

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ESPUMA METÁLICA EN
APLICACIONES DE ALTO IMPACTO (CHALECO ANTIBALAS)**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ESPUMA METÁLICA EN
APLICACIONES DE ALTO IMPACTO PRODUCIDAS POR LA
COLISIÓN DE BALAS DISPARADAS CON UN FUSIL DE
CALIBRE 5,56 MM**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

KEVIN ALEXANDER REA GUAMUSHIG

kevin.reaguamushig@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WILLAN LEOPOLDO MONAR MONAR M.Sc.

william.monar@epn.edu.ec

DQM, Febrero 2024

CERTIFICACIÓN

Yo, **KEVIN ALEXANDER REA GUAMUSHIG** declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

KEVIN ALEXANDER REA GUAMUSHIG

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por **KEVIN ALEXANDER REA GUAMUSHIG**, bajo mi supervisión.

ING. WILLAN MONAR M.Sc.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

KEVIN ALEXANDER REA GUAMUSHIG

WILLAN LEOPOLDO MONAR MONAR

DEDICATORIA

Este esfuerzo es dedicado al pilar fundamental de mi vida, conformado por mi padre Ángel, mi madre Laura, mis hermanos Marjorie, Andrés y mi abuelita Celinda. Personas que estuvieron presentes en cada etapa de mi vida y me formaron en el ser humano que soy ahora con su ejemplo, dedicación, paciencia y amor.

Mi padre quien ha sido una persona leal y fiel a sus principios, enseñándome lo ético e íntegro que debo llegar a ser en cada aspecto de mi vida, mostrándome el camino de donde vinimos y a donde debemos llegar.

Mi madre, la persona más noble y bondadosa, quien me ha enseñado el lado sensible y humano que debemos tener nosotros hacia los demás, motivándome hacer este mundo uno mucho mejor

Finalmente, y no menos importante, dedico este trabajo a mis familiares y amigos quienes contribuyeron a mi formación académica y personal. Que este trabajo sea un homenaje al apoyo brindado y desarrollo de nuevos objetivos en un futuro.

Kevin Rea

AGRADECIMIENTO

A mis padres por ser una de las motivaciones principales, quienes con sus sabios consejos y palabras supieron guiarme en el camino de mi formación profesional y personal. La confianza depositada en mis capacidades ha ayudado a superarme en las dificultades atravesadas durante este tiempo de formación. Agradezco por todo el esfuerzo y sacrificio que tuvieron que hacer para que yo pueda gozar el privilegio del estudio. El éxito en esta etapa lo debo a ustedes.

Un especial agradecimiento a mis familiares, Esther, Nancy, Germán, José, Alberto, Hilda, Gonzalo y su pequeña familia Geova, Valery y Anahí, quienes han sido las personas más cercanas quienes han sabido brindarme su ayuda, compañía y han aportado con su granito de arena para que yo pueda cumplir con mis objetivos, agradezco su apoyo y motivación en las decisiones tomadas.

A Xavier por ser una de las personas cuya compañía ha sido importante en el trascurso de mi carrera profesional y personal, tu compañía amigo mío, hizo que esta travesía sea una de las mejores etapas de la vida.

A las personas que la universidad me permitió conocer en especial a Mishelle, Rashell, Daniela y Alisson, cuyas amistades espero conservarlas siempre, me han enseñado el sentido incondicional de una amistad, su amistad es un regalo inestimable.

A José, mi compañero de viajes quien incondicionalmente me ha apoyado y acompañado a descubrir el mundo, llegando a lugares que nunca nos propusimos llegar.

A mis compañeros de carrera, Jordy, Miguel y Kevin, quienes fueron compañía y apoyo durante el proceso de aprendizaje y enseñanza. Finamente y no menos importante a todas las personas y profesores que me ayudaron en mi formación.

Gracias a todas las personas por permitirme ser parte de su vida y haber aprendido de ustedes.

Kevin Rea

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Descripción del componente desarrollado.....	2
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos.....	3
1.4. Alcance	3
1.5. Marco teórico.....	4
1.5.1. Espumas metálicas	4
1.5.2. Procesos de fabricación de espumas metálicas.....	5
1.5.2.1. Procesos de fusión mediante adición de agentes espumantes (Alporas).....	6
1.5.2.2. Procesos mediante inyección de gas en masas fundidas (Cymat).....	7
1.5.2.3. Procesos mediante técnicas de metalurgia de polvos (Alulight).....	8
1.5.2.4. Procesos de infiltración del metal fundido en preformas solubles	9
1.5.3. Caracterización mecánica de la espuma metálica.....	9
1.5.3.1. Prueba de compresión uniaxial	10
1.5.3.2. Prueba de tracción	11
1.5.3.3. Pruebas de dureza	11
1.5.3.4. Pruebas de impacto	12
1.5.3.5. Porosidad.....	12
1.5.4. Chalecos antibalas	13
1.5.5. Fusil calibre 5,56 mm	15
1.5.6. Normativas balísticas y materiales utilizados en chalecos antibalas	16
1.5.6.1. Placas cerámicas de refuerzo utilizadas en chalecos antibalas	18

1.5.6.2.	Placas de polietileno de alto peso molecular (PEAD) para la aplicación en chalecos antibalas	19
1.5.7.	Simulaciones mediante elementos finitos con ANSYS	20
2.	METODOLOGÍA	21
2.1.	Equipos e insumos	22
2.2.	Producción de espuma metálica de aluminio	27
2.3.	Preparación de probetas	28
2.4.	Ensayos para la caracterización de espumas metálicas de aluminio	30
2.4.1.	Ensayo de espectrografía.....	30
2.4.2.	Ensayo metalográfico	32
2.4.3.	Ensayo de micro dureza.....	35
2.4.4.	Ensayo de impacto Charpy	37
2.4.5.	Ensayo de impacto variable	38
2.5.	Medición de porosidad	40
2.6.	Densidad relativa.....	41
2.7.	Simulación del comportamiento de la espuma metálica bajo cargas de impacto	42
2.7.1.	Mapeo y construcción del material	42
2.7.2.	Selección del tipo de análisis	43
2.7.3.	Características del mallado	44
2.7.4.	Ajuste de variables y ejecución de la simulación.....	45
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
3.1.	Resultados	51
3.1.1.	Ensayo de espectrografía.....	51
3.1.2.	Ensayo metalográfico	52
3.1.3.	Ensayo de micro dureza.....	57
3.1.4.	Ensayo de impacto Charpy	59
3.1.5.	Ensayo de impacto variable	60
3.1.6.	Análisis de porosidad	69
3.1.7.	Análisis de densidad relativa respecto al material base aluminio	71
3.1.8.	Resultados de simulación.....	72
3.2.	Análisis de la viabilidad del uso de espumas metálicas en aplicaciones de alto impacto, chaleco antibalas para un fusil calibre 5,56 mm	77
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
4.1.	Conclusiones.....	80

4.2. Recomendaciones.....	81
5. BIBLIOGRAFÍA.....	82
6. ANEXOS.....	85
ANEXO I Informe de resultados: Metalografías.....	85
ANEXO II Informe de resultados: Análisis de Densidad	88
ANEXO III Informe de resultados: Espectrografía por Chispa.....	91
ANEXO IV Resultados de ensayo: Micro dureza	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Espumas metálicas por método de Alporas	6
Figura 1.2 Proceso por inyección de gas en metal fundido mediante proceso Cymat	7
Figura 1.3 Espuma metálica mediante procesos de Alulight	8
Figura 1.4 Comportamiento del sistema chaleco antibalas frente a un proyectil.....	15
Figura 1.5 Configuración del margen de prueba.....	17
Figura 1.6 Ubicaciones generales de los impactos.....	17
Figura 1.7 Especificaciones de normativa estadounidense y alemana	18
Figura 2.1 Lijas abrasivas de agua	22
Figura 2.2 Baquelita negra.....	23
Figura 2.3 Prensa de montaje en caliente LECO MX500.....	23
Figura 2.4 Pulidora automática Forcipol 2V	24
Figura 2.5 Equipo comprobador de impacto variable Elcometer 1615	24
Figura 2.6 Microscopio OLYMPUS SC30.....	25
Figura 2.7 Espectrómetro BRUKER Q2 ION.....	25
Figura 2.8 Micro durómetro DUROLINE-M	26
Figura 2.9 Espuma metálica por el método de infiltración de metal fundido en preformas solubles	27
Figura 2.10 Espuma metálica Duocel fabricada por la empresa ERG Aerospace.....	28
Figura 2.11 Espuma metálica de aluminio rectificada	28
Figura 2.12 Limpieza profunda de la espuma metálica	29
Figura 2.13 Probetas finales para tratamiento de ensayos	29
Figura 2.14 Placa de aluminio y probetas individuales	30
Figura 2.15 Probetas de espuma y placa de aluminio cortadas.....	32

Figura 2.16	Proceso de encapsulado de las probetas de aluminio	33
Figura 2.17	Pulido de las probetas de aluminio	33
Figura 2.18	Probetas listas para ensayo metalográfico	34
Figura 2.19	Ataque químico	34
Figura 2.20	Metalografía de la espuma metálica de aluminio	35
Figura 2.21	Ensayo de micro dureza en espuma metálica de aluminio	36
Figura 2.22	Indentaciones en la espuma metálica de aluminio	36
Figura 2.23	Ensayo Charpy en probeta de espuma metálica.....	37
Figura 2.24	Ensayo de impacto variable a una altura de 15 cm.....	38
Figura 2.25	Espuma y placa de aluminio sometida a una altura de 15 cm	39
Figura 2.26	Espuma metálica ERG Aerospace sometida a ensayo de impacto dinámico.....	39
Figura 2.27	Análisis de porosidad	40
Figura 2.28	Medición de la masa de la placa de espuma metálica	41
Figura 2.29	Mapeo de plancha de espuma metálica.....	42
Figura 2.30	Representación esquemática del material	43
Figura 2.31	Módulo Explicit Dynamics de ANSYS	44
Figura 2.32	Mallado tetraédrico con tamaño de elemento 1 mm	44
Figura 2.33	Equipos utilizados en las pruebas de impacto experimental	46
Figura 2.34	Esfera y placa metálica	46
Figura 2.35	Simulación de esfera impactando placa metálica	47
Figura 2.36	División del sistema a la cuarta parte.....	47
Figura 2.37	Simulación del fragmento del sistema esfera-placa metálica	48
Figura 2.38	Alerta de error durante el proceso de mallado	48
Figura 2.39	Sistema bala-placa de aluminio 2024-T4	49
Figura 3.1	Metalografías de las probetas sin ataque químico 100x	53
Figura 3.2	Metalografías de las probetas con ataque químico	54
Figura 3.3	Líneas de intersección en metalografías de espuma metálica	56
Figura 3.4	Probeta de espuma metálica después de ensayo Charpy	59
Figura 3.5	Altura vs diámetro indentado en las probetas después del impacto	61
Figura 3.6	Deformación en las probetas sometidas a ensayo de impacto variable	62
Figura 3.7	Macrografías de impacto producido por una altura de 15 cm	64
Figura 3.8	Macrografías de impacto producido por una altura de 60 cm	66
Figura 3.9	Macrografías de impacto producido por una altura de 115 cm.....	67

Figura 3.10	Energía potencial generada a diferentes rangos de altura.....	68
Figura 3.11	Muestra para conteo de porosidad lineal	69
Figura 3.12	Muestra para conteo de porosidad superficial.....	70
Figura 3.13	Muestra para medición de separación de poros	71
Figura 3.14	Muestra para medición de superficie de poros.....	70
Figura 3.15	Muestra para medición de porcentaje de porosidad	71
Figura 3.16	Deformación vs velocidad de impacto.....	72
Figura 3.17	Resultados de la simulación y experimentación.....	73
Figura 3.18	Deformación plástica de la placa de aluminio	74
Figura 3.19	Deformación de la placa	75
Figura 3.20	Comportamiento de la velocidad del proyectil.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Especificaciones para las pruebas balísticas.....	18
Tabla 1.2 Propiedades de placas cerámicas.	19
Tabla 1.3 Propiedades de material Dyneema.....	19
Tabla 2.1 Identificación de las probetas para ensayo de espectrografía	31
Tabla 3.1 Composición química de probetas ensayadas por espectrografía.....	51
Tabla 3.2 Resultados de cálculos del tamaño de grano.	56
Tabla 3.3 Resultados de ensayo de micro dureza de espuma metálica	57
Tabla 3.4 Resultados de ensayo de micro dureza de placa metálica	58
Tabla 3.5 Valores de dureza de espuma y placa de aluminio	59
Tabla 3.6 Tamaño de diámetros causado por el impacto en placa y espuma.....	60
Tabla 3.7 Tamaño de diámetros causado por impacto en espuma ERG Aerospace	61
Tabla 3.8 Resultados de conteo de porosidad lineal	69
Tabla 3.9 Resultados de conteo de porosidad superficial.....	70
Tabla 3.10 Resultados de medición de separación de poros	71
Tabla 3.11 Resultados de medición de superficie de poros.....	70
Tabla 3.12 Resultados de porcentaje de porosidad.....	71
Tabla 3.13 Resultados de simulación y comparación de datos	73
Tabla 3.14 Resumen de propiedades de materiales analizados.....	77

RESUMEN

Este proyecto de integración curricular aborda el estudio de nuevos materiales para aplicaciones de alto impacto, como los chalecos antibalas. El material estudiado corresponde a una espuma metálica de aluminio, fabricada por el método de infiltración de metal en preformas solubles utilizando granos de sal como preformas, la muestra final corresponde a una plancha de espuma metálica con un espesor de 14 mm. El material es dividido en probetas rectangulares, utilizadas para la caracterización y obtener las propiedades mecánicas. Por lo tanto, se realiza ensayos de micro dureza, microscopía, macroscopía, espectrografía, densidad, impacto variable, impacto charpy y simulaciones de impacto. Las pruebas de impacto fueron definidas como las más importantes, pues permiten analizar el comportamiento del material y su resistencia frente a cargas de impacto.

El apartado de simulación muestra una metodología desarrollada, que permite validar los resultados que se obtienen por simulación con resultados experimentales presentados en un artículo científico. Se utiliza dicha metodología y se ajustan los parámetros para poder simular el impacto de la bala de calibre 5,56 mm en la espuma metálica de aluminio.

Finalmente, se comparan las propiedades de la espuma metálica caracterizada con placas cerámicas alotec, que son materiales utilizados comúnmente en la fabricación de chalecos antibalas de nivel III y IV, estableciendo las diferencias, ventajas y desventajas de la espuma metálica frente a estos materiales, además, se realiza un análisis de la viabilidad de utilizar las espumas metálicas para aplicaciones en chalecos antibalas para fusiles de calibre 5,56 mm.

PALABRAS CLAVE: Espuma metálica, chalecos antibalas, fusil calibre 5,56mm, simulación de impacto.

ABSTRACT

This curricular integration project addresses the study of new materials for high-impact applications, such as bulletproof vests. The studied material corresponds to an aluminum metal foam, manufactured by the method of metal infiltration into soluble preforms using salt grains as preforms. The final sample consists of a sheet of metal foam with a thickness of 14 mm. The material is divided into rectangular specimens used for characterization and obtaining mechanical properties. Therefore, microhardness tests, microscopy, macroscopy, spectroscopy, density measurements, variable impact tests, Charpy impact tests, and impact simulations are conducted. Impact tests were identified as the most crucial, as they allow analyzing the material's behavior and resistance to impact loads. The impact tests were defined as the most important since they allow the behavior of the material and its resistance to impact loads to be analyzed.

The simulation section shows a methodology that was developed to validate simulation results with experimental results presented in a scientific article. This methodology is employed, and parameters are adjusted to simulate the impact of a 5.56 mm caliber bullet on the aluminum metal foam.

Finally, the properties of the characterized metal foam are compared with Alotec ceramic plates, which are materials commonly used in the manufacture of level III, IV bulletproof vests. The Differences, advantages, and disadvantages of the metal foam compared to these materials are established, in addition, a feasibility analysis is conducted to assess the potential use of metal foams in bulletproof vests for 5.56 mm caliber rifles.

KEYWORDS: Metal foam, bulletproof vests, 5.56 mm caliber rifle, impact simulation.

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ESPUMA METÁLICA EN APLICACIONES DE ALTO IMPACTO PRODUCIDAS POR LA COLISIÓN DE BALAS DISPARADAS CON UN FUSIL DE CALIBRE 5,56 MM

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo donde la seguridad personal y la protección contra amenazas balísticas son de vital importancia, la búsqueda de materiales y tecnologías innovadoras para mejorar la eficacia de los chalecos antibalas es un objetivo primordial. En este contexto, la espuma metálica ha surgido como una opción prometedora para ofrecer una mayor protección y reducir el peso de los chalecos utilizados por las fuerzas de seguridad y militares.

1.1. Descripción del componente desarrollado

Este estudio lleva a cabo la caracterización mecánica de una espuma metálica de celda abierta a base de aluminio, para analizar su factibilidad en la aplicación específica de chalecos antibalas, capaces de resistir impactos de un fusil calibre 5,56 mm. El calibre 5,56 mm de armas de fuego es usualmente utilizado en ámbitos de seguridad y aplicaciones militares alrededor de todo el mundo. Por lo tanto, es importante comprender la capacidad de protección que una espuma metálica puede ofrecer frente a este tipo de proyectil.

Se realizan pruebas experimentales para determinar las propiedades mecánicas de la espuma metálica de aluminio, como la resistencia a la compresión, la capacidad de absorción de energía y la deformación plástica. Estos datos son comparados con los requisitos de los materiales establecidos para los chalecos antibalas existentes y las normas balísticas aplicables.

Además, se lleva a cabo un análisis de la capacidad de la espuma metálica para resistir impactos de proyectiles de calibre 5,56 mm. Se evalúa la capacidad de la espuma metálica para detener y dispersar la energía cinética del proyectil, minimizando el riesgo de lesiones al usuario.

1.2. Objetivo general

Caracterizar una espuma metálica para aplicaciones de alto impacto como chaleco antibalas para un fusil de calibre 5,56 mm.

1.3. Objetivos específicos

- Seleccionar el método más efectivo para la obtención de la espuma metálica.
- Obtener la espuma metálica de aluminio.
- Medir las propiedades mecánicas de la espuma metálica mediante ensayos de micro dureza, espectrografía, microscopía, impacto variable e impacto charpy.
- Comparar las propiedades mecánicas de la espuma metálica con otros materiales usados para chalecos antibalas.

1.4. Alcance

El actual trabajo de integración curricular se basa en criterios propuestos en el trabajo de titulación denominado "Síntesis de Espumas Metálicas de Aluminio de Celda Abierta " (Abarca, 2009), el cual describe el proceso para sintetizar y obtener una espuma metálica de aluminio de celda abierta por el método de infiltración en proformas solubles o removibles, se determina las propiedades mecánicas de la espuma metálica y su viabilidad para la aplicación en un chaleco antibalas diseñado para resistir impactos de proyectiles de fusil de calibre 5,56 mm.

El proyecto de integración curricular se divide en varias etapas. En primer lugar, se realiza la investigación y estudio del estado del arte que conlleva la revisión bibliográfica de estudios, análisis existentes sobre la espuma metálica, métodos de fabricación e identificación de el mejor método para la obtención de la espuma metálica. Por otro lado, se elige los materiales adecuados para definir el material base de la espuma metálica y posibles elementos de combinación que mejoren las propiedades mecánicas del material.

Se lleva a cabo la preparación de probetas, se analiza la forma, dimensiones y procesos de maquinado adecuadas para la obtención de las probetas. La siguiente etapa consiste en realizar ensayos en las probetas para evaluar las propiedades mecánicas de la espuma metálica, para ello se aplica diferentes ensayos que evalúen la densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia al impacto, composición del material y microestructuras.

Se realiza un análisis de impacto, lo cual implica el desarrollo de una simulación para evaluar el comportamiento de la espuma metálica frente a cargas de impacto y la ejecución experimental de un ensayo de impacto variable. Los resultados obtenidos de la caracterización del material se comparan con las propiedades de otros materiales utilizados comúnmente en la fabricación de chalecos antibalas y se analiza la capacidad que posee la espuma metálica para soportar el impacto generado por un fusil de calibre 5.56 mm.

1.5. Marco teórico

En la actualidad, el desarrollo tecnológico experimenta una constante evolución y crecimiento estrechamente vinculado al progreso investigativo de materiales nuevos o materiales innovadores capaces de ofrecer gran variedad de aplicaciones tecnológicas. Dentro de este campo investigativo, se desarrolla el estudio de las espumas metálicas para analizar su viabilidad en aplicaciones antibalísticas, como chalecos antibalas (Gutiérrez & Oñoro, 2008). Para llevar a cabo este estudio se aborda información relevante sobre las espumas metálicas, procesos de fabricación, herramientas para caracterización mecánica, fusil calibre 5,56 mm, revisión de materiales y normativas balísticas utilizadas en campo.

Dentro de los materiales base usados para la fabricación de espumas metálicas, el aluminio es el foco de investigación comparado con otros materiales aun en desarrollo como el níquel, hierro y plomo, pues los costos y procesos de producción en espumas son relativamente económicos. Por otro lado, el aluminio al presentar baja densidad, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión, permite un manejo fácil, rápido y eficaz al momento de materializar las espumas metálicas, es por ello, su preferencia de uso e investigación (Gutiérrez & Oñoro, 2008).

1.5.1. Espumas metálicas

Las espumas metálicas son materiales que contienen vacíos que se originan a través de la dispersión de gases en un líquido. Este proceso, al solidificarse y mantener una morfología constante, genera un material poroso con una estructura de celdas interconectadas en forma de red, esto permite incorporar las propiedades distintivas de los metales y la ligereza que poseen las espumas (Gutiérrez & Oñoro, 2008). Como resultado, las espumas metálicas presentan una interesante combinación de propiedades mecánicas y físicas como la capacidad de absorber energía, resistir cargas mecánicas, elevada rigidez, bajo peso específico, absorción de sonido, protección electromagnética, absorción de energía de impacto y vibración, convirtiéndolas en un material viable para aplicaciones tecnológicas que involucren la absorción de energía.

Las espumas metálicas pertenecen a la categoría de sólido celular, poseen gases dispersos en su interior, que forman una red de celdas poligonales unidas entre si formando un sistema de mallado tipo bidimensional o tridimensional. Las formas y tamaños que poseen las conexiones internas del sólido son muy variables y dependerán del tipo de material, proceso de fabricación, temperaturas de trabajo, tiempos de enfriamiento, etc. Un parámetro clave que diferencia un sólido celular de un sólido poroso es la densidad relativa, dicho valor relaciona la densidad del

material celular respecto a la densidad del material base, permitiendo diferenciar estructuras finales de tipo esponjas y espumas metálicas. (Castro, 2012)

Las espumas metálicas son un derivado de los sólidos celulares artificiales y pueden clasificarse en espumas metálicas de celda abierta, celda cerrada o mixta. Las espumas metálicas de celda abierta se caracterizan por presentar poros conectados, mientras que, si se habla de espumas metálicas de celda cerrada, se hace referencia a que los poros se encuentran separados unos de otros. Por último, se habla de una estructura mixta a una combinación de ambos casos, cuando sus poros se encuentran conectados unos con otros y separados en distintas zonas de la red (Abarca, 2009).

La porosidad presente en las espumas metálicas de aluminio se caracteriza por tener forma esférica y parcialmente cerrada. El tipo de estructura que poseen las espumas metálicas de aluminio permiten tener cierta apreciación en cuando a sus propiedades y características. Por ejemplo, cuando las espumas metálicas de aluminio presentan poros cerrados el valor de rigidez se incrementa y adicionalmente tendrá gran capacidad para es aislamiento acústico. Por otro lado, las espumas metálicas de aluminio que contengan poros abiertos, presentarán propiedades térmicas como disipación de calor, funciones catalíticas, aplicaciones en filtros y la capacidad de recuperación de elementos (Gutiérrez & Oñoro, 2008).

1.5.2. Procesos de fabricación de espumas metálicas

Existen varias formas y metodologías a seguir para la fabricación de espumas metálicas, algunos métodos son similares entre sí y diferenciados por los siguientes aspectos: material base a utilizar, composición fisicoquímica y factor económico. Los métodos de fabricación más popularizados permiten obtener una espuma metálica de buena calidad y homogeneidad, cabe recalcar que se pueden presentar algunos defectos como gradientes de tamaño de poro, residuos de partículas en las divisiones de cada celda que afectan directamente en las propiedades mecánicas. Por lo tanto, gran parte de las investigaciones y desarrollo está vinculado a mejorar los procesos de fabricación ya conocidos, buscando mejorar parámetros como la homogeneidad y porosidad.

Los procesos de fabricación que conlleva la creación de espumas metálicas se basan en técnicas de fase líquida o espumación fundida y técnicas de fase sólida como: fusión mediante adición de agentes espumantes, inyección de gas en masas fundidas, técnicas de metalurgia de polvos e infiltración del metal fundido en preformas solubles.

1.5.2.1. Procesos de fusión mediante adición de agentes espumantes (Alporas)

El método de creación de espumas metálicas por técnicas de fusión es también conocido como metal foaming, utiliza agentes espumantes que constituyen una mezcla de polvo compuesto ejerciendo influencia directa en las propiedades deseadas de la espuma metálica. Algunos agentes espumantes son TiH_2 , $CaCO_3$, hidruro de zirconio y dolomita. El proceso de fabricación contiene diferentes etapas, en primer lugar, el agente espumante se coloca en un crisol de grafito, sirviendo como base para la fusión del metal, en este caso el material base es el aluminio. Luego, se lleva a cabo el proceso de fusión del metal, sometiendo el crisol a un horno de resistencia eléctrica, lo cual permite tener mejor control en el proceso de fundición del material (Parveez et al., 2022).

La Figura 1.1 muestra gráficamente el paso a paso del proceso de fabricación descrito en forma resumida, en el primer recuadro, durante la fusión del metal se debe mantener valores de temperaturas a niveles bajos o estables respecto a los puntos de fusión. Este enfoque permite al material fundido trabajar con valores de viscosidad adecuados y obtener un mejor comportamiento de los agentes espumantes en la mezcla. Para obtener mejores resultados, se pueden añadir agentes estabilizadores que mejoran la estabilidad de las burbujas resultantes, mejorando la calidad de las espumas metálicas (Parveez et al., 2022).

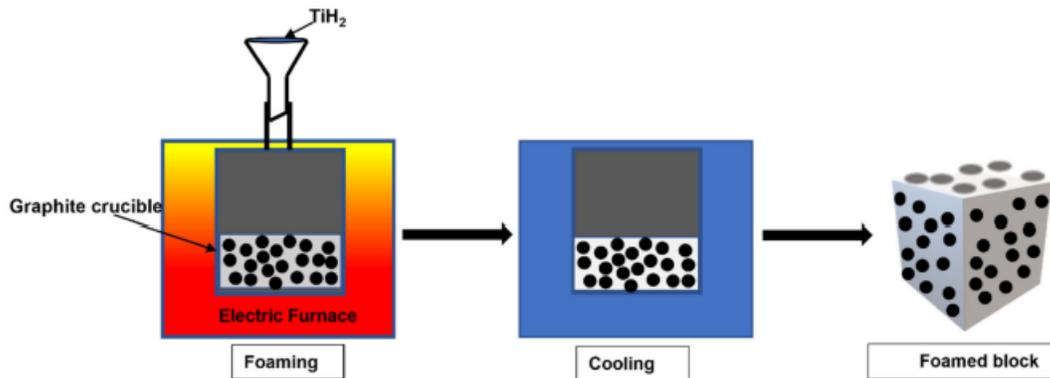


Figura 1.1 Espumas metálicas por método de Alporas

Fuente: (Parveez et al., 2022)

Es esencial agitar el material fundido para asegurar una mezcla homogénea y una distribución uniforme del agente espumante y estabilizadores. Por otro lado, considerar las temperaturas de trabajo de los agentes espumantes, garantizará una descomposición adecuada de los mismos, permitiendo la liberación de gases y burbujas que darán forma a las diversas estructuras de la

espuma metálica. Finalmente, la masa fundida se extrae del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente, culminando así el proceso y obteniendo espumas metálicas (Parveez et al., 2022).

1.5.2.2. Procesos mediante inyección de gas en masas fundidas (Cymat) (Franco & Herrear, 2003)

Este método, comúnmente conocido bajo el nombre comercial Cymat en referencia a la empresa que lo desarrolló y lo utiliza actualmente para la producción de espumas metálicas de celda cerrada, consiste en la inyección de gases cuando el material se encuentra en estado líquido o fundido, los principales gases empleados en este proceso incluyen dióxido de carbono, gases inertes e incluso es viable la utilización de vapor de agua. Este método se aplica con frecuencia en materiales basados en aluminio, aprovechando sus propiedades beneficiosas, como la baja densidad y la resistencia a la corrosión ante la exposición al aire.

