

Comportamiento de espumas poliméricas de celda abierta ante diferentes tasas de deformación; Influencia del STF

Tesis para optar por el título de:
Magister en Ingeniería Mecánica

Vincent Steve Robinson Luque
Ingeniero Mecánico, Universidad de los Andes
Diseñador, Universidad de los Andes



Departamento de Ingeniería Mecánica

Bogotá, Colombia

2014

Asesor

Prof. Juan Pablo Casas Rodríguez, Ph.D., M.Sc., Ing. Mec.

Jurado

Alejandro Marañón, M.Sc., Ph.D.

Vadim V. Silberschmidt, DiplEng, PhD, Ceng, FIMechE, FInstP

Dedicatoria

*Es importante que en ocasiones,
el investigador pierda su rumbo
y le dé al fracaso la oportunidad de ocurrir,
aunque sea sólo para indicar la forma
en la que no se deben plantear los experimentos.*

.....

AGRADECIMIENTOS

El autor quisiera expresar sus agradecimientos, en especial al profesor Juan Pablo Casas por la asesoría investigativa y académica durante todo el periodo de la presente investigación. Adicionalmente a los miembros del Grupo de Integridad Estructural encabezados por el profesor Alejandro Marañón y sus estudiantes de doctorado Camilo Hernández y Mario Buchely, quienes con sus conocimientos en el área fueron un gran apoyo en puntos cruciales del trabajo.

Por último, a mis padres y amigos quienes fueron un soporte vital para la culminación y realización del postgrado. Gracias a todas las personas que de una forma indirecta me apoyaron para que la presente tesis de maestría fuera posible.

CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	OBJETIVO DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2	Revisión Bibliográfica	4
2.1	SHEAR THICKENING FLUID (STF).....	4
2.2	ESPUMAS POLIMÉRICAS DE CELDA ABIERTA.....	6
2.3	ESPUMAS DE CELDA ABIERTA RELLENAS CON FLUIDO (FFOCF)	10
2.4	ONDAS DE CHOQUE (EXPLOSIONES)	13
2.5	HIDROCÓDIGOS	15
2.6	MODELOS COMPUTACIONALES	17
2.7	DESARROLLO DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	20
2.7.1	<i>Ecuación de Estado</i>	21
2.7.2	<i>Modelo Constitutivo</i>	24
2.8	TRABAJO PREVIO REALIZADO EN LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES	26
2.9	RESUMEN.....	28
3	Péndulo balístico.....	29
3.1	DISEÑO DEL PÉNDULO	31
3.1.1	<i>Cálculos analíticos</i>	31
3.1.2	<i>Modelo computacional</i>	35
3.2	DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES.....	38
3.2.1	<i>Estructura de soporte</i>	38
3.2.2	<i>Componentes del péndulo</i>	40
3.3	VARIABLES DE EXPERIMENTACIÓN.....	41
3.4	MEDICIÓN E INSTRUMENTACIÓN	42
3.4.1	<i>Sensor de desplazamiento óptico (Sistema de medición principal)</i>	42
3.4.2	<i>Adquisición de datos</i>	43
3.4.3	<i>Registro en video (Sistema de medición secundario)</i>	44
3.5	RESUMEN.....	44
4	Metodología	45
4.1	PRUEBAS CUASISTÁTICAS.....	45
4.1.1	<i>Compresión uniaxial</i>	45
4.1.2	<i>Compresión uniaxial confinada</i>	46
4.1.3	<i>Cortante simple</i>	46
4.2	PRUEBAS DINÁMICAS	47
4.2.1	<i>Montaje de calibración</i>	47
4.2.2	<i>Montaje de pruebas para espumas con y sin STF</i>	48
4.3	MODELAJE COMPUTACIONAL	49
4.3.1	<i>Calibración</i>	49
4.3.2	<i>Modelo del sándwich</i>	52

4.4	RESUMEN.....	54
5	Análisis y resultados.....	55
5.1	PRUEBAS EXPERIMENTALES	55
5.1.1	<i>Compresión uniaxial sin confinar</i>	55
5.1.2	<i>Compresión uniaxial confinada</i>	57
5.1.3	<i>Cortante simple</i>	58
5.1.4	<i>Experimentación dinámica</i>	59
5.2	PROCEDIMIENTO NUMÉRICO	61
5.2.1	<i>Tamaño del entorno</i>	61
5.2.2	<i>Tamaño de la malla</i>	62
5.2.3	<i>Posición del detonador</i>	63
5.2.4	<i>Modelo de la espuma de poliuretano</i>	63
5.2.5	<i>Modelo de la espuma de poliuretano rellena de STF</i>	64
5.2.6	<i>Tasa de deformación</i>	65
5.2.7	<i>Deflexión del punto medio</i>	65
5.2.8	<i>Impulso transmitido</i>	66
5.3	RESUMEN.....	68
6	Conclusiones.....	69
7	Trabajo futuro.....	70
	Referencias bibliográficas	71
	Apéndice A.....	74

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Representación gráfica del efecto de la fuerza cuando a) no se tiene protector y b) cuando se tiene protector [11].	2
Figura 2: Construcción tradicional de un casco de motocicleta [12].	2
Figura 3: Clasificación de los fluidos en función de la relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo cortante.	4
Figura 4: Resultados experimentales de reología en estado estable de STF compuesto por PMMA-PEG a diferentes fracciones de volumen [14].	5
Figura 5: Datos obtenidos por medio de la SHPB para una fracción de volumen de 54% presentados como a) curva esfuerzo-deformación y b) curva esfuerzo-tasa de deformación en la carga [16].	6
Figura 6: Microestructura de una espuma de aluminio de (a) celdas abiertas [21] y de (b) celdas cerradas [22].	7
Figura 7: Curvas esfuerzo-deformación para un sólido elástico y una espuma desarrollada con el mismo material [2].	7
Figura 8: Curva de esfuerzo-deformación esquemática para espumas elastoméricas [2].	8
Figura 9: Curva esfuerzo-deformación de espumas de poliuretano ante cargas uniaxiales [3].	8
Figura 10: Descripción esquemática de la prueba para (a) suelta, (b) espuma fija A, (c) espuma fija B y (d) espuma fija C [3].	9
Figura 11: Descripción esquemática de la (a) configuración 1 y la (b) configuración 2 [23].	10
Figura 12: Comparación entre el esfuerzo y la deformación para a) espuma sin llenar y con etilenglicol para diferentes tasas de deformación y para b) espuma con etilenglicol y STF para diferentes tasas de deformación [18].	11
Figura 13: Comparación de la respuesta al impacto de espumas rellenas con STF y rellenas con glicerol para diferentes energías por unidad de volumen [18].	11
Figura 14: Curva esfuerzo deformación para espumas rellenas con STF a diferentes condiciones de carga [18].	12
Figura 15: Imágenes capturadas con una cámara de alta velocidad para las diferentes pruebas [18].	12
Figura 16: Perfil de una onda de choque para (a) para el impacto en una placa y (b) una explosión en función de la posición [13].	13
Figura 17: Perfil de una onda de choque (a) ideal y (b) "genérica" para el impacto en una placa en función del tiempo [13].	14
Figura 18: Perfil de onda de choque de (a) berilio (metal) y (b) carburo de silicio para el impacto en una placa en función del tiempo[13].	14
Figura 19: Progreso del pulso de choque a través del material [13].	15
Figura 20: Simulación de un paquete de protección personal sometida a una carga de 40 gr de TNT [26].	15
Figura 21: Enmallado del método de (a) Lagrange y (b) Euler [25].	16
Figura 22: FEA dinámico del impacto de un cubo de 100mm de EPS 35 a 5m/s (a) Curva esfuerzo deformación y (b) contorno de la deformación plástica a los 10 ms cuando la deformación total fue de 0.43 [29].	18
Figura 23: (a) Modelo de ¼ de simetría de un cubo de espuma después de 2.4 ms con el contorno de la componente vertical del esfuerzo compresivo. (b) Predicción de las curvas esfuerzo deformación por compresión adquiridas mediante FEA estándar (línea sólida) y FEA dinámica [29].	18
Figura 24: (a) montaje físico de la prueba IFD, ½ muestra comprimida al 50% de la altura inicial; (b) Grafica de elongación de la prueba IFD para ½ muestra, simulada en ABAQUS comprimido al 50% de la altura inicial [32].	20

Figura 25: Modelo utilizado para capturar los efectos de una onda de choque de la suspensión en mesoescala [35].....	20
Figura 26: (a) Representación esquemática de una pistola de gas ligera de una etapa [13]. (b) Configuración experimental de un impacto con una pistola de gas para determinar la ecuación de estado [13].	22
Figura 27: Ejemplo de la gráfica velocidad de particular vs velocidad de choque [13].	23
Figura 28: Modelo P- α	24
Figura 29: Comportamiento reologico del STF (70 wt% SiO ₂ / 30 wt% PEG) desarrollado en el laboratorio [45].	27
Figura 30: Micrografía de los especímenes (a), (c) sin STF y (b), (d) con STF a diferentes escalas [45]	27
Figura 31: Péndulo balístico convencional desarrollado por BISRU [46].....	29
Figura 32: Movimiento actual de la placa (85 μ s por cuadro) [48].....	30
Figura 33: Fotografía de las capas en ordenadas de manera secuencial con respecto a la distancia de separación (s) [49]	30
Figura 34: Sección transversal de las estructuras tipo sándwich con una densidad de núcleo de (a) 60 kg/m ³ y (b) 200 kg/m ³ para 4 diferentes impulsos.	31
Figura 35: Esquemático del comportamiento del péndulo.	32
Figura 36: Recorrido en h del péndulo en función del impulso generado para diferentes masas (m en kg)) de péndulo.	33
Figura 37: Vista lateral del CAD del péndulo	34
Figura 38: Recorrido horizontal del péndulo en función del impulso generado para diferentes alturas (en cm).	34
Figura 39: Acercamiento del recorrido en horizontal para impulsos de 0 a 4,5 Ns para diferentes alturas. ...	35
Figura 40: Geometría del modelo computacional realizado (unidades en mm).	36
Figura 41: Velocidad horizontal del péndulo en función del tiempo	37
Figura 42: Distribución de presiones al interior del tubo de choque justo antes de hacer contacto con el péndulo para un diámetro de (a) 48 mm, (b) 64 mm, (c) 88 mm y (d) 106 mm.	37
Figura 43: Vista isométrica del soporte del péndulo.....	38
Figura 44: Representación esquemática del ángulo formado por los cables de acero (Vista frontal)	38
Figura 45: Vista superior y frontal de la ubicación del péndulo balístico en el dispositivo de medición de explosión de minas antipersonales	39
Figura 46: Vista isométrica del CAD del péndulo balístico	40
Figura 47: Representación esquemática del péndulo.	41
Figura 48: Sensor óptico de desplazamiento OADM de BAUMER.....	43
Figura 49: Módulo de adquisición de datos NI 9219	43
Figura 50: Estación de medición.....	44
Figura 51: Ubicación del sensor y de la cinta métrica	44
Figura 52: Fotografía de la prueba de compresión	46
Figura 53: Esquemático de la prueba de compresión confinada.	46
Figura 54: Fotografía de la prueba de cortante.....	47
Figura 55. Esquemático del montaje de calibración.....	48
Figura 56. Esquemático del montaje de pruebas	49
Figura 57: Configuración para el modelo de calibración	50
Figura 58: Tamaños de entorno trabajados (a) pequeño, (b) mediano y (c) grande	51
Figura 59: Disposiciones del punto de detonación.....	52

Figura 60: Configuración del modelo del sándwich para el núcleo de espuma de poliuretano (a) con conector y (b) sin conector.	52
Figura 61: Regresión lineal de up vs Us para los valores experimentales adquiridos en [59] para el STF.	53
Figura 62: Distribución del modelo de espuma de poliuretano con y sin relleno de STF para (a) la configuración 1 con la nomenclatura de color y (b) las otras configuraciones.	54
Figura 63: Curva esfuerzo deformación para espuma de poliuretano (a) sin relleno y (b) con relleno de STF.55	
Figura 64: Esfuerzo de fluencia de la espuma de poliuretano con y sin impregnar. Además se incluyen los valores obtenidos por [60] para una espuma de poliuretano con una densidad de 27kg/m^3 a diferentes tasas de deformación.	56
Figura 65: Comparación entre la espuma de poliuretano con relleno y sin relleno de STF para tres tasas de deformación diferentes vista (a) completa y (b) zoom.	56
Figura 66: Módulo de Young para espumas de poliuretano con y sin relleno de STF.	57
Figura 67: Curva esfuerzo deformación para la espuma de poliuretano (a) con STF y (b) sin STF para condiciones confinadas	57
Figura 68: Modulo cortante para la espuma de poliuretano con y sin impregnar.	58
Figura 69: Impulso normalizado a diferentes SD para la calibración y los paneles tipo sándwich.	59
Figura 70: Sensibilidad del péndulo balístico	60
Figura 71: Medición de la deflexión del punto medio para la espuma de poliuretano (a) sin relleno y (b) con relleno de STF para una DS de 200mm.	60
Figura 72: Deflexión del punto medio para diferentes DS para los núcleos utilizados en los paneles tipo sándwich.	61
Figura 73: Velocidad del péndulo balístico según el tamaño del entorno	61
Figura 74: Distribución de presiones en diferentes tiempos de simulación para el entorno mediano.	62
Figura 75: Perfiles de presión para una malla de (a) 2mm y (b) 0.2mm.	63
Figura 76: Datos de compresión uniaxial para la tasa de deformación de 0.32s^{-1} comparada contra el ajuste de curva realizada con el modelo Ogden Hyperfoam	64
Figura 77: Deflexión del punto medio para las configuraciones trabajadas.	65
Figura 78: Tasa de deformación plástica efectiva para diferentes DS.	65
Figura 79: Señal de desplazamiento en el tiempo de la placa posterior para el núcleo de espuma sin impregnar a una DS de 150mm obtenida a través del software Autodyn.	66
Figura 80: Deflexión del punto medio para diferentes DS para los datos experimentales y los modelos computacionales	66
Figura 81: Impulso transmitido cuando el tubo de choque y las barras espaciadoras se encuentran conectadas o desconectadas.	67
Figura 82: Imágenes capturadas de la simulación para (a) la condición inicial y (b) después de 2ms.	67
Figura 83: Impulso normalizados a diferentes DS para los datos experimentales y los modelos computacionales	68

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre el método de Euler y el método de Lagrange [28].....	17
Tabla 2: Parámetros requeridos por AUTODYN para la elaboración del modelo de Shock	22
Tabla 3. Parámetros requeridos por AUTODYN para la realización del modelo de Johnson-Cook.....	25
Tabla 4. Parámetros requeridos por AUTODYN para la realización del modelo Hyperfoam de 2 ^{do} orden.	26
Tabla 5: Materiales utilizados en las simulaciones.....	35
Tabla 6: Parámetros de las simulaciones	36
Tabla 7: Cuadro de pruebas para compresión.....	45
Tabla 8: Cuadro de pruebas para cortante.....	47
Tabla 9. Parámetros para las pruebas de calibración.....	48
Tabla 10. Parámetros para las pruebas de espuma con y sin relleno de STF.	49
Tabla 11: Variables para la ecuación de estado de Hiperelasticidad	53
Tabla 12: Resultados del impulso transmitido en función de la posición del detonador.....	63
Tabla 13: Parámetros para el modelo Ogden Hyperfoam.....	64

RESUMEN

La respuesta de espumas elastoméricas de celda abierta de poliuretano rellenas con una suspensión monodispersa de nanopartículas de sílice bajo compresión cuasi estática y dinámica es experimental y computacional evaluada. Los ensayos cuasi estáticos (10^{-3} - 10^{-1} s $^{-1}$) fueron desarrollados en una máquina de ensayo INSTRON, mientras que las pruebas dinámicas (10^4 s $^{-1}$) se desarrollaron en un péndulo balístico con una carga explosiva de 0.8g de PETN. Con los datos obtenidos se desarrolló un enfoque computacional del modelo numérico de la espuma con y sin relleno para eventos explosivos utilizando el software ANSYS Autodyn. Los resultados presentan que para cargas de compresión cuasi estáticas las espumas evaluadas presentan dependencia a la tasa de deformación debido a que el fluido dentro de ella trata de escapar a través de los poros de las celdas. Sin embargo, a medida que la tasa de deformación aumenta, la viscosidad del fluido espesante por cortante (STF) es lo suficientemente alta para poder despreciar la contribución de la espuma a la respuesta al esfuerzo. Para condiciones dinámicas se encontró que la espuma rellena de STF puede atenuar hasta un 35% más de energía en comparación con la espuma de poliuretano a bajas distancia de separación del explosivo (DS=100 mm). Sin embargo, al aumentar la distancia de separación al explosivo dicha diferencia disminuye hasta encontrar que a DS de 200 mm la espuma sin rellenar absorbe 16% más energía que la espuma rellena con STF.

ABSTRACT

The response of elastomeric polyurethane open celled foam filled with a monodisperse suspension of silica nanoparticles under quasistatic and dynamic compression is experimentally and computationally evaluated. Quasistatic tests (10^{-3} - 10^{-1} s $^{-1}$) were developed in an INSTRON testing machine, while the dynamic tests (10^4 s $^{-1}$) were carried out in a Ballistic Pendulum with an explosive charge of 0.8g PETN. With the obtained data a computational approach of the filled and unfilled foam numerical model for blast events is developed using the software ANSYS Autodyn. The results present that under compressive quasistatic load the foam exhibit strain rate dependence as the fluid within it try to escape through the cell pores. However as the strain rate raises the Shear Thickening Fluid (STF) viscosity is large enough that the contribution of the foam to the stress response can be neglected. For dynamic conditions the influence of STF over the impulse generated by an explosive charge shows that STF filled foam can attenuate up to 35% more energy in comparison to the PU foam at low Stand-off Distances (SoD=100mm). However, by increasing the SoD that difference decrease obtaining that at SoD of 200 mm the unfilled foam absorbs 16% more energy than the STF filled foam.

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de desarrollar diferentes materiales y mecanismos con la capacidad de absorber energía ha cobrado gran interés en las últimas décadas debido a la cantidad de aplicaciones que estos presentan, especialmente en la protección tanto personal como de infraestructuras contra fenómenos dinámicos tales *i.e.* impactos y explosiones. Entre los materiales más utilizados para este fin se encuentran las espumas, las cuales gracias al comportamiento de su microestructura bajo cargas compresivas, pueden mantener un esfuerzo constante en un rango amplio de deformaciones; este fenómeno resulta ser de gran utilidad para absorber energía, además de funcionar como amortiguador atenuando las aceleraciones a un cuerpo. Sin embargo, aunque las espumas presentan un gran potencial para absorber energía (entre otras aplicaciones), existen numerosos escenarios prácticos en los que el espesor, el peso y/o la rigidez de la espuma limita la implementación de espumas rígidas en estructuras tipo sándwich [1-3].

Generalmente, una espuma de celda abierta se encuentra rellena de aire, el cual no genera una contribución considerable al comportamiento mecánico de la misma frente a diferentes cargas [2]. Por esta razón diferentes autores han propuesto rellenar estas espumas con diferentes fluidos (Newtonianos y No-Newtonianos) [4,5] con el fin de mejorar la respuesta dinámica de este tipo de materiales; además, este relleno líquido también permite lograr un mayor control sobre la disipación de energía por medio del fluido viscoso ante una deformación (compresiva) mucho menor.

Uno de los fluidos que ha generado mayor interés para este tipo de aplicaciones es el STF (Shear Thickening Fluid) debido principalmente a su habilidad para cambiar de un fluido con una baja viscosidad a uno de alta viscosidad llegando a un estado casi sólido. Es precisamente este comportamiento el que hace que este tipo de materiales sea deseado en las aplicaciones de absorción de energía [5-7], pues mientras éstos se encuentran en condiciones normales (baja viscosidad) le permiten al usuario tener una gran movilidad y flexibilidad, pero cuando el STF se ve sometido a impactos (altos esfuerzos) empieza la transición de su viscosidad, por medio de la cual se absorbe parte de la energía generada por el impacto y ayuda a desviar la energía restante. Además, mediante la selección de los diferentes componentes del STF, *i.e.* el tipo y el tamaño de las partículas o el disolvente utilizado es posible seleccionar y sintonizar el inicio de la transición de la viscosidad para una aplicación específica [7].

Sin embargo, la efectividad en la absorción de energía por parte de este tipo de fluidos depende de la interacción que presenta con la geometría que lo contiene (o en la que se encuentra impregnado). Las espumas elásticas de celda abierta son uno de los mejores contenedores para el STF debido a que el daño en su microestructura es mínimo incluso cuando éstas se encuentran sometidas a grandes deformaciones, motivo por el cual su capacidad para contener un fluido no se ve afectada de manera significativa. Además, tanto la espuma elástica como el STF poseen un proceso altamente reversible motivo por el cual pueden ser implementados en aplicaciones de cargas cíclicas [1].

1.1 Antecedentes

Entre las aplicaciones encontradas se destacan aquellas donde el confort y la flexibilidad son factores determinantes como lo es el caso de los equipos de protección personal, *i.e.* protectores de cadera (Figura 1) y cascos para bicicletas y motocicletas (Figura 2). Los protectores de cadera permiten absorber parte de la energía generada por el impacto de la caída y de esta forma reducir la fuerza aplicada al hueso (fémur), disminuyendo el número de fracturas de cadera entre el 69-83%[8]. La fractura de cadera es uno de las lesiones más graves, pues se estima que alrededor del 20% de las personas que sufren este tipo de fractura

mueren dentro del año de la lesión y que sólo una de cada cuatro personas llega a recuperarse totalmente [9]. Estudios previos han demostrado que la implementación del STF en dichas aplicaciones es capaz de reducir la carga femoral alrededor de un 50% de la carga total disipando la energía de impacto a través de dicho fluido [10].

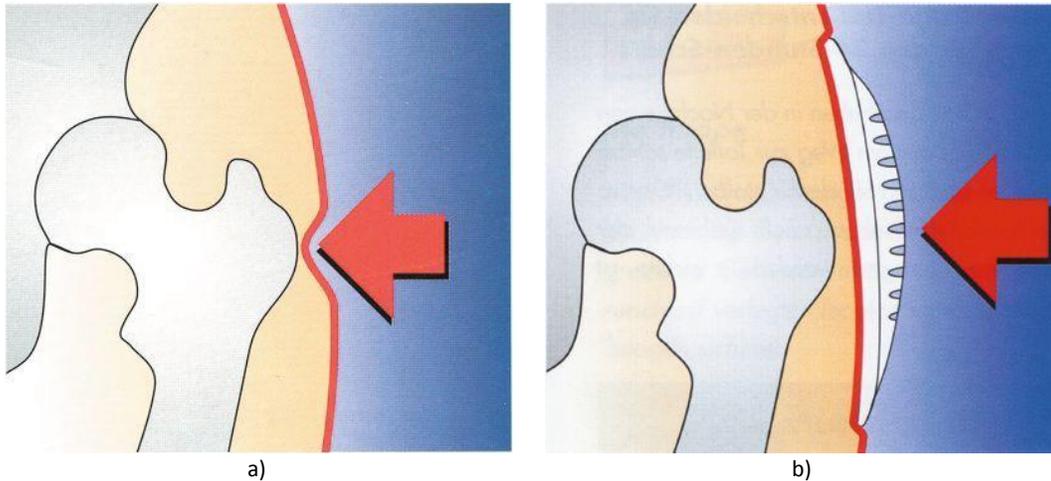


Figura 1: Representación gráfica del efecto de la fuerza cuando a) no se tiene protector y b) cuando se tiene protector [11].

Por otro lado, en el caso de los cascos el equipo de protección no sólo debe absorber energía, es indispensable además garantizar que las aceleraciones que la cabeza experimenta durante el impacto no excedan las permitidas por los diferentes estándares con el fin de evitar daño cerebral. En la actualidad las espumas son implementadas en el desarrollo de cascos como material de absorción de energía gracias al comportamiento tipo meseta que presentan ante cargas compresivas. Sin embargo, para cumplir con los estándares de absorción de energía y de aceleración del cráneo, estas son gruesas y elaboradas con materiales inelásticos, obteniendo como resultado cascos incómodos y útiles únicamente en casos de un único impacto [1]. Entre las ventajas de implementar el compuesto de espuma-STF se encuentra que éste puede ser diseñado para obtener la respuesta dinámica deseada mientras brinda una mejor eficiencia en cuanto al costo, el peso y el espesor. Además presenta la habilidad para mejorar la protección ante múltiples impactos, la cual es una característica esencial, ya que los accidentes reales a menudo implican múltiples impactos consecutivos [1].

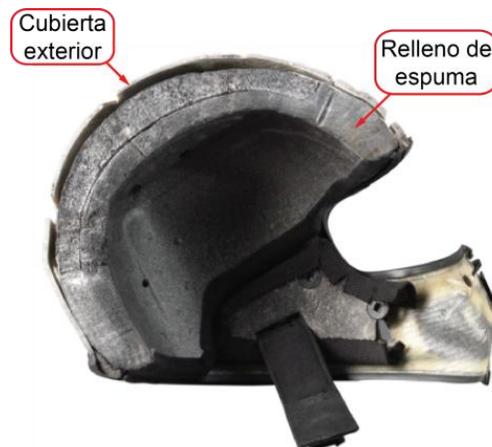


Figura 2: Construcción tradicional de un casco de motocicleta [12].

Finalmente, es necesario entender como el comportamiento de los materiales frente a cargas que cambian rápidamente en el tiempo difiere de manera significativa del que observa cuando el mismo material se ve sometido a condiciones de carga cuasi-estáticas. Esta diferencia se debe a que tanto la inercia como la cinética interna del material se convierten en factores importantes a tasas de deformación de $10s^{-1}$ aproximadamente. En el caso de una carga aplicada durante un tiempo muy corto, ésta no es transmitida a todo el material de forma uniforme, por lo que mientras una parte del cuerpo se encuentra sujeta a una serie de esfuerzos la otra parte aún no. En otras palabras, los esfuerzos se encuentran viajando a través del cuerpo a una velocidad establecida; a este fenómeno se le conoce como onda. Las deformaciones dinámicas involucran (en la mayoría de los casos) propagaciones de onda, mientras que las deformaciones cuasi-estáticas pueden ser consideradas como una secuencia de estados de equilibrio y pueden ser desarrolladas por las ecuaciones de la mecánica de materiales [13]. Es por esta razón que los materiales, al verse sometidos a una carga dinámica *i.e.* la que proviene de un impacto, se comportan de diversas maneras.

De esta forma, el poder entender y modelar el comportamiento de los materiales frente a las distintas cargas dinámicas resulta ser de gran utilidad para el diseño, desarrollo e implementación de diferentes métodos en la mecánica estructural de los objetos. Para esto se disponen de diferentes herramientas computacionales las cuales permiten modelar estos sistemas con el fin de reducir los costos asociados a la experimentación. Entre las diferentes herramientas computacionales se encuentran los Hidrocódigos los cuales permiten resolver problemas de deformación dinámica que no se pueden resolver de forma analítica [13]. Para lograr mejores resultados con el uso de estos códigos es conveniente entender el funcionamiento de los mismos así como de los métodos que lo componen. Entre dichos métodos se destacan los métodos de Lagrange, Euler, ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) y SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

1.2 *Objetivo de investigación*

Este proyecto de investigación parte de la creciente necesidad de generar sistemas de protección ante cargas dinámicas (*i.e.* impactos y explosiones), tanto para infraestructura como para la población civil y militar. Por tal motivo, el presente proyecto de investigación busca evaluar la influencia del STF en la respuesta de espumas elastoméricas de poliuretano de celda abierta contra cargas explosivas en función del impulso transmitido y la deflexión generada en la parte posterior.

1.3 *Objetivos específicos*

Para evaluar el desempeño de las espumas poliméricas rellenas de STF es necesario estudiar el comportamiento de las mismas cuando no están impregnadas con el fluido dilatante; por tal motivo en este proyecto se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el nivel de absorción de energía de espumas poliméricas de celda abierta con y sin relleno de STF frente diferentes condiciones de carga.
- Desarrollar pruebas dinámicas a través de la implementación del péndulo balístico
- Desarrollar pruebas cuasi-estáticas para caracterizar los materiales estudiados.
- Estudiar y analizar diferentes modelos que permitan describir el comportamiento del compuesto utilizado (modelos de constitutivos y modelos de falla).
- Proponer modelos numéricos que describan el comportamiento de la espuma de poliuretano y de la espuma impregnada con STF bajo condiciones de carga explosivas implementando el software ANSYS Autodyn

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se encuentra la revisión bibliográfica elaborada para este proyecto de investigación; entre los temas a tratar se hace mención sobre que es un fluido dilatante (STF), cuál es su comportamiento reológico y por qué dicho comportamiento hace de este material una gran posibilidad para su aplicación en equipos de protección ante eventos dinámicos. Además de esto se presenta el comportamiento de las espumas haciendo énfasis en las espumas elastoméricas de celda abierta ante cargas axiales compresivas mencionando los diferentes mecanismos de absorción de energía que presentan. Posteriormente, se puede encontrar con la revisión desarrollada de los trabajos previos realizados para el análisis de las espumas elastoméricas rellenas de fluidos tanto Newtonianos como No-Newtonianos enfocándose principalmente en su respuesta ante diferentes condiciones de carga. Luego, se presenta la revisión bibliográfica de diferentes modelos computacionales para el modelamiento de espumas poliméricas y para el STF para luego introducir al lector a la teoría de ondas de choque. Por último, se presenta el trabajo previo desarrollado por la Universidad de los Andes en la elaboración del fluido dilatante y de la impregnación de las espumas trabajadas.

2.1 Shear Thickening Fluid (STF)

En el campo de los fluidos se conoce como dilatante o *shear thickening*¹ a aquel fluido cuya viscosidad (η) aumenta de forma proporcional a la tasa de esfuerzos cortantes o de cizallado. Uno de los ejemplos de éste tipo de material son los *shear thickening fluid* (STF), ya que la relación que existe entre el esfuerzo cortante y la tasa/velocidad de corte no es lineal (ver Figura 3). El STF consta principalmente de una suspensión o partículas nanométricas en un fluido, las cuales le darán a éste diferentes propiedades según la forma, la distribución del tamaño, la fracción de volumen, y las interacciones que estas presentan entre sí [1].

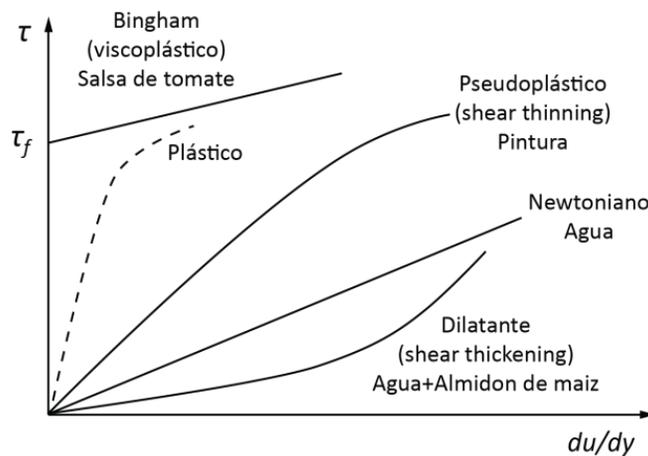


Figura 3: Clasificación de los fluidos en función de la relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo cortante.

El STF se comporta como lubricante a bajas tasas de deformación, pero al verse sometido a un incremento en la velocidad/tasa de cizallamiento su comportamiento cambia y deja de fluir con facilidad, aumentando su viscosidad a partir de un valor crítico (Figura 4), hasta llegar a un comportamiento sólido. Este fenómeno se debe principalmente al comportamiento espesante del STF, el cual, a altas concentraciones (fracciones volumétricas) presenta partículas lo suficientemente densas como para reducir el espacio de separación

¹ La traducción literal de éste término es material espesante a la tasa de corte, sin embargo, en el presente documento se utilizarán las palabras y siglas en ingles para evitar malinterpretaciones.

entre las mismas, incrementando las interacciones que se presentan entre sí. Dawson [1] realizó un resumen de los diferentes estudios que han sido llevados a cabo variando la fracción volumétrica de las partículas en un rango del 10% hasta el 60%, encontrando que en fracciones volumétricas entre el 40% y el 50% aparece el comportamiento dilatante para la mayoría de suspensiones a tasas de deformación relativamente bajas.

