

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESPUMAS
METÁLICAS DE CELDA CERRADA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.

Franco R. Jon,

Herrera M., Daniel A.

Para optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESPUMAS METÁLICAS DE CELDA CERRADA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Dr. D. Alberto D. Pertuz C.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.

Franco R. Jon,

Herrera M., Daniel A.

Para optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

ACTA



ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

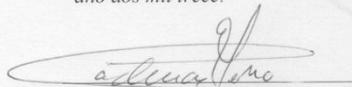
Daniel Herrera y Jon Franco

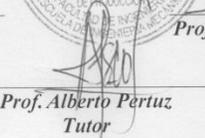
Titulado

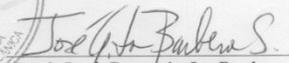
*“Estudio de las Propiedades Mecánicas de Espuma
Metálicas de Celda Cerrada”*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los veintim días del mes de junio del año dos mil trece.


Prof. Pedro Cadenas
Jurado



Prof. Alberto Pertuz
Tutor


Prof. José Gregorio La Barbera
Jurado

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A nuestros padres.

Por habernos apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que nos han permitido ser personas de bien, por los ejemplos de perseverancia y por el valor mostrado para salir adelante en todo momento, pero más que nada, por su amor.

A nuestras familias.

A nuestras tías, a nuestros abuelos, a nuestros primos y hermanos por haber estado pendiente de nosotros y brindarnos todo su apoyo incondicionalmente.

A nuestro Tutor.

Prof. Alberto Pertúz, quien dejó de ser tan solo nuestro tutor y se convirtió en un amigo; por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de este trabajo especial de grado.

Al Prof. Didier Bermúdez.

Quien nos ofreció su ayuda en la parte del análisis estadístico cordialmente.

A nuestros amigos.

Quienes nos apoyaron en nuestra formación profesional, y que hasta ahora seguimos siendo amigos.

**Franco R. Jon,
Herrera M., Daniel A.**

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESPUMAS
METÁLICAS DE CELDA CERRADA**

Tutor Académico: Prof. Dr. D. Alberto D. Pertuz C.

**Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Mecánica. Año
2013, n° pág. (134).**

Palabras clave: Compresión, Deformación, Esfuerzo, Espuma, Propiedades.

Resumen. El estudio de las espumas metálicas es un tema de creciente importancia, no sólo por las ventajas que presentan estos materiales para una amplia gama de aplicaciones en la ingeniería, sino además por la variabilidad que suelen exhibir sus propiedades mecánicas y por lo compleja e imprecisa que puede llegar a ser su caracterización. Este trabajo especial de grado presenta el estudio y análisis del comportamiento mecánico a compresión de una espuma de aluminio, de celda cerrada. Como parte de este estudio, se han llevado a cabo ensayos cuasiestáticos de compresión uniaxial que han permitido la obtención de curvas Esfuerzo-Deformación nominal, y además, la estimación de un comportamiento real del material, el cual cuenta con un blindaje y análisis estadístico de los datos experimentales. A través de la curva Esfuerzo-Deformación real, se estimaron las propiedades mecánicas claves de la espuma y se observó el daño estructural que sufre este material durante la deformación. Finalmente, se realizó una comparación entre la curva nominal obtenida y las bibliográficamente registradas, con el fin de establecer la influencia que tiene la densidad relativa en el comportamiento de este material.

ÍNDICE GENERAL

ACTA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
MOTIVACIÓN	3
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.2. ANTECEDENTES.....	7
1.3. OBJETIVO.....	10
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	10
1.4. ALCANCES.....	11
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	12
2.1. SÓLIDOS CELULARES Y ESPUMAS METÁLICAS.....	13
2.1.1. SÓLIDOS CELULARES	13
2.1.2. Estructura.....	14
2.1.3. Propiedades.....	15
2.2. ESPUMAS METÁLICAS	16
2.2.1. Estructura.....	17
2.2.2. Fabricación	18
2.2.3. Aplicaciones	22
2.2.4. Propiedades Mecánicas	29
2.2.5. Comportamiento a compresión de las espumas metálicas	39
2.2.5.1. Influencia de la Estructura	39
2.2.5.2 Influencia de la Densidad	40

2.2.6. Absorción de energía de las espumas metálicas	42
2.2.6.1. Capacidad de Absorción de Energía	43
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPUMAS METÁLICAS A COMPRESIÓN	44
2.3.1. Preparación superficial y Tamaño de probetas.....	45
2.3.2. Máquina de Ensayo de Universal	47
2.3.3. Recuperación elástica	48
2.3.4. Teorema de Arquímedes.....	49
2.3.5. Análisis estadístico	49
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	51
3.1. Compra del material	52
3.2. Estimación de densidad relativa.....	53
3.3. Fabricación de probetas.....	54
3.4. Ensayo cuasiestático uniaxial a compresión	54
3.5. Recopilación de datos	56
3.6. Elaboración de las curvas Esfuerzo-Deformación	57
3.6.1. Esfuerzo-Deformación nominal	57
3.6.2. Esfuerzo-Deformación real	57
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
4.1. Dimensionamiento de las probetas.....	60
4.2. Ensayo a compresión cuasiestático uniaxial	61
4.3. Análisis Estadístico	62
4.4. Curvas Esfuerzo-Deformación corregidas	66
4.5. Obtención de propiedades	69
4.5.1. Módulo de Young.....	69
4.5.2. Resistencia a la fluencia	71
4.5.3. Resistencia a compresión	72
4.5.4. Deformación de compactación	73
4.6. Análisis del daño estructural	74
4.7. Análisis de la influencia de la variación de la densidad de la espuma metálica ..	77

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
5.1. CONCLUSIONES	81
5.2. RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA.....	84
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	87
ANEXO 1	88
ANEXO 2.....	96
ANEXO 3.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Muestra de forma esquemática la diferencia entre un sólido celular y un material poroso.....	13
Figura 2.2. Comparación entre un sólido celular y un material poroso.....	13
Figura 2.3. Sólidos celulares tridimensionales.....	15
Figura 2.4. Propiedades de los sólidos celulares comparadas con las de otros materiales ingenieriles.....	16
Figura 2.5. Micrografías de espumas de aluminio de celda abierta y cerrada.....	18
Figura 2.6. Esquema del método de espumado de líquidos por inyección de gas...	19
Figura 2.7. Comparación entre una espuma metálica formada por inyección de gas y un vaso de cerveza con espuma.....	19
Figura 2.8. Esquema del método de espumado de líquidos con agentes soplantes...	20
Figura 2.9. Comparación entre un trozo de pan y una espuma de zinc producida mediante espumado de líquidos con agentes soplantes.....	20
Figura 2.10. Espuma metálica obtenida mediante Gasar.....	21
Figura 2.11. Esquema de la técnica de espumado de compactados de polvo.....	22
Figura 2.12. Usos de espumas metálicas en vehículos.....	23
Figura 2.13. Prototipo de soportes de motor BMW con núcleo de espuma metálica.....	23
Figura 2.14. Amortiguador de energía de impacto fabricado con espuma metálica para infraestructura de tranvía SIEMENS COMBINO.....	24
Figura 2.15. Panel sándwich de espuma metálica con curvatura.....	26
Figura 2.16. Bomba de calor con espuma metálica.....	27
Figura 2.17. Filtros elaborados con espuma metálica.....	27
Figura 2.18. Tanque para almacenamiento de nitrógeno líquido cubiertos con espuma metálica.....	28

Figura 2.19. Blindaje híbrido con espuma metálica (aluminum foam) para vehículo militar.....	29
Figura 2.20. Curva tensión-deformación a compresión típica de una espuma metálica.....	33
Figura 2.21. Curvas Esfuerzo-Deformación nominal a compresión cuasiestática de varias espumas metálicas comerciales.....	33
Figura 2.22. Curva Esfuerzo-Deformación de espumas metálicas Cymat de diferentes densidades.....	34
Figura 2.23. Módulo de Young contra densidad de espumas metálicas comerciales.....	35
Figura 2.24. Representación de la resistencia a la fluencia en una curva Esfuerzo-Deformación.....	36
Figura 2.25. Resistencia a compresión contra densidad de espumas metálicas comerciales.....	37
Figura 2.26. Curva Eficiencia a deformación-Deformación nominal de una espuma del tipo alpora 10%.....	38
Figura 2.27. Módulo de Young relativo en función de la densidad relativa, estimado mediante las expresiones propuestas por (Gibson y Ashby ,1999) y obtenido experimentalmente para diferentes espumas metálicas (Gibson, 2000).....	42
Figura 2.28. Estimación de energía absorbida por unidad de volumen, W , y eficiencia, η , de una espuma metálica a partir de su curva tensión-deformación a compresión.....	44
Figura 2.29. Efecto del tamaño relativo de probeta (L/d) sobre el módulo de Young de un par de espumas metálicas comerciales.....	46
Figura 2.30. Efecto del tamaño relativo de probeta (L/d) sobre la meseta de tensión (σ_{pl}) de un par de espumas metálicas comerciales.....	47
Figura 2.31. Máquina de ensayo universal LOSENHAUSEN.....	47
Figura 2.32. Ejemplo del principio de Arquímedes.....	49
Figura 3.1. Espuma de aluminio Cymat de celda pequeña.....	53
Figura 3.2. Probeta prismática de espuma de aluminio, tipo Cymat.....	54
Figura 3.3. Posición de las probetas entre los cabezales de la máquina.....	55

Figura 4.1. Curva Esfuerzo-Deformación real cuasiestática sometida a compresión y a descargas a distintos niveles de deformación.....	62
Figura 4.2. Histograma de los valores V_i (1er. Punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación).....	64
Figura 4.3. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del primer punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación.....	65
Figura 4.4. Curvas Esfuerzo-Deformación. Espuma de Aluminio Cymat $d=2\text{mm}$, $\rho^*/\rho_s = 0,203$	66
Figura 4.5. Tramo elástico de la curva Esfuerzo-Deformación Real estimada.....	70
Figura 4.6. Descarga al 75% de la resistencia a la compresión y ecuación de la recta de descarga.....	71
Figura 4.7. Representación ampliada de la resistencia a la fluencia en la curva Esfuerzo-Deformación Real estimada.....	72
Figura 4.8. Representación ampliada de la resistencia a la compresión en la curva Esfuerzo-Deformación Real estimada.....	73
Figura 4.9. Curva Eficiencia-Deformación Real.....	74
Figura 4.10. Probeta sin ensayar tipo Cymat, flotando en el líquido.....	75
Figura 4.11. Probeta ensayada tipo Cymat, sumergida en el líquido.....	75
Figura 4.12. Representación gráfica de la regresión lineal.....	76
Figura 4.13. Comparación entre dos probetas prismáticas de Cymat: una sin ensayar (der) y la otra después de haber sido ensayada (izq).....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Intervalo de propiedades mecánicas de espumas metálicas comerciales.....	30
Tabla 2.2. Relaciones para estimar propiedades mecánicas de espumas metálicas..	30
Tabla 4.1. Mediciones de masa del panel de espuma metálica.....	60
Tabla 4.2. Propiedades y dimensiones de la probeta en estudio.....	61
Tabla 4.3. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del primer punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación.....	63
Tabla 4.4. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.....	64
Tabla 4.5. Valores de V_i y l_i corregidos para el primer punto de la gráfica Esfuerzo - Deformación.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

- * Superíndice que indica una propiedad de la espuma metálica o sólido celular.
- ρ Densidad de material.
- N Subíndice que indica una propiedad nominal o ingenieril de la espuma metálica.
- R Subíndice que indica una propiedad real de la espuma metálica.
- S Subíndice que indica una propiedad del sólido a partir del cual se ha obtenido la espuma metálica o sólido celular.
- ρ^*/ρ_s Densidad relativa de espuma metálica o material celular.
- ε_{max} Deformación máxima.
- σ Esfuerzo.
- P Carga aplicada sobre la probeta.
- A_0 Área de sección transversal inicial de la probeta.
- ε Deformación.
- ΔL Diferencial de longitud.
- l_0 Longitud inicial de la probeta.
- l_i Longitud en cada instante de aplicación de carga.
- P_i Carga aplicada en cada instante.
- A_i Área transversal en cada instante del espécimen.
- E Módulo de Young.
- σ_Y Resistencia a la fluencia.
- σ_c Resistencia a la compresión.
- ε_D Deformación de compactación.
- σ_{pl} Meseta de tensión.
- λ_T Conductividad térmica.
- R Resistividad.

η	Eficiencia a deformación.
W	Energía absorbida por unidad de volumen.
L	Tamaño de la probeta.
d	Tamaño de celda.
V_d	Volumen desplazado por el elemento metálico y la espuma.
V_e	Volumen del elemento metálico.
V_i	Volumen de la probeta en un instante determinado.
σ_{desv}	Desviación estándar.
μ	Media o valor promedio de la población.
σ^2	Varianza de la población.
ε_T	Deformación total.
ε_e	Deformación elástica.
ε_p	Deformación plástica.
σ_0	Coefficiente de resistencia.
m	Exponente de endurecimiento por deformación.

INTRODUCCIÓN

Las espumas metálicas son un caso particular de los materiales porosos o materiales celulares: cuerpos sólidos con gases dispersos en su interior. El término espuma está generalmente, referido a la dispersión de burbujas de gas en un líquido. Si la morfología de una espuma puede mantenerse después de la solidificación del líquido obtenemos una espuma sólida. Existen diferentes espumas de diferentes materiales, aunque las de aluminio son las más comunes, también se encuentran disponibles aquellas que son de níquel, cobre, zinc y acero.

Los métodos para producir espumas se pueden dividir en tres grupos principales:

1. Método de espumado de líquidos por inyección de gas.
2. Método de espumado de líquidos con agentes soplantes.
3. Método de espumado por compactación de polvos.

En cada uno de estos métodos puede haber variación en el tamaño de celda y de la morfología de celda (abierta o cerrada). Cuando el material se encuentra contenido únicamente en los bordes de las celdas, el sólido entonces consiste en una red de pequeñas barras similares a vigas formando una celosía, estas corresponden a un sólido de celda abierta. La estructura será de celda cerrada cuando el material esta contenido tanto en los bordes como en las caras laterales de las celdas, aislando cada una de estas de las demás adyacentes.

Las espumas de aluminio son un nuevo tipo de material que, debido a sus características únicas, han suscitado un gran interés en varios campos tecnológicos. Estas, combinan algunas virtudes de los metales, con las ventajas estructurales de las espumas. Su particular estructura ligera y sus buenas propiedades físicas, química y mecánicas las hacen aptas para una amplia gama de aplicaciones en la industria automotriz, aeroespacial y naval. También son utilizables en carpintería metálica y

construcciones civiles en general, ya que estos materiales poseen buena capacidad para absorber ruidos, alta rigidez específica y muy buena estabilidad térmica, sumadas a la baja densidad. Por otra parte, sus propiedades de transferencia de calor permiten que sean empleados para enfriar equipos electrónicos y actuar como intercambiadores de calor en motores.

Partiendo de que, este material es novedoso, se llevaran a cabo ensayos de compresión con una máquina de ensayo universal a la espuma de aluminio para conocer su comportamiento mecánico, ya que las propiedades no han sido bien interpretadas, esto a causa de su estructura poco uniforme que impide una fabricación homogénea de la misma. Se realizará también, una metodología que permita la estimación de la curva real que caracteriza a las espumas de aluminio, dicha caracterización permitirá un avance respecto a la disminución de los errores de la curva que se obtienen con la modulación computacional.

MOTIVACIÓN

Los materiales metálicos porosos han experimentado un desarrollo lento, y no ha sido, sino hasta hace pocos años, en que el desarrollo de nuevos procesos de fabricación y la obtención de productos de propiedades relativamente homogéneas y coste razonable ha permitido disponer industrialmente de estos nuevos materiales.

Las espumas metálicas son sólidos celulares que ofrecen importantes beneficios para una amplia gama de aplicaciones estructurales y funcionales. Su baja densidad y la combinación de adecuadas propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y acústicas, han hecho que adquieran especial interés para la investigación científica.

Las espumas metálicas debido a su multifuncionalidad y aporte científico se han convertido en un atractivo campo de investigación de nuevos materiales, creando nuevas perspectivas en las aplicaciones industriales. Dichos materiales tienen muchas combinaciones interesantes de propiedades físicas y mecánicas (elevada rigidez junto con un bajo peso específico o gran permeabilidad a los gases combinada con elevada resistencia mecánica), que pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones estructurales con un abanico de propiedades que en la actualidad no están cubiertas por otros materiales. Por esta razón, en los últimos quince años, la investigación sobre estos materiales se ha extendido a todos los niveles. Sin embargo, las propiedades mecánicas de las espumas metálicas no están bien interpretadas (debido a diferencia existente entre la curva real y nominal en la región plástica) y algunos de los procesos empleados en su elaboración no se han podido controlar de forma precisa, lo que ha generado dispersión en sus propiedades y, por ende, ha dificultado su aplicación más allá de los nichos del mercado.

Actualmente, gran parte de la investigación de espumas se centra en las espumas de aluminio ya que aúnan baja densidad, resistencia a la corrosión y un punto de la fusión relativamente bajo, que las hacen fáciles de manipular. La producción de espumas de níquel, hierro y plomo (los dos últimos, de calidad dudosa)

están, de momento, en la fase de investigación. La aplicación exitosa no depende, únicamente, de sus propiedades termomecánicas sino, en gran medida, de atributos adicionales: costos bajos de fabricación, durabilidad medioambiental y resistencia al fuego. Debido a la diversidad de requerimientos, la disponibilidad y análisis multifuncional es el elemento esencial en la estrategia de su desarrollo tecnológico. Las espumas a base de aluminio, por otra parte, compiten con los materiales compuestos aportando ventajas de alta rigidez a menor coste. Sin embargo, el mercado de las espumas metálicas todavía está limitado, debido al costo relativamente alto de producción de espumas de buena calidad. Ha habido buen progreso hasta ahora, aunque la verdadera prueba de las espumas de aluminio es saber si pueden ocupar el mercado actual de los materiales convencionales y en qué medida.

En este contexto, surge la necesidad de estudiar el comportamiento mecánico de las espumas metálicas, debido a que este material no posee referencias bibliográficas y experimentales respecto a la forma de la curva de Esfuerzo-Deformación real. Algunos investigadores, han intentado estimar dicha curva mediante simulaciones y modelos computacionales, encontrándose en el camino con divergencias de los valores que, relativamente debieran obtenerse. Dichas divergencias son atribuidas por parte de los autores a la morfología estructural de las espumas metálicas; ya que no cumplen con la ley de conservación del volumen cuando son deformadas.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se establece el planteamiento del problema, el cual ha originado una serie de objetivos con los que se busca resolver las interrogantes.

CAPÍTULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La combinación de propiedades en las espumas de aluminio abre una variedad de aplicaciones industriales potenciales: estructuras de paneles rígidos y ligeros para edificios y transporte, aislamiento térmico en estructuras y maquinaria, estructuras flotantes para elevada temperatura y presión, aislamiento de dispositivos electrónicos proporcionando protección electromagnética y térmica, absorbedores de sonido para condiciones difíciles (alta temperatura, humedad, polvo, flujo de gas, vibraciones, ambiente estéril), absorbedores de vibración, tanto para maquinaria como en estructuras.

El desarrollo de la Ciencia y Tecnología actuales implican la generación y aplicación del conocimiento en muchas áreas; por tanto, con la creación de un nuevo material partiendo de uno ya existente como es el aluminio y considerando que es un material con un desarrollo relativamente lento, se deben conocer las nuevas propiedades del mismo (espuma de aluminio).

Debido a que la espuma de aluminio es un material poroso, esta tiene cavidades o pequeños compartimientos; dichos vacíos influyen considerablemente en el comportamiento mecánico, ya que durante la compresión del material existe una variación entre el volumen inicial y el volumen instantáneo.

$$A_o \cdot l_o \neq A_i \cdot l_i \quad (1.1)$$

La espuma de aluminio se conoce como un material poco homogéneo, por tanto, se estudiará la curva de Esfuerzo-Deformación nominal de una espuma metálica de aluminio de celda cerrada, para llevar a cabo este estudio se realizarán ensayos cuasiestáticos a compresión, mediante una máquina de ensayo universal. Dicho ensayo pretende recoger datos para obtener propiedades tales como, módulo de Young, resistencia a la fluencia, resistencia a la compresión, deformación de compactación.

Por otra parte se establecerá una metodología para estimar la curva Esfuerzo-Deformación real, y así lograr un avance en lo que respecta a la minimización de los errores que se pueden producir mediante un modelo computacional de la curva ingenieril de la espuma metálica de aluminio.

1.2. ANTECEDENTES

Se tiene conocimiento que el primer registro de espumas metálicas data de 1948, con la patente de Benjamín Sosnick: “Proceso para hacer espuma con masa de metal”. Su método aprovechó el disponer de fases intermedias con diferentes puntos de fusión y de ebullición para formar un sólido lleno de poros cerrados. Los usos sugeridos para este nuevo producto aprovechaban las mejoras de la resistencia al impacto de la espuma, así como las propiedades de absorción de calor y sonido. El proceso era bastante costoso y sólo produjo cantidades pequeñas de una espuma bastante irregular; quizás, por eso, no tuvo un desarrollo posterior. En 1958 se obtuvieron las primeras espumas metálicas con poro abierto. Estas espumas se obtuvieron vertiendo sobre aluminio fundido partículas de sal, que una vez disueltas, daban lugar a una estructura de espuma con poros abiertos más fiable que el método de Sosnick, pero se apreció más como curiosidad científica que como material tecnológico. En 1959, United Aircraft Corporation desarrollo la patente de un método para hacer espumas, en el cual polvo metálico era mezclado con un producto formador de gas por descomposición a alta temperatura. Esta mezcla de polvos era compactada, extruida y enfriada, para obtener un metal sólido que contenía un agente en polvo espumante. Cuando este sólido se calentaba a la temperatura de fusión del metal, el agente espumante se descomponía para soltar gas en el metal fundido, creando una espuma metálica. No obstante, enfriar la espuma era un problema, utilizándose agua fría o caliente, volviéndose un desafío la producción de espumas fiables. En 1963 Hardy y Peisker, patentaron un método en el cual agregaban los agentes espumantes directamente al metal semifundido mejorando la estructura (en el caso de aluminio fundido también agregaron silicio, para aumentar su viscosidad y

encapsular el gas). Esto llevó a un abaratamiento en los costos de producción en comparación a la compactación de polvo. Las espumas metálicas obtenidas a partir de metal fundido han centrado el principal interés comercial. Varios centros de investigación y empresas han trabajado en métodos alternativos para producir espumas y han desarrollado con éxito varios procesos basados en la infiltración, deposición, y otros sistemas, con una gama amplia de costos y calidad de espumas. En el 2000, M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson y H.N.G. Wadley publican un catálogo “Metal Foams: A Design Guide”, donde presentan las propiedades mecánicas de las espumas metálicas, incluyendo las estructuras tipo sándwich. En este trabajo se realizaron ensayos de tensión uniaxial, ensayos de fatiga y ensayos de compresión uniaxial, con el cual se logra el planteamiento de la curva de Esfuerzo-Deformación nominal. Además realizaron los ensayos para comprobar su comportamiento eléctrico, térmico, acústico, la absorción de sonido; también se estimaron los costos y aplicaron ciertas expresiones matemáticas para disminuir los mismos. En el 2000, Batawros A., Bart-Smith H., Evans A., publicaron un trabajo: “Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam”, en el cual realizaron ensayos de compresión cuasiestáticos donde obtuvieron mediciones de deformación superficial que indicaba la existencia de plasticidad localizada a tensiones por debajo del límite elástico de la espuma metálica, lo cual tiende a reducir la pendiente de su curva tensión-deformación, modificando su módulo de Young. En el 2001, Banhart: “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams”, realizó un importante avance en el estudio de las espumas metálicas, en sus trabajos refleja un análisis de los métodos de caracterización de espumas metálicas mediante ensayos destructivos y no destructivos, también estudió las diversas aplicaciones de este material en el sector industrial. En su investigación resaltan los ensayos destructivos de torsión, tensión y compresión uniaxial. En el 2002, Degischer H., Kriszt B., a través de su manual de metales celulares “Handbook of Cellular Metals” proponen relaciones para la estimación de propiedades mecánicas de las espumas de aluminio a partir de su densidad relativa; ya que, es la propiedad que tiene mayor influencia

sobre el comportamiento a compresión de la misma. En el 2005, Tan P., Reid S., Harrigan J., Zou Z. y Li S., “Dynamic compressive strength properties of aluminium foams” establecieron una metodología para la determinación de las propiedades mecánicas, tales como: la resistencia a la compresión, deformación de compactación; todo esto a través de expresiones matemáticas. En el 2012, Irausquin I. en su tesis doctoral presentó el estudio y análisis del comportamiento mecánico a compresión de una espuma de aluminio, de celda cerrada, a diferentes velocidades de deformación. Como parte de este estudio, se llevaron a cabo ensayos cuasiestáticos de compresión y ensayos dinámicos en un dispositivo de SHPB (Barra Hopkinson de compresión que inglés significa: Split Hopkinson Pressure Bar), con barras viscoelásticas de baja impedancia. Este dispositivo fue diseñado y preparado para el ensayo de la espuma metálica y, como parte del análisis de los resultados que ha permitido obtener, se desarrolló un algoritmo para la corrección analítica de la dispersión y atenuación causadas por las propiedades viscoelásticas de las barras. También se trazaron las curvas Esfuerzo-Deformación nominal ($\sigma_N-\epsilon_N$) de la espuma metálica para diferentes velocidades de deformación en el intervalo de 10^{-3} a 900 s^{-1} . A través de estas curvas se estimaron las propiedades mecánicas clave de la espuma y se evaluó su capacidad de absorción de energía por deformación. Para complementar este análisis se realizó la modelización de los ensayos de compresión cuasiestática y dinámica de la espuma, mediante un código computacional de elementos finitos. La modelización se llevó a cabo implementando un modelo constitutivo con endurecimiento isotrópico incluido en el código e implementando un modelo de celda unitaria, desarrollado a partir de las características estructurales de la espuma. Finalmente, se estudió, mediante ensayos en torre de caída de peso, el comportamiento frente a impacto de baja velocidad de estructuras sándwich con pieles de aleación de aluminio y núcleo de la espuma metálica y se ha realizado una estimación de la contribución de la espuma durante el proceso de absorción de energía de este tipo de estructuras.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Estudiar el comportamiento mecánico a compresión de una espuma metálica de aluminio.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudio del arte de las espumas metálicas de aluminio.
- Analizar estadísticamente los datos obtenidos de las mediciones.
- Obtención experimental de las propiedades mecánicas de las espumas metálicas cuando son sometidas a compresión uniaxial cuasiestáticos.
- Analizar el daño estructural durante el proceso de deformación.
- Analizar la influencia de la variación de la densidad de la espuma metálica.