En la Figura 1.2 se observa la inyección de gases en el material fundido, en este caso se utiliza el argón como gas para la formación de las estructuras celulares en el material. Cuando mayor sean las burbujas, mayor serán los tamaños de celda creados, es por ello, que se debe controlar las presiones de infiltración de gas, todo debe ser regulado de tal forma que se pueda conseguir una estructura similar en toda la espuma metálica.

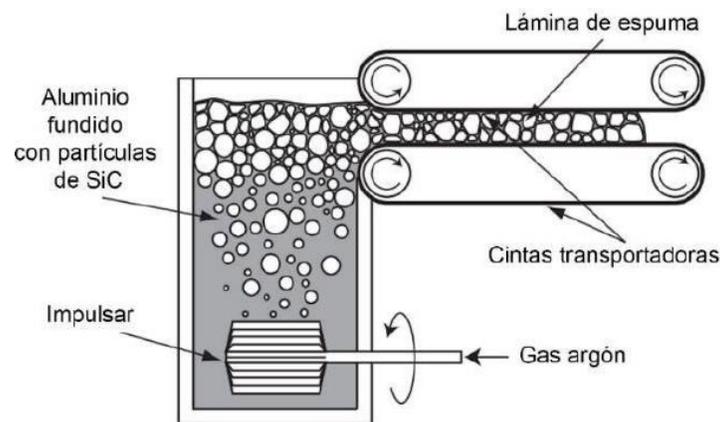


Figura 1.2 Proceso por inyección de gas en metal fundido mediante proceso Cymat

Fuente: (Abarca, 2009)

Las variables críticas por controlar, que determinarán la calidad y homogeneidad del material, incluyen la viscosidad, las temperaturas, el flujo de gas, la fricción del metal, así como los procesos de enfriamiento y solidificación de la espuma. Durante la fase de infiltración de gases, es crucial evitar la fuga de burbujas generadas por la infiltración del gas. Para prevenir este

inconveniente, se estabiliza la viscosidad del material mediante la adición de materiales cerámicos, impidiendo el drenaje de las burbujas. Estos agentes cerámicos pueden tomar la forma de alúmina, grafito o diborato de titanio.

1.5.2.3. Procesos mediante técnicas de metalurgia de polvos (Alulight)

El método desarrollado por Alulight International es conocido como Alulight en referencia a su creador, posibilita la obtención de espumas metálicas basadas en aluminio y aleaciones, con porcentajes de porosidad que varían entre el 63% y el 89%, y dimensiones de poros en la escala milimétrica. Esta técnica es igualmente aplicable para la producción de espumas de acero. El proceso comienza al obtener una combinación entre partículas metálicas, agentes espumantes y un componente fortificante, creando así un precursor espumable. Entre los agentes espumantes comúnmente utilizados junto con polvos de aluminio se encuentra el hidruro de titanio, cuya temperatura de descomposición es alrededor de los 465 °C, es considerablemente menor que la temperatura de fusión del aluminio y sus aleaciones que pueden alcanzar temperaturas de hasta 660 °C. Para asegurar un precursor espumable de calidad, es esencial comprimir y mezclar los componentes en frío para obtener un bloque sólido y compacto, evitando la fuga de gas durante el espumado (Gutiérrez & Oñoro, 2008).

La siguiente etapa, una vez obtenido el material precursor, implica cortarlo en piezas de tamaño pequeño y colocarlo dentro de un molde. Posteriormente, se calienta el molde, lo que desencadena la descomposición del hidruro de titanio, dando lugar a la creación de la estructura celular con vacíos y presiones internas tal como se muestra en la Figura 1.3. Las espumas metálicas generadas por este método están intrínsecamente vinculadas a parámetros críticos como la temperatura de calentamiento del agente espumante, la presión, el tiempo de exposición y el tipo de material base (Ashby et al., 2000).

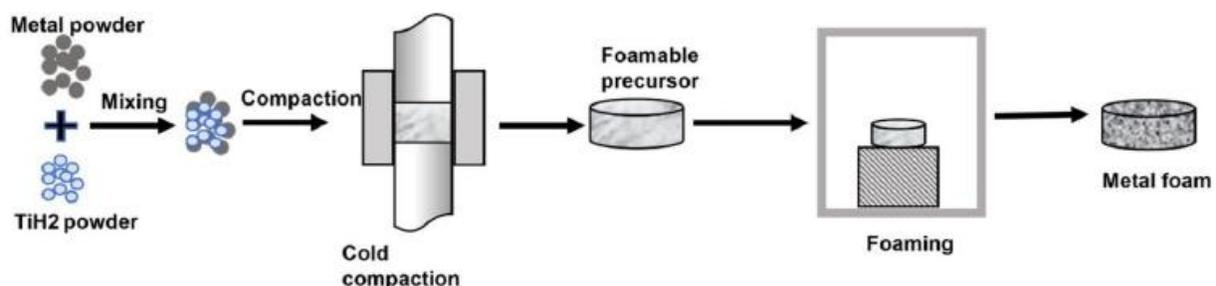


Figura 1.3 Espuma metálica mediante procesos de Alulight
Fuente: (Parveez et al., 2022)

Los resultados de esta metodología permiten obtener espumas metálicas con estructuras de celda cerrada y diámetros en un rango de 1 a 5 mm. Sin embargo, este proceso conlleva costos elevados debido a la manipulación de polvos de metal fino, pues se requiere procesos de mezcla, compactación y un riguroso control de variables (Ashby et al., 2000).

1.5.2.4. Procesos de infiltración del metal fundido en preformas solubles

El proceso de infiltración de metal fundido en preformas solubles, también conocido como la técnica de soporte espacial, se caracteriza por su eficacia y sencillez en la fabricación de espumas metálicas con poros de tamaños y formas controlados. Esta técnica utiliza espaciadores, generalmente partículas de cloruro de sodio NaCl, mezclados con polvos metálicos y aglutinantes que mejoran la resistencia del material. Durante el proceso se crea una preforma de material sólido con los espaciadores y se los rellena con el metal fundido. Posteriormente, los espaciadores se disuelven y dan origen a las diferentes formas y tamaños de celda, la forma más eficiente de disolución es por medio del uso de agua. Sin embargo, esto puede conllevar a problemas de corrosión producidos por la mezcla entre el agua y la sal, produciendo un agente corrosivo, dicho problema se puede apreciar en ambientes marinos donde el metal está expuesto a condiciones salinas (Abarca, 2009).

Las espumas metálicas fabricadas por este método presentan una mejorada resistencia a la compresión, esta resistencia está directamente relacionada con el tamaño de los espacios en las celdas, cuanto mayor sea el espacio, mayor será la capacidad de la espuma para absorber energía (Parveez et al., 2022). Este método de fabricación también facilita la creación de estructuras con propiedades adaptadas a las necesidades requeridas en aplicación, en el caso práctico, se busca obtener espumas metálicas con diferentes morfologías capaces de absorber gran cantidad de energía de impacto producidos por un fusil.

1.5.3. Caracterización mecánica de la espuma metálica

La caracterización de materiales porosos conlleva una selección cuidadosa de técnicas para preparar y realizar ensayos según el tipo de caracterización requerida, ya sea microestructural o mecánica, pues las espumas metálicas al tener una estructura compleja y variable hacen difícil establecer lineamientos o normativas para llevar a cabo ensayos mecánicos, por ello es importante tener como referencia las normativas existentes y aplicables en metales y sus aleaciones, como punto de estudio el material base utilizado es el aluminio. Por lo tanto, los estándares y normativas estarán alineados a este material, teniendo en cuenta las precauciones

necesarias relacionadas al acabado superficial y dimensionamiento de las probetas. Es vital tener en cuenta que las probetas deben tener un tamaño considerable en relación al tipo de ensayo a realizar (Castro, 2012).

En el presente trabajo de integración curricular, se lleva a cabo ensayos mecánicos destinados a evaluar diversas propiedades mecánicas, así como el comportamiento de la espuma metálica frente a fuerzas externas, siendo el ensayo de impacto uno de los más relevantes y fundamentales para el desarrollo del proyecto, también se evaluará propiedades como la densidad y porosidad de las espumas metálicas obtenidas. La caracterización del material seguirá métodos utilizados en otros materiales metálicos, adaptándose a los requisitos y alineamientos establecidos de acuerdo con normativas relacionadas al estudio de espumas metálicas.

Es importante considerar ciertas recomendaciones para el maquinado de las probetas de espuma metálica, dado que, al ser un material celular, pueden generarse daños durante el proceso de corte. Por lo tanto, se sugiere emplear técnicas de corte mediante el uso de sierra con disco de diamante, electroerosión por hilo, maquinado por descarga eléctrica, chorro de agua a alta presión o fresado químico (Ashby et al., 2000). Se aborda información relevante y recomendación de normas para llevar a cabo las pruebas para la caracterización mecánica en espumas metálicas, dichas pruebas corresponden a compresión uniaxial, tracción, dureza, impacto y porosidad.

1.5.3.1. Prueba de compresión uniaxial

Las pruebas de compresión uniaxial se distinguen por la aplicación de fuerzas estáticas a lo largo del eje longitudinal de un espécimen compuesto por un material específico. Este proceso resulta en una deformación del espécimen hasta su fractura o conclusión de la prueba de compresión (Carranza, 2023). Dada la complejidad en las estructuras de las espumas metálicas, se toma como referencia algunas normativas que se aplican en el estudio de las propiedades en metales y aleaciones. Las normas que se aplican son:

ASTM E9 (Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature): Esta normativa se emplea para realizar ensayos de compresión en materiales a temperatura ambiente (ASTM International, 2019)

ASTM C365 (Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores): Utilizada para estudiar las propiedades de compresión en materiales tipo sándwich, puede ser una referencia útil para el análisis de espumas metálicas (ASTM International, 2022).

Para llevar a cabo ensayos de compresión uniaxial en espumas metálicas es recomendable el uso de probetas tipo cilíndricas o prismáticas. Es fundamental considerar que la relación entre la altura y el espesor de la probeta debe ser superior a un valor de 1.5. Así mismo, se recomienda que la relación entre el tamaño relativo de (L/d) , donde “L” representa la longitud de la probeta y “d” el tamaño de celda, sea mayor o igual a 7 (Ashby et al., 2000).

1.5.3.2. Prueba de tracción

Para ensayos de tracción en espumas metálicas se recomiendan probetas cilíndricas entalladas, se debe tener en consideración los extremos de las probetas, pues dichas partes estarán en contacto con los instrumentos de sujeción. Para mejorar la fricción entre los instrumentos de sujeción y la probeta, se recomienda el uso de papel lija o una unión adhesiva (Ashby et al., 2000). El diámetro de las probetas deben ser al menos 7 veces el tamaño de las celdas en las espumas metálicas. Las normas que se aplican son:

ASTM E8 / E8M (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials): Normativa estándar para ensayos de tensión en materiales metálicos (ASTM International, 2022).

ISO 6892-1 (Metallic materials, Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature) : Normativa para ensayos de tensión a temperatura ambiente (International Organization for Standardization, 2019).

El uso de extensómetros ubicados en la zona entallada de la probeta permite obtener una mejor medición del desplazamiento. Por otro lado, parámetros como el módulo de Young, resistencia a la tracción, tenacidad, entre otros, se miden a partir de la curva de esfuerzo deformación obtenida por la implementación de los ensayos de tracción (Strek, 2012).

1.5.3.3. Pruebas de dureza

Los ensayos de dureza permiten estudiar las propiedades relacionadas con la fuerza, ductilidad y resistencia que posee la espuma metálica, mediante el uso de un penetrador, el cual puede ser una esfera o un cilindro de extremo plano, se debe tomar en cuenta que el diámetro de la esfera D debe ser mayor que el tamaño de la celda d, es decir, la relación entre D/d debe ser mayor a

7. Para llevar a cabo ensayos de dureza por indentación se recomienda realizar indentaciones al menos a un diámetro de distancia de los bordes de la placa. En estos ensayos se ha observado que los valores de resistencias disminuyen conforme los valores del diámetro del indentador aumentan. Por lo tanto, es de vital importancia elegir el tamaño del indentador adecuado conforme la relación de diámetros D/d (Ashby et al., 2000). Las normas que se aplican son:

ASTM E92 (Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials): Normativa asociada a procedimientos para realizar ensayos de dureza Vickers (ASTM International, 2023b).

ASTM E10 (Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials): Normativa asociada a procedimientos para realizar ensayos de dureza Brinell (ASTM International, 2023a).

1.5.3.4. Pruebas de impacto

Estos ensayos permiten analizar el comportamiento de un material sometido a cargas dinámicas de impacto, estas pruebas permiten medir la tenacidad al impacto, controlar la calidad del material y realizar análisis de fracturas provocadas por los impactos generados (Ashby et al., 2000). Las normas que se aplican son:

ASTM E23-23^a (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials): Normativa asociada al estudio del comportamiento del metal al someterlo a una fuerza de impacto (ASTM International, 2022).

ASTM D5628-18 (Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dar): Esta normativa estudia el comportamiento de un material frente a cargas de impacto mediante el uso de dardo arrojados desde diferentes alturas (ASTM International, 2022).

1.5.3.5. Porosidad

La porosidad es uno de los parámetros con mayor relevancia en las espumas metálicas, pues permite determinar la mayor parte de propiedades mecánicas y físicas que posee la espuma metálica. Es importante tener en cuenta que, para llevar a cabo el estudio de la porosidad, se debe tener en cuenta factores como la densidad relativa y los tamaños de los poros en el metal poroso (Abarca, 2009).

El análisis de la porosidad permite analizar la cantidad o fracción de gas que se encuentra dentro de la espuma metálica, también se pueden emplear metalografías para obtener dimensionamientos en cuanto al tamaño de poros, para los análisis se puede utilizar las siguiente expresión (Abarca, 2009):

$$p = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s - \rho_g} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

p : Porosidad

ρ : Densidad del material celular

ρ_s : Densidad del material base

ρ_g : Densidad del gas disperso en la espuma metálica

La densidad relativa, la cual se encuentra en una escala del 0 al 1, donde 0 expresa un material sumamente poroso y 1 representa un material sólido en su totalidad (Ashby et al., 2000):

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_s} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

ρ_r : Densidad relativa

ρ : Densidad del material celular (Espuma metálica)

ρ_s : Densidad del material base

1.5.4. Chalecos antibalas

En el ámbito del armamento, el chaleco antibalas se destaca como uno de los elementos de protección más efectivos, aunque estas prendas no tienen la capacidad de detener completamente el impacto de un proyectil, sí pueden mitigar sus efectos y prevenir lesiones graves al usuario. En la fabricación de chalecos antibalas, se han explorado diversos diseños con el objetivo de lograr reducciones significativas en peso y grosor, buscando así cumplir con distintos requisitos y especificaciones.

Un chaleco antibalas se define como un equipo de protección diseñado para ofrecer resguardo contra el impacto de proyectiles provenientes de armas de fuego, armas blancas, entre otros. Su función principal consiste en absorber y disipar la energía cinética generada por el impacto de manera que impida la penetración del proyectil en el cuerpo del usuario. Los chalecos

convencionales se caracterizan por su ligereza y flexibilidad, proporcionando una defensa limitada contra proyectiles deformables, fragmentos de granadas de mano, proyectiles de armas cortas. No obstante, para enfrentar impactos de proyectiles de mayor calibre, como los provenientes de fusiles de alta velocidad, ametralladoras o municiones afiladas, se recurre a chalecos equipados con placas rígidas y pesadas, superpuestas sobre el chaleco tradicional. Este enfoque, aunque brinda una mayor protección, afecta la movilidad y comodidad del usuario, generando sensaciones incómodas (Gago et al., 2017).

En la actualidad, la fabricación de chalecos antibalas se concentra en la creación de materiales poliméricos que satisfagan la demanda de ligereza y flexibilidad. Por esta razón, se han creado diversos materiales, siendo el Kevlar uno de los materiales ampliamente más empleados en la industria debido a sus variadas propiedades. A pesar de la prevalencia del Kevlar, se han ideado nuevos materiales y fibras, como el Dyneema, Spectra, Twaron o el Zylon (Fayed et al., 2023), para su implementación en chalecos antibalas, marcando avances significativos en este ámbito de desarrollo

El Kevlar 29 se destaca por sus propiedades excepcionales, que incluyen una notable resistencia a la tensión, gran flexibilidad, ligereza y su llamativo color amarillo, así como elasticidad. A pesar de estas cualidades positivas, el Kevlar presenta desafíos al exhibir considerables deformaciones bajo impacto, lo que puede resultar en daños para los usuarios. Para abordar este problema, se ha desarrollado material de refuerzo que ha dado lugar a la creación de materiales de blindaje.

Las propiedades más destacables del Kevlar 29 son: resistencia a la tracción con valores de hasta 3.5 [Gpa], alargamiento a la rotura con valores que oscila entre el 3.3% y el 4.4%, tenacidad con valores de 50 [MJ/m³] y propiedades térmicas con temperaturas de descomposición entre 430°C y 480°C. Por lo tanto, este material es uno de los candidatos comúnmente utilizados en la fabricación de chalecos antibalas, pues mejoran la resistencia, absorción de energía, resistencia a impactos y disipación de energía. (Morales-Martín & Rodríguez Simón, 2022).

En la Figura 1.4 se observa el comportamiento de un chaleco antibalas, que está conformado por capas de Kevlar y un material de refuerzo en este caso una placa de acero. El Kevlar, por sí solo, no puede detener y disipar completamente la energía que posee el proyectil, por ello es necesario una placa o material de refuerzo que permita disipar la energía de impacto y detener al proyectil. La función principal del Kevlar es reducir y mitigar toda la energía posible antes de impactar con el material de refuerzo.

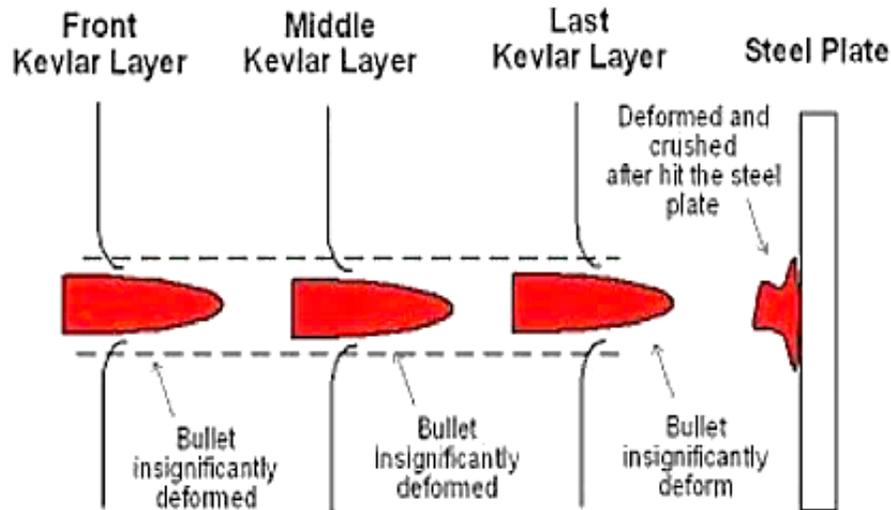


Figura 1.4 Comportamiento del sistema chaleco antibalas frente a un proyectil

Fuente: (Sastranegara et al., 2022)

1.5.5. Fusil calibre 5,56 mm

Los fusiles son herramientas de protección utilizados comúnmente por las fuerzas militares y policiales, se caracterizan por tener un buen alcance efectivo, que varían dependiendo del modelo y las condiciones de tiro, pero a menudo se encuentra en un rango de 300 a 600 metros. Por otro lado, la velocidad de salida de la bala de un fusil de calibre 5.56 mm suele estar en el rango de 850 a 1 000 m/s, ofreciendo opciones de tiro automático y semiautomático (Johnston & Nelson, 2010).

El calibre 5.56 mm es uno de los más populares en el mundo, este cartucho estandarizado por la OTAN comenzó a funcionar en junio de 1976, se basa en el estándar militar STANAG 4172, que cubre municiones OTAN de 5,56 × 45 mm, dicho estándar especifica las dimensiones y características técnicas para este calibre. Esto ha llevado a la creación de una gama amplia de partes y proyectiles de munición, a este calibre se lo conoce con otros nombres como el cartucho Remington .223 y proyectil de bola SS109, la denominación del nombre dependerá de la región en donde se fabrique (Johnston & Nelson, 2010).

Debido a la estandarización del calibre 5.56 mm, existen numerosos modelos de fusiles que utilizan estas municiones, incluyendo el M16 y el M4 en los Estados Unidos, el FAMAS en Francia, y el SA80 en el Reino Unido. Cada fusil posee características únicas en términos de diseño, ergonomía y rendimiento (Johnston & Nelson, 2010).

1.5.6. Normativas balísticas y materiales utilizados en chalecos antibalas

Las pruebas de chalecos antibalas son realizadas según estándares específicos establecidos por organizaciones de pruebas balísticas. Uno de los organismos más conocidos en este campo es el Instituto Nacional de Justicia (NIJ) en Estados Unidos; específicamente en estándar NIJ 0101.06. Una norma balística latinoamericana corresponde a la siguiente norma: “Norma Oficial Mexicana NOM-166-SCFI-2005, seguridad al usuario-chalecos antibalas-especificaciones de seguridad y métodos de prueba”, que se basa en el estándar del Instituto Nacional de Justicia (NIJ). Por lo tanto, en esta normativa se establece que los chalecos antibalas de nivel III o el nivel IV, son apropiados para la protección contra municiones de rifle, siendo capaces de soportar el calibre 5.56 mm (Díaz et al., 2005).

Se detalla información respecto a materiales utilizados en la fabricación de chalecos antibalas con datos sobre sus propiedades mecánicas más relevantes. Los materiales investigados corresponden a placas cerámicas de diferentes categorías y las placas de polietileno de alto peso molecular (PEAD) haciendo énfasis en el Dyneema, la cual es un tipo de PEAD que se utilizan con frecuencia en la construcción de chalecos antibalas.

Para que los chalecos o placas balísticas sean aprobados deben ser sometidos a pruebas específicas que varían según el tipo de chaleco, así pues, los chalecos de nivel de protección III deben ofrecer protección contra balas con revestimiento de metal (FMJ) de calibre 7,62 mm, con masas nominales de 9,6 g (148 gr) y que tengan una velocidad medida de $847 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ ($2780 \text{ ft/s} \pm 30 \text{ ft/s}$). Por otro lado, chalecos de nivel de protección IV deben ofrecer protección contra balas con núcleo de acero templado (AP) calibre 7,62 mm, con masas nominales de 10,8 g (166 gr) que tengan una velocidad medida de $879 \text{ m/s} \pm 9,1 \text{ m/s}$ ($2880 \text{ ft/s} \pm 30 \text{ ft/s}$) (Díaz et al., 2005) (Díaz et al., 2005).

Las pruebas consisten en realizar disparos a los chalecos según las velocidades y tipos de calibre especificados en la norma, así como las distancias e instrumentos necesarios como se muestra en la Figura 1.5, según el número de disparos y su ubicación según la Figura 1.6. Los chalecos y placas balísticas son ubicadas frente a un material testigo que es un bloque homogéneo de plastilina, en el cual se verifica la marca de impacto y se acepta o no según la medida de su profundidad. Además, cabe resaltar que se realizan pruebas en seco y húmedo.

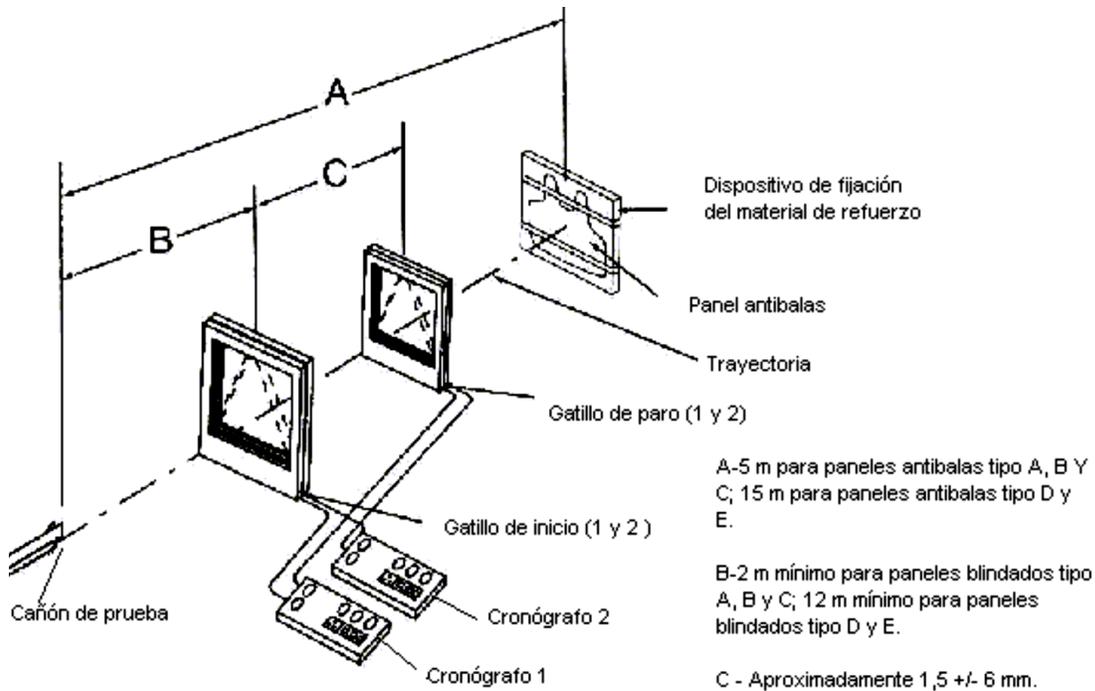


Figura 1.5 Configuración del margen de prueba.

Fuente: (Diaz et al., 2005)

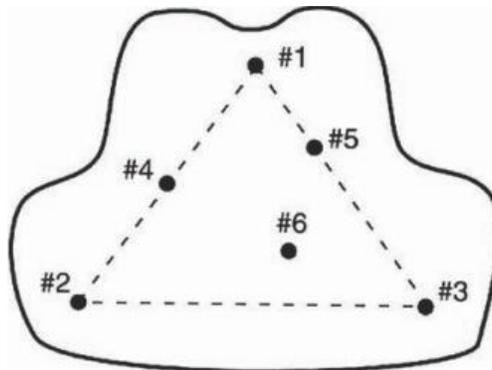


Figura 1.6 Ubicaciones generales de los impactos.

Fuente: (Diaz et al., 2005)

Para el Nivel de protección III y IV, el grupo de pruebas debe estar constituido por cuatro placas balísticas de muestra no más pequeñas de 254 mm x 305 mm (10 in x 12 in). Dos de estas, deben seleccionarse al azar y usarse para la prueba. Por último, los criterios de aceptación de la norma, como se muestra en la Tabla 1.1, para los niveles III y IV son: a) Sin perforación hecha por una bala, fragmento de bala o fragmento de la placa a través del panel balístico. b) Si la profundidad del trauma o depresión en el material testigo no es mayor a los 40 mm (1,6 in) (Diaz et al., 2005).

Tabla 1.1 Especificaciones para las pruebas balísticas.

Fuente: (Diaz et al., 2005)

Variables de las pruebas				Requisitos del rendimiento						
Nivel de protección	Tipo de balas para cada prueba	Peso de la bala	Velocidad de referencia de la bala $\pm 9,1$ m/s (± 30 ft/s)	Impactos al panel balístico a un ángulo de incidencia de 0°	Marca de impacto máxima	Impactos al panel balístico a un ángulo de incidencia de 30°	Impactos por panel	Número de impactos por chaleco	Impactos por serie de prueba	Disparos totales requeridos
III	7,62 mm OTAN FMJ	9,6 g (148 gr).	847 m/s (2 780 ft/s)	6	40 mm (1,6 in)	0	6	12	12	12
IV	7,62 mm AP	10,8 g (166 gr).	879 m/s (2 880 ft/s)	1	40 mm (1,6 in)	0	1	2	2	2

Complementariamente, en la Figura 1.7 se presentan las especificaciones de pruebas de las normas alemanas y estadounidenses que son similares a la expuesta anteriormente, y en especial porque el calibre .223 Remington de la norma alemana se ajusta al calibre 5.56 mm, que es objeto de estudio.

NIJ STD 0101.04 ESPECIFICACIONES				
Nivel	Bala de prueba	Masa de bala (gr)	Velocidad (m/s)	Trauma max.
III	7.62mm NATO ball	9.6	847 \pm 9	44
IV	.30 caliber M2 AP	10.8	878 \pm 9	44

GERMAN SCHUTZKLASSE STANDARD TR03/2008 ESPECIFICACIONES				
Nivel	Bala de prueba	Masa de bala (gr)	Velocidad (m/s)	Trauma max.
SK3	.223 Remington FMJ/PB/SCP MEN, SS109	4.0	950 \pm 10	40 \pm 2
	.308 Winchester FMJ/PB/SC MEN, DM111	9.55	830 \pm 10	40 \pm 2
SK4	.308 Winchester FMJ/PB/HC FNB, P80	9.7	820 \pm 10	40 \pm 2

Figura 1.7 Especificaciones de normativa estadounidense y alemana

Fuente: (Engarde, 2024)

Las placas de cerámica y polietileno son utilizadas en chalecos antibalas y cumplen con las pruebas propuestas en el NIJ 0101.06, poseen una serie de propiedades y características específicas que les permiten ofrecer una protección efectiva para chalecos de nivel de protección III y IV.