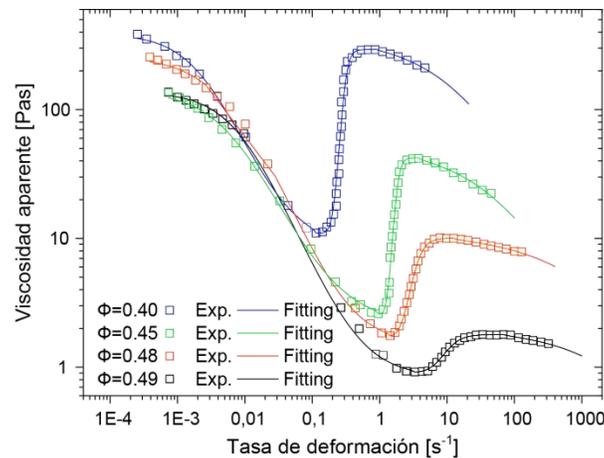


Figura 4: Resultados experimentales de reología en estado estable de STF compuesto por PMMA-PEG² a diferentes fracciones de volumen [14]

En la literatura existen principalmente dos mecanismos para explicar el comportamiento de los STF:

- Teoría del orden-desorden: A medida que se aplica el esfuerzo cortante, las partículas se alinean en capas hexagonales de aglomeraciones paralelas al plano del corte [15], permitiendo ese comportamiento como lubricante. Al alcanzar el esfuerzo crítico, el fluido en el que se encuentran las partículas se vuelve inestable e induce que las partículas se muevan y las capas se desordenen, generando una mayor interacción entre las partículas.
- Teoría de hidro-aglomeraciones (hydrocluster): ésta se fundamenta en un equilibrio entre las fuerzas hidrodinámicas impuestas por el esfuerzo cortante y las fuerzas de la interacción entre las partículas. A bajos esfuerzos la interacción entre las partículas, ya sea de tipo electroestática o Browniana, permite un flujo suave al aproximarse entre sí, lo que resulta en un estado de “baja viscosidad”. A medida que el esfuerzo aumenta, las fuerzas de lubricación entre las partículas crecen hasta llegar al mismo orden de magnitud de las fuerzas inter-particulares [7]. Cuando esto ocurre las partículas se aglomeran a causa de fuerzas hidrodinámicas de lubricación (formando hydroclusters) aumentando de esta forma la viscosidad [7,14].

Por otro lado, Lim *et al* [16] evaluó la respuesta transitoria de un STF con una fracción de volumen del 54% de sílice suspendidas en poli etilenglicol para diferentes tasas de deformación mediante la implementación de una configuración de la *Split Hopkinson Pressure Bar* diseñada previamente [17] para probar fluidos viscosos. Para realizar dicho montaje, el STF es cubierto por una cinta flexible, la cual previene la pérdida de material debido a la gravedad, mientras permite la expansión en dirección radial del fluido. En la Figura 5 a se presentan las curvas esfuerzo-deformación de la muestra para tasas de deformación desde $1800s^{-1}$ hasta $8830s^{-1}$ a partir de las cuales se puede observar que tanto el esfuerzo máximo y como la región de meseta

² PMMA: Polimetilmetacrilato, PEG: Polietilenglicol

aumenta con la tasa de deformación y por lo tanto su capacidad para absorber energía; en este punto es necesario aclarar que la caída en dicha curva no se debe a una falla en el material sino a la culminación de la energía suministrada por la onda de esfuerzos en la SHPB. Por otra parte, en la Figura 5 b presenta la únicamente la porción en la que el material es cargado en función de la tasa de deformación axial, donde la forma de “S” es el resultado de la desaceleración de la carga producto del cambio en las propiedades del material a causa del espesamiento por cortante como se esperaba en un principio gracias a la formación de hydroclusters.

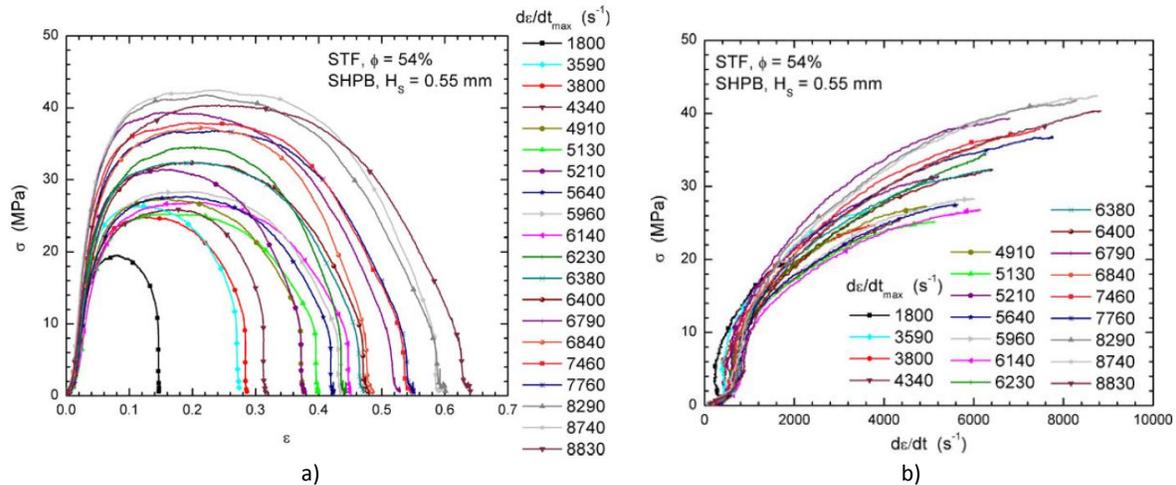


Figura 5: Datos obtenidos por medio de la SHPB para una fracción de volumen de 54% presentados como a) curva esfuerzo-deformación y b) curva esfuerzo-tasa de deformación en la carga [16]

La respuesta reológica a los esfuerzos y la capacidad para absorber energía hace de los STFs uno de los materiales más interesantes para la manufactura de compuestos para protección humana. Además, estos materiales no requieren de un mecanismo externo de activación como si lo requieren los fluidos magneto-reológicos o los electro-reológicos [18]. Diferentes autores han estudiado sobre las distintas aplicaciones de este tipo de materiales, entre estas se destacan el incremento de la resistencia en diversos tejidos contra la penetración y el punzonado [19,20].

En la universidad de los Andes se ha empezado a elaborar STF a partir de partículas de silicio ($\phi=500\text{nm}$) en etilenglicol; este fluido fue caracterizado a partir de curvas reológicas encontrando que con una concentración volumétrica del 58.13% se obtenía el comportamiento deseado similar al que se presenta en la Figura 4.

2.2 Espumas poliméricas de celda abierta

Los materiales porosos o celulares están constituidos por dos fases: una parte sólida y una parte con algún fluido, la cual es generalmente aire o vacío, por lo que la fase sólida o matriz asemeja a una estructura con agujeros o discontinuidades en su interior. Entre esta familia de materiales se destacan los Honeycombs y las espumas. Gibson *et al* [2] presenta una exhaustiva revisión sobre el comportamiento de las espumas, además presenta una serie de modelos que permiten obtener las propiedades de las espumas conociendo la densidad relativa (la razón entre la densidad del material poroso o celular y la densidad del material del cual está hecha en su estado sólido) que estas presentan. Las espumas pueden ser clasificadas como de celda abierta cuando el material se encuentra concentrado en los soportes que forman los bordes de la celda o de

celda cerrada cuando el material también se encuentra en cada pared de la celda, por lo que ningún fluido puede pasar de una celda a otra, a diferencia de las de celda abierta.

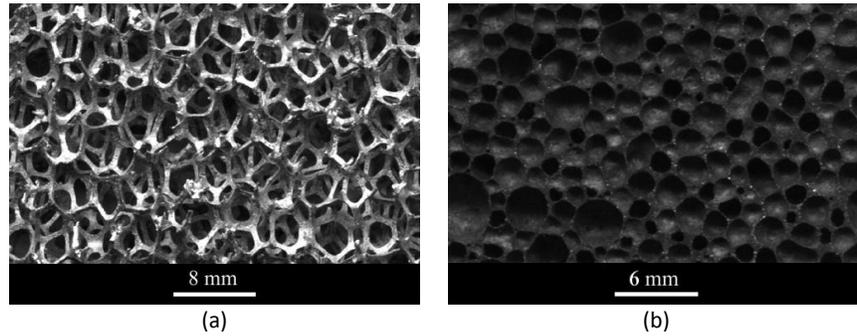


Figura 6: Microestructura de una espuma de aluminio de (a) celdas abiertas [21] y de (b) celdas cerradas [22]. Debido al comportamiento de su microestructura las espumas tienen la capacidad de absorber una mayor cantidad de energía a diferencia de su contraparte sólida, pues ante una misma condición de esfuerzos las espumas presentan un rango de deformaciones mucho más amplio (Figura 7).



Figura 7: Curvas esfuerzo-deformación para un sólido elástico y una espuma desarrollada con el mismo material [2].

En la Figura 8 se presenta un esquemático de la curva de esfuerzo-deformación para espumas elastoméricas en el cual se puede apreciar un régimen elástico asociado a la flexión de la pared de la celda, este régimen presenta una pendiente E^* . Posteriormente se presenta una larga meseta la cual inicia a un esfuerzo σ_{el}^* conocido como esfuerzo de colapsamiento elástico, el cual, como su nombre sugiere, se encuentra asociado al colapso de la estructura de las celdas. Este valor de esfuerzo es de particular importancia pues es durante esta región donde la mayor cantidad de energía es absorbida.

Finalmente a medida que la espuma colapsa las paredes opuestas de la celda se acercan cada vez más hasta que se tocan. A esta deformación, usualmente denominada como deformación de densificación (ϵ_D) el esfuerzo crece rápidamente acercándose al módulo de elasticidad del material sólido E_s .

Por otro lado, cuando una espuma de celda abierta se encuentra sometida a altas tasas de deformación efectos inerciales aumentan la resistencia a la compresión de la misma. Gibson *et al* [2] incluye en su texto un resumen de la investigación de diferentes autores, en el que se comenta sobre los tres diferentes factores dinámicos (localización, micro-inercia y densificación) que contribuyen al incremento de dicha resistencia. La localización es la concentración de la deformación en un instante determinado en una placa

delgada, y es usualmente adyacente a la cara en la que se aplica la carga. Ésta resulta ser de particular importancia cuando se considera la micro-inercia, la cual está asociada a la inercia del movimiento tanto rotacional como lateral de las paredes de la celda cuando ésta se pandea. La micro-inercia tiende a suprimir los modos de pandeo más comunes/compatibles aumentando el esfuerzo de aplastamiento y propagando el frente de onda aplastante. Dicha propagación conlleva a la densificando la espuma la que aumenta el esfuerzo de manera dramática a medida que las paredes de la celda se juntan.

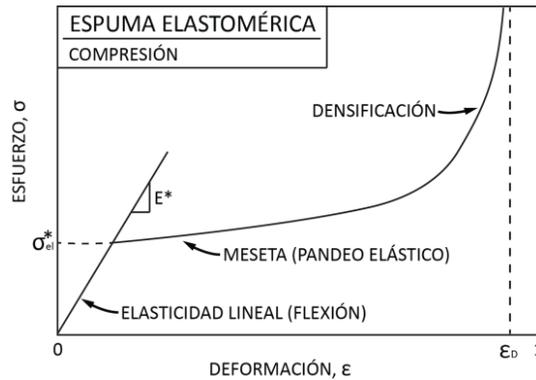


Figura 8: Curva de esfuerzo-deformación esquemática para espumas elastoméricas [2].

Las espumas presentan diferentes mecanismos de absorción de energía, algunos de los cuales se encuentran relacionados a la deformación elástica, plástica o frágil de las paredes de la celda y a la compresión o flujo del fluido que se encuentra al interior de las mismas. Para el caso particular de las espumas elastoméricas, el esfuerzo de meseta es determinado por el pandeo elástico de las celdas, por lo que gran parte del trabajo ejercido almacenado durante la carga es liberado nuevamente durante la descarga. Sin embargo, debido a que dichas espumas presentan amortiguamiento o histéresis (Figura 9) no todo el trabajo realizado es recuperado pues parte de éste es disipado en forma de calor. Por otro lado, en las espumas plásticas y las frágiles el trabajo realizado durante la meseta de la curva esfuerzo-deformación es completamente disipado por deformación plástica, por fractura o por fricción entre los fragmentos destrozados de las paredes de las celdas.

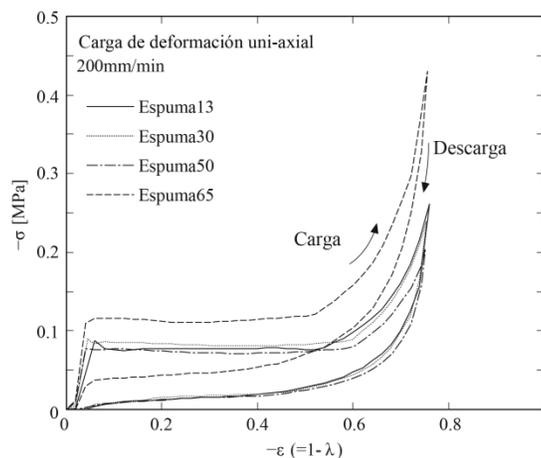


Figura 9: Curva esfuerzo-deformación de espumas de poliuretano ante cargas uniaxiales [3].

La energía por unidad de volumen necesaria para comprimir una espuma de celda abierta hasta una deformación específica es simplemente el área bajo la curva de esfuerzo-deformación hasta dicha

deformación, y los mecanismos de absorción se encuentran relacionados al pandeo elástico, deformación plástica y aplastamiento frágil en las paredes de la celda. La cantidad de energía absorbida dependerá del material, la densidad de la espuma, la tasa de deformación $\dot{\epsilon}$ y la temperatura T a la cual se encuentre sometido [2].

Por ejemplo, Kitagawa *et al* [3] realiza un estudio para investigar los efectos de 4 diferentes espumas porosas de poliuretano en la atenuación de las ondas de choque, utilizando experimentos de choques en tubos para analizar como la interacción de la onda con la espuma afecta el comportamiento de los perfiles de presión. Cada una de las espumas al interior del tubo fue estudiada bajo 4 condiciones diferentes (Figura 10): suelta (solo pegada a la pared final del tubo), espuma fija A (pegada a todas las paredes del tubo dejando suelta solo la cara de la espuma que va a ser impactada), espuma fija B (pegada a los costados del tubo dejando una distancia de separación de 127 mm entre la espuma y la pared final del tubo) y la espuma fija C (pegada a los costados del tubo dejando una distancia de separación de 932 mm entre la espuma y la pared final del tubo). A partir de esto se encontró que para el caso de la espuma fija C la presión disminuía entre un 18 y un 65% de la presión de choque incidente, donde esta variación de porcentajes depende principalmente de la longitud de la espuma.

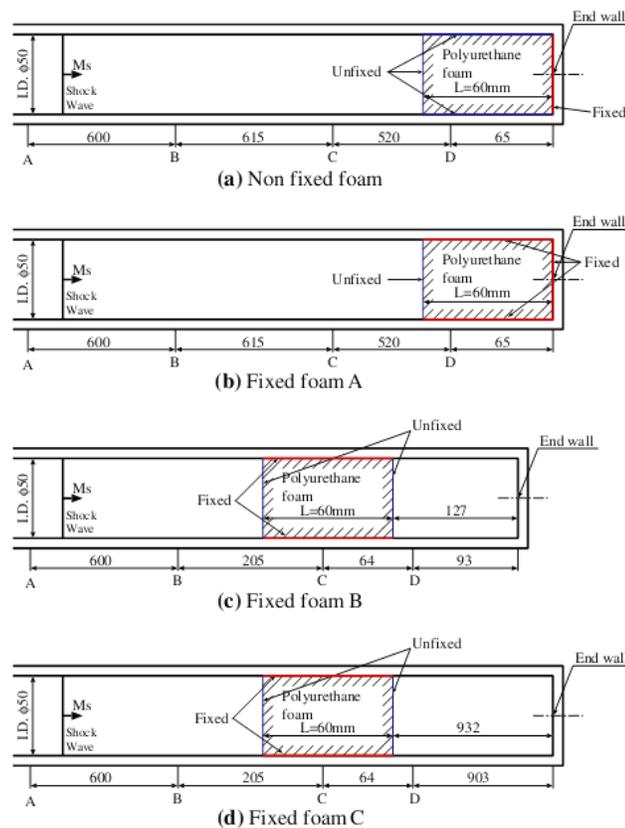


Figura 10: Descripción esquemática de la prueba para (a) suelta, (b) espuma fija A, (c) espuma fija B y (d) espuma fija C [3]

Gardner *et al* [23] estudia de manera experimental la respuesta de compuestos tipo sándwich elaborados con un núcleo graduado y una capa de poliurea ante una carga explosiva. Para este caso dos configuraciones diferentes del núcleo son implementadas, en las cuales únicamente la posición de la espuma de poliuretano es modificada (Figura 11). A partir de esto se encontró que al colocar la capa de poliurea después de la

espuma (configuración 2) mejoraba la resistencia del compuesto tipo sándwich mejorando su integridad estructural. Además se observó que al estar ubicada la capa de poliurea después de la espuma la capacidad de absorber energía aumenta atenuando el efecto de la explosión; por el contrario ubicar la capa de poliurea antes de la espuma amplifica el efecto destructivo de la onda de choque promoviendo la falla del compuesto.

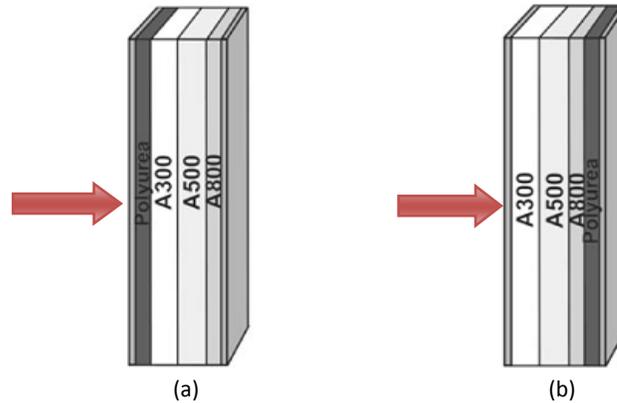


Figura 11: Descripción esquemática de la (a) configuración 1 y la (b) configuración 2 [23].

Petel *et al* [24] realiza un estudio para determinar si la distribución de las capas de 2 materiales (acero y una espuma polimérica) conservando tanto la masa como el espesor total de ambos puede ser usado para maximizar la habilidad que estos materiales poseen para atenuar la onda de choque, encontrando que la impedancia entre los materiales puede amplificar o atenuar los efectos producidos por una onda de choque dependiendo de la combinación utilizada. Para este caso en específico se encontró que a mayor número de capas mayor cantidad de energía es disipada, reduciendo hasta en un 80% el impulso generado.

2.3 Espumas de celda abierta rellenas con fluido (FFOCF³)

Previamente se habló sobre algunos de los mecanismos que poseen las espumas para absorber energía, sin embargo, cuando éstas se rellenan con algún fluido sus propiedades se ven afectadas por la presencia de este, motivo por el cual, al comprimir una espuma dicho fluido será desplazado hacia el exterior de la misma. Para llevar a cabo este desplazamiento parte del trabajo desarrollado durante la carga compresiva será usado para este fin y entre mayor sea la tasa de deformación a la que se ve sometida la espuma mayor será el trabajo requerido para desplazar el fluido, aumentando de esta manera la capacidad para absorber energía con menores deformaciones, al igual que una dependencia a la tasa de deformación.

Diferentes estudios han sido desarrollados con el ánimo de conocer y estudiar el comportamiento de espumas elastoméricas de celda abierta al ser rellenas con fluidos tanto newtonianos [4,7,1,18] como no newtonianos [7,5,1,18]. Entre dichos estudios resalta el de Bettin [18] quien realizó una detallada caracterización de espumas de poliuretano impregnadas con glicerol (newtoniano) y STF (no newtoniano) de sílice con una fracción de volumen del 60%. En la Figura 12 se evidencia que al llenar las celdas de las espumas con un fluido su comportamiento ante cargas compresivas se ve afectado, incrementando los esfuerzos soportados a medida que la tasa de deformación aumenta. En el caso específico del STF (Figura 12 b) se puede apreciar como los esfuerzos encontrados experimentalmente son mucho mayores a los obtenidos con el glicerol debido al endurecimiento de la espuma por la viscosidad del fluido.

³ Fluid-Filled Open Cell Foam

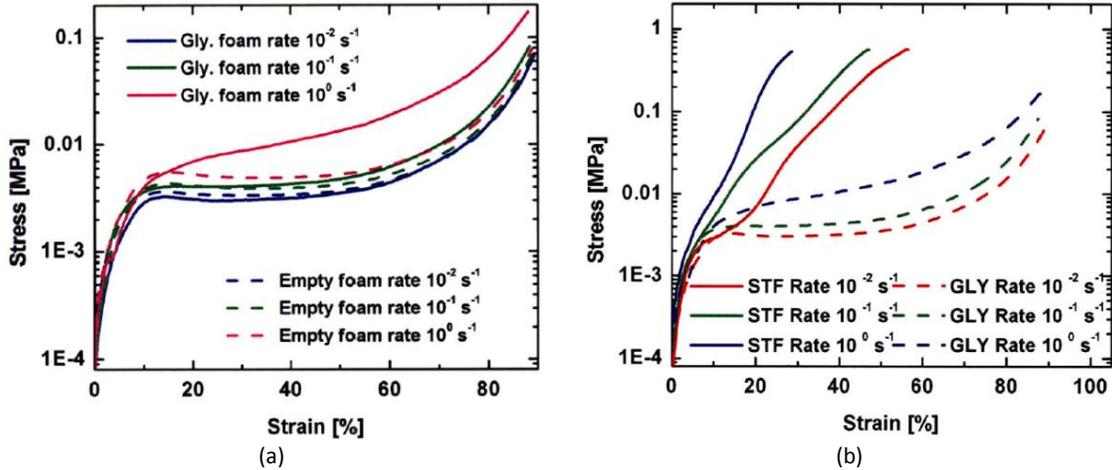


Figura 12: Comparación entre el esfuerzo y la deformación para a) espuma sin llenar y con etilenglicol para diferentes tasas de deformación y para b) espuma con etilenglicol y STF para diferentes tasas de deformación [18].

Por otro lado, en la Figura 13 se evidencia la diferencia entre la espuma rellena de glicerol y de STF cuando son sometidas a impactos de baja velocidad, siendo esta última la que más carga soporta. Esto se debe a la respuesta dinámica del STF la cual, como se mencionó anteriormente varía drásticamente a medida que la tasa de deformación aumenta.

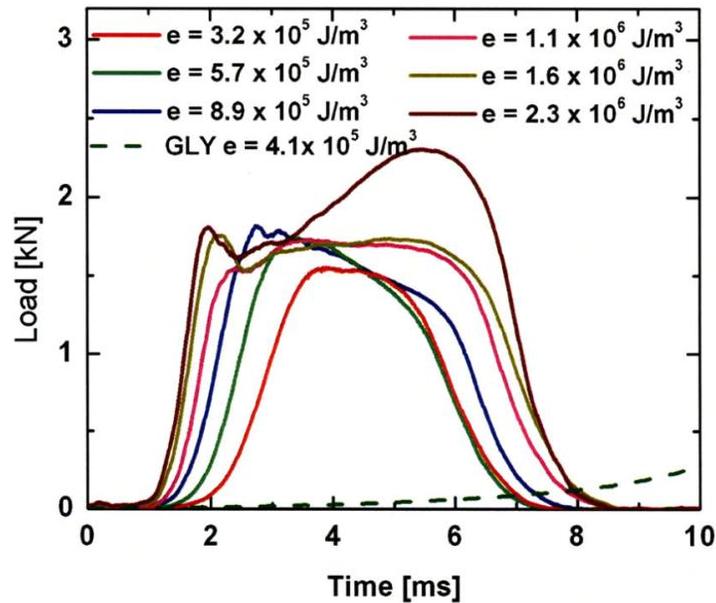


Figura 13: Comparación de la respuesta al impacto de espumas rellenas con STF y rellenas con glicerol para diferentes energías por unidad de volumen [18].

En la Figura 14 se puede observar como para cada experimento realizado el esfuerzo llega a un valor máximo de 2.8 MPa pasando a la región de meseta, cuya duración dependerá de la energía generada por el impacto. A energías por unidad de volumen superiores a los $1.6 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ las deformaciones ya no se encontraban en el régimen elástico sino en el plástico. Este mecanismo de disipación permitió mantener un porcentaje relativamente constante de absorción de energía (entre los 80-90%), siendo este calculado como la razón entre la energía absorbida y la energía del impacto [18].

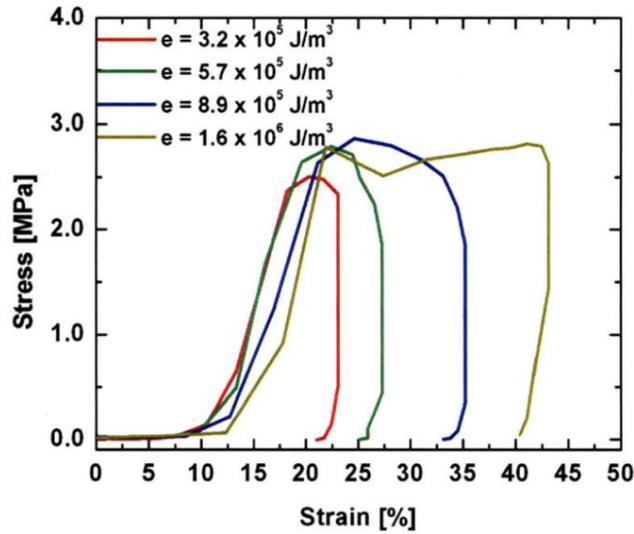


Figura 14: Curva esfuerzo deformación para espumas rellenas con STF a diferentes condiciones de carga [18].

En la Figura 15 se puede observar como cambia el comportamiento de la espuma polimérica al ser rellena con glicerol y con STF a diferentes velocidades, encontrándose que la deformación que sufre la espuma rellena de glicerol es mucho mayor a la que sufre la que se encuentra rellena de STF. Sin embargo, cuando la espuma se ve sometida a altas energías de impacto se puede observar cómo actúan los diferentes mecanismos de fractura presentando un comportamiento más cercano al de un cerámico que al de una espuma elastomérica.

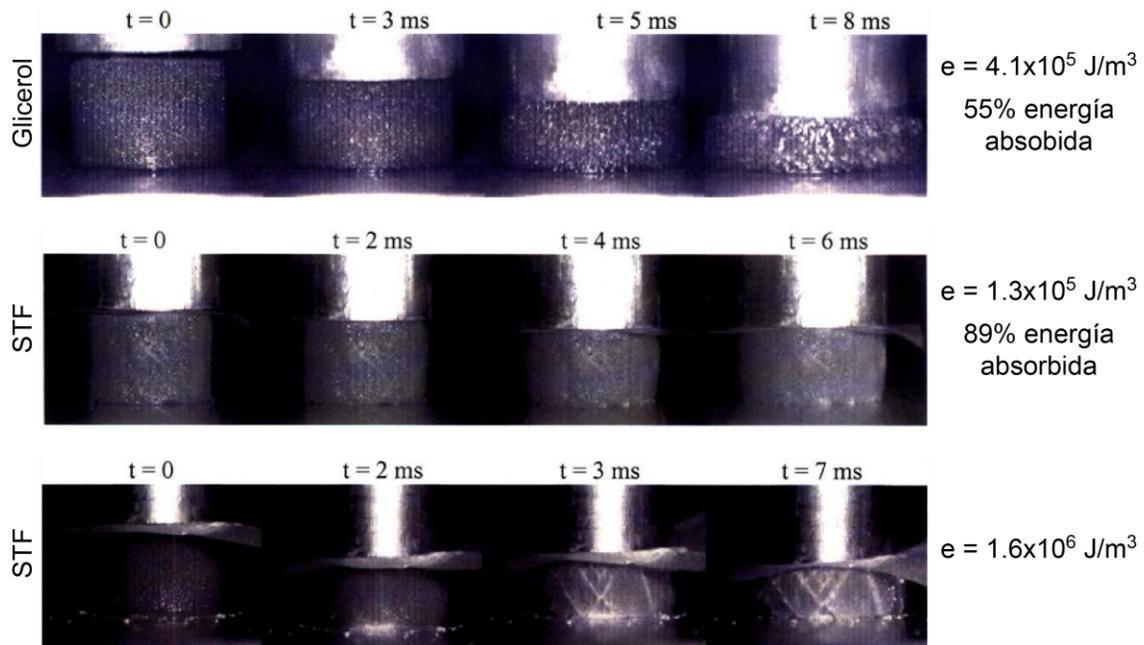


Figura 15: Imágenes capturadas con una cámara de alta velocidad para las diferentes pruebas [18].

2.4 Ondas de choque (explosiones)

Las explosiones resultan ser cada vez de más utilidad, pues comprenden una gran variedad de procesos tales como la compactación de polvos (partículas), la soldadura y la síntesis de grafito en diamante entre otros. Entender este fenómeno, permite aprovechar y controlar toda la energía que produce.

Cuando la deformación ocurre desde el exterior a una gran velocidad una parte del cuerpo se encuentra sujeta a una serie de esfuerzos mientras que la otra parte aún no se ha visto sometida a estos. En otras palabras, los esfuerzos se encuentran viajando a través del cuerpo a una velocidad establecida que puede ser calculada con un buen grado aproximación. A este fenómeno se le conoce como onda. Las deformaciones dinámicas involucran (en la mayoría de los casos) propagaciones de onda, mientras que las deformaciones cuasi estáticas pueden ser consideradas como una secuencia de estados de equilibrio y pueden ser desarrolladas por las ecuaciones de mecánica de materiales [13].

Por ejemplo, una explosión libera energía rápidamente en forma de calor, ondas de sonido y de presión. Las ondas de presión se expanden alejándose de la carga generando un borde al que se le conoce como frente de choque el cual posee en la mayoría de los casos la presión más alta de la onda en cualquier instante de tiempo. Este frente de choque se pronunciará hacia arriba a medida que viaja por el material debido a que las regiones con una mayor amplitud viajan más rápido que las regiones de menor amplitud. Esto genera una onda de choque, definida por Meyers como “una discontinuidad en presión, temperatura (o energía interna) y densidad”[13].

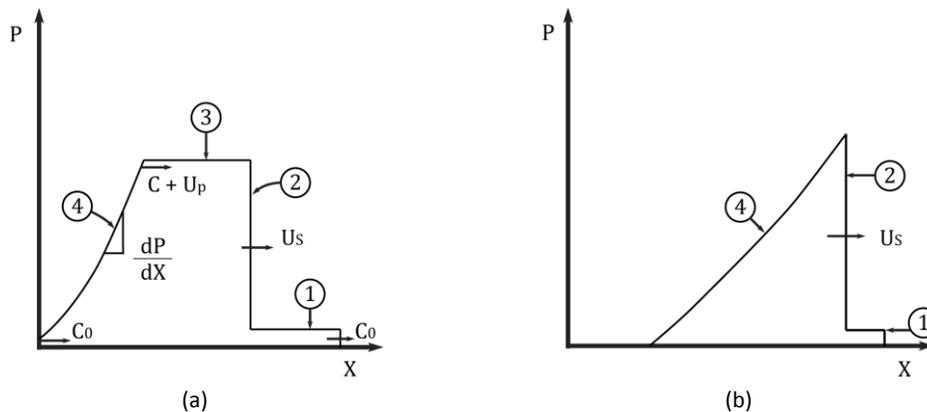


Figura 16: Perfil de una onda de choque para (a) para el impacto en una placa y (b) una explosión en función de la posición [13].

El análisis de las ondas de choque es aplicable tanto para fenómenos generados por impactos a altas velocidades como para explosiones, y su utilidad radica en la posibilidad de generar perfiles que permitan determinar el comportamiento de dicha onda a través de un material determinado. En la Figura 16 se presentan dos perfiles de onda en términos de presión (P) y posición (X). Para un caso ideal el perfil de una onda de choque de un impacto en una placa presenta una forma rectangular y podría predecir una discontinuidad en el frente (2), un valor constante denominado “duración del pulso” en la parte superior (3) establecido por el tiempo requerido por la onda para viajar a través del proyectil y un retorno gradual de la presión hacia 0 (4) (Figura 16a), mientras que el perfil de las ondas de choque producidas por una explosión en donde el explosivo se encuentra en contacto directo con el material es de tipo triangular, pues el valor constante desaparece convirtiendo la duración del pulso en un pico máximo de presión (Figura 16b).

Ciertamente, el perfil de una onda de choque presenta ciertas características que dependerán de la presión y del material por el que se propague (Figura 17b).

Ejemplos del comportamiento del perfil de una onda de choque son suministrados en la Figura 18, donde se aprecia que el límite elástico de Hugoniot (HEL) es relativamente bajo para los metales en comparación al de los cerámicos, además de presentar un decaimiento más abrupto desde la fase de duración del pulso o el pico de presión. Además se puede observar con claridad la separación entre las regiones elásticas y plásticas de la carga [13].