1.4. ALCANCES

- Recopilación del material teórico correspondiente a las espumas metálicas y estudio del mismo. Esto abarca, como ha sido desde sus inicios la evolución de este material, sus diversos tipos de fabricación, los tipos de estructuras morfológicas, aplicación en el mercado, tipos de ensayos a aplicar para el conocimiento de sus propiedades mecánicas, tipos de espumas. Para ello, se consultará información en la red (revistas, artículos, trabajos especiales, folletos, y otros bibliografías relacionadas), trabajos de investigación previos relacionados con el tema, personal profesional y docente.
- Validación estadística sobre los datos obtenidos (volumen instantáneo y longitud instantánea) usando la teoría de la distribución normal y el teorema del límite central.
- Obtención de la curva de Esfuerzo-Deformación nominal.
- Estimación de la curva de Esfuerzo-Deformación real.
- Obtención de las propiedades mecánicas tales como: módulo de Young, resistencia a la fluencia, resistencia a la compresión, deformación de compactación; a partir de la curva real.
- Se analizará el daño estructural ocasionado al comprimir el material mediante observación (fotografía).
- Comparación de curvas Esfuerzo-Deformación nominal de espumas metálicas tipo CYMAT provenientes de la literatura con la obtenida en este trabajo.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se trata el fundamento teórico de los materiales celulares y las espumas metálicas, haciendo énfasis en sus características, propiedades, aplicaciones y estudios previos sobre su caracterización mecánica.

CAPÍTULO II

2.1. SÓLIDOS CELULARES Y ESPUMAS METÁLICAS

2.1.1. SÓLIDOS CELULARES

Puede definirse a un sólido celular como aquel formado por una red de celdas poliédricas o poligonales unidas entre sí formando mallas bidimensionales o tridimensionales (Gibson y Ashby, 1999). Estos materiales son sumamente porosos, lo que se ve reflejado en la densidad relativa, definida como ρ^*/ρ_s , donde ρ^* es la densidad del material celular y ρ_s la del material que forma el sólido macizo. Los sólidos celulares pueden distinguirse de los sólidos porosos de acuerdo al siguiente criterio:

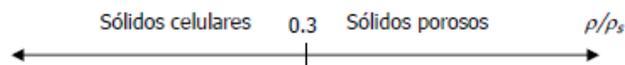


Figura 2.1. Muestra de forma esquemática la diferencia entre un sólido celular y un material poroso.

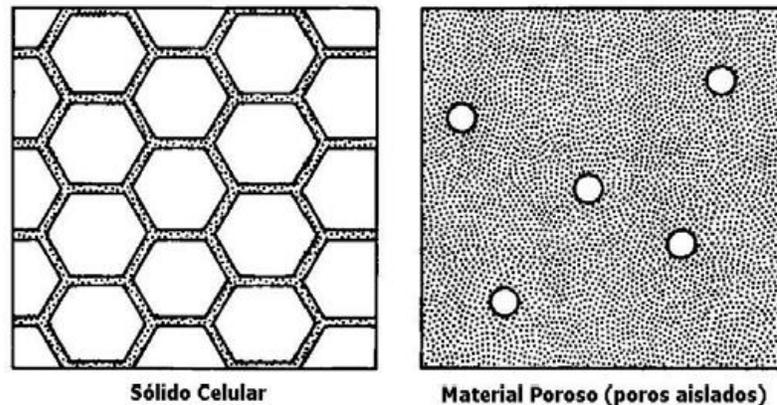


Figura 2.2. Comparación entre un sólido celular y un material poroso

(Gibson y Ashby, 1999).

Los materiales celulares pueden alcanzar densidades relativas del orden de 0,001, siendo usuales para esta propiedad física valores en el intervalo de 0.03 a 0.2.

Según su origen los sólidos celulares se pueden clasificar en:

- Naturales: madera, esponja, corcho, coral y hueso.
- Artificiales: espumas, poliuretano, polietileno, panales de abeja, pan y otros comestibles.

2.1.2. Estructura

La distribución de tamaños de celdas en algunas espumas es aleatoria. En un mismo cuerpo pueden encontrarse celdas muy pequeñas y celdas de tamaño varias veces mayor que las primeras. Esta gran dispersión no implica un material anisótropo; se genera anisotropía cuando las paredes de las celdas están orientadas según una dirección determinada. La anisotropía puede caracterizarse mediante la relación de anisotropía $R = L_1 / L_2$, donde L_1 y L_2 son los valores promedios de las dimensiones de las celdas en dos direcciones principales. En tres dimensiones se incorpora L_3 lo que permite calcular dos relaciones de anisotropía $R_{12} = L_1 / L_2$ y $R_{13} = L_1 / L_3$.

La caracterización estructural de un sólido celular está referida a los siguientes parámetros: material que constituye al sólido, densidad, tipo de celda (abierta o cerrada), conectividad de bordes, conectividad de caras, número de bordes promedio por cara, número de caras promedio por celda, forma de la celda, simetría de la estructura, espesor de los bordes, espesor de las caras, fracción de material en los bordes de las celdas, mayor dimensión principal de celda (L_1), menor dimensión principal de celda (L_2), dimensión principal de celda (L_3), fracciones de anisotropía R_{12} y R_{13} , desviación estándar del tamaño de las celdas y otras características específicas

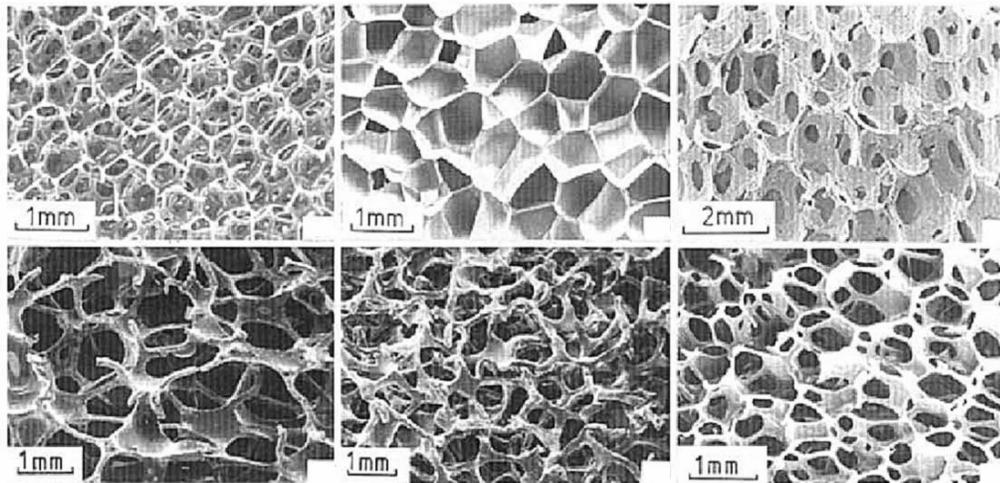


Figura 2.3. Sólidos celulares tridimensionales (Gibson y Ashby, 1999).

2.1.3. Propiedades

Las propiedades de un sólido celular dependen en gran parte de su densidad relativa (ρ^*/ρ_s). Este parámetro es de mucha utilidad ya que puede calcularse fácilmente; sin embargo, existen modelos para las propiedades de las espumas y paneles de abeja donde intervienen distintas propiedades de las paredes de celda. Tales modelos no son muy utilizados en la práctica puesto que intervienen los mencionados parámetros microscópicos que son difíciles de cuantificar. La densidad relativa, por el contrario, puede estimarse sin mayor complejidad a través de mediciones experimentales.

Los sólidos celulares poseen propiedades mecánicas que pueden medirse a través de los mismos métodos que se usan para los sólidos densos. En la figura 2.4 se indica el intervalo abarcado por algunas propiedades de diversos sólidos celulares comparadas con las de los sólidos convencionales. El intervalo de propiedades de los materiales celulares los hace aptos para cumplir funciones que los otros sólidos no pueden.

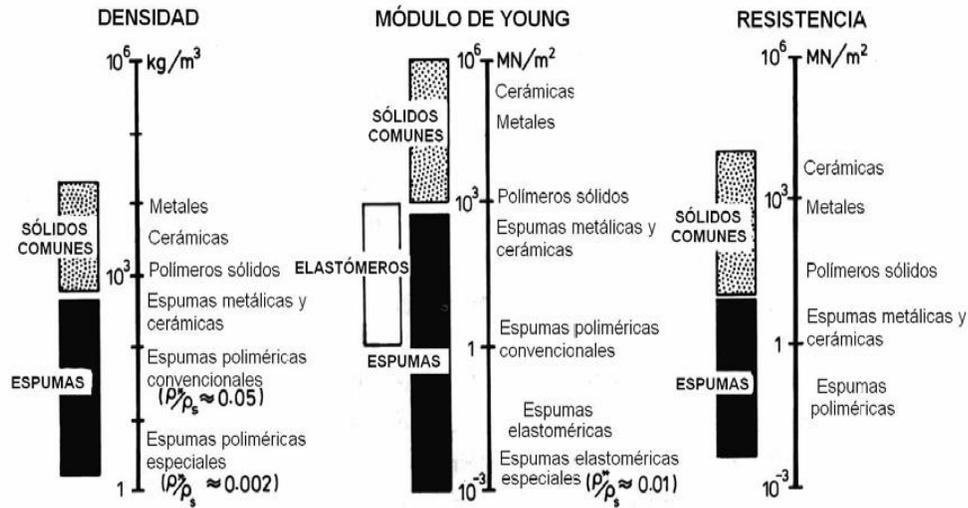


Figura 2.4. Propiedades de los sólidos celulares comparadas con las de otros materiales ingenieriles (Gibson y Ashby, 1999).

Dentro de sus propiedades mecánicas destaca la baja rigidez que tiene, lo cual los hace aptos para cumplir funciones de amortiguación. También soportan grandes deformaciones en compresión ($\epsilon_{max} \approx 0,65$), por lo que son capaces de absorber grandes cantidades de energía.

2.2. ESPUMAS METÁLICAS

Las espumas metálicas son una clase especial de materiales celulares que se originan fundamentalmente por la adición de gas a un metal o aleación metálica en estado líquido y, por ende, tienen una morfología restringida.

La espuma de aluminio es un material metálico muy poroso con una distribución aleatoria de los poros dentro de la estructura. Los poros, esencialmente esféricos y cerrados, ocupan del 50 al 90% del volumen total. Las propiedades mecánicas y físicas dependen fuertemente de la densidad, típicamente, en el rango de

0,4 a 0,8 g/cm³. Estas resultan materiales muy eficaces en la absorción de sonido, protección electromagnética, absorción de energía de impacto y vibración, no son inflamables y permanecen estables a alta temperatura, es reciclable y no contaminante, ofreciendo una combinación de propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas, características de un material homogéneo.

Las espumas se dividen en dos tipos de estructuras: de poros cerrados, que comúnmente se usa en aplicaciones estructurales, y de poros abiertos, que es utilizada por sus propiedades específicas (térmicas, superficiales, etc.). Los poros en las espumas de aluminio son, esencialmente, esféricos y parcialmente cerrados, generalmente, interconectados, aunque también puede lograrse una porosidad completamente cerrada (Gutiérrez y Oñoro, 2008). No hay ningún diámetro típico de poro, no obstante, algunas muestras pueden prepararse con tamaños de poro controlado (entre 0,5-8 mm) dependiendo de la composición de la matriz o los parámetros de espumado (temperatura y tiempo). Si cambiamos la temperatura de espumado y el tiempo, con aproximadamente la misma densidad del material, podemos obtener diferentes estructuras de poro en diferentes preparados de la misma aleación.

2.2.1. Estructura

La estructura del sólido es de celda abierta cuando el material se encuentra contenido únicamente en los bordes de las celdas. El sólido entonces consiste en una red de pequeñas barras similares a vigas formando una celosía. La estructura es de celda cerrada cuando el material está contenido en tanto en los bordes como en las caras laterales de las celdas, aislando cada una de éstas de las demás adyacentes. En las figuras 2.2 y 2.3 se observan ejemplos de sólidos celulares en dos y tres dimensiones, respectivamente. Aunque las espumas de aluminio son las más comunes, también se encuentran disponibles espumas de níquel, cobre, zinc y acero.

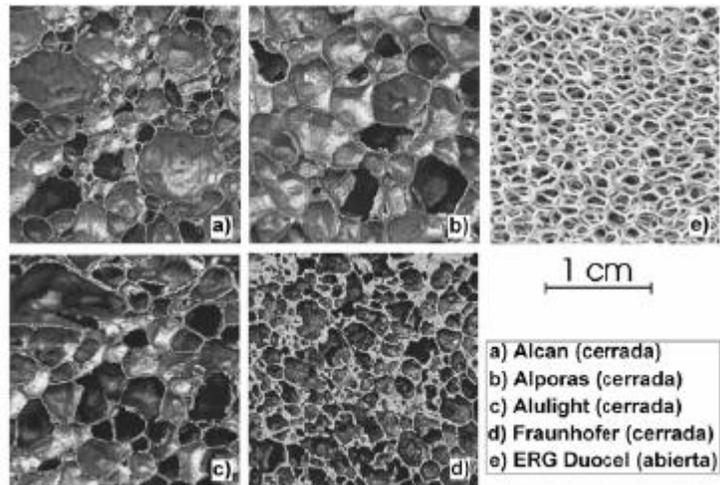


Figura 2.5. Micrografías de espumas de aluminio de celda abierta y cerrada (Andrews, Sanders y Gibson, 1999).

2.2.2. Fabricación

- Método de espumado de líquidos por inyección de gas (melt gas injection):

Este método se usa ampliamente para el aluminio y sus aleaciones, utiliza partículas de carburo de silicio, óxido de aluminio u óxido de magnesio, para aumentar la viscosidad, luego se inyecta un gas (aire, nitrógeno o argón) de modo que genere burbujas muy finas en el seno del líquido, esta mezcla flota y se torna en una espuma líquida cuando el metal líquido se drena, la cual se deja solidificar (figura 2.6). Un mecanismo similar ocurre durante la formación de espuma en las bebidas gaseosas y en la cerveza. Esto se hace evidente al apreciar en la figura 2.7 la comparación entre una espuma metálica obtenida mediante este proceso y un vaso de cerveza con espuma.

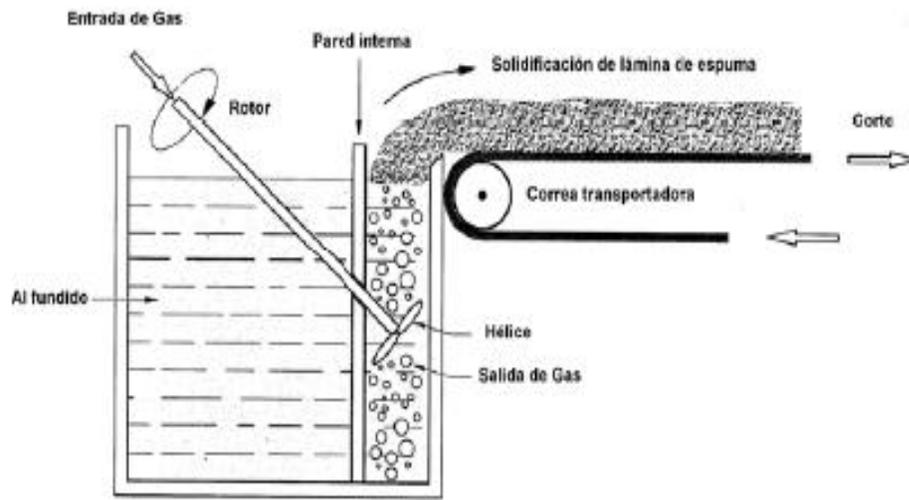


Figura 2.6. Esquema del método de espumado de líquidos por inyección de gas (Banhart, 2001).



Figura 2.7. Comparación entre una espuma metálica formada por inyección de gas y un vaso de cerveza con espuma (Babcsán Y Banhart, 2006).

- Método de espumado de líquidos con agentes soplantes (gas-releasing particle decomposition in the melt):

La segunda manera de espumar líquidos es añadiendo un agente soplante en vez de inyectar gas, que se descompone con el calor y libera gas, propiciando el espumado. Típicamente se agrega 1-2% de calcio al aluminio fundido aproximadamente a 680 °C para aumentar su viscosidad y posteriormente se añade hidruro de titanio (TiH_2) como agente soplante que libera hidrógeno en el líquido viscoso, espumándolo. Este proceso se puede observar en la figura 2.8. La figura 2.9 muestra un trozo de espuma de zinc producida mediante esta técnica y se compara con un trozo de pan, dada la analogía que existe entre ambos: el aluminio se espuma por liberación de H_2 y el pan por liberación de CO_2 .

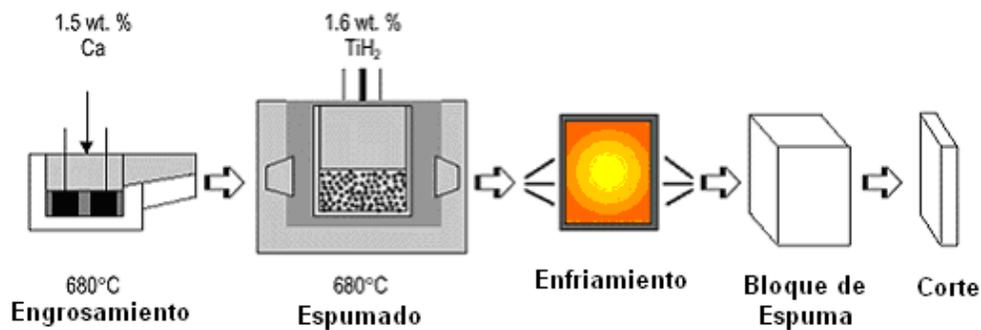


Figura 2.8. Esquema del método de espumado de líquidos con agentes soplantes (Banhart, 2000).

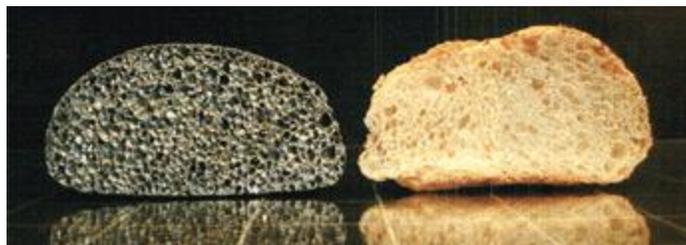


Figura 2.9. Comparación entre un trozo de pan y una espuma de zinc producida mediante espumado de líquidos con agentes soplantes (Banhart y Weaire, 2002).

- Método de solidificación eutéctica de sólido-gas (*Gasar*)

El tercer método se aprovecha de algunos metales que en estado líquido forman un sistema eutéctico con el hidrógeno gaseoso. Fundiendo estos metales en una atmósfera presurizada de hidrógeno, se obtiene un baño homogéneo cargado del mismo (H_2). Al enfriar se obtiene la espuma. Este método también recibe el nombre de “Gasar”, un acrónimo ruso cuyo significado es “reforzado con gas”. Las espumas metálicas que resultan de este proceso suelen tener poros muy alargados, orientados en la dirección de solidificación, como puede verse en la figura 2.10.

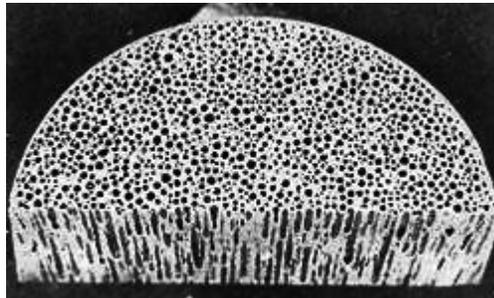


Figura 2.10. Espuma metálica obtenida mediante Gasar (Banhart, 2000).

- Método de espumado de compactados de polvo (*powder compact melting technique*)

Las espumas también se pueden producir a partir de polvos metálicos. En este proceso se comienza mezclando los polvos con un agente soplante, después de lo cual la mezcla se compacta para dar un producto denso semiacabado (ver figura 2.11). Luego se hace un tratamiento térmico a temperaturas cercanas al punto de fusión de los polvos, así se descompone el agente soplante y se libera el gas que forma los poros. Esta técnica no sirve sólo para el aluminio, otros metales y aleaciones, como estaño, zinc, plomo, latón y oro también pueden ser espumados.

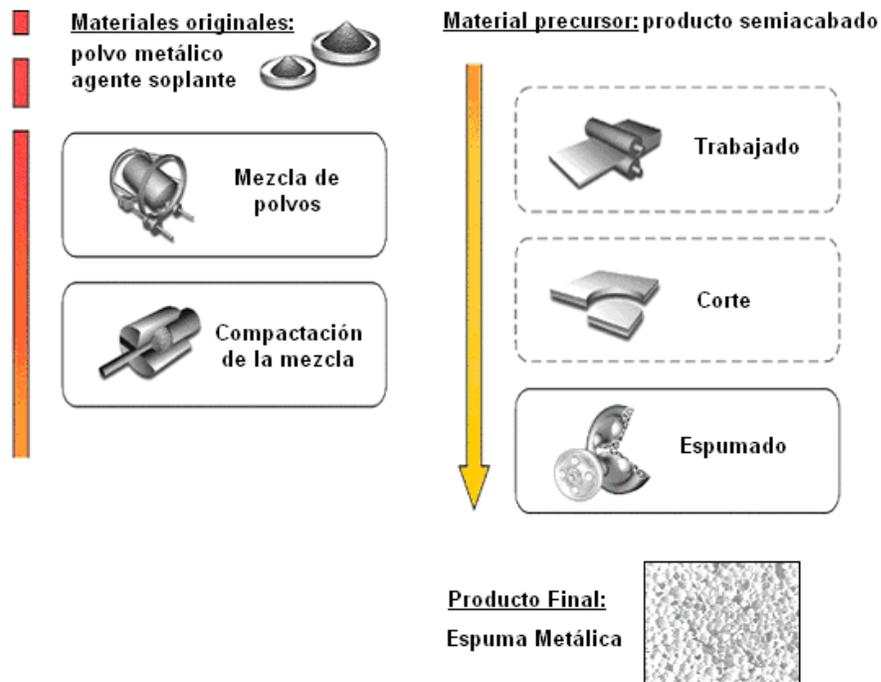


Figura 2.11. Esquema de la técnica de espumado de compactados de polvo (Baumgärtner, Duarte y Banhart, 2000).

2.2.3. Aplicaciones

Las espumas metálicas tienen una combinación de propiedades que las hacen atractivas para numerosas aplicaciones ingenieriles. Entre sus aplicaciones se tienen el uso como materiales livianos de construcción, para absorber energía por deformación, para el control térmico y acústico y otras tantas más. A continuación se describen las aplicaciones actuales y potenciales que poseen las espumas metálicas, de acuerdo al sector productivo correspondiente:

- Industria automotriz

Las características y propiedades de las espumas metálicas las hacen de utilidad en la fabricación de vehículos. Así, su alta capacidad para absorber energía mecánica por deformación (especialmente de impacto), carácter reciclable, insensibilidad a entallas, protección contra fuego, aislamiento térmico y acústico y

resistencia al calor, apropiada relación resistencia/peso y rigidez/peso, hacen que tengan aplicación en parachoques, soportes para barras anticolidión, rieles, protección interna de ocupantes, capó, paneles laterales y otros. En la figura 2.12 se indican esquemáticamente las aplicaciones que tienen las espumas metálicas en la fabricación de vehículos automotrices, mientras que en la figura 2.13 se puede ver una aplicación en la fabricación de soportes de motor.

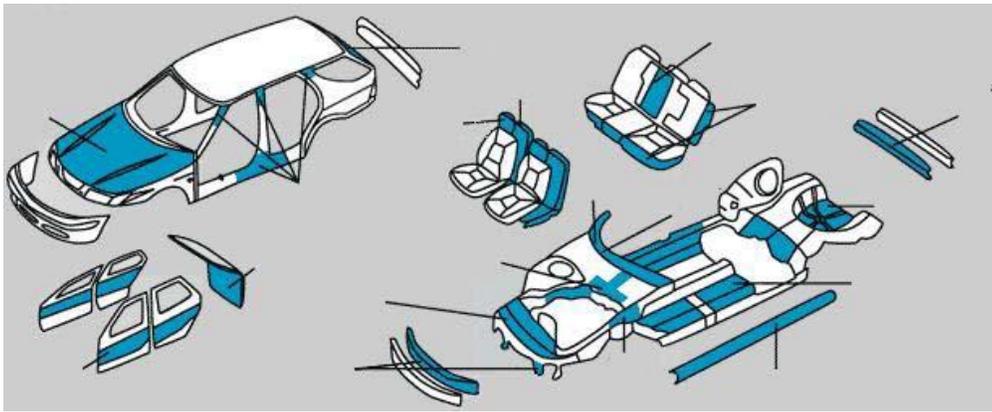


Figura 2.12. Usos de espumas metálicas en vehículos (Cymat Technologies, 2008).



Figura 2.13. Prototipo de soportes de motor BMW con núcleo de espuma metálica (Banhart, 2005).

- Equipo deportivo

Aunque no se ha reportado uso de espumas metálicas en este sector, su baja densidad y elevada capacidad de absorción de energía las hacen apropiadas para aplicaciones de relleno, por ejemplo en raquetas de tenis, bates de béisbol, cuadros de bicicletas y otros.

- Insertos biocompatibles

La estructura de celda abierta de espumas metálicas biocompatibles, tales como las de titanio, estimulan el crecimiento celular, de modo que pueden favorecer el crecimiento de hueso dentro de los poros de la espuma en prótesis ortopédicas.