1.5.6.1. Placas cerámicas de refuerzo utilizadas en chalecos antibalas

Las placas de cerámica utilizadas en chalecos antibalas suelen estar hechas de óxido de aluminio (Alúmina Al₂O₃), carburo de silicio (SiC) o carburo de boro (BC), entre las principales propiedades que tienen estas placas balísticas cerámicas se tienen: dureza muy alta, tenacidad al impacto moderada y resistencia a la compresión muy alta. Algunas de estas propiedades se

muestran en la Tabla 1.2 y fueron obtenidas del catálogo de la empresa CeramTec, especializada en fabricar estos elementos (CeramTec, 2024).

Tabla 1.2 Propiedades de placas cerámicas.

Fuente: (CeramTec, 2024)

Propiedades	Unidades	ALOTEC 98 SB	ALOTEC 99 SB	ALOCOR 100	SICADUR F	BOCADUR
Densidad	ρ (g/cm^3)	3.80	3.87	>3,97	3.1	2.48
Porosidad residual	P (%)	<2	<2	<0.1	<2.5	0.5
Tamaño de grano medio	D (μm)	6	10	0.85	<5	<15
Dureza Vickers	$HV(5)$ (GPa)	13.5	15	21	26	32
Módulo de Young	E (GPa)	335	365	405	410	420
Resistencia a la flexión	σ_b (MPa)	260	280	500	400	450

1.5.6.2. Placas de polietileno de alto peso molecular (PEAD) para la aplicación en chalecos antibalas

El PEAD utilizado en chalecos antibalas a menudo se encuentra en forma de fibra como el Dyneema, este tipo de compuestos se caracterizan por tener una dureza menor que la cerámica, pero su estructura de fibra da una alta resistencia a la tracción, además de una muy buena tenacidad al impacto, lo cual permite la capacidad de absorber y dispersar energía. Existen varios tipos, que se diferencian por su composición y propiedades, a continuación, en la Tabla 1.3 se muestran resumidas las propiedades mecánicas de algunos tipos de Dyneema, que brindan protección balística.

Tabla 1.3 Propiedades de material Dyneema

Propiedades Mecánicas	Unidades	SK76	HB26	HB80
Densidad	ρ (g/cm^3)	0.975	0.98	0.98
Módulo de Young en la dirección más favorable	E (GPa)	130	81.39	56.32
Módulo de rigidez en la dirección más favorable	G (GPa)	--	0.72	0.89
Resistencia a la tracción	σ_t (MPa)	3600	--	--

Fuente: (Chricker et al., 2021; Gilson et al., 2020; Tatár & Mészáros, 2023)

1.5.7. Simulaciones mediante elementos finitos con ANSYS

ANSYS es un software de simulación para ingeniería que busca predecir el funcionamiento de un producto en un entorno real y aplica el método de análisis de elementos finitos (FEA), este es una representación matemática de un sistema físico que comprende una pieza/conjunto, propiedades del material y condiciones de contorno. Debido a que el comportamiento del producto no se puede aproximar manualmente, este método se encarga de presentar los comportamientos complejos por medio de la representación precisa de fenómenos físicos aplicando ecuaciones diferenciales parciales. El software crea elementos que contienen nodos, por medio del mallado, que representan la forma de la geometría. En cuanto a los tipos de mallado 3D se tienen elementos del tipo tetraédricos y hexaédricos, así mismo la calidad de la malla se basa en que se adapte a las necesidades (tipo de análisis, nivel de precisión, tiempo) como la calidad del elemento y la relación de aspecto (Ansys, 2021).

La dinámica explícita es un método que se aplica para resolver problemas en los que se tienen condiciones de eventos de corta duración con productos que sufren fuerzas dinámicas transitorias y altamente no lineales, que resultarían demasiado complejas para métodos implícitos. Este método explica condiciones que varían rápidamente o eventos discontinuos, entre los que se incluyen: interacciones de corta duración, cargas cuasi estáticas, impactos de alta velocidad, fallo y fragmentación de materiales, mecánica de penetración, entre otras. Por ello, ANSYS ha desarrollado el software ANSYS LS-DYNA, este es un software de simulación explícito y capaz de simular la respuesta de materiales ante períodos cortos de carga severa; permite simular los problemas planteados anteriormente, así como abordar simulaciones que requieran verificar fallas de materiales y verificar cómo progresa la falla a través de una pieza o de un sistema (Ansys, 2022).

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo utiliza un enfoque mixto, a través de un modelo experimental y teórico, se estructura en tres etapas: fabricación, ensayos y simulación del comportamiento de la espuma metálica frente a cargas de impacto. Cada etapa contiene aspectos esenciales en el proceso de caracterización de la espuma metálica. En primer lugar, se fabrica la espuma metálica a partir del método de infiltración del metal en preformas solubles utilizando NaCl o granos de sal como proformas, este proceso permite obtener espumas metálicas de forma sencilla, pues la complejidad del proceso es reducida y utiliza componentes de fácil acceso como la sal en grano y el aluminio como material base, el cual es un metal de uso común. Por otro lado, la espuma metálica obtenida se basó en la metodología descrita en el trabajo de titulación “Síntesis de Espumas Metálicas de Aluminio de Celda Abierta” (Abarca, 2009), con modificaciones en la forma final de la espuma, llegando a obtener una plancha de espuma metálica de aluminio de celda abierta con dimensiones específicas: un espesor de 14 mm, un largo de 150 mm y un ancho de 100 mm.

Los ensayos que se realizan incluyen pruebas de impacto, densidad, metalografías y espectrometrías siguiendo los criterios establecidos en normativas. Se evalúa la factibilidad de realizar ensayo de tensión bajo normativa ASTM E8 y ensayo de impacto Charpy ASTM E23, debido a la alta porosidad que posee el material estudiado. La porosidad dificulta los procesos de maquinado de las probetas para cumplir con las medidas establecidas por las normas, por ello se busca la mejor forma para preparar las probetas sin causar daños que afecten los resultados finales.

Finalmente, se efectúa simulaciones de impacto en la espuma metálica de aluminio mediante el método de elementos finitos, utilizando ANSYS STUDENT 2024 R1 con su módulo Dynamics Explicit como herramienta de simulación. La versión estudiantil de este software presenta limitaciones respecto al número de nodos y la cantidad de elementos en función del tipo y tamaño del mallado. Los resultados de estas simulaciones son fundamentales para analizar los esfuerzos y deformaciones en la espuma metálica, proporcionando una mejor comprensión de su comportamiento. En este apartado se aplican métodos de discretización y refinamiento de mallado para poder ejecutar una buena simulación reduciendo el gasto computacional y tiempos de simulación, así mismo se adoptan consideraciones como la forma final de la probeta para poder simplificar el fenómeno dinámico y ajustarse a la capacidad limitada que ofrece la licencia estudiantil de ANSYS.

2.1. Equipos e insumos

Se presentan los diferentes equipos y materiales utilizados durante el proceso de fabricación, realización de ensayos y simulación, para poder llevar a cabo la caracterización mecánica de la espuma metálica.

Para la fabricación del material, las características de los equipos e insumos se describen en detalle en la metodología expuesta en “Síntesis de Espumas Metálicas de Aluminio de Celda Abierta” (Abarca, 2009). Se toma en cuenta equipos principales como: hornos de fundición de pared delgada, horno mufla eléctrico, bomba de vacío, sistema de válvulas y tamices. Los materiales base son: Granos de NaCl como material para las preformas, aluminio como metal de infiltración, molde de una plancha plana, tanque de gas argón, grafito en polvo y tamices.

Para la caracterización, realización de ensayos y simulación se utilizaron los siguientes equipos e insumos: lijas abrasivas de agua, baquelita negra, máquina de montaje en caliente, pulidora automática, equipo para ensayo de impacto, microscopios, espectrómetro, micro durómetro y software ANSYS STUDENT 2024 R1.

La Figura 2.1 muestra las lijas abrasivas de agua, las cuales son un papel de tipo cartón y se encuentran recubiertas con un material abrasivo y diferenciadas por el tamaño de grano, estas lijas utilizan el agua como agente lubricador. Adicionalmente, se presenta un dispositivo que permite colocar varias lijas de forma ordenada, de tal forma que al momento de lijar se pueda abrir una válvula que permita el flujo controlado de agua sobre ellas. Se utilizan lijas para poder desbastar el material en exceso, pulir probetas y obtener acabados superficiales de buena calidad, las lijas usadas son la número 100, 150, 240, 320, 400, 600, 1200, 1500 y la 2500, adicionalmente, se hacen pasadas con lijas de hasta 3 micras para dar acabados finales.



Figura 2.1 Lijas abrasivas de agua

La Figura 2.2 muestra el tipo de resina utilizada correspondiente a la baquelita negra, este es un material necesario para encapsular a las probetas del material, se encuentra en forma de granos por lo que es necesario pesar la cantidad requerida para embutir una probeta, para las probetas de espuma metálica se utilizaron 20g de baquelita negra por probeta. Es necesario tomar en cuenta las temperaturas necesarias para que este material se funda y se adapte a la forma de un molde.



Figura 2.2 Baquelita negra

La Figura 2.3 muestra una máquina de montaje en caliente de la marca LECO modelo MX500, con una capacidad de montaje de hasta 50 mm, este dispositivo se encarga de encapsular a las probetas por medio de la fundición de la baquelita negra. La máquina maneja temperaturas elevadas para poder fundir los materiales de base prima, para el enfriamiento de las piezas encapsuladas se utiliza agua como refrigerante, de tal forma que el proceso de encapsulado dure un tiempo de 5 minutos y enfriamiento de 3 minutos adicionales. Es importante tener en consideración la limpieza de los moldes que son utilizados para encapsular las probetas, pues se puede presentar inclusiones o desechos que pueden dañar la forma final del encapsulamiento.



Figura 2.3 Prensa de montaje en caliente LECO MX500

La Figura 2.4 muestra una pulidora automática de marca FORCIPOL, posee un soporte para probetas cilíndricas con capacidad de giro en sentido horario como antihorario, permite controlar la fuerza axial sometida a las probetas y velocidades de giro. El equipo cuenta con una base rotativa, a la cual se adhiere una lija abrasiva, en este equipo se llevó a cabo el lijado y preparación de probetas para metalografías en el laboratorio de metalografía, desgaste y falla en la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 2.4 Pulidora automática Forcipol 2V

La Figura 2.5 muestra el equipo para ensayos de impacto el cual corresponde a un comprobador de impacto variable, su marca comercial es Elcometer 1615. Este dispositivo permite estudiar el comportamiento del material frente a cargas de impacto, analizando su resistencia mecánica y deformación. Se utilizan dardos que son liberados desde cierta altura hasta llegar a deformar el material.



Figura 2.5 Equipo comprobador de impacto variable Elcometer 1615

La Figura 2.6 muestra un microscopio óptico de la marca OLYMPUS modelo SC30, este dispositivo permite obtener imágenes metalográficas que permiten analizar detalles en la estructura del material, el dispositivo se ajusta a probetas circulares con un diámetro máximo de 40 milímetros, ofrece la capacidad de ajustar el zoom y la cantidad de luminosidad necesaria para tomar una captura metalográfica mediante un software que permite la conexión con un CPU externo.



Figura 2.6 Microscopio OLYMPUS SC30

La Figura 2.7 muestra un espectrómetro de la marca BRUKER modelo Q2 ION, este dispositivo genera un arco de 0.01 ms a 2ms por chispa, frecuencia de 50 a 100 Hz, software (PSA) paquete de solución analítica. Este equipo se utiliza para realizar ensayos de espectrometrías por chispa y permite determinar los elementos presentes en un material, en este caso se utiliza para determinar la composición química de una probeta de espuma metálica, durante el ensayo en este dispositivo se utilizó la norma ASTM E1251 – 17^a (ASTM, 2017). con el método Al 100 Base.



Figura 2.7 Espectrómetro BRUKER Q2 ION

La Figura 2.8 corresponde a un micro durómetro, el cual es un dispositivo que permite conocer la dureza del material mediante micro indentaciones con cargas aplicadas, el equipo es un durómetro de la marca METKON y modelo DUROLINE-M. Este equipo mide la dureza en escala Vickers, mediante el análisis de la longitud que presentan las diagonales después de la micro indentación, para dicho análisis el dispositivo cuenta con un microscopio y perillas de ajuste que permiten controlar el enfoque y posición del elemento. Posee dardos de diferentes pesos, en el caso práctico se utilizó una carga de 100 gf, el tiempo promedio de indentación es de 15 segundos. Finalmente, para la aplicación en ensayos de micro dureza mediante micro indentación es importante que las probetas sean limpiadas y tratadas de tal forma que se eliminen la mayor parte de imperfecciones e irregularidades de su superficie.



Figura 2.8 Micro durómetro DUROLINE-M

En el apartado simulación se utilizó ANSYS STUDENT 2024 R1, el cual es un software especializado para llevar a cabo simulaciones de ingeniería, permite predecir el comportamiento de los objetos en entornos reales. Se utiliza el método de elementos finitos para analizar el comportamiento de una espuma metálica de aluminio frente a cargas axiales. Se intenta replicar los ensayos de compresión y tensión, en función de las recomendaciones establecidas en normativa E8 para ensayos de tracción y E9 para ensayos de compresión. ANSYS requiere características mínimas operativas de: Windows 10, tarjeta gráfica mínimo de 1 Gb de video RAM, Procesador mínimo Pentium® 4 2.0 GHZ de 64 bits, 8 GB de memoria RAM y memoria SSD de almacenamiento de 65 GB. El equipo utilizado para llevar a cabo la simulación es una laptop con procesador Intel Core i7, 16 GB RAM y 6 GB de tarjeta gráfica

2.2. Producción de espuma metálica de aluminio

El proceso de producción de la espuma metálica de celda abierta a base de aluminio por preformas solubles, se llevó a cabo en la ciudad de Riobamba en las instalaciones prestadas por una empresa de industria local. Se toma como base la metodología del trabajo de titulación “Síntesis de Espumas Metálicas de Aluminio de Celda Abierta” (Abarca, 2009), ajustando parámetros relacionados con la forma del molde y tamaño de granos de NaCl, de tal manera que, se pueda conseguir una plancha rectangular de espuma metálica de aluminio con un espesor de 14 mm.

La Figura 2.9 muestra el resultado del proceso de fabricación de la espuma metálica por el método de infiltración por preformas solubles. La plancha de espuma metálica es limpiada para eliminar los excesos de NaCl, en este proceso se emplea agua como disolvente, dejándolo reposar por 1h para asegurar la disolución eficaz de los residuos de sal. Se utilizan herramientas metálicas finas, como alambres para facilitar la limpieza dentro de los poros formados en la estructura celular y poder garantizar la integridad del material.



Figura 2.9 Espuma metálica por el método de infiltración de metal fundido en preformas solubles

Por otro lado, se adquiere una espuma metálica de aluminio fabricada por una empresa estadounidense ERG Aerospace representada en la Figura 2.10, esta espuma recibe el nombre comercial de espuma Duocel. Esta espuma metálica posee una estructura formada por una red de ligamentos que constituye una estructura de celda abierta, es decir, posee poros abiertos y sus celdas están interconectadas unas con otras. La fabricación de este tipo de espumas

metálicas conlleva procesos y variables más controladas, lo que implicada un mejor resultado en la estructura y morfología final de la espuma (ERG, 2024).



Figura 2.10 Espuma metálica Duocel fabricada por la empresa ERG Aerospace

ERG ofrece espumas personalizadas acorde al tipo de aplicaciones, la calidad de sus espumas metálicas corresponde al control de tres factores principales que ellos describen como los más importantes, el primero corresponde al tipo de material base que va a conformar la estructura de la espuma, el segundo corresponde al tamaño de los poros y finalmente el tercer aspecto corresponde a la selección transversal del ligamento, este último parámetro se lo puede especificar mediante el análisis de la densidad relativa de la espuma (ERG, 2024). La espuma Duocel de la Figura 2.10 posee una dimensión de 3,5 cm de ancho, 9 cm de largo y un espesor de 1,2 cm. La espuma Duocel servirá como objeto de comparación con la espuma metálica fabricada por el proceso de preformas solubles.

2.3. Preparación de probetas

Una vez obtenida la plancha de espuma metálica por el método de infiltración, se realiza operaciones de maquinado y rectificado para obtener una plancha de forma rectangular con las medidas de 150x100x14 mm como se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.11 Espuma metálica de aluminio rectificada

A continuación, se procede a limpiar impurezas restantes con la ayuda de aire por presión, eliminando el resto de las impurezas concentradas en las celdas de la espuma metálica como se muestra en la Figura 2.12, adicionalmente se puede apreciar como el material excedente sale expulsado en forma de polvo, consecuencia del desprendimiento de los granos de sal NaCl atrapados en las celdas del material poroso.



Figura 2.12 Limpieza profunda de la espuma metálica

Se establece el número de probetas necesarias para llevar a cabo los diferentes ensayos, delimitando la forma y dimensiones necesarias de cada una de las probetas de espuma metálica como se muestra en la Figura 2.13. La forma final corresponde a un prisma rectangular de proporciones establecidas por un largo de 50 mm, un ancho de 30 mm y un espeso de 14 mm, las probetas fueron maquinadas cuidadosamente para poder conservar la integridad del material y evitar resultados erróneos al momento de realizar los ensayos.



Figura 2.13 Probetas finales para tratamiento de ensayos

De forma similar, se prepara una placa de aluminio de las mismas dimensiones que la plancha de espuma metálica, obteniendo probetas similares en dimensiones como muestra la Figura 2.14, estas probetas sirvieron como prueba para desarrollar el ensayo de impacto variable. Adicionalmente, estas probetas se utilizan para comparar las características y comportamientos finales de la espuma metálica de aluminio frente al comportamiento y características de un material sin porosidad y de masa uniforme en toda su sección transversal.



Figura 2.14 Placa de aluminio y probetas individuales

2.4. Ensayos para la caracterización de espumas metálicas de aluminio

Se lleva a cabo el análisis de las diferentes propiedades mecánicas medidas a partir de diferentes ensayos como: espectrografía, metalografías, micro dureza, impacto charpy e impacto variable. Estos ensayos se realizan en ambos materiales para ser comparados, tanto para probetas de espumas metálica de aluminio y probetas de placa de aluminio.

2.4.1. Ensayo de espectrografía

El ensayo de espectrografía por chispa se usa para determinar los elementos que conforman la espuma metálica de aluminio, se usa el espectrómetro ubicado en las instalaciones del laboratorio de fundición de la EPN. El equipo emite un haz luminoso o chispa, la misma que al ser absorbida por el material se descompone en varios componentes acorde a su longitud de onda, luego se lleva a cabo un análisis óptico mediante el uso de una rejilla de difracción, esto permite diferenciar a los elementos que conforman la espuma metálica y la placa de aluminio.

El ensayo de espectrografía se lleva a cabo según la norma ASTM E1251-17a “Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry” (ASTM, 2017), mediante el método Al 100 base. Previo a la entrega de probetas para análisis se preparan las muestras con un pulido superficial ligero para eliminar impurezas en la superficie del material. En la Tabla 2.1 se muestra la identificación y etiquetado de las probetas que van a ser sometidas al ensayo, para cada probeta se realizan 3 mediciones con un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 2.1 Identificación de las probetas para ensayo de espectrografía

Nombre	Identificación	Fotografía
Placa de aluminio	M1	
Espuma de aluminio	M2	

La realización de este ensayo es de mucha importancia debido a la incertidumbre asociada a los elementos que intervienen en la composición definitiva de esta espuma metálica, ya que el proceso de fabricación de esta espuma de aluminio incluye etapas de fundición, donde se utilizó aluminio reciclado en forma de chatarra, por ello algunos elementos presentes en la chatarra pueden alterar la composición final de la espuma metálica.

2.4.2. Ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico se emplea para analizar el tipo de estructura metálica presente en una muestra, a través de microscopia, para ello es necesario la preparación de probetas mediante el encapsulado, pulido y un ataque químico revelador. Por último, se colocan las muestras en un microscopio y se determina las características de grano y las diferentes fases que presenta.

Las probetas de espuma de aluminio preparadas anteriormente de dimensiones 30x50x14 mm tuvieron que ser preparadas nuevamente, en este caso se cortaron en la mitad de tal forma que puedan entrar en las dimensiones de un cilindro de 40 mm de diámetro y 20 mm de altura. Se prepararon probetas tanto de espuma metálica como de la placa de aluminio como se muestra en la Figura 2.15.



Figura 2.15 Probetas de espuma y placa de aluminio cortadas

Las probetas al ser cortadas de forma manual presentan superficies sumamente rugosas, por tal motivo se someten a un proceso de pulido mediante el uso de lijas numero 100 o superiores, este proceso garantiza que la probeta se asiente completamente a nivel sobre una superficie plana, es decir, se asienta de tal forma que la superficie de la probeta entra en contacto directo con la otra superficie, en este caso la base del molde de la máquina de montaje en caliente.

Una vez ajustados los tamaños de las probetas, se encapsula a las probetas con baquelita negra, con una medida de 20 g en cada probeta, una vez medida la cantidad necesaria se pasa a la prensa de montaje en caliente y se añade la baquelita junto a la probeta, acto seguido se da inicio al proceso de embutido que toma alrededor de 10 minutos como se muestra en la Figura 2.16. Finalmente, se obtienen las probetas encapsuladas que deben ser pulidas hasta obtener una superficie completamente lisa, parecida a la superficie de un espejo.



Figura 2.16 Proceso de encapsulado de las probetas de aluminio

Completado el encapsulado de las probetas, empieza el proceso de pulido como se muestra en la Figura 2.17 el numeral 1, para esta etapa se utiliza la pulidora automática, el lijado empieza con el uso de una lija de grano N°150, esta lija permite eliminar todas las impurezas y poder dar uniformidad a las probetas, el pulido termina cuando se utiliza la lija de 3 micras, la cual es la última lija que determina el acabado superficial final, el tiempo de pulido varía acorde al acabado superficial en un promedio de unos 15 a 30 minutos de pulido por cada lija.

Por último, al cambiar de lija se debe limpiar bien la zona de trabajo, esto incluye el lavado de las probetas, las cuales se lava con agua y alcohol anhidrido al 99.8%, acto seguido se seca con ayuda de una sopladora de aire caliente, todo este proceso se puede apreciar en la Figura 2.17 los numerales 2, 3 y 4 respectivamente. Es importante mencionar que el lavado se lo realiza superficialmente sin tocar directamente las superficies recién pulidas, ya que podrían dañar el pulido realizado.



Figura 2.17 Pulido de las probetas de aluminio

Una vez concluido el pulido, la superficie de las probetas toman un aspecto reflectivo similar a la de un espejo, libre de imperfecciones desde la perspectiva visual humana como se observa en la Figura 2.18. Finalmente, las probetas están listas para ser utilizadas en los ensayos metalográficos.



Figura 2.18 Probetas listas para ensayo metalográfico

Se utiliza el microscopio óptico para poder observar de forma detallada la estructura presente en las probetas de espuma de aluminio y de la placa de aluminio. Para poder apreciar los límites de grano y tener mejor apreciación de la forma estructural de los granos en las probetas, se realiza un ataque químico con Keller, una solución química compuesta de agua, ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico. El tiempo de exposición de las probetas al ataque químico fue de 8 segundos como se muestra en la Figura 2.19.



Figura 2.19 Ataque químico

Finalmente, se obtienen las metalografías como se muestra en la Figura 2.20 como resultado del ensayo metalográfico acorde a normativa ASTM E3-11, es importante mencionar que se realizaron capturas metalográficas de las probetas antes de someterlas al ataque químico y después de someterlas al ataque químico con ampliación de 100x y 500x, esto permite obtener

una perspectiva más amplia para el análisis de la microestructura del material y poder evaluar la información respecto a la composición y propiedades mecánicas de la espuma metálica de aluminio.



Figura 2.20 Metalografía de la espuma metálica de aluminio

2.4.3. Ensayo de micro dureza

Para llevar a cabo el ensayo de micro dureza, se utilizan las probetas preparadas en el anterior apartado, el uso de estas probetas permite obtener imágenes de la indentación mucho más clara y limpia, esto permite realizar un mejor análisis de la medición de las longitudes de las diagonales con resultados más confiables. El ensayo se realiza con la ayuda del micro durómetro, el cual utilizó una carga de 100 gf, con un tiempo de aplicación de 15 segundos y a temperatura ambiente.

La muestra se coloca sobre una barra metálica y es sujeta por las mordazas laterales como se muestra en la Figura 2.21, para el caso de la espuma metálica, la indentación se realiza en lugares con material continuo, en lo posible libre de porosidades. Para poder ubicar la probeta en una posición adecuada se hace uso de las perillas de movimiento que posee el micro durómetro, cada vuelta a la perilla representa 0,25 mm de distancia en la probeta, de esta forma se puede desplazar en dirección x e y respectivamente hasta encontrar el punto idóneo para realizar las mediciones de dureza.

Mediante la aplicación de este ensayo se puede realizar el análisis para poder correlacionar la dureza Vickers obtenida con el valor de la resistencia ultima a la tracción que puede presentar este material, esta relación permite estimar dicho valor con un porcentaje de error reducido. Esta estimación es útil para el análisis de resultados y comparación de propiedades mecánicas entre los materiales caracterizados y materiales utilizados en la industria de chalecos antibalas.

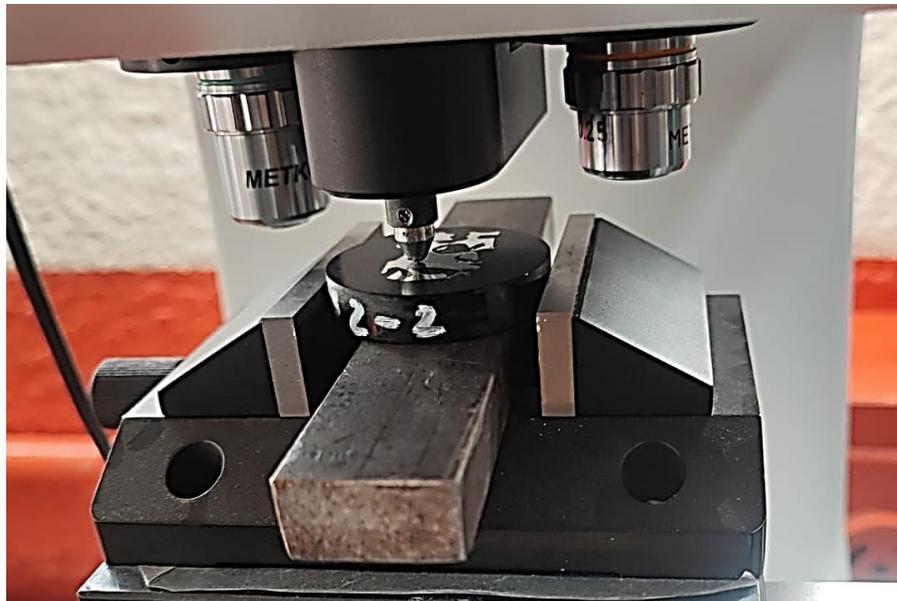


Figura 2.21 Ensayo de micro dureza en espuma metálica de aluminio

Se lleva a cabo 3 indentaciones para establecer un promedio en el valor de la dureza proporcionado por el micro durómetro como se muestra en la Figura 2.22, la separación de las indentaciones tuvo lugar a una distancia de 3 mm o 12 vueltas de la perilla de desplazamiento, esta distancia asegura los lineamientos propuestos por la normativa, en la cual menciona una separación mínima de al menos 3 veces el tamaño de la diagonal principal en la indentación como distancia entre indentaciones.