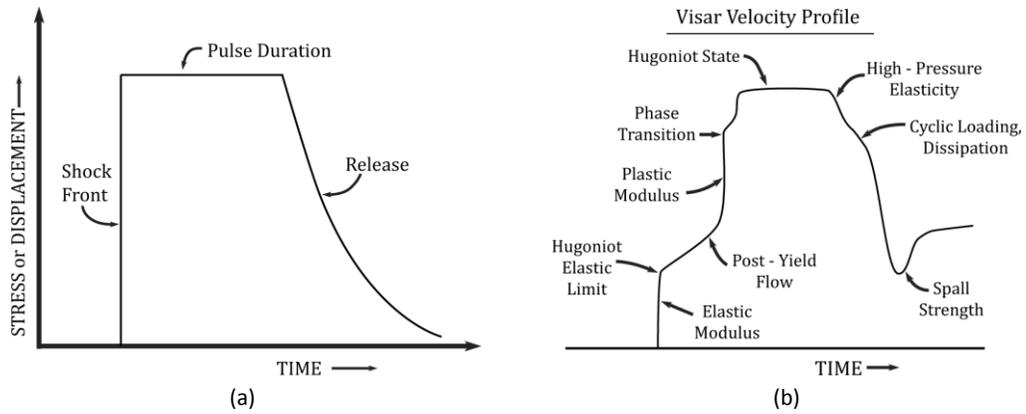


Figura 17: Perfil de una onda de choque (a) ideal y (b) “genérica” para el impacto en una placa en función del tiempo [13].

Ahora bien, para atenuar una onda de choque se requiere disminuir el pulso de presión a medida que éste viaja a través del material, esto se logra al disipar la energía que lleva consigo el pulso ya sea en forma de calor, a través de defectos generados u otros procesos [13]. La Figura 19 muestra el comportamiento del pulso de choque a medida que éste avanza por el material, notándose que la presión permanece constante durante un tiempo determinado y luego decae; entre más largo el pulso inicial, mayor será el impulso que éste lleva consigo, y por ende mayor su habilidad para seguir por el material.

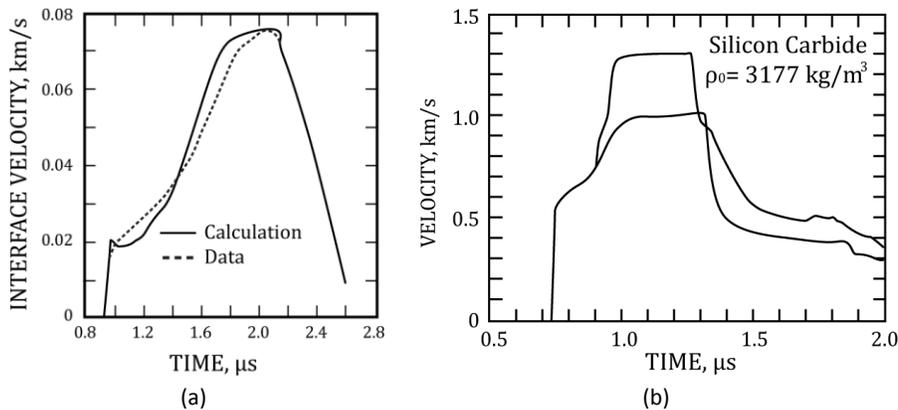


Figura 18: Perfil de onda de choque de (a) berilio (metal) y (b) carburo de silicio para el impacto en una placa en función del tiempo[13].

El comportamiento de ondas de choque a través de un material poroso resulta de gran interés por que estos absorben una gran cantidad de energía atenuando rápidamente el impacto de las ondas. La energía absorbida comprime al material, compactándolo, y en consecuencia, aumentando la temperatura.

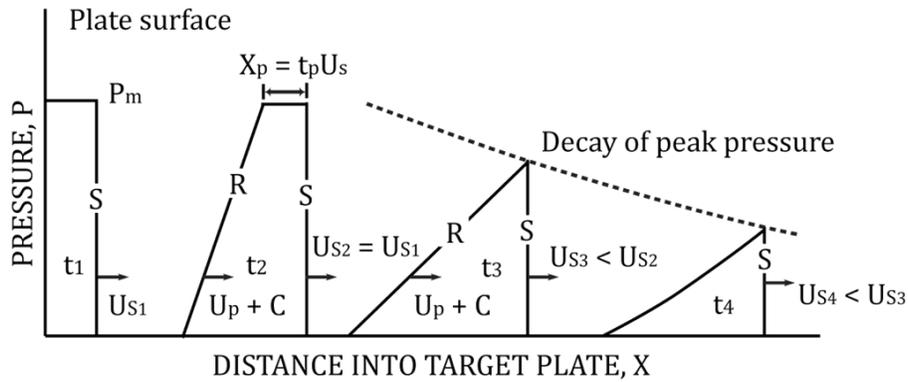


Figura 19: Progreso del pulso de choque a través del material [13].

2.5 Hidrocódigos

En las últimas décadas el estudio de eventos generados por impactos a altas velocidades y explosiones ha sido de gran interés, pero el realizar su estudio de forma experimental resulta ser difícil además de costoso. Es por esta razón que la implementación de herramientas computacionales como los hidrocódigos ha cobrado tanta importancia.

Zukas define los hidrocódigos como un programa computacional para el estudio de cargas muy rápidas e intensas en materiales y estructuras [25]. Desarrollado en los 60's, este programa originalmente realizaba cálculos asumiendo un comportamiento hidrodinámico en los materiales ignorando la resistencia del mismo, denominándose así "Hidrocódigo" [25].

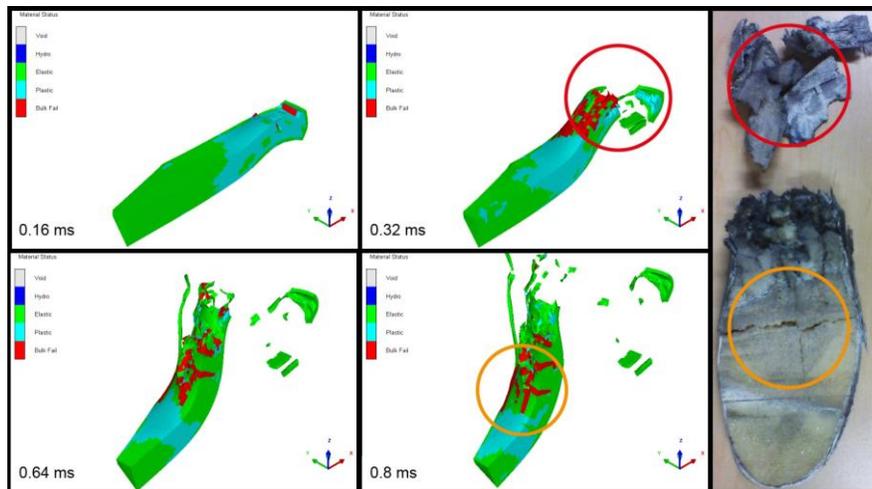


Figura 20: Simulación de un paquete de protección personal sometida a una carga de 40 gr de TNT [26].

Los hidrocódigos se encuentran especialmente diseñados para solucionar problemas dinámicos no lineales donde obtener una respuesta analítica precisa resulta ser un problema de alta complejidad [25]. En consecuencia son adecuados para el modelamiento de impactos, explosiones y penetraciones pues gracias las altas velocidades generadas se producen presiones que exceden la resistencia de los materiales impactados por varios órdenes de magnitud, lo que permite desarrollar los cálculos asumiendo un comportamiento hidrodinámico en dichos materiales [25].

Actualmente los hidrocódigos tiene una gran variedad de aplicaciones entre las que se encuentra el diseño de vehículos a prueba de choques, el análisis del efecto de los hoyuelos en las pelotas de golf y el diseño de estructuras espaciales que permitan soportar impactos de diferentes tamaños de partículas a altas velocidades entre otros [25].

Entre los hidrocódigos se encuentran diferentes técnicas que permiten modelar los diferentes fenómenos. Generalmente éstas técnicas están basadas en mallas, las cuales dividen el objeto en una serie de elementos y nodos con los que se hace posible obtener la información en cualquier instante de tiempo. Entre los métodos existentes se encuentran el método de Euler y el método de Lagrange, siendo éstos los métodos más básicos [27].

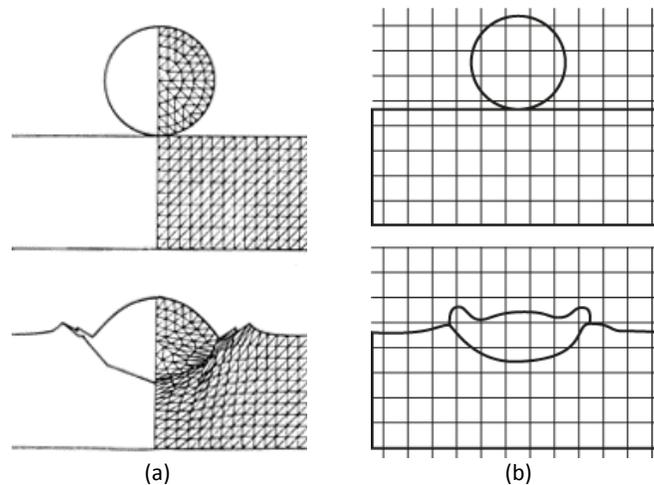


Figura 21: Enmallado del método de (a) Lagrange y (b) Euler [25].

En el método de Lagrange el enmallado se encuentra fijo en el objeto durante todo el proceso y por ende éste se mueve junto con el material (Figura 21a). Este método presenta varias ventajas pues el tener un enmallado fijo en el objeto permite realizar de manera sencilla un seguimiento puntual en el material obteniendo un historial completo de las variables [28]. A pesar de las ventajas que se obtienen con éste método también existen desventajas pues cuando el objeto sufre grandes deformaciones los elementos del enmallado disminuyen su tamaño aumentando el costo computacional requerido. Si la deformación continúa se van a presentar distorsiones y entrecruzamientos en el enmallado con lo cual el método pierde precisión generando errores en los resultados. Para evitar estos errores se suelen eliminar los elementos que han llegado a una deformación plástica máxima determinada por medio de un proceso llamado erosionado.

Por otro lado en el método de Euler el objeto simulado se mueve a través de la malla la cual permanece fija en el espacio y no cambia con el tiempo mientras que los materiales fluyen a través de ella, permitiéndole al objeto realizar grandes deformaciones como explosiones o impactos de altas velocidades sin generar algún tipo de distorsión en el enmallado eliminando de esta forma problemas numéricos como los que se presentan en el método de Lagrange. Sin embargo, en el método de Euler no se puede realizar un seguimiento puntual del material, motivo por el cual solo se puede conseguir información de variables fijas en el espacio como el flujo de masa, momento y energía, lo que compromete la precisión de los resultados [28]. Otro problema que presenta éste método proviene de la necesidad de modelar no solo el objeto de

interés sino el entorno que lo rodea, por lo que más elementos, memoria y tiempo son requeridos en comparación a un modelo estándar de Lagrange [27].

Tabla 1: Comparación entre el método de Euler y el método de Lagrange [28].

Comparación de los métodos de Euler y Lagrange		
	Métodos Lagrangianos	Métodos de Euler
Enmallado	Adherido al material en movimiento	Fijo en el espacio
Seguimiento	Movimiento de cualquier punto en los materiales	Flujo de Masa, momento y energía a través de los nodos de red y los límites del enmallado
Historial	Facilidad de obtener el registro histórico en un punto adherido al material	Dificultad de obtener el registro histórico en un punto adherido al material
Límites e interfaz en movimiento	Fácil de seguir	Difícil de seguir
Geometría irregular	Fácil de modelar	Difícil de modelar con buena precisión
Largas deformaciones	Difícil de manejar	Fácil de manejar

Además de los métodos anteriormente mencionados existen otros conocidos como “métodos sin malla” entre los cuales destaca el método SPH que aunque es relativamente nuevo, es el más antiguo de esta clase.

2.6 Modelos computacionales

El análisis por elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés) es utilizado principalmente para determinar la distribución de esfuerzos en geometrías complejas. Para análisis estáticos o cuasi-estáticos se utiliza un método implícito, el cual itera la solución hasta que ésta converge para cada una de las etapas de deflexión; sin embargo, dicho método no considera aceleración alguna en las masas, a diferencia del método explícito utilizado para la solución de problemas dinámicos, en el que se estima la fuerza, la aplica a las masas y calcula las aceleraciones para el siguiente ciclo [29].

A pesar de que el FEA dinámico encaje mejor en la solución de problemas de impactos, presenta diferentes inconvenientes computacionales, i.e. cuando la espuma hace contacto con una superficie infinitamente rígida no es posible utilizar las condiciones de contacto cinemáticas con contacto “hard” pues los cuerpos se sobrepondrían, motivo por el cual se sugiere implementar las condiciones de contacto tipo “penalty” que presentan como consideración la inclusión de un contacto artificial de resorte elástico en la interfaz, especificando como el sobre cierre de las superficies de contacto varían en función de la presión [29].

En su texto Mills [29] presenta una exhaustiva revisión literaria sobre los diferentes modelos encontrados en la literatura además de comentar sobre los diferentes programas utilizados para tal fin. En dicha revisión se destacan los ejemplos presentados para el caso del FEA dinámico en los que se desarrolla el análisis de las simulaciones de una prueba de impacto uniaxial a compresión para dos tipos de espumas diferentes. La primera de éstas consistía en un cubo de 100 mm de una espuma de celda cerrada de poliestireno expandido (EPS por sus siglas en inglés) con una densidad de 35kg/m^{-3} , el cual fue golpeado por un impactor (martillo) de 5 kg a 5 m/s. La aceleración del impactor y la fuerza de reacción de la mesa de soporte fueron los parámetros de salida para el FEA, los cuales fueron posteriormente procesados para generar los esfuerzos en la espuma con respecto a los esfuerzos del impactor y la interfaz de la mesa. En la Figura 22a se puede observar que al principio durante la región elástica los esfuerzos oscilan y al pasar el punto de fluencia las dos curvas de esfuerzo oscilan desfasadas entre sí debido a la transmisión y reflexión de las

ondas de choque a través del material, mientras que en la Figura 22b muestra como a pesar de que el componente vertical de la deformación plástica es ligeramente no-homogénea la deformación de la espuma es casi uniforme [29].

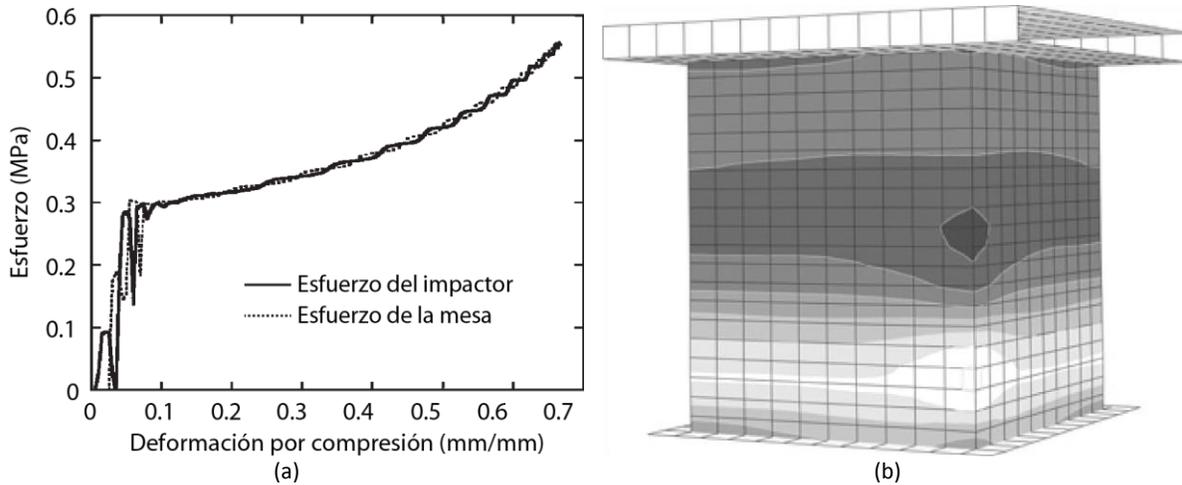


Figura 22: FEA dinámico del impacto de un cubo de 100mm de EPS 35 a 5m/s (a) Curva esfuerzo deformación y (b) contorno de la deformación plástica a los 10 ms cuando la deformación total fue de 0.43 [29]

La segunda espuma simulada fue una espuma flexible de poliuretano de celda abierta, donde se encontró un fenómeno diferente cuando ésta era impactada debido a la inercia de, su bajo módulo elástico y su baja velocidad de la onda de sonido. Para dicho modelo se trabajó con un cuarto de simetría utilizando la misma geometría de la espuma de EPS, impactada a una velocidad de 3.5m/s por un impactor de cara plana de 2 kg. La Figura 23a presenta el contorno de esfuerzos de la espuma adquiridos mediante la implementación del FEA dinámico, en éste se puede observar como el impactor (en la parte superior) crea un pulso de presión que se propaga a través de la espuma polimérica.

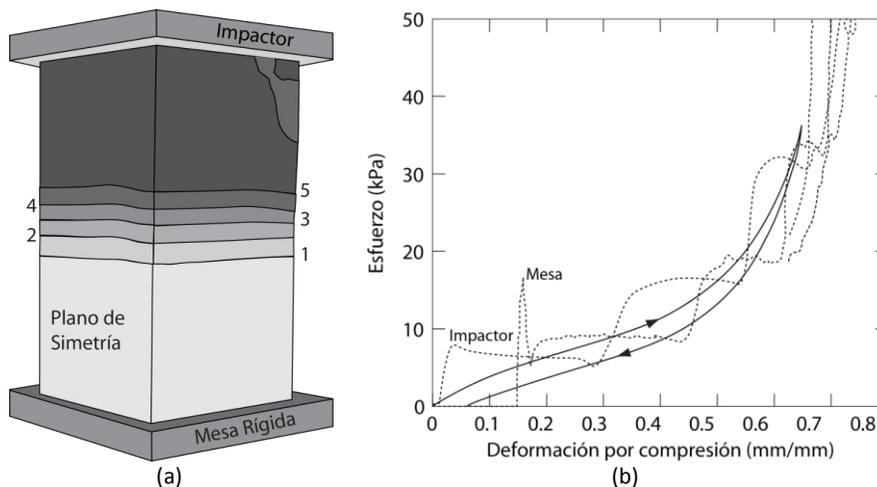


Figura 23: (a) Modelo de ¼ de simetría de un cubo de espuma después de 2.4 ms con el contorno de la componente vertical del esfuerzo compresivo. (b) Predicción de las curvas esfuerzo deformación por compresión adquiridas mediante FEA estándar (línea sólida) y FEA dinámica [29].

Por otro lado, en la Figura 23b se presenta que después de 2.4ms, la parte superior de la muestra se encuentra comprimida a un esfuerzo casi uniforme de 6 kPa, mientras que la parte inferior no presenta

esfuerzos significativos. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo la mayor parte del estado de esfuerzos se propaga hacia la parte inferior del espécimen generando una región con grandes esfuerzos en la parte inferior que tienden a propagarse nuevamente a la parte superior [29].

Por su parte Zhang et al [30] propone un modelo constitutivo para espumas poliméricas de baja densidad (poliuretano, polipropileno y poliestireno) sometidas a diferentes cargas dinámicas enfocándose principalmente en la influencia de la temperatura y la tasa de deformación. Dicho modelo fue implementado en el programa de elementos finitos explícito LS-DYNA3D, el cual le permite al usuario agregar una nueva subrutina del material definiendo nuevos modelos constitutivos. Los parámetros necesarios para la elaboración del modelo fueron obtenidos a través de una serie de pruebas experimentales de compresión axial, compresión hidrostática y cortante simple, las cuales también fueron utilizadas para validar el funcionamiento del modelo. A partir de esta investigación los autores concluyen que las espumas que se comportan de manera dúctil cuando se encuentran a compresión pueden fallar bajo cortante y tensión debido a que bajo estas condiciones son frágiles. Cabe resaltar que aunque en este estudio se realizaron las pruebas experimentales para las espumas de poliuretano de celda abierta, los modelos constitutivos presentados en condiciones tanto estáticas como dinámicas fueron solo elaborados para las espumas de polipropileno y poliestireno.

Por otro lado, Ong et al [31] propone en su texto los diferentes modelos para los distintos materiales que componen una placa de protección personal. Entre dichos materiales se encuentra una espuma rígida de poliuretano, para la que se enuncian las respectivas ecuaciones de estado, modelos constitutivos y los modelos de falla necesarios para su modelamiento ante cargas dinámicas utilizando el software AUTODYN. Para la ecuación de estado se propone el modelo de compactación de P- α , el cual permite describir el comportamiento dinámico de los materiales porosos, detallando la compresión de choque y el proceso de descarga del material; además, éste puede representar de manera adecuada la descarga de los estados parcialmente compactados producidos en aplicaciones de bajos esfuerzos. Los parámetros necesarios para implementar este método son: la densidad inicial del material poroso, la velocidad del sonido de compresibilidad (Bulk) en la región de compactación elástica, la presión máxima elástica, la presión de compactación sólida y los parámetros Hugoniot (C y S) del sólido. En cuanto al modelo constitutivo se utiliza el criterio de límite elástico de Von Mises el cual describe el límite elástico del material y su transición a una deformación plástica permanente debido a la incapacidad de soportar grandes esfuerzos cortantes; para su aplicación se requieren los siguientes parámetros: el módulo cortante y el límite elástico. Finalmente, la falla del material es modelado por separado y ocurre cuando el material no es capaz de soportar los esfuerzos tensores excediendo la resistencia local a la tracción del material [31]. Los autores concluyen que la espuma porosa resulta ser de gran utilidad a la hora de atenuar la onda de choque al ampliar el tiempo de aumento del choque para retrasar la propagación de dicha onda.

Por su parte, Briody et al [32,33] presenta una caracterización cuasi estática de cargas compresivas y cortantes para espumas de poliuretano de celda abierta con densidades de 40kg/m^3 y 80kg/m^3 respectivamente. Los datos adquiridos fueron usados posteriormente para calcular las constantes de un modelo Ogden's Hyperfoam de segundo orden a través de un ajuste de la curva esfuerzo deformación utilizando el software ABAQUS. Una prueba de fuerza de deflexión por indentación (IFD por sus siglas en inglés) fue llevada a cabo para demostrar la precisión del modelo numérico obtenido. En la Figura 24 se presentan los resultados obtenidos en dicho estudio, los cuales fueron validados visualmente comparando la compresión obtenida mediante la prueba experimental y las simulaciones en los costados de las muestras y en la distorsión de la malla en la cara frontal de las mismas.

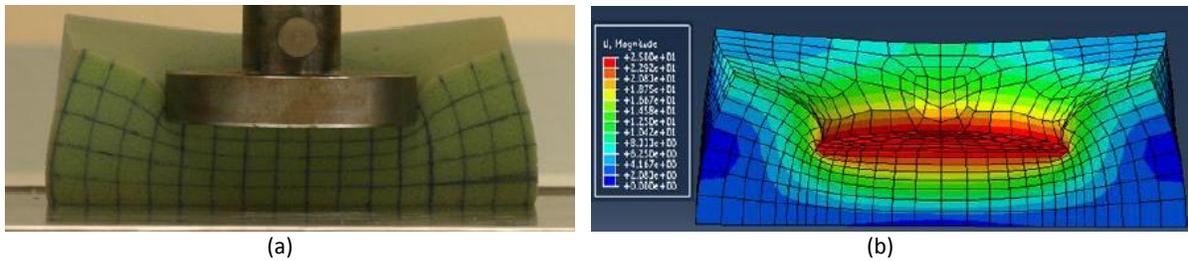


Figura 24: (a) montaje físico de la prueba IFD, ½ muestra comprimida al 50% de la altura inicial; (b) Grafica de elongación de la prueba IFD para ½ muestra, simulada en ABAQUS comprimido al 50% de la altura inicial [32]

De la misma manera, Grujic et al [34] desarrolla un modelo numérico usando un modelo para espuma no lineal isotrópico compresible hiperelástico cuyos parámetros (para un modelo de Ogden's Hyperfoam de 2^{do} orden) fueron obtenidos a través de un ajuste de curva para los datos experimentales obtenidos por medio del software ABAQUS/Standard. Los autores evalúan el confort al sentarse en términos de la presión máxima y la distribución de la misma para el contacto entre el usuario y la silla; los resultados fueron comparados contra estudios experimentales previos los cuales involucraban sujetos de prueba encontrando una validación muy precisa para su método. Las propiedades físicas de la espuma i.e. densidad y tamaño de celda no son suministradas en el artículo. En este punto es necesario mencionar que en los dos últimos casos presentados anteriormente, las simulaciones fueron desarrolladas para casos cuasi estáticos donde la tasa de deformación no afecta el comportamiento mecánico de la espuma drásticamente.

En cuanto al modelo computacional del STF los documentos disponibles al respecto son bastante escasos, sin embargo se encuentran autores como Petel et al [35] quienes han empezado a desarrollar, validar y caracterizar suspensiones densas mediante la implementación del método de Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) disponible en el software LS-DYNA. Para el modelo el carburo de silicio fue definido como un cerámico Johnson-Holmquist, mientras que el etilenglicol fue definido como un material nulo (sin resistencia) utilizando un ajuste polinómico de las Hugoniot disponibles en la literatura para desarrollar la ecuación del estado. Los nodos intersticiales que rodean las partículas de carburo de silicio se definieron como etilenglicol (Figura 25). Los autores concluyen que el comportamiento deviatorico de la suspensión se debe probablemente a la rápida creación de cadenas al interior de la suspensión ante las cargas de choque.

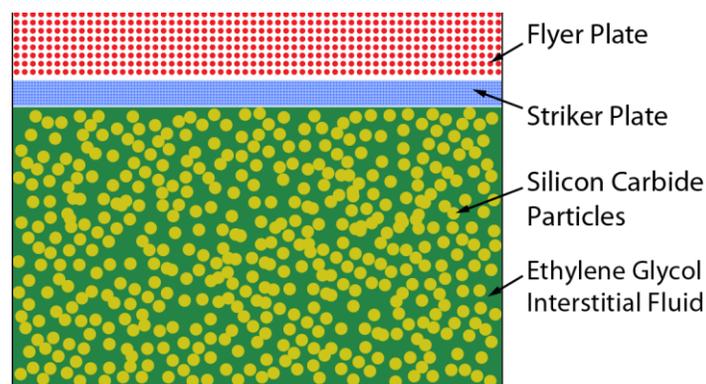


Figura 25: Modelo utilizado para capturar los efectos de una onda de choque de la suspensión en mesoescala [35]

2.7 Desarrollo del modelo computacional.

Para el desarrollo del modelo computacional del MPA trabajado fue necesario estudiar diferentes ecuaciones de estado, modelos constitutivos y modelos de falla y así seleccionar el que mejor describa el comportamiento del material.

Debido a que el material trabajado es un aglomerado de arena y epoxi se revisaron las ecuaciones de estado empleadas por defecto en AUTODYN para estos materiales. Posteriormente se realizó una revisión bibliográfica para entender estos modelos y de esta forma encontrar los valores requeridos para elaborarlos y comprobar en la simulación el que más se ajusta al comportamiento del material.

2.7.1 Ecuación de Estado.

Usualmente las ecuaciones de estado (EOS por sus siglas en inglés) se definen como un intento de conectar (de forma funcional) predicciones teóricas de modelos micro-estructurados a observaciones experimentales del comportamiento macroscópico. Sin embargo, no existe una teoría general que permita pasar de condiciones atómicas a predicciones del comportamiento continuo, por lo que a menudo se deben incluir algunas simplificaciones [25].

Para propósitos computacionales asociados a la elaboración de hidrocódigos, se puede decir que las ecuaciones de estado son descripciones matemáticas con bases físicas del comportamiento del material de acuerdo a un conjunto de condiciones iniciales establecidas [25], entre las que se encuentran grandes deformaciones, presiones que exceden el esfuerzo de fluencia del material y la propagación de ondas de choque.

Éstas ecuaciones permiten relacionar la densidad (o el volumen) y la energía interna (o la temperatura) de un material con la presión, mediante la aplicación de los principios de conservación de masa, momento y energía [27]. De ésta forma es posible determinar el comportamiento hidrostático del material calculando la presión como una función de la densidad y en algunos casos de la energía y/o temperatura.

En resumen, se puede decir que las ecuaciones de estado constituyen la información necesaria del material que permite modelar el comportamiento del mismo en cualquier problema que se esté trabajando, especialmente aquellos que incluyen grandes deformaciones.

2.7.1.1 MODELO DE SHOCK.

El modelo de Shock es uno de los más utilizados en simulaciones numéricas y se basa en las ecuaciones de Hugoniot-Rankine que determinan los estados del material antes y después del frente de choque. Éstas resultan de la conservación de masa, momento y energía a través de la interfaz de choque [36].

Estas ecuaciones relacionan la velocidad de la partícula (u_p) a la velocidad de choque (U_s) y las presiones de la onda de choque (P) a la velocidad de la partícula (u_p) o a la velocidad de choque (U_s). Donde la velocidad de la partícula (u_p) es la velocidad actual de cada partícula en el material después de que la onda de choque haya pasado y la velocidad de choque (U_s) describe la tasa de propagación del frente de choque a través del material. Las ecuaciones de Hugoniot-Rankine pueden también ser empleadas para determinar como una onda de choque cambia cuando ésta se desplaza a través de diferentes materiales [37].

Tabla 2: Parámetros requeridos pro AUTODYN para la elaboración del modelo de Shock

Parámetro	Unidad
Coefficiente de Grüneisen	-
Velocidad del sonido (C_0)	m/s
Pendiente de la ecuación (S)	-

Los valores necesarios para desarrollar el modelo de Shock son presentados en la Tabla 2 y pueden ser obtenidos realizando impactos a una placa empleando una pistola de gas como lo mencionan Jordan *et al* [38] y Meyers [13] en sus respectivos textos pues éste tipo de experimentación provee un mejor control sobre la velocidad de impacto y la dirección del mismo [Figura 26]. Para este experimento se deben elaborar placas del material cuyo modelo se desea obtener, las cuales serán impactadas con un material conocido a diferentes velocidades que se encuentran entre 300 y 960 m/s [38]. El proyectil viaja por un tubo donde se tienen galgas que permitan conocer la velocidad longitudinal y la presión generada al momento del impacto.

De aquí se obtienen las velocidades del frente de choque (U_s) las cuales son determinadas por la diferencia entre el tiempo de llegada entre una galga y otra y la presión inicial generada al momento del disparo; si la presión inicial no es medible también se puede utilizar la presión transmitida a la placa en el momento del impacto.

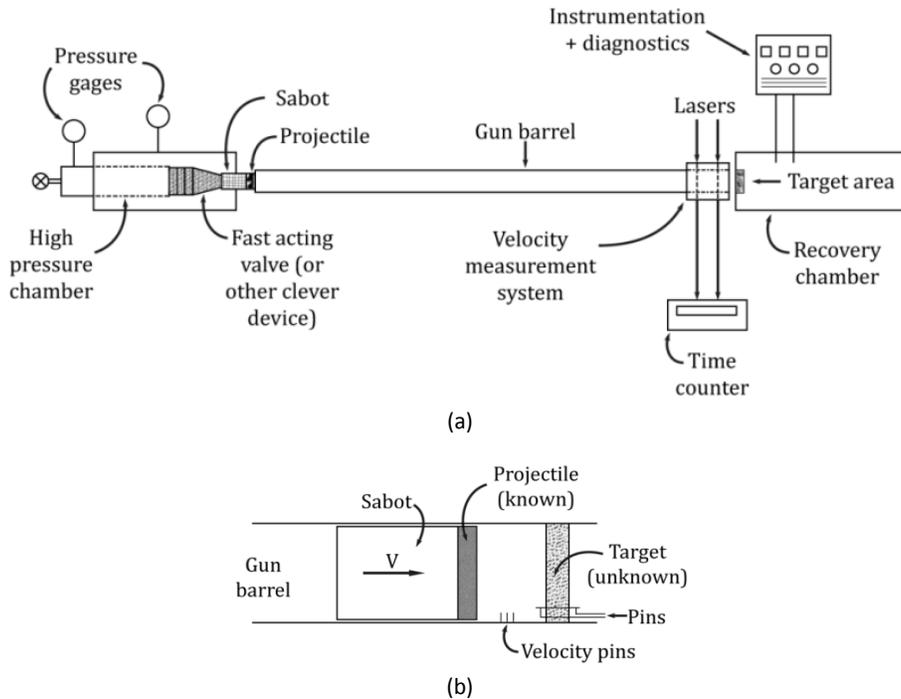


Figura 26: (a) Representación esquemática de una pistola de gas ligera de una etapa [13]. (b) Configuración experimental de un impacto con una pistola de gas para determinar la ecuación de estado [13].