- Industria ferroviaria

Las ventajas que tienen las espumas metálicas en el sector automotriz se extienden a la construcción ferroviaria. En éste sector se ha hecho hincapié en el aprovechamiento de la alta absorción de energía de impacto, para trenes urbanos que presentan el riesgo de colisión con vehículos (figura 2.14). Se han fabricado elementos anticolidión de espuma metálica para trenes de alta velocidad.

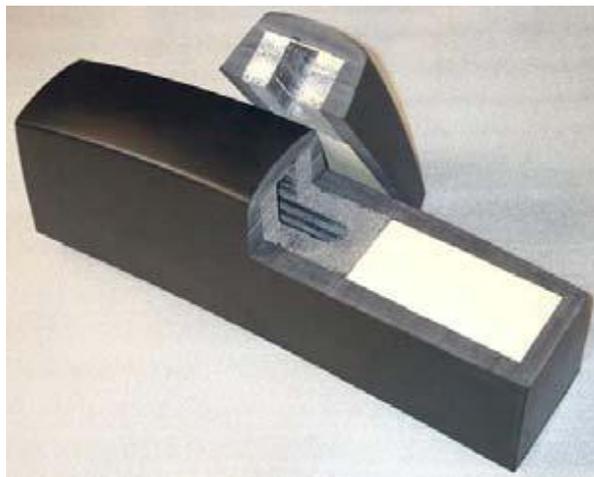


Figura 2.14. Amortiguador de energía de impacto fabricado con espuma metálica para infraestructura de tranvía SIEMENS COMBINO (Banhart, 2005).

- Construcción naval

Las espumas de aluminio de celda cerrada son más ligeras que el agua, debido a que las burbujas de aire que contienen reducen su densidad y, por ende, les permiten flotar, lo que es muy ventajoso para la fabricación de barcos. Más ventajosas aún se hacen al tener en cuenta que no se corroen, no se ven afectadas por inmersiones prolongadas y mantienen la flotabilidad, incluso después de haberse dañado. Algunas aplicaciones incluyen elevadores, plataformas, mamparos estructurales, plataformas para antenas y casilleros.

- Estructuras livianas

Sus excelentes relaciones resistencia/peso y rigidez/peso las hacen atractivas para la construcción de cualquier estructura liviana. Particularmente los paneles sándwich con núcleo de espuma metálica tienen potencial para ser usados en fuselajes de aviones, vehículos espaciales y embarcaciones.

- Protección acústica y reducción de ruido

Los poros en las espumas de celda abierta facilitan la absorción de ruido, puesto que lo reflejan dentro de la misma y convierten parte en calor. Esto hace que puedan ser usadas para apantallamiento acústico en techos y paredes y en equipos de audio.

- Protección contra fuego

Las mismas propiedades que las hacen útiles como intercambiadores (celda abierta con mucha área superficial y alta conductividad de bordes de celda), les confieren capacidad para resistir y sofocar llama directa. Por esto han sido empleadas en paneles de protección contra fuego.

- Amortiguamiento mecánico y control de vibraciones

La capacidad de amortiguamiento de las espumas metálicas es hasta diez (10) veces mayor que la de los metales sólidos. Además tienen elevadas frecuencias naturales de resonancia, pudiendo por tanto reducir el intervalo de vibraciones. Pueden usarse como relleno de perfiles huecos para amortiguación y en cobertores y contenedores sujetos a vibración.

- Industria aeroespacial

En aplicaciones aeroespaciales el remplazo de grandes cantidades de paneles sándwich de material compuesto, por otros de espuma metálica implica una significativa reducción de costos. En este sentido, grandes fabricantes como Boeing han evaluado el uso de paneles sándwich con espumas de titanio y de aluminio en botalones de cola de helicópteros. La principal ventaja de tales sándwiches es que pueden fabricarse con curvaturas a diferencia de los de material compuesto, tal como se aprecia en la figura 2.15. Otras aplicaciones incluyen relleno de álabes de turbina, elementos anticolidión para soportes de aterrizaje de vehículos espaciales, estructuras resistentes y escudos térmicos en satélites.

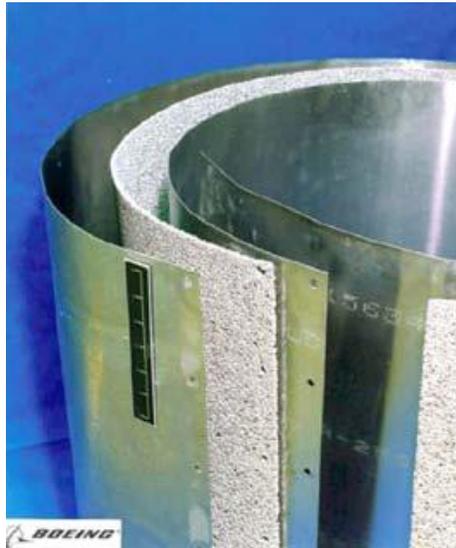


Figura 2.15. Panel sándwich de espuma metálica con curvatura (Npl, 2000).

- Intercambiadores de calor

Las espumas de celda abierta tienen mucha área superficial y alta conductividad térmica (de sus bordes de celda), lo que le otorga cualidades excepcionales para transferir energía en dispositivos tales como bombas o intercambiadores de calor (ver figura 2.16).



Figura 2.16. Bomba de calor con espuma metálica (Erg materials and Aerospace, 2011).

- Apantallamiento electromagnético

Sirven para proteger dispositivos electrónicos y espacios interiores de ondas electromagnéticas, evitando daño a equipos y personas, respectivamente. Esto es posible gracias a una buena conductividad eléctrica, que minimiza la penetración de las ondas, y a una baja permeabilidad magnética, que ayuda a convertir este tipo de energía en calor. La protección, según cada caso, se logra mediante placas de techo y pared y cajas cobertoras.

- Filtración

Las espumas de celda abierta con tamaño de poro controlado tienen un gran potencial para filtrar gases y fluidos (figura 2.17). Entre las aplicaciones posibles están filtros de aceite y tubos de escape de vehículos.



Figura 2.17. Filtros elaborados con espuma metálica (Artenano CO, 2008).

- Arquitectura y Decoración

Su apariencia novedosa y bajo peso, hacen de las espumas un elemento muy útil para el diseño arquitectónico y la decoración de espacios interiores y exteriores. Es por ello que se han utilizado en tabiquería, muebles, pisos, techos, acabados, estantería e iluminación.

- Aislamiento térmico

Por el gran volumen de aire que contienen, las espumas metálicas de celda cerrada poseen una baja conductividad térmica. Esto las hace indicadas como aislante térmico a altas y bajas temperaturas. Así, han tenido aplicación en tanques criogénicos para almacenamiento de nitrógeno líquido.

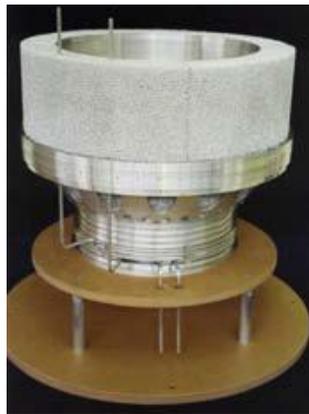


Figura 2.18. Tanque para almacenamiento de nitrógeno líquido cubiertos con espuma metálica (Erg materials and Aerospace, 2011).

- Seguridad y Defensa

La conjugación de propiedades tales como su elevada capacidad para absorber energía de impacto, para amortiguar vibraciones mecánicas, para atenuar ondas de choque y para sofocar llama directa, aunadas a su reducido peso, hace de las espumas metálicas un elemento de sumo interés para las industria militar y de defensa, ya que pueden ser utilizadas en la fabricación de placas de contención (blast protection), relleno para cascos blindados y blindaje de vehículos, como el que puede observarse en la figura 2.19.

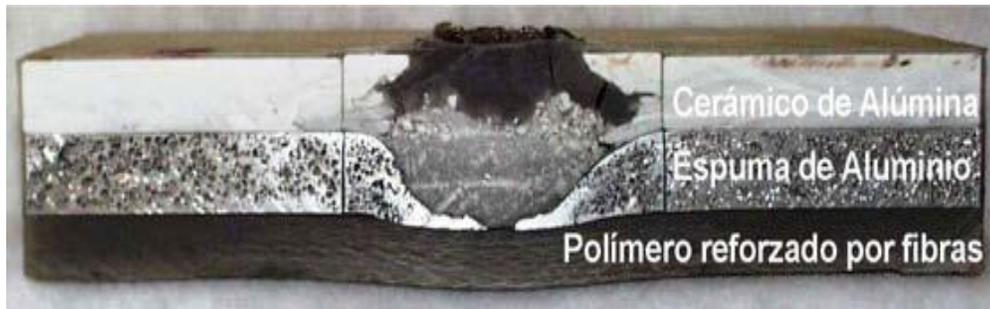


Figura 2.19. Blindaje híbrido con espuma metálica (aluminum foam) para vehículo militar (Isotech, 2011).

2.2.4. Propiedades Mecánicas

Las espumas metálicas son sistemas complejos en relación con su macro y microestructura. Esta última y las propiedades mecánicas locales son gobernadas por la composición de la aleación, condiciones de espumado y enfriamiento y eventualmente postratamiento térmico. Algunos rasgos macroscópicos de su morfología, tales como el tamaño de poro o curvatura de paredes de celda, junto con la densidad relativa, ρ^*/ρ_s , tienen una marcada influencia sobre la respuesta mecánica. Como todas estas características son inherentemente estadísticas y dependen significativamente de las condiciones de procesamiento, es complicado establecer una base de datos precisa, sencilla y confiable para las espumas metálicas. No obstante, autores como (Ashby y otros, 2000) han encontrado intervalos de propiedades mecánicas nominales para algunas espumas metálicas y han determinado reglas para su estimación. La tablas 2.1 y 2.2, respectivamente, contienen esta información.

Tabla 2.1. Intervalo de propiedades mecánicas de espumas metálicas comerciales.

Espuma	<i>Cymat</i>	<i>Alulight</i>	<i>Alporas</i>	<i>ERG</i>	<i>Inco</i>
Material	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
Estructura (tipo de celda)	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Abierta	Abierta
Tamaño de celda, d (mm)	3.4-13.2	4.2	4.5	2.5-4.5	0.45-0.8
Densidad relativa, ρ/ρ_s	0.02-0.2	0.1-0.35	0.08-0.1	0.05-0.1	0.03-0.04
Densidad, ρ (Mg/m ³)	0.07-0.56	0.3-1.0	0.2-0.25	0.16-0.25	0.26-0.37
Módulo de Young, E (GPa)	0.02-2.0	1.7-12	0.4-1.0	0.06-0.3	0.4-1.0
Módulo de cortadura, G (GPa)	0.001-1.0	0.6-5.2	0.3-0.35	0.02-0.1	0.17-0.37
Coefficiente de Poisson, ν	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34
Resistencia a compresión, σ_c (MPa)	0.04-7.0	1.9-14.0	1.3-1.7	0.9-3.0	0.6-1.1
Límite Elástico, σ_y (MPa)	0.04-7.0	2.0-20	1.5-1.8	0.9-2.7	0.6-1.1
Resistencia a tracción, σ_t (MPa)	0.05-8.5	2.2-30	1.6-1.9	1.9-3.5	1.0-2.4
Módulo de compres. vol., K (GPa)	0.02-3.2	1.8-13.0	0.9-1.2	0.06-0.3	0.4-1.0
Deformación de compactación, ϵ_D	0.6-0.9	0.4-0.8	0.7-0.82	0.8-0.9	0.9-0.94
Ductilidad, ϵ_f	0.01-0.02	0.002-0.04	0.01-0.06	0.1-0.2	0.03-0.1
Dureza, H (MPa)	0.05-10	2.4-35	2.0-2.2	2.0-3.5	0.6-1.0

Tabla 2.2. Relaciones para estimar propiedades mecánicas de espumas metálicas.

Propiedades mecánicas	Espuma de celda abierta	Espuma de celda cerrada
Módulo de Young, E (GPa)	$E = (0.1-4)E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$	$E = (0.1-1)E_s \left[0.5 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + 0.3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)\right]$
Módulo de cortadura, G (GPa)	$G = \frac{3}{8}E$	$G = \frac{3}{8}E$
Módulo de comp. volumétrica, K (GPa)	$K = 1.1E$	$K = 1.1E$
Resistencia a compresión, σ_c (MPa)	$\sigma_c = (0.1-1)\sigma_{c,s} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}}$	$\sigma_c = (0.1-1)\sigma_{c,s} \left[0.5 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} + 0.3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)\right]$
Resistencia a tracción, σ_t (MPa)	$\sigma_t = (1.1-1.4)\sigma_c$	$\sigma_t = (1.1-1.4)\sigma_c$
Deformación de compactación, ϵ_D	$\epsilon_D = (0.9-1) \left(1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s} + 0.4 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3\right)$	$\epsilon_D = (0.9-1) \left(1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s} + 0.4 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3\right)$
Dureza, H (MPa)	$H = \sigma_c \left(1 + 2 \frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$	$H = \sigma_c \left(1 + 2 \frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$

Vistas las propiedades de las espumas metálicas (tabla 2.1), es conveniente que en este trabajo especial de grado (antes de dar a conocer el comportamiento mecánico a compresión y características de las propiedades que se obtendrán), se definan y se conozcan que son las curvas de Esfuerzo-Deformación, que nos permitirán saber que resistencia y deformación se espera de un material cuando este es sometido a una determinada carga.

- Curva ingenieril:

Llamada también convencional, tecnológica o nominal, expresa tanto el esfuerzo como la deformación en términos de las dimensiones originales de la probeta, un procedimiento muy útil cuando se está interesado en determinar los datos de resistencia y ductilidad para propósito de diseño en ingeniería. Esta curva define el esfuerzo como el cociente entre una carga aplicada sobre la probeta (P_i) y un área de sección transversal inicial (A_o).

$$\sigma_N = \frac{P_i}{A_o} \quad (2.1)$$

Y a la deformación como un cociente entre un decremento de longitud (ΔL) y la longitud inicial (l_0) del espécimen.

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta L}{l_0} = \frac{(l_0 - l_i)}{l_0} \quad (2.2)$$

Donde, (l_i) representa la longitud en cada instante de aplicación de carga. De esta curva se pueden obtener propiedades mecánicas como lo son el módulo de Young, la resistencia a fluencia, la resistencia a compresión, la deformación de compactación y otras propiedades que nos permiten caracterizar mecánicamente los materiales.

- Curva Real:

A diferencia de la curva ingenieril, en esta curva, las deformaciones corresponden a los fenómenos físicos reales en la deformación del material, es decir, describe realmente el comportamiento del material, esto se debe a que esta curva toma los valores instantáneos de deformación que se ven reflejados en un aumento del área transversal del espécimen. Se define el esfuerzo real como la relación entre la

carga aplicada en cada instante (P_i) y el área transversal real (instantánea) (A_i) del espécimen.

$$\sigma_R = \frac{P_i}{A_i} \quad (2.3)$$

Y a la deformación real o natural como el logaritmo neperiano entre la longitud en cada instante de aplicación de carga (l_i) y la longitud inicial del espécimen (l_0).

$$\varepsilon_R = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (2.4)$$

El área bajo la curva de Esfuerzo-Deformación real se conoce como tenacidad del material, esto es, la cantidad de energía por unidad volumétrica que disipa el material. La tenacidad, por consiguiente, involucra tanto el ancho como la altura de la curva Esfuerzo-Deformación del material, en tanto que la resistencia está relacionada únicamente con la altura de la curva y la ductilidad está relacionada únicamente con el ancho de la curva (Shackelford, 2006).

Con relación al comportamiento a tracción y compresión cuasiestática de las espumas metálicas, es conveniente saber que usualmente el módulo de Young, E , a tracción es alrededor de un 10% mayor al que se tiene en compresión (Shackelford, 2006).

En compresión uniaxial cuasiestática las espumas metálicas comúnmente exhiben una visible y bien definida meseta de tensión, σ_{pl} , que se muestra claramente en el esquema de la figura 2.20. El modelo micromecánico involucrado en este comportamiento puede describirse a partir de resultados encontrados en espumas poliméricas, en los que se ha encontrado que la respuesta elástica inicial está relacionada a la flexión de los bordes de celda, en las espumas de celda abierta, y a la flexión de los bordes y alargamiento de las caras, en espumas de celda cerrada (Gibson, 2000). En la medida en que se incrementa el esfuerzo, las celdas comienzan a colapsar a una carga casi constante, mediante pandeo elástico, fluencia o fractura, dependiendo de la naturaleza del material. Una vez que todas las celdas han colapsado, el aumento en la deformación causa presión entre las paredes de celda,

incrementando de forma abrupta la tensión a partir de una determinada deformación (compactación).

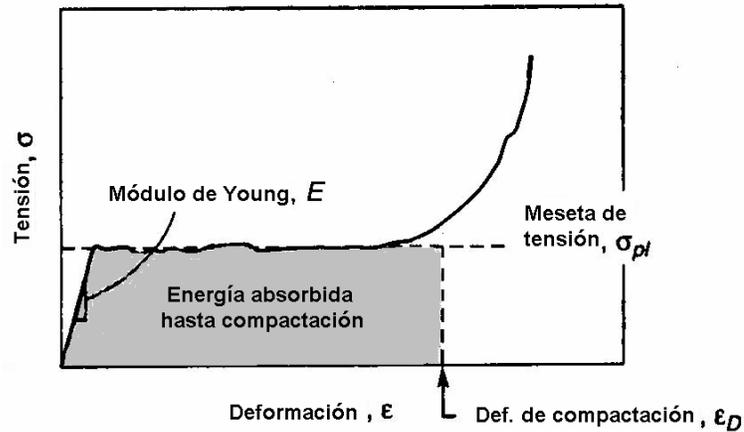


Figura 2.20. Curva tensión-deformación a compresión típica de una espuma metálica (Ashby y otros, 2000).

La curva mostrada en la figura anterior (fig. 2.20) es más propia de las espumas de celda abierta, ya que en las de celda cerrada existe un ligero incremento del esfuerzo con la deformación plástica. Esto se puede notar en las (figuras 2.21 y 2.22), que contienen las curvas Esfuerzo-Deformación a compresión de varias espumas metálicas comerciales.

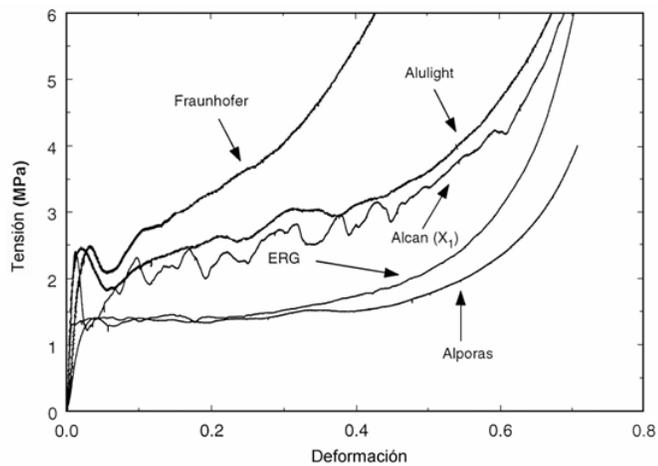


Figura 2.21. Curvas Esfuerzo-Deformación nominal a compresión cuasiestática de varias espumas metálicas comerciales (Andrews y otros, 1999).

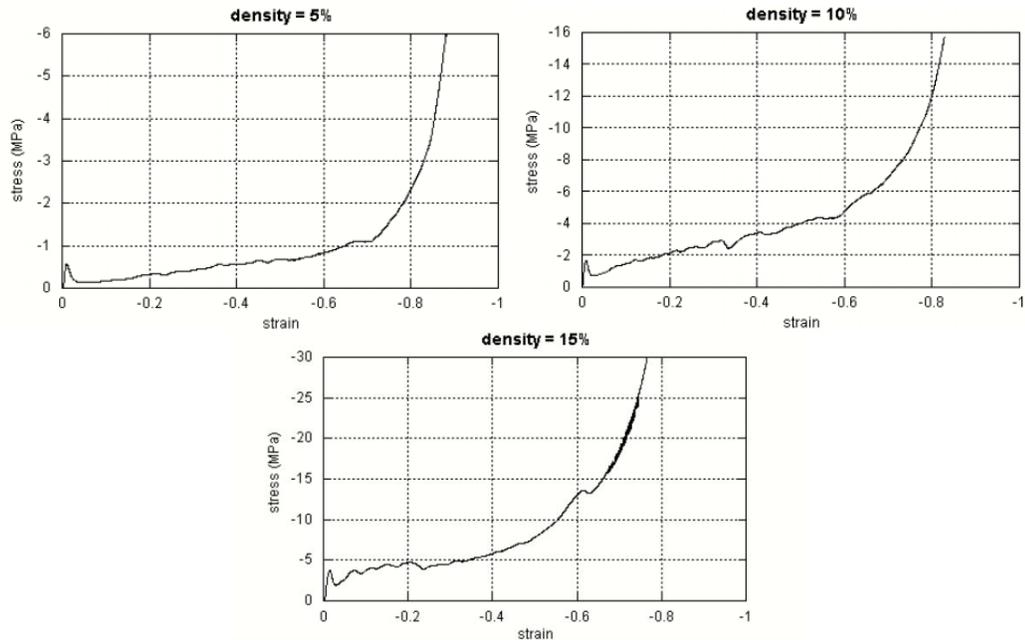


Figura 2.22. Curva Esfuerzo-Deformación de espumas metálicas Cymat de diferentes densidades (CYMAT technical manual, 2009).

- Módulo de Young (E):

Descubierto por el físico y médico inglés Thomas Young, es una propiedad que está referida a la pendiente de la curva Esfuerzo-Deformación en la zona elástica. Proporciona una información muy práctica, ya que representa la rigidez del material (esto es, su resistencia a la deformación elástica), y se manifiesta como la cantidad de deformación durante la utilización normal del material por debajo de su límite elástico y también como el grado de recuperación elástica del material durante el conformado.

El valor del módulo de Young, se calcula con la pendiente de la curva Esfuerzo-Deformación en la zona elástica, sin embargo, mediciones de deformación superficial realizadas por (Bastawros y Mcmanuis, 1998) y (Bastawros y otros, 2000), han indicado la existencia de plasticidad localizada a esfuerzos por debajo del límite elástico de la espuma metálica, lo cual tiende a reducir la pendiente de su curva Esfuerzo-Deformación en la zona elástica. Como consecuencia de esto, las mediciones del módulo de Young de la espuma deben hacerse a partir de la pendiente

obtenida al hacer una descarga aproximadamente al 75% de su resistencia a compresión.

En la figura 2.23, se puede observar esta propiedad para varios tipos diferentes de espumas metálicas con sus respectivas densidades.

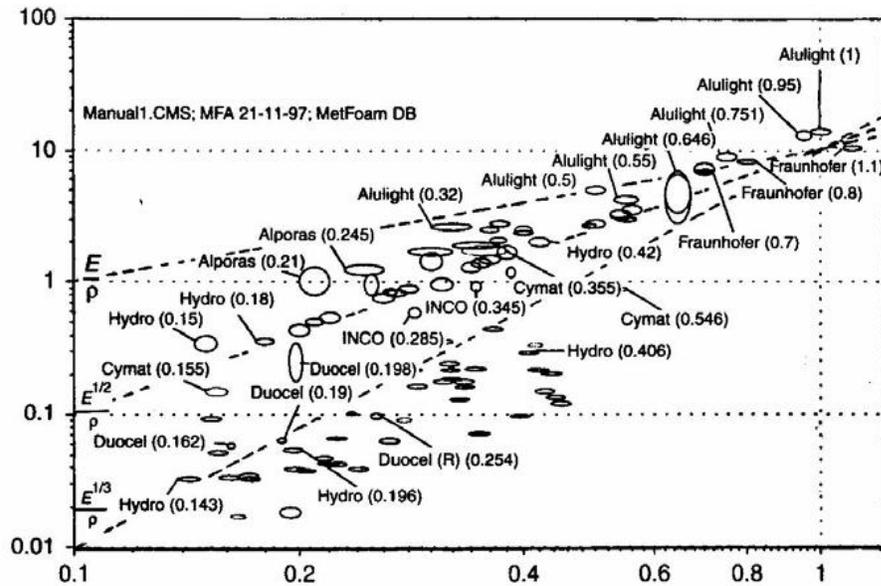


Figura 2.23. Módulo de Young contra densidad de espumas metálicas comerciales (Ashby y otros, 2000).

- Resistencia a la fluencia (σ_Y):

Esta propiedad se define como el esfuerzo necesario para producir una deformación permanente del 0.2%. Este punto de la curva de Esfuerzo-Deformación separa la región elástica (zona de deformación no permanente donde el material se recupera de forma lineal al retirar la carga) de la región plástica (zona de deformación permanente). El convenio usual para su determinación en una curva Esfuerzo-Deformación es trazar una línea recta paralela al tramo elástico que corte al eje de deformación en el 0.2%, esto es aplicable también para materiales porosos como es el caso de la espuma metálica.

En la siguiente figura se aprecia la forma como se calcula la resistencia a la fluencia sobre una curva de Esfuerzo-Deformación.

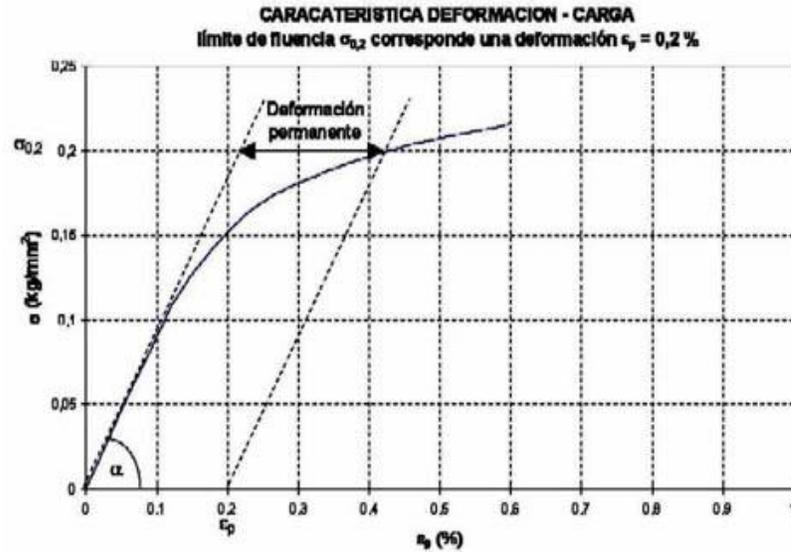


Figura 2.24. Representación de la resistencia a la fluencia en una curva Esfuerzo-Deformación (Inducor, 1990).

