



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA
MECANICA Y ELECTRICA
UNIDAD CULHUACAN**

**“OBTENCION Y PROPIEDADES DE
ESPUMAS METÁLICAS BASE
ZINALCO”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECANICO
P R E S E N T A

OSCAR EDGAR OCHOA DE JESUS

**ASESORES DE TESIS:
DR. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR
DR. ALBERTO SANDOVAL JIMENEZ**



IPN
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD CULHUACAN

TESIS INDIVIDUAL

Que como prueba escrita de su Examen Profesional para obtener el Título de Ingeniero Mecánico deberá desarrollar el C.:

OSCAR EDGAR OCHOA DE JESÚS


“OBTENCIÓN Y PROPIEDADES DE ESPUMAS METÁLICAS BASE ZINALCO”

Las espumas metálicas son un campo de investigación y aplicación industrial que crece cada año. Las espumas metálicas se fabrican principalmente con aluminio y en países como Alemania, Japón, EUA, Canadá. Pero gracias a las propiedades de la aleación ZINALCO (aleación desarrollada en la UNAM) se pueden crear espumas metálicas a bajo costo y con propiedades semejantes a las espumas obtenidas bajo otros procesos. Con esto, es posible colocar al ZINALCO dentro de un campo de investigación internacional y en crecimiento.

CAPITULADO

- I.- DESARROLLO INDUSTRIAL DEL ZINALCO.
- II.- SUSTITUCIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO POR LAS DE Zn-Al
- III.- ESPUMAS METÁLICAS
- IV.- PROCESOS DE OBTENCIÓN DE ESPUMAS METÁLICAS
- V.- COMPORTAMIENTO DE LAS ESPUMAS METÁLICAS BAJO ENSAYOS DE COMPRESIÓN.
- VI.- PROCESO DE ELABORACIÓN.

México D. F., a 06 de noviembre de 2008




DR. ALBERTO RAMIRO SANDOVAL JIMÉNEZ
PRIMER ASESOR



DR. GABRIEL TORRES VILLASEÑOR
SEGUNDO ASESOR



ING. MAGDALENO VÁSQUEZ RODRÍGUEZ
JEFE DE LA CARRERA DE I.M.



M. EN C. HÉCTOR BECERRIL MENDOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO.

AGRADECIMIENTOS

Mil gracias al Dr. Gabriel Torres Villaseñor por darme la confianza y los recursos para realizar este trabajo. Gracias por la paciencia que me tuvo y gracias por creer en mi. Por usted es que mis ánimos de trabajar son grandes.

Agradezco el apoyo y los consejos del Dr Alberto Sandoval ya que gracias a su experiencia este trabajo se pudo realizar con la coherencia y forma que requiere una tesis de licenciatura. Admiro su entrega a la investigación de materiales.

Gracias al Dr. Said Robles por sus conocimientos transmitidos, por el asesoramiento en este proceso de elaboración. Gracias a usted madure mucho.

Un agradecimiento muy especial a Gabriel (técnico del Laboratorio de laminación del IIM) por sus consejos y ayuda en momentos oportunos. También les agradezco a los compañeros de la laminadora.

Gracias a todo el personal de IIM dentro del taller de procesos de manufactura

No podré olvidar a Marco, gracias por invertir tanto tiempo en este trabajo, siempre demostraste interés y entusiasmo, tu ayuda para realizar este trabajo fue imprescindible.

Ares y Evelin, compañeros dentro del IIM, son parte fundamental de esta tesis.

A todos mis primos y tíos les agradezco el tiempo que invirtieron en mi, no los defraudare.

A mi padre y mi madre les agradezco que siempre crean en mi a pesar de todos los errores que cometo; a mi hermana por su comprensión y ayuda.

No encuentro la forma correcta para agradecerle a mi hermano Hugo su presencia

A mi esposa e hijos les agradezco el haberme soportado, las desveladas y las carencias, los amo. Gracias por las sonrisas y el amor que me regalan desde el amanecer.

Gracias al glorioso IPN y ESIME CULHUACAN

Gracias a Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

Gracias virgen de Guadalupe

Oscar Ochoa

INDICE

OBJETIVO	2
INTRODUCCION	3
CAPITULO I Desarrollo Industrial del ZINALCO	4
CAPITULO II La Sustitución de las Aleaciones de Aluminio por las de Zn-Al	9
CAPITULO III Espumas Metalicas	155
CAPITULO IV Procesos de Obtención de Espumas Metálicas	222
CAPITULO V Comportamiento de las Espumas Metálicas Bajo Ensayos de	301
CAPITULO VI Proceso de Elaboración	41
RESULTADOS, ANALISIS	489
CONCLUSIONES	645
REFERENCIAS	656

OBJETIVO

Objetivo Principal:

Elaborar espumas metálicas con ZINALCO

Objetivos Particulares:

1. Ampliar el campo de aplicación de la aleación ZINALCO dentro de una nueva tecnología en desarrollo Internacional.
2. Establecer los parámetros necesarios para el proceso de obtención de las espumas metálicas de ZINALCO.

Estudiar el efecto de la densidad y del tamaño de poro en el esfuerzo a compresión.

INTRODUCCION

El aluminio en México es un producto de importación, debido a la carencia de materia prima convencional utilizada para extraer el aluminio. El punto básico a resolver es: cómo se podría satisfacer nuestras necesidades de aluminio, sin tener que aumentar las importaciones ni el gasto de energías. Una posible respuesta a esta interrogante es la sustitución de Al por aleaciones de Zn-Al. El Zn es un material, del cual México tiene grandes excedentes. La sustitución de las aleaciones Al-Si-Mg usadas en la industria de la construcción por aleaciones Zn-Al, reduciría el consumo de aluminio, ya que estas aleaciones de Zn llevarían tan solo un 22% de aluminio. Las propiedades mecánicas de la aleación Zn-Al hace posible que puedan sustituir a las aleaciones ricas en aluminio, en aquellos casos en que la ligereza no es un factor importante. Las espumas metálicas son, como su nombre indica, materiales metálicos con una morfología porosa. Pueden formar una estructura abierta de poros interconectados, similar a una esponja de baño, o bien una estructura de poros cerrados no conectados entre sí y se fabrican principalmente de aluminio. Tienen muy baja densidad (entre 3-80 %), a la vez que presentan algunas de las propiedades del metal del que están formados, junto a otras características derivadas de su peculiar estructura. Por tanto, son materiales con una combinación de propiedades fisico-químicas y mecánicas muy especiales, de manera que tienen un conjunto de propiedades que en la actualidad no está cubierto por otros materiales, En el presente trabajo se establece el proceso para la obtención de espumas metálicas de ZINALCO. (El ZINALCO, es una aleación de Zinc, Aluminio y Cobre, surgió como producto de estudios básicos realizados sobre las propiedades del Zinc y del Cobre.) Este proceso esta basado en la técnica de réplica de estructura y permite la obtención de 4 espumas, con diferentes propiedades físicas y mecánicas cada una. La estructura de réplica es creada por el acomodamiento de los granos de Na-Cl dentro de un molde. Para cada tipo de espuma, que difieren en el tamaño de poro creado, se realizan mediciones de densidad, tamaño de poro, espesor de pared de poro. También se realizan ensayos de compresión que permitieron determinar el efecto del tamaño de poro en el esfuerzo a compresión; los datos obtenidos en los ensayos de compresión permiten determinar, de forma teórica, la cantidad de energía que puede absorber cada tipo de espuma y el Módulo de Young.

CAPÍTULO I

DESARROLLO INDUSTRIAL DEL ZINALCO

El ZINALCO, es una aleación de Zinc, Aluminio y Cobre, surgió como producto de estudios básicos realizados sobre las propiedades del Zinc y del Cobre [1]. Se le llama ZINALCO porque es una palabra compuesta por las primeras letras de los metales componentes: **ZINc**, **AL**uminio y **CO**bre.

Los estudios se iniciaron alrededor de 1973, en el Instituto de Investigaciones en Materiales, con el objetivo de contribuir al conocimiento de las materias primas nacionales, zinc y cobre, en virtud de que empezaban a presentarse señales de debilitamiento en cuanto a su uso, por efecto de la sustitución que se estaba realizando en todo el mundo por aluminio y plásticos. Los estudios básicos se mantuvieron con fondos del Instituto hasta 1979, año en el que recibieron recursos por parte de la Organización de los Estados Americanos (OEA) para el desarrollo de las aleaciones base ZINC que pudieran utilizarse en sustitución del aluminio, del cual México carece y tiene que importar. En 1983 ya se contaba con un diseño de material con las propiedades adecuadas para competir con el aluminio. El diseño se basó en lograr un material que tuviese una relación de peso a resistencia mecánica igual al de las aleaciones de aluminio de la serie 6000, las cuales son las más usadas en México. La densidad fue disminuida con aluminio y las propiedades mecánicas se ajustaron con la adición de cobre.

La carencia de bauxita en México, ha obligado a nuestro país, ha tener que importar alúmina para ser transformada en aluminio. El aluminio transformado resulta ser un 22% mas caro que el importado, debido principalmente al alto costo de la electricidad en México. Por otro lado, México es un gran productor de Zn, y vende a bajo precio el 70% de su producción, sin valor agregado.

Las propiedades mecánicas de la aleación Zn-Al hace posible que puedan sustituir a las aleaciones ricas en aluminio, en aquellos casos en que la ligereza no es un factor importante. Otra propiedad sobresaliente de la aleación Zn-Al es la de tener un comportamiento superplástico.

El aluminio en México es un producto de importación, debido a la carencia de materia prima convencional utilizada para extraer el aluminio. Sin embargo, debido a las constantes

innovaciones en las aplicaciones de este material, el consumo aumenta a un ritmo anual superior al 22%. El problema que encaramos, no es el de literalmente quedarnos sin aluminio, sino el conseguirlo bajo condiciones económicas aceptables, ya que hay un límite costo/energía. El punto básico a resolver es: cómo se podría satisfacer nuestras necesidades de aluminio, sin tener que aumentar las importaciones ni el gasto de energías. Una posible respuesta a esta interrogante es la sustitución de Al por aleaciones de Zn-Al. El Zn es un material, del cual México tiene grandes excedentes ya que de las 270000 toneladas que se producen anualmente solo utilizamos 70, las restantes se venden a la mitad de precio del aluminio. La sustitución de las aleaciones Al-Si-Mg usadas en la industria de la construcción por aleaciones Zn-Al, reduciría el consumo de aluminio, ya que estas aleaciones de Zn llevarían tan solo un 22% de aluminio.

1. Propiedades Mecánicas de las Aleaciones Zn-Al

Las aleaciones de Zinc que se han investigado contienen 60, 70, 78 y 85% en peso de zinc. Las propiedades mecánicas de estas aleaciones varían de acuerdo a su tratamiento térmico, ver tabla 1:

- las aleaciones que son enfriadas en el horno presentan un esfuerzo de cedencia casi constante comprendido entre 7 y 9Kg/mm² para cualquier concentración de zinc. La microestructura de estas aleaciones es perlita.
- Las aleaciones templadas desde 350°C en agua con hielo presentan una estructura extremadamente fina. El punto de cedencia de las aleaciones tratadas en esta forma es el más alto y alcanza un máximo 28 Kg/mm² en la composición de Zn-22Al.
- Los resultados de microdureza son, como era de esperarse, un fiel reflejo del comportamiento mostrado por el esfuerzo de cedencia. La máxima dureza se obtiene en la aleación con composición de 78% de Zinc templada a 0°.

No existe algún cambio entre la densidad de las aleaciones con igual composición pero diferente tratamiento térmico.