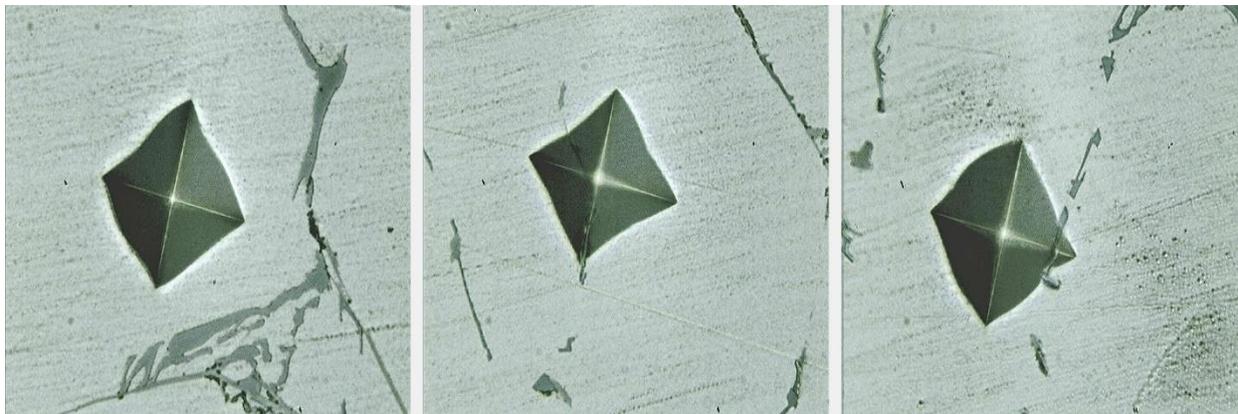


Figura 2.22 Indentaciones en la espuma metálica de aluminio

Para establecer el valor de la dureza del material se utiliza la normativa ASTM E384-22, la cual detalla el cálculo del valor de la dureza mediante la ecuación 3 (ASTM, 2022), esta expresión utiliza parámetros relacionados a la geometría de la indentación en la probeta y la carga utilizada al realizar el ensayo, cabe recalcar que el valor de la dureza se encuentra expresada en Vickers.

Ec. (3)

$$HV = 1854.4 \frac{P}{d^2} \left[\frac{kgf}{mm^2} \right]$$

Donde:

P: Fuerza en gf

d: Longitud de las diagonales presente en la indentación en micras

2.4.4. Ensayo de impacto Charpy

La aplicación del ensayo Charpy busca cuantificar la cantidad de energía absorbida por la espuma metálica al recibir una carga dinámica, en este caso producido por el impacto de un péndulo. Para llevar a cabo el ensayo Charpy se toma como referencia a la norma ASTM E23, que establece los parámetros geométricos de las probetas para ser ensayadas en el equipo.

Se prepara la probeta con dimensiones de 10x10x55 mm y se realiza una muesca en forma de V con un ángulo de 45°, la cual se sitúa en el centro de la probeta de espuma metálica, la muesca en la probeta es un concentrador de esfuerzos, lo que ocasiona una ruptura del material en ese punto establecido. La espuma metálica al ser un material poroso contiene varios concentradores de esfuerzos en formas irregulares, por lo tanto, este ensayo es adaptado al material de estudio.

En la Figura 2.23 se observa la forma final de la probeta de espuma metálica con las dimensiones necesarias para realizar el ensayo Charpy, se suelta el péndulo del dispositivo y se registra los datos reflejados por la realización del ensayo.

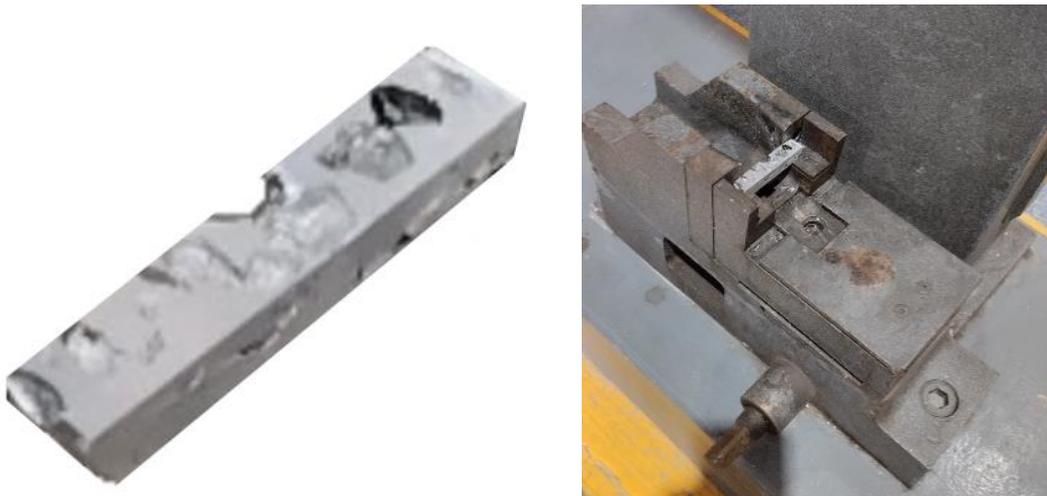


Figura 2.23 Ensayo Charpy en probeta de espuma metálica

2.4.5. Ensayo de impacto variable

En este ensayo se busca analizar el comportamiento de la espuma metálica de aluminio frente a cargas de impacto dinámico, se utiliza el equipo de impacto variable. El estudio mediante la aplicación de este ensayo busca determinar la altura necesaria para romper o fisurar a la probeta de espuma metálica, variando la altura y masa de un dardo metálico. Como primer punto, se da una limpieza superficial a las probetas de tal forma que se pueda medir las deformaciones presentes en el material después de la caída del dardo.

Las placas de aluminio se utilizan como probetas de prueba para analizar la deformación y determinar la altura necesaria para que la espuma metálica llegue a fallar, el aluminio al ser un material metálico necesita de una carga considerable, a partir de esta premisa se utiliza una carga inicial de 1kg desde una altura inicial de 15 cm como se observa en la Figura 2.24, acto seguido se realiza una prueba de impacto en la espuma de aluminio para determinar el posible fallo de la probeta.



Figura 2.24 Ensayo de impacto variable a una altura de 15 cm

Se realizan pruebas de impacto en la placa de aluminio desde alturas correspondientes a 15, 20, 30, 40, 50, 60, 100 y 115 cm, acorde a cada altura se evalúa el tamaño del diámetro de la indentación del dardo de 1 kg en la placa de aluminio y se establecen las alturas necesarias para las pruebas en las espumas metálicas con valores de 15, 20, 30, 60, 100 y 115 cm. Se obtiene diferentes comportamientos de la espuma metálica que varían con la altura de impacto como se observa en la Figura 2.25.

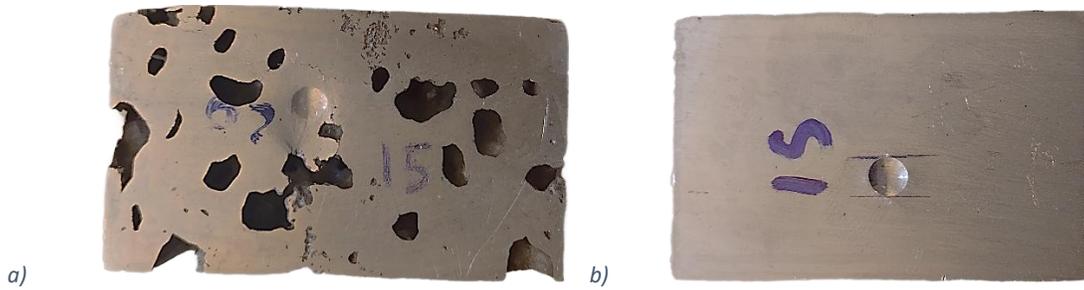


Figura 2.25 Espuma y placa de aluminio sometida a una altura de 15 cm

Finalmente, al identificar la altura máxima y mínima que podían soportar las espumas metálicas de aluminio fabricadas por proceso de infiltración, se procede a realizar el ensayo de impacto variable en la espuma metálica Duocel proporcionada por ERG Aerospace. Se lleva a cabo 2 pruebas debido a la limitación de probetas de este tipo de espuma metálica, las alturas seleccionadas corresponden a 15 cm y 115 cm, que corresponden a los valores de altura mínimos y máximos que soportó la espuma metálica fabricada por el método de preformas solubles.

La Figura 2.26 presenta el resultado de la deformación final en la espuma Duocel producido por el impacto desde cierta altura establecida, el lado izquierdo de la probeta muestra la deformación generada por el dardo a una altura de 15 cm y el lado derecho de la probeta muestra la deformación y ruptura del material generada a una altura de 115 cm. Pese a la deformación que presento la probeta después de los dos ensayos de impacto, se evaluó la posibilidad de someter a la espuma Duocel a un último impacto desde una altura mediana. Sin embargo, la deformación suscitada no permitió colocar la probeta en el dispositivo de prueba, dando como resultado la ejecución solo de dos pruebas de impacto a 15 y 115 cm.

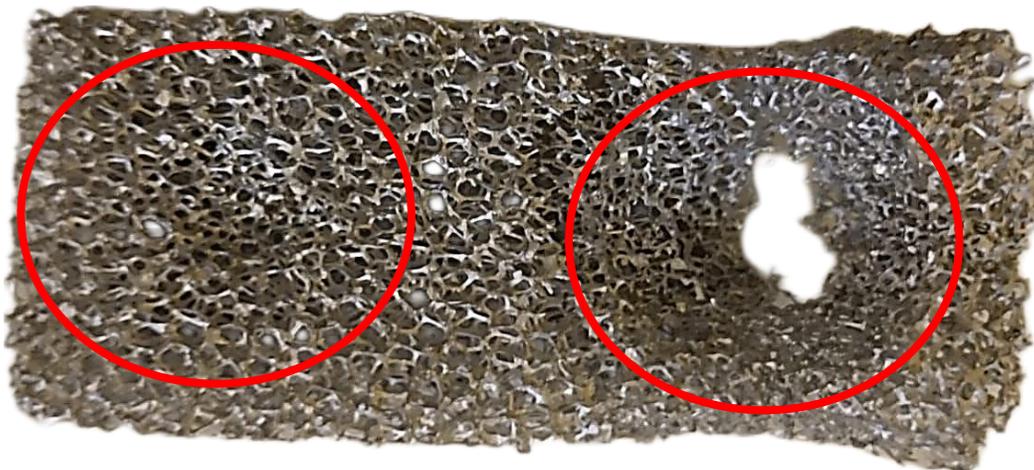


Figura 2.26 Espuma metálica ERG Aerospace sometida a ensayo de impacto dinámico

2.5. Medición de porosidad

Esta sección se encarga de describir el proceso para llevar a cabo el análisis de porosidad en la muestra de espuma metálica, se procede tomar capturas de la probeta con una escala de 5 cm como se muestra en la Figura 2.27, esta toma permite determinar el número de poros por cm lineal, el número de poros por superficie, separación entre poros, tamaño superficial de poros y porcentaje de porosidad.

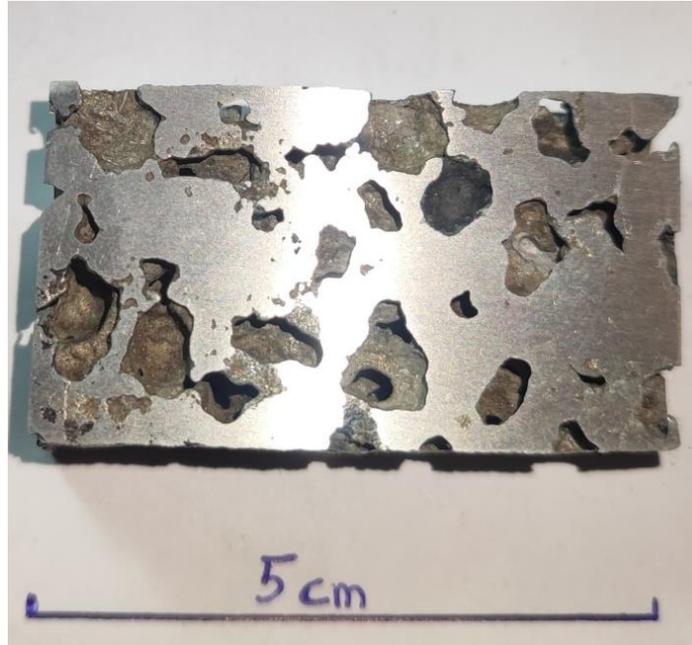


Figura 2.27 Análisis de porosidad

El número de poros por cm lineal se obtuvo al contar el número de poros que son atravesados por líneas horizontales iguales de 49.88 mm, del mismo modo el número de poros por superficie se obtuvo al promediar el conteo de poros en 9 superficies de iguales área con un valor de 144 mm^2 . En ambos casos se realizó las conversiones debidas para tener resultados en términos de cm lineales o superficiales, respectivamente.

Para la separación entre poros se realizaron 30 mediciones al azar para obtener una media y una desviación estándar, para obtener mediciones de los tamaños superficiales de los poros se promedia las mediciones del área de 15 poros de tamaños variados. Por último, para el porcentaje de porosidad se midió el área de los poros dentro de un área rectangular específica de 858 mm^2 , con ello el porcentaje se obtuvo al establecer la relación entre el área de poros y el área total.

2.6. Densidad relativa

Para obtener la densidad relativa se hace uso de la ecuación 2, que involucra la densidad de la espuma metálica y la densidad del material base, que en este caso es el aluminio. La Figura 2.28 muestra el valor de la masa correspondiente a la espuma metálica de aluminio antes de ser seccionada para la creación de probetas, El valor de la masa fue medido después de limpiar la muestra y quitar todos los residuos producidos por el método de fabricación.



Figura 2.28 Medición de la masa de la placa de espuma metálica

Se obtiene el valor de la masa del material espumoso con un valor medido de 275 g, se calcula el volumen de dicha pieza, en este caso al ser una figura simple el volumen se puede calcular mediante el producto de su altura, largo y ancho correspondientemente.

Es importante determinar los valores de la densidad del material base, por ello se toma en cuenta un valor de $2,7 \text{ g/cm}^3$ como el valor de densidad correspondiente al aluminio que fue el material base de la espuma metálica. El valor de la densidad relativa debe situarse en un rango de 0 a 1, es decir, si el material llega a tener valores que tiendan a 0 se considerará al material como espumoso, por el contrario, si los valores calculados tienden a 1 el material se considerará como un sólido.

Esta relación entre densidades permite delimitar y analizar la diferencia de peso que puede ofrecer la espuma metálica de aluminio, pues al presentar espacios porosos hace que el material reduzca considerablemente su peso y adquiera características beneficiosas.

2.7. Simulación del comportamiento de la espuma metálica bajo cargas de impacto

Previo a la simulación del material en un modelado 3D, se analiza la morfología que presenta la plancha obtenida de espuma metálica de aluminio. Al ser un material poroso no presenta indicios de simetría en cuanto a la distribución de poros y celdas internas, esto dificulta la representación y construcción en un archivo CAD. Por lo tanto, se toman medidas de las diferentes profundidades en cada espacio abierto, para de esta manera poder representar de forma esquemática a la espuma metálica en un programa CAD. En este apartado se describe el proceso de representación del material, mapeo y construcción del material, selección del tipo de análisis, características de mallado, y ejecución de simulaciones dinámicas referentes a una prueba de impacto utilizando una esfera a una velocidad de 165 m/s y una bala calibre 5,56 mm con una velocidad de 900 m/s.

2.7.1. Mapeo y construcción del material

Se utiliza SolidWorks como herramienta CAD para generar la representación esquemática de la espuma metálica. Se toman muestras fotográficas de la plancha de espuma metálica para poder realizar un mapeo de las diferentes formas y tamaños de las celdas que se encuentran presentes en la estructura, con dicha información se representa la espuma metálica lo más similar posible, teniendo en cuenta las limitaciones en cada uno de los programas a utilizar.

La Figura 2.29 muestra el mapeo del material, las franjas de color azul corresponden a las celdas formadas en la espuma de aluminio, se toma como referencia la medida de una regla fijada a los extremos de la placa, para poder escalarla en el programa CAD y ajustar los valores mapeados a valores similares en la realidad. Este proceso se lleva a cabo para las 6 caras de la placa, superior, inferior y las 4 laterales.

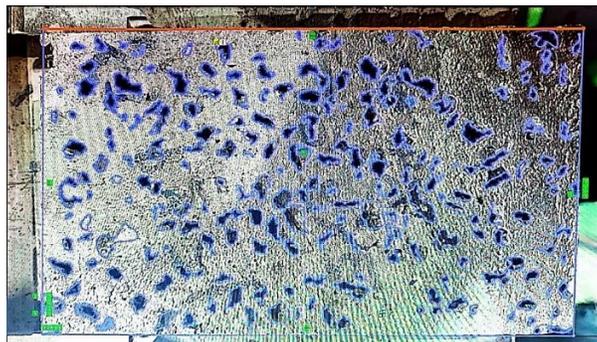


Figura 2.29 Mapeo de plancha de espuma metálica

Una vez mapeado el material, se tomara todas las medidas necesarias para poder dibujar la espuma metálica en un programa CAD y se obtiene la representación geométrica del material como se muestra en la Figura 2.30. Las profundidades de las porosidades fueron representadas como extrusiones en la geometría con longitudes variadas acorde a cada poro medido, con el objetivo de garantizar una representación lo más fiel posible a la realidad y tener mejores resultados al llevar a cabo la simulación.

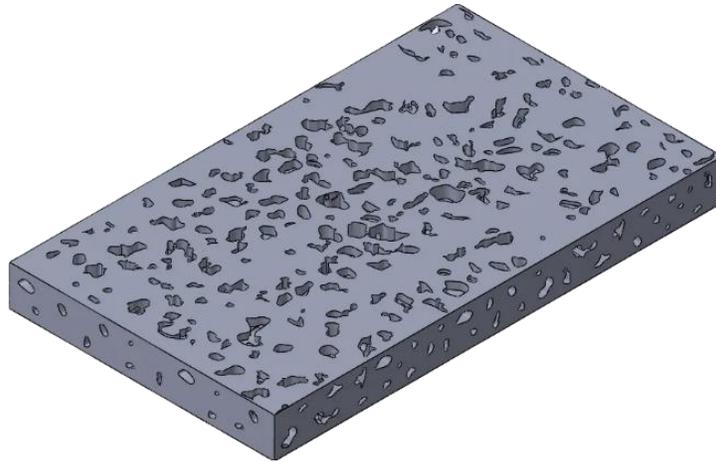


Figura 2.30 Representación esquemática del material

2.7.2. Selección del tipo de análisis

El ensayo de impacto corresponde a un comportamiento dinámico, por ello se elige realizar la simulación en el módulo de Explicit Dynamics de ANSYS, que ofrece diferentes configuraciones, como el tipo de movimiento, desplazamiento, velocidades, etc. En este caso se simulará un impacto generado por una bala de calibre 5,56 mm en la cara superior de la probeta metálica.

La Figura 2.31 muestra los parámetros que deben ser completados para llevar a cabo la simulación, en el apartado de Engineering Data se establece el material del cuerpo a simular, al realizar el ensayo de espectrografía por chispa se obtuvo los componentes químicos del material de estudio, por lo tanto, se eligen la aleación de aluminio 2024-T4 de la biblioteca de ANSYS, pues sus propiedades y composición química son similares a la espuma metálica obtenida. Una vez establecidos los materiales, se procede a importar la geometría de la probeta creada en SolidWorks al módulo de ANSYS, en este paso es importante revisar la geometría y verificar que el cuerpo conste como un solo sólido. Por último, se selecciona el tipo de mallado y las condiciones de frontera para realizar la simulación.

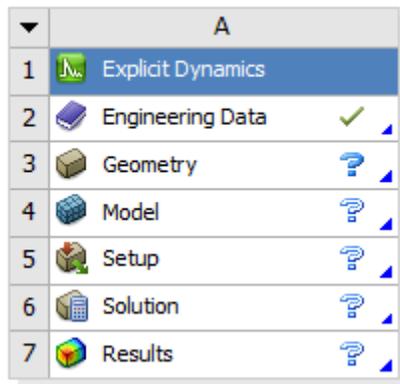


Figura 2.31 Módulo Explicit Dynamics de ANSYS

2.7.3. Características del mallado

Debido a la complejidad geométrica que posee el modelo, se establece un mallado tipo tetraédrico con un tamaño de elemento de 1 mm, este tipo de mallado es recomendado para la aplicación de geometrías complejas, además es utilizado en simulaciones que requieren un análisis dinámico complejo.

La Figura 2.32 muestra un mallado con un total de 42 162 nodos y 205 763 elementos de mallado, la presencia de geometrías diminutas en el interior de la geometría complica tener un mallado de buena calidad, pese a dicho inconveniente se ajustan los parámetros y refinamientos de malla hasta conseguir una buena calidad de malla relacionando aspectos como Element Quality, Aspect Ratio y Jacobian, todos estos parámetros deben encontrarse cercanos al valor de 1.

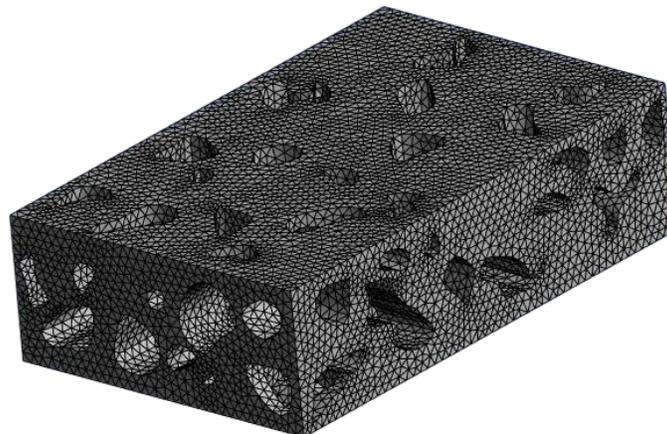


Figura 2.32 Mallado tetraédrico con tamaño de elemento 1 mm

Debido a la complejidad geométrica que presenta la espuma metálica mapeada, se opta estrategias para mejorar el refinamiento del mallado, aspectos a modificar usualmente son el tamaño de mallado, es decir, mientras más pequeño es el mallado, se producirán más elementos que conforman la geometría, esto demandará mayores recursos computacionales al momento de simular y tiempos prolongados hasta obtener resultados. Por ello, es recomendable tener tamaños acorde a las medidas de la pieza.

Para tener mejor discretización del mallado y mejorar los tiempos de rendimiento se pueden aplicar técnicas de corte de las piezas para la construcción de mallados, separación de cuerpos, elegir el tipo de mallado, establecer los límites y tamaños de elementos, etc. Esto permite reducir tiempos de simulación de 1h a 5 minutos, medidos en una CPU de procesador Core i7 de 10ma generación con 16 GB RAM, los tiempos dependerán de la complejidad que presenta el modelo.

2.7.4. Ajuste de variables y ejecución de la simulación

La simulación en ANSYS requiere la validación de datos para poder saber la confiabilidad de los resultados obtenidos por simulación, por ello se debe comparar dichos resultados con resultados obtenidos de algún experimento o cálculo que lo respalde, es importante tener en cuenta las condiciones de cada experimento y simulación para poder realizar la comparación de datos.

Para realizar la validación de datos se utilizan los resultados obtenidos en artículo científico “The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates” (Karthikeyan et al., 2013), en el cual se expone resultados de la deformación en placas provocadas por impactos a diferentes velocidades, este enfoque permite extraer datos experimentales para poder ser comparados con los valores obtenidos en la simulación por elementos finitos de ANSYS. Por lo tanto, en las simulaciones se trata de representar todas las condiciones descritas en el artículo para obtener resultados más realistas y obtener bajos porcentajes de error.

El experimento presentado por Karthikeyan et al, consistió en realizar impactos en placas de diferentes materiales, en el que resalta el acero como objeto de estudio, el impacto se realizó con una esfera de acero cromado AISI 52100 de radio de 6,35 mm y una masa de 8,3g a velocidades iniciales de 25 m/s hasta llegar a velocidades de 555 m/s, la esfera fue impulsada con la ayuda de un cañón. Las placas de espesor de 0,71 mm fueron sujetadas por un dispositivo conformado por un anillo interior de 100 mm y una placa de respaldo cuadrada como se muestra en la Figura 2.33. Finalmente, el registro de datos se realizó con cámaras de alta velocidad que capturaron los choques de onda y deformaciones producidas por el impacto en los materiales.

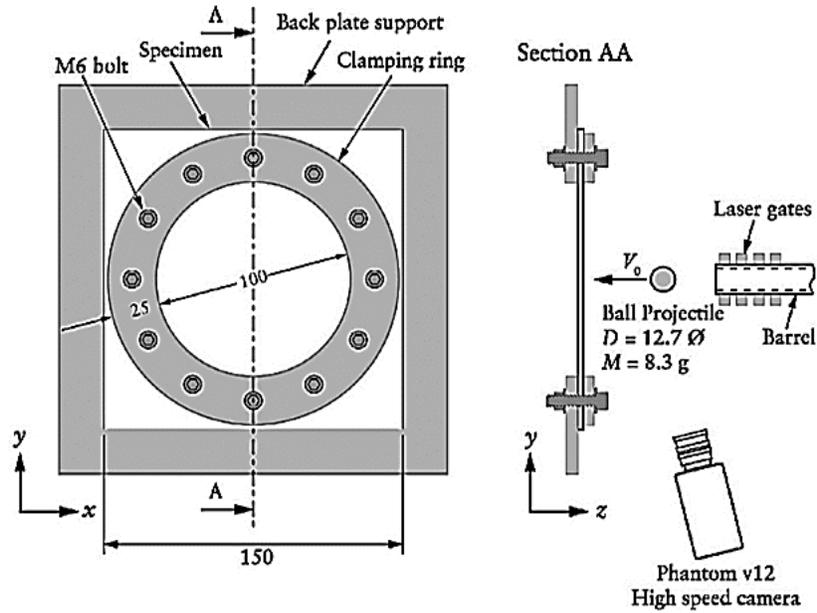


Figura 2.33 Equipos utilizados en las pruebas de impacto experimental
 Fuente: (Karthikeyan et al., 2013)

Se realiza una simulación de impacto de una esfera de radio 6.35 mm de material de acero 4340 y una placa de acero inoxidable 304 de espesor de 0.71 mm, estas geometrías se pueden apreciar en la Figura 2.34, la esfera es impactada con la placa de acero a una velocidad aproximada de 165 m/s y se obtiene datos que serán comparados con los resultados experimentales expuestos en “The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates” (Karthikeyan et al., 2013), el cual presenta valores de la deformación provocada por el impacto de una esfera en una placa de acero 304. Los materiales mencionados se encuentran disponibles en la biblioteca de ANSYS como Steel-4340 para la esfera y SS-304 para la placa de prueba. Se toma como condiciones de borde las caras laterales del cuadrado fijas con restricción de movimiento y rotación en todos los ejes, mientras que el círculo intermedio solo tendrá permisible el movimiento de rotacional y velocidad de esfera de 165 m/s.

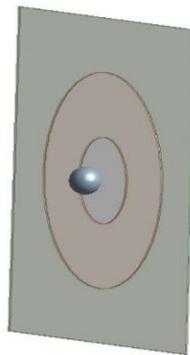


Figura 2.34 Esfera y placa metálica

Se realiza el mallado de las geometrías y se simula acorde a las condiciones de fronteras establecidas para las diferentes geometrías, la combinación de todos los parámetros y consideraciones muestran los resultados obtenidos como se puede observar en la Figura 2.35, los datos para realizar la comparación de valores serán los máximos, es decir se busca el valor de la máxima deformación producido por el impacto de la esfera en el material.

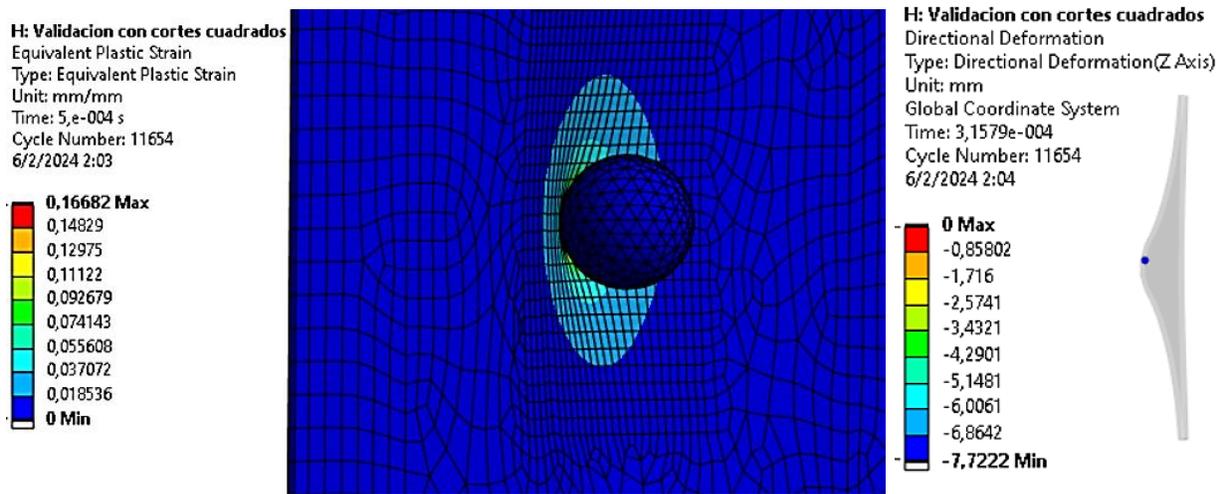


Figura 2.35 Simulación de esfera impactando placa metálica

Para disminuir el gasto computacional generado al simular el evento e interacción de cuerpos se elige realizar una simulación por simetría, es decir todo el sistema es simplificado a la cuarta parte, dividiendo al sistema en 4 partes iguales y evaluando solo una de ellas como se observa en la Figura 2.36, esto permite reducir tiempos de simulación, simplifica la complejidad del evento dinámico y permite tener una mejor discretización del mallado

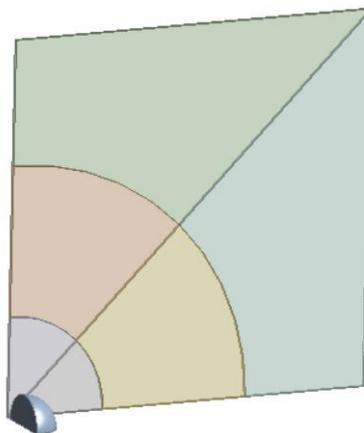


Figura 2.36 División del sistema a la cuarta parte

En la Figura 2.37, se puede observar la representación y resultado gráfico obtenido de las simulaciones, mediante la aplicación de etiquetas en diferentes nodos se busca medir el comportamiento de la deformación en la placa y le reducción de la velocidad de la esfera después del impacto en la placa metálica. Al tener un sistema mucho más simple que el sistema completo.