- Resistencia a la compresión (σ_c):

Es el esfuerzo máximo que se registra para los materiales dentro de la zona de deformación plástica. Dicha zona está relacionada con el inicio del colapso plástico de una franja de celdas hasta una deformación particular que se le denomina deformación de compresión. Es por esta razón, que este valor se toma como el pico inicial de esfuerzo en la curva Esfuerzo-Deformación.

En la figura 2.25, se pueden apreciar valores de la resistencia a compresión para distintos tipos de espumas metálicas comerciales y sus correspondientes valores de densidad.

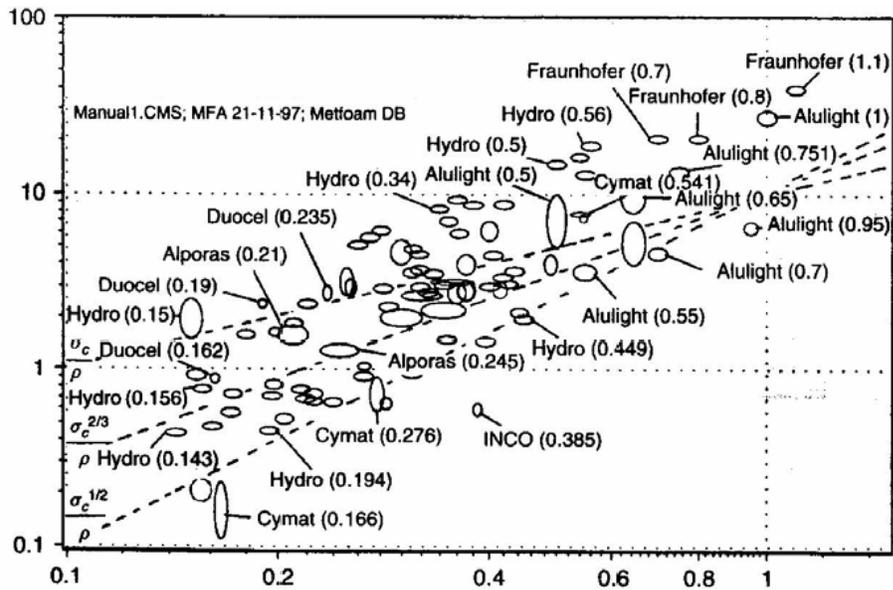


Figura 2.25. Resistencia a compresión contra densidad de espumas metálicas comerciales (Ashby y otros, 2000).

- Deformación de compactación (ϵ_D):

Esta propiedad se define como el máximo de la curva Eficiencia a deformación-Deformación de la espuma, esta deformación se da cuando todas las celdas de la espuma han colapsado provocando así el último régimen de deformación denominado compactación donde se aprecia un incremento abrupto en el valor de esfuerzo.

En la figura 2.26, se puede apreciar la determinación de la deformación de compactación.

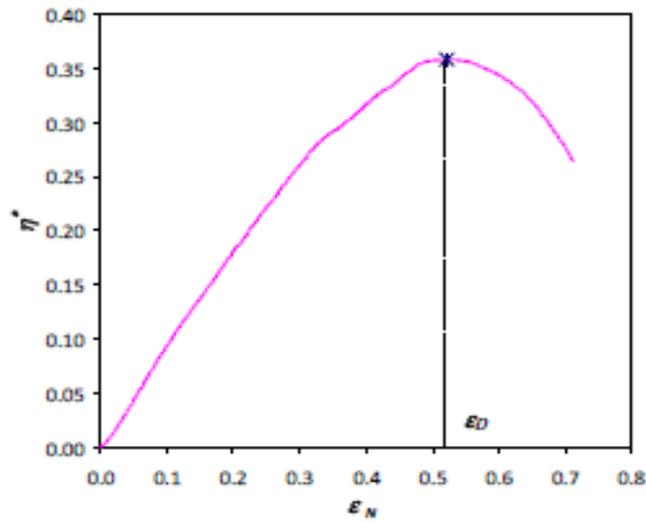


Figura 2.26. Curva Eficiencia a deformación-Deformación nominal de una espuma del tipo alpora 10% (Irausquín, 2012).

- Coeficiente de endurecimiento por deformación (m):

El endurecimiento por deformación plástica es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente.

La relación matemática que describe el comportamiento de los materiales en la zona plástica de la curva Esfuerzo-Deformación, está representada por la Ley de plasticidad de Hollomon:

$$\sigma = \sigma_0 * \epsilon^m \quad (2.5)$$

Donde, σ_0 : coeficiente de resistencia, m : exponente de endurecimiento por deformación.

Para determinar el valor del exponente de endurecimiento por deformación, se traza en una gráfica log-log, los valores que representan la zona plástica de la curva Esfuerzo-Deformación. Esta gráfica es aproximadamente una línea recta, y la pendiente de esa curva es igual al valor del exponente de endurecimiento por deformación.

2.2.5. Comportamiento a compresión de las espumas metálicas

Las espumas metálicas exhiben una respuesta única a compresión, que las hace apropiadas para aplicaciones en las que se requiera absorción de energía de impacto por deformación. Dicho comportamiento ha sido extensamente investigado, especialmente en condiciones cuasiestáticas, pero los resultados indican una importante variabilidad en las propiedades de estos materiales, debido fundamentalmente a la heterogeneidad en su estructura y a la falta de control que se tiene sobre ésta durante el proceso de fabricación.

A continuación se describen los factores más relevantes que afectan el comportamiento a compresión de las espumas metálicas y el efecto concreto que tienen sobre sus propiedades.

2.2.5.1. Influencia de la Estructura

Según su topología (celda abierta, celda cerrada) las espumas metálicas presentan diferentes mecanismos de deformación y, por lo tanto, diferente respuesta a compresión. En las espumas de celda cerrada, la existencia de paredes entre sus bordes de celda, constituye una importante restricción que hace que las mismas sean considerablemente más rígidas que espumas de celda abierta con la misma densidad relativa.

Algunas imperfecciones en la estructura de espumas de celda cerrada, tales como corrugaciones y curvaturas de las paredes y bordes de celda, también influyen significativamente sobre su rigidez (Andrews y otros, 1999). Si estas imperfecciones llegan a alcanzar una extensión importante, puede haber un efecto considerable sobre el módulo de Young de la espuma, específicamente de disminución de éste. Tal efecto es de menor consideración que para el caso de espumas de celda abierta (Grenstedt, 1998). Otros parámetros estructurales, como el tamaño de celda, en sí

mismos (no considerando su dependencia de la densidad) han mostrado una menor influencia en la rigidez de la espuma (Nieh, Higashi y Wadsworth, 2000).

2.2.5.2 Influencia de la Densidad

La densidad relativa (ρ^*/ρ_s), es la propiedad que tiene mayor influencia sobre el comportamiento a compresión de las espumas metálicas (Gibson y Ashby, 1999; Degischer y Kriszt, 2002). Es por esto que se han llegado a proponer relaciones para la estimación de sus propiedades mecánicas a partir de su densidad relativa, como las que se muestran en la tabla 2.2. Aunque tales expresiones están basadas en un modelo sencillo de celda unitaria cúbica, que difiere considerablemente de la estructura real de la espuma, autores como Gibson y Ashby han encontrado un adecuado ajuste entre las estimaciones que permiten realizar y datos obtenidos experimentalmente, como puede apreciarse en la figura 2.27. Las expresiones son válidas mientras el mecanismo de deformación predominante sea la flexión de las paredes de celda, de modo que, presentan cierta desviación para espumas de alta densidad y celda cerrada, en las que la compresión de las paredes de celda contribuye notablemente a la deformación.

2.2.5.3. Influencia de la Deformación

Teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de las espumas metálicas son dependientes de su estructura, es evidente que éstas también son dependientes de la deformación, pues durante dicho proceso ocurren cambios estructurales debidos principalmente a la flexión, pandeo, alargamiento y fractura de las paredes de celda. Esta influencia es particularmente notoria en la rigidez de la espuma, definida ésta en términos del módulo de Young, E .

Mediante ensayos cuasiestáticos de compresión, (Sugimura y otros, 1997) determinaron el módulo de Young de espumas de aluminio Alporas y Alcan

(CYMAT), a partir de la pendiente de líneas de descarga realizadas a diferentes valores de deformación y encontraron que esta propiedad se mantenía prácticamente constante hasta deformaciones coincidentes con un esfuerzo próximo al 75% del valor de la resistencia a compresión (pico de esfuerzo en la curva Esfuerzo-Deformación). Así mismo, encontraron que este valor obtenido mediante descarga era considerablemente mayor que el estimado con la línea inicial de carga (tangente inicial de la curva Esfuerzo-Deformación o módulo tangente). Este hecho fue atribuido a una concentración de esfuerzos en las paredes de celda de la espuma que provocaba mecanismos de plastificación localizada casi inmediatamente al inicio del proceso de carga. Tal suposición fue posteriormente confirmada por (Bastawros y Mcmanuis, 1998) y (Bastawros, Bart-Smith y Evans, 2000) mediante observaciones microscópicas.

Complementando los estudios antes mencionados, (Ramamurty y Paul ,2004) observaron que el módulo de Young tangente a compresión (medido con la línea de carga inicial) de una espuma Cymat variaba mucho más que el módulo medido con líneas de descarga para una muestra significativa de probetas, aparentemente debido a la influencia del equipo utilizado para los ensayos.

Los hallazgos relacionados con la influencia de la deformación sobre la rigidez de espumas metálicas de aluminio de celda cerrada, han llevado a considerar como módulo de Young o módulo de elasticidad verdadero de una espuma metálica al valor de la pendiente de una línea de descarga realizada aproximadamente al 75% de su resistencia a compresión, σ_c . Con este valor no se recogen deformaciones no lineales y se evita la influencia de la técnica y del equipo de medición.

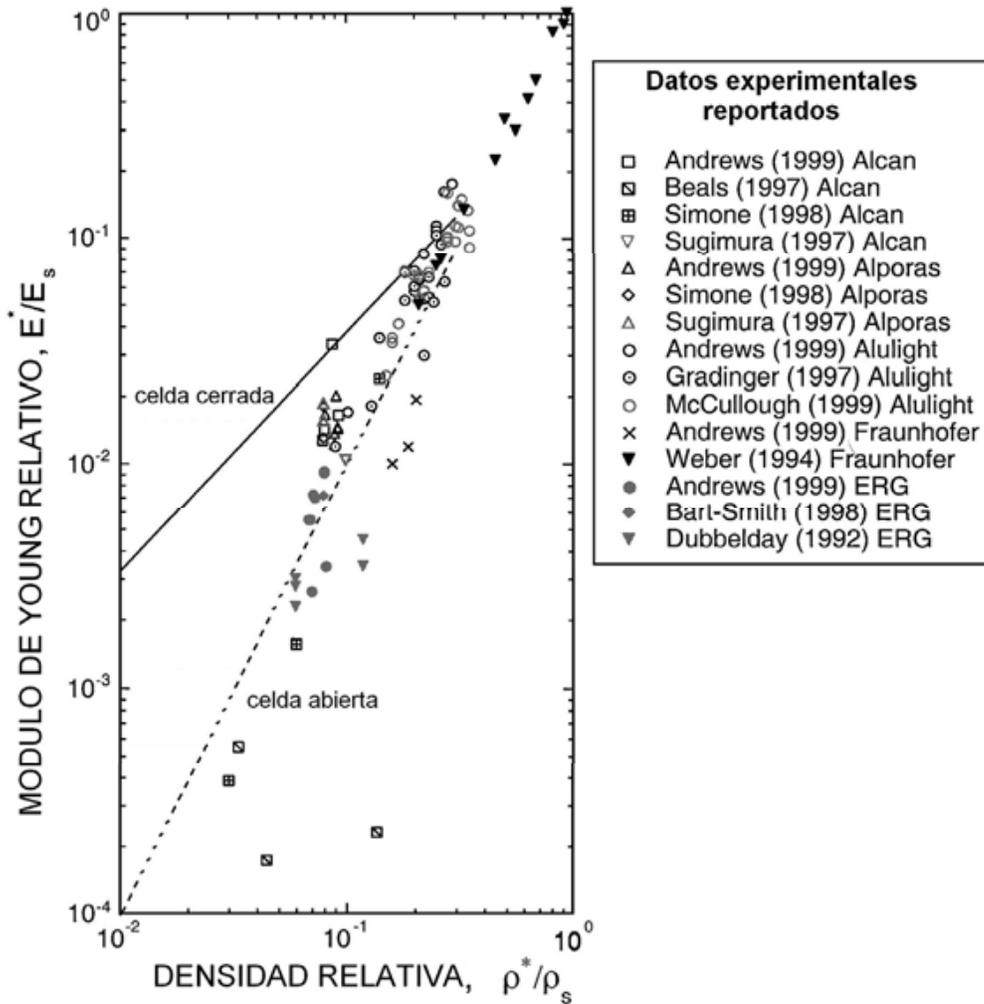


Figura 2.27. Módulo de Young relativo en función de la densidad relativa, estimado mediante las expresiones propuestas por (Gibson y Ashby, 1999) y obtenido experimentalmente para diferentes espumas metálicas (Gibson, 2000).

2.2.6. Absorción de energía de las espumas metálicas

De las curvas Esfuerzo-Deformación a compresión de las espumas metálicas se puede inferir su idoneidad para aplicaciones en las que se requiera absorción de energía, ya que son capaces de soportar grandes deformaciones a niveles de tensión relativamente bajos.

2.2.6.1. Capacidad de Absorción de Energía

En la figura 2.28 se representa esquemáticamente el modo en que se hace la estimación de la energía absorbida por unidad de volumen, W , y de la eficiencia a deformación, η , de una espuma metálica usando su curva Esfuerzo-Deformación a compresión. La energía que la espuma absorbe por unidad de volumen, W , hasta el inicio de la compactación puede obtenerse del área bajo la curva Esfuerzo-Deformación, según la expresión:

$$W(\varepsilon_D) = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.6)$$

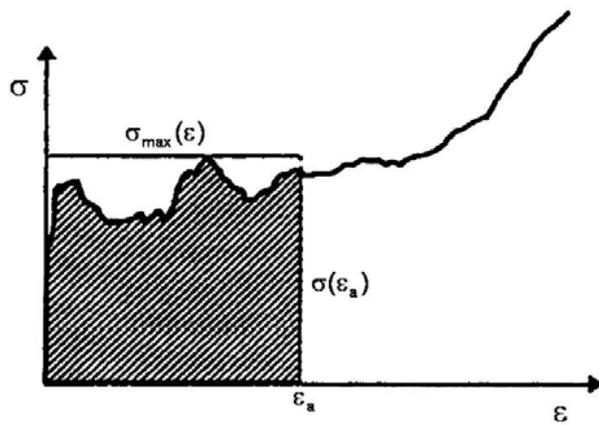
Se define eficiencia a deformación, η , de la espuma para absorber energía hasta una determinada deformación (ε_a), como el cociente entre la energía absorbida hasta dicha deformación y el máximo valor de energía que podría absorberse (energía total absorbida por un material perfectamente plástico hasta la deformación ε_a considerada), esto es,

$$\eta(\varepsilon_a) = \frac{W(\varepsilon_a)}{\sigma_{\max}(\varepsilon) \cdot \varepsilon_a} \quad (2.7)$$

De modo que la eficiencia a deformación total de la espuma se estima según:

$$\eta = \frac{W(\varepsilon_D)}{\sigma(\varepsilon_D) \cdot \varepsilon_D} \quad (2.8)$$

La mayoría de las espumas metálicas tienen una meseta de deformación amplia, lo cual les confiere alta eficiencia de absorción de energía.



Energía $W(\epsilon_a) = \int_0^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon =$ 

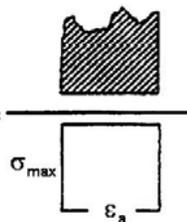
Eficiencia $\eta(\epsilon_a) = \frac{W(\epsilon_a)}{\sigma_{\max}(\epsilon) \cdot \epsilon_a} =$ 

Figura 2.28. Estimación de energía absorbida por unidad de volumen, W , y eficiencia a deformación, η , de una espuma metálica a partir de su curva Esfuerzo-Deformación a compresión.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPUMAS METÁLICAS A COMPRESIÓN

El ensayo de compresión consiste en aplicar a la probeta, en la dirección de su eje longitudinal, una carga estática que tiende a provocar un acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta rotura o suspensión del ensayo. El diagrama obtenido de dicho ensayo, presenta un periodo elástico y otro plástico.

La complejidad estructural de las espumas metálicas y la considerable variabilidad que exhiben sus propiedades han dificultado el desarrollo de procedimientos, normativas o estándares para su ensayo mecánico. Por esta razón, para llevar cabo su caracterización mecánica se suelen tomar como referencia

diversas normativas aplicables a metales y aleaciones metálicas, ya que se producen a partir de este tipo de material, y se tienen las precauciones necesarias para evitar efectos debidos al tamaño de probeta y al acabado superficial.

2.3.1. Preparación superficial y Tamaño de probetas

Para el dimensionamiento de las probetas de espuma metálica, se debe tomar como referencia las recomendaciones de la norma ASTM E9 (American Society for Testing and Materials) para ensayos de compresión de materiales metálicos en un recinto a temperatura ambiente. Esta norma recomienda especímenes de forma prismática, siempre y cuando se utilice el espesor total del material. A partir de este espesor, la norma establece en la sección ocho (8), intervalos de valores para el dimensionamiento de la sección transversal de la probeta.

Ensayos a compresión cuasiestáticos realizados por (Irausquin Castro, 2012), recomiendan usar probetas prismáticas de sección transversal cuadrada, en base a una relación de tamaño relativo L/d mayor o igual a 6, donde L es el espesor de la probeta, y d , el diámetro medio de los poros de la espuma metálica.

Las probetas de espuma metálica pueden mecanizarse empleando varias técnicas conocidas. Para minimizar el daño de las celdas es recomendable hacer el corte con disco de diamante, electroerosión por hilo u otro equipo de EDM (electric discharge machining: mecanizado por descarga eléctrica), fresado químico, o chorro de agua a alta presión. En este trabajo se utilizó el método de corte con sierra de cinta (por ser el más accesible), el cual provee una superficie más deteriorada que la obtenida con los procesos anteriores. Los valores de rigidez y resistencia a compresión estimados para una espuma de aluminio de celda cerrada cortada con disco de diamante y con electroerosión suelen ser idénticos, pero al ser cortada con sierra de cinta se hacen inferiores. A este respecto, (Ashby y otros. 2000) señalan disminuciones de hasta 15% en el módulo de Young y hasta 7% en la resistencia a compresión. Así pues, como en cualquier otro ensayo de compresión uniaxial, es

conveniente lubricar las caras de la probeta que estén en contacto con los platos de carga, para evitar que el rozamiento entre ambas superficies ocasione falta de homogeneidad en la deformación (abarrilamiento) y, por consiguiente, imprecisión en la estimación de las propiedades mecánicas (Shackelford, 2006).

El tamaño relativo de las probetas L/d (siendo L el tamaño de probeta y d el diámetro promedio de los poros) puede afectar la medición de propiedades mecánicas de las espumas, como se aprecia en las figuras 2.29 y 2.30. Esto ocurre debido a que durante los ensayos las caras laterales de las probetas quedan libres, por lo que las paredes de celda en dichas caras están menos restringidas y contribuyen menos a la resistencia y rigidez; como resultado, el módulo de elasticidad y la resistencia tienden a incrementarse a medida que aumenta L/d . Por regla general, los efectos de borde se hacen insignificantes para tamaños relativos de probetas aproximadamente mayores a 6 (Ashby y otros, 2000; Degischer y Kriszt, 2002), lo cual implica que debe tomarse este valor como referencia al dimensionar las probetas para que tengan representatividad.

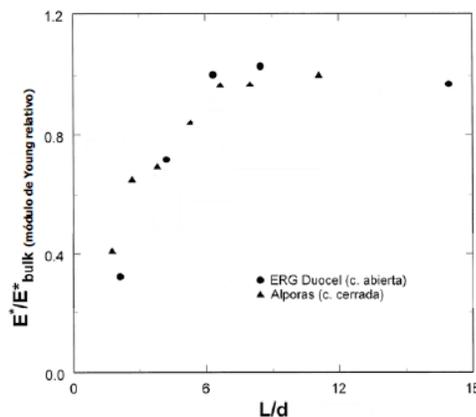


Figura 2.29. Efecto del tamaño relativo de probeta (L/d) sobre el módulo de Young de un par de espumas metálicas comerciales (Andrews, Gioux, Onck y Gibson, 2001).

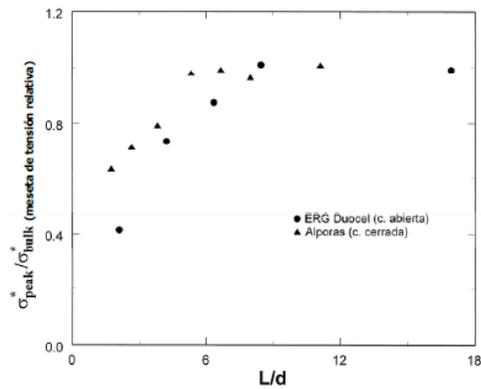


Figura 2.30. Efecto del tamaño relativo de probeta (L/d) sobre la meseta de tensión (σ_{pl}) de un par de espumas metálicas comerciales (Andrews y otros, 2001).

2.3.2. Máquina de Ensayo de Universal

Para obtener las propiedades mecánicas cuasiestáticas de la espuma de aluminio Cymat, se hará uso de una máquina de ensayo universal LOSENHAUSEN de 20000 kg de capacidad máxima, que se muestra en la figura 2.31.



Figura 2.31. Máquina de ensayo universal LOSENHAUSEN.

La máquina LOSENHAUSEN dispone de celdas de carga de 1000 kg, 2000 kg, 4000 kg, 10000 kg y 20000 kg. Esta máquina está conectada a un sistema de adquisición de datos analógico, que consta de un rodillo en el cual se plasma la curva

carga-desplazamiento, donde la carga es la aplicada sobre las probetas en estudio y el desplazamiento representando por la distancia que recorren los cabezales (dicha distancia en la representación gráfica debe ser corregida por una relación establecida por el fabricante de la máquina).

La máquina posee cabezales cilíndricos de 150 mm de diámetro. La velocidad de desplazamiento de los cabezales es controlada por la apertura de válvula y la presión de aceite.

2.3.3. Recuperación elástica

Al realizar un ensayo de compresión, tanto la probeta como los elementos de máquina se deforman elásticamente. La corrección para esta deformación viene dada por una expresión:

$$\text{Factor de corrección} = \frac{K_{muestra} - K_{experimental}}{K_{experimental} * K_{muestra}} \quad (2.9)$$

Donde, $K_{experimental}$: pendiente de la recta que mejor se aproxime a la curva en la zona elástica, y $K_{muestra} = (E^* . A_0) / l_0$.

Cuando se retira la carga en un ensayo de tracción o compresión, los materiales recuperan una pequeña componente de deformación, entonces la deformación total (ε_T) del material, queda representada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (2.10)$$

donde, ε_e : deformación elástica, ε_p : deformación plástica.

La espuma metálica por presentar plasticidad localizada en la región elástica (Bastawros, A.; McManuis, R.;, 1998), posee un menor grado de recuperación, esto hace, que la deformación elástica (ε_e) sea mucho menor en este tipo de material, de tal manera, que se puede despreciar y decir que la deformación total es igual a la deformación plástica (espécimen sujeto a compresión).

2.3.4. Teorema de Arquímedes

Arquímedes, matemático griego, con su principio físico, establece un método para determinar el volumen de un objeto con una forma irregular. Este plantea que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desalojado. El volumen desplazado por el sólido sumergido en un fluido coincide con el volumen del sólido (ver figura 2.32).

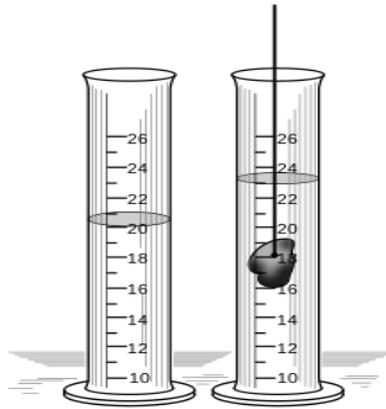


Figura 2.32. Ejemplo del principio de Arquímedes.

2.3.5. Análisis estadístico

Teniendo en cuenta que todo procedimiento experimental, durante la recolección de datos, presenta errores asociados a imprecisiones en las mediciones y calibración de instrumentos; se aplican entonces, métodos estadísticos que tomen en cuenta la influencia de los errores en el comportamiento de una determinada población.

El Teorema del Límite Central, establece que para una población de muestras aleatorias con una media (μ) y una varianza (σ^2), con un número de muestras suficiente grande ($n \geq 30$), se puede establecer una distribución normal de la población.

Dicha distribución normal de la población, nos garantiza, que aplicando el teorema del límite central, el valor corregido de la muestra es la media (μ), (Devore, 2005).

Una distribución normal es aplicable en distintas ramas, por ejemplo: un ingeniero automotriz puede planificar un estudio de mediciones promedio fuerza de arranque de varios conectores. Si asumimos que cada medición resulta de una réplica de un experimento aleatorio, la distribución normal puede ser utilizada para hacer conclusiones aproximadas sobre este medio.

Además, a veces el teorema del límite central es menos obvio. Por ejemplo, supongamos que la desviación (o error) en la longitud de una pieza mecanizada es la suma de un gran número de efectos infinitesimales, tales como la temperatura y la humedad, vibraciones, variaciones del ángulo de corte, desgaste de la herramienta de corte, desgaste de los cojinetes, variaciones de la velocidad de rotación, variaciones en el montaje y acople, las variaciones en numerosas características de las materias primas, y la variación en los niveles de contaminación. Si los errores de los componentes son independientes y la misma probabilidad de ser positivo o negativo, el error total puede ser demostrado con una distribución aproximadamente normal. Además, la distribución normal surge en el estudio de numerosos fenómenos físicos básicos.