Tabla 1 Resultados de los ensayos de compresión de las aleaciones de Zn-Al con diferente tratamientos térmico

	Enfriamiento lento			
	Temple			
	60% Zn	70% Zn	78% Zn	85% Zn
Esfuerzo de cedencia en compresión kg/mm ²	10	8	9,5	8,5
Deformación %*	70	65	80	80
Densidad gr/c.c.	4,2	4,5	5,2	5,5
Intervalo de fusión °C	450-540	430-500	421-482	380-430

2. Efecto de las Modificaciones en los Tratamientos Térmicos.

Las propiedades de estas aleaciones sufren cambios, si el templado se efectúa a partir de otra temperatura, así, la aleación con 70% de zinc, al ser templada desde 400°C en lugar de 350°C presenta un reblandecimiento anómalo, quedando su punto de cedencia en tan solo 8Kg/mm². El tiempo de homogenizado, así como el tiempo de recocido también dan lugar a cambios sensibles en las propiedades mecánicas. En el caso del tiempo de homogenizado, las propiedades parecen estabilizarse después de 5 horas y en el caso de recocido se alcanza un máximo en la deformación de la aleación eutectoide si se recoce a 350°C durante 20 horas.

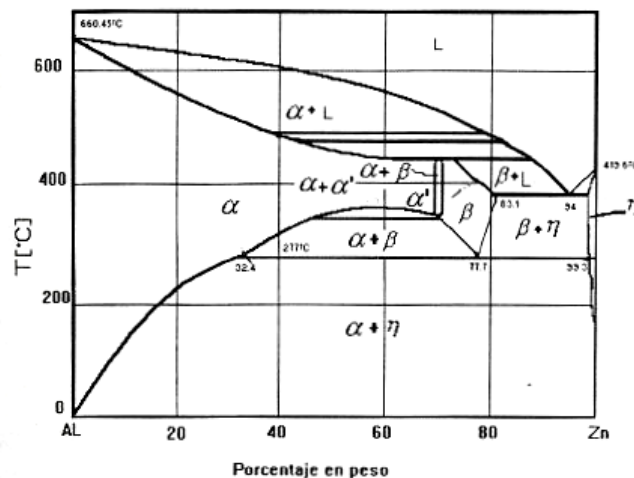


Figura 1 Diagrama de fases de la aleación Al-Zn

3. Análisis de las Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de las aleaciones Zn-Al, son muy sensibles al tratamiento térmico, lo cual nos brinda un buen intervalo de valores para las propiedades mecánicas que van desde 8Kg/mm^2 hasta 22Kg/mm^2 , las cuales son superiores a las aleaciones convencionales Al-Mg-Si. Además estas aleaciones son susceptibles a endurecerse por deformación, lo cual les confiere superioridad en cuanto a resistencia mecánica.

Las aleaciones con 60% de Zn, son las menos sensibles al tratamiento térmico pues sus propiedades solo varían desde 9Kg/mm^2 para las muestras enfriadas lentamente hasta 12Kg/mm^2 para las muestras templadas de 350°C a 0°C . Es de hacerse notar que la máxima resistencia se obtiene al templar a 0°C desde la región $\alpha + \beta$ y una resistencia intermedia al templar desde la región alfa. Esto puede interpretarse, como que la resistencia es proporcional a la cantidad de la fase β presente al momento de templar. Así, si templamos desde 400°C rápidamente a 0°C , no hay oportunidad de formación de β y la aleación resulta blanda. Sin embargo, templando mas suavemente desde 400°C hasta 20°C , si hay oportunidad de formación de fase β resultando una aleación mas resistente.

Un análisis mas profundo de las transformaciones de fase demostró que al templar desde 350°C , no podemos retener la fase β a temperatura ambiente, sino que esta tiende siempre a descomponerse en las fases $\alpha + \eta$, formando perlita (figura 1). El producto de la transformación de la fase β , se observó que variaba según la velocidad de enfriamiento, dando por resultado perlita granular al enfriar lentamente, perlita muy fina al enfriar con velocidades intermedias y perlita gruesa al enfriar lentamente. En las aleaciones con 70%Zn, lo anteriormente dicho parece aplicarse, pues el comportamiento depende otra vez de la cantidad de fase β presente en el momento de templar. En las aleaciones con 78% de Zn tenemos una sola fase entre los 400°C y 320°C por lo que se eligió para el templado la temperatura de 350°C . A esta temperatura la muestra contiene únicamente fase β , por lo que la aseveración de que el tipo de perlita que resulte de la descomposición de β , es la que gobierna el comportamiento mecánico se comprueba perfectamente. Al templar de 350°C a 0°C se obtiene una perlita granular, con máxima resistencia. Al templar de 350°C a 20°C , la perlita es de laminas finas y presenta una resistencia mecánica ligeramente menor, por otro lado, el enfriamiento lento origina una perlita gruesa con baja resistencia. A esta composición se observó que las muestras templadas de 350°C a 20°C , se fracturaron soportando muy poca deformación, mientras que los otros casos las pruebas se detuvieron

al llegar a deformaciones de alrededor de 70% sin observar fractura. Esto implica que la perlita fina es dura pero al mismo tiempo resiste poca deformación.

CAPITULO II

LA SUSTITUCION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO POR LAS DE ZN-AL

1. Efecto de la adición de Cu a la Aleación Eutectoide Zn-Al

Los cambios en la microestructura, al añadir 1 o 2% de Cu a la aleación Zn-22%Al, son poco apreciables, sin embargo los cambios son notorios al añadir 4% de Cu. Las microestructuras resultantes del enfriamiento lento para las aleaciones con 1 y 2% de Cu son perlitas muy similares a las obtenidas con la aleación Zn-22%Al. es de esperarse que ahora cada fase de la perlita contenga Cu en solución. La aleación con 4% de Cu presenta gránulos de una segunda fase y entre ellos existe una perlita muy fina. Esto implica que el cobre en bajas cantidades entra en solución sólida con la fase α (Al) y con la β (Zn). El enfriamiento en aire y en agua con hielo, produce una estructura con grano muy fino equiaxial en las aleaciones con 1 y 2% de Cu. A mayor velocidad de enfriamiento en el templado, menor el tamaño de grano. Estas microestructuras son las que dan lugar a altas deformaciones observadas a temperatura ambiente (superplasticidad). Los mismos tratamientos en la aleación con 4% de Cu producen una estructura que consiste en una dispersión de granos más grandes de otra fase que posiblemente sea la fase ϵ retenida por el tratamiento térmico. Estos granos son de una fase dura y frágil, por lo que es de esperarse mayor resistencia pero menor deformación.

2. Efectos de Cu en la Microdureza

La aleación con 4% de Cu presenta un notable incremento en su dureza, las aleaciones con 1 y 2% de Cu aumentan su dureza ligeramente y después de un temple. Este incremento es debido a la formación de precipitados de Cu-Al en la fase α y de Cu-Zn en la fase η , en especial cuando hay un templado a velocidad intermedia, como es el caso del enfriamiento en aire. Un enfriamiento muy rápido o muy lento no permitiría la formación de un precipitado con tamaño óptimo para mejorar la dureza. Los esfuerzos de cedencia de estas aleaciones resultan ser mas altos que los mismos con las aleaciones sin cobre. Al igual que en el caso de la dureza, las aleaciones con 4% de Cu son las que presentan mayor incremento en su resistencia mecánica. Es interesante hacer notar que la deformación plástica en las aleaciones con 1 y 2% de Cu aumentó sensiblemente, llegándose a obtener

deformaciones de hasta 110% de reducción de altura inicial sin presentar agrietamiento. La misma aleación en tensión se logró deformar hasta 82% a temperatura ambiente, que es una deformación 4 veces mayor a la que resisten las aleaciones de aluminio.

3. Microestructura y Propiedades Mecánicas del Zinalco

El zinalco es un material basado en la aleación eutectoide Zn-Al modificada con cobre. Fue desarrollada en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Una de las propiedades más sorprendentes de esta aleación es la de comportarse como un plástico a temperaturas de $0,5T_m$ a $0,6T_m$, donde T_m es la temperatura de fusión.

El Zinalco viene a llenar un vacío existente entre los dos materiales con más aplicaciones industriales, el hierro y el aluminio.

4. Propiedades Físicas

Las principales características físicas del Zinalco se muestran en la tabla 2. Como podemos notar en esta tabla, el zinalco tiene un intervalo de fusión bastante amplio. El bajo punto de fusión de esta aleación, en comparación con el aluminio, latón, bronce o hierro de fundición, permite ahorros considerables de energía.

Tabla 2 *Propiedades físicas del ZINALCO*

Propiedades físicas del zinalco	
Temperatura de fusión	694 a 754 °K
Densidad	$5,4 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-3}$
Módulo elástico	100 Gpa
Conductividad eléctrica	0,0000059 ohm cm ¹
Conductividad térmica	$125,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Coefficiente de expansión térmica (entre 290 y 548 K)	$25 \times 10^6 \text{K}^{-1}$

La densidad de la aleación la coloca en una posición intermedia entre el Acero y el aluminio. Comparativamente es más ligera que el Zamak, la cual es la aleación de Zinc más conocida para fundición; 30% más ligera que el hierro de fundición; 40% más ligera que el latón y pesa el doble que el aluminio. Su coeficiente de expansión térmica, el cual reviste importancia en situaciones como ajuste de ventanas o fundiciones de precisión, es muy similar al del aluminio.

5. Microestructura.

Básicamente, el Zinalco tiene una microestructura compuesta de dos fases; la fase α , es aluminio con menos de 1% de Zinc disuelto y la fase η , es zinc con menos de 0,5% de aluminio disuelto y en ambas fases hay una cantidad de cobre disuelto. La forma geométrica que toman estas fases depende de la trayectoria seguida durante el enfriamiento a partir de una temperatura superior a 280°C pero inferior a 420°C, que es la región donde el zinalco adquiere una estructura cristalina idéntica a la del aluminio (cúbica F). Si se enfría rápidamente, la estructura resultante esta formada por granos muy finos de fase α y η , mientras que si se enfría lentamente las fases α y η se arreglan en forma de láminas alternadas dando una estructura perlítica. En ambos casos los granos o láminas son tan finas que solo son observables con la ayuda de la técnica de microscopía electrónica. Su ancho es menor a 3 μm .

6. Zinalco Superplástico

La superplasticidad es la propiedad que tienen algunas aleaciones metálicas de poder deformarse, en tensión, varios cientos por ciento antes de llegar a la fractura, y aun, sin que se presente el efecto de reducción de área localizado, es decir, la formación de un cuello.

Antes de 1945 el comportamiento de la deformación de cierta clase de materiales que poseían propiedades de viscosidad entre el vidrio y la brea tenia varios nombres. El término superplasticidad se introdujo después de 1945 por los rusos Bochvar y Sviderskaya.

Una explicación definitiva al porqué de este comportamiento en algunos metales no se conoce aun, experimentalmente se sabe que la aleación debe tener ciertas propiedades, como:

- Tener una estructura de grano muy fino. Con diámetros menores a 5 μm .
- La aleación debe deformarse a una temperatura elevada, a menudo 0,5 a 0,6 veces la temperatura absoluta de fusión de la aleación.
- Debe utilizarse una velocidad de conformado baja, es decir una rapidez de deformación muy lenta.
- Los bordes granulares en la aleación deberán permitir que los granos se deslicen fácilmente unos sobre otros y giren al aplicarse esfuerzo.

El comportamiento superplástico de la aleación Zn-Al fue reportado desde 1945 por Bochar y Sviderskaya. Solo se comentó sobre el bajo esfuerzo de deformación y la alta ductilidad de la aleación granular Zn-20Al. Subsecuentes estudios reportaron elongaciones de varios cientos por ciento y confirmaron la importancia de la composición.