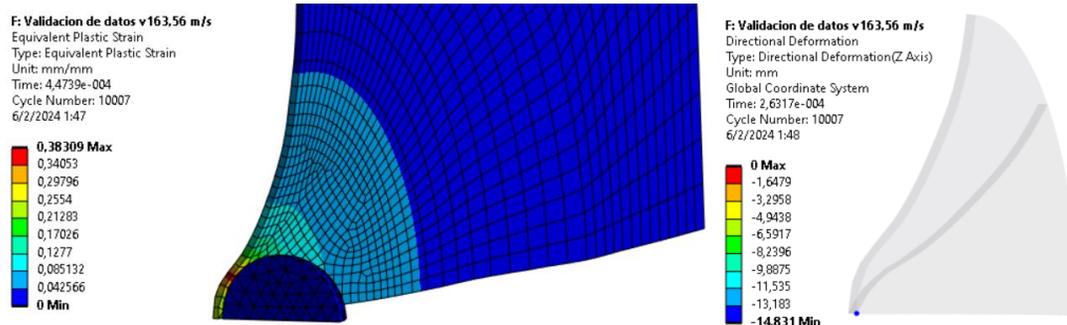


Figura 2.37 Simulación del fragmento del sistema esfera-placa metálica

Una vez validados los datos, se procede a utilizar la misma metodología y a configurar los diferentes materiales y geometrías de los cuerpos, en este caso para la bala se utiliza el mismo acero 4340 y para la espuma metálica se utiliza el aluminio 2024-T4 el cual se asemeja a la espuma metálica obtenida. La espuma metálica mapeada posee una geométrica complicada tanto en su interior como en su exterior, pues posee elementos que son diminutos con tamaños que pueden llegar a ser menores a 1mm, esto dificulta el proceso de discretización del mallado en la pieza, pues al reducir el tamaño de mallado para poder cubrir estas pequeñas geométricas, se aumenta considerablemente el número de elementos a simular, eso trae como consecuencia tiempos de simulación muy altos (en un CPU con procesador i7 y 16 GB de RAM fue de 1h), errores de mallado y resultados poco fiables. La Figura 2.38 muestra uno de los errores más frecuentes que se presentó en el proceso de simulación, provocando que la simulación presente problemas o muestre datos erróneos desapegados de las condiciones que se requiere obtener.

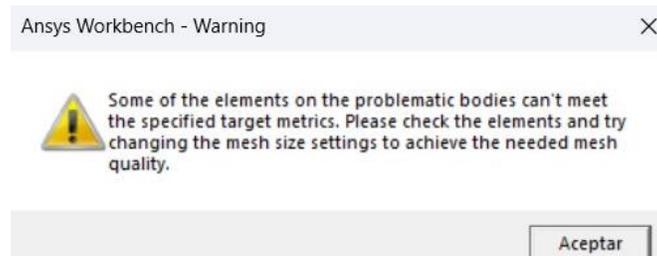


Figura 2.38 Alerta de error durante el proceso de mallado

Al tener tantas irregularidades y errores de simulación por la geometría, se optó por reemplazar a los poros irregulares con figuras geométricas más simples, además se redujo la cantidad de poros en el material. Sin embargo, pese a esas consideraciones no se pudo llevar a cabo un buen mallado haciendo que se genere errores y complicaciones, pues se trataba de seguir la metodología utilizada en la validación de datos.

Es importante tener en cuenta que al momento de llevar a cabo una simulación se deben hacer aproximaciones de la realidad, o realizar suposiciones que favorezcan a obtener valores fiables. Debido a las complicaciones presentadas al utilizar la espuma metálica mapeada, se hace algunas consideraciones para llevar a cabo la simulación de impacto de la bala de calibre 5,56 mm con la espuma metálica. Por lo tanto, se elimina la porosidad de la espuma, generando una pieza sólida de 14 mm de espesor, esta consideración simplifica la discretización de mallado y tiempos de simulación. Siguiendo la metodología expuesta anteriormente se obtiene la representación de la bala y la placa de aluminio 2024-T4 como se muestra en la Figura 2.39, en la parte izquierda se muestra al sistema bala-placa, que será seccionada en 4 y analizada por simetría en solo un cuadrante como se observa en la parte derecha.

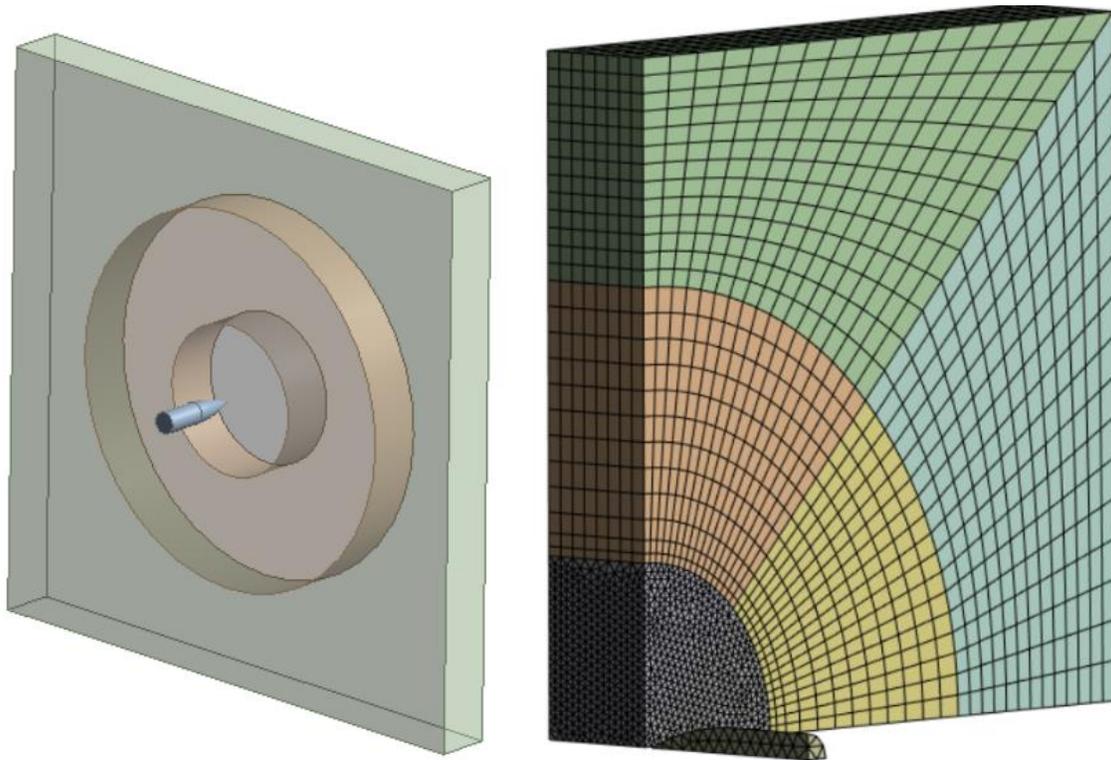


Figura 2.39 Sistema bala-placa de aluminio 2024-T4

La geometría seccionada al lado derecho de la Figura 2.39 presenta un mallado refinado, es decir, se aplican técnicas de discretización, combinando entre formas tetraédricas y formas cúbicas para generar un mallado de mejor calidad, esto permite reducir el número de elementos y nodos creados, lo cual permite reducir los tiempos de simulación. Al reducir el número de nodos y elementos creados se evita problemas de simulación relacionados a la capacidad limitada que brinda utilizar ANSYS STUDENT 2024 R1, pues esta versión utiliza una licencia estudiantil la cual restringe realizar simulaciones con gran cantidad de elementos, es decir, la licencia estudiantil permite simular geometrías que contengan hasta 32 000 elementos y 32 000 nodos para el caso de física estructural, por otro lado física de fluidos el límite se sitúa en 512 000 nodos.

En la Figura 2.39, el mallado de las partes periféricas, no será muy afinado por que serán utilizados como elementos de soporte evitando que el sistema se mueva, por otro lado, en la parte céntrica el mallado será mucho más denso, debido a que será la zona de estudio que recibirá el impacto de la bala. Una vez establecidos los parámetros de simulación y ajustados las condiciones de frontera se lleva a cabo la simulación para el impacto de bala de calibre 5,56 mm en una placa de aluminio 2024-T4 con una velocidad de 900 m/s, esta velocidad fue tomada como una velocidad promedio que adquiere el proyectil una vez que es disparado un fusil.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultados

Se presentan los resultados de los ensayos de espectrografía, metalografía, micro dureza, charpy, impacto variable, análisis de porosidad, análisis de densidad relativa y simulación, realizados en la espuma metálica de aluminio para realizar la caracterización mecánica y un análisis en aplicaciones de alto impacto como chalecos antibalas para calibre 5,56 mm.

3.1.1. Ensayo de espectrografía

La Tabla 3.1 muestra los resultados del ensayo de espectrografía por chispa realizado a una probeta de placa de aluminio y espuma metálica, denominados como M1 y M2 respectivamente como se muestra en la Tabla 2.1. Los resultados del ensayo permiten establecer diferencias notorias en cuanto a composición química a pesar de utilizar el mismo material base de aluminio.

Tabla 3.1 Composición química de probetas ensayadas por espectrografía

Elemento	Placa metálica (M1) [%]	Espuma metálica (M2) [%]
Silicio [Si]	0,417	3,677
Hierro [Fe]	0,267	0,330
Cobre [Cu]	0,010	3,597
Manganeso [Mn]	0,035	0,121
Magnesio [Mg]	0,052	1,539
Cromo [Cr]	0,044	0,065
Níquel [Ni]	0,073	0,087
Zinc [Zn]	0,062	0,395
Titanio [Ti]	0,027	0,029
Plomo [Pb]	0,143	0,179
Estaño [Sn]	0,113	0,163
Vanadio [V]	0,020	0,078
Estroncio [Sr]	0,031	0,026
Zirconio [Zr]	0,024	0,025
Cobalto [Co]	0,069	0,064
Boro [B]	0,046	0,000
Bismuto [Bi]	0,082	0,000
Calcio [Ca]	0,037	0,045
Litio [Li]	0,469	0,000
Aluminio [Al]	97,98	89,58
Total	100,00	100,00

Los resultados muestran que la composición química de la espuma metálica (M2), está conformada por 3 elementos principales: aluminio, cobre y silicio con porcentajes de 89.58%, 3.59% y 3.67% respectivamente. Estos valores resultan de la utilización de aluminio reciclado en forma de chatarra durante el proceso de fabricación, pues se observó que ciertos objetos en la materia prima contenían materiales incrustados como polímeros y otros metales. Los datos recopilados indican que la espuma obtenida corresponde a una aleación de aluminio en composición química similar a la aleación de aluminio 2024-T4. Por otro lado, en la placa (M1) ensayada se detecta al aluminio como elemento principal constituyendo un 97,98% del material.

La presencia del silicio y cobre con valores mayores al 3% en la espuma metálica, produce un incremento en la resistencia mecánica, debido a esto la espuma presenta valores de dureza mayores al de la placa metálica

3.1.2. Ensayo metalográfico

Acorde a la metodología descrita en el inciso 2.4.2, se somete una muestra de la placa metálica y una muestra de espuma metálica a un ensayo metalográfico, los resultados se muestran en la Figura 3.1 y Figura 3.2 ,que abarcan las imágenes metalográficas tomadas antes de ser sometidas a un ataque químico y después de ser sometidas a un ataque químico con Keller. Estos datos permiten analizar las características estructurales del material fabricado, comparar estructuras, tamaño de granos, defectos estructurales y determinar la densidad de grano presente en las probetas de aluminio y las probetas fabricadas por el método de preformas solubles.

En las metalografías a y b de la Figura 3.1 se comparan los resultados de la espuma metálica con la placa metálica de aluminio sin ataque químico, en cuanto a la espuma metálica se pueden observar los granos de α -Al y las dendritas en los límites de granos causados por la precipitación de los compuestos, formados de aluminio-cobre y aluminio-silicio presentes en la composición química de la espuma metálica. También se pueden observar pequeños poros e inclusiones de color negro, mismos que eran de esperarse debido al proceso de fabricación de la espuma metálica ya que estos se generan por la presencia de gases u otros compuestos que no se reaccionan directamente con el aluminio. En las metalografías de las espumas metálicas se observa la formación de los relieves de grano sin necesidad de realizar un ataque químico. Sin embargo, es necesario realizar dicho procedimiento para obtener mejor apreciación de la formación de los límites de grano y llevar a cabo la medición del tamaño de grano presente en el material.

Por otro lado, en la metalografía b, correspondiente a la placa metálica, no se diferencian límites de grano; únicamente hay muchas rayas visibles y pequeñas manchas alargadas que se denominan colas de cometa. La presencia de las colas de cometa se debe a que el aluminio, a mayor pureza, es un material blando y esto ocasiona que los compuestos utilizados durante el desbaste y pulido provoquen arañazos, generando estas marcas visibles con formas alargadas.

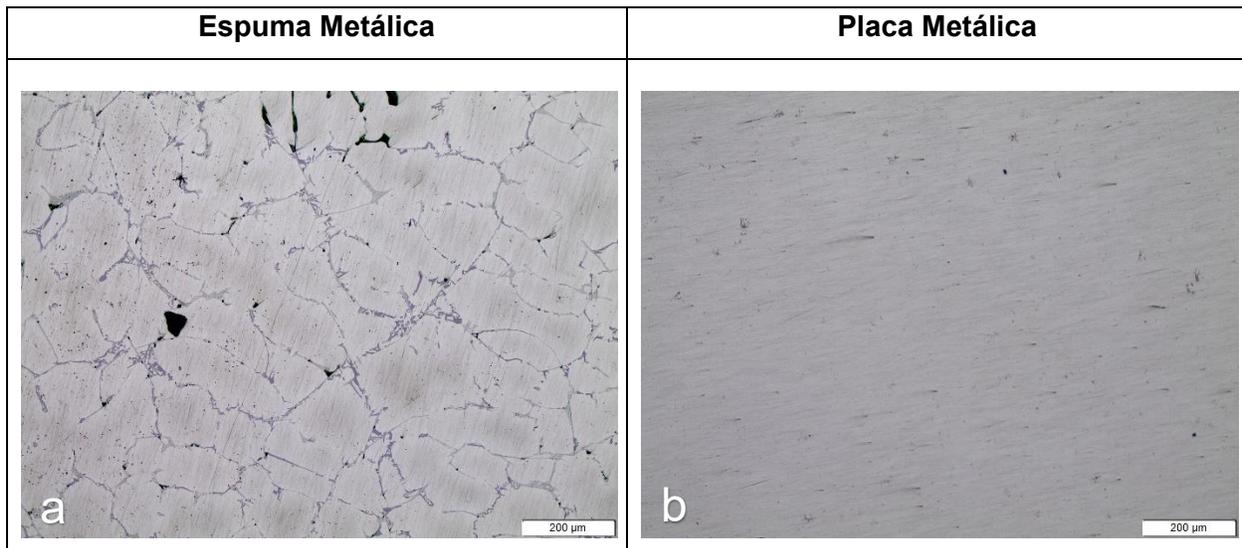


Figura 3.1 Metalografías de las probetas sin ataque químico 100x

El ataque químico permite mejorar el contraste en los límites de grano, superficie de los granos y fases, brindando una mejor perspectiva visual de la micro o macroestructura del material y así poder diferenciar de mejor manera las distintas fases y formaciones, como resultado en las metalografías a y b de la Figura 3.2 se puede observar la formación de los límites de grano con sus respectivas formas y tamaños. Analizando la placa de aluminio, se puede resaltar en la metalografía b, la presencia de granos alargados con la fase α -Al dominante y precipitados finos en forma de puntos o alargados de color negro, que se formaron gracias a la presencia de otros elementos en la composición química de la placa, se pueden observar estas fases de mejor manera en las metalografías d, f y h.

Por otro lado, se puede observar los granos y los límites de grano de la espuma metálica en las metalografías a, c y e; estos corresponden a una fase hipoeutéctica debido a que predomina la fase α -Al de color gris claro, además de la presencia de las dendritas pequeñas en menor cantidad de color gris oscuro que se encuentran presentes en los límites de grano. Dichas dendritas corresponden a las fases precipitadas del aluminio con el cobre y el silicio, que son los elementos que predominan en relación con los otros componentes del material.

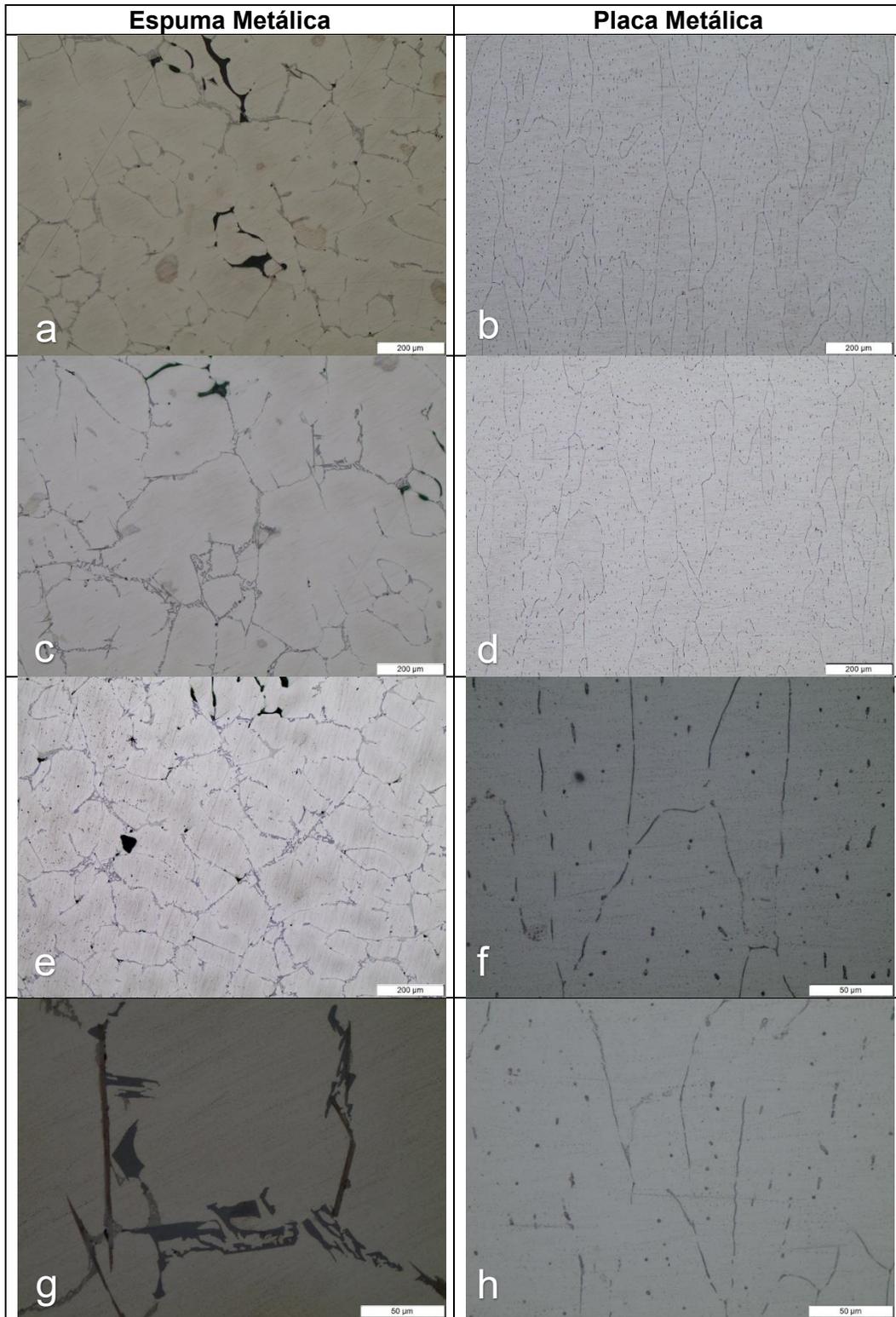


Figura 3.2 Metalografías de las probetas con ataque químico

En la metalografía g de la Figura 3.2, se observa con mayor detalle las fases de los límites de grano que denotan tonalidades de gris en diferentes escalas, de dichas tonalidades, una corresponde a la fase del compuesto formado por aluminio-cobre (posiblemente Al₂Cu) y la otra a la fase resultante del aluminio-silicio (Al-Si eutéctico). A pesar de determinar una similitud entre la espuma metálica y la aleación Al 2024-T4, se presenta una diferencia notoria en el porcentaje de composición del silicio, pues la espuma metálica contiene mayor cantidad de silicio en comparación con la aleación propuesta, por ello es difícil distinguir con certeza las fases mencionadas anteriormente. Este inconveniente es el resultado de tener una espuma compuesta por una nueva composición química, la cual no se ajusta por completo a otras composiciones químicas que ya son conocidas en las aleaciones de aluminio, esto complica el poder hallar y utilizar un diagrama de fases para tomarlo como una guía de referencia.

Por último, en la comparación de granos entre la placa y la espuma metálica, se tiene que los granos de la placa son notablemente más grandes y alargados, esto se debe a la mayor pureza del aluminio y la forma alargada del grano es típica de un proceso de forja. En contraste, los granos de la espuma metálica son más pequeños y están distribuidos de manera más homogénea, lo que implica una significativa mejora en las propiedades mecánicas, dándole una mejora en la resistencia mecánica.

La determinación del tamaño promedio de grano de la espuma metálica se realizó por el método de las intercepciones explicado en la norma ASTM E112. Para este método se trazan rectas que intercepten la mayor cantidad de granos de las metalografías, en este caso se utilizaron las 3 metalografías mostradas en Figura 3.3; el método consiste en medir el largo de las líneas “L” según la escala de la metalografía, contar el número de granos que corta la línea y dividir el largo de la línea para el número de granos, obteniendo la intersección media " $\bar{\ell}$ ". Por último, se obtiene el número de tamaño de grano ASTM “G”, aplicando las ecuaciones mostradas a continuación según normativa ASTM E112 (ASTM, 2021).

$$\bar{\ell} = L/n \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde

$\bar{\ell}$: Intersección media

L: Longitud de la línea trazada

n: Número de granos

Ec. (5)

$$G = -3.288 - (6.643856 \log_{10} \bar{\ell})$$

Donde

G: Tamaño de grano según ASTM E112

$\bar{\ell}$: Intersección media



Figura 3.3 Líneas de intersección en metalografías de espuma metálica.

En la Tabla 3.2 se muestra el valor de 3.013 para el grano ASTM y en base a la tabla de la misma norma se tiene que dicho valor se aproxima al número 3, lo cual da como resultado un tamaño de grano promedio de $127 \mu m$

Tabla 3.2 Resultados de cálculos del tamaño de grano.

Metalografía	Recta	N.º de granos (n)	Longitud de línea (L [μm])	Intersección media ($\bar{\ell}$ [mm])	Grano ASTM (G)
a	1	8	871	0.1089	3.1105
	2	10	1145	0.1145	2.9652
	3	11	1089	0.0990	3.3849
	4	9	954	0.1060	3.1877
	5	11	1212	0.1102	3.0761
b	1	7	800	0.1143	2.9706
	2	8	928	0.1160	2.9276
	3	11	1180	0.1073	3.1533
	4	7	750	0.1071	3.1568
	5	8	1156	0.1445	2.2937
c	1	10	1191	0.1191	2.8515
	2	7	739	0.1056	3.1994
	3	9	1044	0.1160	2.9276
	4	6	742	0.1237	2.7429
	5	9	933	0.1037	3.2520
Promedio				0.1131	3.0133

3.1.3. Ensayo de micro dureza

Se obtienen valores de dureza para las dos probetas ensayadas, probeta de espuma metálica de aluminio y probeta de placa metálica de aluminio. Por otro lado, en la sección de anexos se presentan las imágenes tomadas por el microscopio del equipo de micro dureza, en la que se puede observar con mejor apreciación la deformación provocada por la indentación del dardo, es importante mencionar que dicho ensayo se llevó a cabo con una carga de 100 gf, temperatura ambiente de 23 °C y con un tiempo de indentación de 15 segundos. Se realizaron 3 indentaciones con separación de 4 mm entre cada una.

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados de dureza obtenidos para la espuma metálica, cuyos valores se encuentran en un rango de 63.11 y 66.19 HV, si se calcula la desviación estándar de dichos valores se observa que los valores no se encuentran dispersos a gran medida respecto a su media. Por lo tanto, los valores presentados son aceptables.

Tabla 3.3 Resultados de ensayo de micro dureza de espuma metálica

Carga: 100 [gf]	Dureza HV	Diagonales [μm]		
		D1	D2	D. Principal
O1	63,87	54,27	53,48	53,88
O2	66,19	51,34	54,51	52,93
O3	63,11	54,54	53,86	54,2
Promedio	64,39	53,38	53,95	53,67

La dureza promedio de la espuma de aluminio corresponde a un valor de 64,39 HV con una carga de 100 [gf] y una diagonal promedio de 53,67 [μm], con dichos valores se procede a calcular la dureza en unidades de [GPa], mediante la aplicación de la ecuación 3 modificada según normativa ASTM E384-22.

La ecuación 6 utiliza los mismos parámetros que la ecuación 3 expresados en diferentes unidades, cabe recalcar que 1 [N] es equivalente al valor resultante al multiplicar 1 [Kgf] por la gravedad de 9,81 [m/s^2], teniendo estas consideraciones la ecuación 6 toma la siguiente forma (ASTM, 2021):

$$HV = 0.0018544 \times \frac{P_2}{(d_2)^2} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

HV: Dureza Vickers reportada en unidades de [Gpa]

P₂: Fuerza aplicada en [N]

d₂: Diagonal principal en [mm]

Utilizando la ecuación 6 se obtiene la dureza Vickers expresada en [GPa] de la espuma metálica

$$HV = 0.0018544 \times \frac{P_2}{(d_2)^2} = 0,632 \text{ [GPa]}$$

La Tabla 3.4 muestra los resultados de dureza obtenidos para la placa metálica, cuyos valores se encuentran en un rango de 46.33 y 49.60 HV, si se calcula la desviación estándar de dichos valores se observa que los valores no se encuentran dispersos a gran medida respecto a su media. Por lo tanto, los valores presentados son aceptables.

Tabla 3.4 Resultados de ensayo de micro dureza de placa metálica

Carga: 100 [gf]	Dureza	Diagonales [μm]			
		Medida	HV	D1	D2
	O1	46,33	62,81	63,71	63,26
	O2	47,3	61,4	63,81	62,61
	O3	49,18	60,72	62,08	61,40
	Promedio	47,60	61,64	63,20	62,42

La dureza promedio de la placa de aluminio corresponde a un valor de 47.60 HV con una carga de 100 [gf] y una diagonal promedio de 62,42 [μm], se utiliza los mismos pasos y aplicación de la ecuación 6 y se obtiene la dureza Vickers expresada en [GPa] de la placa de aluminio.

$$HV = 0.0018544 \times \frac{P_2}{(d_2)^2}$$

$$HV = 0,467 \text{ [GPa]}$$

Finalmente se obtiene una tabla comparativa de los valores de dureza expresados en unidades de [HV] y [GPa] de las probetas ensayadas como se muestra en la Tabla 3.5, se observa una diferencia del 33% en los valores de dureza, siendo la placa de aluminio la más débil comparada con la espuma metálica. El incremento de la dureza en la espuma metálica se debe a la presencia del cobre y el silicio, que al unirse con el aluminio forman una aleación mejorando sus propiedades mecánicas.