A nivel bibliográfico, no se cuenta con un procedimiento experimental con el cual se estime el comportamiento real de la espuma metálica, por lo tanto, es de gran importancia corregir los valores obtenidos de los ensayos y poder así, contar con un blindaje a nivel estadístico de los resultados estimados.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se darán a conocer los métodos experimentales que se emplearán para desarrollar las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos planteados.

CAPÍTULO III

3.1. Compra del material

Para llevar a cabo este estudio se efectuó una revisión entre las espumas metálicas de mayor comercialización y se optó por las espumas metálicas Cymat, por ser esta la que cuenta con mayor información disponible en cuanto a morfología, propiedades mecánicas y por ser muy accesible en mercado; estas fueron adquiridas vía Internet (Inventables), las cuales presentan las siguientes características ofrecidas por el fabricante:

- Alta resistencia y relación de rigidez-peso.
- Las propiedades constantes en el intervalo de tiempo, temperatura y humedad.
- Alta absorción de energía mecánica en todas las direcciones.
- No es inflamable o susceptible a la degradación del medio ambiente.
- Propiedades de aislamiento electromagnético.
- Acústica y propiedades de aislamiento térmico.
- Reciclable.
- Alto rendimiento en relación con el precio.

El proceso patentado para producir paneles planos SAF (Stabilized Aluminum Foam) comienza con un metal compuesto de una aleación de aluminio que tiene partículas cerámicas añadidas. Una vez fundido, el metal compuesto, se vierte en una caja de formación de espuma. Mediante la inyección de gas controlada a través de un impulsor rotativo, las burbujas son creadas. Estas suben a través del líquido (metal compuesto) y crean una estructura de espuma. La cual se acumula en la superficie del material fundido donde puede ser extraída continuamente para formar una lámina. La estructura de espuma es de células predominantemente cerrada. El tamaño de las células puede ser controlada mediante la variación de las condiciones de funcionamiento del sistema de inyección. La velocidad y el medio por el que se introduce el gas puede ser variada para producir espumas con densidades que varían de 5% a 25% de la densidad del aluminio sólido (es decir, 97,5% a 80% de aire).

La placa de espuma metálica adquirida para la fabricación de la probeta fue la siguiente:

- Una (1) de celda pequeña, 6 in × 10 in × 0,5 in.

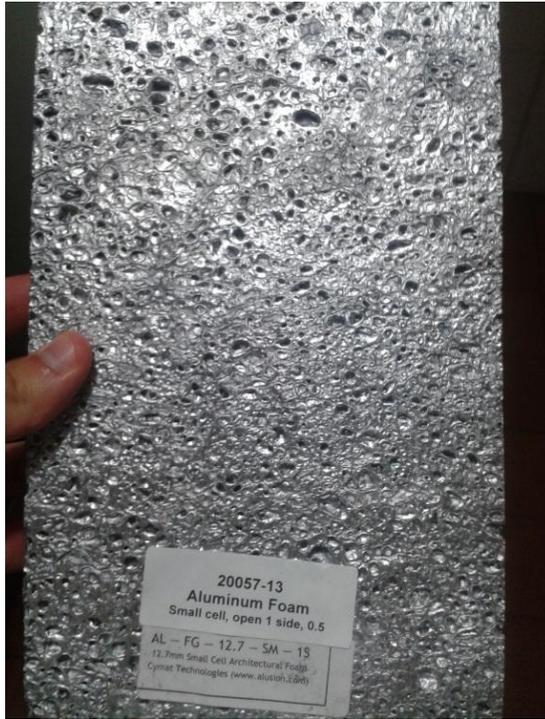


Figura 3.1. Espuma de aluminio Cymat de celda pequeña.

3.2. Estimación de densidad relativa

Con la finalidad de estimar la densidad relativa, ρ^*/ρ_s , de la espuma adquirida, se pesó en una balanza analógica el panel de espuma (ver apartado 2.1.3) con un volumen conocido y se estimó la densidad.

$$\rho^* = \frac{\text{masa}}{\text{Volumen}} \quad (3.1)$$

Para disminuir cualquier posible error asociado a la lectura o calibración de la balanza, la muestra fue pesada cuatro (4) veces.

3.3. Fabricación de probetas

Teniendo como referencia las recomendaciones que hace la norma ASTM E9 y otros autores (ver apartado 2.3.1), se fabricaron probetas prismáticas de sección transversal cuadrada.

El primer paso, es dimensionar sobre el panel del material la geometría transversal de las probetas, luego se procede a realizar el corte con el método de sierra cinta (ver apartado 2.3.1).



Figura 3.2. Probeta prismática de espuma de aluminio, tipo Cymat.

3.4. Ensayo cuasiestático uniaxial a compresión

Haciendo uso de la máquina de ensayo universal se realizaron los ensayos de compresión a una velocidad constante del desplazamiento de los cabezales igual a 1,41 mm/s, con la finalidad de que el parámetro velocidad de deformación no influya en el comportamiento de las espumas en estudio.

En el ensayo se esparció una película de grasa lubricante grafitada sobre las superficies de las probetas que estaban en contacto con los cabezales de la máquina, haciendo el efecto de lubricación y evitando el fenómeno de abarrilamiento previo (ver apartado 2.3.1).

Las probetas fueron ubicadas en el centro del cabezal fijo de la máquina de ensayo universal (ver figura 3.3).



Figura 3.3. Posición de las probetas entre los cabezales de la máquina.

Se fijó de todas las celdas de carga de la máquina, la correspondiente a 10000 kg, debido a que es una escala más precisa y el material supera los 4000 kg de carga de la escala inferior.

La compresión de las probetas se realizó hasta alcanzar una deformación total de 0,65 (ver apartado 2.1.3).

Durante cada ensayo, se realizaron once (11) descargas, cada descarga cuenta con el siguiente procedimiento:

- Se desplaza el cabezal móvil de la máquina hasta ponerse en contacto con la probeta.
- El control de parada de la máquina se establece para un valor de carga establecido (iguales en cada descarga de todos los ensayos).
- Una vez en contacto ambas superficies comienza el proceso de compresión, a velocidad constante.
- El proceso de compresión termina cuando se alcanza el valor de carga establecido.
- Se retira la carga, dejando que el cabezal móvil se desplace a su posición inicial.
- Se retira la probeta del cabezal fijo.
- Las caras de la probeta que contienen la grasa, son limpiadas con solvente.
- Registro fotográfico, medición de volumen instantáneo y longitud instantánea.

Una vez culminado el proceso descrito, este se repite once (11) veces incrementando los valores de carga establecido, hasta llegar a un valor de deformación total igual a 0,65, para obtener el resultado de un (1) ensayo. En total se realizaron siete (7) ensayos.

3.5. Recopilación de datos

La longitud en cada instante de deformación (l_i), se medirá con un vernier digital de precisión (una décima de milímetro). Cada medición consta de cinco (5) registros realizados en puntos al azar de la sección transversal de las probetas, esto con el fin de tener un registro de mediciones que permita un análisis estadístico de los mismos.

Para analizar el daño estructural que sufren las probetas cuando se someten a carga, se realizará una inspección visual a partir de una serie de fotografías en determinados instantes de la descarga. De esta forma se observará el deterioro de las paredes de los poros de la espuma de aluminio en las zonas visibles y el cambio de densidad de la misma.

Las espumas metálicas por ser materiales porosos, presentan cambios de densidad durante la compresión, esto se ve reflejado en una variación de volumen, por tanto se plantea realizar la estimación del volumen para cada instante de la descarga mediante el Teorema de Arquímedes (ver apartado 2.3.4), donde las probetas ensayadas serán sumergidas en una probeta graduada (con escala de medición en ml, la apreciación del instrumento es de un milímetro) con agua en su interior, con el fin de obtener el volumen desplazado por el espécimen.

La espuma de aluminio al contener gases en su estructura, posee una densidad menor a la del agua, por tanto flota cuando entra en contacto con el agua. Por esta razón, se sujetará a un dispositivo (con un volumen V_e) que tenga una densidad mayor a la del agua para poder sumergirla, y así conocer el volumen desplazado por el dispositivo y la espuma (V_d). Dicho proceso se ve reflejado en la siguiente ecuación:

$$V_i = V_d - V_e \quad (3.2)$$

Donde, V_i representa el volumen desplazado por la probeta en un instante determinado.

Esta medición de volumen se realiza cinco (5) veces en cada descarga del ensayo, entre cada medición se cambia el agua contenida en la probeta graduada con

el fin de calibrar el instrumento de medición constantemente y las probetas son secadas para eliminar la presencia de agua en los poros.

3.6. Elaboración de las curvas Esfuerzo-Deformación

3.6.1. Esfuerzo-Deformación nominal

Teniendo en cuenta, los valores de carga aplicada (P_i) para cada descarga y área inicial (A_0), la cual proviene de la siguiente expresión:

$$A_0 = \frac{V_0}{l_0} \quad (3.3)$$

Donde, V_0 es volumen inicial y l_0 la longitud inicial del espécimen en estudio. Se halló haciendo uso de la ecuación 2.1 ($\sigma_N = P_i/A_0$), el esfuerzo nominal para cada punto de construcción de la curva. Para la obtención de la deformación nominal, se empleará la ecuación 2.2 ($\varepsilon_N = (l_0 - l_i)/l_0$).

3.6.2. Esfuerzo-Deformación real

Para el cálculo de esfuerzo real en un instante determinado del ensayo de compresión, se relaciona una carga con el área transversal en contacto con los cabezales para ese mismo instante, ver ecuación 2.3 ($\sigma_R = P_i/A_i$), dicha área (A_i) es obtenida a partir del volumen (V_i) instantáneo y la longitud instantánea (l_i) de la probeta, calculado como se menciona en el apartado 3.3, con la siguiente relación:

$$A_i = \frac{V_i}{l_i} \quad (3.4)$$

La deformación real se obtendrá a partir de la ecuación 2.4 ($\varepsilon_R = \ln(l_i/l_0)$).

Tanto para la curva nominal como para la curva real, se obtendrán las gráficas haciendo uso de la hoja de cálculo de Microsoft Excel, introduciendo los valores de esfuerzo y deformación obtenidos para cada punto de las descargas realizadas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de las estimaciones experimentales realizadas.

CAPÍTULO IV

4.1. Dimensionamiento de las probetas

Tabla 4.1. Mediciones de masa del panel de espuma metálica.

Número de mediciones	Masa (kg)
1	0,270
2	0,268
3	0,271
4	0,271
Media	0,270

Al estimar una media entre los valores de masa obtenidos (Tabla 4.1) y con el volumen del panel igual a $4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, se hizo uso de la ec.3.1 a fin estimar el valor de densidad del panel: $\rho^* = 549,23 \text{ kg/m}^3$, para la espuma tipo Cymat. Considerando que la densidad del aluminio y sus aleaciones es de aproximadamente $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$ (Shackelford, 2006), la densidad relativa de la espuma es:

$$\rho^*/\rho_s = 0,203 \text{ (20,3\%)}$$

Dicho valor nos indica que la relación de material sólido-gas es de 20,3%-79,7% respectivamente; con lo cual se concluye que existe una mayor presencia de gases en toda la estructura.

Debido a que la caracterización estructural de la espuma no es competencia del presente estudio y por el inherente tratamiento estadístico en la estimación de los parámetros de celda, fueron empleadas como referencia las mediciones reportadas por (Mukai y otros, 2006) para espumas metálicas con iguales densidades relativas a la utilizada en esta investigación ($\rho^*/\rho_s = 0,203$). Tales mediciones reportan que la espuma debe tener un tamaño medio de celda, d , de 2 mm.

Para la fabricación de probetas de espuma metálica destinadas a ensayo de compresión cuasiestático, se tomaron en cuenta las recomendaciones expuestas en la norma ASTM E9 y las consideraciones provenientes de la relación L/d (ver apartado

2.3.1). En base a ello, se fabricaron probetas prismáticas de sección transversal cuadrada, tal como se resume en la siguiente tabla.

Tabla 4.2. Propiedades y dimensiones de la probeta en estudio.

Espesor (l_0) (mm)	Densidad (ρ^*) (Kg/m ³)	Densidad Relativa (ρ^*/ρ_s) (%)	Tamaño medio de celda (d)(mm)	Dimensiones de los lados (mm)	Relación (l_0/d)
12,7	549,23	20,3	2	30*30	6,35

4.2. Ensayo a compresión cuasiestático uniaxial

Es importante destacar que, a la hora de determinar el esfuerzo y la deformación de cierto material, se han de tener en cuenta los efectos de la deformación elástica de los componentes de la máquina de ensayo (ver apartado 2.3.3). El factor de corrección por deformación elástica de los elementos de máquina estimado mediante la ecuación 2.9, fue de: $1,26 \times 10^{-6}$ mm/N. Este valor nos indica que podemos despreciar la influencia de la deformación elástica de los elementos de máquina.

En las espumas metálicas la deformación elástica tiene poca influencia en la estimación de la deformación total (ver apartado 2.3.3). En la figura 4.1 se muestran las pendientes de ocho (8) descargas realizadas para diferentes valores de esfuerzo y deformación, durante un ensayo de compresión, éstas descargas se obtienen de las curvas Carga-Desplazamiento que proporciona la máquina de ensayo universal sobre un papel milimetrado. Puede apreciarse en la figura 4.1, cómo estas líneas de descarga son prácticamente verticales, lo cual es un indicativo de que el material tiene una mínima recuperación elástica que no influye considerablemente en su comportamiento mecánico; es por ello que, para las estimaciones realizadas del valor de deformación total, se desprecia la deformación elástica, $\epsilon_e \approx 0$.

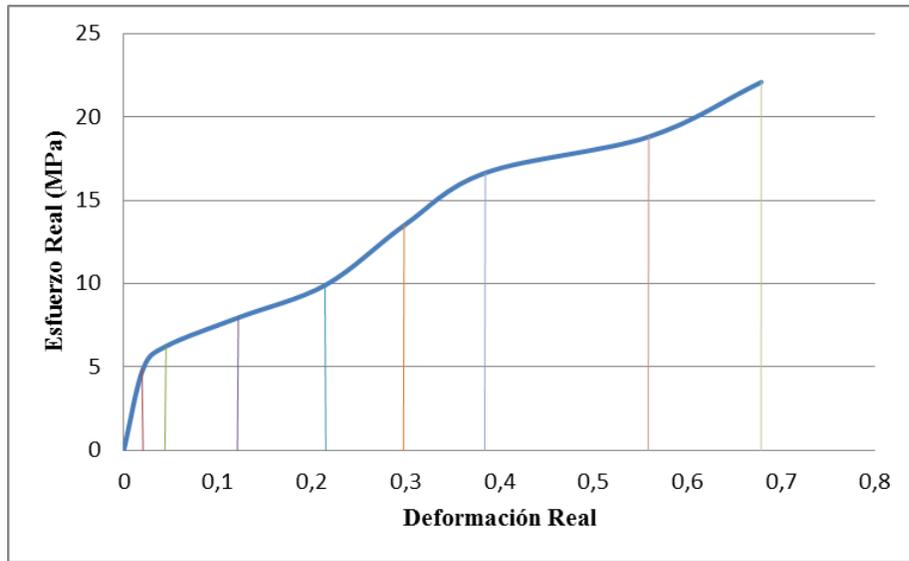


Figura 4.1. Curva Esfuerzo-Deformación real cuasiestática sometida a compresión y a descargas a distintos niveles de deformación.

4.3. Análisis Estadístico

Los datos que permitieron la construcción de una curva nominal y la estimación de una curva real (ver anexo1), fueron obtenidos mediante un procedimiento experimental; por este motivo, presentan un margen de apreciación asociado a errores típicos que se comenten durante la realización de esta experiencia (ver apartado 3.5). Estos datos experimentales fueron sometidos a un análisis estadístico, debido a que la metodología empleada es novedosa y no se poseen registros bibliográficos respecto al comportamiento real de este material.

Para la aplicación de dicho análisis, se trabajó con una población de 35 muestras ($n = 35$) en cada punto de descarga de las curvas Esfuerzo-Deformación (cinco (5) mediciones de V_i en cada descarga, de los siete (7) ensayos realizados); garantizando de esta manera una distribución normal, tal cual se señala en el teorema del límite central (Montgomery y Runger, 2010).

A continuación, se presenta el análisis estadístico para el primer punto de la representación gráfica:

- Para un valor de Fuerza, $P = 0$ N

Dicha fuerza representa el punto inicial de la curva Esfuerzo-Deformación (la probeta no ha sido ensayada); por tanto no se aplicó el teorema del límite central a la longitud inicial (se conoce por las características de la espuma proporcionada por el fabricante que, $l_0 = 12,7$ mm). Únicamente, se empleó el teorema al volumen instantáneo (V_i).

En la tabla 4.3., se resumen los valores de las treinta y cinco (35) mediciones de volumen instantáneo (V_i) y el “Vi medio muestral”, que representa el valor promedio del volumen de cada ensayo.

Tabla 4.3. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del primer punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación.

Ensayo	Mediciones (ml)					Vi medio muestral (ml)
	1	2	3	4	5	
1	9,00	8,50	8,60	8,70	8,60	8,68
2	9,00	9,10	8,80	9,20	9,00	9,02
3	11,00	10,50	10,50	11,50	11,50	11,00
4	8,50	8,50	8,30	8,20	8,00	8,30
5	9,50	10,00	9,50	10,30	10,10	9,88
6	8,50	8,50	8,00	8,30	8,40	8,34
7	10,50	10,30	10,20	10,30	10,00	10,26

Sin embargo, por tratarse del mismo material, se puede observar que existe variación de volumen promedio entre cada probeta; esto se debe, a la configuración estructural que posee cada espécimen.

Al “Vi medio muestral” de los ensayos se le aplicó una estadística descriptiva y se encontró el valor de media y desviación estándar de V_0 ; dichos valores se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del primer punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación.

Media (ml)	9,35
Desviación Estandar (ml)	1,04

Esta tabla refleja que la población a partir de la media, tiene una dispersión igual al valor de su desviación estándar, lo cual quiere decir que podemos encontrar valores de volumen comprendidos entre los siguientes intervalos señalados por (Devore, 2005): $(\mu-3\sigma_{desv}, \mu-2\sigma_{desv}, \mu-\sigma_{desv}, \mu, \mu+\sigma_{desv}, \mu+2\sigma_{desv}, \mu+3\sigma_{desv})$. Dichos intervalos, nos indican que los valores de la población (ver tabla 4.3) están contenidos dentro del rango admisible de ocurrencia. Se puede observar en la figura 4.2., la frecuencia que tienen los valores de volumen para cada intervalo; como es de esperarse teóricamente, la mayor frecuencia se encuentra ubicada para valores cercanos a la media. La concentración de la población en este intervalo, es un indicativo de la gran precisión con la cual fueron recolectados los datos experimentales.

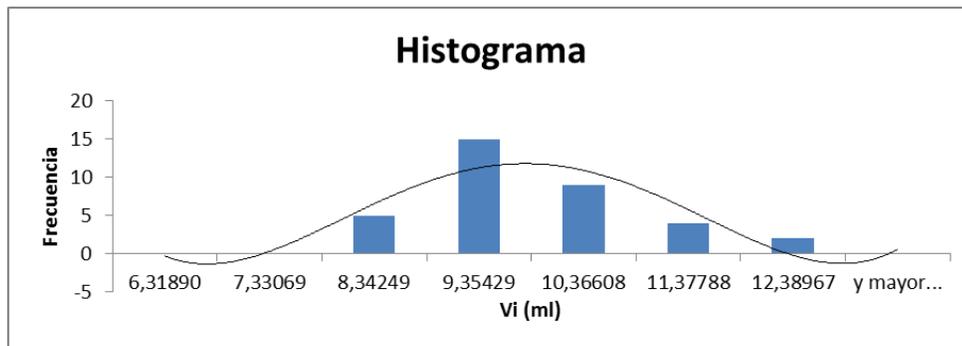


Figura 4.2. Histograma de los valores V_i (1er. Punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación).

Teóricamente, se asegura una distribución normal para una población con un $(n \geq 30)$, (ver apartado 2.3.5), esto fue verificado aplicando la función de distribución normal de la hoja de cálculo de Microsoft Excel, a los valores de media muestral de la tabla 4.3 y representado gráficamente en la figura 4.3.

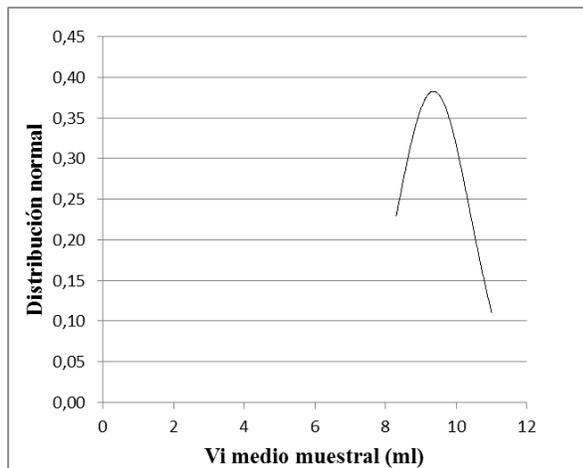


Figura 4.3. Distribución normal de “Vi medio muestral” del primer punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación.

La distribución normal de la figura 4.3, tiene forma de campana de Gauss y además es simétrica en el valor de la media, esto coincide con la teoría de (Runger & Montgomery, 2010), por lo tanto es posible aplicar la teoría del límite central (ver apartado 2.3.5).

Tabla 4.5. Valores de V_i y l_i corregidos para el primer punto de la gráfica Esfuerzo-Deformación.

V_0	9,35 ml
l_0	12,70 mm

Los valores que se presentan en la tabla 4.5., son los valores de V_0 y l_0 , que serán usados para la construcción de la curva Esfuerzo-Deformación. Donde V_0 es igual a la media encontrada de la población en estudio, y l_0 corresponde al valor de la tabla por ser la longitud inicial de la probeta. Es importante resaltar, que para los l_i y V_i de los puntos siguientes de la gráfica, se aplicó la misma metodología de análisis estadístico, con la finalidad de minimizar al máximo los errores acarreados por las mediciones (ver anexo 2).

4.4. Curvas Esfuerzo-Deformación corregidas

Una vez realizado el análisis estadístico de los datos experimentales, se procedió a la construcción de las curvas Esfuerzo-Deformación corregidas.

Es importante resaltar que la metodología empleada, puede ser utilizada para cualquier tipo de espuma metálica; caso contrario ocurre con los resultados que aquí se presentan, ya que los mismos solo sirven para caracterizar la espuma metálica de aluminio del tipo Cymat con un tamaño de poro $d=2\text{mm}$, y una densidad relativa del 20,3% (ver apartado 4.1).

A continuación, se muestra la representación gráfica de las curvas Esfuerzo-Deformación nominal y real para una espuma de aluminio con las características reseñadas en el párrafo anterior.

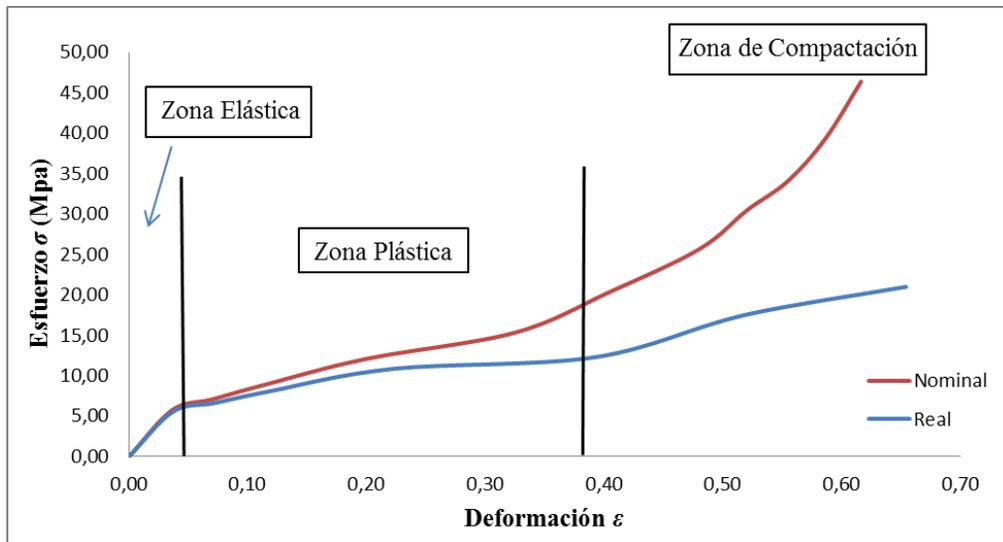


Figura 4.4. Curvas Esfuerzo-Deformación. Espuma de Aluminio Cymat $d=2\text{mm}$, $\rho^*/\rho_s = 0,203$.

En la figura 4.4, se observa la secuencia típica de deformación del espécimen durante un ensayo uniaxial cuasiestático a compresión, destacando las tres zonas principales de la curva que responden al comportamiento del material ante un esfuerzo aplicado.

- Zona elástica: Está representada por el tramo inicial de la curva Esfuerzo-Deformación, que parte desde el origen hasta un punto conocido como límite elástico, el cual se estima como lo indica el apartado 2.2.4.

La zona elástica de las curvas Esfuerzo-Deformación (ver figura 4.4) de la espuma metálica, a diferencia de los sólidos, no está representado por un tramo lineal; por tanto, en dicha zona no se cumple la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, como es referido en la ley de Hooke ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) (Shackelford, 2006).

Observando la primera descarga realizada en la zona elástica (ver figura 4.1), nos damos cuenta que el material no se recupera completamente al retirar la carga, por lo tanto, existe una pequeña cantidad de deformación permanente. Hecho que se atribuye a la existencia de plasticidad localizada que señalan los autores (Ashby y otros, 2000) y (Bastawros y otros, 2000). Este fenómeno se debe en primera instancia, al pandeo y fractura de las paredes de las celdas, que impiden que el material se recupere totalmente en la zona elástica como lo haría un espécimen sólido sometido a compresión. El fenómeno de plasticidad localizada genera una disminución de la pendiente del tramo de carga inicial (zona elástica), haciendo que el material disminuya su rigidez.