En choques estables, la velocidad del frente de choque (U_s) siempre debe ser mayor que la velocidad de la onda en el material inicial (C_0) y también debe ser menor que la velocidad de la onda en el material comprimido detrás de la onda de choque (C_s). Esto se debe a un problema de estabilidad pues al ser la velocidad del frente de choque (U_s) mayor a la velocidad de la onda en el material inicial (C_0) se asegura que el frente de choque permanece estable y no se dispersa en el siguiente sistema. Además al ser la velocidad

del frente de choque (U_s) menor a la velocidad de la onda en el material compactado (C_s) se asegura que el frente de choque permanece impulsado. Así pues U_s debe ser supersónico en el material sin comprimir y subsónico en el material comprimido para que se mantengan estables tanto la dispersión como la atenuación respectivamente [13]. Con la ecuación (1) es posible determinar la velocidad de la partícula (u_p) en el material a partir de la presión (P), la densidad inicial del material (ρ_0) y la velocidad del frente de choque (U_s).

$$P = \rho_0 U_s u_p \quad (1)$$

La ecuación (2) muestra la ecuación de Shock donde los valores de C_0 y s son obtenidos a partir de una regresión lineal entre las velocidades de choque y de partícula, donde C_0 es la velocidad del sonido en el medio de propagación y s es un valor empírico conocido mediante la pendiente de la regresión.

$$U_s = C_0 + s * u_p \quad (2)$$

La Figura 27 muestra un ejemplo de la regresión lineal obtenida para diferentes materiales compuestos de epon 828 y partículas de diferentes metales principalmente aluminio y en diferentes medios de propagación.

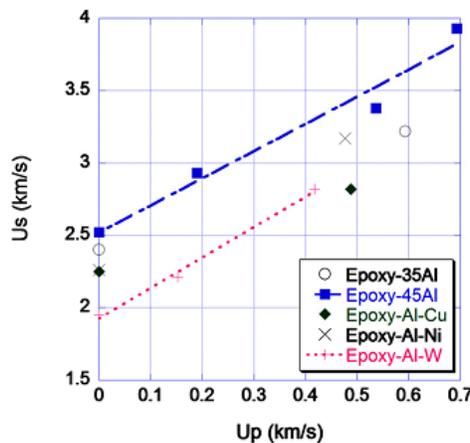


Figura 27: Ejemplo de la gráfica velocidad de partícula vs velocidad de choque [13].

2.7.1.2 MODELO P-ALPHA

El modelo P- α es fue desarrollado por W. Herrmann [39] en 1969 y permite describir la compactación dinámica de materiales porosos. Ong et al [31] presenta en su texto de manera resumida el funcionamiento de este modelo, el cual está compuesto por varias etapas de. La primera de las etapas mencionadas es una compresión elástica desarrollada por el pandeo elástico de las paredes de la celda. Posteriormente, empieza un cambio permanente en el volumen, el cual coincide con el inicio de la deformación plástica de las paredes de la celda a una presión P_e (el cual, resulta ser el mismo esfuerzo de fluencia del material poroso).

Posteriormente, la compactación dinámica viaja a través de las líneas de Rayleigh finalizando en el estado plástico (descrita por la ecuación en la Figura 28), donde la presión alcanza un estado de compactación total a una presión de compactación sólida P_s o es liberada a un estado parcialmente comprimido. Por último, se presenta una descarga desde el estado parcialmente compactado de manera elástica a su estado final cuando el volumen específico ambiental es inferior al volumen inicial debido a la densificación localizada.

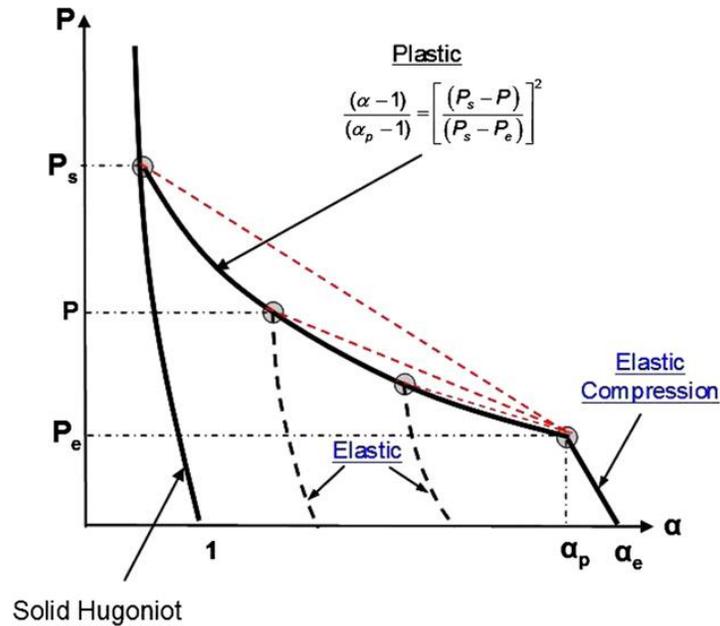


Figura 28: Modelo P-α

Este, es el modelo más sencillo con el que puede describir de manera realista los procesos de compresión de choque y de alivio en materiales porosos. Además, este modelo describe el alivio de estados parcialmente densificados, lo cual es de gran importancia para aplicaciones de bajos esfuerzos. Para modelar un material poroso utilizando la ecuación de estado P-α en Autodyn, los siguientes parámetros deben ser especificados al inicio:

- Densidad inicial en el material poroso ρ_0
- Velocidad del sonido de compresión en la región lineal elástica.
- Presión elástica máxima (presión en fluencia) P_e .
- Presión de compactación sólida P_s .
- Parámetros de Hugoniot C y S del material en su estado sólido.

La obtención de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente se encuentra de manera detallada en [31].

2.7.2 Modelo Constitutivo.

El modelo constitutivo permite formular la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales. Usualmente describe la transición entre el régimen elástico y plástico en términos del esfuerzo de fluencia, que a su vez es función de propiedades del material tales como deformación, velocidad de deformación y/o energía [40].

2.7.2.1 MODELO DE JOHNSON-COOK.

El modelo constitutivo de Johnson-Cook permite representar el comportamiento de la resistencia de los materiales sujetos a largas deformaciones, altas tasas de deformación y altas temperaturas que pueden ocurrir en problemas de impactos de alta velocidad [41].

Tabla 3. Parámetros requeridos por AUTODYN para la realización del modelo de Johnson-Cook.

Parámetros	Unidad
Modulo Cortante*	(kPa)
Esfuerzo de Fluencia (A)*	(kPa)
Constante de endurecimiento (B)*	(kPa)
Exponente de endurecimiento (n)	-
Tasa constante de deformación (C)	-
Exponente de ablandamiento térmico. (m)	-
Temperatura de fusión (T _m)	(K)

Para realizar este modelo es necesario desarrollar una prueba de compresión de la cual se podrá encontrar el valor del esfuerzo de fluencia. La ecuación 8 es la ecuación de Johnson-Cook en la cual se relacionan el esfuerzo de fluencia, las tasas de deformación y los cambios sujetos a la temperatura.

$$\sigma = [A + B * \varepsilon_p^n] [1 + C * \ln \dot{\varepsilon}_p] [1 - T_H^m] \quad (3)$$

Donde A es el esfuerzo de fluencia, B y n son valores que representan el efecto de endurecimiento por deformación, C es la tasa constante de deformación, ε_p es la deformación y $\dot{\varepsilon}_p$ es la tasa de deformación normalizada [Ecuación 9] donde ε_{p0} es la tasa de deformación utilizada en la prueba de compresión.

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{p0}} \quad (4)$$

El termino T_H es la temperatura homogenizada la cual es encontrada a partir de la ecuación 10 donde T_0 es la temperatura de referencia y T_m la temperatura de fusión del material.

$$T_H = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (5)$$

A partir de este punto se realizan una serie de suposiciones para encontrar todas las variables, pues los únicos valores conocidos son σ , A y ε_p los cuales son obtenidos de la prueba de compresión. La primera suposición que se plantea se refiere a la condición cuasi estática de la prueba de compresión por lo cual el término $[1 + C * \ln \dot{\varepsilon}_p]$ toma un valor igual a 1. Por otro lado en la ecuación 10 el valor $T - T_0$ se hace 0, por lo que el término $[1 - T_H^m]$ se vuelve 1. De esta manera la ecuación 8 toma la siguiente forma:

$$\sigma = [A + B * \varepsilon_p^n] \quad (6)$$

Y despejando se obtiene que:

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \varepsilon_p \quad (7)$$

Graficando el $\ln \varepsilon_p$ contra el $\ln(\sigma - A)$ y realizando una regresión lineal se obtiene que la constante de la ecuación es igual al $\ln B$ y la pendiente es n. Para encontrar el termino C nuevamente se asume que el término $T - T_0$ es igual a 0. Despejando se obtiene que:

$$C = \frac{\frac{\sigma}{[A + B * \varepsilon_p^n]} - 1}{\ln \dot{\varepsilon}_p} \quad (8)$$

De este modo los valores para realizar el modelo de Johnson-Cook son encontrados.

2.7.2.2 MODELO HYPERFOAM DE OGDEN

Aunque las espumas elastoméricas de poliuretano presentan sensibilidad a las tasas de deformación, la forma de 2^{do} orden del modelo constitutivo Ogden's Hyperfoam ha sido utilizado ampliamente en la literatura para espumas elastoméricas como se presenta en [42-44]. Con el propósito de obtener las constantes necesarias presentadas en la ecuación (9) para desarrollar este modelo, se recomienda realizar pruebas uniaxiales de compresión sin confinamiento y realizar un ajuste de la curva esfuerzo-deformación

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[\hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} ((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right] \quad (9)$$

donde W es la función de energía de deformación de Ogden, N el orden de ajuste, $\hat{\lambda}_1^{\alpha_i}$ son las elongaciones deviatoricas principales; $\hat{\lambda}_i = \lambda_i (J^{th})^{-1/3}$, $\hat{\lambda}_1 \hat{\lambda}_2 \hat{\lambda}_3 = J^{el}$ y λ_i son las elongaciones principales, J^{el} y J^{th} son las relaciones de volumen elásticos y térmicos respectivamente y μ_i , α_i y β_i son los parámetros del material dependientes de la temperatura, los cuales, como se mencionó anteriormente se determinan a partir de un ajuste de la curva mediante el software Hyperfit v2.006. El coeficiente β_i controla los grados de compresibilidad los cuales se encuentran relacionados a los coeficientes de Poisson (ν_i) como se presenta en la ecuación (10).

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - \nu_i} \quad (10)$$

Sin embargo, para tener en cuenta el pandeo de las paredes de la celda de la espuma generadas por cargas compresivas sin restricciones laterales, el efecto de Poisson debe ser obviado, por lo que dichos coeficientes serán establecidos como cero [34]. La Tabla 4 presenta las variables necesarias para desarrollar el modelo Hyperfoam de 2^{do} orden.

Tabla 4. Parámetros requeridos por AUTODYN para la realización del modelo Hyperfoam de 2^{do} orden.

Parámetros	Unidad
Orden	-
Mu1*	(kPa)
Alpha1*	-
d1	(/kPa)
Mu2	(kPa)
Alpha2*	-
d2	(/kPa)

2.8 Trabajo previo realizado en la Universidad de los Andes

Recientemente la Universidad de los Andes ha desarrollado su propio STF. A través de su investigación los autores desarrollaron diferentes estudios como la influencia de la temperatura y la concentración de las nanopartículas en la respuesta del STF compuesto por una suspensión monodispersa de nanopartículas de sílice con un diámetro promedio de 500nm en etilenglicol. Los resultados obtenidos exhiben que a una fracción de volumen (ϕ) de 58.14 este material presenta el mejor desempeño [45]. Además, en dicho estudio se muestra que el STF se encuentra activado a una tasa de deformación entre $10^{-3} s^{-1}$ and $10^0 s^{-1}$.

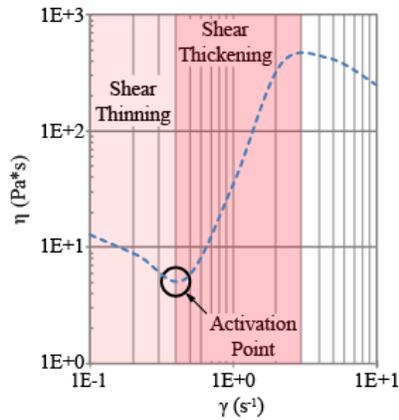


Figura 29: Comportamiento reológico del STF (70 wt% SiO₂ / 30 wt% PEG) desarrollado en el laboratorio [45].

La Figura 29 presenta el comportamiento reológico del STF desarrollado. En dicha imagen, es posible notar dos etapas principales; la primera conocida como “shear thinning” exhibe un decaimiento de la viscosidad debido a que cuando el esfuerzo cortante aumenta, las partículas se empiezan a organizar en el fluido. Sin embargo, cuando el esfuerzo cortante aumenta aun mas, las interacciones hidrodinámicas entre partículas permiten la formación de aglomeraciones de partículas conocidas como “hydroclusters” las cuales aumentan la viscosidad debido a la dificultan el flujo de la suspensión. Es importante resaltar que el punto de activación inicia cerca a los $4 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ y termina a los $3 \cdot 10^0 \text{ s}^{-1}$.

En el mismo trabajo, se tomó una espuma de poliuretano de celda abierta con una densidad de 25 kg/m^3 ($\rho^* / \rho_s = 0.02$) de la empresa Espumados S.A. para posteriormente impregnarla el STF desarrollado. La Figura 30 muestra las micrografías capturadas con el microscopio de barrido electrónico (SEM) JEOL JSM-6490LV disponible en la universidad de los Andes, de la espuma de poliuretano antes y después de la impregnación con dicho fluido

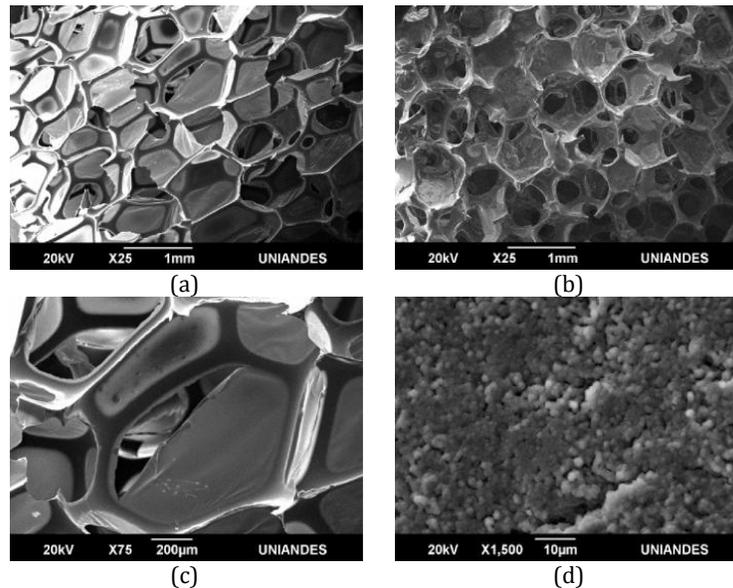


Figura 30: Micrografía de los especímenes (a), (c) sin STF y (b), (d) con STF a diferentes escalas [45]

En la Figura 30a es posible observar la microestructura de la espuma compuesta por un grupo de celdas. Cuando el fluido ingresa a la espuma, esta tiende a acoplarse a las paredes de las celdas de la misma debido a la capilaridad. A medida que la cantidad de fluido aumenta este empieza a esparciarse entre los poros hasta llenar todo el espacio, como se presenta en la Figura 30b y Figura 30c, donde es posible apreciar las nanopartículas de sílice del STF. A partir de estas micrografías es posible establecer que la espuma fue impregnada con el fluido satisfactoriamente, lo que significa que el fluido permanecerá adherido y estable al interior de la estructura de la espuma.

2.9 Resumen

El capítulo anterior suministró la revisión bibliográfica desarrollada con el propósito de proporcionarle al lector una base conceptual del comportamiento de los materiales trabajados en la presente investigación. A partir de esta recopilación de textos científicos se puede concluir que ante altas condiciones de carga ($3.2 \cdot 10^5$ Joules/m³) la respuesta del compuesto presenta un comportamiento mucho más parecido a la respuesta del fluido dilatante solo que al de la espuma elastomérica (ver Figura 5a, Figura 12b y Figura 14), motivo por el cual ante dichas condiciones se podría decir que la función de la espuma es la de contener el fluido y que no presenta ninguna contribución considerable.

3 PÉNDULO BALÍSTICO

El péndulo balístico consiste generalmente de una masa suspendida por cuatro cables de acero (ver Figura 31). En este caso particular, el péndulo es impulsado al detonar una carga explosiva al interior del tubo de choque, ubicado en la parte frontal del módulo de pruebas. El principio de funcionamiento parte de la conservación de momentum, es decir, durante la explosión el impulso generado por dicho fenómeno causará que el péndulo se balancee; ese balanceo permite conocer el impulso conociendo la geometría del péndulo.

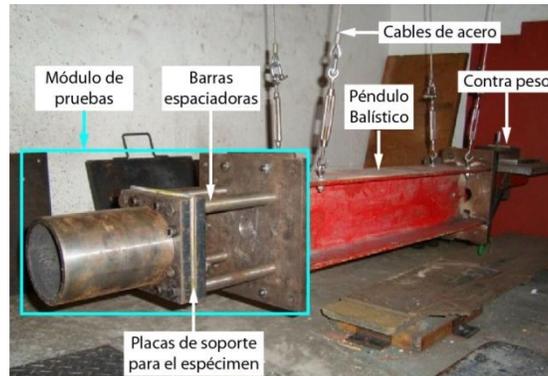


Figura 31: Péndulo balístico convencional desarrollado por BISRU [46]

El péndulo balístico ha sido usado durante varias décadas debido a su relativamente simpleza (en concepto) para construir. La principal ventaja de un péndulo balístico es que responde al momento total entregado al área transversal de una masa móvil, permitiendo de esta manera encontrar el impulso transmitido a través del desplazamiento horizontal del mismo como se presenta en la sección 3.3. Sin embargo, en cuanto a su diseño se debe tener atención en asegurar que la respuesta del mismo sea medible, i.e. en el caso de que el péndulo sea demasiado pesado, el movimiento de respuesta de este puede a ser muy leve para poder ser registrado, pero en el caso contrario cuando el péndulo es muy liviano el movimiento del mismo es muy pronunciado y fácilmente perturbable por otros factores como es el viento, lo que introduciendo un error en la medición. Por otro lado, en el diseño de un péndulo para explosiones, es necesario asegurar que la onda de presión no pueda envolver el péndulo antes de finalizar la carga en la cara frontal de la muestra, lo cual se logra al colocar el péndulo en un espacio lo suficientemente grande para que la distancia que debe viajar la onda para alcanzar la parte posterior del péndulo sea mayor que la duración de la fase positiva de la onda [47].

Entre los estudios elaborados se destaca el de Humphreys [48] quien desarrolla una serie de pruebas a placas de acero de diferentes tamaños y propiedades las cuales son fijadas a un péndulo balístico. Para esta prueba el autor instaló una cámara de alta velocidad sobre el péndulo con el objetivo de registrar las deformaciones sufridas por las placas en tiempo real (Figura 32). En este estudio el autor reportó que la explosión tiene una duración de $150\mu\text{s}$ empezando en el segundo cuadro (desde la derecha) y terminando en el cuarto sin presentar deformación alguna en la placa. Para el sexto cuadro ya se ha alcanzado una deformación plástica final en la placa en un lapso de tiempo de alrededor de 0.0005s , el cual es extremadamente menor comparado a los 4.43s del periodo natural del péndulo. De esta forma se evidencia que la deformación plástica en la placa ha ocurrido mucho antes de que el péndulo balístico alcance su máxima oscilación (balanceo).

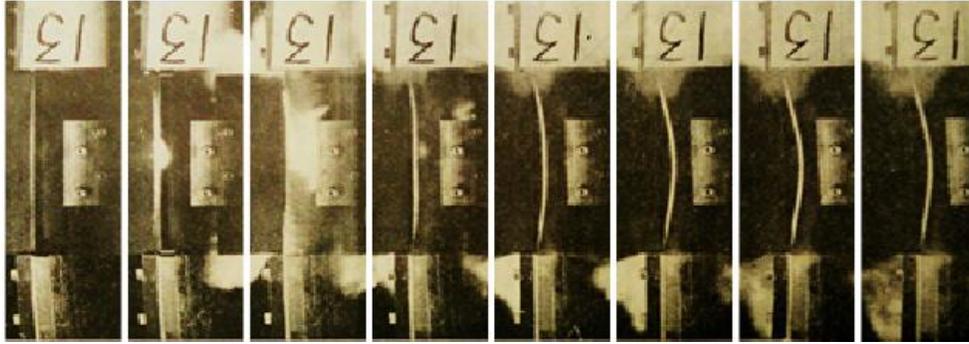


Figura 32: Movimiento actual de la placa (85µs por cuadro) [48]

De la misma manera cabe destacar el trabajo desarrollado por en la unidad de investigación de impactos, explosiones y supervivencia (BISRU por sus siglas en ingles) de la Universidad de Ciudad del Cabo (UCT) encabezada por el profesor Gerald Nurick quienes han sido los líderes en la implementación de este dispositivo en el análisis del comportamiento de materiales ante cargas explosivas. Entre los trabajos desarrollados se encuentra el presentado por Jacob et al [49] quienes evalúan la influencia de la distancia de separación entre el explosivo y una placa circular de 53 mm de diámetro, encontrando que para distancias de separación inferiores al radio de placa (13-40 mm), la carga explosiva es considerada como localizada, mientras que al ser la distancia de separación superior al diámetro (100-300 mm) la carga se considera como uniformemente distribuida sobre toda la placa. Adicionalmente los autores concluyen que las deflexiones en el punto medio decrecen significativamente a medida que la distancia de separación aumenta de 13 a 50 mm para una misma carga, pero cuando las distancias se encuentran entre 75 y 300 mm las deflexiones en el medio son similares.

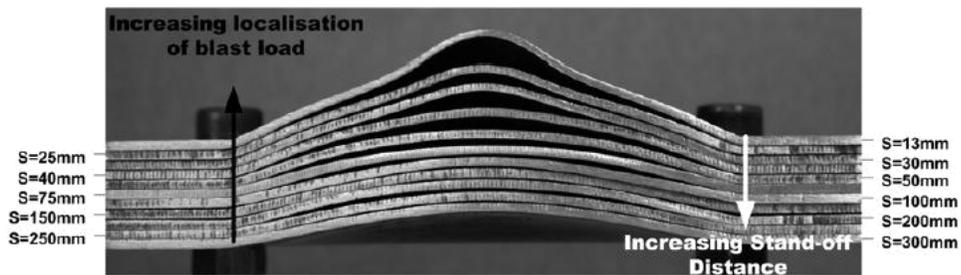


Figura 33: Fotografía de las capas en ordenadas de manera secuencial con respecto a la distancia de separación (s) [49]

Hassan et al [46] investiga la influencia de la variación de la densidad de núcleo de espumas de PVC con placas de aluminio con un espesor de 1.7 mm adheridas en la parte frontal y posterior de la espuma utilizando un adhesivo de curado rápido (Timbond). En su estudio Hassan et al presentan que el daño al interior de los paneles tipo sándwich es mucho más severa cuando la densidad del núcleo aumenta, a diferencia de la espuma de menor densidad (60 kg/m^3) en la que no se evidencia desprendimiento entre las capas o de fractura en el núcleo en los rangos de impulso trabajados.

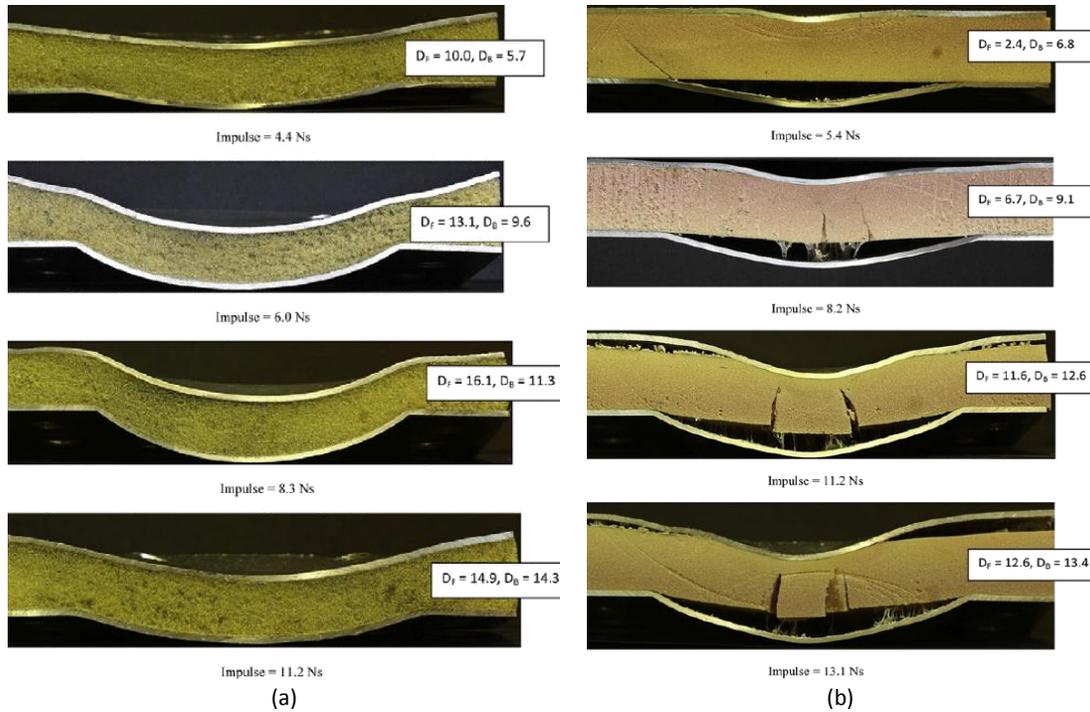


Figura 34: Sección transversal de las estructuras tipo sándwich con una densidad de núcleo de (a) 60 kg/m^3 y (b) 200 kg/m^3 para 4 diferentes impulsos.

3.1 Diseño del péndulo

En la presente sección se presenta el procedimiento utilizado para desarrollar el péndulo balístico implementado en las pruebas dinámicas.

3.1.1 Cálculos analíticos

En la presente sección se establecen los criterios y consideraciones empleados para el diseño del péndulo balístico. Como primera medida y como menciona Humphreys en [48] el impulso generado por la detonación será transmitida al péndulo como energía cinética (E_k) como resultado de la inercia del cuerpo, obteniendo de esta manera una velocidad inicial (v_0). Posteriormente y conociendo que el movimiento del péndulo no va a presentar efectos rotacionales sino netamente de translación dicha energía cinética se convertirá en energía potencial (E_p) alcanzando una altura (h) determinada debido a que el péndulo sigue una trayectoria curvilínea. Por lo anterior se tiene que:

$$E_{k_1} + E_{p_1} = E_{k_2} + E_{p_2} \quad (11)$$

dado que el péndulo no presenta energía potencial en el instante 1 ni energía cinética en el estado dos de la ecuación (11) se obtiene

$$E_{k_1} = E_{p_2} \quad (12)$$

por lo tanto

$$\frac{mv_0^2}{2} = mgh \quad (13)$$

resolviendo para (h) se tiene que

$$\frac{v_0^2}{2g} = h \quad (14)$$

Mediante la ecuación (14) se relaciona la velocidad inicial del péndulo producto de la energía liberada por la detonación del explosivo con el desplazamiento vertical del mismo. Sin embargo, se desea conocer el desplazamiento horizontal pues será este desplazamiento el que será registrado al momento de adquirir los datos. Así pues, con ayuda de la Figura 35 se logra relacionar el desplazamiento vertical (h) con el horizontal (x) haciendo uso de pitagoras obteniendo

$$L^2 = (L - h)^2 + x^2 \quad (15)$$

despejando para x

$$x = \sqrt{L^2 - (L - h)^2} \quad (16)$$

Simplificando

$$x = \sqrt{2Lh - h^2} \quad (17)$$

Sustituyendo la ecuación (14) en la ecuación (15) se obtiene

$$x = \sqrt{2L \left(\frac{v_0^2}{2g} \right) - \left(\frac{v_0^2}{2g} \right)^2} \quad (18)$$

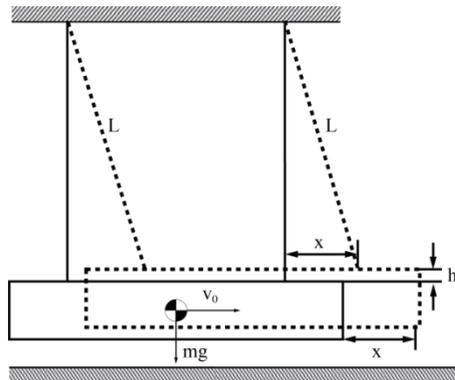


Figura 35: Esquemático del comportamiento del péndulo.

Posteriormente como se desea diseñar el péndulo en función del impulso generado es deseable expresar la ecuación (18) en términos de los impulsos (I) requeridos, lo cual logra al saber que el impulso generado depende de la masa del péndulo y su velocidad inicial de la siguiente manera

$$I = mv_0 \quad (19)$$

despejando para v_0 se tiene

$$v_0 = \frac{I}{m} \quad (20)$$

reemplazando la ecuación (20) en la ecuación (18) se obtiene

$$x = \sqrt{2L \left(\frac{\left(\frac{I}{m}\right)^2}{2g} \right) - \left(\frac{\left(\frac{I}{m}\right)^2}{2g} \right)^2} \quad (21)$$

De esta manera mediante la ecuación (21) se puede relacionar el desplazamiento horizontal en términos de la altura a la cual se encuentra suspendido (L), la masa (m) del mismo y el impulso (I) deseado. Con dicha ecuación se desarrolla un código en MATLAB, el cual es suministrado Apéndice A, mediante el cual se obtiene una serie de curvas que permiten seleccionar un rango de las variables mencionadas anteriormente. La Figura 36 presenta el desplazamiento en función del impulso para diferentes masas de péndulo, esta curva resulta de gran interés, pues la medición se llevará a cabo por medio de un sensor de desplazamiento el cual va a estar a una altura fija durante toda la prueba, por ende si el desplazamiento vertical del péndulo es muy grande puede que se salga del rango de medición. Si se estima que la masa del péndulo se encontrará entre 70 kg y 85 kg y que la vista transversal de la misma tiene una altura de 200 mm el impulso máximo que se puede medir sin hacer modificaciones a la geometría está entre los 47Ns y los 53Ns como se puede observar en la Figura 36, lo cual es consecuente con la restricción de complementar el rango de impulsos logrado con el péndulo gravitacional.

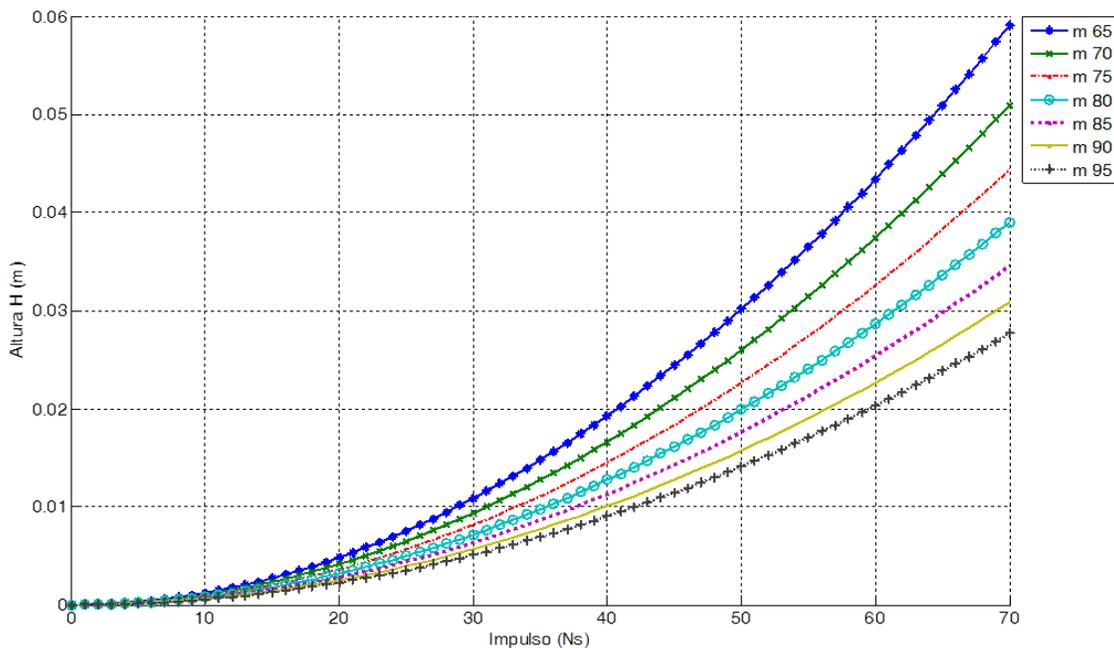


Figura 36: Recorrido en h del péndulo en función del impulso generado para diferentes masas (m en kg) de péndulo.