Tabla 3.5 Valores de dureza de espuma y placa de aluminio

Carga: 100 [gf]	Material	Dureza	
		HV	GPa
	Espuma metálica de aluminio	64,39	0,632
	Placa de aluminio	47,60	0,467

3.1.4. Ensayo de impacto Charpy

Este ensayo se realizó acorde a la metodología expuesta en el inciso 2.4.4 en base a la normativa ASTM E23 (ASTM, 2022) que establece las geometrías y condiciones necesarias para llevar a cabo el ensayo. El ensayo se llevó a cabo cumpliendo todos los parámetros dictados en la normativa, en este caso particular al realizar el ensayo del material no se pudo registrar ningún valor por parte del equipo de medición.

El ensayo Charpy resultó ser muy agresivo para la probeta de espuma metálica, pues el material presenta muchos concentradores de esfuerzos en forma de poros, lo que provocó que el material falle inmediatamente al contacto del péndulo con la probeta. La estructura geométrica del material poroso dificultaba tener uniformidad del material en las dimensiones de la probeta propuesta por la norma ASTM E23, adicionalmente la muesca realizada en la probeta actuó como un concentrador de esfuerzos adicional, provocando que el material fallara Figura 3.4 sin reflejar valores en el dispositivo de medición.



Figura 3.4 Probeta de espuma metálica después de ensayo Charpy

3.1.5. Ensayo de impacto variable

En la Tabla 3.6 se presentan los resultados del ensayo de impacto variable realizados desde diferentes alturas, adicionalmente se toman macroscopías de las probetas afectadas desde las alturas críticas establecidas mediante el análisis del comportamiento que tuvo cada probeta al ser impactada por un dardo cuya masa fue de 1 kg y con un diámetro de 15.9 mm. En esta tabla se puede apreciar como el tamaño de indentación provocado por el impacto del dardo, va creciendo conforme la altura va ascendiendo. Sin embargo, si se comparan los valores de tamaño de diámetro de indentación de las espumas y placas de aluminio se observa diferencias notorias en los tamaños finales del diámetro, lo cual indica que las espumas metálicas cumplen la función de absorber la energía generada al momento del impacto.

Tabla 3.6 Tamaño de diámetros causado por el impacto en placa y espuma

Altura [cm]	Diámetros en placa metálica [mm]				Diámetros en espuma metálica [mm]			
	D_1	D_2	D_3	D_{prom}	D_1	D_2	D_3	D_{prom}
115	7,80	7,90	7,70	7,73	4,95	4,70	4,80	4,82
100	7,10	7,10	7,10	7,10	6,80	6,85	6,90	6,85
60	6,70	6,70	6,80	6,73	6,50	6,60	6,65	6,58
50	6,30	6,50	6,60	6,47	-	-	-	-
40	6,10	6,10	6,15	6,12	-	-	-	-
30	5,55	5,50	5,60	5,55	4,20	4,25	4,30	4,25
20	5,00	5,10	5,05	5,05	5,00	5,15	4,95	5,03
15	4,80	4,80	4,70	4,77	3,85	3,95	3,90	3,90

Mediante la aplicación del ensayo de impacto, se determinó de forma experimental la cantidad de deformación ocasionada en las probetas después de la caída del dardo a diferentes alturas, hasta llegar a encontrar la altura máxima que la espuma metálica podría soportar antes de fracturarse por completo. Sin embargo, se pudo observar que el material retenía los impactos y absorbía gran parte de la energía generada evitando que la espuma colapsara, adicionalmente al absorber dicha energía se evitaba que el dardo tienda a rebotar después del impacto. Por otro lado, en el caso de la espuma Duocel, esta fue capaz de absorber toda la energía provocada por el dardo, dando como resultado un impacto seco.

Debido a la estructura y morfología que posee la espuma metálica, el material fue capaz de soportar todas las alturas que el equipo permitía medir, es decir, el equipo de impacto variable contaba con una escala métrica de hasta 1 m. Además se colocó una regla que permita extender el alcance del equipo, llegando así hasta una altura máxima de 1.15 m, esta altura fue considerada como la altura máxima y la más crítica para el estudio debido a las limitaciones que

presentaba el equipo, así pues, se establece la altura de 60 cm como la altura media y la altura de 15 cm como la altura mínima a la que fue sometida la espuma metálica sin sufrir un colapso completo, dichas alturas se toman como referencia para el ensayo en la espuma Duocel.

La Tabla 3.7 muestra el resultado de los impactos realizados en la espuma Duocel ERG con las alturas máximas y mínimas soportadas por la espuma metálica de aluminio fabricada por el método de infiltración en proformas solubles, debido a la limitación de material de espuma Duocel se lleva a cabo 2 pruebas de impacto tomando como referencia las alturas 115 y 15 cm.

Tabla 3.7 Tamaño de diámetros causado por impacto en espuma ERG Aerospace

Altura [cm]	Diámetros en espuma ERG Aerospace [mm]			
	D_1	D_2	D_3	D_{prom}
115	32	32,5	32,1	32,2
15	14,5	14	14,5	14,333

Los datos de las Tabla 3.6 y Tabla 3.7 se grafican y se obtiene la Figura 3.5, en la cual se aprecia el comportamiento de la deformación plástica en el material con la medición de los diámetros producidos por el impacto del dardo acorde a cada altura, mientras más grande sea el diámetro de deformación, mayor será la cantidad de absorción y disipación de energía por el material, este comportamiento se observa en los ensayos realizados en la espuma Duocel, que a pesar de tener una buena distribución de poros y estructura no pudo soportar una carga de impacto generada por una altura de 115 cm llegando a traspasarla por completo, este fallo produjo que la espuma sufriera deformaciones grandes, llegando a un diámetro promedio de 32,2 mm.

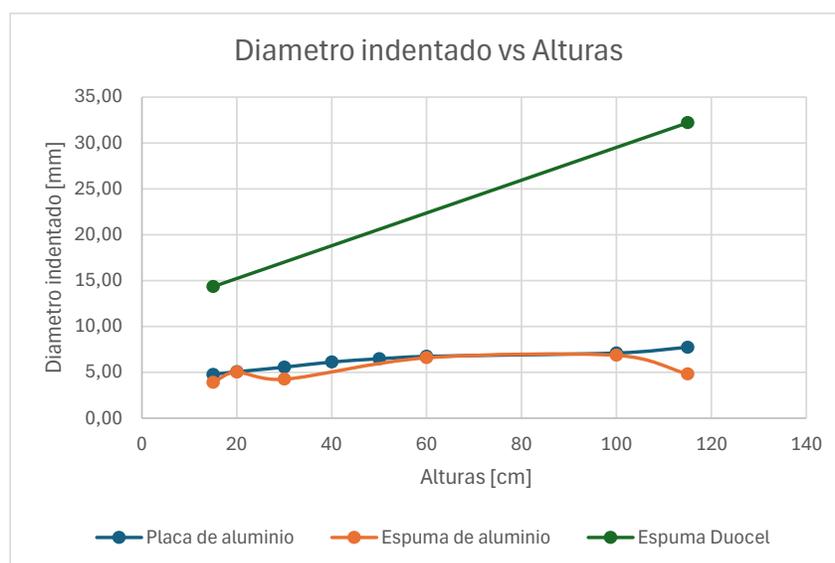


Figura 3.5 Altura vs diámetro indentado en las probetas después del impacto

En el caso de la espuma metálica por preformas solubles al tener una estructura porosa se observa un incremento inusual en algunos diámetros deformados, pues es el resultado de la presencia de zonas huecas o vacías dentro del material, lo que permite la absorción de energía. Esto se puede apreciar si se compara la deformación de la espuma Duocel y la espuma por proformas solubles con las placas de aluminio, mientras mayor sea el diámetro de impacto mayor será la energía absorbida. Sin embargo, algunas probetas de espuma metálica por preformas solubles presentaban diámetros de impacto mucho menores en comparación al de las placas metálicas, provocando que las probetas se deformen en toda su área transversal. Por lo tanto, a pesar de que estas espumas metálicas presenten diámetros de impacto menores, la absorción de energía se aprecia en la deformación que adquiere toda su sección transversal.

En la espuma metálica por proforma solubles los diámetros con valores menores al de la placa de aluminio, también se pueden manifestar como consecuencia de la dureza del material, pues por el ensayo de micro dureza se determinó que la espuma de aluminio por preformas solubles tiene mayor dureza que las otras probetas constituidas principalmente de aluminio, las deformaciones finales se pueden observar en la Figura 3.6 que muestra el comportamiento del material y su deformación en espumas metálicas y placas de aluminio.

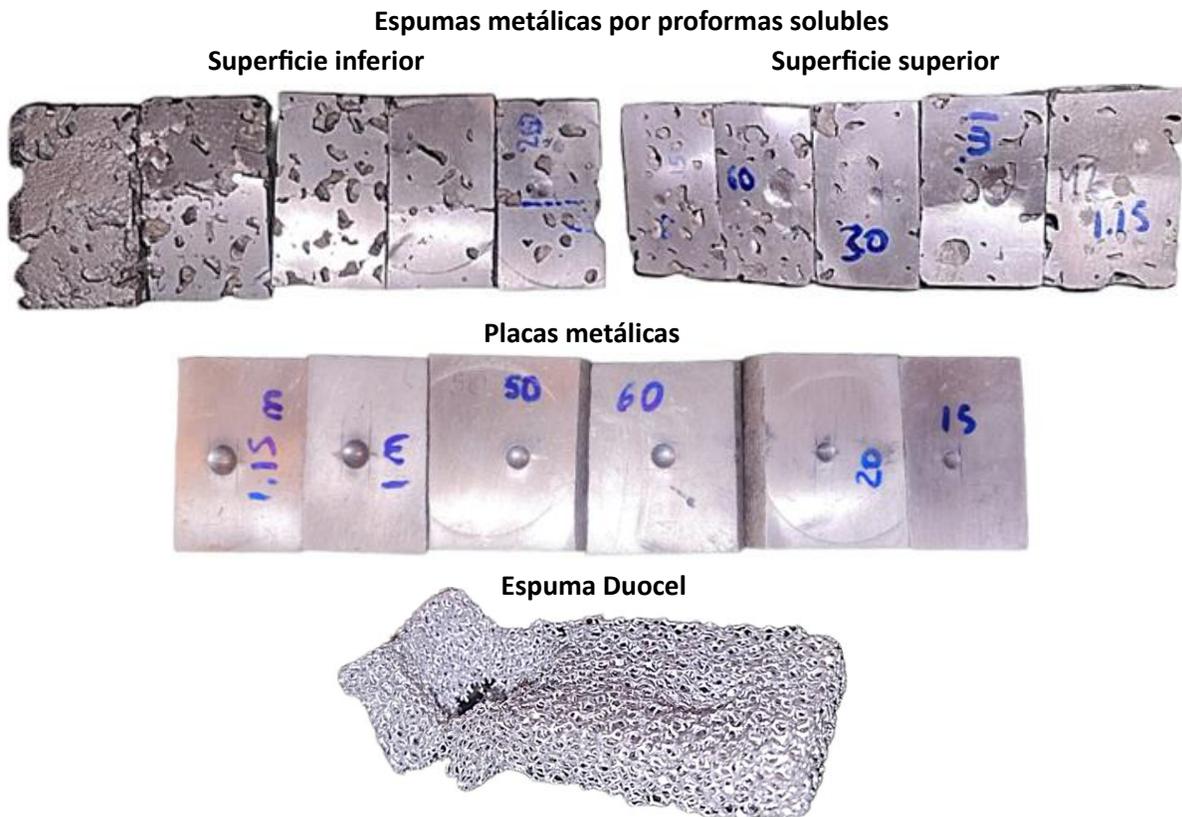


Figura 3.6 Deformación en las probetas sometidas a ensayo de impacto variable

Las fisuras y deformaciones producidas por el impacto en las espumas y placas de aluminio se someten a examinación por macrográficas, en este caso se evalúan a las probetas que fueron sometidas a alturas de 15, 60 y 115 cm, mismas que fueron consideradas como alturas clave de estudio, además, se toma medidas de los puntos de falla ocurridos en los materiales.

La Figura 3.7 ilustra los resultados causados por el impacto desde una altura de 15 cm, se muestra distintas macrográficas tomadas desde diferentes ángulos de vista, en el caso de la espuma metálica fabricada por el método de infiltración en preformas solubles, se observa en la vista superior pequeñas fisuras superficiales con tamaños de hasta 110 μm como máximos y medidas de 10 μm como mínimas, lo que se traduce como un daño no tan severo al material, afectándolo solo de forma superficial. Adicionalmente, se observa que las fisuras más grandes se presentan en espacios huecos, en la vista inferior de la espuma metálica se aprecia la fisura más grande que está ubicada en una lámina que conecta la estructura superficial.

Por otro lado, se observa que el tamaño del diámetro producido por el impacto tiene un valor nominal de 3,91 mm, con dicho valor se puede estimar la profundidad que se produjo en el impacto, este valor se obtiene al aplicar principios de geometría para el cálculo de la altura de un casquete esférico y se obtiene la expresión representada en la ecuación 7 (Calvache, 2016).

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \text{ [mm]} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

h: Es la profundidad producida por la indentación [mm]

D: Es el diámetro del dardo de indentación [mm]

d: Es el diámetro producido por la indentación en la superficie de la probeta [mm]

Utilizando la ecuación 7 se obtiene una profundidad de indentación aproximada de 0,2441 mm que corresponde al material de espuma metálica, se realiza un proceso similar y se establece una profundidad de indentación para la placa metálica con un valor de 0,3475 mm. Si se comparan los dos valores obtenidos se establece que la espuma metálica dispersó de mejor forma la energía de impacto evitando que el dardo penetre hasta un 29,76% menos respecto a la profundidad registrada en la placa metálica de aluminio.

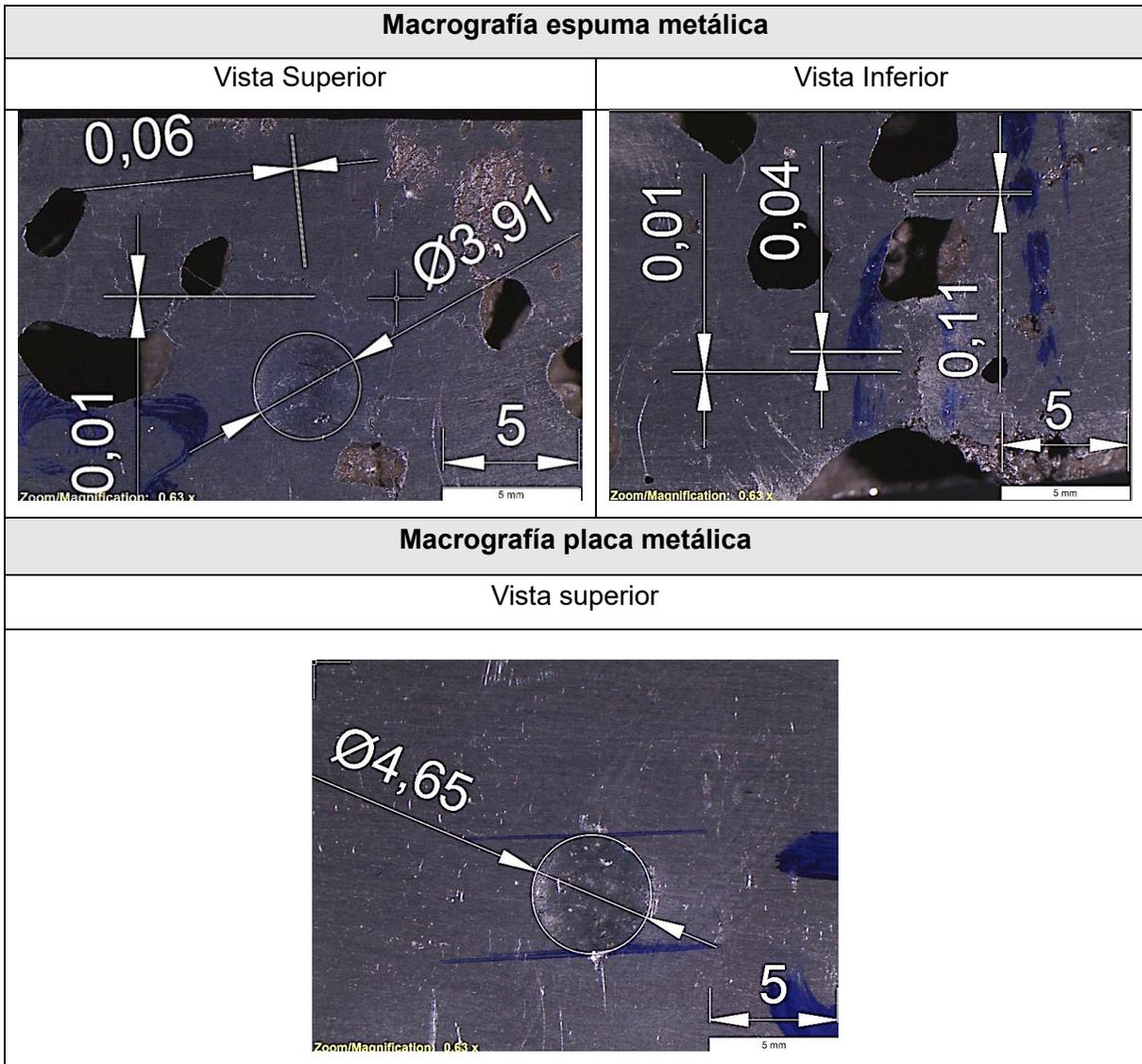
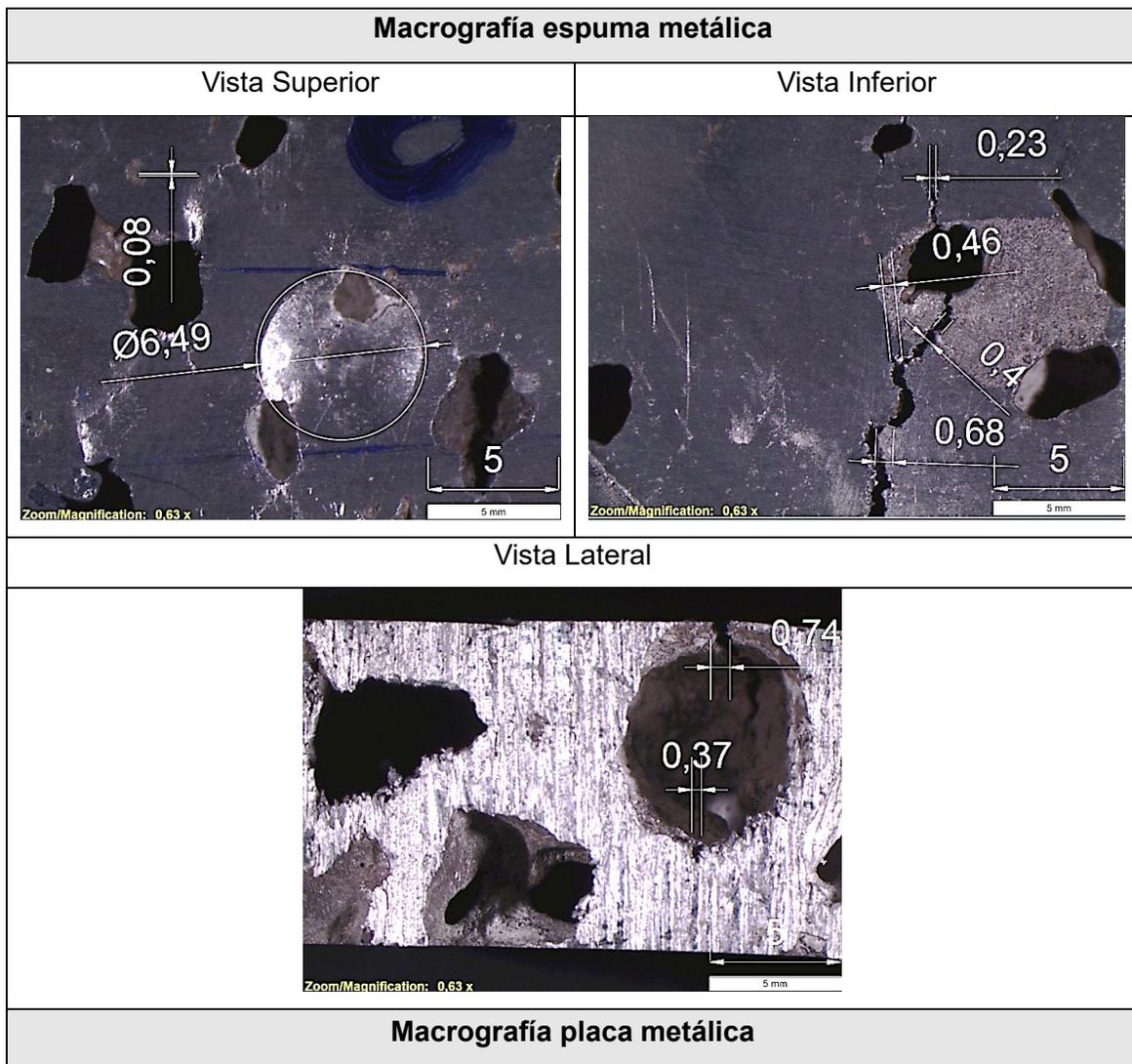


Figura 3.7 Macrografías de impacto producido por una altura de 15 cm

La Figura 3.8 ilustra los resultados causados por el impacto de dardo desde una altura de 60 cm, que representa 4 veces la altura inicial, por consecuencia la energía de impacto será mucho mayor y puede llegar a presentar fisuras más notables, esto se lo puede comprobar al observar la vista inferior de la espuma metálica que contiene fisuras de tamaños de hasta 0,6 mm de distancia de separación. Por otro lado, es importante mencionar que la ubicación de la fisura tiene origen y está situado en la parte superior de la macrografía, la cual se va extendiendo de forma pronunciada hasta conectarse con un concentrador de esfuerzos, en este caso el concentrador de esfuerzo está representado por un poro, el cual da paso a continuar con la trayectoria hasta fisurar completamente al material

Se utiliza la ecuación 7 para obtener los valores de profundidad de ambos materiales, para el caso de la espuma metálica se observa un valor de diámetro de indentación de 6,49 mm, mientras que en la placa metálica se observa un valor nominal de 6,7 mm, respecto a estos datos se obtiene una profundidad de 0,6924 mm para la espuma metálica y un valor de 0,7402 mm. Por lo tanto, el comportamiento de estos materiales es similar al caso anterior, es decir, en este caso la espuma metálica dispersó la energía del impacto de tal forma que pudo reducir hasta un 6,45% la profundidad de penetración respecto a la profundidad de la placa metálica. Sin embargo, a pesar de haber soportado dicha carga se presentan daños notorios en la espuma metálica como se logra observar en la vista lateral, además se observa una ligera deformación de la probeta en la zona impactada ocasionando un quiebre ligero con un ángulo de inclinación leve pero notorio, como se muestra en la Figura 3.8.



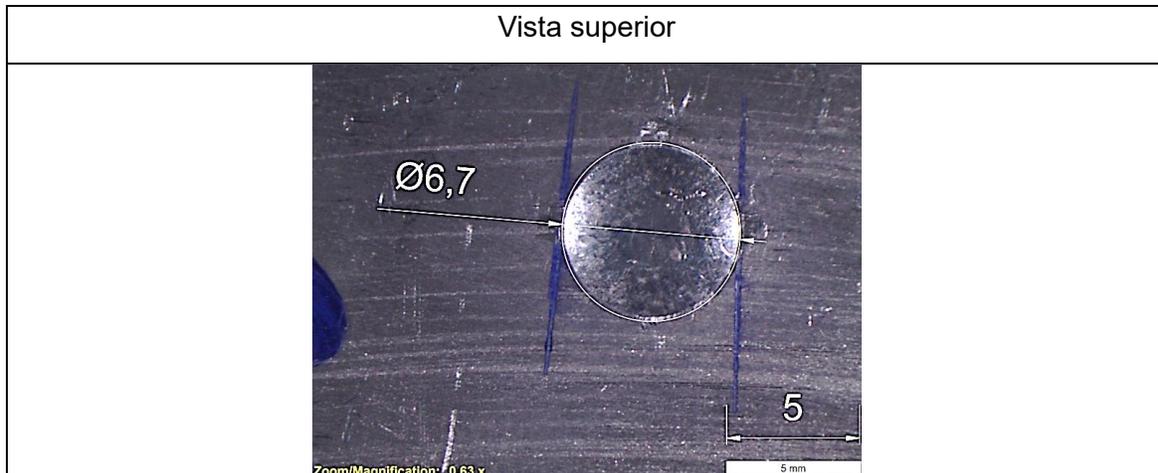


Figura 3.8 Macrografías de impacto producido por una altura de 60 cm

La Figura 3.9 muestra los resultados causados por el impacto de dardo desde una altura de 115 cm, que representa más de 7 veces la altura inicial, por consecuencia la energía de impacto será mucho mayor llegando a fisurar completamente al material, pero sin destruirlo por completo, las fisuras se pueden apreciar al observar la vista inferior de la espuma metálica que contiene fisuras de tamaños de hasta 2,38 mm de distancia de separación, lo cual es una distancia mucho mayor en comparación a los casos anteriores. Las fisuras generadas se encuentran en la dirección perpendicular al plano de impacto, lo que produce el agrietamiento y desgarre del material, la zona impactada sufre deformación de tal forma que la probeta tiende a tener un leve aspecto geométrico en forma de “V”, a pesar de las notorias separaciones el material no llega a fracturarse por completo, dejando una unión sólida de 2,5 mm en dirección paralela al plano de impacto.

Se utiliza la ecuación 7 para obtener los valores de profundidad de ambos materiales, para el caso de la espuma metálica se observa un valor de diámetro de indentación de 4,87 mm, mientras que en la placa metálica se observa un valor nominal de 7,73 mm, respecto a estos datos se obtiene una profundidad de 0,3820 mm para la espuma metálica y un valor de 1,002 mm para la placa metálica. Por lo tanto, la espuma metálica dispersa la energía del impacto de tal forma que pudo reducir hasta un 61,89 % la profundidad de penetración respecto a la profundidad de la placa metálica.

La espuma metálica pudo controlar los impactos generados desde una altura de 15 cm hasta una altura de 115 cm, gracias al comportamiento presentado por los ensayos de impacto y la formación de fisuras, la espuma metálica presenta un buen comportamiento en la absorción de impactos generados por el choque entre el dardo y la placa.

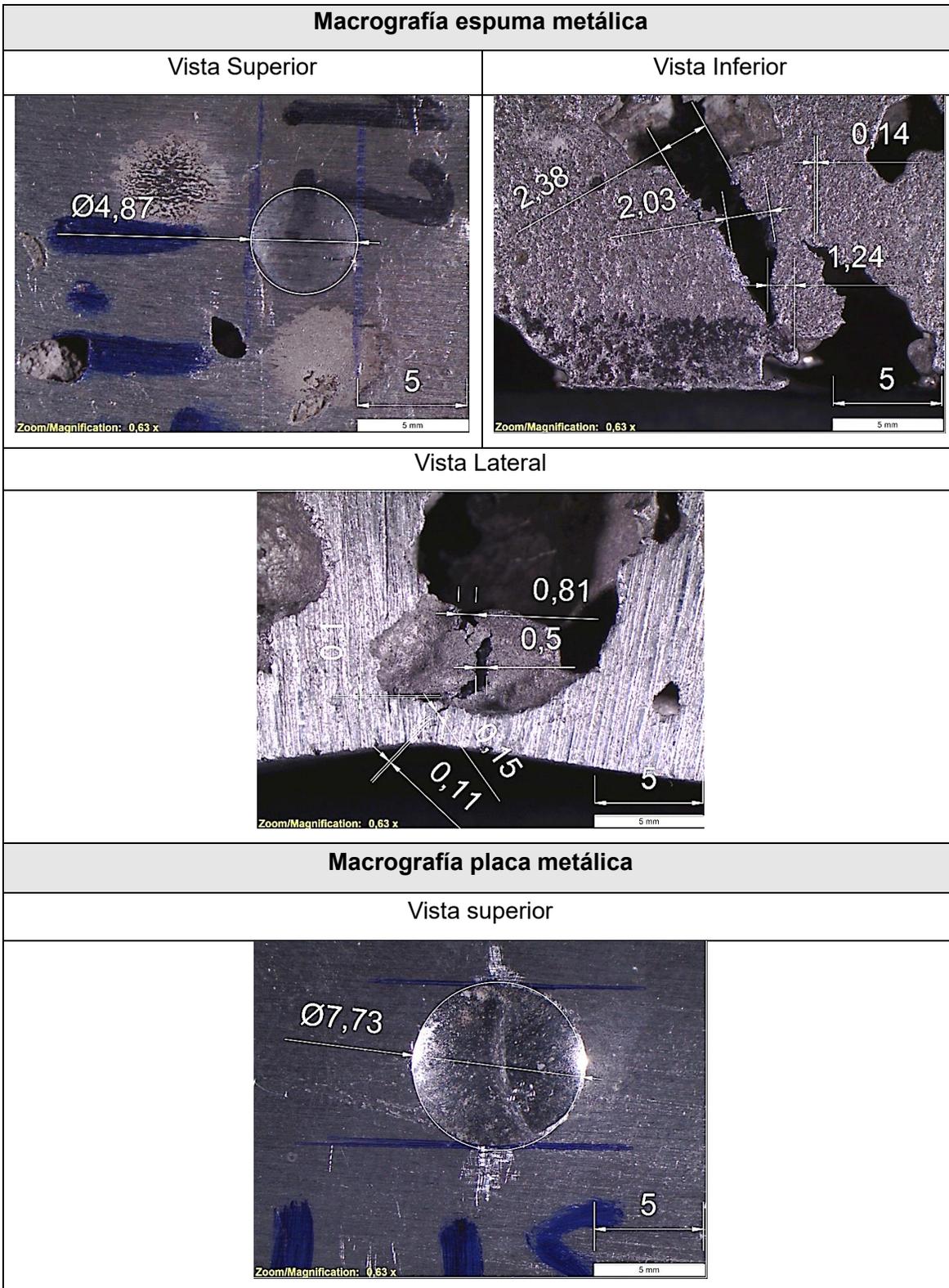


Figura 3.9 Macrografías de impacto producido por una altura de 115 cm

Para el caso de la espuma Duocel sometida a una altura de 15 cm, el daño en la estructura fue mínimo, no se registraron fisuras en la integridad del material, sino más bien, solo se registró una deformación producida por la indentación del dardo, llegando a marcar un diámetro de 14,33 mm lo que corresponde a una profundidad de indentación de 4,5 mm. A pesar de presentar una profundidad considerable en comparación con las otras probetas, esta deformación se presentó de forma puntual sin afectar el resto de la estructura afectando solo el área de impacto. Sin embargo, frente a una altura de 115 cm la probeta no pudo soportar y falló.