De la figura 4.4, se puede observar que la curva nominal y la curva real, presentan un comportamiento similar, debido a cambios muy pequeños en las dimensiones del área transversal del espécimen, haciendo que los valores de esfuerzo estimados para ambas curvas se asemejen.

- Zona plástica: Una vez superado el límite elástico, se observa la separación entre ambas curvas (ver figura 4.4), dando inicio a la zona plástica del material. En este tramo plástico se observa que la curva real está por debajo de la curva nominal, ya que en la estimación del esfuerzo ingenieril, el área transversal (A_o) del espécimen se mantiene constante. Sin embargo, se sabe que el área transversal instantánea (A_i) de la probeta varía durante el proceso de compresión, disminuyendo así el esfuerzo al que realmente está sometido el material.

En la zona plástica, conforme se incrementa la carga, el espécimen empieza a sufrir una deformación permanente, por tanto, la relación esfuerzo y deformación no es proporcional. La región de la curva Esfuerzo-Deformación Real (ver figura 4.4) comprendida entre el comienzo de la deformación plástica (superado el límite elástico) y el comienzo de la zona de compactación, puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = 16,02 * \varepsilon_T^{0,3} \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 representa el comportamiento de la zona plástica de la curva Esfuerzo-Deformación Real, para la espuma metálica tipo CYMAT, de densidad relativa 20,3%. Dicha expresión, viene dada por la relación de potencia entre el esfuerzo y la cantidad de deformación total (ver apartado 2.2.4); donde los valores de las constantes están representados por: $\sigma_0 = 16,02$ MPa, y $m^* = 0,3$. El valor del exponente de endurecimiento por deformación (m^*) de la espuma metálica es mayor que el del aluminio recocido registrado por (Datsko, 1967), $m_s = 0,20$. Esto refleja que la morfología estructural de la espuma posee capacidad para deformarse plásticamente; es por ello que, el material es propicio para aplicaciones que impliquen la absorción de energía. Observando el comportamiento en la zona plástica de la curva real (ver figura 4.4), se puede establecer que la espuma metálica tipo Cymat presenta un comportamiento dúctil (debido al ancho de la zona plástica); reflejándose así la buena capacidad del material para ser deformado plásticamente. Una implicación práctica de la ductilidad es la conformabilidad que tienen las espumas durante la fabricación.

La espuma metálica se utiliza a nivel industrial en aplicaciones que tienen que ver más con el conformado y muy poco es utilizada para operaciones de diseño. Es por ello, que la combinación de la curva real estimada (ver figura 4.4) y la ecuación que representa la zona plástica (ec. 4.1), nos permite establecer una referencia respecto al verdadero comportamiento que debe

tener este material en aplicaciones industriales, y además nos da una interpretación correcta de las propiedades mecánicas que en la literatura son estimadas únicamente a partir de la curva ingenieril.

- Zona de compactación: Una vez alcanzada la deformación de compactación, la espuma metálica entra en un proceso de densificación, que se ve reflejado en el cambio de su estructura, pasando de ser un sólido celular a uno con un comportamiento similar al de un sólido macizo.

En la figura 4.4, se puede observar que la curva nominal en la zona compactación crece abruptamente a variaciones de deformación total pequeñas, ya que, se necesita aplicar una mayor cantidad de carga para deformar el espécimen; lo que implica, un aumento del esfuerzo que se estima con un valor de área constante. En cambio, la curva real (figura 4.4) en la zona de compactación, presenta un crecimiento moderado de su forma, esto se debe a que en la estimación del esfuerzo; se utiliza el área instantánea del espécimen que varía durante el proceso de compresión.

4.5. Obtención de propiedades

Partiendo de la curva real estimada de la figura 4.4., se obtuvieron las propiedades mecánicas que se reflejan a continuación.

4.5.1. Módulo de Young

Como teoría de los materiales sólidos, el módulo de Young se estima en la figura 4.5 como la pendiente de la línea de carga inicial, resultando un valor de $E=0,149$ GPa, correspondiente al valor de la pendiente de la curva en la zona elástica.

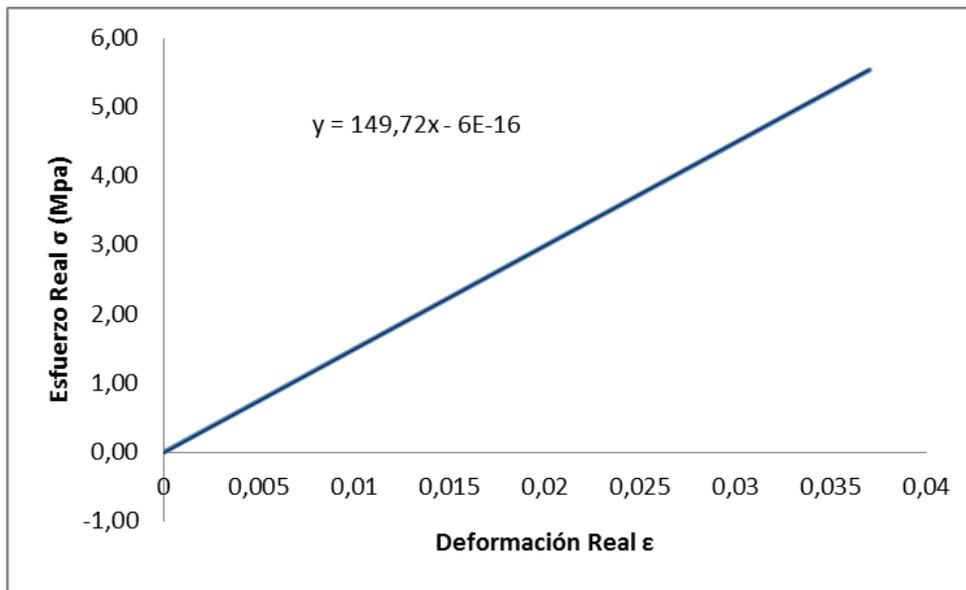


Figura 4.5. Tramo elástico de la curva Esfuerzo-Deformación Real estimada.

Este valor no tiene validez como propiedad mecánica generalizada de la espuma metálica. Mediciones de deformación superficial realizadas por (Bastawros y Mcmanius, 1998) y por (Bastawros y otros, 2000) han indicado la existencia de plasticidad localizada a tensiones por debajo del límite elástico de la espuma metálica, lo cual tiende a reducir la pendiente de su curva Esfuerzo-Deformación en la zona elástica. Hecho que está atribuido a una concentración de tensiones en las paredes de las celdas.

Es por ello que se establece como módulo de Young verdadero, al valor de la pendiente de una línea de descarga realizada aproximadamente al 75% del valor de la resistencia a la compresión (σ_c), ver figura 4.6.

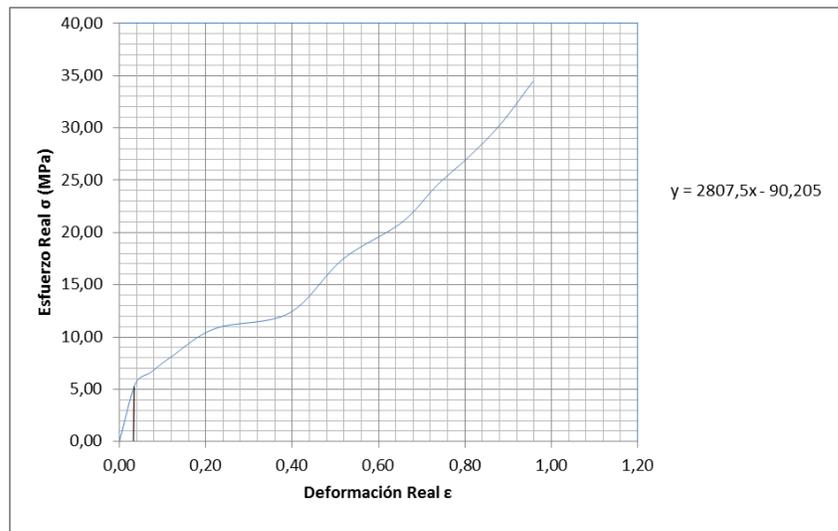


Figura 4.6. Descarga al 75% de la resistencia a la compresión y ecuación de la recta de descarga.

El valor del módulo de Young para la espuma metálica tipo Cymat es de $E=2,8075$ GPa. Un valor considerablemente mayor al obtenido por la línea de carga inicial, que no se ve afectado por las técnicas de medición.

El valor de módulo de Young estimado para la espuma metálica tipo Cymat, de densidad relativa 20,3%, es un valor cercano al obtenido previamente para esta espuma de aluminio por (Ashby y otros, 2000), con un valor de desviación estándar de 8%.

La rigidez de este material, sufre un incremento una vez superada la zona elástica, debido a la compactación progresiva del material que ocasiona un cambio en su respuesta mecánica por comenzar a aproximarse a la de un sólido macizo. Este incremento de rigidez asociado con la densificación de la espuma, se inicia a un valor de deformación total inferior al de la denominada deformación de compactación.

4.5.2. Resistencia a la fluencia

La resistencia a la fluencia (σ_f), se obtuvo al intersectar la recta paralela al tramo elástico, que pasa por el 0,2 por ciento de la deformación total, con la curva

Esfuerzo-Deformación real (ver figura 4.7). Este punto de intersección simboliza el inicio de la zona plástica.

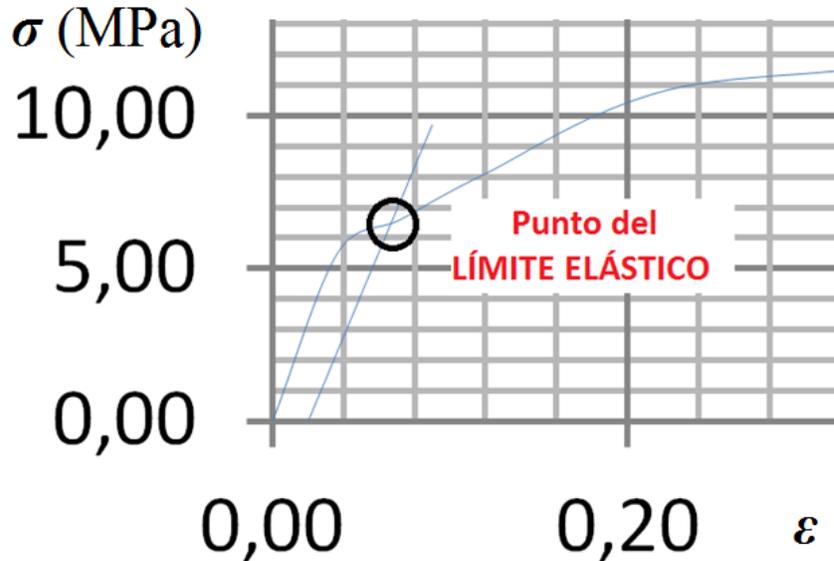


Figura 4.7. Representación ampliada de la resistencia a la fluencia en la curva Esfuerzo-Deformación Real estimada.

El valor obtenido de resistencia a la fluencia es de: $\sigma_y = 6,5 \text{ MPa}$. Este valor se encuentra en el rango establecido por (Ashby y otros, 2000). Dicho rango, va desde 0,04 MPa hasta 7 MPa, para una espuma metálica tipo Cymat de densidad relativa similar.

Una vez superado este valor estimado de la resistencia a la fluencia (σ_y), para la espuma metálica tipo Cymat de densidad relativa 20,3%, el material presenta deformaciones permanentes.

4.5.3. Resistencia a compresión

La cantidad de esfuerzo necesario para deformar permanentemente la espuma metálica tipo Cymat y que coincide con el inicio del colapso plástico de una franja de celdas, está representado por el valor de la resistencia a compresión. De la figura 4.8, se puede observar que esta propiedad tiene un valor estimado de: $\sigma_c = 7 \text{ MPa}$.

Este registro, comparado con el valor de resistencia a la fluencia, es muy similar. Ello se debe al fenómeno de plasticidad temprana que estos materiales experimentan cuando son sometidos a compresión. De la misma manera, este valor de resistencia a compresión está comprendido en el rango de valores establecido por (Ashby y otros, 2000). Dicho rango, va desde 0,04 MPa hasta 7 MPa, para una espuma metálica tipo Cymat de densidad relativa similar.

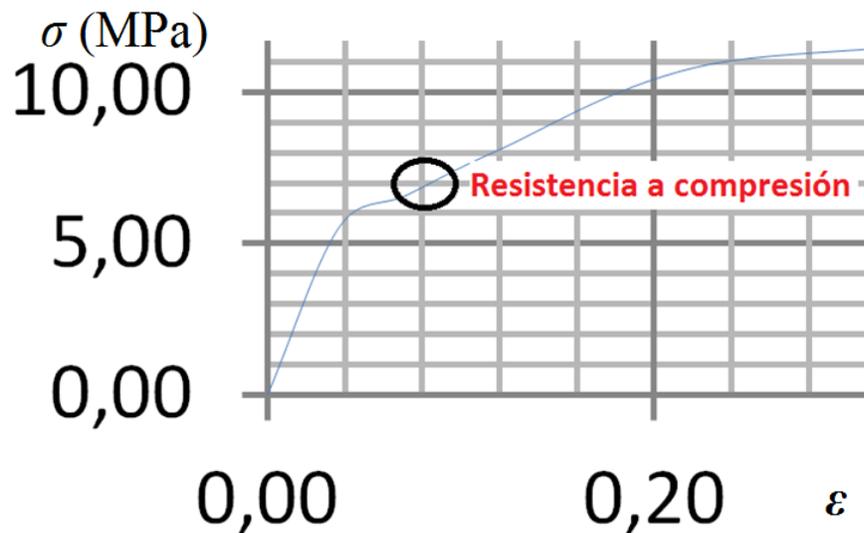


Figura 4.8. Representación ampliada de la resistencia a la compresión en la curva Esfuerzo-Deformación Real estimada.

El valor estimado de resistencia a compresión mediante la ecuación 4.1, es de $\sigma_c = 7,51$ MPa, estableciéndose una diferencia porcentual de siete (7) porciento con la resistencia a compresión experimentalmente obtenida.

4.5.4. Deformación de compactación

Podemos observar de la figura 4.9, que la deformación de compactación para la espuma metálica tipo Cymat es de: $\epsilon_D = 0,38$. Lo cual quiere decir, que la espuma empieza a densificarse después de este valor, esto trae como consecuencia un cambio en la respuesta mecánica del material, pasando de ser poroso a ser un material con un comportamiento similar al de un sólido macizo cercano a los valores del material base (en este caso el aluminio).

De la figura 4.9, también podemos destacar que la eficiencia total de la espuma (η), que está referida a la cantidad de energía que puede absorber un material, es del 76% aproximadamente, con lo que se confirma la teoría de (Mukai y otros, 1999), de que la espuma metálica, en este caso la tipo Cymat, es propicia para aplicaciones de impacto a partir de valores de eficiencia superiores al 70%.

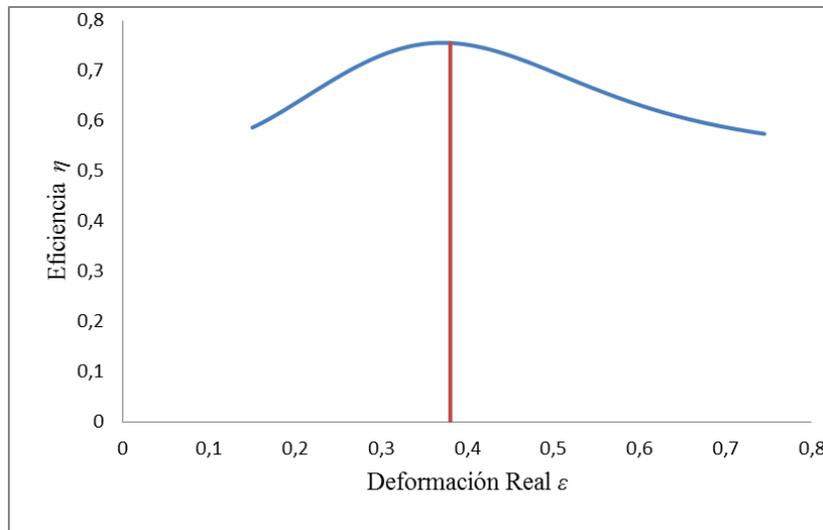


Figura 4.9. Curva Eficiencia-Deformación Real.

La energía absorbida por unidad de volumen (W) hasta la deformación de compactación (ϵ_D) de las espumas metálicas tipo Cymat, de densidad relativa 20,3%, fue de aproximadamente $3,42 \text{ MJ/m}^3$, que es un valor similar al obtenido previamente para esta misma espuma de aluminio (con densidad relativa similar) por (Miyoshi y otros, 1999).

4.6. Análisis del daño estructural

Este análisis se realiza mediante la inspección visual de una serie de fotografías que fueron tomadas sobre las probetas prismáticas de espuma tipo Cymat. En las figuras 4.10 y 4.11, se hace evidente que las probetas cuando son sometidas a compresión uniaxial cuasiestática, ocurre un cambio de volumen. Al inicio, debido a las porosidades del material, la densidad del mismo es menor que la del agua y por ende, flota (ver figura 4.10). Como es conocido de la teoría, este material no cumple

con la ley de conservación de volumen y a medida que avanza la deformación, el volumen de la estructura disminuye, esto se debe al comienzo del colapso plástico y al deterioro de las paredes de los poros, produciendo entonces, un aumento de densidad que se traduce en una sumersión de la espuma metálica en el agua (ver figura 4.11).



Figura 4.10. Probeta sin ensayar tipo Cymat, flotando en el líquido.



Figura 4.11. Probeta ensayada tipo Cymat, sumergida en el líquido.

El cambio de densidad que sufre la espuma metálica cuando es sometida a compresión, es atribuido a la variación en el volumen. Se hace constante una disminución del volumen de la estructura a lo largo de todo el incremento de la

deformación total; comportamiento esperado, ya que a medida que comienza el proceso de compresión, los compartimientos porosos van disminuyendo sus dimensiones, haciendo que el volumen de gases que en un principio estos ocupan, ya no exista, produciéndose así una pérdida de volumen al incrementar ese colapso plástico.

Para visualizar el fenómeno descrito, se utilizó la técnica estadística de la regresión lineal. Se observa de la figura 4.12, cómo influye la fuerza que se aplica a la probeta en el volumen de la misma a lo largo de todo el proceso de compresión. Resulta sencillo concluir de esta gráfica que, a medida que incrementa la fuerza, el volumen de la probeta va disminuyendo.

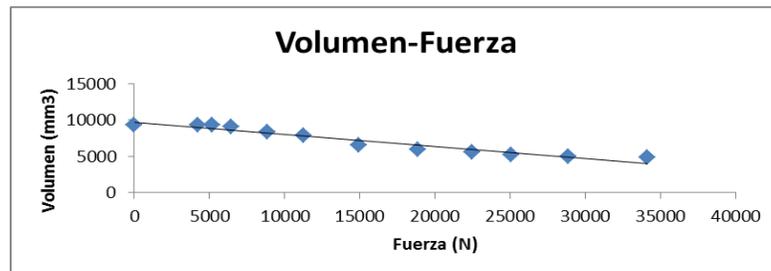


Figura 4.12. Representación gráfica de la regresión lineal.

La figura 4.13, muestra el estado final de una probeta sometida a compresión y se compara con una del mismo tipo sin ensayar. Son notables dos fenómenos: el primero, es el cambio de sección transversal a medida que varía la longitud del espécimen sometido a compresión. El cambio en el área, disminuye el valor de esfuerzo real que se utiliza para la estimación de la curva Esfuerzo-Deformación real, es por ello, que la curva real está por debajo de la curva nominal a partir de la región plástica (ver figura 4.4). Y un segundo fenómeno donde se observa el nivel de compactación que alcanza la espuma metálica, esto producto de la existencia de un deterioro y degradación del material contenido en las paredes de la celda, lo que trae como consecuencia, un incremento de la flexión de los poros hasta producirse la fractura, y por ende, la compactación del material.

Se espera que los poros a nivel interior se comporten de forma similar a lo que macroscópicamente a nivel exterior se observa, y para estudiar mejor la influencia que tienen la flexión y el alargamiento de las paredes de la celda en la rigidez del material, se necesitaría de un análisis microscópico que determine la heterogeneidad propia del material en relación con el tamaño, forma y distribución de poros.



Figura 4.13. Comparación entre dos probetas prismáticas de Cymat: una sin ensayar (der) y la otra después de haber sido ensayada (izq).

4.7. Análisis de la influencia de la variación de la densidad de la espuma metálica

Estableciendo una comparación de las curvas nominales que hacen referencia a las espumas metálicas tipo Cymat de densidades relativas: 5%, 10% y 15% correspondientemente, que se presentan en la figura 2.22 y la curva nominal obtenida de la espuma tipo Cymat (densidad relativa 20,3%) de la figura 4.4 en este trabajo, se obtuvieron las siguientes observaciones, tomando como base la densidad relativa.

- Zona elástica

A medida que aumenta la densidad relativa, se hace evidente que el material se va tornando más rígido. Este incremento en la rigidez, se debe a que en la estructura de la espuma, existe mayor cantidad de material sólido. En las curvas Esfuerzo-Deformación nominal, a medida que aumenta la densidad relativa, el tramo elástico

posee mayor altura y un aumento de la pendiente, indicativo de que el módulo de Young es mayor.

El módulo de Young, para espumas metálicas tipo Cymat, de densidad relativa 5%, es de 0,5 GPa (Cymat Technologies Ltd, 2008). Comparando este valor con el estimado en el apartado 4.5.1 de una espuma de mayor densidad relativa, se puede establecer, que la presencia de mayor contenido de material sólido en la estructura de la espuma, contribuye a un incremento de la rigidez del material.

Asimismo, la resistencia a la fluencia para espumas metálicas tipo Cymat, de densidad relativa 5%, es de 0,7 MPa (Cymat Technologies Ltd, 2008), mientras que la estimada en este estudio fue de 6,5 MPa; esto deja en evidencia que es necesario la aplicación de un mayor esfuerzo para provocar una deformación permanente en el material de mayor densidad relativa.

- Zona Plástica

Una vez superado el límite elástico, el material comienza a deformarse de manera permanente. Al inicio de la zona plástica, se puede observar que, en las curvas Esfuerzo-Deformación nominal (ver figura 2.22), se presentan ondulaciones que son producto de la presencia de gases en el andamiaje interno de las espumas, generando así, una caída del valor de esfuerzo. Se nota que dichas ondulaciones disminuyen a medida que aumenta la densidad relativa de las espumas, esto es causado por un mayor contenido de material sólido en el volumen total.

Las espumas metálicas comienzan a experimentar un cambio en la respuesta mecánica una vez superada la deformación de compactación. Esto genera una densificación del material, pasando de ser de una estructura compuesta por material sólido-gas, a una prácticamente sólida maciza. Esta deformación es menor para espumas metálicas tipo Cymat con una densidad relativa mayor.

Una característica importante que presentan todas estas curvas de Esfuerzo-Deformación nominal (ver figura 2.22 y figura 4.4), es que una vez superada la

deformación de compactación, el esfuerzo tiende a incrementarse de manera abrupta con variaciones pequeñas de deformación total, dejando en evidencia que se está aproximando al comportamiento de un cuerpo sólido.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta las conclusiones extraídas del análisis de los resultados más importantes obtenidos en el trabajo especial de grado y una propuesta de trabajo futuro a ser desarrollado para enriquecer la línea de investigación tratada.

CAPÍTULO V

5.1. CONCLUSIONES

Una vez estudiado experimentalmente el comportamiento mecánico a compresión, en condiciones estáticas, de una espuma de aluminio tipo Cymat, con un 20,3% de densidad relativa, se destacan las siguientes conclusiones:

- Se obtuvo una estimación del comportamiento real de la espuma metálica tipo CYMAT, de densidad relativa 20,3%, a partir de la curva Esfuerzo-Deformación Real y la ecuación de Hollomon, representativa de la zona plástica.

$$\sigma = 16,02 * \epsilon_T^{0,3}$$

- La zona elástica para las espuma metálica tipo Cymat, no representa una zona de proporcionalidad, por tanto, el tramo de la curva Esfuerzo-Deformación no es lineal.
- Durante un estudio realizado en compresión cuasiestática con descargas de la espuma tipo Cymat, se ha evidenciado que la deformación elástica (recuperación del material), ϵ_e , se puede despreciar, debido a que no influye considerablemente en la deformación total que sufre el material.
- El material, al ser poroso y no cumplir con la ley de continuidad, presenta una disminución del volumen, a medida que se aplica el ensayo de compresión, esto afecta al área que se considera para la estimación del esfuerzo y por lo tanto, incide directamente sobre la forma de la curva Esfuerzo-Deformación real.
- Tras estimar la curva real de la espuma metálica tipo Cymat, se evidencia la diferencia existente en la región plástica con la curva nominal obtenida, dicha diferencia es importante a la hora de predecir un comportamiento del material cuando es utilizado en operaciones de conformado.
- Al someter a compresión uniaxial cuasiestática probetas prismáticas de la espuma, se ha encontrado que ésta tiene un comportamiento mecánico

macroscópicamente dúctil y consistente con el que típicamente exhiben el mismo tipo de material.

- En compresión cuasiestática la espuma de aluminio comienza a presentar plastificación localizada en las paredes de las celdas, inmediatamente después de iniciar el proceso de carga, lo que ocasiona que el módulo de Young, E , estimado a partir de líneas de descarga al 75% de su resistencia a compresión, σ_c , sea considerablemente mayor que el estimado con la tangente inicial de la curva real Esfuerzo-Deformación.
- El alto valor de eficiencia (76 %) registrado por los resultados obtenidos, indica que este material es propicio para aplicaciones donde se requiera una gran absorción de energía.
- Una comparación entre la curva nominal obtenida y las registradas en la literatura para el mismo tipo de material, pero a diferentes valores de densidad relativa, permitió demostrar que a medida que aumentamos dicha densidad la rigidez del material también aumenta; mientras que a mayor densidad menor es la deformación de compactación.