La aleación eutectoide Zn-22Al posee un comportamiento superplástico a elevadas temperaturas (temperaturas mayores a 200°C), bajo ciertas condiciones de deformación y microestructura. A temperatura ambiente esta misma aleación pierde estas propiedades, solo se puede deformar un 15%. Sin embargo, al ser modificada con pequeñas cantidades de cobre (ZINALCO) se observa un incremento impresionante en la ductilidad a temperatura ambiente. Las cantidades de cobre introducidas para dar este efecto se encuentran dentro de la región de solubilidad (0,6 a 2,5%) y prácticamente no afectan las temperaturas de transición ni la microestructura mostradas en la aleación eutectoide Zn-Al. El zinalco es, por lo tanto, una aleación de alta resistencia y que es superplástica a temperatura ambiente, su deformación a 20°C es cercano a 200%; esta deformación se logra siempre y cuando la aleación haya sido sometida a templado en hielo y subsecuentemente a una laminación a temperatura ambiente. Existe una concentración de cobre por la cual se logra la máxima ductilidad, después la resistencia mecánica sigue en aumento, pero la ductilidad se reduce.

Un modelo preliminar para explicar la gran ductilidad de la aleación Zn-Al-Cu a la temperatura ambiente, es que la presencia del cobre obligue a los granos a crecer con una orientación privilegiada y que esta orientación facilite el deslizamiento de un grano sobre otro. Algunos autores han propuesto que bajo la acción de temperatura y esfuerzo, los granos de las aleaciones Zn-Al sufren orientaciones preferenciales y que después se pueden deformar superplasticamente. En las aleaciones Zn-Al-Cu aparentemente el cobre a provocado esta orientación y no se requiere de calor para lograrlo.

7. Corrosión.

La posible utilidad de las aleaciones Zn-Al, como sustitutos de las aleaciones ricas en aluminio, para aplicaciones en donde la ligereza no es el factor decisivo, depende de su comportamiento contra la corrosión, como en el caso de la industria de la construcción.

La corrosión puede considerarse como una reacción entre un metal y su medio ambiente, cuyo resultado es la pérdida de metal, tanto al medio como en forma de compuesto de

carácter oxidado. La pérdida de la resistencia mecánica o ductilidad para el componente metálico en su conjunto es generalmente el cambio más importante en sus propiedades. El control de la reacción de corrosión se basa en la práctica de actuar sobre el medio ambiente o sobre el metal. El control sobre el medio ambiente significa controlar su composición o reducir la humedad en la atmósfera, desairar los electrolitos, cambiar la acidez o alcalinidad a valores mas moderados, eliminar las bacterias, reducir la temperatura o añadir sustancias químicas específicas para inhibir la reacción de corrosión. Estos son los medios más importantes en la lucha contra la corrosión.

Desde el punto de vista de la producción, sería mas deseable obtener un metal o una aleación que en su estado bruto de fabricación tuviera una determinada resistencia a la corrosión frente a diversas circunstancias y, por tanto, redujera el costo.

Según estudios realizados, la aleación Zn-22Al, presenta buena resistencia a la corrosión de vapor de agua. Los resultados de estos estudios indican el desarrollo de un óxido protector que impide mayor oxidación.

En el aluminio puro, la capa es continua, ya que ahí existe solo una fase. En la aleación la capa esta compuesta de dos partes, una en la región rica en aluminio, que corresponde a la capa protectora normal del aluminio, y otra en la región rica en zinc, que es mas porosa y de mayor volumen. La rapidez de oxidación crece inicialmente de forma muy rápida, para después estabilizarse siguiendo una relación casi parabólica. La región de rápida oxidación corresponde a la formación del óxido protector, después de la cual la rapidez de oxidación tiende a estabilizarse. Es posible que esta capa trabaje como película protectora que aísla a la superficie del ambiente.

El desarrollo de esta capa protectora depende de la microestructura de la aleación, ya que, en cada una de ellas se observó diferente comportamiento. En todos los casos se observó la tendencia a formar una capa homogénea en la superficie a través de la soldadura del óxido mas grueso. Esto no fue posible en todas las regiones, pues el éxito de la unión depende de la distancia que separa al óxido que crece mas rápido. Así, en la microestructura de fundición (dendritas), la unión de este óxido solo sucede en la región interdendrítica, quedando los granos ricos en aluminio protegidos por un óxido mas delgado, por lo tanto toda la capa es de menor espesor.

En la microestructura perlítica de enfriamiento lento, compuesta de laminas de α y η , la unión sólo se logra en aquellas regiones en donde la perlita es muy fina. En la estructura

ocasionada por el enfriamiento en agua con hielo de granos hiperfinos, se nota la tendencia a homogeneizar la capa en toda la superficie, generando una capa protectora de mayor espesor.

Las aleaciones con microestructuras perlíticas presentaron una menor corrosión que las estructuras con grano fino y que las de fundición. Este efecto puede ser provocado por la existencia de una gran cantidad de superficies en la estructura de granos finos, ya que se ha observado que los granos tienen una gran concentración de zinc en la región cercana a la frontera. En la estructura de fundición fue claramente observada la corrosión en las regiones interdendríticas ricas en zinc. En la microestructura perlítica, la cantidad de fronteras es menor, por lo cual la corrosión se observó en menor grado.

Además de estas propiedades naturales, el zinalco acepta recubrimientos protectores por anodinado o por inmersión en baños de cromatos. La aleación también puede ser pintada siempre y cuando la superficie esté perfectamente limpia. Los electrodepositos de cobre-níquel-cromo son otras posibilidades de dar acabados a esta aleación, con la ventaja de que la adherencia que tiene esta aleación a los electrodepositos es superior a la que presenta el zinc puro o los plásticos.[2]

CAPITULO III

ESPUMAS METALICAS

Las espumas metálicas son, como su nombre indica, materiales metálicos con una morfología porosa. Pueden formar una estructura abierta de poros interconectados, similar a una esponja de baño, o bien una estructura de poros cerrados no conectados entre sí. A pesar de que el interés en el uso de este tipo de materiales se ha ido incrementando, existe confusión en lo que se refiere al término espuma metálica, por lo que Banhart propuso varias definiciones [3]

- Metales Celulares: el término mas general, se refieren a un cuerpo metálico en el cual un gas es dispersado. La fase metálica divide espacios de celdas cerradas las cuales contienen la fase gaseosa. En un sistema ideal, las células individuales están separadas una de la otra por metal pero en realidad esto no existe.
- Metales porosos: un tipo especial de metales celulares en el que los poros están normalmente aislados uno de otros y se caracterizan por tener una superficie lisa.
- Espuma metálica (sólida): son casos especiales de metales celulares. Una espuma sólida se origina de una espuma liquida en la cual. Las células son cerradas, redondas o polihedrales y están separadas una de otra por una capa delgada.
- Esponja metálica: una morfología de un metal celular en el cual las células están interconectadas

Son varios los materiales base que se pueden utilizar para obtener espumas metálicas como son: Zinc [3] Aluminio, Estaño, Plomo, Oro, Plata [4], Níquel [5] y vidrios de la aleación Pd-10Ni-27Cu-20P [6]. Tienen muy baja densidad (entre 3-80 %), a la vez que presentan algunas de las propiedades del metal del que están formados, junto a otras características derivadas de su peculiar estructura. Por tanto, son materiales con una combinación de propiedades físico-químicas y mecánicas muy especiales, de manera que tienen un conjunto de propiedades que en la actualidad no está cubierto por otros materiales, Tales como [7]

- Porosidad cerrada o abierta
- Bajo peso específico

- Alta capacidad para absorber energía durante la deformación plástica
- Alta dureza específica
- Reduce la conductividad térmica y eléctrica
- Buena amortiguación acústica
- No flamable
- Reciclable
- Buena maquinabilidad

Ya se ha establecido que varias de estas propiedades (por ejemplo el módulo elástico, la conductividad térmica y eléctrica) dependen de la densidad relativa y obedecen una regla que se aplica a los sistemas porosos y que es de la forma [2,7,8]:

$$A = A_o \left(\frac{\rho}{\rho_o} \right)^n$$

Donde A es la propiedad de interés (módulo elástico, la conductividad térmica y eléctrica), A_o es la propiedad del material sólido, ρ es la densidad de la espuma, ρ_o es la densidad del material sólido y n es un exponente que usualmente está en el rango de 1.5 a 2. El valor del exponente viene dado por la ecuación de la curva que origina la dispersión de los valores del esfuerzo a compresión contra el valor de la densidad de cada muestra. Un ejemplo de tal relación de esfuerzo y densidades la Fig. 2, En este caso el exponente, n, es 1.89 [3].

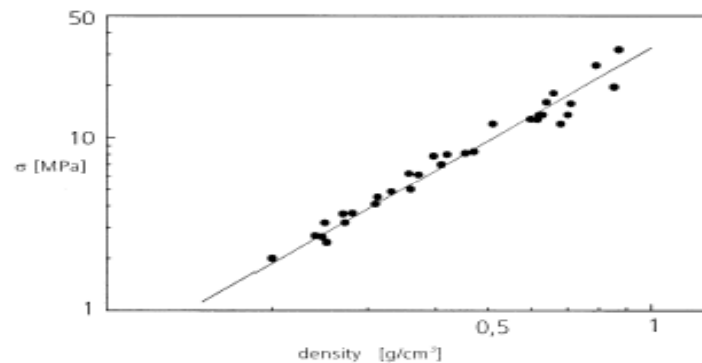


Figura 2. Efecto de la densidad en el esfuerzo de compresión de las espumas, base aluminio, fabricadas por el proceso de metalurgia de polvos.

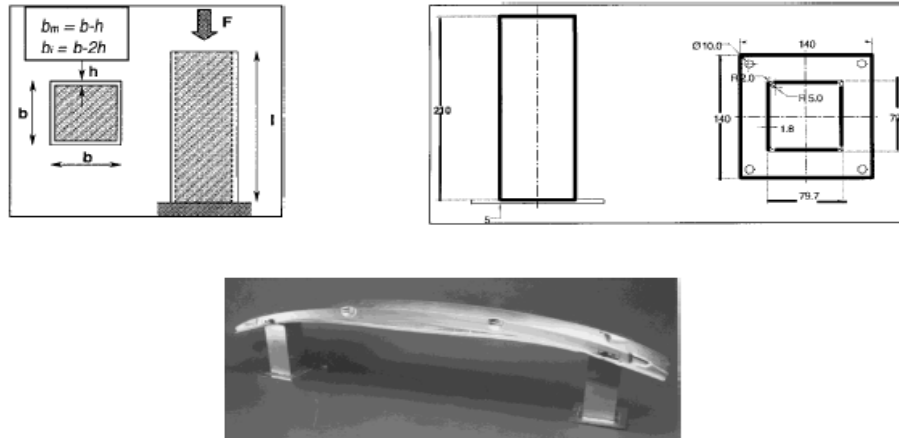
1. Aplicaciones

Esta combinación de propiedades físicas y mecánicas han hecho que el campo de aplicación de las espumas metálicas sea muy amplia en industrias como la automotriz, aeroespacial, náutica, de construcción, civil y médica. Por ejemplo, la industria biomédica puede utilizar espumas de Titanio como implantes dentales [10], ya que el titanio es biocompatible y las propiedades elásticas de la espuma pueden ser adaptadas a la forma del hueso, esto con una apropiada selección de la porosidad. La industria aeroespacial puede cambiar las costosas estructuras llamadas “Honeycomb” por láminas de espumas de aluminio o paneles de AFS, con lo cual puede reducir costos. Una ventaja de los paneles de aluminio es que no están unidos por medio de adhesivos, lo que los hace seguros en el momento de incendios.

2. Cajas de Choques

Actualmente hay una gran demanda por incrementar los niveles de seguridad activa y pasiva en los vehículos, en algunos automóviles se han incorporado elementos deformables para absorber energía de choque, lo que involucra un aumento de peso a los vehículos, contrario a las demandas de bajo consumo de combustible. Por esta razón, los materiales de bajo peso específico y alta capacidad para absorber energía son de un especial interés. Las espumas de materiales orgánicos tienen bajo peso específico, pero su capacidad para absorber energía es también baja; las espumas de polímeros tienen un esfuerzo de deformación pequeño. Aplicando espumas de aluminio se puede tener gran cantidad de energía absorbida [9].