Finalmente, en la Figura 3.10 se presenta la energía potencial generada al dejar caer el dardo desde una altura h , con masa de 1 kg y considerando la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$, se aplica la ley de conservación de la energía y se obtienen los valores correspondientes a cada altura representados en una gráfica. Se observa que a medida que la altura se incrementa, la energía potencial seguirá creciendo proporcionalmente, además se establecen los valores de energía críticos para las alturas de 15 cm con un valor de 1,47 J, 60 cm con un valor de 5,88 J y una altura máxima de 115 cm con un valor de 11,28 J.

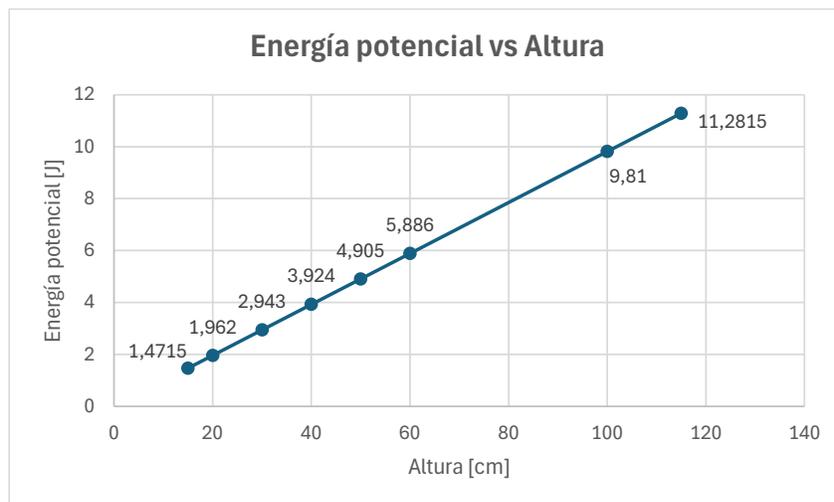


Figura 3.10 Energía potencial generada a diferentes rangos de altura

Las probetas de espuma metálica por proformas solubles lograron soportar alturas de hasta 115 cm con energías potenciales de hasta 11,28 J, mientras que la espuma Duocel no pudo soportar dicha altura de impacto y fue atravesada completamente en el área de impacto, esto puede ser debido a los valores de densidad relativa que posee el material. Sin embargo, la espuma Duocel pudo mitigar la energía de impacto de forma más eficiente, reduciendo considerablemente el sonido provocado por el impacto y produciendo un impacto seco.

3.1.6. Análisis de porosidad

En la Figura 3.11 se muestran las 5 líneas horizontales de 49.88 mm que se utilizaron para determinar el número de poros por milímetros lineales, el resultado del conteo se muestra en la Tabla 3.8 y se obtiene el valor promedio de 1.56 poros por centímetro, con una desviación estándar de 0.26 por lo que los valores no se encuentran muy dispersos.

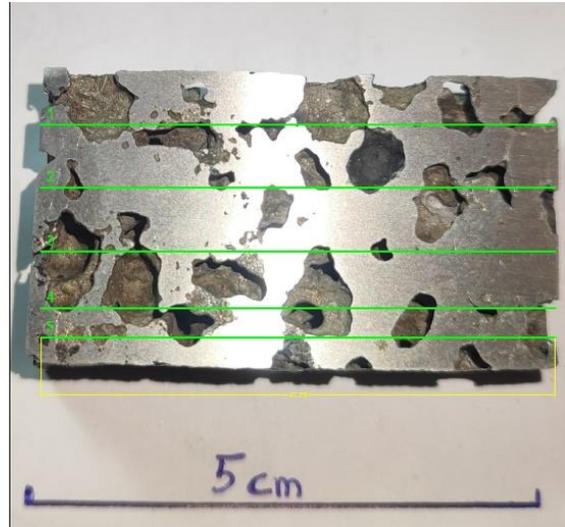


Figura 3.11 Muestra para conteo de porosidad lineal

Tabla 3.8 Resultados de conteo de porosidad lineal

<i>Nº Línea</i>	<i>poros/49.88 mm</i>	<i>poros/cm</i>
1	10	2.00
2	8	1.60
3	7	1.40
4	7	1.40
5	7	1.40
Media	7.80	1.56
Desviación estándar	1.30	0.26

Del mismo modo se procedió con el análisis de porosidad por cm^2 , se contó el número de poros en 9 rectángulos de área 144 mm^2 , como muestra en la Figura 3.12 los valores tabulados se muestran en la Tabla 3.9, se obtuvo una media de $5.56 \text{ poros por cm}^2$; además la desviación estándar para esta muestra fue de 1.74, lo cual demuestra cierta dispersión de los datos, debido a que se aprecia en la muestra que algunos de los poros de la espuma metálica están bastante separados.

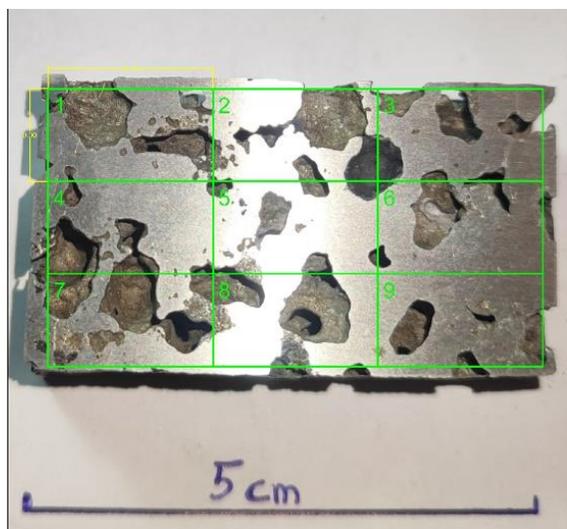


Figura 3.12 Muestra para conteo de porosidad superficial

Tabla 3.9 Resultados de conteo de porosidad superficial

<i>Nº Cuadro</i>	<i>poros/144 mm²</i>	<i>poros/cm²</i>
1	10	6.94
2	11	7.64
3	9	6.25
4	8	5.56
5	11	7.64
6	5	3.47
7	8	5.56
8	5	3.47
9	5	3.47
<i>Media</i>	8.00	5.56
<i>Desviación estándar</i>	2.50	1.74

Para determinar la separación media de poros se realizaron 30 mediciones al azar como se muestra en la Figura 3.13 y los datos se resumen en la Tabla 3.10. De este análisis se obtuvo una separación de poros de 2.45 mm, sin embargo, la desviación estándar resultó ser de 1.65, por lo cual los datos tienen cierta dispersión, esto se debe a que muchos poros están más juntos en una en determinadas zonas de la muestra.

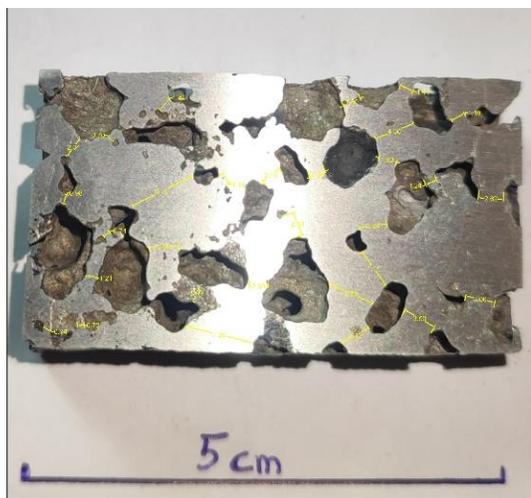


Figura 3.13 Muestra para medición de separación de poros

Tabla 3.10 Resultados de medición de separación de poros

<i>NºMedición</i>	<i>separación [mm]</i>		
1	0.74	17	2.5
2	0.72	18	2.84
3	1.21	19	4.14
4	3	20	4.89
5	0.74	21	3.12
6	6.7	22	2.03
7	0.98	23	3.5
8	2.34	24	3.06
9	0.7	25	2.62
10	1.44	26	1.24
11	1.89	27	1.83
12	2.1	28	4.3
13	1.15	29	1.41
14	1.69	30	1.48
15	1.9	<i>Media</i>	2.45
16	7.2	<i>Desviación estándar</i>	1.65

La Figura 3.14 muestra los 16 poros seleccionados para medir su área, mediante la ayuda de software especializado se midieron dichas áreas que se presentan en la Tabla 3.11; de esto se obtuvo un área media de poro de 16.93 mm², la desviación estándar demostró una gran dispersión de datos, lo cual se debe a que también se consideraron los poros muy pequeños en la muestra.

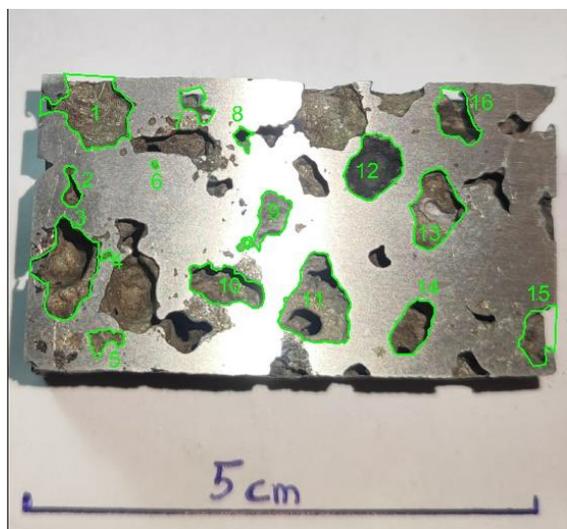


Figura 3.14 Muestra para medición de superficie de poros

Tabla 3.11 Resultados de medición de superficie de poros

<i>Nº Área</i>	<i>Área [mm²]</i>
1	39.67
2	4.28
3	39.64
4	0.69
5	5.35
6	0.40
7	6.31
8	2.40
9	12.56
10	20.71
11	40.80
12	25.52
13	27.01
14	15.64
15	14.73
16	15.23
<i>Media</i>	16.93
<i>Desviación estándar</i>	14.08

Por último, el porcentaje de porosidad se determinó en base a la Figura 3.15 y se explica en la Tabla 3.12. Se midió el área total del rectángulo rojo que fue de 858 mm², y del mismo modo se midió el área de la zona porosa y no porosa; estableciendo la relación entre estas áreas, como

resultado se obtiene una porosidad de 36.07%, lo cual resulta un poco baja para una espuma metálica, pero tendría ciertos beneficios para la aplicación que se está estudiando.

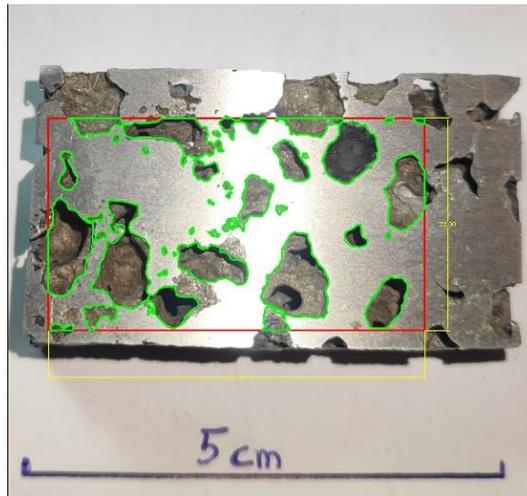


Figura 3.15 Muestra para medición de porcentaje de porosidad

Tabla 3.12 Resultados de porcentaje de porosidad

Parámetro	Total	No porosa	Porosa
Área [mm²]	858	548.524	309.476
Porcentaje	100.00%	63.93%	36.07%

3.1.7. Análisis de densidad relativa respecto al material base aluminio

Sabiendo que la densidad es la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, se toman los siguientes datos como referencia para el cálculo de la densidad relativa. El valor de la densidad del aluminio corresponde a 2,7 g/cm³, el valor del volumen de la pieza equivale a 184 cm³, la relación entre estos dos valores da como resultado la densidad de la espuma metálica por proformas solubles con un valor de 1,49 g/cm³, tomando en cuenta la densidad del aluminio y relacionándolo con la densidad de la espuma metálica según la ecuación 2, se obtiene la densidad relativa con un valor de 0,55.

El valor de densidad relativa del 55 % permite considerar a la espuma metálica como un material poroso, pues se encuentra entre en la mitad del rango de 0 a 1, donde 0 significa sumamente poroso y 1 representa a un sólido. Esta espuma se encuentra en un rango intermedio haciendo presencia del beneficio de la porosidad al aliviar el peso casi a la mitad y su robustez como resultado de un material sólido.

3.1.8. Resultados de simulación

Los datos utilizados para llevar a cabo la validación de resultados son extraídos del artículo científico “The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates” (Karthikeyan et al., 2013), el cual presenta resultados de deformación en una placa de acero inoxidable SS-304 de espesor 0,71 mm provocado por el impacto de una esfera de diámetro 6,35 mm de acero 4340 a diferentes velocidades como muestra la Figura 3.16. En dicha figura se puede observar las diferentes velocidades de impacto para la placa de acero en un rango aproximado de 50 a 200 m/s con sus respectivas deformaciones provocadas por el impacto, para extraer dichos valores se mapea la imagen en un software de extracción de datos y se obtienen las diferentes velocidades acorde a la curva representada por el acero inoxidable.

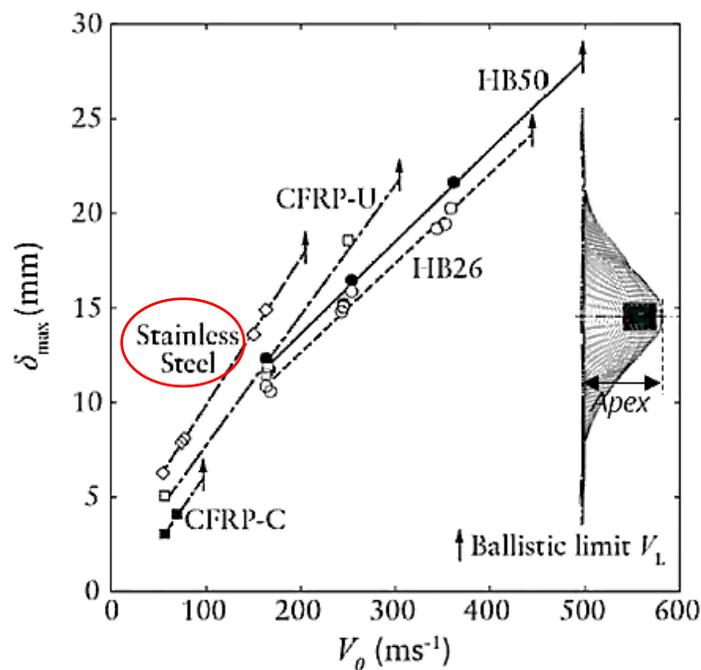


Figura 3.16 Deformación vs velocidad de impacto

Fuente: (Karthikeyan et al., 2013)

Una vez extraídos los datos de las velocidades y deformaciones para el acero inoxidable, se utilizan las velocidades como parámetros de entrada y se evalúa para distintas magnitudes. La Tabla 3.13 muestra el resultado de las simulaciones, los datos experimentales y el porcentaje de error respecto a los valores experimentales obtenidos de las deformaciones provocadas en la placa en unidades milimétricas.

Tabla 3.13 Resultados de simulación y comparación de datos

Velocidad [m/s]	Deformación [mm]		Error %
	Experimental	ANSYS	
57,000	6,170	5,9493	3,58%
75,616	7,984	7,611	4,67%
91,233	9,177	8,934	2,65%
99,157	9,725	9,939	2,20%
114,247	10,947	10,800	1,34%
130,685	12,222	12,112	0,91%
147,945	13,621	13,505	0,85%
163,562	14,774	14,831	0,39%

La Tabla 3.13 muestra el resultado de la experimentación y el resultado de la simulación con porcentajes de error relativamente bajos, con un valor máximo de 4,67% que corresponde a una velocidad de 75 m/s, dichos errores pueden estar ligados al refinamiento de mallado y las condiciones de frontera establecidas en el modelo. Por otro lado, se observa valores de error menores al 1%, lo cual indica que los resultados obtenidos por la simulación son fiables y se asemejan mucho a la realidad, estos valores son representados en la Figura 3.17, en la cual se puede apreciar que los datos obtenidos mediante simulación se ajustan muy bien a la curva experimental, sin presentar una dispersión desmesurada. Por lo tanto, se utiliza la metodología desarrollada en la validación de datos para llevar a cabo la simulación de impacto de bala.

Resultados de Simulación Vs Experimental

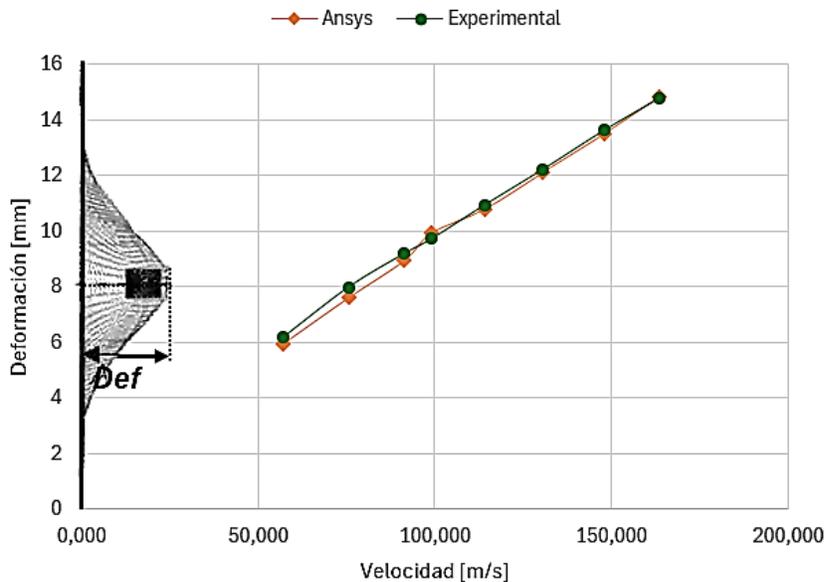


Figura 3.17 Resultados de la simulación y experimentación

Se realiza una simulación con el paso a paso y la metodología desarrollada en la validación de datos con valores distintos en los materiales, formas de las geometrías y velocidades de análisis. A la bala de calibre 5,56 mm se le asigna un material de acero 4340, usado como material de la esfera en la validación de datos, la placa posee un espesor de 14 mm y la bala estará sometida a una velocidad de 900 m/s. al tener una velocidad tan alta se debe variar campos como el paso del tiempo, para que el resultado llegue a tener convergencia se calcula un tiempo de análisis de 0,000065292 s, el cual permite analizar solo una fracción del suceso y comportamiento de la placa frente al impacto de la bala. El valor de tiempo fue medido y comparado con varias simulaciones hasta poder conseguir una solución convergente sin errores.

La Figura 3.18 muestra el comportamiento del aluminio 2024-T4 frente a una carga puntual de impacto con velocidad de 900 m/s, deformando completamente la zona donde penetra la bala, esto indica que, en el intervalo de tiempo de $6,53 \times 10^{-6}$ segundos, el aluminio empieza a sufrir una deformación plástica producto del impacto de la bala. El proyectil, al poseer una geometría delgada y puntiaguda, hace que el impacto generado sea puntual en una zona específica de impacto, esto se puede comprobar al observar las zonas azules de la Figura 3.18, la cual es la representación de la colisión de la placa de aluminio con el proyectil calibre 5,56 mm, esta representación se divide en 3 tomas de derecha a izquierda, empezando por el instante en el que el proyectil y la placa entran en contacto, seguido de la penetración del proyectil en la placa, deformándola por completo en la dirección de la trayectoria de la bala. Finalmente, se muestra el momento en el que el proyectil atraviesa por completo a la placa de aluminio, el impacto generado es de gran magnitud por lo que se desprende material de ambos cuerpos y se representa con los puntos rojos.

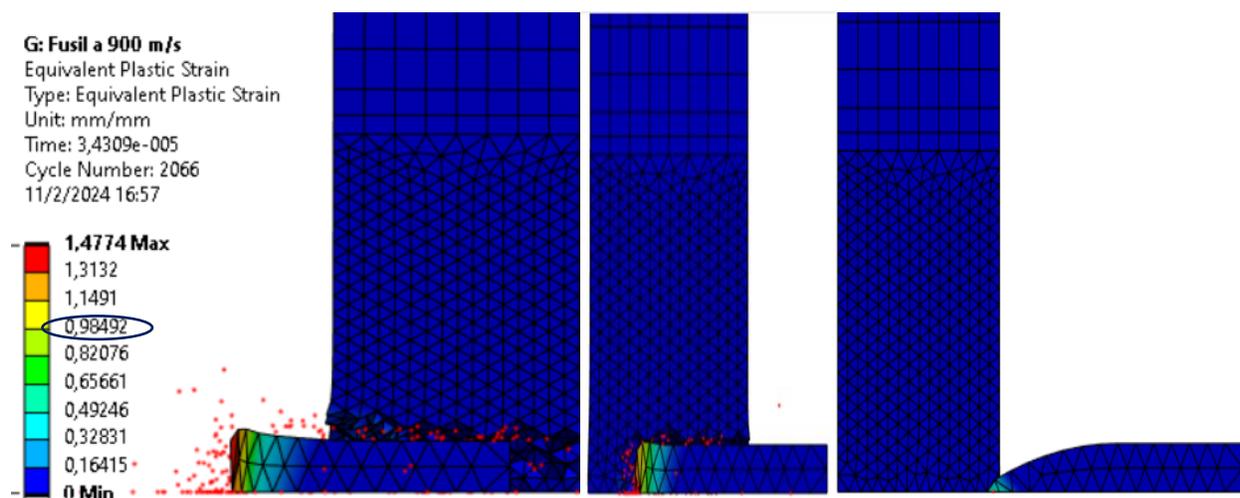


Figura 3.18 Deformación plástica de la placa de aluminio

La Figura 3.18 indica valores de deformación, la placa presenta una deformación mínima con valores máximos de hasta del 3%. Además, se observa una deformación en la geometría del proyectil, pues al impactar con la placa de aluminio 2024-T4 a elevadas velocidades se produce una gran cantidad de energía haciendo que se deforme la placa de aluminio junto con el proyectil, es importante considerar que las partículas de color rojo son restos del material desprendido durante la colisión, dichos elementos contienen los máximos valores de deformación haciendo que se separen del material. Por lo tanto, los valores hasta el 0,98492 representan la deformación producida en la placa metálica y el proyectil.

La Figura 3.19 representa la deformación direccional de los cuerpos, la placa de color amarillo contiene el origen de coordenadas, los valores de deformación se miden con referencia al eje de coordenadas z, el cual fue representado como la dirección de la velocidad del proyectil. El desprendimiento del material representado por las partículas de color rojo, presentan desplazamientos máximos de hasta 54 mm durante el intervalo de tiempo establecido, los desprendimientos se presentan en ambas direcciones del eje z. Esta representación visual permite comprender la capacidad destructiva generada por la colisión de un proyectil de calibre 5,56 mm. Sin embargo, a pesar de utilizar la placa de aluminio completamente sólida, se observa que el material falla y es traspasado completamente. Por lo tanto, al someter la espuma metálica al mismo efecto de impacto y considerando la porosidad del material, se estima que la espuma metálica no va a ser capaz de poder detener el proyectil, pues la porosidad reduce la capacidad de soportar el impacto, provocando que el proyectil traspase con mayor facilidad al cuerpo poroso.

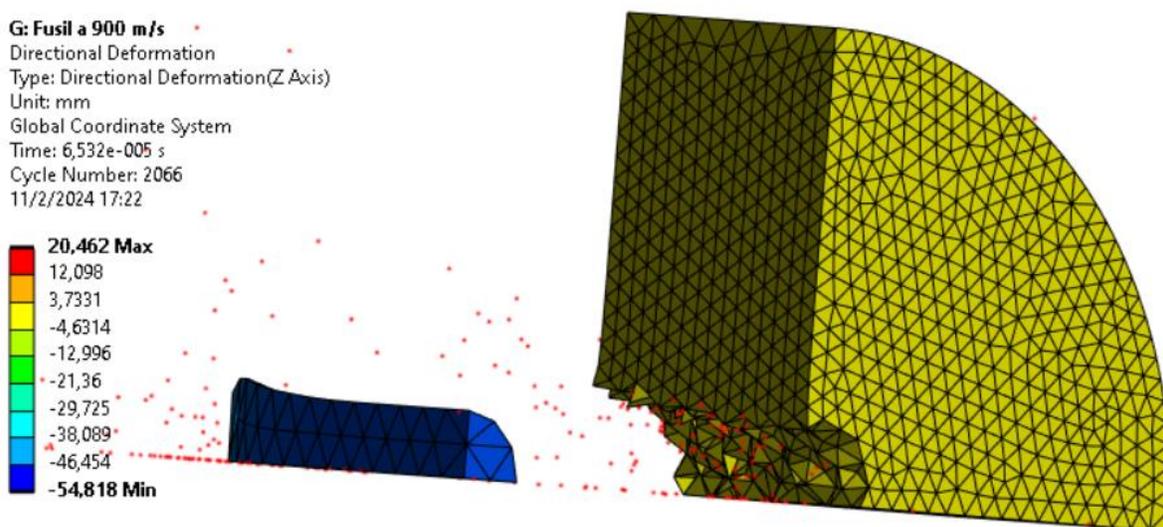


Figura 3.19 Deformación de la placa

Finalmente, se presenta la Figura 3.20 que muestra el comportamiento de la velocidad del proyectil en el lapso de 65,29 μs , en el instante 0 segundos, se considera el punto de partida del proyectil con una velocidad inicial de 900 m/s, al momento de iniciar el impacto el proyectil empieza a perder velocidad hasta traspasar por completo a la placa metálica con un espesor de 14 mm. Una vez que el proyectil atraviesa la placa, la velocidad promedio de salida corresponde a un valor de 635 m/s, reduciendo la velocidad del proyectil un 30% respecto a la velocidad inicial.