Seguidamente se realizó un modelo CAD del péndulo (Figura 37) para tener una masa aproximada obteniendo un valor de 73.04 kg. Con este valor se desarrolló la gráfica presentada en la Figura 38 en la que

se ilustra la variación del desplazamiento horizontal máximo alcanzado por el péndulo en función del impulso generado para diferentes alturas. Como se puede observar entre mayor sea la altura a la cual se encuentra suspendido mayor será el desplazamiento, motivo por el cual se decidió colgar el péndulo a una altura de 2.4 m.



Figura 37: Vista lateral del CAD del péndulo

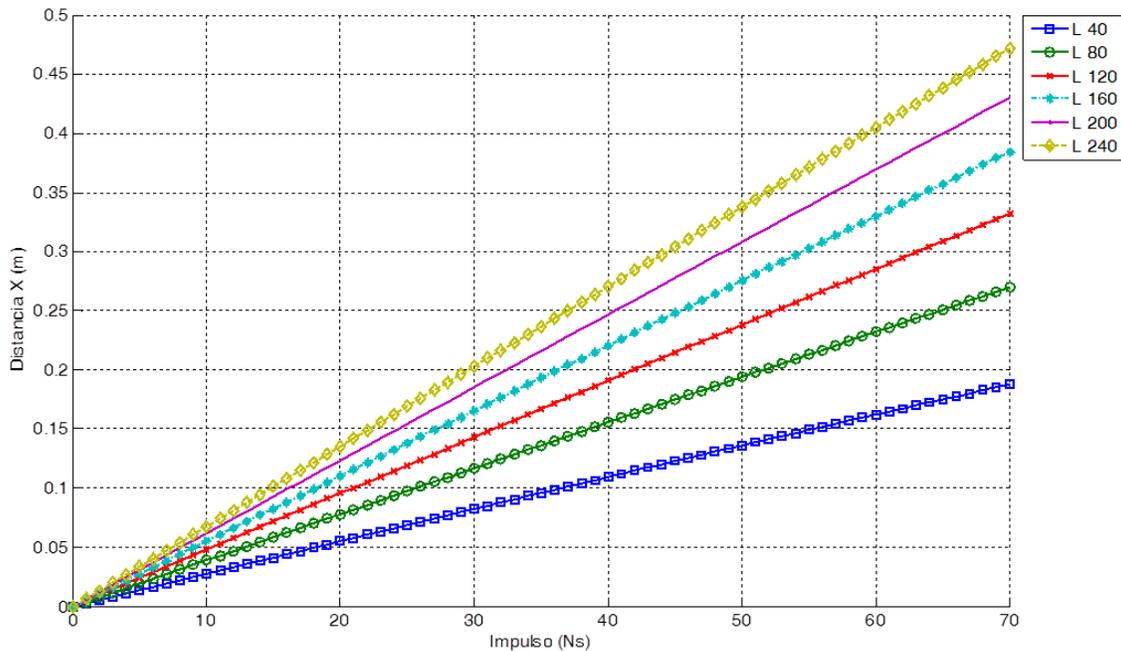


Figura 38: Recorrido horizontal del péndulo en función del impulso generado para diferentes alturas (en cm).

Como se puede observar en la Figura 38 la distancia horizontal recorrida por el péndulo es inferior a los 5 cm cuando el impulso es menor a 7.5Ns. Debido al poco desplazamiento obtenido para cargas tan bajas, se realizó un acercamiento a un rango de impulsos entre 0Ns y 4,5Ns (ver Figura 39) con el fin de conocer la diferencia de los desplazamientos y de esta manera poder seleccionar un sensor con una resolución que permita realizar dicha medición. En la Figura 39 se observa que por cada unidad que aumente el impulso el péndulo se va desplazar 7 mm por lo que el sensor que se escoja debe estar en la capacidad de medir en dicho rango con un error sistemático inferior al 10%.

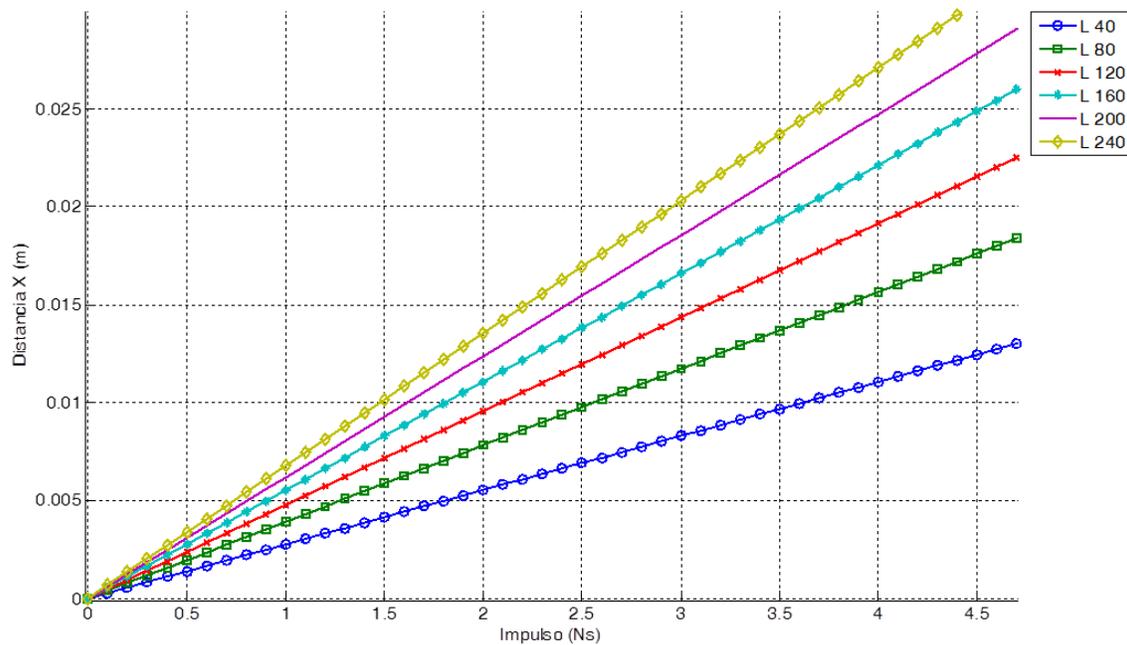


Figura 39: Acercamiento del recorrido en horizontal para impulsos de 0 a 4,5Ns para diferentes alturas.

3.1.2 Modelo computacional

Con el fin de desarrollar los modelos computacionales utilizando el software ANSYS AUTODYN con un procesador de Euler para crear el entorno de la explosión, el cual consta de aire y el explosivo, mientras que el procesador de Lagrange fue utilizado para modelar el cuerpo del péndulo. Las condiciones de frontera utilizadas fueron de tipo “outflow” para suponer un entorno infinitamente grande.

En la Tabla 5 se presentan los diferentes materiales empleados en las simulaciones con sus respectivos modelos y referencias.

Tabla 5: Materiales utilizados en las simulaciones

Material	Ecuación de Estado	Modelo Constitutivo	Modelo de Falla	Ref.
ACERO 1006	Shock	Johnson Cook		[50,51]
AIRE	Gas Ideal			[52]
TNT	Jones-Wilkins-Lee (JWL)	-	-	[53]

En la Figura 40 se presenta la geometría utilizada para el análisis, donde r representa el radio del tubo de choque. Para cada simulación se colocaron entre tres y seis galgas de presión (dependiendo del radio) con una distancia de separación de 10 mm entre sí. El objetivo de estas simulaciones es el de analizar la influencia del diámetro del tubo de choque en las presiones incidentes sobre la cara del péndulo y el impulso transmitido al mismo.

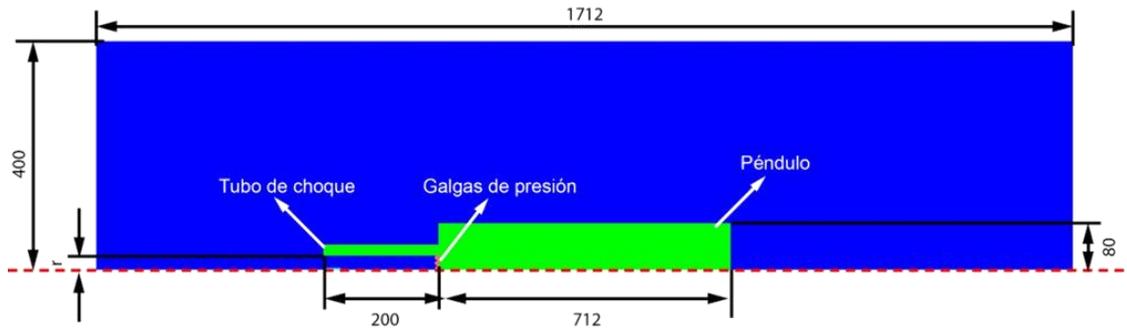


Figura 40: Geometría del modelo computacional realizado (unidades en mm).

Todas las simulaciones fueron realizadas de manera paralela a los cálculos presentados en la sección 3.1.1 haciendo uso del software ANSYS AUTODYN, en estos se implementó una simetría 2D de tipo axial por motivos computacionales; en la Figura 40 se representa el eje de rotación mediante una línea punteada.

Tabla 6: Parámetros de las simulaciones

Diámetro (mm)	# de galga	Peso del péndulo (kg)	Masa explosivo (gr) Pentrita (TNT) ⁴	Distancia de separación (Longitud del tubo de choque) (mm)
48	3	88	1.6 (1.97)	200
64	4	88	1.6 (1.97)	200
88	5	88	1.6 (1.97)	200
106	6	88	1.6 (1.97)	200

Como se puede observar el peso del péndulo es mayor al peso seleccionado en la sección 3.1.1. Esto se debe que tanto la metodología analítica como computacional fueron desarrolladas de manera paralela como se mencionó anteriormente y por lo que para este caso en particular se decidió utilizar la masa del péndulo presentada en [8]. Puesto que la variable de interés es el impulso, el cual como se mencionó anteriormente depende de manera lineal de la velocidad inicial y la masa del péndulo se encuentra que entre mayor sea la masa menor será la velocidad y viceversa por lo que el impulso se conserva y el análisis no varía.

En la Figura 41 se presenta la velocidad con la que el péndulo se desplaza en dirección horizontal. En ésta se puede observar que el cambio en el diámetro no afecta de manera significativa la velocidad del mismo. Por otro lado a partir de esa misma gráfica se puede encontrar el impulso máximo esperado, es decir, cuando no hay pérdidas de energía por deformación y/o fractura de la muestra (placa infinitamente rígida) utilizando la ecuación (19) obteniendo un valor de 4.20Ns el cual representa un desplazamiento horizontal de 2,8 cm aproximadamente.

⁴ Es importante mencionar que el poder calorífico definido en AUTODYN para el TNT es de 3,68 kJ/gr. No obstante, el valor teórico del poder calorífico del TNT es de 4.6 kJ/gr [9]. Por tal razón, se decidió aumentar la masa del TNT 1.25 veces para alcanzar el valor teórico del poder calorífico en todas las simulaciones realizadas en este trabajo. Es importante mencionar que el modelo del TNT no fue alterado: lo único que varía es que si se desea simular 1.97 gr de TNT en la realidad, se debe aumentar la masa del TNT a 2.46 gr de en el programa AUTODYN.

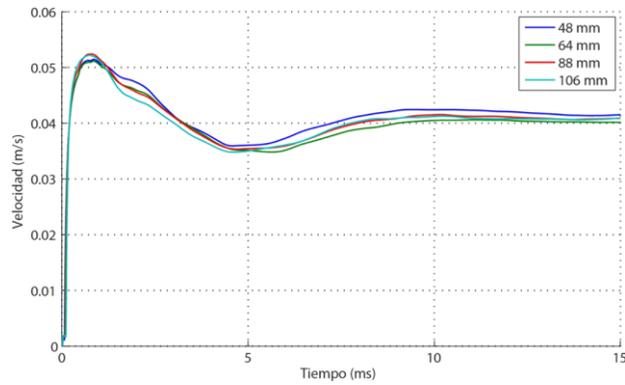


Figura 41: Velocidad horizontal del péndulo en función del tiempo

Por otro lado en la Figura 42 se presenta el perfil de presiones encontradas en cada una de las galgas de presión mencionadas anteriormente. Como se puede observar a medida que el diámetro aumenta la distribución de presiones es cada vez menos uniforme, lo cual es consecuente con lo presentado por [49]. De esta manera se decidió utilizar un diámetro interno de 48 mm.

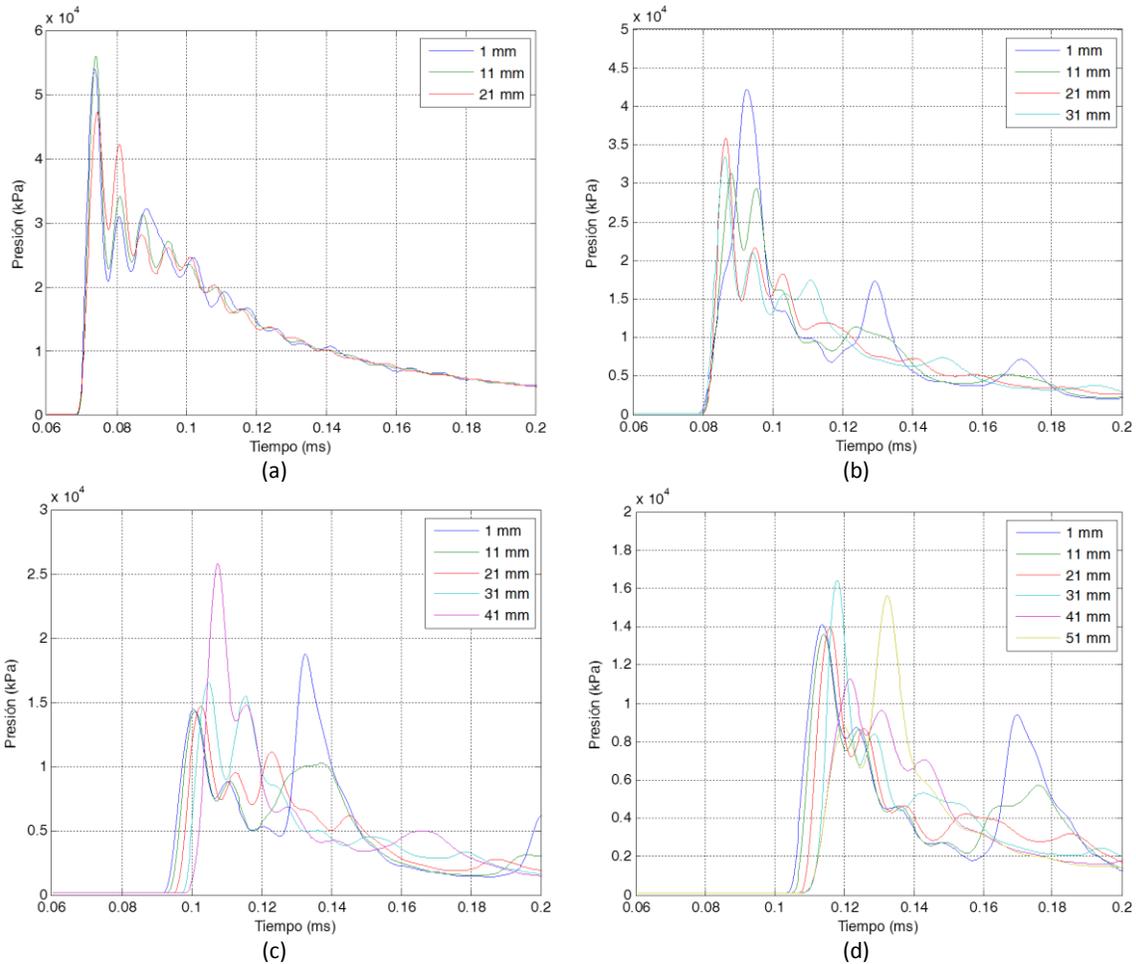


Figura 42: Distribución de presiones al interior del tubo de choque justo antes de hacer contacto con el péndulo para un diámetro de (a) 48 mm, (b) 64 mm, (c) 88 mm y (d) 106 mm.

3.2 Descripción de componentes

En la presente sección se describirán los componentes necesarios para el ensamble del péndulo balístico.

3.2.1 Estructura de soporte

La estructura de soporte, es la encargada de sostener el péndulo a una altura determinada. En la Figura 43 se presenta una vista isométrica del CAD desarrollado. Éste está compuesto por una viga HEA 200 de una longitud de 495 mm y dos placas rectangulares (largueros) de 3"x1" por 1080 mm de longitud. Estas placas son ubicadas verticalmente sobre la viga y son fijadas a la misma por medio de 4 pernos de 1/2" cada una. Para mayor información al lector por favor referirse a los planos anexos "SOPORTE PÉNDULO".

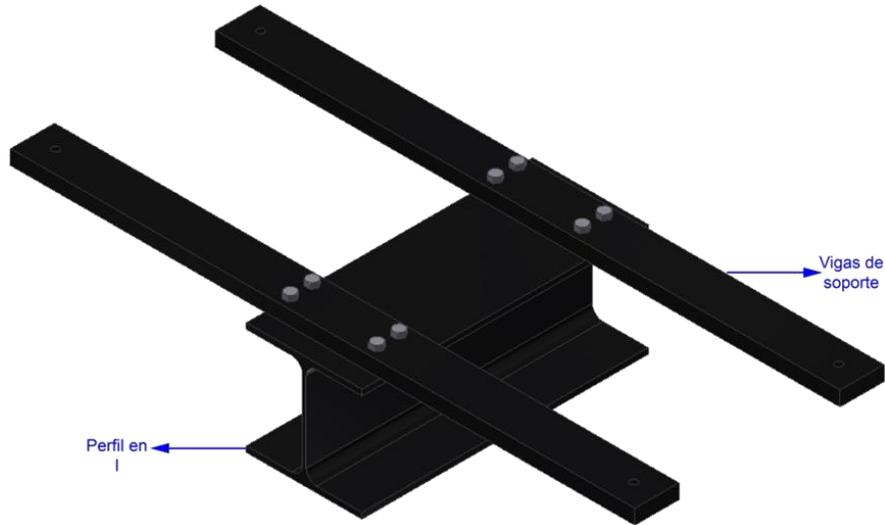


Figura 43: Vista isométrica del soporte del péndulo

La longitud de las placas fue determinada para garantizar que los cables de acero presente un ángulo de 10° como se presenta en la Figura 44, con el fin de darle estabilidad.

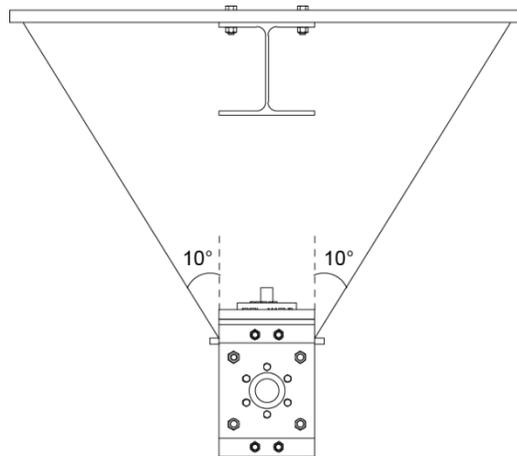


Figura 44: Representación esquemática del ángulo formado por los cables de acero (Vista frontal)

El soporte presentado será fijado mediante grapas cuadradas en la parte superior del dispositivo de medición de explosión de minas antipersonales ubicado en la fábrica de explosivos Antonio Ricaurte (FEXAR) tal y como se presenta en la Figura 45. Por otro lado, se hará uso de chasos y tensores de gancho cerrado de 1/2" y cables de acero de 3/8" para sostener el péndulo al soporte logrando que éste se encuentre suspendido a una altura de 2,4 m; como se presentó en la sección 3.1.1 entre mayor sea dicha la distancia mayor será la amplitud de oscilación (distancia horizontal) generada por el impulso de la detonación.

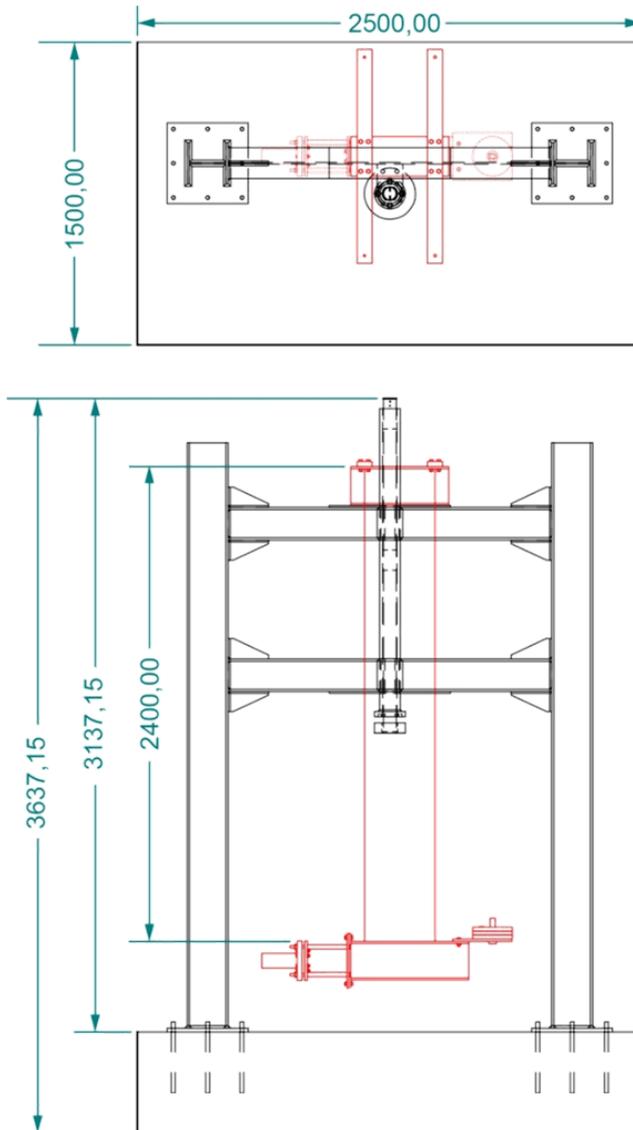


Figura 45: Vista superior y frontal de la ubicación del péndulo balístico en el dispositivo de medición de explosión de minas antipersonales

Es necesario mencionar que el dispositivo de medición de explosión de minas antipersonales consta de un contenedor de suelo, el cual debe ser removido del montaje.

3.2.2 Componentes del péndulo

En la Figura 46 se presenta el CAD del péndulo balístico diseñado. Éste consta de tres partes principalmente: el módulo de pruebas, el perfil en H y el sistema de contrapeso.

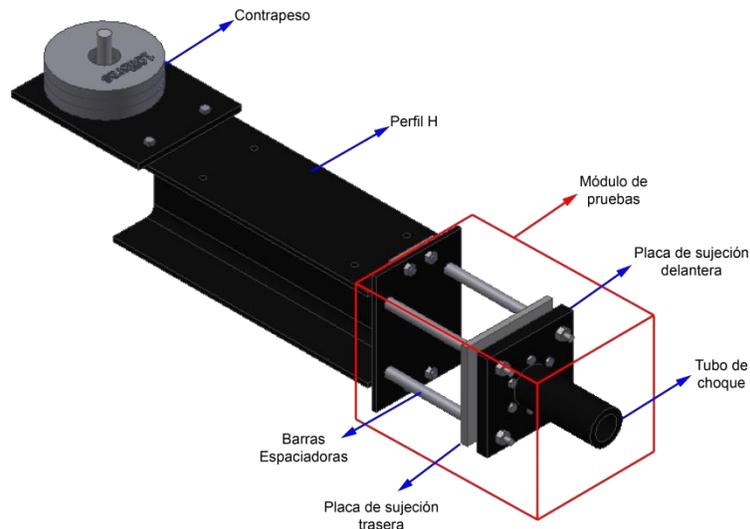


Figura 46: Vista isométrica del CAD del péndulo balístico

3.2.2.1 MÓDULO DE PRUEBAS

El módulo de pruebas se encuentra ubicado en la parte frontal del péndulo balístico y está compuesto por 4 barras espaciadoras, 2 placas de sujeción (delantera y trasera) y un tubo de choque. Las barras espaciadoras son barras de acero estructural de 7/8" de diámetro y una longitud de 200 mm con un agujero roscado de 1/2" y una profundidad de 31.8 mm. Estas barras tienen como objetivo permitir que el espécimen se deforme libremente sin ningún tipo de contacto con el perfil en I, estas deben ser lo suficientemente largas para garantizar que cuando la onda se refleje en el péndulo y se devuelva no altere los resultados.

El tubo de choque tiene un diámetro interno de 50 mm (seleccionado a partir de lo presentado en la sección 3.1.2) y un espesor de pared de 12,5 mm para soportar las cargas trabajadas sin absorber parte de la energía en deformación. El tubo de choque presenta una rosca externa (M75) de una altura de 1" para fijarlo a la placa de sujeción delantera.

En cuanto a las placas de sujeción tanto la trasera como la delantera son elaboradas en acero estructural y presentan 4 perforaciones de 1/2" en las esquinas y 6 agujeros de 3/8" en un patrón concéntrico de 50 mm de radio alrededor del centro de la placa por medio de los cuales se fijara la muestra. La diferencia entre estas dos placas radica en el diámetro del agujero ubicado en el centro geométrico de las mismas, siendo de 50 mm para la placa trasera (debe ser igual que el diámetro interno del tubo de choque) y de 75 mm para la placa delantera; éste último debe ser roscado para fijar el tubo de choque.

3.2.2.2 PERFIL EN H

Esta sección del péndulo está compuesto de un perfil HEA 200 de una longitud de 595 mm, una placa base y una placa de fijación, ésta presenta 6 perforaciones de 1/2". La placa base es una placa de acero estructural de 3/8" de espesor, 100 mm de ancho y 275 mm de longitud, ésta se encuentra unida al perfil mediante soldadura E7018 y presenta 4 perforaciones de 1/2" en los extremos. Es necesario mencionar que esta placa debe estar perfectamente alineada con el perfil. Por otro lado la placa de fijación es una placa de acero

estructural de 3/8" de espesor, 200 mm de ancho y 275 mm de longitud, ésta presenta 8 perforaciones de 1/2". Para más información consultar los planos anexos "PÉNDULO"

3.2.2.3 CONTRAPESO

La parte de contrapeso está compuesta de una placa de acero estructural de 1" de espesor, 240 mm de ancho y 296 mm de longitud. En el medio presenta una ranura de 120 mm de longitud la cual permite variar la ubicación de las masas y de esta forma cambiar el momento ejercido sobre el péndulo con el fin de balancearlo; además, Tiene 2 agujeros de 1/2" para fijarla al perfil en H. Se disponen de 3 masas de 10 lb y 3 masas de 2.5 lb. Se debe mencionar que la cantidad y ubicación de estas varía según el peso de las muestras a ser probadas. Para fijar y alinear las pesas se utiliza una barra roscada de 1".

3.3 Variables de experimentación

En la Figura 47 se presenta un esquemático del movimiento del péndulo y la nomenclatura que se utilizará para poder encontrar el impulso transmitido al péndulo balístico a partir de la ecuación de movimiento. Para la implementación de esa ecuación se debe incluir un término asociado al amortiguamiento viscoso producto del medio que lo rodea (aire y efectos gravitacionales); dicha expresión es representada por de Borbon et al [54] en su texto de la siguiente manera:

$$\ddot{X} + 2\beta\dot{X} + \omega_n^2 X = 0 \quad (22)$$

donde $\beta = \frac{C}{2M}$, $\omega_n = \frac{2\pi}{T}$ y $\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \beta^2}$ siendo C el coeficiente de amortiguamiento, M la masa total del péndulo incluyendo el módulo de pruebas, el perfil en I y las masas del contra peso y T el periodo natural del péndulo, el cual es determinado al promediar las oscilaciones registradas del péndulo. De esta manera se obtiene que:

$$X = \frac{e^{-\beta t} \dot{x}_0 \sin(\omega_d t)}{\omega_d} \quad (23)$$

en la que \dot{x}_0 es la velocidad inicial del péndulo.

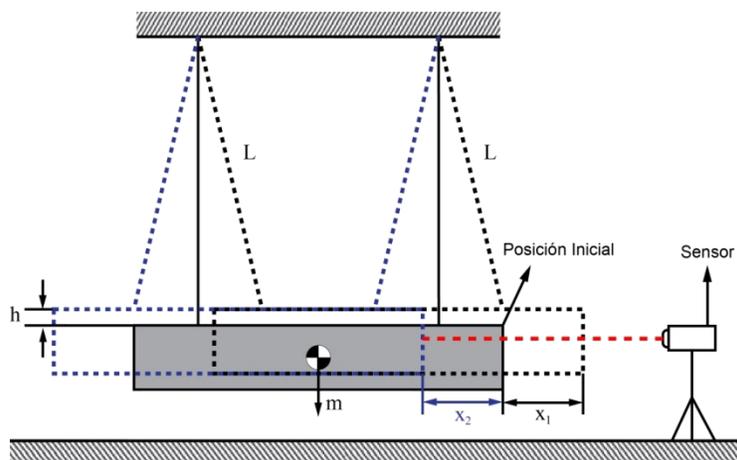


Figura 47: Representación esquemática del péndulo.

Si se asume que el desplazamiento x_1 (desplazamiento máximo en sentido positivo) ocurre en el tiempo $t = \frac{T}{4}$ y el desplazamiento x_2 (desplazamiento máximo en sentido negativo) en $t = \frac{3T}{4}$ se encuentra que:

$$x_1 = \frac{\dot{x}_0 T}{2\pi} e^{-0.25\beta T} \quad (24)$$

$$x_2 = \frac{\dot{x}_0 T}{2\pi} e^{-0.75\beta T} \quad (25)$$

por lo tanto

$$\frac{x_1}{x_2} = e^{0.5\beta T} \quad (26)$$

de esta forma se puede obtener la constante de amortiguamiento (β) mediante los desplazamientos x_1 y x_2 encontrados a partir de las mediciones de la siguiente manera

$$\beta = \frac{2}{T} \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \quad (27)$$

Con dicha relación es posible determinar la velocidad inicial del péndulo mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{x}_0 = \frac{2\pi}{T} x_1 e^{0.25\beta T} \quad (28)$$

Por lo que el impulso puede ser calculado a de la siguiente manera:

$$I = M\dot{x}_0 \quad (29)$$

Por lo presentado anteriormente se concluye que las variables de experimentación son las amplitudes de oscilación horizontal del péndulo (x_1 y x_2) y el periodo natural del mismo (T), ya que partir de éstas se puede calcular la constante de amortiguamiento (β), la velocidad inicial (\dot{x}_0) y el impulso transmitido al dispositivo de medición producto de la detonación de un artefacto explosivo

3.4 Medición e instrumentación

En la presente sección se presentan los equipos necesarios para realizar la medición de las variables mencionadas previamente en la sección 3.3.

3.4.1 Sensor de desplazamiento óptico (Sistema de medición principal)

El desplazamiento es medido usando un sensor óptico de desplazamiento OADM de la empresa BAUMER. Este permite conocer el desplazamiento horizontal del péndulo en cada instante de su oscilación. El sensor óptico de desplazamiento se muestra en la Figura 48.



Figura 48: Sensor óptico de desplazamiento OADM de BAUMER

Este sensor tiene una salida análoga que está relacionada con la intensidad de luz que llega al receptor de voltaje DC de 0 a 28 VDC. Tiene una capacidad máxima de salida de 20mA. El tiempo de respuesta de este sensor es de 0.9 ms permitiendo obtener todo el recorrido generado por la oscilación. Para ubicar el sensor es necesario tener una base independiente con la que se pueda modificar la altura del mismo y la distancia al objetivo

3.4.2 Adquisición de datos

La adquisición de datos es realizada mediante una tarjeta de adquisición de datos 9219 de *National Instruments* [55] (ver Figura 49). Esta consta de un módulo de 4 canales, con el que es posible medir varias señales de sensores como galgas extensiométricas, sensores de temperatura, celdas de carga, de desplazamiento y de presión. Los canales de este módulo pueden ser seleccionados individualmente permitiendo así que se pueda realizar un tipo de medida diferente en cada uno de los cuatro canales. Los rangos de medida difieren para cada tipo de medición pero se encuentran en el rango ± 60 V para voltaje y ± 25 mA para corriente. Las mediciones adquiridas con este módulo de adquisición de datos, serán visualizados en un computador que se encuentra en el campo de pruebas. La frecuencia máxima de adquisición de estas tarjetas es de 100Hz.