En los automóviles, para bajas velocidades de impacto 3-5 Km/H, la solución más simple es un absorbedor de impacto, pero aumentando esta velocidad el chasis se deforma plásticamente. A. Fuganti y L. Lorenzi, del Centro Ricerche FIAT [11] han introducido una estructura para absorber la energía de choque entre el chasis y la defensa del vehículo, con esto es posible incrementar el rango de velocidad arriba mencionado por encima de los 15 Km/h, en este caso la seguridad de los pasajeros no es el objetivo principal, debido a la baja velocidad, sino en la fácil y económica reparación del vehículo. El elemento que diseñaron Fuganti y Lorenzi, ver figura 3, consiste en una caja de choques que en su interior lleva espuma de aluminio, lo que garantiza una alta eficiencia y ventajas como bajo peso y menores dimensiones en comparación con otros materiales.



Tipo de Prueba	Fuerza Maxima (N)	Energía Absorbida (J)	Eficiencia A_e (%)
Compresión estática de cajas de choques no llenas	38398	3505	0,56
Compresión estática de cajas de choques llenas de espuma	51891	5490	0,74
Compresión dinámica de cajas de choques llenas de espuma	57356	4744	0,74

Figura 3. Arriba, diseño de la caja de choques, en medio, cajas de choques fijadas a una defensa convencional; abajo, propiedades mecánicas de las cajas de choques, huecas y rellenas de espuma de aluminio.

Este mismo sistema se ha utilizado en el tren suburbano de Alemania. Como se ve en la Fig. 4, la parte negra es una caja de choque [12]. Dicho elemento está diseñado de acuerdo a las normas de VDV 152 de la Asociación Alemana de Compañías de Transporte



Figura 4, la caja de choques es un compuesto de espuma de aluminio y un polímero, recubierta de caucho

3. Absorción de Sonido

La Fig. 5 muestra el coeficiente de absorción de sonido de espumas de aluminio laminadas, llamadas Alporas. Este coeficiente fue medido por el método de la cámara de reverberación

y esta en comparación con las Alporas sin laminar y el vidrio de 40mm de espesor y una densidad de 25 Kg/m^3 [13]. Las Alporas laminadas tienen un alto coeficiente de absorción de sonido, equivalente al vidrio, pero con una densidad menor. La figura 6 muestra blocks de Alporas ancladas a la parte baja de una carretera elevada en Japón para la absorción de sonido.

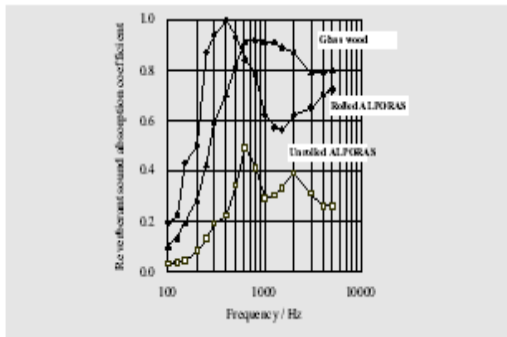


Figura 5. Valor del coeficiente de absorción de sonido de las espumas de aluminio laminadas llamadas Alporas contra el vidrio y las mismas Alporas sin laminar;



Figura 6. Alporas ancladas a la parte baja de un viaducto elevado en Japón, con esto se reduce el nivel de ruido hacia los residentes cercanos.

4. Espumas de Níquel

Las espumas de Níquel, llamadas INCOFOAM, son usadas en las baterías recargables donde su alta porosidad, buena conductividad del Níquel y tamaño de poro regular, son necesarios para tener bajo peso y alta densidad de energía. El esfuerzo y la resistencia a la temperatura y corrosión del níquel ofrecen una atractiva combinación de propiedades para ser usado como material filtrante, ver [figura 7 \[5\]](#).



Figura 7. Izquierda, estructura en las espumas INCOFOAM; derecha, propiedades físicas y mecánicas.

5. Estructuras AFS

Los análisis de las cargas y requerimientos de las partes estructurales del cuerpo de un automóvil, muestran que existen varias oportunidades donde las espumas de aluminio pueden contribuir a mejorar el comportamiento en torsión y absorción de energía de la estructura del automóvil. En algunos casos hay estructuras huecas dentro de las cuales un cuerpo de espuma de aluminio puede ser integrado [14]. Bajo este principio, en 1998, fue presentado el primer carro concepto (figura 8) con estructuras AFS en la Detroit Motor Show [15]. Existen ya varias técnicas con las cuales se puede lograr que la espuma quede integrada y fija a las estructuras huecas y así obtener los beneficios que las espumas de aluminio ofrecen. Las técnicas de unión más importantes se ilustran en la figura 9 [16]:

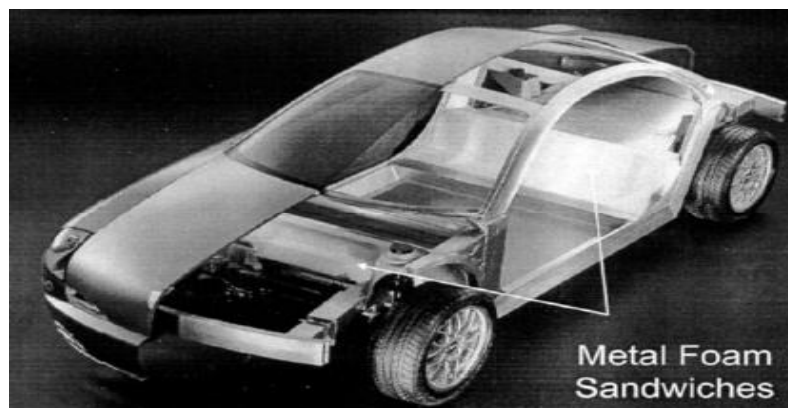


Figura 8. Carro concepto con paneles de estructuras AFS

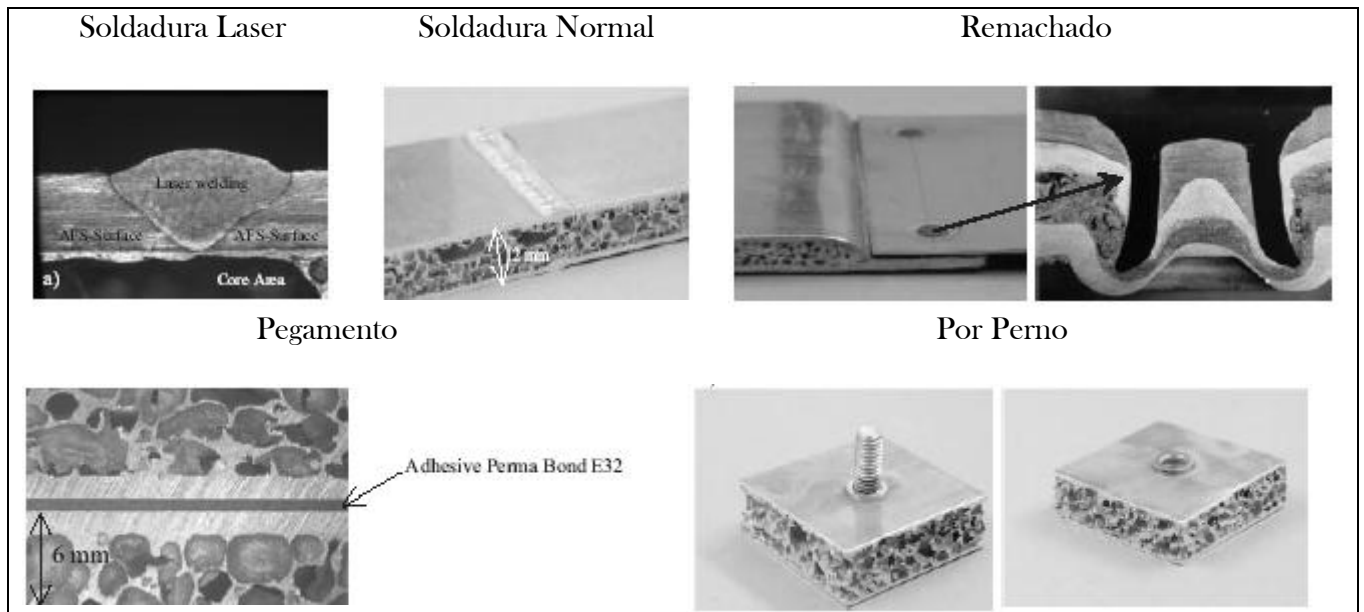


Figura 9. Técnicas de unión aluminio-espuma-aluminio (AFS)

No solo en la industria automotriz tienen aplicaciones las estructuras AFS. La construcción de barcos se puede ver beneficiada usando estas estructuras para puertas, escotilla o muros, utilizando la relación de esfuerzo por el peso. Las plataformas de movimiento rápido, columnas y vigas, utilizadas en estructuras de maquinaria, hechas de materiales densos, pueden ser cambiadas por estructuras AFS logrando reducir el peso de la máquina y la vibración de la misma.

6. Filtros



Figura 3,10 esponjas aplicadas como silenciadores neumáticos [17]

Existen procesos bajo los cuales es posibles obtener esponjas, esto es, materiales porosos en los cuales existe un

interconexión entre los poros. Estos nuevos metales se usan como Silenciadores ya que se pueden colocar en los sistemas neumáticos y reducir la emisión de ruido a la salida del aire; Filtros: se pueden utilizar para separar partículas sólidas de líquidos o gases o para separar dos líquidos. Otros campos en los cuales está en evaluación su uso es en la reducción de presión, intercambiadores de calor. Ver Figura 10.

CAPITULO IV

PROCESOS DE OBTENCION DE ESPUMAS METALICAS

En 1943 Benjamin Sosnik logró obtener una espuma de Aluminio con Mercurio. Para esto, primero fundió una mezcla de Al con Hg en una cámara cerrada a alta presión. La presión fue liberada, lo cual provoca la vaporización del Hg, esto a la temperatura de fundición del Al, y la formación de la espuma. Un método menos riesgoso fue diseñado en la década de los 50's, con el principio de que un metal líquido se convierte más fácilmente en espuma, si es pretratado para aumentar su viscosidad. Con la ayuda de este proceso, William Eliot y Stuart Fiedler, en el Bjorksten Research Laboratories, desarrollaron una espuma de aluminio para la US Navy a finales de los 50's [10]

En la actualidad son varios los métodos para fabricar espumas. Cada uno de estos métodos cubre diferentes rangos de densidad y características como tamaño y forma de la celda, hay procesos adecuados para producir largos paneles o blocks y otros para obtener piezas pequeñas de formas complejas.

Se ha hecho ya una clasificación de estos procesos y se han establecido dos principales rutas para obtener espumas metálicas:

- La primera esta basada en la inyección continua de un gas a un metal líquido o por la descomposición de un agente espumante.
- La segunda ruta es la llamada metalurgia de polvos.

La figura 11 nos da una visión de los 5 métodos más utilizados para obtener espumas. Uno puede distinguir que son dos las rutas principales para obtener espumas, de la fundición de metal o de metalurgia de polvos. Una segunda diferencia es el origen del gas utilizado para crear la porosidad: una fuente externa puede ser utilizada, un agente espumante puede ser descompuesto, o disolver un gas. Tercera, la espuma puede formarse instantáneamente (ejemplo, la adición de gas permite formar la espuma inmediatamente), se puede obtener un producto intermedio que se puede transformar en espuma en una siguiente etapa [3].