5.2. RECOMENDACIONES

Con la finalidad de complementar la investigación desarrollada en este trabajo especial de grado, de modo que se facilite la comprensión y ratificación de algunas de las conclusiones extraídas y de las suposiciones realizadas, es recomendable llevar a cabo diversas tareas a futuro. Estas tareas, que en sí mismas enriquecerían el aún insuficiente conocimiento que se tiene sobre las espumas metálicas, se pueden resumir en las siguientes:

- Emplear otro método para la fabricación de las probetas, por ejemplo: con disco de diamante, chorro de agua a alta presión, entre otros; para minimizar el daño de las celdas durante el proceso de corte que afecta al módulo de Young.
- Realizar ensayos a compresión cuasiestática uniaxial, sobre este tipo de material pero de diferentes densidades relativas, y comparar el comportamiento de la curva real que se estime.
- Estudiar la evolución del módulo de Young durante el proceso de compresión, el cual se ve afectado por la compactación y la degradación de las paredes de las celdas.
- Realizar ensayos dinámicos donde se estudie la influencia de la velocidad de deformación.
- Modular computacionalmente las curvas Esfuerzo-Deformación real y compararlas con las experimentalmente obtenidas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andrews, E.; Gioux, G.; Onck, P.; Gibson, L.;. (2001). Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results. *International Journal of Mechanical Sciences* 43, 701-713.
2. Andrews, E.; Sanders, W.; Gibson , L.;. (1999). Compressive and tensile behaviour of aluminum foams. *Materials Science and Engineering*, 113-124.
3. Artenano Company Limited. (Octubre de 2008). Obtenido de <http://www.artenano.com>.
4. Ashby , M.; Evans, A.; Fleck, N.; Gibson , L.; Hutchinson, J.; Wadley, H.;. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth-Heinemann.
5. ASTM International. (2000). ASTM E9. *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*.
6. Banhart, J. (2000). Manufacturing Routes for Metallic Foams. *JOM*, 22-27.
7. Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 559-632.
8. Banhart, J. (2005). Aluminium foams for lighter vehicles. *Int. J. Vehicle Design*, 114-125.
9. Banhart, J.; Weaire, D.;. (2002). On the Road Again: Metal Foams Find Favor. *Physics Today July*, 37-42.
10. Bastawros , A.; Bart-Smith, H.; Evans, A.;. (2000). Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 48, 301-322.
11. Bastawros, A.; McManuis, R.;. (1998). Case study: use of digital image analysis software to measure non-uniform deformation in cellular aluminum alloys. *Experimental Techniques*, 35-37.
12. Baumgartner, F.; Duarte, I.; Banhart, J.;. (2000). Industrialization of Powder Compact Foaming Process. *Advanced Engieneering Materials* 2, 168-174.
13. Datsko, J. (1967). *Material Properties and Manufacturing Processes*. Michigan: Wiley.

14. Degischer, H.; Kriszt, B.; (2002). *Handbook of Cellular Metals*. WILEY-VCH.
15. Devore, J. (2005). *Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias*. México: Thomson.
16. Gibson, L. (2000). Mechanical Behavior Of Metallic Foams. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 191-227.
17. Gibson, L.; Ashby, M.; (1999). *Cellular Solids*. Cambridge University Press.
18. Grenestedt, J. (1998). Influence of wavy imperfections in cell walls on elastic stiffness of cellular solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 46, 29-50.
19. Gutierrez, J. A.; Oñoro, J. (2008). Espumas de Aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. *Revista de Metalurgia Madrid*, 457-476.
20. Irausquin Castro, I. A. (2012). *Caracterización Mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía*. Leganés (España).
21. Mukai, T.; Kanahashi, K.; Miyoshi, T.; Mabuchi, M.; Nieh, T.; Higashi, K.; (1999). Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminium foam under dynamic loading. *Scripta Materialia*, 921-927.
22. Mukai, T.; Miyoshi, T.; Nakano, S.; Somekawa, H.; Higashi, K.; (2006). Compressive response of a closed-cell aluminium foam at high strain rate. *Scripta Materialia* 54, 533-537.
23. National Physical Laboratory (NPL). (2000). *NPL Workshop on Metal Foams*. UK.
24. Nieh, T.; Higashi, K.; Wadsworth, J.; (2000). Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams. *Materials Science and Engineering*, 105-110.
25. Ramamurty, U.; Paul, A.; (2004). Variability in mechanical properties of a metal foam. *Acta Materialia* 52, 869-876.
26. Runger, G. C., & Montgomery, D. C. (2010). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Arizona: Wiley India.

27. Shackelford, J. F. (2006). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid (España): Pearson Prentice Hall.
28. Sugimura, Y.; Meyer, J.; He, M.; Bart-Smith, H.; Grenstedt, J.; Evans, A.;. (1997). On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams. *Acta Materialia* 45, 5245-5259.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Babcsán, N.; Banhart, J.;. (9-16 de Enero de 2006). *Fluid Foam Physics: A Model for Complex Systems*. Consultado el 16 de febrero de 2013, en: <http://www.maths.tcd.ie/~foams/>
2. Cymat Technologies Ltd. (Octubre de 2008). Consultado el 28 de noviembre de 2012 en: <http://www.cymat.com>.
3. ERG Materials and Aerospace Corp. (Julio de 2011). Consultado el 5 de febrero de 2013 en: <http://www.ergaerospace.com>.
4. Inducor Electrical Testing Group. (1990). Consultado el 14 de abril de 2013 en: www.inducor.com.ar.
5. Isotech Inc. (Julio de 2011). Consultado el 8 de marzo de 2013 en: <http://catalog.isotechinc.com/Asset/foamedaluminium>.

ANEXO 1

Ensayos a compresión cuasiestático uniaxial. Datos experimentales, estimaciones realizadas y representación gráfica de las curvas Esfuerzo-Deformación.

ENSAYO #1

Tabla A1.1. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial #1.

Descarga	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi(ml) promedio	Vi(mm3) promedio	Li(mm) promedio
0	0,00	0	8,68	8680	12,70
1	0,42	4116	8,08	8080	12,02
2	0,50	4900	7,81	7810	11,56
3	0,63	6174	7,65	7650	11,04
4	0,95	9310	7,31	7310	9,22
5	1,08	10584	6,68	6680	8,68
6	1,55	15190	4,20	4200	7,06
7	1,95	19110	3,85	3850	6,50
8	2,31	22638	3,62	3620	5,84
9	2,53	24794	3,46	3464	4,94
10	3,01	29498	3,36	3360	4,72
11	3,55	34790	3,11	3110	4,24

Tabla A1.2. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales del ensayo #1.

Ai (mm ²)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ε	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ε
683,46457	0,00	0,00	0,00	0,00
672,21298	6,12	0,06	6,02	0,05
675,60554	7,25	0,09	7,17	0,09
692,93478	8,91	0,14	9,03	0,13
792,84165	11,74	0,32	13,62	0,27
769,58525	13,75	0,38	15,49	0,32
594,90085	25,53	0,59	22,23	0,44
592,30769	32,26	0,67	27,96	0,49
619,86301	36,52	0,78	33,12	0,54
701,21457	35,36	0,94	36,28	0,61
711,86441	41,44	0,99	43,16	0,63
733,49057	47,43	1,10	50,90	0,67

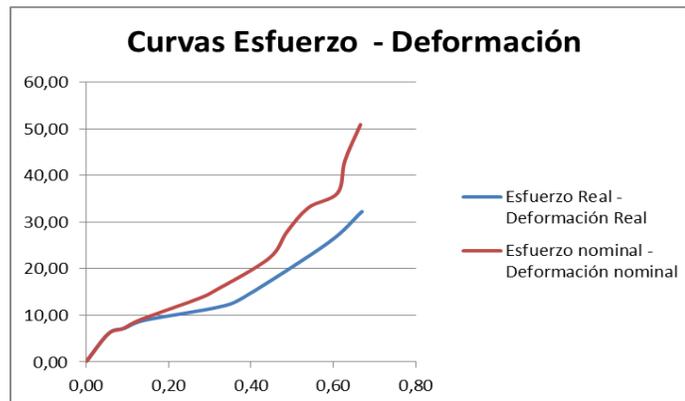


Figura A1.1. Curvas Esfuerzo – Deformación del ensayo #1.

ENSAYO #2

Tabla A1.3. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial #2.

Descarga	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi(ml) promedio	Vi(mm3) promedio	Li(mm) promedio
0	0,00	0	9,02	9020	12,70
1	0,40	3920	8,93	8930	12,08
2	0,54	5292	8,60	8602	11,22
3	0,65	6370	8,19	8190	10,54
4	0,85	8330	7,97	7970	9,76
5	1,21	11858	6,67	6670	8,04
6	1,60	15680	5,73	5728	7,26
7	1,85	18130	5,58	5580	6,66
8	2,30	22540	5,17	5170	6,18
9	2,55	24990	4,75	4750	5,86
10	2,94	28812	4,56	4560	5,02
11	3,59	35182	3,63	3628	4,54

Tabla A1.4. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales del ensayo #2.

Ai (mm2)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ϵ	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ϵ
710,23622	0,00	0,00	0,00	0,00
739,23841	5,30	0,05	5,52	0,05
766,66667	6,90	0,12	7,45	0,12
777,03985	8,20	0,19	8,97	0,17
816,59836	10,20	0,26	11,73	0,23
829,60199	14,29	0,46	16,70	0,37
788,98072	19,87	0,56	22,08	0,43
837,83784	21,64	0,65	25,53	0,48
836,56958	26,94	0,72	31,74	0,51
810,58020	30,83	0,77	35,19	0,54
908,36653	31,72	0,93	40,57	0,60
799,11894	44,03	1,03	49,54	0,64

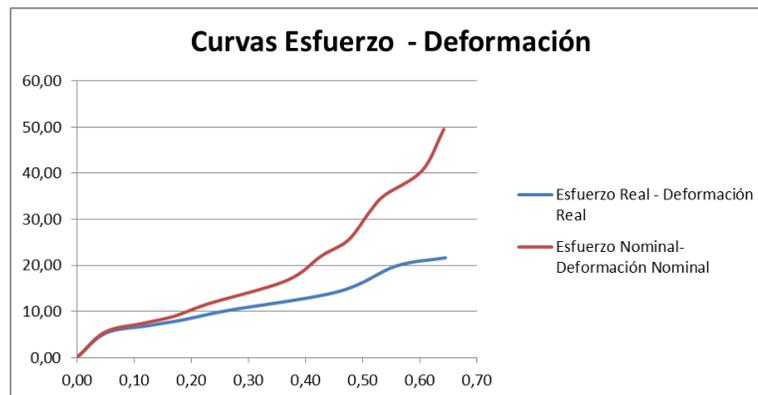


Figura A1.2. Curvas Esfuerzo – Deformación del ensayo #2.

ENSAYO #3

Tabla A1.5. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial #3.

Descarga	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi(ml) promedio	Vi(mm3) promedio	Li(mm) promedio
0	0,00	0	11,00	11000	12,70
1	0,46	4508	9,30	9300	12,26
2	0,52	5096	10,62	10620	11,94
3	0,64	6272	11,60	11600	11,54
4	0,95	9310	9,44	9440	10,72
5	1,16	11368	12,48	12480	9,62
6	1,49	14602	8,24	8240	8,98
7	2,02	19796	6,94	6940	6,80
8	2,28	22344	6,97	6970	6,22
9	2,50	24500	6,16	6160	5,94
10	2,90	28420	5,17	5170	5,68
11	3,46	33908	5,68	5680	5,24

Tabla A1.6. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales del ensayo #3.

Ai (mm2)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ϵ	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ϵ
866,14173	0,00	0,00	0,00	0,00
758,56444	5,94	0,04	5,20	0,03
889,44724	5,73	0,06	5,88	0,06
1005,19931	6,24	0,10	7,24	0,09
880,59701	10,57	0,17	10,75	0,16
1297,29730	8,76	0,28	13,12	0,24
917,59465	15,91	0,35	16,86	0,29
1020,58824	19,40	0,62	22,86	0,46
1120,57878	19,94	0,71	25,80	0,51
1037,03704	23,63	0,76	28,29	0,53
910,21127	31,22	0,80	32,81	0,55
1083,96947	31,28	0,89	39,15	0,59

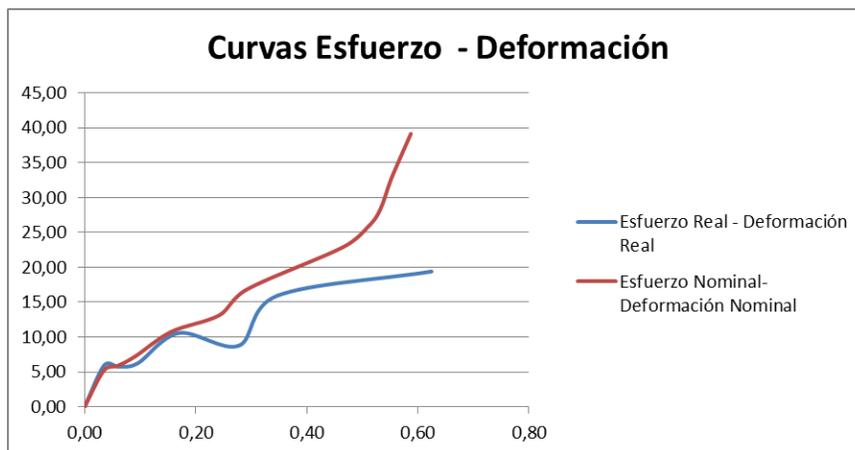


Figura A1.3. Curvas Esfuerzo – Deformación del ensayo #3.

ENSAYO #4

Tabla A1.7. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial #4.

Descarga	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi(ml) promedio	Vi(mm3) promedio	Li(mm) promedio
0	0,00	0	8,30	8300	12,70
1	0,40	3920	8,00	8000	12,12
2	0,49	4802	7,76	7760	11,70
3	0,67	6566	7,60	7602	11,14
4	0,89	8722	7,44	7440	9,46
5	1,10	10780	7,18	7180	8,22
6	1,50	14700	6,12	6120	7,40
7	1,84	18032	5,10	5100	6,52
8	2,25	22050	5,03	5030	6,06
9	2,57	25186	4,76	4760	5,74
10	2,87	28126	4,64	4640	5,42
11	3,43	33614	5,03	5030	5,06

Tabla A1.8. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales del ensayo #4.

Ai (mm2)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ϵ	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ϵ
653,54331	0,00	0,00	0,00	0,00
660,06601	5,94	0,05	6,00	0,05
663,24786	7,24	0,08	7,35	0,08
682,40575	9,62	0,13	10,05	0,12
786,46934	11,09	0,29	13,35	0,26
873,47932	12,34	0,44	16,49	0,35
827,02703	17,77	0,54	22,49	0,42
782,20859	23,05	0,67	27,59	0,49
830,03300	26,57	0,74	33,74	0,52
829,26829	30,37	0,79	38,54	0,55
856,08856	32,85	0,85	43,04	0,57
994,07115	33,81	0,92	51,43	0,60

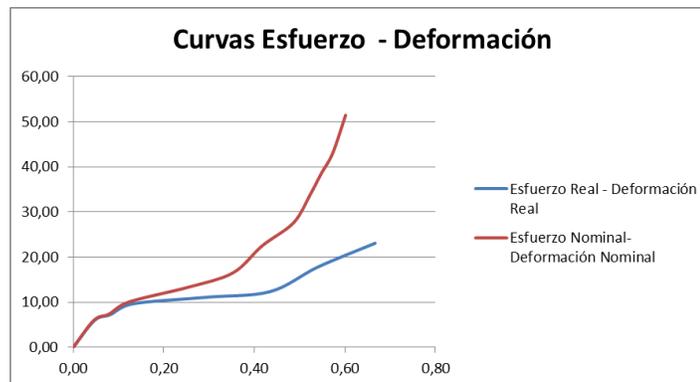


Figura A1.4. Curvas Esfuerzo – Deformación del ensayo #4.

ENSAYO #5

Tabla A1.9. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial #5.

Descarga	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi(ml) promedio	Vi(mm3) promedio	Li(mm) promedio
0	0,00	0	9,88	9880	12,70
1	0,43	4214	9,79	9790	12,36
2	0,55	5390	9,64	9640	12,04
3	0,67	6566	9,45	9450	11,80
4	0,91	8918	8,48	8480	10,54
5	1,05	10290	7,52	7520	9,42
6	1,51	14798	7,23	7230	7,24
7	2,06	20188	7,01	7010	6,34
8	2,40	23520	5,96	5960	6,04
9	2,58	25284	5,96	5960	5,86
10	2,93	28714	6,74	6740	5,46
11	3,45	33810	6,34	6340	5,18

Tabla A1.10. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales del ensayo #5.

Ai (mm2)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ϵ	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ϵ
777,95276	0,00	0,00	0,00	0,00
792,07120	5,32	0,03	5,42	0,03
800,66445	6,73	0,05	6,93	0,05
800,84746	8,20	0,07	8,44	0,07
804,55408	11,08	0,19	11,46	0,17
798,30149	12,89	0,30	13,23	0,26
998,61878	14,82	0,56	19,02	0,43
1105,67823	18,26	0,69	25,95	0,50
986,75497	23,84	0,74	30,23	0,52
1017,06485	24,86	0,77	32,50	0,54
1234,43223	23,26	0,84	36,91	0,57
1223,93822	27,62	0,90	43,46	0,59

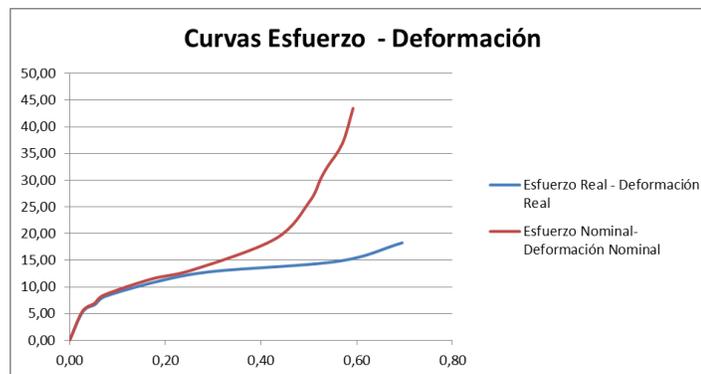


Figura A1.5. Curvas Esfuerzo – Deformación del ensayo #5.

ENSAYO #6

Tabla A1.11. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial #6.

Descarga	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi(ml) promedio	Vi(mm3) promedio	Li(mm) promedio
0	0,00	0	8,34	8340	12,70
1	0,45	4410	9,82	9820	12,39
2	0,53	5194	9,72	9720	12,14
3	0,65	6370	9,05	9050	11,66
4	0,86	8428	8,42	8420	11,30
5	1,24	12152	6,32	6320	6,64
6	1,53	14994	6,28	6280	6,42
7	1,92	18816	6,14	6140	6,14
8	2,23	21854	5,86	5860	5,86
9	2,60	25480	5,14	5140	5,14
10	2,97	29106	4,76	4760	4,76
11	3,50	34300	4,46	4460	4,46

Tabla A1.12. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales del ensayo #6.

Ai (mm2)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ϵ	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ϵ
656,69291	0,00	0,00	0,00	0,00
792,57466	5,56	0,02	6,72	0,02
800,65898	6,49	0,05	7,91	0,04
776,15780	8,21	0,09	9,70	0,08
745,13274	11,31	0,12	12,83	0,11
951,80723	12,77	0,65	18,50	0,48
978,19315	15,33	0,68	22,83	0,49
1000,00000	18,82	0,73	28,65	0,52
1000,00000	21,85	0,77	33,28	0,54
1000,00000	25,48	0,90	38,80	0,60
1000,00000	29,11	0,98	44,32	0,63
1000,00000	34,30	1,05	52,23	0,65

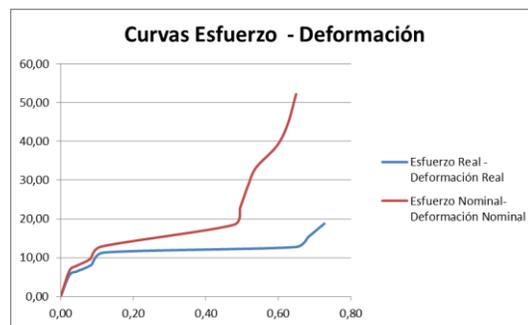


Figura A1.6. Curvas Esfuerzo – Deformación del ensayo #6.

ENSAYO #7

Tabla A1.13. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial #7.

Descarga	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi(ml) promedio	Vi(mm3) promedio	Li(mm) promedio
0	0,00	0	10,26	10260	12,70
1	0,46	4508	11,45	11450	12,44
2	0,57	5586	10,85	10850	12,14
3	0,70	6860	9,68	9680	11,24
4	0,92	9016	9,30	9300	10,24
5	1,21	11858	8,28	8280	9,42
6	1,49	14602	7,58	7580	8,64
7	1,85	18130	7,00	7000	7,26
8	2,26	22148	6,46	6460	6,44
9	2,57	25186	6,25	6250	6,14
10	3,02	29596	5,87	5870	5,76
11	3,41	33418	5,58	5580	5,40

Tabla A1.14. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales del ensayo #7.

Ai (mm2)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ϵ	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ϵ
807,87402	0,00	0,00	0,00	0,00
920,41801	4,90	0,02	5,58	0,02
893,73970	6,25	0,05	6,91	0,04
861,20996	7,97	0,12	8,49	0,11
908,20313	9,93	0,22	11,16	0,19
878,98089	13,49	0,30	14,68	0,26
877,31481	16,64	0,39	18,07	0,32
964,18733	18,80	0,56	22,44	0,43
1003,10559	22,08	0,68	27,42	0,49
1017,91531	24,74	0,73	31,18	0,52
1019,09722	29,04	0,79	36,63	0,55
1033,33333	32,34	0,86	41,37	0,57

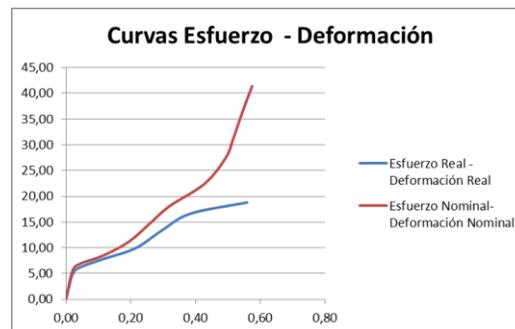


Figura A1.7. Curvas Esfuerzo – Deformación del ensayo #7.

ANEXO 2

Análisis estadístico de los datos experimentales correspondientes a las descargas efectuadas en los ensayos.