Figura 49: Módulo de adquisición de datos NI 9219

El campo de pruebas cuenta con una estación de trabajo, ubicada en un container ubicado aproximadamente a 30 metros del centro de las detonaciones. En esta estación de trabajo (Figura 50), se tiene un computador con una tarjeta de adquisición de datos (NI9219) para registrar las variables medidas y una fuente de voltaje. Se usa cable blindado para hacer la transmisión electrónica desde los sensores puestos en el dispositivo hasta la adquisición realizada en la estación de medición. Para mantener las condiciones de seguridad, el personal no debe permanecer en la estación durante las detonaciones y éste debe refugiarse en un sitio dispuesto para ello ubicado aproximadamente a 50 metros del centro de detonación.



Figura 50: Estación de medición

3.4.3 Registro en video (Sistema de medición secundario)

Con el ánimo de tener un segundo sistema de medición y verificar los datos obtenidos mediante la medición realizada con el sensor de desplazamiento óptico se sitúan 2 cámaras de video para grabar el evento explosivo. Una de ellas, enfoca directamente a la cinta métrica (Figura 51) cuyo 0 debe estar alineado con el extremo posterior del péndulo para poder conocer mediante un análisis de imágenes la magnitud del recorrido total del mismo. De esta forma, para que una medición sea considerada como válida, el error entre el desplazamiento encontrado mediante el sensor óptico y la cámara de video no debe exceder el 5% (se toma el mismo error que se ha trabajado para el péndulo gravitacional). La segunda cámara registra una vista panorámica del evento explosivo. Las cámaras utilizadas tienen una frecuencia de adquisición de 30 fps para la cámara fotográfica (vista panorámica) y de 60 fps para la cámara de video (vista detallada del desplazamiento vertical).

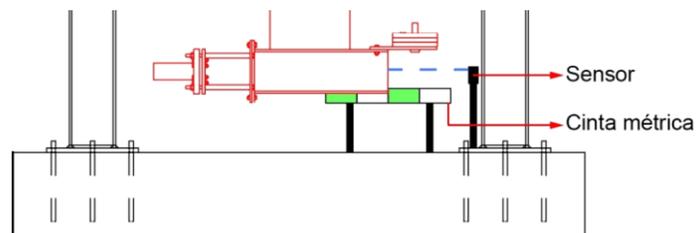


Figura 51: Ubicación del sensor y de la cinta métrica

3.5 Resumen

El capítulo anterior presenta la revisión bibliográfica del péndulo balístico. Además, describe detalladamente el proceso de diseño (tanto analítico como computacional) realizado para la elaboración del mismo con el cual se llevarán a cabo las pruebas dinámicas de los materiales estudiados. De la misma manera se presenta la descripción de los componentes que conforman el sistema, así como los instrumentos de medición necesarios y la forma de adquisición de los datos.

4 METODOLOGÍA

Con el propósito de caracterizar las espumas utilizadas durante esta investigación se realizaron diferentes pruebas tanto en condiciones cuasi estáticas (tasas de deformación de 10^{-2} - 10^0s^{-1}) como dinámicas (tasas de deformación de $10^4 - 10^6 \text{s}^{-1}$). El material poroso utilizado durante la presente investigación es un espumado de celda abierta de poliuretano disponible comercialmente y fabricado por la empresa Espumados S.A. cuya geometría variará según la prueba y se presentará en la sección correspondiente. La espuma presenta una densidad de 17 kg/m^3 . Por otro lado, el STF que se va a utilizar para impregnar dicho espumado fue desarrollado en la Universidad de los Andes compuesto por nano-partículas de sílice con un diámetro promedio de 500nm y una concentración volumétrica del 58.13 %.

4.1 Pruebas cuasi estáticas

En la presente sección se presentan las pruebas cuasi estáticas desarrolladas durante la experimentación.

4.1.1 Compresión uniaxial

El procedimiento experimental que aquí se presenta está basado en la norma ASTM D3574-11 con modificaciones en cuanto al número de probetas y sin la compresión previa que se debe realizar conforme se indica en la misma. Para el presente caso se toma una muestra por cada tasa de deformación unitaria según se presenta en la Tabla 7 con el fin de evaluar la tendencia en el comportamiento del material compuesto. En cuanto a la compresión previa, esta no se realizará debido a que, al tener las muestras de espuma impregnada con STF, el nano-compuesto va a fluir fuera de la espuma y por lo tanto no se va a tener una lectura correcta del comportamiento de este sistema para ser comparado con la espuma sin impregnación.

Tabla 7: Cuadro de pruebas para compresión

Material	Tasa de deformación (s^{-1})	Material	Tasa de deformación (s^{-1})
PU	1×10^{-3}	PU+STF	1×10^{-3}
PU	3.1×10^{-2}	PU+STF	3.1×10^{-2}
PU	6.2×10^{-2}	PU+STF	6.2×10^{-2}
PU	1.2×10^{-1}	PU+STF	1.2×10^{-1}
PU	3.1×10^{-1}	PU+STF	3.1×10^{-1}

Las tasas de deformación unitaria ($\dot{\epsilon}$) presentadas en la Tabla 7 fueron determinadas al convertir la velocidad de compresión de la prueba mediante la ecuación (30) (donde v_c es la velocidad de compresión y h_p es la altura de la probeta) con las velocidades de operación de 2mm/min, 50mm/min, 100mm/min, 200mm/min y 500mm/min.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_c}{h_p} \quad (30)$$

Las probetas empleadas tienen un área transversal de 50x50mm y una altura de 27mm. La máquina utilizada para caracterizar las espumas de poliuretano impregnadas con STF, corresponde a una INSTRON 3367 con capacidad de 30kN de carga como se presenta en la Figura 52.

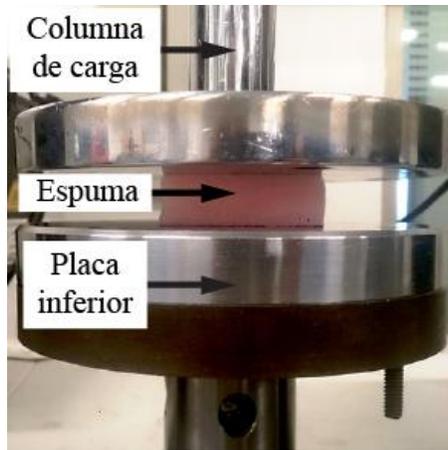


Figura 52: Fotografía de la prueba de compresión

4.1.2 Compresión uniaxial confinada

Debido a que los materiales porosos se encuentran generalmente contenidos dentro de una estructura para aumentar su capacidad de absorber energía fue necesario realizar pruebas de compresión utilizando un contenedor que impida la deformación a los costados de la muestra debido al efecto de Poisson. Con tal propósito se utilizó el procedimiento experimental planteado en diferentes artículos [56,57]. Los parámetros desarrollados para esta prueba son los mismos a los presentados en la Tabla 7. Sin embargo, es necesario aclarar que para este ensayo se desarrollo una repetición para cada tasa.

Las probetas empleadas para la presente prueba tienen una geometría cilíndrica de 18.8mm de diámetro y una altura de 27mm. Se utilizó la máquina INSTRON 3367 con una capacidad de carga de 30kN, de acuerdo al montaje presentado en la Figura 53. En dicha figura se presenta el confinamiento de acero el cual impide a la espuma expandirse en sentido radial; además, se puede observar una cinta de Teflón en el montaje, la cual rodeará la muestra y ayudará a reducir la fricción durante el experimento.

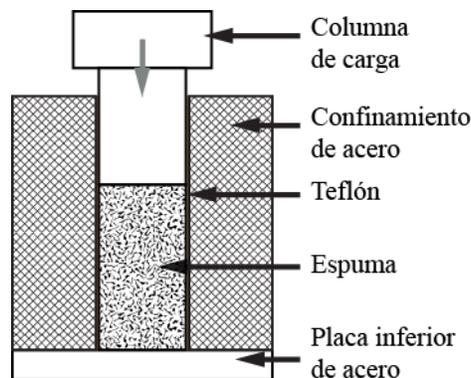


Figura 53: Esquemático de la prueba de compresión confinada.

4.1.3 Cortante simple

Con el propósito de determinar el módulo de cortante de los materiales utilizados se trabajó bajo la norma ISO 1827 con las modificaciones presentadas en [32,33]. Las muestras tienen una geometría rectangular de 27x20x6mm y fueron adheridas con cianocrilato en las dos caras a unas superficies rígidas de acero como se presenta en la Figura 54.

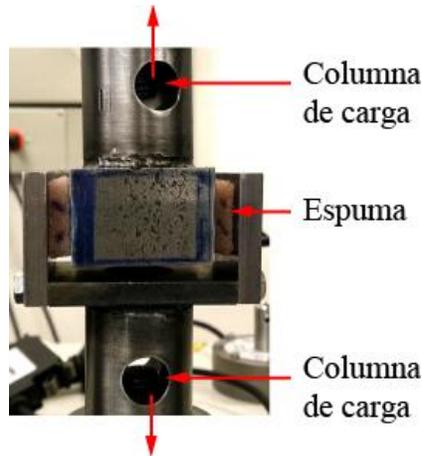


Figura 54: Fotografía de la prueba de cortante.

Diferentes condiciones de carga fueron trabajadas (4mm/min, 100mm/min, 300mm/min y 500mm/min) con el ánimo de determinar el comportamiento del módulo cortante de las muestras ante la tasa de deformación. En la Tabla [tab:Cuadro-de-pruebas-compres-1-1] se presentan las diferentes tasas de deformación utilizadas en la prueba. En este punto es necesario aclarar que para cada una de las pruebas planteadas se realizó una repetición.

Tabla 8: Cuadro de pruebas para cortante

Material	Tasa de deformación (s ⁻¹)	Material	Tasa de deformación (s ⁻¹)
PU	3.0x10 ⁻³	PU+STF	3.0x10 ⁻³
PU	8.3x10 ⁻²	PU+STF	8.3x10 ⁻²
PU	2.5x10 ⁻²	PU+STF	2.5x10 ⁻²
PU	4.2x10 ⁻¹	PU+STF	4.2x10 ⁻¹

4.2 Pruebas dinámicas

A continuación se presenta el equipo utilizado y las pruebas desarrolladas para llevar a cabo la experimentación de los materiales en condiciones dinámicas.

4.2.1 Montaje de calibración

En la Figura 55 se presenta el esquemático del montaje para la calibración del péndulo. Para la calibración se utilizará una placa de acero estructura de ½" de espesor la cual será la encargada de recibir toda la energía producto de la detonación del explosivo; dado que dicha placa es rígida se asegura que toda la energía producida por el explosivo sea transmitida al péndulo sin presentar pérdidas asociadas a la deformación de la muestra. Dicha placa se asegura al módulo de pruebas mediante 6 pernos de 3/8". La masa total del péndulo es de 73.04 kg incluyendo la placa de calibración.

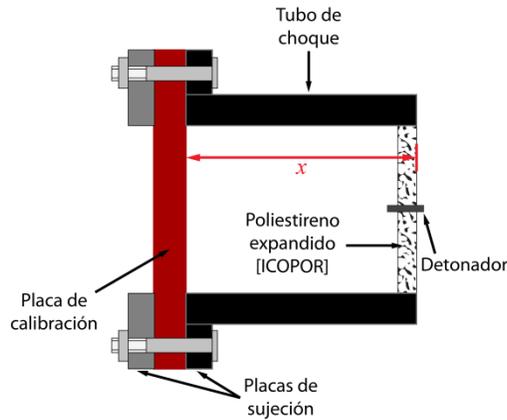


Figura 55. Esquemático del montaje de calibración.

Los parámetros utilizados para la prueba de calibración son presentados en la Tabla 9. La distancia de separación fue estimada mediante el uso de herramientas computacionales para garantizar que la onda de choque llegara lo más plana posible.

Tabla 9. Parámetros para las pruebas de calibración.

Parámetros de la prueba	Detalles
Distancias de separación trabajadas (mm)	100, 150, 200
Repeticiones para cada distancia	2
Diámetro de exposición del espécimen (mm)	50
Carga de PETN (g)	0.8
Diámetro de la carga (mm)	6.2±0.05
Longitud de la carga (mm)	45±0.5

4.2.2 Montaje de pruebas para espumas con y sin STF

En la Figura 56 se presenta el esquemático del montaje de pruebas para el análisis del comportamiento de las espumas poliméricas con y sin STF. Por la naturaleza elastomérica de las muestras utilizadas es necesaria la implementación de una placa de aluminio tanto frontal y una posterior con un espesor inferior a 2mm [46] para que la espuma pueda absorber parte de la energía generada por el evento en el compuesto y no salga eyectada del módulo de pruebas, pues al presentar una rigidez tan baja, la onda de choque desprendería por cortante la muestra del módulo y no se podría obtener información sobre la cantidad de energía absorbida por la misma. Estas placas serán adheridas a la muestra utilizando Sikaflex 220 para asegurar que la deflexión encontrada en éstas sea la misma que la sufrida por el núcleo (espuma con STF).

Las dimensiones de las muestras de espuma de poliuretano presentan un diámetro de 60 mm y un espesor variable; la mitad de los especímenes serán impregnados totalmente con STF con una concentración (fracción de volumen) del 58.13% (como se presenta en [11]) mientras que la otra mitad se dejará sin impregnar para comprar posteriormente los resultados y analizar la influencia del STF en el impulso transmitido.

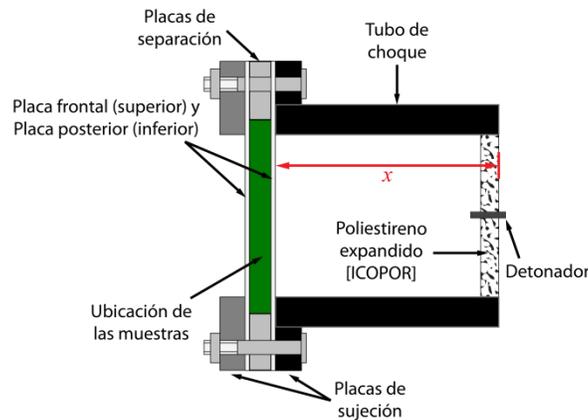


Figura 56. Esquemático del montaje de pruebas

Adicionalmente, en la Figura 56 se puede observar la presencia de placas de separación con las cuales se fija la distancia entre las placas de sujeción cuando las muestras tienen muy poca rigidez o cuando se dispone de poco material para ser atornillado a dichas placas, de esta manera se garantiza que la muestra soporte toda la carga de la detonación sin verse afectada por presiones producidas al apretar demasiado el espécimen.

Debido a que hasta la fecha no existe un estudio sistemático para investigar la influencia del núcleo (espuma con y sin STF) en la resistencia contra explosiones no se puede estimar de manera estadística el número de experimentos que se debe llevar a cabo, sin embargo en la literatura se encuentran estudios en los que se utilizan 1 espécimen para cada prueba [46] no para encontrar un intervalo de confianza de las pruebas sino una tendencia del comportamiento de las mismas. Como primera aproximación se deciden utilizar 2 repeticiones por cada distancia de separación. Los parámetros utilizados para la prueba de espuma con STF son presentados en la Tabla 10. Las distancias de separación fueron determinadas a partir de la literatura y mediante el uso de herramientas computacionales para garantizar que la onda de choque llegara lo más plana posible.

Tabla 10. Parámetros para las pruebas de espuma con y sin relleno de STF.

Núcleo	Repeticiones	DS (mm)
Espuma	2	200
	2	150
	2	100
STF	2	200
	1	150
	2	100

4.3 Modelaje computacional

En esta sección se presenta la metodología desarrollada para el modelaje computacional del péndulo balístico, incluyendo los parámetros de calibración, y las suposiciones desarrolladas.

4.3.1 Calibración

En la Figura 57 se presenta la geometría del modelo computacional desarrollado para la calibración. A partir de las pruebas desarrolladas en la sección XX se obtendrá el impulso transmitido a una placa rígida, el cual ayudará a realizar una correcta calibración del tamaño del entorno y la malla Euleriana.

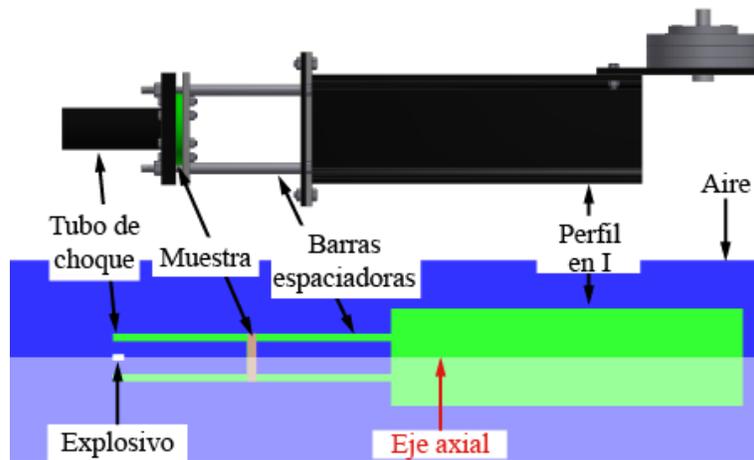


Figura 57: Configuración para el modelo de calibración

El tubo de choque, las barras espaciadoras y el perfil en I son desarrollados con acero 1006 y modelados con un solucionador Lagrangiano, mientras que el entorno compuesto por aire (a una atmósfera de presión) y la carga explosiva son modeladas con una formulación Euler. Las interacciones del tipo “polygon free couple” son seleccionadas, mientras que la condición de “Flow out” se colocó en los bordes del aire. Todos los materiales implementados en esta sección fueron tomados de la librería por defecto de Autodyn; por lo que el desarrollo de dichos modelos no se expone en este estudio.

Por otra parte, aunque el explosivo utilizado en la experimentación es PETN, en la simulación numérica se utiliza TNT debido a la confiabilidad obtenida con este modelo en estudios anteriores. Para esto se debe implementar un equivalente en TNT para el PETN. Sin embargo, los valores de equivalencia encontrados en la literatura varían entre 0.9 y 1.72 [58]. Por esta razón se lleva a cabo un proceso iterativo con diferentes valores de equivalencia hasta encontrar el valor correcto de impulso transmitido. En este punto es necesario mencionar que el poder calorífico del modelo de TNT en Autodyn 3.68kJ/g, mientras que el valor teórico para dicho parámetro es de 4.6kJ/g, por lo que es necesario incrementar la masa de TNT del modelo de Autodyn en 1.25 veces hasta alcanzar el valor teórico. De esta manera para lograr el valor esperado de impulso transmitido una masa de 1.63g de TNT en Autodyn fue utilizada, lo que equivale a 1.09g de TNT real (de acuerdo a lo expuesto anteriormente). Finalmente se selecciona una equivalencia de 1.46 para PETN con el fin de obtener una masa de 0.8g de PETN.

4.3.1.1 TAMAÑO DEL ENTORNO

Con el propósito de seleccionar un tamaño de entorno adecuado 3 diferentes entornos fueron evaluados con el fin de observar la influencia del mismo en el impulso transmitido. En la Figura 58 se presentan los tamaños seleccionados. Como se puede observar en la Figura 58a el entorno seleccionado no cubre en su totalidad el péndulo balístico mientras que para la Figura 58b y la Figura 58c este si cubre todo el entorno pero se alejan las fronteras del mismo para que no afecte los resultados. El tamaño de malla para el entorno Euleriano es de 2mm mientras que para el péndulo balístico se utilizó un tamaño de malla de 4mm. En este punto es necesario mencionar que la geometría del péndulo no varía para ninguno de los casos estudiados.

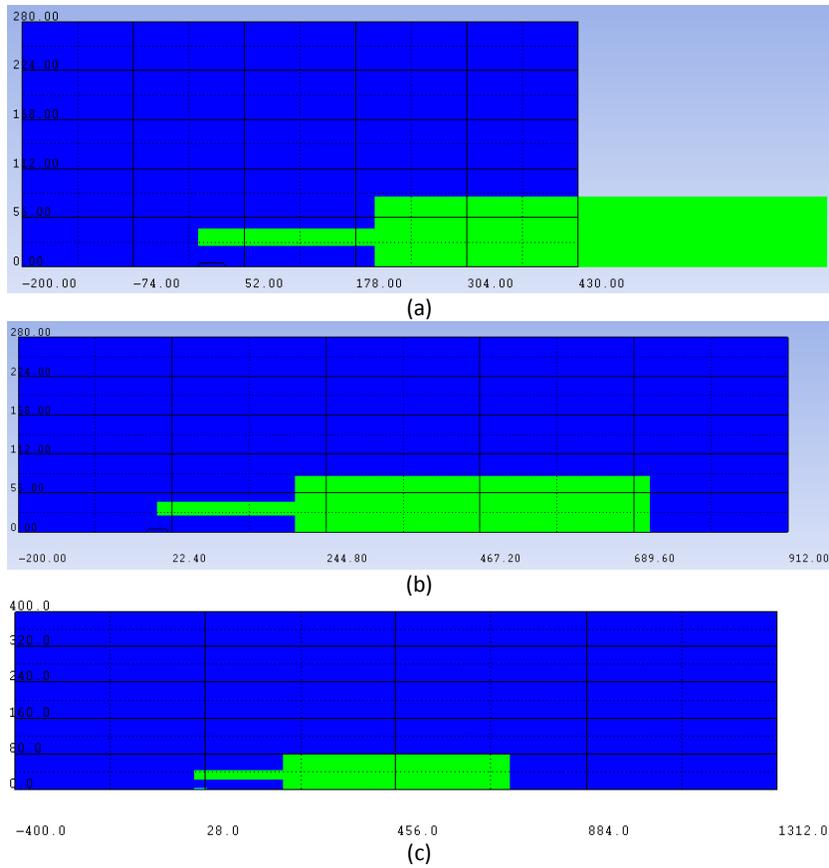


Figura 58: Tamaños de entorno trabajados (a) pequeño, (b) mediano y (c) grande

4.3.1.2 TAMAÑO DE MALLA

En esta sección se estudia la influencia del tamaño de malla en el frente de onda generado por la detonación del explosivo. Dado que se desea tener un frente de onda uniforme este parámetro se convierte en un caso de estudio importante para el presente estudio. Dos tamaños de malla fueron utilizados (2mm y 0.2mm) implementados en el tamaño de entorno grande (ver Figura 58).

4.3.1.3 POSICIÓN DEL DETONADOR

Dado que la carga explosiva utilizada en la experimentación es el detonador implementado para explotar las cargas más grandes en INDUMIL no se conoce la influencia de la ubicación del detonador en los resultados obtenidos. Además en la literatura no se ha encontrado un estudio sobre el efecto este parámetro en el fenómeno de explosión, motivo por el cual es necesario realizar dicho estudio.

En la Figura 59 se presentan las tres configuraciones implementadas en el entorno grande con una malla de 0.2mm para estudiar su efecto en la energía transmitida. Las suposiciones utilizadas para estas tres configuraciones son:

- La detonación es generada por una carga puntual en el medio de la carga explosiva.
- La detonación es generada en el extremo del explosivo por una carga puntual.
- La detonación se generada en el extremo por una carga lineal

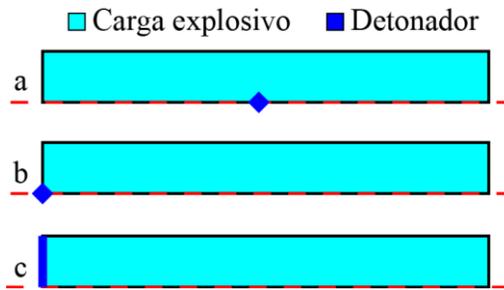


Figura 59: Disposiciones del punto de detonación

Aunque existen otras opciones para generar un detonador estas fueron las más adecuadas de acuerdo a la geometría del explosivo trabajado.

4.3.2 Modelo del sándwich

En la Figura 60 se presenta la configuración de la simulación numérica de los paneles tipo sándwich. La geometría y el material del tubo de choque, las barras espaciadoras, el perfil en I y el entorno son los mismos que los utilizados en el modelo de calibración. Las láminas/placas de aluminio están hechas con aluminio 6061-T6 seleccionado de la librería por defecto de Autodyn y modelado por un solucionador ALE para grandes elongaciones. El panel tipo sándwich es colocado en lugar de la placa de muestra hecha en acero. En este punto es importante mencionar que un espacio de 0.033mm fue colocado entre la placa de aluminio y el tubo de choque para permitir el mismo desplazamiento encontrado en la experimentación. Por otro lado para analizar la influencia de la separación de la placa frontal del tubo de choque utilizaron dos configuraciones diferentes; en la primera (Figura 60a) se implementa un conector de acero 1006 modelado con un solucionador Lagrangiano entre el tubo de choque y las barras espaciadoras para impedir el desplazamiento del tubo de choque en la dirección contraria. El mismo espacio de separación es utilizado entre las placas de aluminio y el conector. En la segunda configuración se permite el libre desplazamiento del tubo de choque (Figura 60b). Las otras partes que componen el modelo son unidas para no permitir la separación.

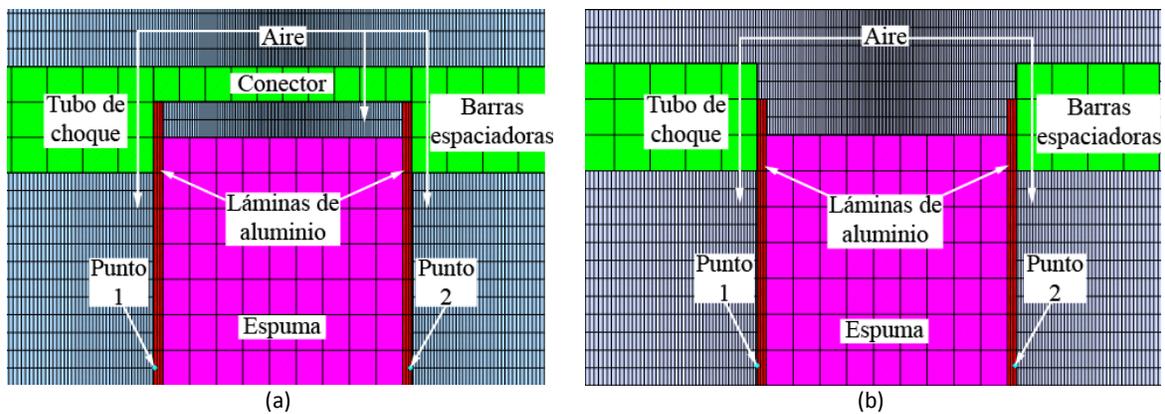


Figura 60: Configuración del modelo del sándwich para el núcleo de espuma de poliuretano (a) con conector y (b) sin conector.

Las variables analizadas en esta sección incluyen el impulso transmitido del acero, la deflexión del punto medio de la placa posterior de aluminio (Punto 2), y la tasa de deformación (Punto 1). El núcleo del

sándwich está compuesto por el modelo de espuma de poliuretano con y sin rellenar. El desarrollo para dicho modelo se menciona en las secciones siguientes.

4.3.2.1 MODELO DE ESPUMA DE POLIURETANO

Con el propósito de modelar la espuma de poliuretano se utiliza el modelo constitutivo de Ogden's Hyperfoam para materiales hiperelásticos. Para este modelo la ecuación de estado de Hiper elasticidad debe ser implementado. En la Tabla 11 se presentan los valores utilizados para dicha EOS los cuales fueron obtenidos en la literatura.

Tabla 11: Variables para la ecuación de estado de Hiper elasticidad

Variable	Valor	Ref.
Temperatura de referencia (K)	293	
Calor específico (J/kgK)	1650	[2]
Conductividad térmica (W/mK)	0.025	[2]

Como se mencionó en la sección 2.7.2.2 los parámetros del modelo constitutivos se obtienen a partir de un ajuste a la curva de compresión de esfuerzo deformación.

4.3.2.2 MODELO DE ESPUMA DE POLIURETANO RELLENA DE STF

Debido a que las tasas de deformación obtenidas de forma experimental utilizando la máquina de ensayos Instron no son lo suficientemente altas para lograr la activación del STF, el modelo propuesto para este material será una integración de los métodos encontrados en la literatura.

En su artículo Petel et al [59] brinda la información necesaria para desarrollar la ecuación de estado de Shock. Este método es uno de los más utilizados en las simulaciones numéricas y se basan en las ecuaciones de Rankine-Hugoniot, las cuales determinan los estados del material antes y después del frente de choque. Como se mencionó en la sección 2.7.1.1 a partir de la regresión lineal de velocidad de partícula contra velocidad de la onda se pueden obtener los valores necesarios para desarrollar dicho modelo.

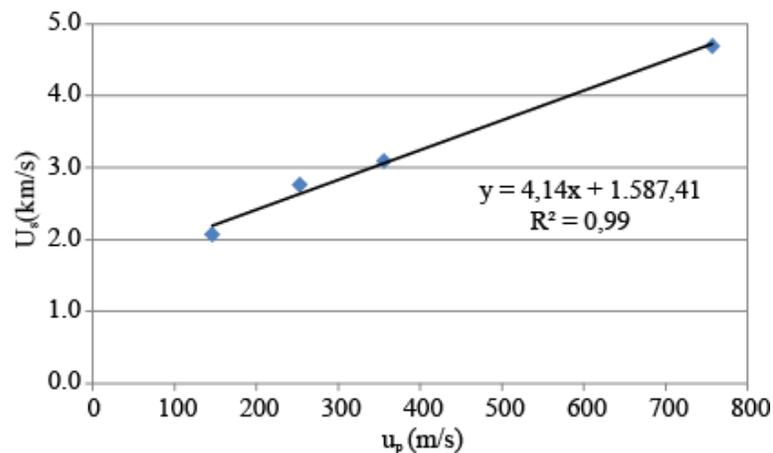


Figura 61: Regresión lineal de u_p vs U_s para los valores experimentales adquiridos en [59] para el STF.

La Figura 61 presenta la regresión lineal obtenida para los valores suministrados. En esta se encuentra que los valores de C and S son 1587.41m/s y 4.14 respectivamente. Para el modelo computacional es necesario tener en cuenta el comportamiento de la espuma, ya que, aunque las investigaciones desarrolladas han demostrado que a altas tasas de deformación el comportamiento de la espuma rellena con STF depende

más de las propiedades del STF que de la espuma, la influencia del aire en la atenuación de la onda de choque es una variable importante la cual debe ser tomada en cuenta así como el comportamiento hiperelástico de la espuma

A partir de los datos experimentales es posible encontrar que la espuma impregnada con STF está compuesta (en peso) por un 93% de STF y un 7% de espuma de poliuretano. Con el propósito de observar la influencia de la distribución de los elementos llenados, cinco configuraciones diferentes son evaluadas (en términos de la deflexión del punto medio) sin modificar el tamaño de los elementos, pues el tiempo computacional requerido para estudiar la influencia de este parámetro era muy alto. Las configuraciones seleccionadas mantienen el mismo peso final del núcleo y presentan diferentes suposiciones i.e. la aglomeración del STF en la parte frontal y posterior del núcleo o distribuciones uniformes para reducir el efecto de la impedancia. La Figura 62 presenta las configuraciones evaluadas. La Figura 62a presenta la configuración 1 con la nomenclatura de color que se utiliza para las otras configuraciones.

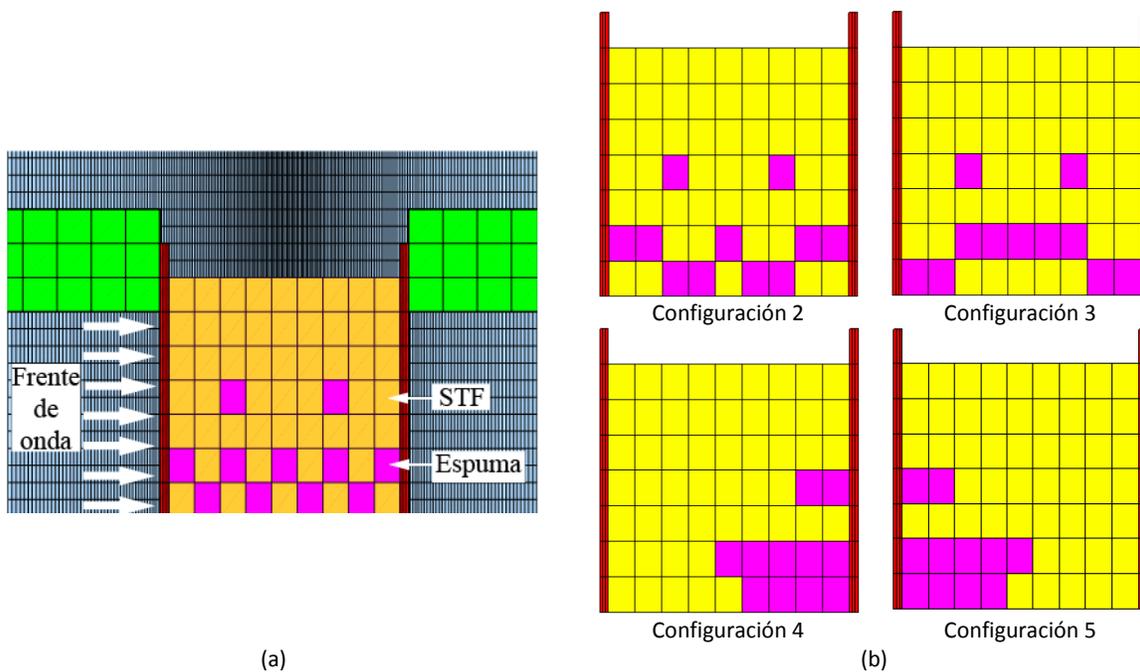


Figura 62: Distribución del modelo de espuma de poliuretano con y sin relleno de STF para (a) la configuración 1 con la nomenclatura de color y (b) las otras configuraciones.