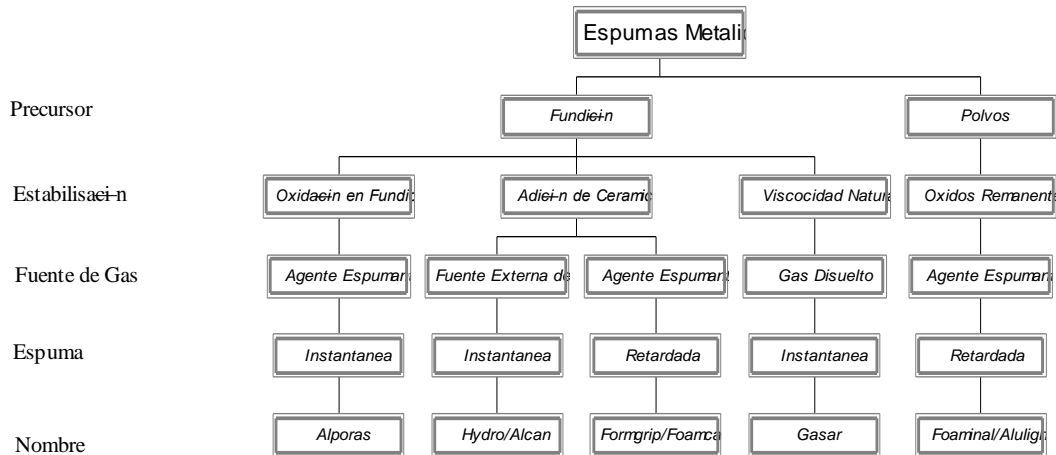


Figura 11. Etapas de los procesos más significativos para producir espumas metálicas

1. Espumas Metálicas por Inyección de Gas (Hidro/Alcan) [3,10,18,19]

Este método es utilizado por la compañía HYDRO ALUMINIUM en Noruega y por CIMAT ALUMINIUM CORPORATION en Canadá, utilizando aluminio y sus aleaciones. La figura 12 describe esquemáticamente el proceso, partículas de carburo de silicio, óxido de aluminio u óxido de magnesio son utilizadas para aumentar la viscosidad de la fundición. Por lo tanto el primer paso consiste en preparar la fundición de aluminio conteniendo unas de estas partículas, haciendo una matriz metálica compuesta (MMC). Este paso requiere técnicas sofisticadas de mezclado para asegurar una distribución uniforme de partículas. La MMC es “espumeada” en un segundo paso por la inyección de gas (aire, nitrógeno o argón), utilizando un diseño especial de impulsores y una boquilla de agitación. Así se generan finas burbujas de gas que se distribuyen en la fundición uniformemente. El resultado es una mezcla viscosa de burbujas de gas y fundición de metal que flota a la superficie del líquido donde se convierte en una clara espuma líquida. Debido a las partículas cerámicas la espuma es relativamente estable. Esta espuma puede ser jalada de la superficie del líquido (con una banda transportadora) y así permitir el enfriamiento y la solidificación de la espuma. La espuma sólida resultante es, en principio, tan larga como se desee, tan ancha como el recipiente que la contenga, típicamente 10cm. La densidad de la espuma de aluminio obtenida por este proceso tiene un rango de 0.069 a 0.54 g/cm³, el tamaño promedio de poro es de 3 a 25mm y el espesor de la pared es de 50 a 85 μm. El tamaño de poro, el

espesor de la pared de poro y la densidad pueden ser modificados ajustando el flujo de gas, la velocidad del impulsor, la frecuencia de vibración de la boquilla y otros parámetros.

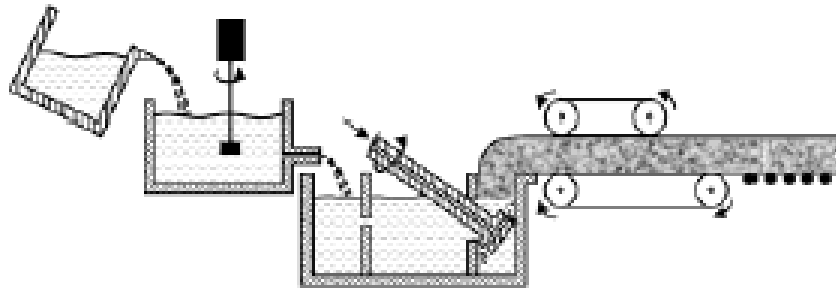


Figura 12. Esquema del proceso llamado Hidro/Alcan.

Ventajas del proceso directo es la capacidad de producir continuamente largos volúmenes de espuma y la baja densidad que se puede lograr. Por lo tanto la MMC es mas barata que otros materiales metálicos celulares.

2. Espumas de Fundición con Agente Espumeante (Alporas) [3,10,18]

Una segunda forma de obtener espumas directamente de la fundición es agregando un agente espumeante en lugar de la inyección de gas. Un a segunda etapa de calentamiento ocasiona que el agente espumeante se descomponga y libere gases los cuales provocan la formación de la espuma. SHINKO WIRE COMPANY, en Amagasaki, Japón, ha estado produciendo espumas por medio de este proceso desde 1986. como se ilustra en la [figura 13](#), en un primer paso, cerca de 1.5 wt% de calcio es agregado a la fundición de aluminio a 680°C. Esta fundición es agitada por varios minutos, durante los cuales la viscosidad continuamente incrementa debido a la formación de oxido de calcio (CaO) oxido de calcio-aluminio (CaAl₂O₄). Después de que la viscosidad ha alcanzado el valor deseado, el hidruro de titanio (TiH₂) es agregado (típicamente 1.6 wt%), sirviendo como agente espumeante y liberando hidrógeno en el liquido viscoso. Lentamente la fundición empieza a expandirse hasta llenar el recipiente que lo contiene. La transformación en espuma tiene lugar a una presión constante. después de que se enfría el molde, la temperatura de la fundición baja hasta que solidifique y se obtenga una espuma sólida que puede ser retirada del molde. El proceso entero dura menos de 15 minutos y la espuma obtenida es de 2050mm x 650mm x 450mm. La densidad de este tipo de espuma esta en el rango de 0.18 a 0.24 g/cm³ con un

tamaño de poro entre 2 y 10mm. Las espumas obtenidas por medio de este proceso muestran la estructura mas homogénea hasta ahora conocida.

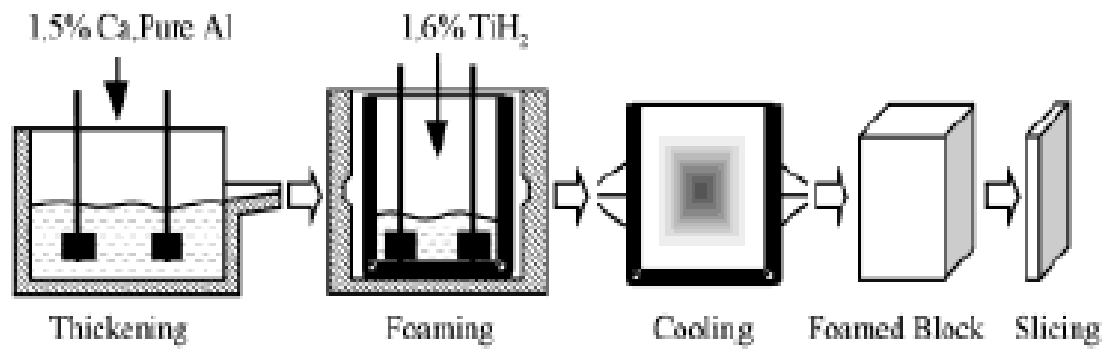


Figura 13 Etapas dentro del proceso de elaboración de Alporas

3. Solidificación Eutéctica (Gasar) [3,10,18,19]

Un método desarrollado cerca de una década atrás, explotando el hecho de que algunos metales líquidos forman un sistema eutéctico con gas de hidrógeno. Si uno de estos metales es fundido en una atmósfera de hidrógeno, bajo alta presión (arriba de 50 atms), el resultado es una fundición homogénea cargada con hidrógeno. Si la temperatura disminuye, la fundición, eventualmente sufrirá una transición eutéctica a un sistema heterogéneo de dos fases (Sólido-gas). Si la composición del sistema es lo suficientemente cercano a la concentración eutéctica ocurrirá una reacción de segregación. Cuando la fundición solidifica los poros de gas se precipitan y son atrapados en el metal. La morfología del poro resultante es larga y esta determinada por el contenido de hidrógeno, la presión bajo la cual se realizó la fundición, la dirección y rango de la temperatura removida y por la composición química de la fundición. Generalmente se forman largos poros orientados en la dirección de la solidificación (ver figura 14)

El diámetro del poro está en el rango de $10\mu\text{m}$ a 10mm , la longitud del poro es de $100\mu\text{m}$ a 300mm y se logra una porosidad de 5% a 72%

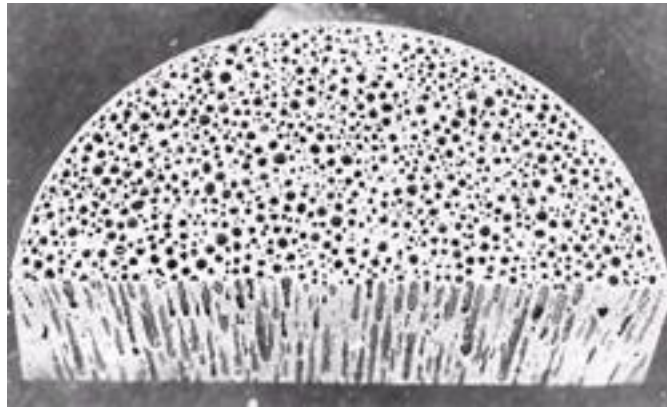


Figura 14 Estructura de la espuma obtenida por el método Gasar

4. Espumas por la Compactación de Polvos (Foaminal/Alulight) [3,10,18,]

Las espumas metálicas también pueden ser obtenidas de polvos de metal. El proceso de producción empieza con la mezcla de los polvos del metal-polvos de metales elementales, polvos de aleaciones o mezclas de polvos- con un agente espumante. Después la mezcla es compactada para aumentar su densidad. La compactación puede ser lograda usando una técnica en la cual el agente espumante es fijado en el metal matriz sin ninguna notable porosidad abierta. Ejemplos de tales métodos de compactación son: compresión uniaxial o una extrusión. El precursor debe ser manufacturado muy cuidadosamente ya que poros residuales u otros defectos pueden ocasionar unos resultados pobres al final del proceso. El siguiente paso es un tratamiento térmico a una temperatura cercana a la del punto de fundición del material base. El agente espumante, que esta homogéneamente distribuido por toda la matriz metálica, se descompone y libera gases forzando al material precursor a expandirse, formando su alta estructura porosa. El tiempo necesario para una expansión completa depende de la temperatura y tamaño del precursor y pueden ser unos cuantos segundos o varios minutos. Este método no es estrictamente para aluminio y sus aleaciones; estaño, zinc, plomo, oro y algunos otros metales y aleaciones pueden ser espumeadas con parámetros del proceso y agente espumante adecuados.