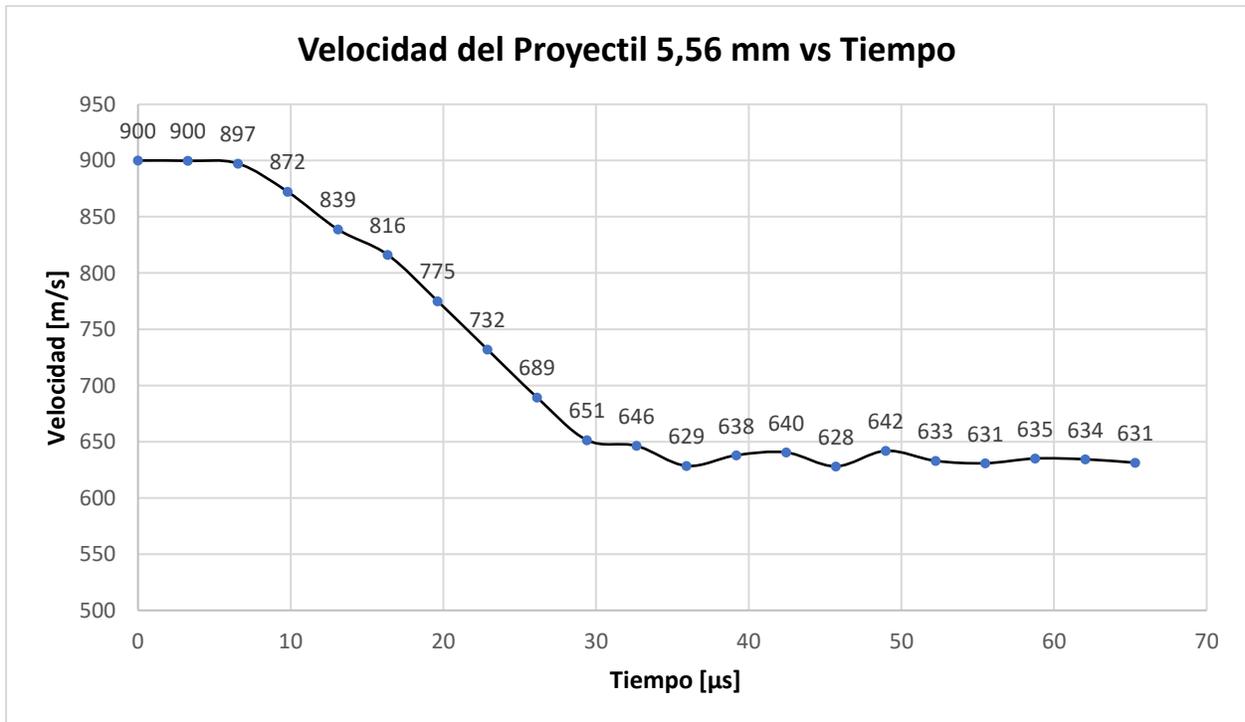


Figura 3.20 Comportamiento de la velocidad del proyectil

La velocidad, con una magnitud de 900 m/s que se tomó como referencia para la simulación, es un valor estimado y promedio según la literatura planteada en el marco teórico, por lo tanto, dicho parámetro puede variar acorde al modelo de fusil que se utilice. Por otro lado, es importante considerar el espesor de las placas metálicas de prueba, para el caso simulado es necesario utilizar una placa con un mayor espesor para poder detener completamente al proyectil, otra opción a considerar es utilizar otros materiales más resistentes como un acero. El propósito de utilizar una espuma de aluminio con espesor de 14 mm es utilizar materiales mucho más livianos que el acero, pues la espuma metálica de aluminio al presentar una densidad relativa respecto al aluminio del 50%, lo hace un material idóneo para la reducción de peso. Sin embargo, no es recomendable utilizar este material para detener directamente el impacto puntual que se genera cuando un fusil dispara un proyectil calibre 5,56 mm.

3.2. Análisis de la viabilidad del uso de espumas metálicas en aplicaciones de alto impacto, chaleco antibalas para un fusil calibre 5,56 mm

Se presenta en la Tabla 3.14 las propiedades de las placas cerámicas que se usan para chalecos antibalas tipo III y IV, capaces de soportar munición de 5.56 mm, también se muestran las principales propiedades obtenidas de la espuma metálica por proformas solubles, y se coloca las propiedades de la espuma Duocel.

Tabla 3.14 Resumen de propiedades de materiales analizados

Propiedades	Unidades	ALOTEC 98 SB	Espuma Metálica	Espuma Duocel
Densidad	ρ (g/cm^3)	3.80	1.49	0.23
Porosidad	P (%)	<2	36.07	--
Tamaño de grano medio	D (μm)	6	127	--
Dureza Vickers	$HV(5)$ (GPa)	13.5	0.632	0.343
Módulo de Young	E (GPa)	335	--	0.103
Resistencia a la flexión	σ_b (MPa)	260	--	--
Energía absorbida	E (J)	--	11,7	11,7

De las propiedades mostradas se puede comparar la densidad, que es una ventaja para las espumas metálicas, ya que representa un alivio de peso de alrededor del 40%, esta ligereza puede ser muy bien aprovechada en chalecos antibalas para brindar comodidad a los usuarios. Por otro lado, es notable que la espuma Duocel presenta menor densidad siendo así el material más ligero, aliviando mucho más el peso de un cuerpo formado por este material. Sin embargo, este tipo de estructuras no pueden detener por si solas el impacto puntual de un proyectil calibre 5,56 mm disparado por un fusil, por lo que es necesario utilizar materiales adicionales que ayuden a distribuir la energía de impacto.

El tamaño de grano medio permite saber las propiedades mecánicas de los elementos, sabiendo esto, las placas de cerámica presentan un tamaño de grano mucho menor en comparación con el tamaño de grano de la espuma metálica por proformas solubles y placa de aluminio. El tamaño de grano que poseen las placas de cerámica permite al material tener valores de dureza y rigidez mucho mayores que la espuma caracterizada, permitiendo que las placas cerámicas puedan soportar impactos directos y puntuales. Por otro lado, la espuma metálica al poseer un tamaño de grano mucho mayor, presenta una reducción de la dureza y rigidez del material, pese a este inconveniente el valor de la ductilidad es mucho mayor, lo que provoca tener mejores valores de tenacidad, es decir, la capacidad de absorber energía aumenta. Una mayor ductilidad implica que la espuma metálica puede sufrir deformaciones significativas antes de la fractura y sumado la presencia de poros, hace que el material se deforme de mejor manera y pueda absorber la energía de impacto a la cual se le quiere someter

La energía generada por el disparo de una bala calibre 5.56 mm es puntual, generando una gran cantidad de energía cinética de más de 1767 J, este valor dependerá del tipo de fusil utilizado, dicha energía resultante debe ser disipada y absorbida por el material de protección. Mediante los ensayos de impacto se evidencio que la espuma metálica de aluminio por preformas solubles pudo soportar un impacto de 11,28 J, un valor correspondiente al 1% del total de la energía generada por un fusil. Las espumas metálicas pudieron soportar el impacto generado por la esfera en el ensayo de impacto, pero presentaron deformaciones notorias, en el caso de la espuma por proformas solubles se cuantificó que el área transversal se fracturó alrededor del 80%, por otro lado, la espuma Duocel no pudo soportar dicha energía provocando que el indentador traspase a la espuma. Al tomar como referencia estos comportamientos, se establece que estas espumas metálicas de aluminio con espesores de 14 mm y 12 mm respectivamente, no pueden soportar un impacto puntual con una energía de 1767 J generadas por el disparo de un fusil calibre 5.56 mm, pues serían traspasadas y fracturadas.

La porosidad en las espumas metálicas permite a estos materiales tener una mejor deformación al momento de absorber energía, el hecho de tener poros muy grandes puede provocar que la bala penetre fácilmente a través de las espumas metálicas, lo cual es contraproducente. Por lo tanto, es necesario establecer límites de densidad relativa en las espumas metálicas para la aplicación en chalecos antibalas. Por otro lado, se compara los valores de dureza presentados en la Tabla 3.14 respecto al material cerámico, y se observa un valor de dureza relativamente bajo en las espumas metálicas, este comportamiento se le atribuye al material base de fabricación, correspondiente al aluminio.

En las pruebas de impacto variable y pruebas de impacto realizadas por simulación, se observa que el impacto de los proyectiles es puntual en un área muy reducida, haciendo que todo el impacto sea concentrado en un solo punto, esto provoca que las espumas metálicas no puedan absorber y disipar toda la energía provocada por el impacto en su totalidad. Por lo tanto, para que las espumas metálicas puedan absorber y disipar la mayor cantidad de energía posible, es necesario que la energía de impacto sea distribuida en un área lo más amplia posible, es decir, mientras más grande sea el área de impacto, la espuma metálica podrá absorber de mejor manera la energía producida por el impacto.

La mejor solución para mejorar el rendimiento de las espumas metálicas, frente a impactos puntuales generado por proyectiles, es combinar las propiedades de la espuma metálicas con las de los materiales existentes como Kevlar o Dyneema. Estas capas periféricas ayudan a disipar la energía distribuyéndola en un área mayor, evitando que se genere un impacto puntual, de esta forma al tener una carga de impacto distribuida y no puntual, la espuma metálica puede absorber de mejor manera la energía mediante su deformación, pues los poros y estructuras abiertas que se encuentran en su interior permite que la espuma pueda absorber la energía final de impacto.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se caracterizó la espuma metálica obtenida mediante la aplicación de ensayos de micro dureza, microscopía, macroscopía, espectrografía, impacto variable, análisis de porosidad y densidad, que permitieron obtener los valores de las propiedades mecánicas presentes en la espuma metálica fabricada.

Se comparó las propiedades de la espuma metálica de aluminio, fabricada por el método de infiltración de metal en proformas solubles, con las propiedades de las placas cerámicas alotec utilizadas en la fabricación de chalecos antibalas, y se establecen diferencias significativas en aspectos como la densidad, tamaño de grano medio, dureza y porosidad. Por lo tanto, se establece que la espuma metálica de aluminio es mucho más liviana que las placas cerámicas, poseen una dureza mucho menor de hasta 20 veces respecto a las placas cerámicas, un tamaño de grano medio mucho mayor de hasta 20 veces el tamaño de grano medio de las placas cerámicas y una porosidad superior en un 35%, haciendo que la espuma metálica no sea apta para detener y soportar impactos de gran magnitud generados por un fusil calibre 5,56 mm, por si sola.

Se verificó que, la espuma metálica no presenta propiedades favorables para detener impactos directos de fusiles 5.56 mm, mediante la comparación de las características de la espuma metálica con otros materiales usados para chalecos antibalas. Sin embargo, puede ser considerado en aplicaciones de alto impacto si se combina adecuadamente con otros materiales como el Kevlar o el Dyneema, creando un material compuesto con mejores propiedades de absorción de energía.

Se comprobó, mediante la realización de pruebas experimentales de impacto variable y ejecución de simulaciones de impacto de bala, que la espuma metálica de aluminio con un espesor de 14 mm no puede detener impactos puntuales generados por un fusil calibre 5,56 mm y como consecuencia el material es atravesado por el proyectil en la zona de impacto.

Se determinó que, mediante la simulación por elementos finitos se puede obtener una buena referencia del comportamiento del material frente a cargas de impacto reales, lo que permite una reducción de costos, pues el llevar a cabo pruebas experimentales de impacto por un fusil de calibre 5,56 mm en el material de estudio, puede llevar a costos de hasta \$ 500 por prueba.

En las simulaciones realizadas se observó que, a pesar de que la espuma metálica no pudo soportar y detener el impacto generado por un fusil calibre 5,56mm, pudo llegar a reducir la energía cinética inicial del proyectil hasta en un 30%, después de ser atravesado por el proyectil.

Se observó que, el tamaño de poros en las espumas metálicas es un aspecto importante a considerar, pues el material debe tener un tamaño de poros menor que el valor de $24,27 \text{ mm}^2$, el cual corresponde al área transversal de un proyectil de calibre 5.56 mm, es decir, el diámetro de los poros debe ser menor al diámetro del proyectil calibre 5.56mm, caso contrario, el proyectil puede atravesar a la espuma metálica con mayor facilidad, además esto produce que el material disipe menor cantidad de energía cinética después de ser atravesado.

Se determinó que, la espuma metálica puede llegar a disipar de mejor forma la energía cinética a pesar de ser atravesada, si el área de impacto incrementa y llega a ser similar al área transversal donde toma lugar el impacto en la espuma metálica, es decir, mientras mayor sea el área de impacto, mayor será la cantidad de energía absorbida por la espuma metálica.

Se realizó un análisis de la viabilidad del uso de las espumas metálicas en aplicaciones de alto impacto como los chalecos antibalas para un fusil calibre 5,56 mm, en el cual se establece que la espuma metálica de aluminio, fabricada por el método de infiltración de metal en preformas solubles con un espesor de 14 mm y la espuma metálica de aluminio Duocel con un espesor de 12 mm, no son aptas para la implementación como placas principales de protección, en la fabricación de chalecos antibalas para un fusil calibre 5,56 mm.

4.2. Recomendaciones

No se recomienda utilizar espumas metálicas de aluminio con espesores de 14 mm y 12 mm, como placas principales de protección en la fabricación de chalecos antibalas para fusiles calibre 5,56 mm.

Realizar pruebas de impacto reales y en base a las normativas expuestas en este trabajo, considerando ajustar diversos valores de espesores de espuma metálica combinados con otros materiales existentes, para estudiar las condiciones óptimas que garanticen una protección efectiva mientras se disminuye el peso.

Se recomienda mejorar el proceso de obtención de espumas metálicas, debido a que no es un proceso convencional en el Ecuador, esto permitirá controlar de mejor manera la porosidad,

tamaño de granos y por ende las propiedades mecánicas de resistencia, dureza, ductilidad y tenacidad de las espumas metálicas para futuros estudios de este potencial material.

Se recomienda llevar a cabo la fabricación de espumas metálicas de otros materiales como el acero, el cual es un material con mejores propiedades mecánicas que el aluminio, ayudando a mejorar las propiedades mecánicas de la espuma metálica.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, E. (2009). *Síntesis de espumas metálica de aluminio de celda abierta*. Escuela Politécnica Nacional.
- Ansys. (2021, April 28). *The Fundamentals of FEA Meshing for Structural Analysis*. <https://www.ansys.com/blog/fundamentals-of-fea-meshing-for-structural-analysis>
- Ansys. (2022, July 27). *What is Explicit Dynamics*. <https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics>
- Ashby, M., Evans, A., Fleck, N., Gibson, L., Hutchinson, J., & Wadley, H. (2000). *Metal Foams : A Design Guide*. 3069(FEBRUARY 2002), 264.
- ASTM. (2017). *E1251 Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry*. <https://www.astm.org/e1251-17a.html>
- ASTM. (2021). *E112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. <https://www.astm.org/e0112-13r21.html>
- ASTM. (2022). *E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. <https://www.astm.org/standards/e384>
- ASTM International. (2019). *E9 Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*. <https://www.astm.org/e0009-19.html>
- ASTM International. (2022). *C365/C365M Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*. https://www.astm.org/c0365_c0365m-22.html
- ASTM International. (2023a). *E10 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. <https://www.astm.org/e0010-23.html>
- ASTM International. (2023b). *E92 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. <https://www.astm.org/e0092-23.html>
- Calvache, G., León, C. (2016). Geometría plana, geometría del espacio, geometría analítica, trigonometría
- Carranza, J. C. (2023). *Obtención , caracterización y modelado de espumas de aluminio reforzadas , fabricadas mediante infiltración*. 177.

- Castro, I. (2012). *Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía*. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DEPARTAMENTO. CeramTec. (2024). *Ceramic materials for light-weight ceramic polymer armor systems*. <https://www.yumpu.com/en/document/read/22494183/ceramic-materials-for-light-weight-ceramic-polymer-armor-systems>
- Chricker, R., Mustacchi, S., Massarwa, E., Eliasi, R., Aboudi, J., & Haj-Ali, R. (2021). Ballistic penetration analysis of soft laminated composites using sublaminar mesoscale modeling. *Journal of Composites Science*, 5(1), 1–29. <https://doi.org/10.3390/jcs5010021>
- Diaz, R. T., Romo, M. A., Bacher, Industrial, P. B. e, & Nacional, S. de la D. (2005). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-166-SCFI-2005, SEGURIDAD AL USUARIO-CHALECOS ANTIBALAS-ESPECIFICACIONES DE SEGURIDAD Y METODOS DE PRUEBA*.
- Engarde. (2024). *COMFORT Ballistic Armor System*. <https://issuu.com/engardebv/docs/engarde-es-2020/20>
- ERG. (2024). Duocel Foam Basics | Technical Information | ERG Aerospace. <https://Ergaerospace.Com/>. <https://ergaerospace.com/duocel-foam-technical-information/>
- Fayed, A. I. H., Abo El Amam, Y. A., & Elgohary, D. H. (2023). Enhancing the performance of Cordura and ballistic nylon using polyurethane treatment for outer shell of bulletproof vest. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 35(4), 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.001>
- Franco, R., & Herrear, M. (2003). Estudio de las propiedades mecánicas de espumas metálicas de celda cerrada. In *Bibliogeo.Ing.Ucv.Ve*. http://bibliogeo.ing.ucv.ve/DB/bfiegucv/EDOCs/SRed/2012/10/T041500005176-0-TEG_ANAYA_RAQUEL_2004-000.pdf
- Gago, I., del Río, M., Carretero, J., Ibarra, I., León, G., & Miguel, B. (2017). Nanocomposites basados en el grafeno para chalecos antibalas: límite balístico y propiedades en tensión e impacto. *V Congreso Nacional de I+D En Defensa y Seguridad, November*.
- Gilson, L., Imad, A., Rabet, L., & Coghe, F. (2020). On analysis of deformation and damage mechanisms of DYNEEMA composite under ballistic impact. *Composite Structures*, 253(March), 112791. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112791>
- Gutiérrez, J. A., & Oñoro, J. (2008). Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. *Revista de Metalurgia (Madrid)*, 44(5), 457–476. <https://doi.org/10.3989/REVMETALM.0751>
- International Organization for Standardization. (2019). *ISO 6892-1:2019 - Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature*.

<https://www.iso.org/standard/78322.html>

- Johnston, G. P., & Nelson, T. B. (2010). *THE WORLD ' S ASSAULT RIFLES*. Ironside International Publishers, Inc.
- Morales-Martín, D., & Rodríguez Simón, L. R. (2022). La retícula de Kevlar® 49 como sistema de refuerzo en el tratamiento de rasgados en la conservación curativa de pintura sobre lienzo. *Ge-Conservacion*, 22(1), 47–57. <https://doi.org/10.37558/gec.v22i1.1056>
- Parveez, B., Jamal, N. A., Anuar, H., Ahmad, Y., Aabid, A., & Baig, M. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review. *Materials*, 15(15), 5302. <https://doi.org/10.3390/ma15155302>
- Sastranegara, A., Halawa, E., & Anggraini, L. (2022). Experimental study on the performance of multi-layered bulletproof vest. *Sinergi*, 26(3), 287. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2022.3.003>
- Strek, A. (2012). Methodology for Experimental Investigations of Metal Foams and Their Mechanical Properties. *Mechanics and Control*, 31(2), 90. <https://doi.org/10.7494/mech.2012.31.2.90>
- Tatár, B., & Mészáros, L. (2023). Shape memory effect in cross-linked polyethylene matrix composites: the effect of the type of reinforcing fiber. *Polymer Bulletin*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-05003-0>

6. ANEXOS

ANEXO I Informe de resultados: Metalografías

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
	Página: Pág. 1 de 3		
	INFORME DE RESULTADOS N° 0TI0090-24		

INFORME DE RESULTADOS N° 0TI0090-24

Información General

Cliente / Empresa/ Entidad:	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
Persona de contacto:	Ing. Edisson Calderón		
Teléfono: 0987508667	E-mail:	edisson.calderon@epn.edu.ec	
Muestras suministradas por: Josué Checa	Fecha de recepción de muestra:	25-01-2023	
Fecha de emisión de Informe: 22-01-2024	Fecha/ plan y método de muestreo:	N/A	
Fecha de inicio de ensayo: 25-01-2024	Fecha de fin de ensayo:	19-01-2024	

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, unas probetas de aluminio, para realizar ensayos en base a los Memorandos Nro. EPN-DMT-2023-1567-M y EPN-DMT-2024-0022-M.

2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Probetas de aluminio

3. DETALLE DE ENSAYOS REALIZADOS:

Se realizó ensayos de impacto de acuerdo con la solicitud del cliente y los resultados fueron emitidos al cliente y de micro dureza.

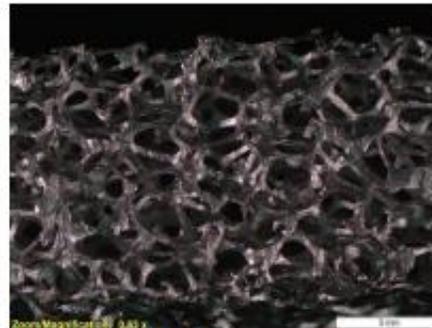
4. MACROGRAFÍAS OBTENIDAS

La preparación de las probetas para el ensayo lo realizó el cliente, las macrografías realizadas son en el sentido especificado por el cliente, a continuación, se presenta las fotografías más representativas del ensayo:

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
	Página: Pág. 2 de 3		
	INFORME DE RESULTADOS N° 0T10090-24		



Elemento aumento de 6,3X



Esponja aumento de 6,3X

5. RESULTADO METALGRÁFICO

La preparación de las probetas para el ensayo metalográfico se realiza en base a la norma ASTM E3-11, las metalografías realizadas son en el sentido especificado por el cliente, a continuación, se presenta las fotografías más representativas del ensayo:

24-002



Aumento 100x Sin ataque químico



Aumento 100x Con ataque químico

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
Página: Pág. 3 de 3			
INFORME DE RESULTADOS		RT-LMDF-0701	
Nº 0TI0090-24			



Aumento 500x Con ataque químico

DECLARATORIA:

- Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
- Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.
- Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.

Atentamente:

Informe

Elaborado por:

Aprobado por:



PATRICIA MARIANA
PROAÑO SANCHEZ

Ing. Patricia Proaño
Responsable Técnico del Laboratorio de
Metalografía, Desgaste y Falla.



VERÓNICA VENERICA
SOTOMAYOR ORELLANA

Ing. Verónica Sotomayor
Coordinadora del Laboratorio de
Metalografía, Desgaste y Falla.

ANEXO II Informe de resultados: Análisis de Densidad



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



INFORME DE RESULTADOS No. II-2024-003

Orden de trabajo: DT-OTI0094-2024

Quito, 30 de enero de 2024

DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE

Solicitado por: Ing. Willan Monar, M. Sc.
Empresa / Institución: EPN-DMT
Teléfono: 2976-300 ext. 3013
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253
E-Mail: william.monar@epn.edu.ec

Identificación de la(s) muestra(s) (cliente):

- Espuma de aluminio

Descripción de la(s) muestra(s):

Espuma de aluminio.

LABORATORIO

Fecha de ingreso al Laboratorio: 2024/01/30.

Identificación de la(s) muestra(s) (código LANUM):

- 24-94-01 para espuma de aluminio

Fecha en que se realizaron los ensayos: 2024/01/30.

Área del laboratorio donde se realizó el ensayo: Área de análisis y síntesis.

Condiciones ambientales: Ensayos de densidad basados en la norma ASTM D792-13 se realizaron con el medio líquido a 23,0 °C.

EQUIPOS UTILIZADOS

- Balanza analítica marca Shimadzu, modelo AUX 220 con una apreciación de 0,0001 g. Utilizada para medir la masa de las muestras utilizadas el ensayo de densidad basados en la norma ASTM D792-13.

MÉTODO EMPLEADO

Ensayo de densidad basado en la norma ASTM D792-13:

Medio líquido para inmersión: Agua desionizada

Condiciones de la muestra: Masa: 1 a 50 g.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Volumen: mayor o igual a 1 cm³.
Espesor: mayor o igual a 1 mm/g.
Temperatura del medio líquido: 23,0 °C +/- 0,1%.

Para el cálculo de la gravedad específica y densidad se utilizan las siguientes expresiones:

$$\text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} = W_a / W_a - W_l \quad (1)$$

$$D^{23^{\circ}\text{C}} = \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} \times D \text{ líquido} \quad (2)$$

Donde:

sp gr 23/23°C: Gravedad específica de la muestra.

W_a: Masa de la muestra medida en aire, (g).

W_l: Masa de la muestra medida en el medio líquido, (g).

D 23°C: Densidad de la muestra, (g/cm³).

D líquido: Densidad del medio líquido a 23 °C, Agua: 0,99762 g/cm³.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la muestra analizada.

W_a: 4,5556 g

W_l: 2,7463 g

$$\begin{aligned} \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} &= W_a / W_a - W_l \\ \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} &= 4,5556 / (4,5556 - 2,7463) \\ \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} &= 2,5179 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D^{23^{\circ}\text{C}} &= \text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} \times D \text{ líquido} \\ D^{23^{\circ}\text{C}} &= 2,5179 \times 0,99762 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$D^{23^{\circ}\text{C}} = 2,51189 \text{ g/cm}^3$$

"El cliente puede hacer uso académico de los resultados presentados en este informe".

NOTA: ESTOS RESULTADOS ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE A LA(S) MUESTRA(S) SOMETIDA(S) A ENSAYO

NOTA DE DESCARGO DE RESPONSABILIDAD: En caso de que las muestras entregadas no cumplieran con las especificaciones solicitadas por el LANUM (dimensiones, cantidad de muestra), y a pesar de eso el cliente diera su consentimiento para la realización de análisis, el LANUM no se responsabiliza si los resultados son afectados debido a estas desviaciones (no cumplimiento de especificaciones)



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mena Caamaño

RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Realizado por:

Karina Lagos

Analista Técnico

Revisado y aprobado por:

Orlando Campaña

Responsable Técnico(s)

Autorizado por:

Paulina Romero Ph.D.

Coordinadora del LANUM

ANEXO III Informe de resultados: Espectrografía por Chispa



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE MATERIALES LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Willan Monar Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 03 de enero del 2024

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en una probeta.

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional tres probetas sueltas.

Se solicita realizar el ensayo con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación	Fotografía
Muestras de material metálico	M1	
	M2	

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. **Limpieza Superficial:** Según la norma ASTM E1251 – 17a Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry

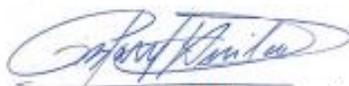
3.2. **Método:** Al 100 Base

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones en la muestra promediando su valor.

Elemento	M1		
	Medias [%]	Desviación Estándar [%]	Intervalo de confianza (95%)
Silicio [Si]	0,417	0,1650	0,417 ± 0,1867
Hierro [Fe]	0,267	0,0560	0,267 ± 0,0634
Cobre [Cu]	0,010	0,0011	0,010 ± 0,0012
Manganeso [Mn]	0,035	0,0049	0,035 ± 0,0055
Magnesio [Mg]	0,052	0,0120	0,052 ± 0,0136
Cromo [Cr]	0,044	0,0250	0,044 ± 0,0283
Niquel [Ni]	0,073	0,0110	0,073 ± 0,0124
Zinc [Zn]	0,062	0,0230	0,062 ± 0,0260
Titanio [Ti]	0,027	0,0000	0,027 ± 0,0000
Plomo [Pb]	0,143	0,0240	0,143 ± 0,0272
Estaño [Sn]	0,113	0,0210	0,113 ± 0,0238
Vanadio [V]	0,020	0,0021	0,020 ± 0,0024
Estroncio [Sr]	0,031	0,0035	0,031 ± 0,0040
Circonio [Zr]	0,024	0,0042	0,024 ± 0,0048
Cobalto [Co]	0,069	0,0120	0,069 ± 0,0136
Boro [B]	0,046	0,0280	0,046 ± 0,0317
Bismuto [Bi]	0,082	0,0190	0,082 ± 0,0215
Calcio [Ca]	0,037	0,0160	0,037 ± 0,0181
Litio [Li]	0,469	0,0680	0,469 ± 0,0769
Aluminio [Al]	97,98	0,4950	97,98 ± 0,5601
Total	100,00		

Elemento	M2		
	Medias [%]	Desviación Estándar [%]	Intervalo de confianza (95%)
Silicio [Si]	3,677	0,1110	3,677 ± 0,1256
Hierro [Fe]	0,330	0,0200	0,330 ± 0,0226
Cobre [Cu]	3,597	0,0012	3,597 ± 0,0014
Manganeso [Mn]	0,121	0,1420	0,121 ± 0,1607
Magnesio [Mg]	1,539	0,0123	1,539 ± 0,0139
Cromo [Cr]	0,065	0,0210	0,065 ± 0,0238
Niquel [Ni]	0,087	0,1110	0,087 ± 0,1256
Zinc [Zn]	0,395	0,0240	0,395 ± 0,0272
Titanio [Ti]	0,029	0,0140	0,029 ± 0,0158
Plomo [Pb]	0,179	0,0600	0,179 ± 0,0679
Estaño [Sn]	0,163	0,0010	0,163 ± 0,0011
Vanadio [V]	0,078	0,0110	0,078 ± 0,0124
Estroncio [Sr]	0,026	0,2070	0,026 ± 0,2342
Zirconio [Zr]	0,025	0,0110	0,025 ± 0,0124
Cobalto [Co]	0,064	0,1040	0,064 ± 0,1177
Calcio [Ca]	0,045	0,0010	0,045 ± 0,0011
Aluminio [Al]	89,58	1,0220	89,58 ± 1,1565
Total	100,00		



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor Msc.

Jefe del Laboratorio de Fundición



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 03.01.2024 08:04:57

Method: Al100

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	0,417	0,267	0,010	0,035	0,052
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,044	0,073	0,062	0,027	0,143
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Cd [%]
∅	0,113	0,020	0,031	0,024	<0,0050
	Co [%]	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Ca [%]
∅	0,069	0,046	0,0043	0,082	0,037
	Li [%]	Al [%]			
∅	0,469	97,98			

Bruker Analysis Report



Sample: M2

Analysis Time: 03.01.2024 08:32:31

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	3,677	0,330	3,597	0,121	1,539
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,065	0,087	0,395	0,029	0,179
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	0,163	0,078	0,026	0,025	0,064
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,045	89,58			