4.4 Resumen

En este capítulo se presentó toda la metodología utilizada para la caracterización, evaluación y modelaje de la espuma elastomérica de poliuretano de celda abierta con y sin impregnar. Las pruebas cuasi estáticas se llevaron a cabo en la máquina de ensayos universales Instron 3367 mientras que las pruebas dinámicas se desarrollaron por medio del péndulo balístico descrito en el capítulo 3. Por último se presentan las consideraciones y variables realizadas para el desarrollo de un modelo computacional que permita describir el comportamiento de dichos materiales ante ondas de choque generadas por la detonación de un explosivo.

5 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los resultados obtenidos para los procedimientos experimentales y computacionales son presentados en la siguiente sección.

5.1 Pruebas experimentales

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos, los cuales se utilizarán para caracterizar el material y obtener diferentes parámetros que permitan desarrollar los modelos numéricos de los materiales estudiados.

5.1.1 Compresión uniaxial sin confinar

Los datos obtenidos experimentalmente de la compresión uniaxial sin confinar son presentados en la Figura 63. La Figura 63a presenta los resultados de la espuma sin impregnar, en la que es posible evidenciar el comportamiento característico de una espuma elastomérica de celda abierta exhibiendo una región elástica seguida por un esfuerzo de meseta y finalizando con su respectiva región de densificación. Además, en la misma figura, es posible observar la influencia de la tasa de deformación en el comportamiento de la curva esfuerzo deformación.

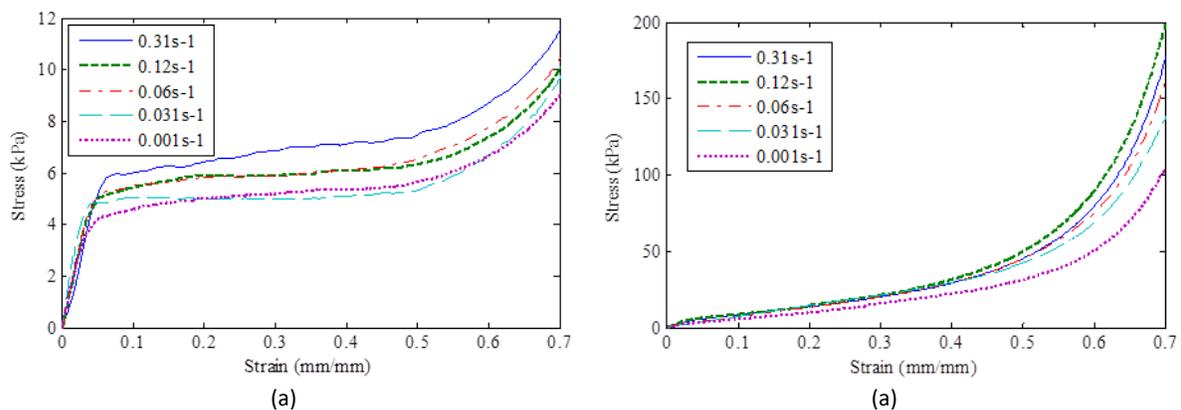


Figura 63: Curva esfuerzo deformación para espuma de poliuretano (a) sin relleno y (b) con relleno de STF.

Por otro lado, en la Figura 63b se presenta la respuesta de la espuma de poliuretano impregnada con STF. Como se observa, el comportamiento de la curva esfuerzo deformación también muestra influencia a la tasa de deformación. Además, aunque al igual que la espuma sin impregnar exhibe las zonas características de una espuma (como la región de meseta y densificación) el orden de magnitud que se maneja es de al menos 1 más. Este cambio está relacionado a la interacción viscosa del fluido de STF con las paredes de las celdas de la estructura de la espuma.

Como se evidencia en la Figura 63 y la Figura 64 al incrementar la tasa de deformación el esfuerzo de fluencia también incrementa. Esto se debe a que a bajas tasas de deformación el gas al interior de la espuma puede escapar a través de los poros lo suficientemente rápido para no influenciar la respuesta de la curva esfuerzo deformación. Sin embargo a mayores tasas de deformación el gas genera un efecto de amortiguamiento debido a que no puede escapar. La Figura 64 también presenta los resultados obtenidos por Croop et al [60] para una caracterización en compresión para una espuma elastomérica de poliuretano

de celda abierta con una densidad de 27kg/m^3 . Debido a la gran similitud entre los resultados (círculos y diamantes) para las tasas de deformación evaluadas, la tendencia encontrada por Croop et al puede aplicarse a las espumas utilizadas en la presente investigación. De esta forma es posible decir que en 5 órdenes de magnitud el esfuerzo de fluencia solo incrementa 4kPa lo que no es un incremento significativo.

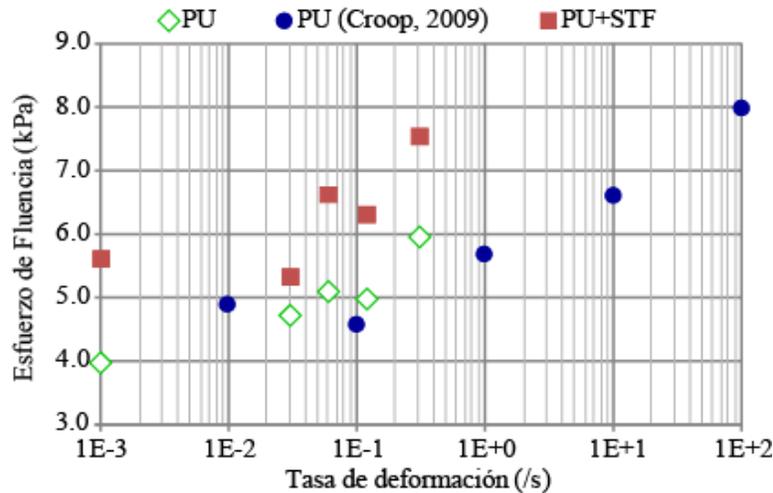


Figura 64: Esfuerzo de fluencia de la espuma de poliuretano con y sin impregnar. Además se incluyen los valores obtenidos por [60] para una espuma de poliuretano con una densidad de 27kg/m^3 a diferentes tasas de deformación.

Por otro lado, la Figura 65 presenta una comparación entre la espuma de poliuretano con y sin impregnar para tres tasas de deformación diferente. Aquí se vuelve más evidente las diferencias entre los dos materiales bajo las condiciones estudiadas. Como se puede apreciar en la Figura 65b la espuma impregnada es más rígida que la espuma de poliuretano sin impregnar lo que es consistente con lo presentado en [18].

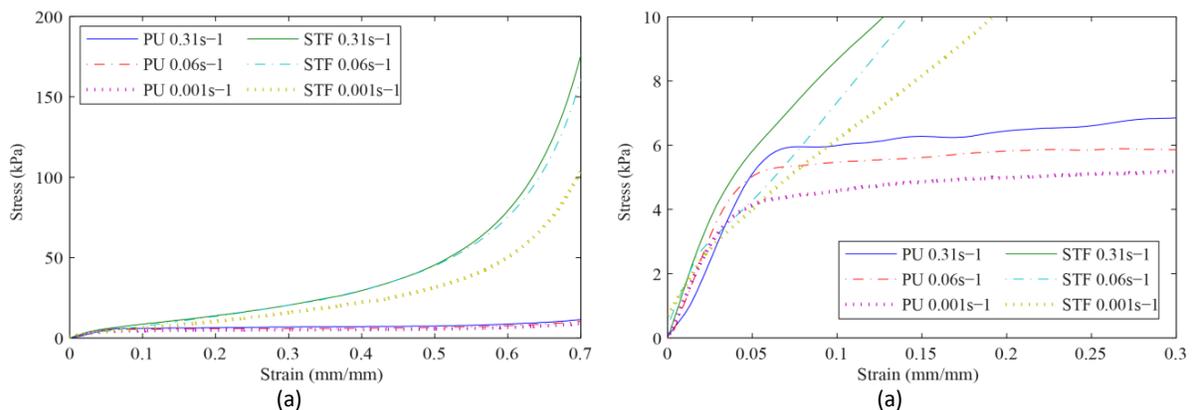


Figura 65: Comparación entre la espuma de poliuretano con relleno y sin relleno de STF para tres tasas de deformación diferentes vista (a) completa y (b) zoom.

Como se esperaba, el valor del módulo de Young no varía mucho en función de la tasa de deformación como se menciona en [2,61]. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 66.

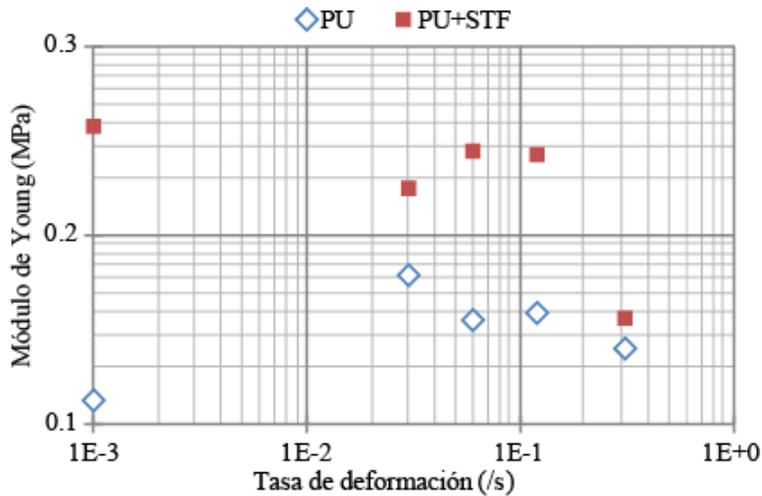


Figura 66: Módulo de Young para espumas de poliuretano con y sin relleno de STF

5.1.2 Compresión uniaxial confinada

Los resultados obtenidos para la caracterización mecánica bajo condiciones de compresión confinada se presentan en la Figura 67. En la Figura 67^a se presenta la curva esfuerzo deformación para la espuma sin impregna, en la que es posible notar el comportamiento característico de las espumas elastoméricas de celda abierta. Sin embargo bajo estas condiciones no se presenta sensibilidad a las tasas de deformación trabajadas permaneciendo casi igual para los casos estudiados. Este fenómeno es generado posiblemente por la imposibilidad del aire al interior de la espuma de escapar.

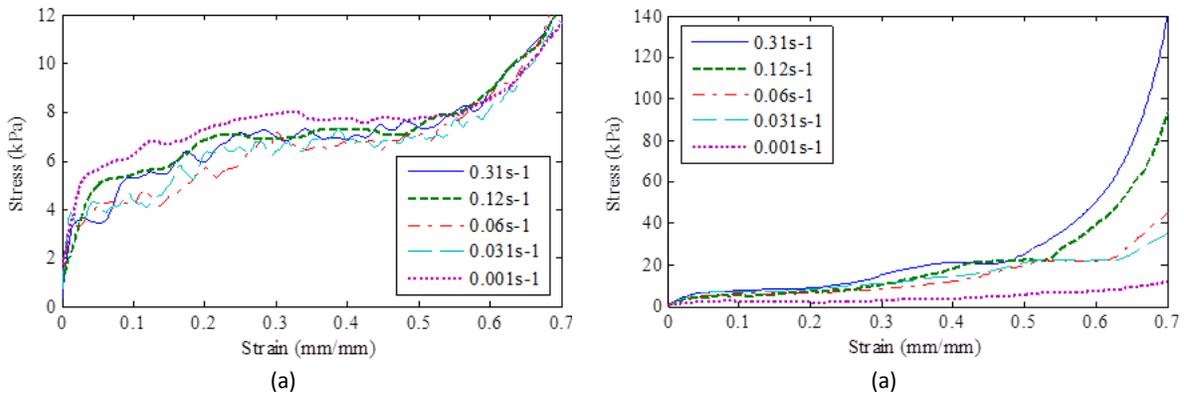


Figura 67: Curva esfuerzo deformación para la espuma de poliuretano (a) con STF y (b) sin STF para condiciones confinadas

Debido al comportamiento elastomérico de las espumas de poliuretano estudiadas, el módulo de compresibilidad (Bulk) encontrado es demasiado bajo para ser considerado en la caracterización. En la Figura 67b se presenta la respuesta de la espuma de poliuretano impregnada la cual si exhibe una sensibilidad a la tasa de deformación, para la cual, a medida que esta aumenta la zona de meseta y de densificación también incrementa su valor.

5.1.3 Cortante simple

Como se menciona en la sección 4.1.3 para desarrollar este experimento se implemento la norma ISO 1827. La cual menciona que el modulo cortante se puede determinar en un único punto en el 25% de la deformación cortante (γ) obtenida por la ecuación (31).

$$\gamma = \frac{h}{2c} \quad (31)$$

donde h es el desplazamiento vertical y c es el espesor de una de las muestras. Los otros pasos pueden ser leídos en la norma. Sin embargo, al calcular el modulo cortante en un único punto se puede obtener un error muy grande entre los resultados de las muestras. Por esta razón un análisis secundario de los resultados es desarrollado utilizando la teoría clásica de cortante. De esta manera, el esfuerzo cortante (τ) fue calculado por medio de la ecuación (32)

$$\tau = \frac{1.5P}{2A_t} \quad (32)$$

donde P es la carga aplicada y A_t es el área transversal de los especímenes, mientras que la constante (1.5) es una aproximación por la geometría de la probeta. Para calcular la deformación cortante se utiliza la ecuación (33).

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{h}{c}\right) \quad (33)$$

Los dos procedimientos presentan resultados similares, sin embargo, el segundo método provee una desviación estándar menor. La Figura 68 presenta el modulo cortante promedio para cada prueba desarrollada para la espuma con y sin impregnar, encontrando un incremento de del modulo cortante del 17% entre las tasas de deformación de $0.42s^{-1}$ y $0.25s^{-1}$.

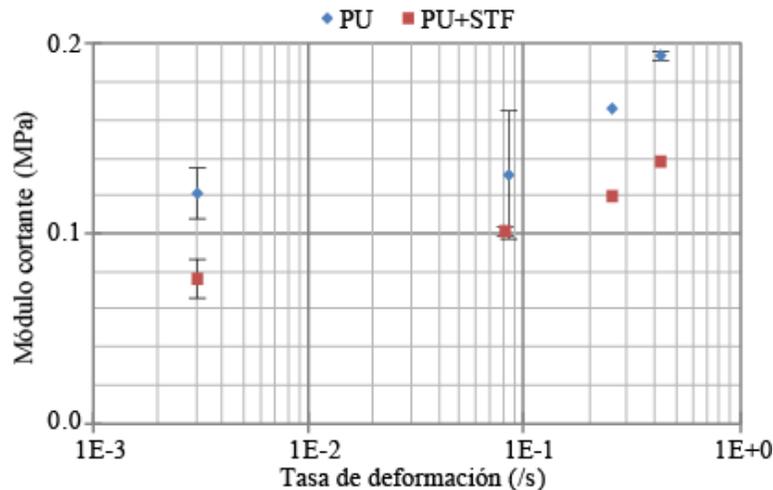


Figura 68: Modulo cortante para la espuma de poliuretano con y sin impregnar.

En la misma figura es posible observar que los datos obtenidos para la espuma impregnada también presentan un incremento similar a los obtenidos para la espuma sin impregnar. Sorpresivamente, el módulo cortante obtenido para este material es menor que para la espuma sin impregnar. Una de las posibles

razones que pueden generar este efecto es la dificultad que se presenta a la hora de aplicar el adhesivo de cianocrilato a la espuma impregnada y adherirla al montaje de pruebas. En este punto cabe mencionar que algunos de los resultados fueron descartados debido a fallas en el adhesivo.

5.1.4 Experimentación dinámica

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en la experimentación desarrollada mediante la implementación del péndulo balístico.

5.1.4.1 IMPULSO TRANSMITIDO

En la Figura 69 se presenta los impulsos transmitidos obtenidos de las pruebas experimentales. Como se puede apreciar a través de los valores obtenidos, los paneles rígidos utilizados en la calibración son los elementos que mas transmiten el mayor impulso, lo que los hace poco deseables para la elaboración de equipos de protección, pues no pueden absorber energía por deformación o por fractura. Los datos presentados en dicha figura son normalizados con respecto al impulso máximo promedio (2.78Ns) encontrado para una DS de 100mm en las pruebas de calibración. Este procedimiento fue llevado a cabo para poder comparar los resultados de manera directa. Los valores presentados son el promedio calculado para las repeticiones realizadas en cada una de las configuraciones.

Al comparar los valores de calibración es posible notar un decaimiento en el impulso transmitido a medida que la DS aumenta, lo que es consistente con la teoría de propagación de ondas en el aire. Además las espumas impregnadas presentan una caída del 35% en el impulso transmitido en comparación a la espuma sin impregnar para un DS de 100mm. Sin embargo, a medida que el DS aumenta esta diferencia disminuye hasta encontrar que para una DS de 200mm la espuma de poliuretano absorbe 16% más que su contraparte impregnada.

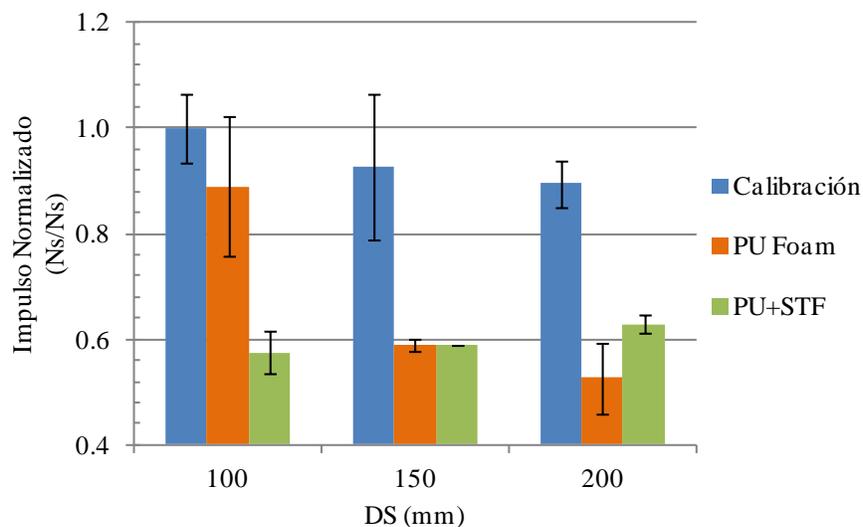


Figura 69: Impulso normalizado a diferentes SD para la calibración y los paneles tipo sándwich.

En este punto es necesario tener en cuenta la sensibilidad del péndulo balístico para posibles errores aleatorios producidos por diferentes situaciones e.g. el balanceo del péndulo debido al viento. La Figura 70 presenta la diferencia porcentual generada al impulso transmitida en función de la variación del desplazamiento (en mm) del péndulo. Como se puede observar un incremento de 1mm en la amplitud de la

oscilación del péndulo genera un incremento en el impulso transmitido del 6%; 4mm lo incrementa 32% más.

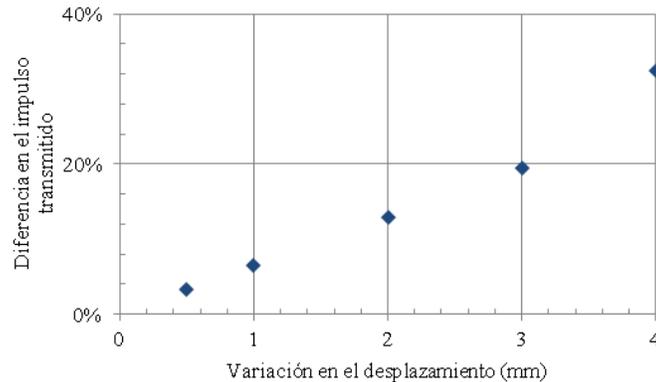


Figura 70: Sensibilidad del péndulo balístico

5.1.4.2 DEFLEXIÓN DEL PUNTO MEDIO

En la caracterización dinámica de materiales, la deflexión del panel posterior se ha convertido en una de las variables más importantes de estudio, pues esta relaciona de manera directa el nivel de trauma generado a los usuarios. La Figura 71 presenta una de las muestras obtenidas después del experimento, donde d representa los valores de medición para la deflexión del punto medio. Por otro lado, se puede notar la deflexión de la placa frontal entre los dos núcleos estudiados. De esta manera, se encuentra un nivel de deformación (o daño) mayor en el núcleo de espuma sin impregnar (Figura 71a) debido a que esta no brinda ninguna integridad estructural al panel en comparación (Figura 71b) a la espuma impregnada que permanece casi plana con excepción de las esquinas.

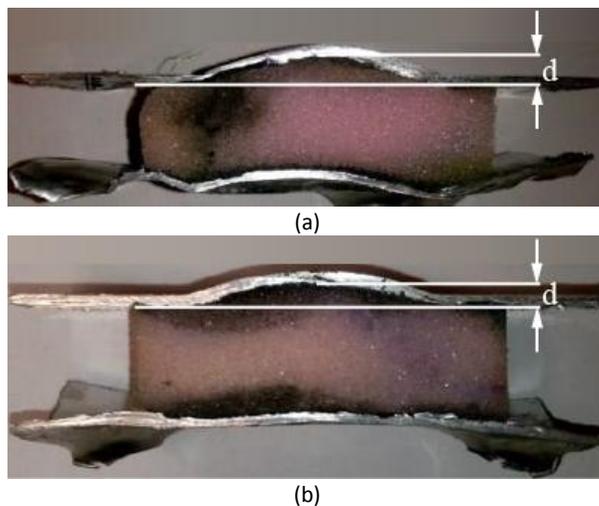


Figura 71: Medición de la deflexión del punto medio para la espuma de poliuretano (a) sin relleno y (b) con relleno de STF para una DS de 200mm.

La Figura 72 presenta la deflexión del punto medio promedio de la placa posterior de aluminio. Como se puede observar, la deflexión en las muestras de espumas impregnadas presenta una reducción entre el 16 y 35% en comparación de la espuma sin impregnar. Sin embargo, debido a la alta desviación estándar en el

resultado para DS de 100 y la única prueba desarrollada para DS de 150 para las espumas impregnadas, no es posible definir una tendencia del comportamiento del punto medio.

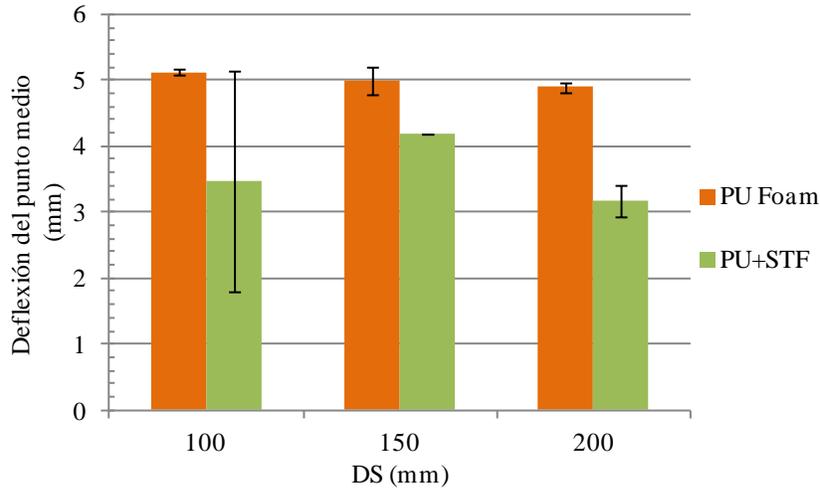


Figura 72: Deflexión del punto medio para diferentes DS para los núcleos utilizados en los paneles tipo sándwich

5.2 Procedimiento numérico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a través del software ANSYS Autodyn desde la calibración del péndulo hasta la validación de los resultados computacionales en función de los datos experimentales.

5.2.1 Tamaño del entorno

En la Figura 73 se presenta la velocidad inicial del péndulo balístico en función del tiempo para cada uno de los entornos estudiados. En dicha figura, se puede apreciar que al no estar totalmente cubierto el péndulo balístico en el entorno, este no llega a estabilizarse en una velocidad inicial, sino que esta sigue incrementando indefinidamente. Esto se debe a que en este tipo de simulaciones, los efectos gravitacionales no son tenidos en cuenta, lo que deja únicamente a las presiones en el medio como única forma de amortiguamiento.

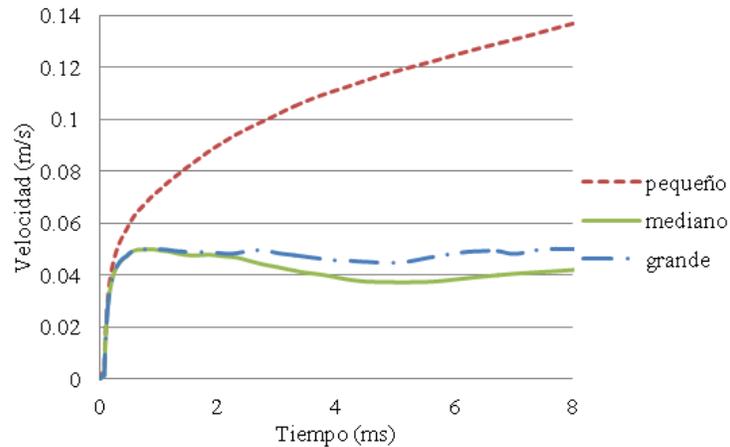


Figura 73: Velocidad del péndulo balístico según el tamaño del entorno

A partir de las distribuciones de presión presentadas en la Figura 74 es posible analizar dicho fenómeno con mayor detenimiento. Al primer milisegundo se observa una gran sobrepresión al interior del péndulo balístico, mientras que una porción de la onda generada viaja (con menor intensidad) por el exterior del mismo. A los 5ms debido a la caída de presión posterior al sobrepico generado por la detonación de la carga explosiva, la distribución de estas al interior del tubo de choque disminuye abruptamente, mientras que la onda que se encontraba viajando por el exterior del péndulo genera una presión mayor en la parte posterior (en comparación de la presión en la parte frontal) del mismo creando un amortiguamiento lo que disminuye la velocidad inicial del péndulo. Este fenómeno no se presenta en un entorno pequeño por lo que no existe alguna condición que disipe la energía cinética del cuerpo. Ya a los 10 y 15ms las diferencias de presión en la parte frontal y posterior del péndulo no afectan de gran manera en la velocidad del mismo debido a las magnitudes de presión generadas.

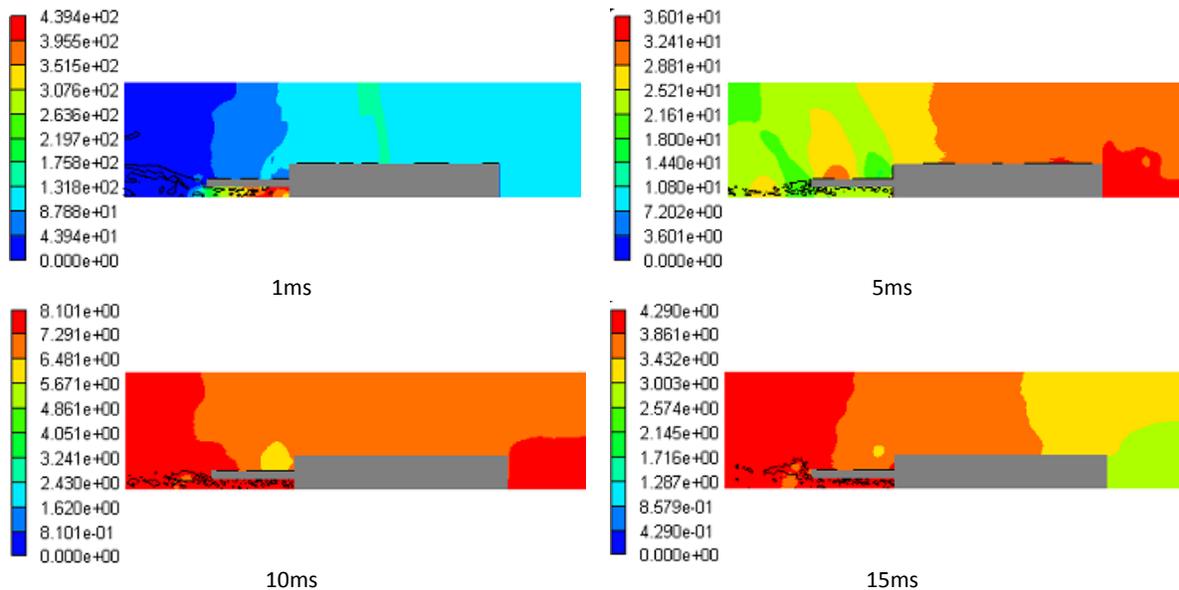


Figura 74: Distribución de presiones en diferentes tiempos de simulación para el entorno mediano.

Con base en los resultados obtenidos en esta sección se decide modelar el péndulo balístico implementando un entorno grande y alejando las condiciones de frontera lo más posible de las variables de medición necesarias, pues se encontró que la velocidad inicial si presenta una caída después de los 2ms en la velocidad debido a la cercanía de las condiciones de frontera en la parte posterior del péndulo.

5.2.2 Tamaño de la malla

Como se aprecia en la Figura 75 el tamaño de la malla afecta considerablemente el comportamiento del perfil de la onda de choque generada, pues a mayor tamaño de elemento, el pulso de presión presenta una interacción mas “brusca” entre los elementos Lagrangianos generando concentraciones de presión mayores en algunas de las zonas evaluadas (Figura 75a). De la misma manera, también se encuentra que debido a las interacciones comentadas anteriormente el valor del sobrepico de presión obtenido para un tamaño de malla de 2mm es un poco mayor que las sobrepresiones encontradas para una malla de 0.2mm. Con este último tamaño de malla se observa que los tres picos de presión analizados no presentan una diferencia significativa por lo que se puede asumir que se tiene un perfil de onda constante.

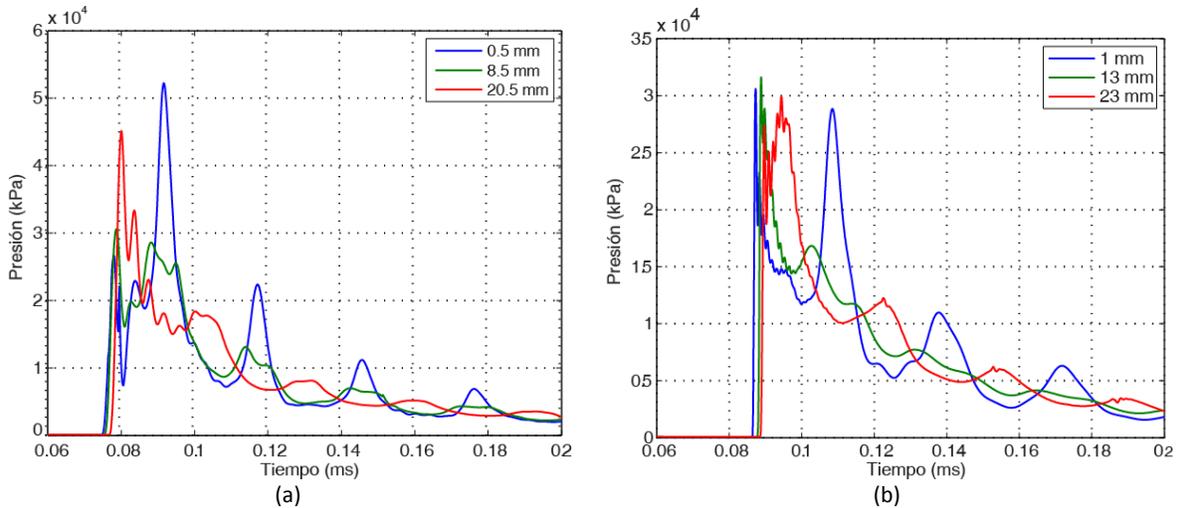


Figura 75: Perfiles de presión para una malla de (a) 2mm y (b) 0.2mm.