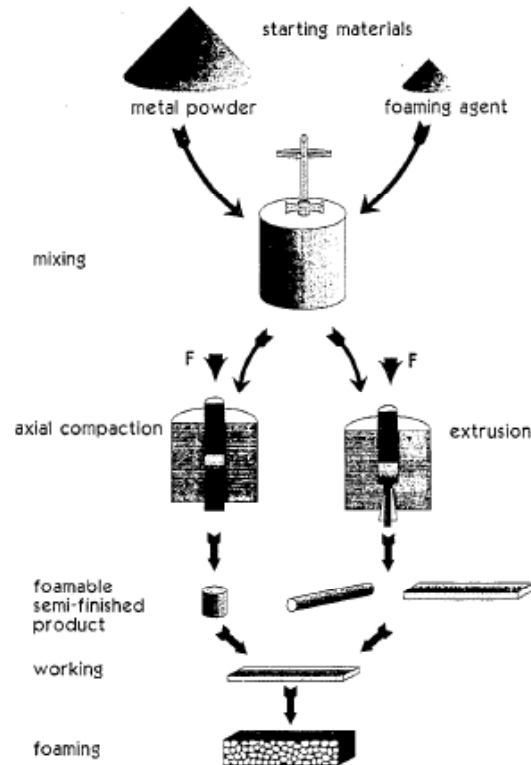


Figura 15. Proceso de Metalurgia de polvos para obtener espumas metálicas

Los agentes espumantes utilizados son hidruros metálicos y se emplean en cantidades menores al 1%. Las espumas obtenidas por esta técnica exhiben una estructura de poros cerrados, con valores de densidad que están en el rango de $0,2-2,5 \text{ g/cm}^3$

El método de compactación de polvos es comercializado a pequeña escala por las compañías germanas SCHUNK y HONSEL y por las compañías austriacas ALULIGHT y NEUMAN ALUFOAM. La figura 15 muestra, de forma esquemática, el proceso de elaboración de espumas de aluminio por la compactación de polvos [20]

5. Lingotes de Espumas Conteniendo Agentes Espumeantes

(Formgrip/foamcast) [3,10,21]

Este proceso es una modificación al método de compactación de polvos, en el cual, la primera etapa consiste en pretratar una mezcla de polvo de hidruro de titanio y polvo de una aleación de Al-12Si, esta mezcla tiene una relación en peso de 1:4. El pretratamiento consiste en una secuencia de dos pasos de oxidación térmica ($400^\circ\text{C}/24 \text{ h} + 500^\circ\text{C}/ \text{h}$) en aire, con esto se forma una capa superficial de dióxido de titanio. Esta mezcla de polvos es dispersado gradualmente en una fundición de Al-9Si/SiC usando una agitación mecánica

convencional (1200 rpm). La fundición es agitada cerca de un minuto a partir de la introducción del polvo. Este primer paso genera un material compuesto, llamado precursor, con una porosidad relativamente baja (23%). En una segunda etapa, el precursor es colado en un molde de grafito, este molde, que contiene al precursor en estado líquido, es calentado en un horno a 650°C por un tiempo de 23 minutos. Pasado este tiempo se saca el molde y se deja enfriar y solidificar. El último paso es retirar el molde. La [figura 16](#) nos muestra el proceso de obtención en forma esquemática.

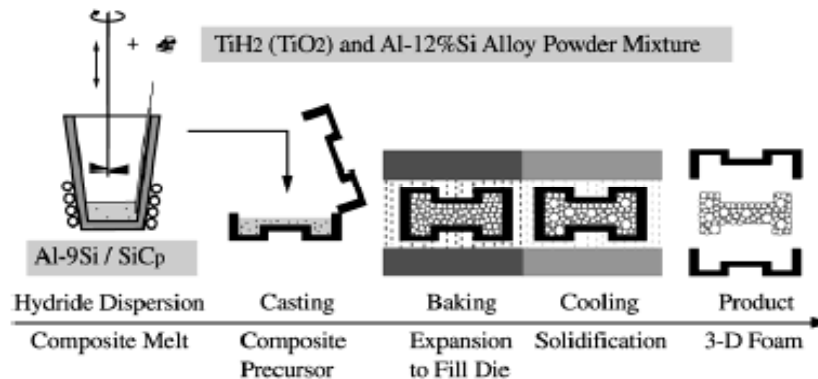


Figura 16 Diagrama esquemático del proceso de obtención de espumas formigrip

6. Réplica de Estructura

Las espumas pueden ser manufacturadas de un metal fundido sin un proceso directo de espumabilidad. Esto se muestra de forma esquemática en la [figura 17](#). De acuerdo a este proceso, una espuma de polímero, por ejemplo espuma de poliuretano, es usada como punto de inicio. Si la espuma de polímero tiene una estructura de poros cerrados se tiene que transformar a una estructura de poros abiertos por medio de un tratamiento de reticulación. La espuma de polímero resultante es entonces llenado con un slurry de un material con suficiente resistencia térmica, por ejemplo: resinas fenólicas y carbonato de calcio o yeso. Después del llenado la espuma de polímero es removida por medio de un tratamiento térmico y el metal fundido es colado dentro de la estructura, de poros abiertos, esta estructura es una réplica de la espuma de polímero original. La aplicación de presión y calentamiento del molde pueden ser necesarias si las estrechas cavidades de la estructura no se logran llenar por completo debido a la fuerza de gravedad al momento de colar. Después de la colada, el molde se debe retirar, utilizando agua a alta presión, la estructura metálica obtenida es una réplica exacta de la espuma de polímero original.

Este proceso presenta dificultades tales como: lograr un llenado completo de los filamentos, controlar la dirección de la solidificación y lograr que la remoción del material del molde no dañe la fina estructura metálica.

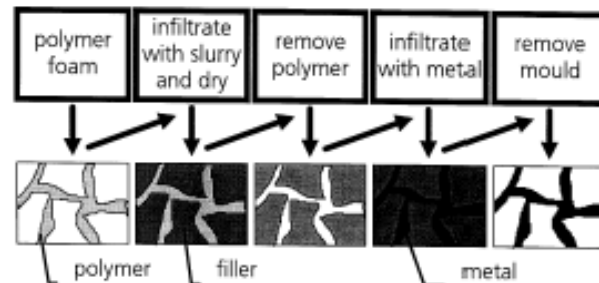


Figura 17. Etapas necesarias para lograr que un metal reproduzca la estructura inicial de una espuma de polímero.

La **figura 18** muestra la estructura de un material celular de aluminio hecha por esta técnica. Tales espumas han sido vendidas por ERG en Oakland (USA) bajo el nombre comercial de “Duocel”, se ha reportado un amplio rango de porosidades, que van desde 2-16 poros/centímetro. Con esta técnica también se pueden lograr formas complejas como las que se muestran en la figura. la densidad de la espuma depende de la forma de la espuma del polímero utilizada, y puede estar entre 80-97%. El precio de una pulgada cúbica de este material, fabricado por ERG, es de 10 dólares.

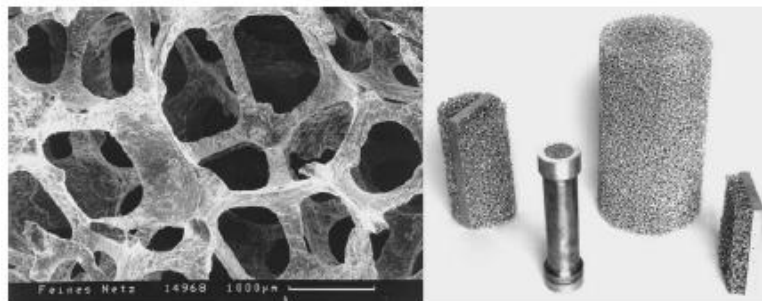


Figura 18. Estructura de la porosidad abierta y formas complejas obtenidas con la técnica de replica de estructura.

7. Colada alrededor de materiales creadores de espacio

Los materiales porosos pueden ser producidos colando un material líquido alrededor de partículas orgánicas o inorgánicas o esferas huecas de baja densidad, o por la introducción de tales materiales en un metal fundido. Cualquiera de los dos tipos de partículas

permanecen en el metal después de la colada o pueden ser removidas sumergiendo el material en solventes o ácidos, o por tratamientos térmicos. La eliminación de las partículas sumergiendo el material en solventes o ácidos se logra al 100% cuando existe una gran cantidad de partículas que permiten una interconexión perfecta.

Un precalentamiento de las partículas utilizadas es usualmente necesario para evitar una solidificación prematura de la fundición, especialmente cuando la capacidad calorífica de las partículas es alta o la presión de infiltración es baja. Debido a la tensión superficial del metal líquido y a la humedad de las partículas utilizadas el llenado de los huecos entre las partículas puede ser difícil de lograr. Por lo tanto, crear un vacío entre los huecos que provocan las partículas o inyectar, con alta presión, la fundición es un requisito. La siguiente figura muestra un esquema de este proceso

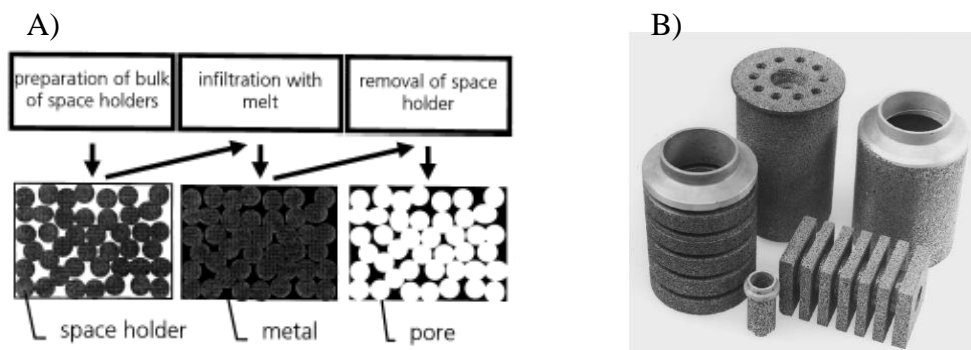


Figura 19. A) El acomodamiento de cierto tipo de partículas puede ser usado para crear espumas metálicas. B) espumas obtenidas bajo este proceso

Una de las principales ventajas de usar esta técnica es el control que se tiene en la distribución del tamaño de poro, la cual es determinada por el tamaño de las partículas utilizadas, esto en contraste con la distribución del tamaño de poro de los procesos mencionados como principales, donde se encuentra una distribución estadística del tamaño de poro. Por otra parte, la máxima porosidad que se puede lograr usando esta técnica está limitada a valores por debajo del 80% mientras que los métodos presentados en la sección anterior logran porosidades hasta del 98%.

CAPITULO V

COMPORTAMIENTO DE LAS ESPUMAS METALICAS BAJO ENSAYOS DE COMPRESION

Para la caracterización de las espumas y la evaluación de sus aplicaciones es necesario estudiar su comportamiento en compresión, o más específicamente longitud y variación de la zona plana. Todas las espumas, sin importar el material del cual están hechas, presentan el mismo comportamiento en los ensayos de compresión [4], el cual se muestra en la siguiente figura.

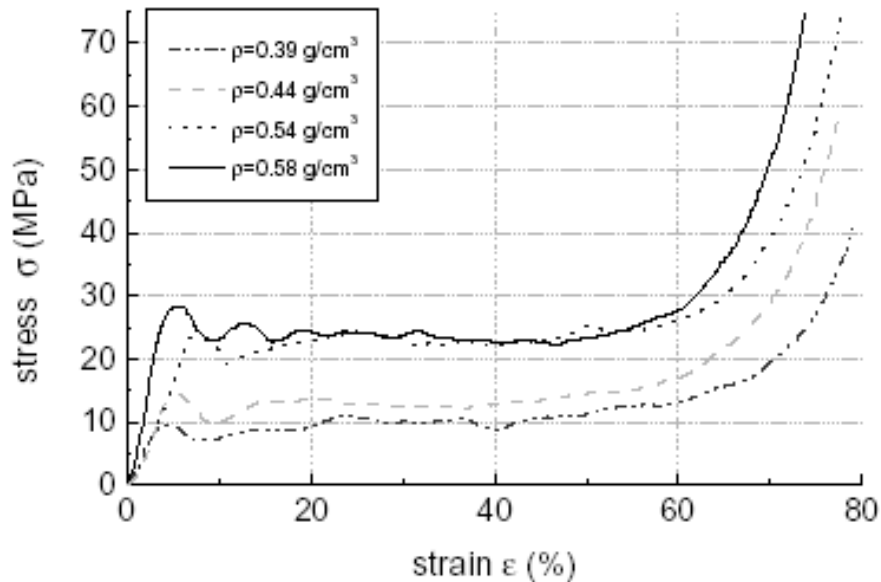


Figura 20. Gráfica obtenida mediante ensayos de compresión a espumas metálicas

Este tipo de gráfica comprende tres regiones [8]:

- Una deformación elasto-plástica hasta el 1% de la deformación.
- Una región extendida de esfuerzo casi estable un poco más del 70% de la deformación
- Un incremento abrupto del esfuerzo debido a la densificación del espécimen

Zona a) de deformación elasto-plástica: para pequeñas compresiones, se puede observar un incremento en el esfuerzo el cual, a primera vista, parece ser elástico. Un análisis más completo revela que el incremento es sólo parcialmente reversible y que cierto proceso de deformación irreversible de la estructura de la espuma ocurre durante la primera carga. Por lo tanto el módulo de Young no puede ser determinado por la inclinación de esta primera parte de la curva. El esfuerzo, después de un punto máximo, cae significativamente, dando paso a la existencia de un UYS (upper yield stress por sus siglas en inglés) y un LYS (low yield stress) [3], esto es el efecto del colapso de una capa de poros, y por lo tanto la deformación correspondiente a esta inclinación es proporcional al tamaño de poro.