Para un valor de Fuerza, $P = 0,43 \text{ N}$

Tabla A2.1. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	8,00	8,20	8,10	8,00	8,10	8,08
Vi2	8,80	8,70	9,00	9,10	9,05	8,93
Vi3	9,00	8,50	10,00	9,50	9,50	9,30
Vi4	8,10	7,90	7,90	8,00	8,10	8,00
Vi5	9,90	9,80	9,70	9,80	9,75	9,79
Vi6	10,00	9,80	9,90	9,80	9,60	9,82
Vi7	11,50	11,40	11,30	11,45	11,60	11,45

Tabla A2.2. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	9,33857
Desviación Estándar	1,25926

Tabla A2.3. Distribución normal de “Vi medio muestral” del segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
8,00	0,18007
8,08	0,19226
8,93	0,30056
9,30	0,31666
9,79	0,29709
9,82	0,29448
11,45	0,07768

Tabla A2.4. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (2do. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
5,93218	0
7,06764	0
8,20311	10
9,33857	7
10,47403	13
11,33857	1
12,74496	4

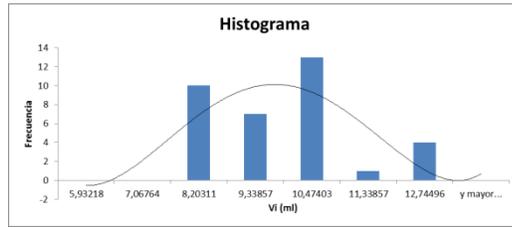


Figura A2.1. Histograma de los valores V_i (2do. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

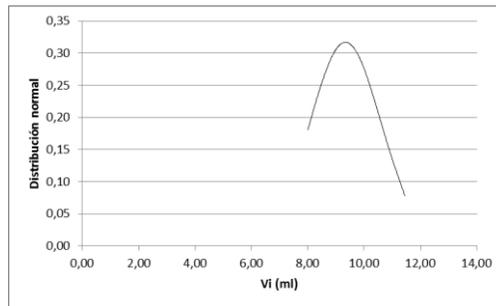


Figura A2.2. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.5. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	9,33857
Desviación estándar	1,13546

Tabla A2.6. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	12,24
Desviación estándar	0,16183

Tabla A2.7. Valores de V_i y l_i corregidos para el segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_I	9,33857 ml
L_I	12,24 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 0,53 \text{ N}$

Tabla A2.8. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del tercer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	7,90	7,80	7,80	7,70	7,85	7,81
Vi2	8,76	8,65	8,70	8,50	8,40	8,60
Vi3	10,50	10,80	10,70	10,20	10,90	10,62
Vi4	7,70	7,80	7,60	7,70	8,00	7,76
Vi5	9,60	9,70	9,65	9,55	9,70	9,64
Vi6	10,00	9,70	9,50	9,80	9,60	9,72
Vi7	10,80	10,90	10,95	10,85	10,75	10,85

Tabla A2.9. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del tercer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	9,28600
Desviación Estándar	1,25926

Tabla A2.10. Distribución normal de “Vi medio muestral” del tercer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
7,76	0,15202
7,81	0,15939
8,60	0,27336
9,64	0,30453
9,72	0,29854
10,62	0,18076
10,85	0,14650

Tabla A2.11. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (3er. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
5,71137	0
6,90292	0
8,09446	10
9,28600	5
10,47754	11
11,66908	9
12,86063	0

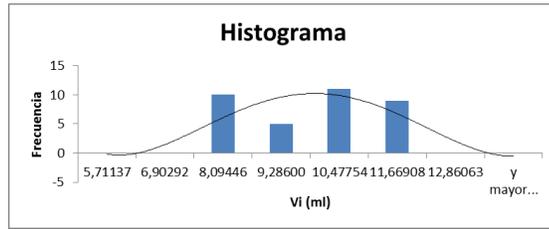


Figura A2.3. Histograma de los valores V_i (3er. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

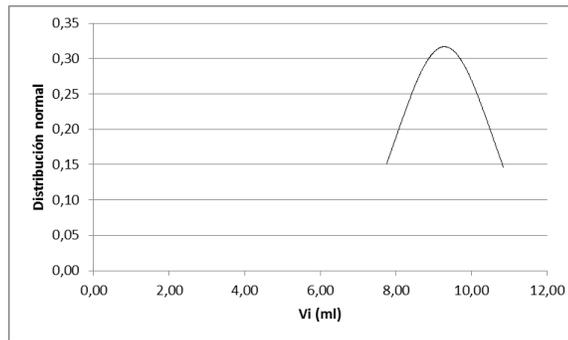


Figura A2.4. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del tercer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.12. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del tercer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	9,28600
Desviación estándar	1,19154

Tabla A2.13. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del tercer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	11,82000
Desviación estándar	0,32702

Tabla A2.14. Valores de V_i y l_i corregidos para el tercer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_2	9,28600 ml
L_2	11,82 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 0,66 \text{ N}$

Tabla A2.15. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del cuarto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	7,70	7,60	7,65	7,60	7,70	7,65
Vi2	8,15	8,20	8,10	8,20	8,30	8,19
Vi3	11,50	11,40	11,60	11,50	12,00	11,60
Vi4	7,60	7,50	7,66	7,55	7,70	7,60
Vi5	9,40	9,50	9,45	9,50	9,40	9,45
Vi6	9,00	9,00	9,00	9,15	9,10	9,05
Vi7	9,50	9,80	10,00	9,50	9,60	9,68

Tabla A2.16. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del cuarto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	9,03171
Desviación Estándar	1,40555

Tabla A2.17. Distribución normal de “Vi medio muestral” del cuarto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
7,60	0,16919
7,65	0,17507
8,19	0,23724
9,05	0,28381
9,45	0,27154
9,68	0,25519
11,60	0,05346

Tabla A2.18. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (4to. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
5,05433	0
6,38012	0
7,70592	10
9,03171	8
10,35751	12
11,68330	4
13,00910	1

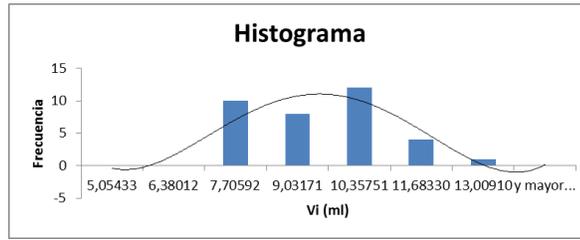


Figura A2.5. Histograma de los valores V_i (4to. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

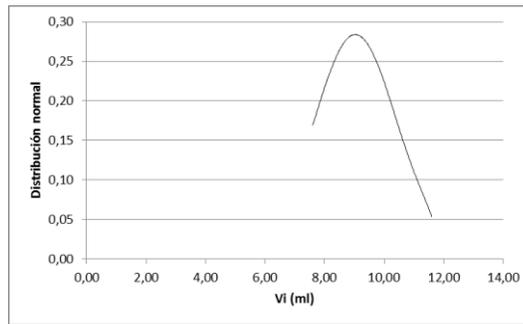


Figura A2.6. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del cuarto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.19. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del cuarto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	9,03171
Desviación estándar	1,32579

Tabla A2.20. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del cuarto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	11,28000
Desviación estándar	0,40642

Tabla A2.21. Valores de V_i y l_i corregidos para el cuarto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_3	9,03171 ml
L_3	11,28 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 0,9 \text{ N}$

Tabla A2.22. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	7,30	7,40	7,35	7,20	7,30	7,31
Vi2	7,85	7,90	8,00	8,10	8,00	7,97
Vi3	8,50	9,50	9,50	10,00	9,70	9,44
Vi4	7,40	7,45	7,50	7,45	7,40	7,44
Vi5	8,50	8,30	8,50	8,50	8,60	8,48
Vi6	8,50	8,50	8,50	8,30	8,30	8,42
Vi7	9,40	9,20	9,20	9,40	9,30	9,30

Tabla A2.23. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	8,33714
Desviación Estándar	0,83320

Tabla A2.24. Distribución normal de “Vi medio muestral” del quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
7,31	0,22395
7,44	0,26817
7,97	0,43451
8,42	0,47645
8,48	0,47182
9,30	0,24557
9,44	0,19939

Tabla A2.25. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (5to. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
5,90745	0
6,71735	0
7,52725	10
8,33714	8
9,14704	8
9,95694	8
10,76683	1

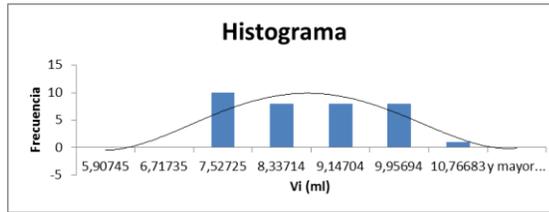


Figura A2.7. Histograma de los valores V_i (5to. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

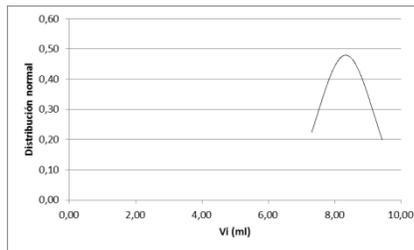


Figura A2.8. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.26. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	8,33714
Desviación estándar	0,80990

Tabla A2.27. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	10,17714
Desviación estándar	0,69835

Tabla A2.28. Valores de V_i y l_i corregidos para el quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_4	8,33714 ml
L_4	10,17714 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 1,15 \text{ N}$

Tabla A2.29. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del sexto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	6,60	6,50	6,70	6,80	6,80	6,68
Vi2	6,60	6,40	6,70	6,80	6,85	6,67
Vi3	12,50	12,50	12,60	12,50	12,30	12,48
Vi4	7,30	7,40	6,50	7,20	7,50	7,18
Vi5	7,50	7,40	7,70	7,50	7,50	7,52
Vi6	6,50	6,50	6,40	6,20	6,00	6,32
Vi7	8,00	8,50	8,30	8,50	8,10	8,28

Tabla A2.30. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del sexto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	7,87571
Desviación Estándar	2,13218

Tabla A2.31. Distribución normal de “Vi medio muestral” del sexto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
6,32	0,14338
6,67	0,15946
6,68	0,15988
7,18	0,17741
7,52	0,18452
8,28	0,18377
12,48	0,01818

Tabla A2.32. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (6to. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
1,83829	0
3,85076	0
5,86324	0
7,87571	25
9,88819	5
11,90066	0
13,91314	5

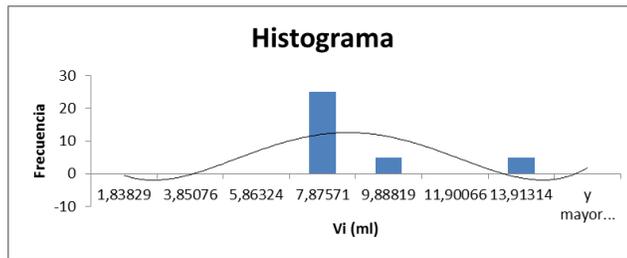


Figura A2.9. Histograma de los valores V_i (6to. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

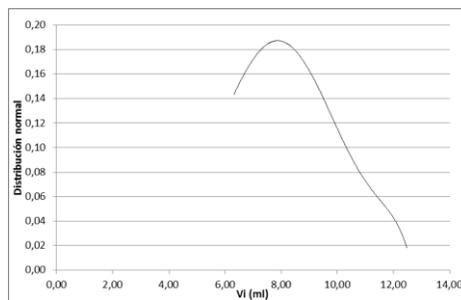


Figura A2.10. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del sexto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.33. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del sexto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	7,87571
Desviación estándar	2,01247

Tabla A2.34. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del sexto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	8,57714
Desviación estándar	0,99265

Tabla A2.35. Valores de V_i y l_i corregidos para el quinto punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_5	7,87571 ml
L_5	8,57714 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 1,52 \text{ N}$

Tabla A2.36. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del séptimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	4,20	4,00	4,10	4,40	4,30	4,20
Vi2	5,74	5,80	5,60	5,70	5,80	5,73
Vi3	7,50	8,50	8,50	8,20	8,50	8,24
Vi4	6,00	6,40	6,20	5,50	6,50	6,12
Vi5	7,20	7,30	7,15	7,20	7,30	7,23
Vi6	6,30	6,30	6,20	6,25	6,35	6,28
Vi7	7,60	7,70	7,50	7,50	7,60	7,58

Tabla A2.37. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del séptimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	6,48257
Desviación Estándar	1,34186

Tabla A2.38. Distribución normal de “Vi medio muestral” del séptimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
4,20	0,06996
5,73	0,25383
6,12	0,28665
6,28	0,29394
7,23	0,25458
7,58	0,21279
8,24	0,12610

Tabla A2.39. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (7mo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
2,64675	0
3,92536	0
5,20396	5
6,48257	14
7,76118	12
9,03979	4
10,31839	0

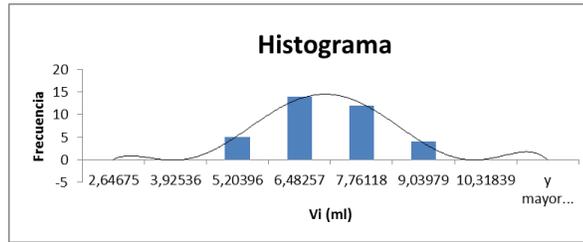


Figura A2.11. Histograma de los valores V_i (7mo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

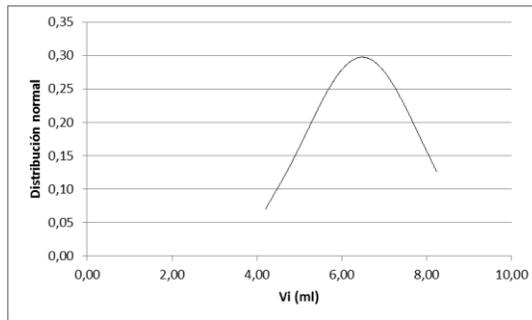


Figura A2.12. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del séptimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.40. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del séptimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	6,48257
Desviación estándar	1,27861

Tabla A2.41. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del séptimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	7,57143
Desviación estándar	0,85494

Tabla A2.42. Valores de V_i y l_i corregidos para el séptimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_6	6,48257 ml
L_6	7,57143 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 1,93 \text{ N}$

Tabla A2.43. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del octavo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	3,80	3,90	3,85	3,95	3,75	3,85
Vi2	5,70	5,60	5,50	5,40	5,70	5,58
Vi3	6,50	7,00	7,30	7,40	6,50	6,94
Vi4	5,00	4,50	5,20	5,30	5,50	5,10
Vi5	7,00	7,10	7,05	7,00	6,90	7,01
Vi6	6,10	6,10	6,10	6,20	6,20	6,14
Vi7	7,00	7,00	6,90	7,10	7,00	7,00

Tabla A2.44. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del octavo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,94571
Desviación Estándar	1,19105

Tabla A2.45. Distribución normal de “Vi medio muestral” del octavo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
3,85	0,07123
5,10	0,26031
5,58	0,31953
6,14	0,33052
6,94	0,23640
7,00	0,22638
7,01	0,22470

Tabla A2.46. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (8vo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Clase	Frecuencia
2,53228	0
3,67009	0
4,80790	6
5,94571	9
7,08353	16
8,22134	4
9,35915	0

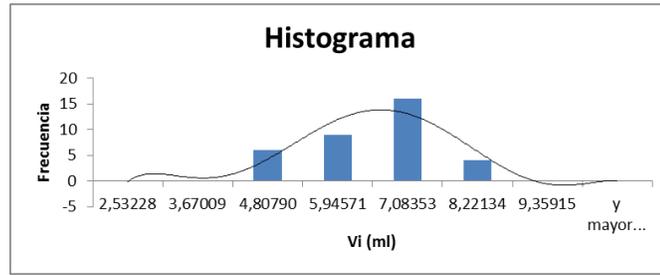


Figura A2.13. Histograma de los valores V_i (8vo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

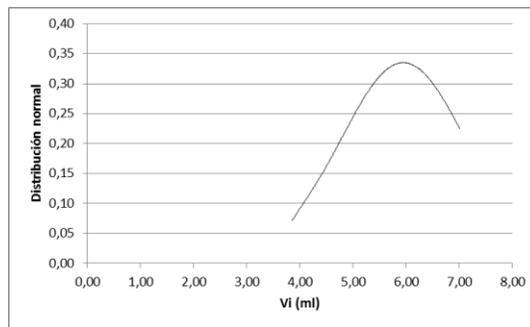


Figura A2.14. Distribución normal de “Vi medio muestral” del octavo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.47. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del octavo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,94571
Desviación estándar	1,13781

Tabla A2.48. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del octavo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	6,60286
Desviación estándar	0,34170

Tabla A2.49. Valores de V_i y l_i corregidos para el octavo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_7	5,94571 ml
L_7	6,60286 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 2,29 \text{ N}$

Tabla A2.50. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del noveno punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	3,55	3,60	3,65	3,60	3,70	3,62
Vi2	5,10	5,20	5,15	5,30	5,10	5,17
Vi3	7,00	7,10	6,90	7,00	6,85	6,97
Vi4	5,00	5,10	5,00	4,95	5,10	5,03
Vi5	5,60	6,00	6,20	6,30	5,70	5,96
Vi6	5,80	5,80	5,90	5,90	5,90	5,86
Vi7	6,40	6,50	6,50	6,40	6,50	6,46

Tabla A2.51. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del noveno punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,58143
Desviación Estándar	1,09860

Tabla A2.52. Distribución normal de “Vi medio muestral” del noveno punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribucion normal
3,62	0,07377
5,03	0,32016
5,17	0,33854
5,86	0,35165
5,96	0,34221
6,46	0,26375
6,97	0,16337

Tabla A2.53. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (9no. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
2,46457	0
3,50352	0
4,54248	5
5,58143	10
6,62038	15
7,65934	5
8,69829	0

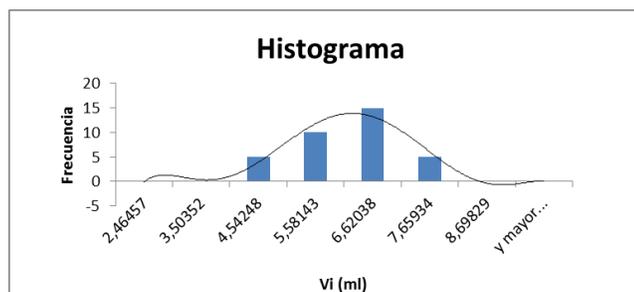


Figura A2.15. Histograma de los valores V_i (9no. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

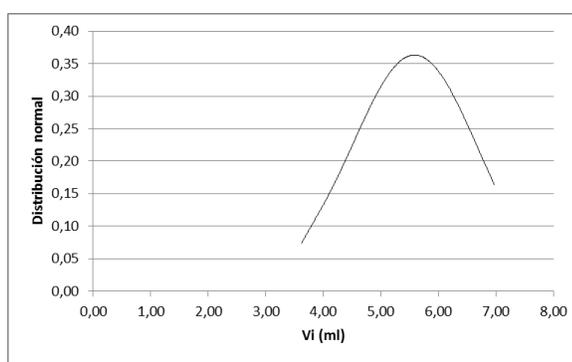


Figura A2.16. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del noveno punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.54. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del noveno punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,58143
Desviación estándar	1,03895

Tabla A2.55. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del noveno punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	6,09143
Desviación estándar	0,20633

Tabla A2.56. Valores de V_i y l_i corregidos para el noveno punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_8	5,58143 ml
L_8	6,09143 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 2,56 \text{ N}$

Tabla A2.57. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del décimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	3,50	3,55	3,40	3,42	3,45	3,46
Vi2	4,80	4,70	4,80	4,75	4,70	4,75
Vi3	5,50	6,50	5,70	6,50	6,60	6,16
Vi4	4,70	4,70	4,70	4,80	4,90	4,76
Vi5	6,00	6,10	5,90	5,80	6,00	5,96
Vi6	5,10	5,10	5,10	5,20	5,20	5,14
Vi7	6,20	6,30	6,10	6,25	6,40	6,25

Tabla A2.58. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del décimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,21200
Desviación Estándar	1,00117

Tabla A2.59. Distribución normal de “Vi medio muestral” del décimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
3,46	0,08679
4,75	0,35823
4,76	0,35987
5,14	0,39745
5,96	0,30143
6,16	0,25451
6,25	0,23280

Tabla A2.60. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (10mo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
2,33297	0
3,29264	0
4,25232	5
5,21200	15
6,17168	8
7,13136	7
8,09103	0

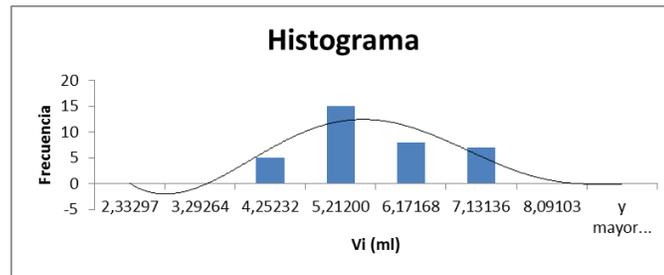


Figura A2.17. Histograma de los valores V_i (10mo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

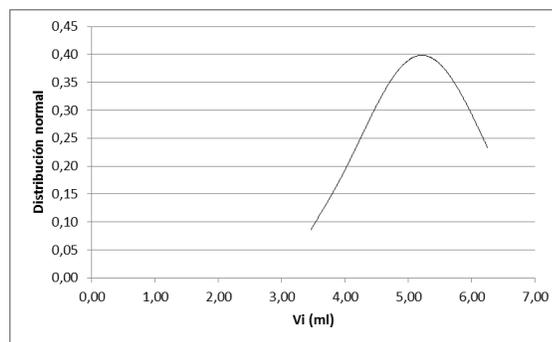


Figura A2.18. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del décimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.61. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del décimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,21200
Desviación estándar	0,95968

Tabla A2.62. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del décimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,66000
Desviación estándar	0,42022

Tabla A2.63. Valores de V_i y l_i corregidos para el décimo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_9	5,212 ml
L_9	5,66 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 2,95 \text{ N}$

Tabla A2.64. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del décimo primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	3,40	3,30	3,20	3,50	3,40	3,36
Vi2	4,60	4,55	4,50	4,50	4,65	4,56
Vi3	5,20	5,10	5,00	5,30	5,25	5,17
Vi4	4,50	4,50	4,50	4,80	4,90	4,64
Vi5	6,80	6,70	6,60	6,90	6,70	6,74
Vi6	4,80	4,80	4,80	4,70	4,70	4,76
Vi7	5,80	5,90	5,85	5,80	6,00	5,87

Tabla A2.65. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del décimo primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,01429
Desviación Estándar	1,07101

Tabla A2.66. Distribución normal de “Vi medio muestral” del décimo primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
3,36	0,11299
4,56	0,34045
4,64	0,35043
4,76	0,36214
5,17	0,36858
5,87	0,27071
6,74	0,10171

Tabla A2.67. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (11 vo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Clase	Frecuencia
1,97994	0
2,99139	0
4,00284	5
5,01429	16
6,02573	9
7,03718	5
8,04863	0

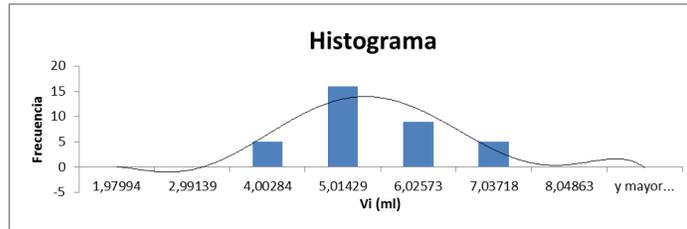


Figura A2.19. Histograma de los valores V_i (11 vo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

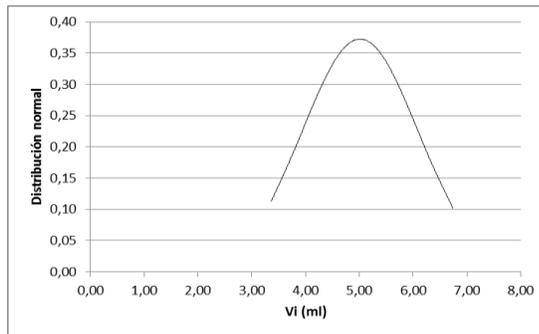


Figura A2.20. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del décimo primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.68. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del décimo primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,01429
Desviación estándar	1,01145

Tabla A2.69. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del décimo primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	5,26000
Desviación estándar	0,40308

Tabla A2.70. Valores de V_i y l_i corregidos para el décimo primer punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_{10}	5,01429 ml
L_{10}	5,26 mm

Para un valor de Fuerza, $P = 3,48 \text{ N}$

Tabla A2.71. Valores de la media muestral del volumen instantáneo del décimo segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

	1	2	3	4	5	Vi medio muestral
Vi1	3,10	3,00	3,20	3,15	3,10	3,11
Vi2	3,60	3,70	3,62	3,50	3,72	3,63
Vi3	5,70	5,60	5,80	5,60	5,70	5,68
Vi4	5,10	5,00	4,90	5,15	5,00	5,03
Vi5	6,40	6,50	6,10	6,30	6,40	6,34
Vi6	4,50	4,50	4,50	4,40	4,40	4,46
Vi7	5,50	5,50	5,50	5,70	5,70	5,58

Tabla A2.72. Valor de media y desviación estándar de “Vi medio muestral” del décimo segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	4,83257
Desviación Estándar	1,16513

Tabla A2.73. Distribución normal de “Vi medio muestral” del décimo segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Vi medio muestral	Distribución normal
3,11	0,11479
3,63	0,20065
4,46	0,32534
5,03	0,33752
5,58	0,27872
5,68	0,26282
6,34	0,14827

Tabla A2.74. Valores de frecuencia, según intervalos desviación estándar (12vo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

Vi (ml)	Frecuencia
1,53833	0
2,63641	0
3,73449	10
4,83257	5
5,93065	15
7,02874	5
8,12682	0

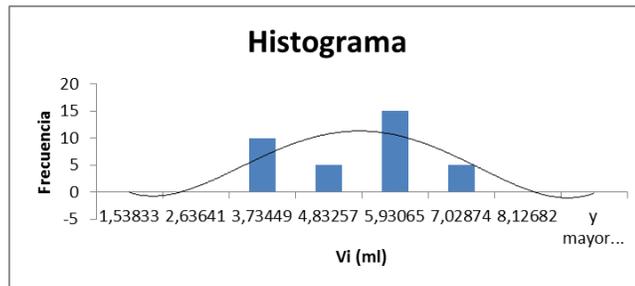


Figura A2.21. Histograma de los valores V_i (12vo. Punto de la gráfica esfuerzo - deformación).

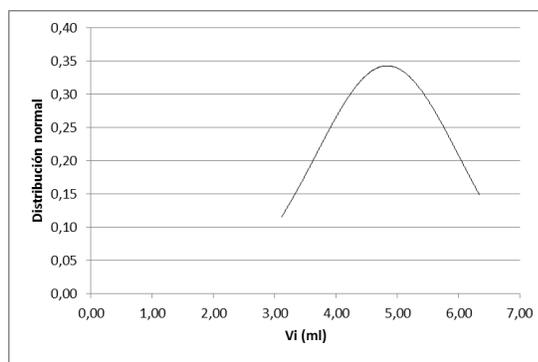


Figura A2.22. Distribución normal de “ V_i medio muestral” del décimo segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Tabla A2.75. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de V_i del décimo segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	4,83257
Desviación estándar	1,09808

Tabla A2.76. Valor de media y desviación estándar para una población de 35 muestras de l_i del décimo segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

Media	4,87429
Desviación estándar	0,42658

Tabla A2.77. Valores de V_i y l_i corregidos para el décimo segundo punto de la gráfica esfuerzo - deformación.

V_{II}	4,83257 ml
L_{II}	4,87429 mm

ANEXO 3

Datos experimentales corregidos estadísticamente y estimaciones de los valores de esfuerzo y deformación.

Tabla A3.1. Datos experimentales del ensayo a compresión cuasiestático uniaxial analizados estadísticamente.

Punto	Fuerza(Mp)	Fuerza(N)	Vi (ml)	Vi (mm3)	Li(mm)
0	0,00	0	9,35	9354	12,70
1	0,43	4228	9,34	9339	12,24
2	0,53	5180	9,29	9286	11,82
3	0,66	6454	9,03	9032	11,28
4	0,90	8862	8,34	8337	10,18
5	1,15	11270	7,88	7876	8,58
6	1,52	14938	6,48	6483	7,57
7	1,93	18886	5,95	5946	6,60
8	2,29	22442	5,58	5581	6,09
9	2,56	25060	5,21	5212	5,66
10	2,95	28896	5,01	5014	5,26
11	3,48	34146	4,83	4830	4,87

Tabla A3.2. Resultados obtenidos a partir de los datos experimentales analizados estadísticamente.

Punto	Ai (mm2)	Esfuerzo Real σ (MPa)	Deformación Real ϵ	Esfuerzo Nominal σ (MPa)	Deformación nominal ϵ
0	736,55793	0,00	0,00	0,00	0,00
1	763,04424	5,54	0,04	5,74	0,04
2	785,61760	6,59	0,07	7,03	0,07
3	800,68389	8,06	0,12	8,76	0,11
4	819,20270	10,82	0,22	12,03	0,20
5	918,22119	12,27	0,39	15,30	0,32
6	856,18868	17,45	0,52	20,28	0,40
7	900,47598	20,97	0,65	25,64	0,48
8	916,27580	24,49	0,73	30,47	0,52
9	920,84806	27,21	0,81	34,02	0,55
10	953,28626	30,31	0,88	39,23	0,59
11	990,91442	34,46	0,96	46,36	0,62