5.2.3 Posición del detonador

Como se puede apreciar en la Tabla 12 la diferencia en el impulso transmitido al péndulo dependiendo de la ubicación y forma del detonador no presenta una variación significativa. Sin embargo si se evidencia una mejoría al utilizar la disposición del detonador b de acuerdo a lo presentado en la Figura 59

Tabla 12: Resultados del impulso transmitido en función de la posición del detonador

Disposición del detonador	V. inicial (m/s)	Impulso (Ns)	Diferencia (%)
a	3.16e-2	2.37	4.81
b	3.17e-2	2.38	4.43
c	3.16e-2	2.37	4.72

En este punto es necesario mencionar que ninguno de estas disposiciones modifica el perfil de onda encontrado en la sección 5.2.2.

5.2.4 Modelo de la espuma de poliuretano

Como se mencionó en la sección 4.3.2.1 se selecciona el modelo constitutivo Hyperfoam de Ogden, para desarrollar la espuma de poliuretano sin impregnar, cuyos parámetros son determinados a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de compresión uniaxial sin confinamiento. Se utiliza el software Hyperfit v.2006 para realizar el ajuste de la curva esfuerzo deformación para encontrar los parámetros μ_i y α_i , mientras que los parámetros β_i se definieron como 0 como se menciona en el capítulo anterior. La Figura 76 presenta la comparación entre los datos experimentales y el ajuste de la curva al modelo Ogden Hyperfoam, por medio de la cual es posible observar que el modelo se ajusta con una muy buena precisión a los datos obtenidos experimentalmente.

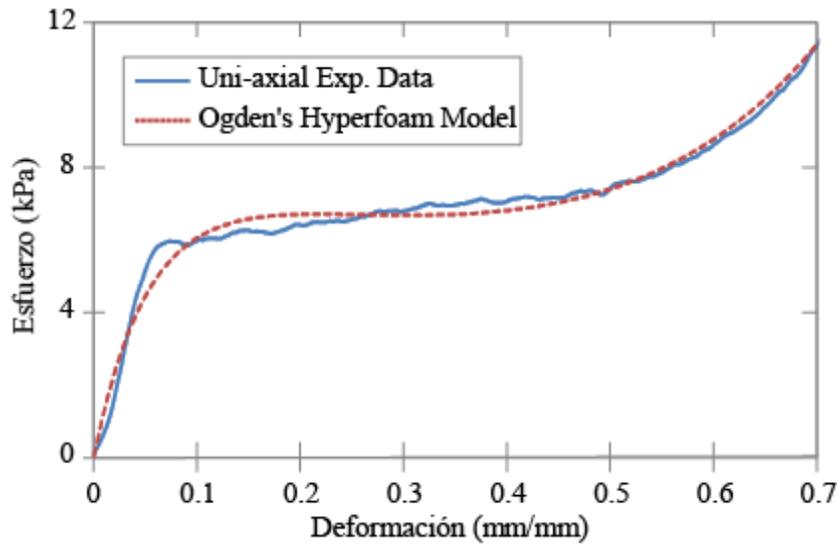


Figura 76: Datos de compresión uniaxial para la tasa de deformación de $0.32s^{-1}$ comparada contra el ajuste de curva realizada con el modelo Ogden Hyperfoam

Debido a que el modelo hiperelástico trabajado no depende de la tasa de deformación sino a las condiciones térmicas, el análisis de la influencia sobre los parámetros adquiridos por medio del ajuste de la curva no van a hacer discutidas. Por lo tanto se tomaran los resultados del ajuste de la curva para los datos experimentales obtenidos para la mayor tasa de deformación obtenida. Los parámetros obtenidos a partir del ajuste realizado para elaborar el modelo se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Parámetros para el modelo Ogden Hyperfoam

N	μ (kPa)	α	β (/kPa)
1	0.031	12.49	0
2	-7.94	-48.12	0

5.2.5 Modelo de la espuma de poliuretano rellena de STF

La Figura 77 presenta la deflexión del punto medio para las distintas configuraciones desarrolladas. Para observar la influencia de cada modelo (únicamente espuma con y sin relleno de STF) sobre la respuesta de las dichas configuraciones en la figura también se presentan la deflexión del punto medio para núcleos conformados únicamente por estos materiales.

Como se esperaba, el núcleo conformado únicamente por el modelo de STF presenta la menor deflexión, mientras que la espuma de poliuretano sin impregnar presenta la mayor deflexión. Sin embargo, como se puede observar, las configuraciones utilizadas para desarrollar el modelo de espuma rellena con STF afectan de manera dramática la deflexión del punto medio en la placa posterior encontrando una diferencia del 15% entre la configuración 1 y la configuración 2. Dado que la configuración 1 presenta la deflexión más cercana a los resultados experimentales, se decide modelar la espuma rellena con STF con dicha configuración. Sin embargo, se debe realizar un estudio más detallado con el fin de optimizar la configuración utilizada, donde el tamaño de elemento del núcleo debe ser modificado.

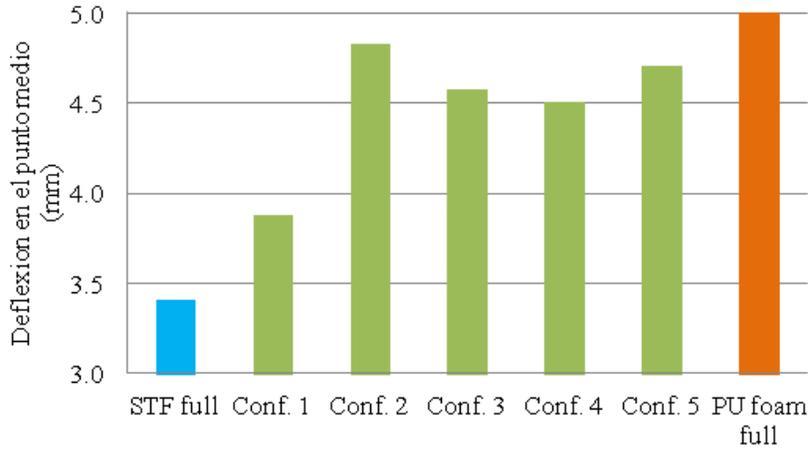


Figura 77: Deflexión del punto medio para las configuraciones trabajadas.

5.2.6 Tasa de deformación

Con el fin de determinar las tasas de deformación generadas por las diferentes condiciones de carga trabajadas en el presente estudio, un punto de medición fue ubicado (como se menciona en la sección 4.3.2) en la placa frontal del panel. La tasa de deformación efectiva es adquirida por medio del software Autodyn son presentados en la Figura 78.

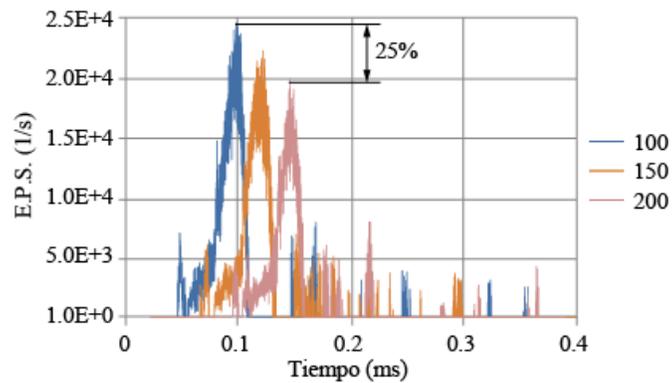


Figura 78: Tasa de deformación plástica efectiva para diferentes DS

Los picos de la tasa de deformación obtenidos para las diferentes DS son consistentes con el orden de magnitud en los problemas de propagación de onda como se presenta en [25]. En dicha figura, se puede observar y retraso en el tiempo de la señal a medida que la DS aumenta debido a que la onda de choque tarda un mayor tiempo interactuar con el panel estudiado. De la misma manera es posible notar una reducción del 25% en la tasa de deformación cuando la DS aumenta.

5.2.7 Deflexión del punto medio

En la Figura 79 se presenta la señal de desplazamiento de la placa posterior de aluminio adquirido a través del software ANSYS Autodyn. En dicha figura, se puede notar un pico en el desplazamiento seguido por un valor constante. Este comportamiento representa dos etapas; la primera es la combinación del fenómeno de deformación elástica y plástica, mientras que la segunda, se presenta después de que el pico máximo es alcanzado. En esta etapa, la recuperación de la deformación elástica empieza y el desplazamiento de la placa posterior se reduce presentando únicamente la condición plástica.

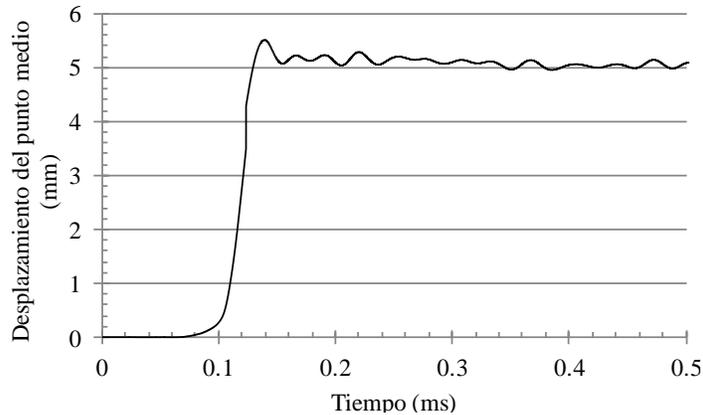


Figura 79: Señal de desplazamiento en el tiempo de la placa posterior para el núcleo de espuma sin impregnar a una DS de 150mm obtenida a través del software Autodyn.

Por otro lado, en la Figura 80 se presentan los resultados de la deflexión del punto medio en la placa posterior. El modelo de espuma sin impregnar desarrollado con el modelo de Hyperfoam, presenta unos resultados muy similares a aquellos encontrados en la parte experimental con un error máximo del 15% a una DS de 200mm. Por su parte, el modelo de espuma impregnada con STF presenta un error mayor con un valor máximo del 45%. Este error fue calculado con el promedio de los valores experimentales para cada una de las DS. Sin embargo, este error puede ser reducido al desarrollar una mayor experimentación, lo cual reducirá la desviación estándar presentada en los datos experimentales.

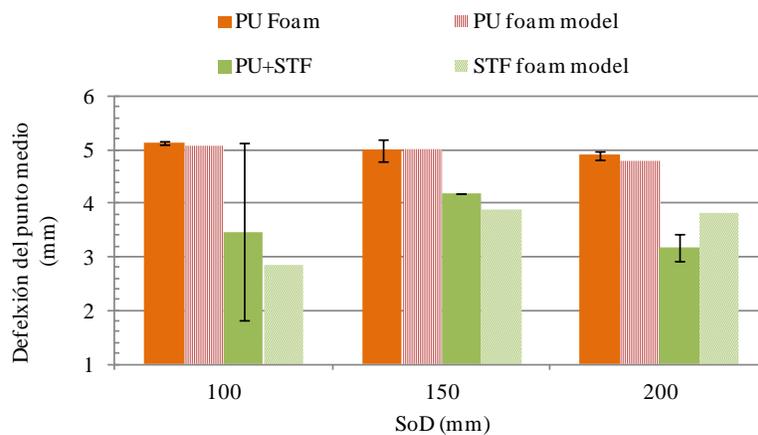


Figura 80: Deflexión del punto medio para diferentes DS para los datos experimentales y los modelos computacionales

5.2.8 Impulso transmitido

La Figura 81 presenta de manera grafica las diferencias en el impulso transmitido cuando el tubo de choque y las barras espaciadoras se encuentran conectadas o desconectadas. Una reducción entre el 20 y el 30% en el impulso transmitido es presentada cuando las partes (mencionadas anteriormente) no se encuentran conectadas. Dichas condiciones no afectan la deflexión final del punto medio en la placa posterior.

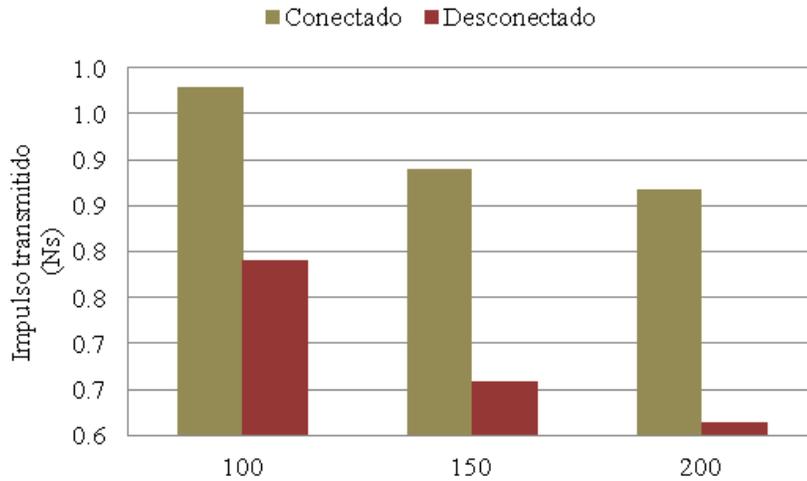


Figura 81: Impulso transmitido cuando el tubo de choque y las barras espaciadoras se encuentran conectadas o desconectadas

La reducción obtenida en el impulso transmitido puede ser generada por la onda de choque tratando de escapar del sistema a través del espacio creado por el desplazamiento de la placa frontal como se puede apreciar en la Figura 82b. Este fenómeno genera un colchón de aire de alta presión que reduce la velocidad inicial del péndulo balístico y por ende el impulso final transmitido.

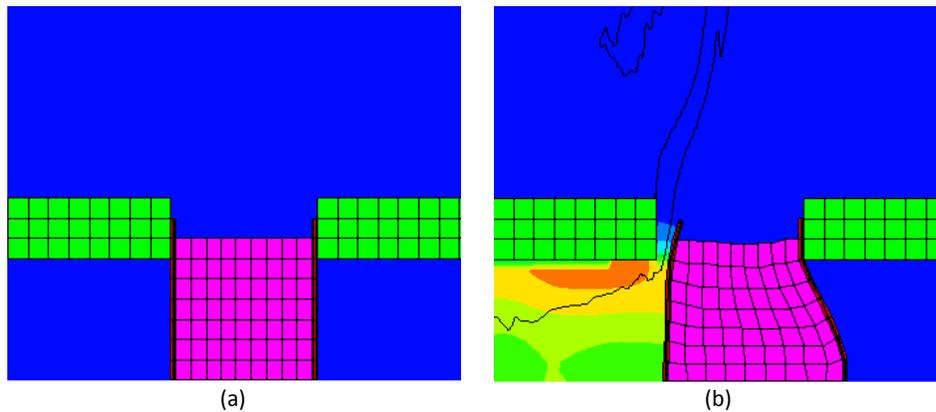


Figura 82: Imágenes capturadas de la simulación para (a) la condición inicial y (b) después de 2ms.

Por otro lado, en la Figura 83 se presentan los resultados del impulso transmitido para los procedimientos tanto experimentales como computacionales. Aquí es posible encontrar que los resultados presentan una alta precisión en la mayoría de las configuraciones probadas. Sin embargo, el modelo de la espuma impregnada con STF exhibe un error grande para bajas DS, el cual puede ser reducido por la implementación de diferentes modelos constitutivos y de falla.

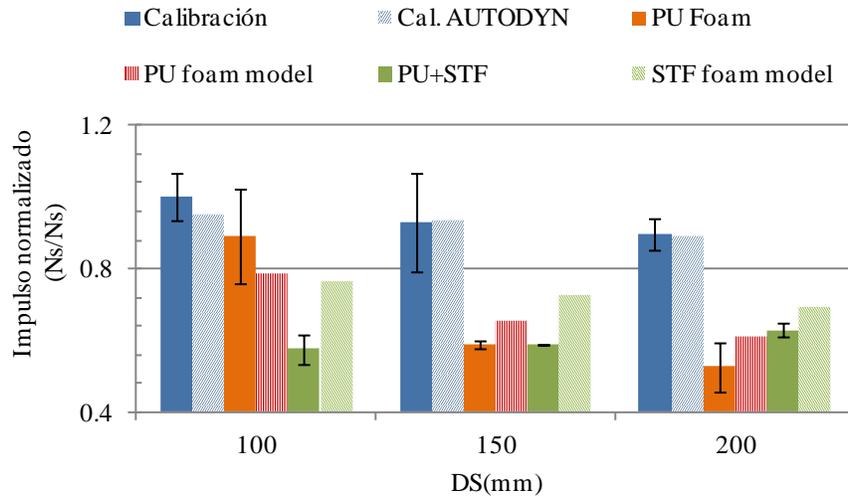


Figura 83: Impulso normalizados a diferentes DS para los datos experimentales y los modelos computacionales

5.3 Resumen

En el capítulo anterior se presentaron los resultados obtenidos tanto para las pruebas experimentales como para los procedimientos numéricos o computacionales propuestas en el capítulo 4. Los resultados de deflexión en el punto medio en la placa posterior y del impulso transmitido al péndulo balístico obtenidos tanto experimental como computacionalmente son comparados presentando una muy buena precisión en la mayoría de los casos estudiados.

6 CONCLUSIONES

En la presente investigación se demuestra que la espuma impregnada con STF tiene una gran capacidad de absorber grandes cantidades de energía, especialmente a bajas distancias de separación del explosivo (DS de 100mm). Sin embargo, esta diferencia se reduce a medida que la DS aumenta, debido a la capacidad del aire al interior de la espuma para disipar energía y al pandeo de las paredes de la celda.

Con el propósito de determinar cuál de los mecanismos presentes en la espuma rellena de STF (viscosidad del fluido o formación de los hydroclusters) es el responsable de la capacidad de absorción de energía que presenta este material ante explosiones se debe realizar un análisis más profundo.

Durante el diseño del péndulo balístico también es necesario tener en cuenta que al desplazarse la placa frontal del panel se genera un espacio lo suficientemente grande para que la onda de choque fluya a través de él, creando un amortiguamiento de aire a alta presión lo que reduce la velocidad inicial y por ende el impulso transmitido al péndulo. Sin embargo, al momento de realizar el análisis de los resultados obtenidos, se debe conocer que al fijar las placas al tubo de choque no se permite la deformación real del panel probado.

En el presente proyecto se encontró que aunque los modelos implementados para la espuma con y sin impregnar con STF no tienen en cuenta la sensibilidad que estos materiales presentan a la tasa de deformación, las variables evaluadas (deflexión de la placa posterior y el impulso transmitido al péndulo) presentan una muy buena precisión al compararlos con los resultados obtenidos de forma experimental.

Finalmente, al evaluar la influencia que se presenta durante el modelamiento de este tipo de fenómenos en problemas computacionales se encontró que el tamaño de entorno y de malla (específicamente en el caso del entorno modelado por medio de un solucionador de Euler) presenta una gran influencia en la respuesta del impulso transmitido al péndulo balístico y en el perfil de presión generado por la detonación del artefacto explosivo.

7 TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se debe optimizar el tamaño de malla de los modelos, especialmente para el de espuma impregnada con STF con el propósito de obtener la distribución más homogénea posible.

Por otro lado se recomienda estudiar la compresión final del núcleo con el fin de mejorar los modelos propuestos.

Finalmente se debe incluir el adhesivo con el que se elaboraron paneles tipo sándwich para analizar la influencia de este sobre los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dawson MA (2008) Modeling the Dynamic Response of Low-Density, Reticulated, Elastomeric Foam Impregnated with Newtonian and Non-Newtonian Fluids. PhD, Massachusetts Institute of Technology,.
2. Gibson LJ, Ashby MF (1999) Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge University Press,
3. Kitagawa K, Takayama K, Yasuhara M (2006) Attenuation of shock waves propagating in polyurethane foams. *Shock waves* 15:437-445
4. Dawson MA, McKinley GH, Gibson LJ (2008) The Dynamic Compressive Response of Open-Cell Foam Impregnated With a Newtonian Fluid. *Journal of Applied Mechanics* 75 (4):11
5. Dawson MA, McKinley GH, Gibson LJ (2009) The Dynamic Compressive Response of an Open-Cell Foam Impregnated With a Non-Newtonian Fluid. *Journal of Applied Mechanics* 76 (6):8
6. Lim AS, Lopatnikov SL, Wagner NJ, Gillespie JW (2010) An experimental investigation into the kinematics of a concentrated hard-sphere colloidal suspension during Hopkinson bar evaluation at high stresses. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 165 (19–20):9. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2010.06.015>
7. Bettin G (2005) Energy Absorption of Reticulated Foams Filled with Shear-Thickening Silica Suspensions. MSc, Massachusetts Institute of Technology,
8. Yunn-Chih (2008) The response of honeycomb sandwich panels to blast loads. University of Cape Town,
9. Cooper PW (1996) Explosives engineering. Wiley-VCH,
10. Wilson C. Hayes TAM, Stephen N. Robinovitch (1997) Bone fracture prevention garment and method. US5599290 A,
11. Universidad de los Andes (2013) Proyecto de Investigación Nuevos Material para el Sector Defensa. Informe mensual agosto. Uniandes - Indumil, Bogotá, Colombia
12. Revista Portafolio (2012) Producción de panela busca entrar en la era exportadora. <http://www.portafolio.co/especiales/aniversario/produccion-panela-busca-entrar-la-era-exportadora>. Accessed 04 2014
13. Meyers MA (1994) Dynamic behavior of materials. John Wiley & Sons, Inc., New York
14. Avendaño DF, Casas-Rodriguez JP, Marañón EA (2013) Caracterización dinámica de estructura celular hexagonal. Universidad de los Andes,
15. Hoffman RL (1972) Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. I. Observations of flow instability. *Journal of Rheology* 16 (1):155-173
16. Lim A, Lopatnikov S, Wagner N, Gillespie J, Jr. (2010) Investigating the transient response of a shear thickening fluid using the split Hopkinson pressure bar technique. *Rheologica Acta* 49 (8):12. doi:10.1007/s00397-010-0463-8
17. Lim AS, Lopatnikov SL, Gillespie Jr JW (2009) Development of the split-Hopkinson pressure bar technique for viscous fluid characterization. *Polymer Testing* 28 (8):10. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.08.002>
18. Bettin G (2007) High-Rate Deformation Behavior and Applications of Fluid Filled Reticulated Foams. PhD, Massachusetts Institute of Technology,
19. Decker MJ, Halbach CJ, Nam CH, Wagner NJ, Wetzel ED (2007) Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics. *Composites Science and Technology* 67 (3–4):14. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.007>
20. Yu K, Cao H, Qian K, Jiang L, Li H (2012) Synthesis and Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF) Impregnated Glass Fabric Composites. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 20 (6A (95)):3
21. CORE-Materials Open-celled aluminium foam. Flickr
22. CORE-Materials FORMGRIP closed cell aluminium foam. Flickr
23. Gardner N, Wang E, Shukla A (2012) Performance of functionally graded sandwich composite beams under shock wave loading. *Composite Structures* 94 (5):1755-1770
24. Petel OE, Jetté FX, Goroshin S, Frost DL (2011) Blast wave attenuation through a composite of varying layer distribution. *Shock waves* 21:215-224
25. Zukas JA (2004) Introduction to Hydrocodes. Elsevier Ltd., Baltimore, USA

26. Robinson Luque VS, Casas Rodriguez JP, Bastidas VH Geometry and material influences in the transferred energy by an explosive shock wave. In: 10th World Congress on Computational Mechanics, Sao Paulo, Brazil, 2012.
27. Black G, Righman J (2006) Computer Modeling of Blast Loading Effects on Bridges. Lafayette College, Easton, Pennsylvania
28. Liu MB, Liu GR (1995) Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments. *Computational Mechanics* 17 (1):25-76
29. Mills NJ (2007) Chapter 6 - Finite element modelling of foam deformation. In: *Polymer Foams Handbook*. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp 115-145. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-075068069-1/50007-6>
30. Zhang J, Kikuchi N, Li V, Yee A, Nusholtz G (1998) Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading. *International Journal of Impact Engineering* 21 (5):369-386. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00087-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00087-0)
31. Ong CW, Boey CW, Hixson RS, Sinibaldi JO (2011) Advanced layered personnel armor. *International Journal of Impact Engineering* 38:369-383
32. Briody C, Duignan B, Jerrams S (2011) Characterisation, Modelling and Simulation of Flexible Polyurethane Foam.
33. Briody C, Duignan B, Jerrams S (2011) Testing, modelling and validation of numerical model capable of predicting stress fields throughout polyurethane foam. *Constitutive Models for Rubber VII*:143
34. Grujicic M, Pandurangan B, Arakere G, Bell WC, He T, Xie X (2009) Seat-cushion and soft-tissue material modeling and a finite element investigation of the seating comfort for passenger-vehicle occupants. *Materials & Design* 30 (10):4273-4285. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.028>
35. Petel OE, Frost D, Higgins A, Ouellet S Lateral stress measurements in dense suspensions. In: *Physics AIO (ed) Shock Compression of Condensed Matter - 2011, Chicago, Illinois, 2012*. AIP Conference Proceedings, pp 1495-1498
36. Doyle JM (2005) A New Continuous Hugoniot Method for the Numerical Study of Shock Waves. The University of Texas at Austin
37. Danyluk J (2010) Spall Fracture of Multi-Material Plates Under Explosive Loading. Rensselaer Polytechnic Institute at Hartford
38. Jordan JL, Herbold EB, Sutherland G, Fraser A, Borg J, Richards DW (2011) Shock equation of state of multi-constituent epoxy-metal particulate composites.
39. Herrmann W (1969) Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials. *Journal of Applied Physics* 40 (6):2490-2499. doi:10.1063/1.1658021
40. Bastidas VH (2010) Evaluación de paquetes de protección de botas antiminas mediante el uso de herramientas computacionales. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Bogotá
41. SATIOĞLU AC (2009) Analysis of mechanical behavior of high performance cement based composite slabs under impact loading. The graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university
42. Briody C, Duignan B, Jerrams S Testing, modelling and validation of numerical model capable of predicting stress fields throughout polyurethane foam. In: 7th European Conference on Constitutive models for Rubber (ECCMR), Dublin, Ireland, 2011.
43. Briody C, Duignan B, Jerrams S Characterisation, material modelling and simulation of flexible polyurethane foam. In: *International conference on Materials, Tribology and Recycling (MATRIB)*, Vela Luka, Croatia, 2011.
44. Mills N (2007) *Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*. Elsevier Science,
45. Universidad de los Andes (2014) Nuevos materiales para el sector de defensa. Informe Final. Uniandes-Indumil, Bogotá, Colombia
46. Hassan MZ, Guan ZW, Cantwell WJ, Langdon GS, Nurick GN (2012) The influence of core density on the blast resistance of foam-based sandwich structures. *International Journal of Impact Engineering* 50 (0):9-16. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.06.009>
47. Needham CE (2010) *Blast Waves*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-05288-0

48. Humphreys JS (1965) Plastic Deformation of Impulsively Loaded Straight Clamped Beams. *Journal of Applied Mechanics* 32 (1):7-10. doi:10.1115/1.3625788
49. Jacob N, Nurick GN, Langdon GS (2007) The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads. *Engineering Structures* 29 (10):2723-2736. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.021>
50. Johnson GR, Cook WH A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: *Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands, 1983. pp 541–547
51. Los Alamos Scientific Laboratory (1969) *Selected hugoniot*s. Los Alamos, New Mexico
52. Rogers G, Mayhew Y (1995) *Thermodynamic and transport properties of fluids: SI units*. B. Blackwell,
53. Lee E, Finger M, Collins W (1973) JWL equation of state coefficients for high explosives. LAWRENCE LIVERMORE LABORATORY, Livermore, California
54. de Borbón F, Ambrosini D (2013) Dynamic response of composites sandwich plates with carbon nanotubes subjected to blast loading. *Composites Part B: Engineering* 45 (1):466-473. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.035>
55. National Instruments (2007) NI 9219 Operating Instructions.
56. Liu Q, Subhash G, Gao X-L (2005) A parametric study on crushability of open-cell structural polymeric foams. *Journal of Porous Materials* 12 (3):233-248
57. Subhash G, Liu Q (2009) Quasistatic and dynamic crushability of polymeric foams in rigid confinement. *International journal of impact engineering* 36 (10):1303-1311
58. Sochet I, Gardebas D, Calderara S, Marchal Y, Longuet B (2011) Blast Wave Parameters for Spherical Explosives Detonation in Free Air. *Open Journal of Safety Science and Technology* 1 (2):12. doi:10.4236/ojsst.2011.12004
59. Petel OE, Higgins AJ (2010) Shock wave propagation in dense particle suspensions. *Journal of Applied Physics* 108 (11):13. doi:10.1063/1.3504858
60. Croop B, Lobo H, DatapointLabs N Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA. In: *Proceedings of the 7th European LS-DYNA conference*, Dynamore GmbH, Salzburg, Germany, 2009.
61. Pampolini G, Del Piero G (2008) Strain localization in open-cell polyurethane foams: experiments and theoretical model. *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 3 (5):969-981

APÉNDICE A

En el presente anexo se suministra el código de Matlab utilizado para el diseño del péndulo balístico.

```
clear all
close all

m = 73.037;
g = 9.81;
lm=0:70;

%% Largo 40;
L=0.40;
v= lm/m;
h40= (v.^2)/(2*g);
x40= sqrt(2*L*h40-(h40.^2));

%% Largo 80;
L=0.80;
v= lm/m;
h80= (v.^2)/(2*g);
x80= sqrt(2*L*h80-(h80.^2));

%% Largo 120;
L=1.2;
v= lm/m;
h120= (v.^2)/(2*g);
x120= sqrt(2*L*h120-(h120.^2));

%% Largo 160;
L=1.60;
v= lm/m;
h160= (v.^2)/(2*g);
x160= sqrt(2*L*h160-(h160.^2));

%% Largo 200;
L=2.0;
v= lm/m;
h200= (v.^2)/(2*g);
x200= sqrt(2*L*h200-(h200.^2));

%% Largo 240;
L=2.4;
v= lm/m;
h240= (v.^2)/(2*g);
x240= sqrt(2*L*h240-(h240.^2));

%% GRAFICA definir L
figure1 = figure('CoLor',[1 1 1]);
% Create axes

axes1 = axes('Parent',figure1,'FontSize',14);
%xLim(axes1,[0 2.5]);
%box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot( lm,x40,...
lm,x80,...
lm,x120,...
lm,x160,...
lm,x200,...
lm,x240,...
'LineWidth',2);
Legend('L 40','L 80','L 120','L 160','L 200','L
240','Location','NorthEastOutside');
grid on;
title('RECORRIDO EN X DEL PÉNDULO VARIANDO
LA LONGITUD DE L','FontSize',15);
xlabel('Impulso (Ns)','FontSize',14);
ylabel('Distancia X (m)','FontSize',14);

%%GRAFICA ZOOM
figure3 = figure('CoLor',[1 1 1]);
axes1 = axes('Parent',figure3,'FontSize',14);
hold(axes1,'all');
plot( lm,x40,...
lm,x80,...
lm,x120,...
lm,x160,...
lm,x200,...
lm,x240,...
'LineWidth',2);
Legend('L 40','L 80','L 120','L 160','L 200','L
240','Location','NorthEastOutside');
grid on;
title('RECORRIDO EN X DEL PÉNDULO VARIANDO
LA LONGITUD DE L','FontSize',15);
xlabel('Impulso (Ns)','FontSize',14);
ylabel('Distancia X (m)','FontSize',14);
axis([0 2 0 13*10^-3]);

%% GRAFICA definir h
figure2 = figure('CoLor',[1 1 1]);

% Masa 65kg
v65=lm/65;
h65=(v65.^2)/(2*g);
```

```
% Masa 70kg
v70=lm/70;
h70=(v70.^2)/(2*g);
```

```
% Masa 75kg
v75=lm/75;
h75=(v75.^2)/(2*g);
```

```
% Masa 80kg
v80=lm/80;
h80=(v80.^2)/(2*g);
```

```
% Masa 85kg
v85=lm/85;
h85=(v85.^2)/(2*g);
```

```
% Masa 90 kg
v90=lm/90;
h90=(v90.^2)/(2*g);
```

```
% Masa 95kg
```

```
v95=lm/95;
h95=(v95.^2)/(2*g);
```

```
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure2,'FontSize',14);
%xlim(axes1,[0 2.5]);
%box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(
lm,h65,lm,h70,lm,h75,lm,h80,lm,h85,lm,h90,lm,
h95,'LineWidth',2);
Legend('m 65','m 70','m 75','m 80','m 85','m
90','m 95','Location','NorthEastOutside');
grid on;
title('RECORRIDO EN H DEL
PÉNDULO','FontSize',15);
xlabel('Impulso (Ns)','FontSize',14);
ylabel('Altura H (m)','FontSize',14);
```