Zona b) de esfuerzo constante: en este régimen plano, el modo de deformación es el resultado de la abrupta y repetida falla de sucesivas capas de poros (se sabe que en los materiales celulares la deformación toma lugar por bandas de deformación, la primera banda de deformación aparece en la capa de menor densidad), esta región plana es constante en el caso de materiales perfectamente celulares. Si la espuma no es perfecta, entonces el esfuerzo en esta zona tiene altas y bajas, debido a defectos en la estructura de la espuma como la distribución del tamaño de poro, regiones de baja densidad, poros muy largos y paredes de celdas fracturados.

Zona c) zona de densificación: este punto empieza cuando ya no hay suficientes paredes de celda intactas para soportar la carga, por lo tanto el esfuerzo incrementa rápidamente debido a que el espécimen ha densificado por completo. La densificación es debido a que las paredes de las celdas choquen una con otra, ocupando el espacio que dejaron los poros, ocasionando que la espuma se densifique poco a poco.

1. Esfuerzo de compresión en espumas metálicas

La definición del esfuerzo a compresión de las espumas metálicas es ambigua. Existen varias posibilidades para definir esta propiedad. En la siguiente figura estas posibilidades están denotadas por números [3]:

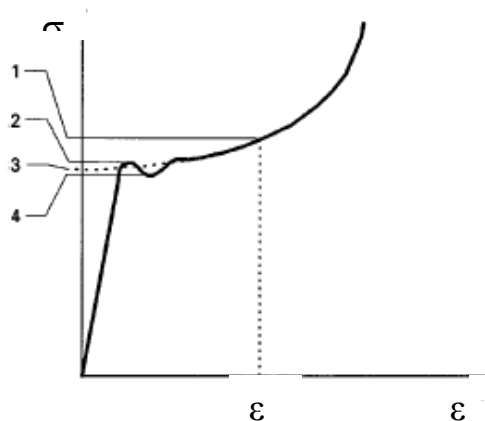


Figura 21. Definición del esfuerzo a compresión de las espumas. 1 esfuerzo de compresión a una deformación dada. 2 esfuerzo de cedencia superior (UYS). 3 esfuerzo extrapolado de la región plana. 4 esfuerzo de cedencia inferior (LYS)

- Se puede utilizar el esfuerzo a la cedencia superior (UYS) o el esfuerzo a la cedencia inferior (LYS) o el promedio de ambos.

- En el caso de que estos dos puntos no puedan ser observados el esfuerzo de la región plana puede ser extrapolado a una deformación cero.
- Finalmente se puede simplemente tomar el esfuerzo a cierta deformación dada, por ejemplo, 10% o 20%, y usar el correspondiente esfuerzo a esa deformación, $\sigma_{10\%}$ o $\sigma_{20\%}$ como la definición del esfuerzo a la compresión. Esta opción es solo recomendable para curvas relativamente uniformes, de otra forma los resultados varían mucho debido a las fluctuaciones del esfuerzo.

Otro factor que influye en el valor del esfuerzo a compresión de las espumas metálicas es la forma geométrica de los poros, las cuales pueden ser esféricas o poliédricas [22]

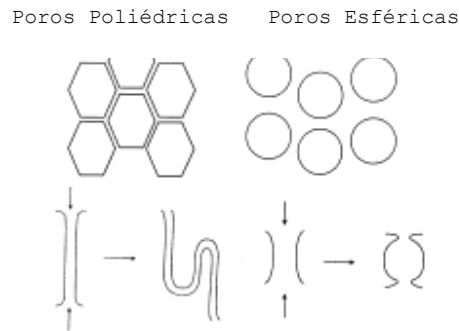


Figura 22. Posibles formas geométricas de los poros de las espumas metálicas con su respectivo modelo de deformación debido a la compresión.

La **figura 22** muestra un esquema de las dos posibles formas geométricas de los poros de una espuma. Las paredes de las poros poliédricos son largos y delgados, lo que produce una compresión inestable y el colapso simultáneo de varias paredes de celdas. Por otro lado, las paredes de la poros esféricos son más cortos y, en promedio, de mayor espesor, lo que produce una estabilidad en la compresión. En la **figura 23** se presentan los diagramas esfuerzo-deformación de un mismo tipo de espuma, Alporas, pero con diferentes formas geométricas [13].

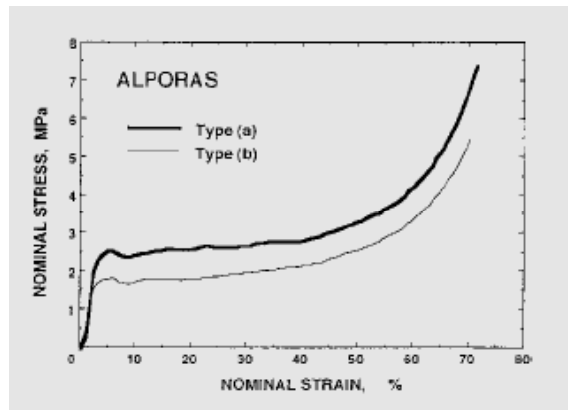


Figura 23. En las espumas metálicas llamadas Alporas, al pasar el 70% de porosidad, la forma esférica de los poros se convierte en poliédricas, lo que causa una disminución en el valor del esfuerzo a la compresión

2. Capacidad de Absorción de Energía de Espumas Metálicas

La capacidad de absorción de energía se define como la energía necesaria para deformar un espécimen dado a una cierta deformación [23]. Hasta ahora las espumas de polímeros han sido usadas como estructuras para absorber la energía. La posibilidad de controlar el comportamiento a la compresión, por una apropiada selección del material base, geometría de la celda y densidades relativas, hacen de las espumas metálicas un material ideal para tales aplicaciones. La energía por unidad de volumen absorbida por el material, corresponde directamente con el área bajo la curva σ - ϵ , ver figura 24. La gráfica esfuerzo-deformación muestra una región donde existe un esfuerzo constante y, por lo tanto, puede absorber mucha más energía de deformación que una pieza maciza del mismo material. La mayor parte de la energía absorbida es irreversible, convertida a una energía de deformación plástica [8].

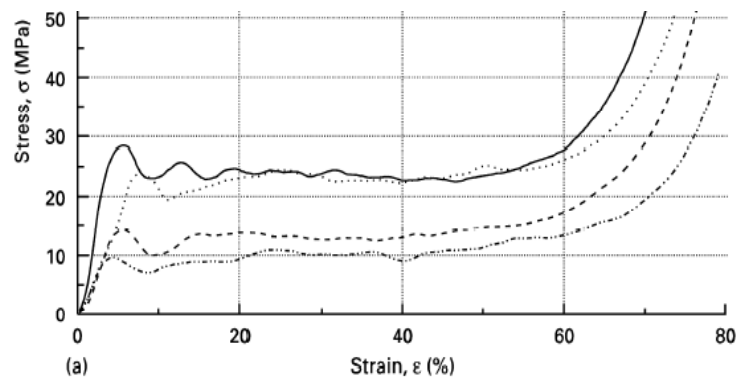
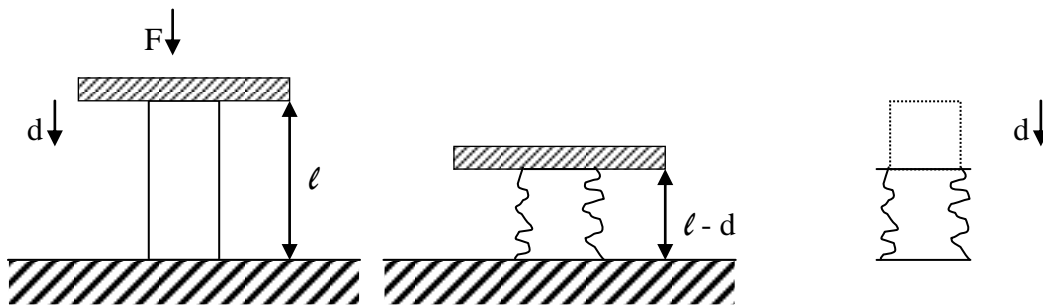


Figura 24. Curva esfuerzo deformación de las espumas metálicas, presentan una zona de esfuerzo constante, cercano al 60% de deformación.

Durante la deformación, las fuerzas exteriores que actúan sobre el cuerpo realizan trabajo, y este trabajo se transforma completa o parcialmente en energía potencial de deformación.

Si las fuerzas que causan la deformación del cuerpo disminuyen gradualmente, el cuerpo vuelve total o parcialmente a su forma primitiva y durante esta deformación inversa la energía potencial de deformación acumulada en el cuerpo se recupera en forma de trabajo exterior. Sea, por ejemplo, una barra prismática cargada en una de sus extremos, figura 25. Bajo la acción de esta carga, la barra se comprime una cierta cantidad. El punto de aplicación de la carga se desplaza en su dirección y la carga realiza un trabajo positivo durante este movimiento. Cuando la carga disminuye, la compresión de la barra disminuye también, el extremo cargado se desplaza hacia arriba y la energía potencial de deformación se transforma en el trabajo de desplazar la carga en sentido contrario a su dirección. En el caso de un cuerpo perfectamente elástico, el trabajo realizado por las fuerzas exteriores durante la deformación se transforma completamente en energía potencial de deformación. En el caso de un cuerpo parcialmente elástico, parte de aquel trabajo se transforma en calor desarrollado en el cuerpo.



Figura,25 comportamiento de una barra prismática bajo ensayos de compresión

Donde:

F = Fuerza aplicada a la barra

ℓ = longitud inicial de la barra

d = desplazamiento del punto de aplicación de f

Si el valor final de la carga es P y el alargamiento correspondiente es δ el diagrama de ensayo tendrá la forma indicada en la figura 26. P_1 representa un valor intermedio de la carga; δ_1 el alargamiento debido a él. Un aumento dP_1 de la carga origina un incremento $d\delta_1$ en el alargamiento. El trabajo realizado por P_1 durante este alargamiento es $P_1 d\delta_1$,

representado en la figura por el área rayada. Si se tiene en cuenta el aumento de P_1 durante el alargamiento, el trabajo realizado estará representado por el área del trapecio $abcd$. El trabajo total realizado al aumentar la carga desde 0 a P es la suma de áreas elementales análogas y vendrá dado por el área del triángulo OAB . Dicha área representa la energía total.[25]

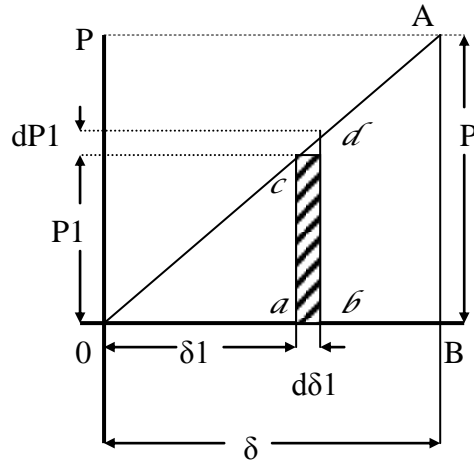


Figura 26 Diagrama de esfuerzo- deformación

De acuerdo a lo dicho en este texto la energía que puede almacenar un cuerpo es igual al trabajo que desarrollan las fuerzas externas, esto es, fuerza por distancia. En el caso de las espumas el trabajo realizado por las fuerzas exteriores no se transforma en energía potencial sino en calor (deformación plástica). Como muestra la figura 3,25 el trabajo de las fuerzas exteriores consiste en destruir una cantidad de masa definida, o lo que es lo mismo desplazar el punto de aplicación de la fuerza una cierta distancia. De aquí que la energía que puede absorber una espuma metálica hasta una deformación dada sea $E = F \cdot d$. Este efecto también se puede interpretar en términos de la forma de la gráfica esfuerzo-deformación , ya que De acuerdo a [11]: La relación fuerza desplazamiento, F - d , puede ser integrada para obtener la energía absorbida E . Para un desplazamiento dado D , F_{max} es la fuerza mas grande ocurrida en el intervalo de $(0$ a $d)$, considerando además que F_{avg} es el promedio de la fuerza en el mismo intervalo, ver figura 27. La eficiencia a la fuerza aplicada A_E es la relación de la energía absorbida E , entre una absorción plástica perfecta a una fuerza de colapso constante F_{max} ; Un valor cercana 100% indica buenas características de absorción de energía [11]

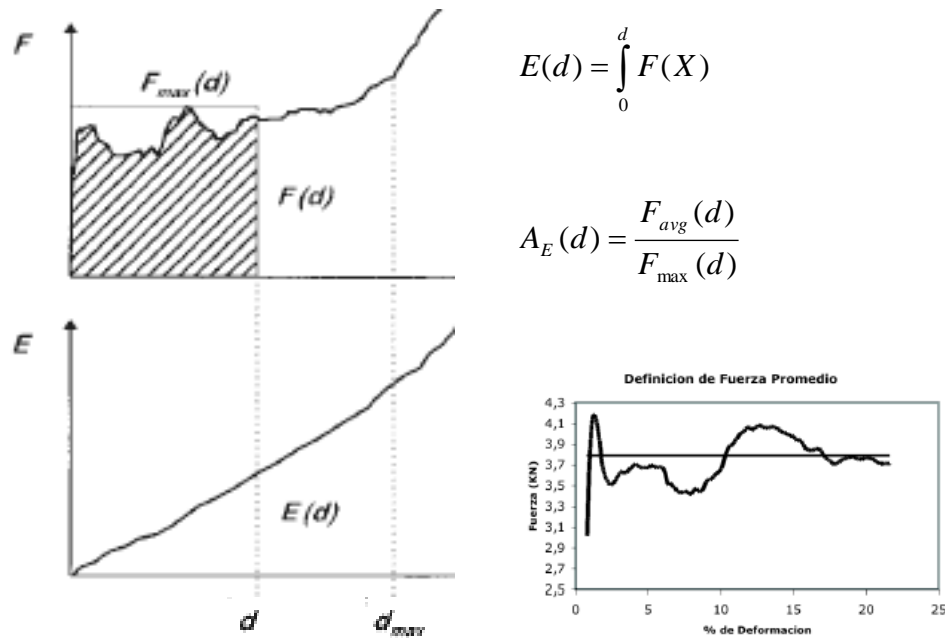


Figura 27 Definición de formulas para el calculo de la energía que puede absorber una espuma metálica

3. Selección de una Espuma Metálica Para Absorber Energía

Las espumas metálicas pueden ser producidas en un amplio rango de densidades y propiedades, la cuestión radica en saber cual es la espuma mas recomendable para absorber una cantidad de energía requerida. Para la selección del material apropiado para el absorbedor de energía existe un método analítico que relaciona las demandas y los parámetros de la espuma [8]. La eficiencia de absorción de energía compara la energía de deformación absorbida por un componente o material real con uno ideal. Un absorbedor ideal muestra una marcha rectangular de la curva σ - ϵ . Esto es, se alcanza directamente el valor máximo del esfuerzo y se mantiene constante durante todo el proceso de deformación.

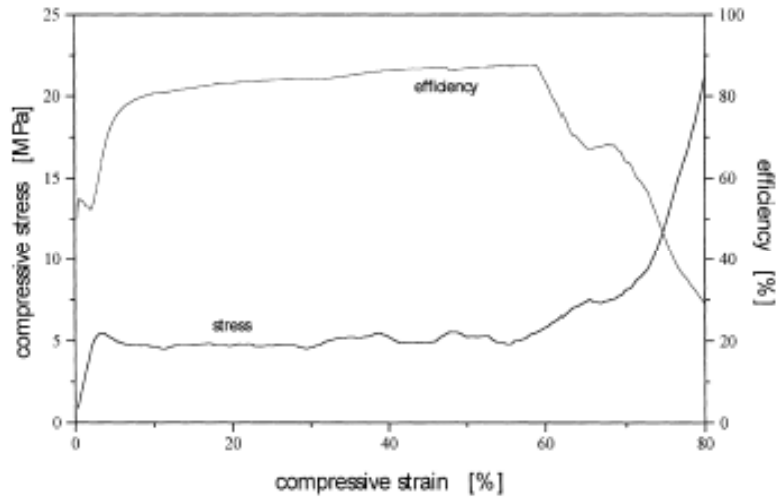


Figura 28. Comparativo de la curva σ - ϵ contra su respectiva curva de eficiencia de absorción de energía.

Como todo material real muestra una variación del esfuerzo bajo la compresión, la eficiencia calculada también cambia durante el proceso de deformación y por lo tanto depende de la naturaleza de la curva σ - ϵ , [figura 28](#). Dependiendo de la densidad y de la composición de la aleación, las espumas de aluminio alcanzan valores de A_E de hasta 90%, especialmente para los primeros 60% de deformación. En el área de densificación, la A_E decrece con el incremento del σ . Entonces se puede decir que las espumas pueden ser cargadas óptimamente solo hasta el final de la zona plana. Se ha estudiado que dependiendo de la forma de la curva esfuerzo-deformación se puede llegar a determinar al mejor elemento para absorber una cantidad de energía dada. En la [figura 29](#) se muestra el comportamiento bajo compresión de tres espumas metálicas de aluminio.

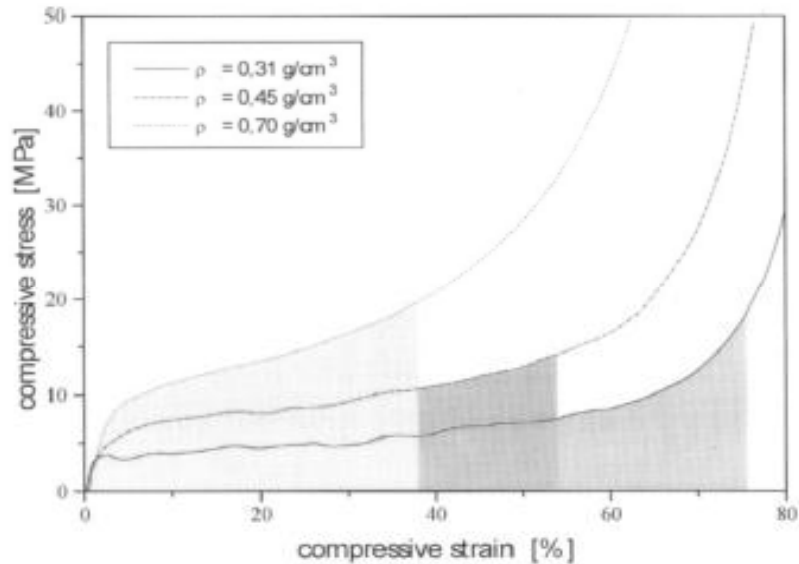


Figura 29. Efecto de la densidad en la forma de la curva σ - ϵ de espumas metálicas de aluminio

Las zonas sombreadas corresponden a una igual cantidad de energía absorbida W , el extremo derecho de estas zonas marcan la compresión que fue necesaria para absorber esta cantidad de energía. En el caso de la muestra de menor densidad, la curva σ - ϵ ya ha pasado el régimen plano antes de absorber la energía W , por lo tanto se requieren altos esfuerzos para absorber la energía dada. El espécimen de mayor densidad difícilmente muestra una zona plana, y aunque puede alcanzar valores de absorción de energía muy altos por el método de deformación que presentan no son muy atractivos, ya que con un comportamiento a la compresión en el cual una progresiva deformación plástica ocurre a un esfuerzo relativamente bajo es más probable asegurar un uniforme y eficiente colapso del material (23). El espécimen de mediana densidad es cargada exactamente hasta el final de la zona plana, por lo tanto presenta el menor σ pico hasta la completa absorción de energía, de esta forma, para una energía de impacto dada una espuma de una densidad específica puede ser determinada el más bajo esfuerzo máximo durante la deformación. En lo que respecta especialmente a la construcción de vehículos, el espacio y peso requeridos para la adición de componentes estructurales es de alta importancia. La energía de impacto absorbida por un volumen inicial del absorbedor de energía es, por lo tanto, de especial interés y es mostrado en la [figura 30](#).

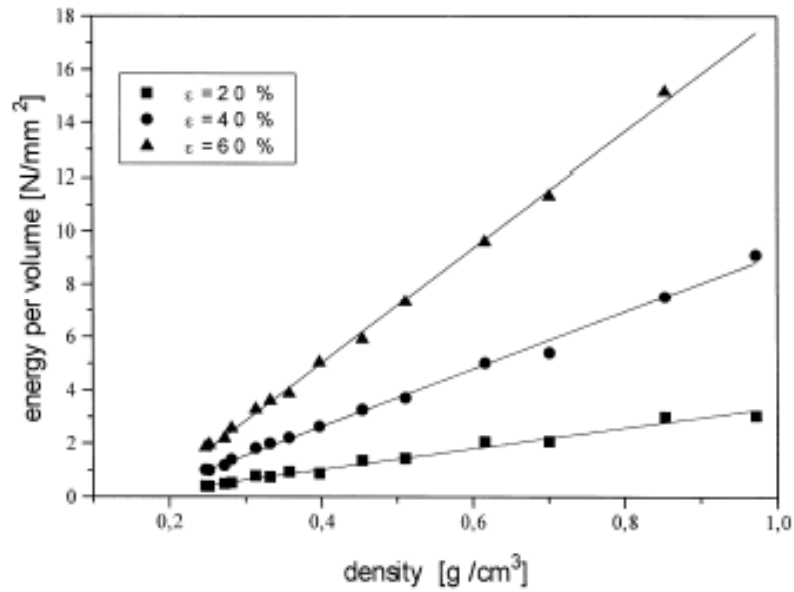


Figura 30. Capacidad de absorción de energía como una función de la densidad

Como se describió arriba, existen varias técnicas para la selección y evaluación de los absorbentes de energía. Dependiendo de las necesidades del problema se puede aplicar una o varias técnicas de evaluación.

CAPITULO VI

PROCESO DE ELABORACION

El proceso que aquí proponemos se basa en la técnica de Colada Alrededor de Partículas Creadoras de Espacio (pag. 29). La estructura que se reproduce es la que forman los cristales de NaCl, ver figura 31, contenidos dentro de un molde; el metal, en estado líquido, se deposita en el molde por medio de decantación y el efecto de lixiviación logra que el metal cubra toda la estructura, posteriormente los cristales de NaCl se disuelven con agua, quedando una estructura de poros interconectados. [28]

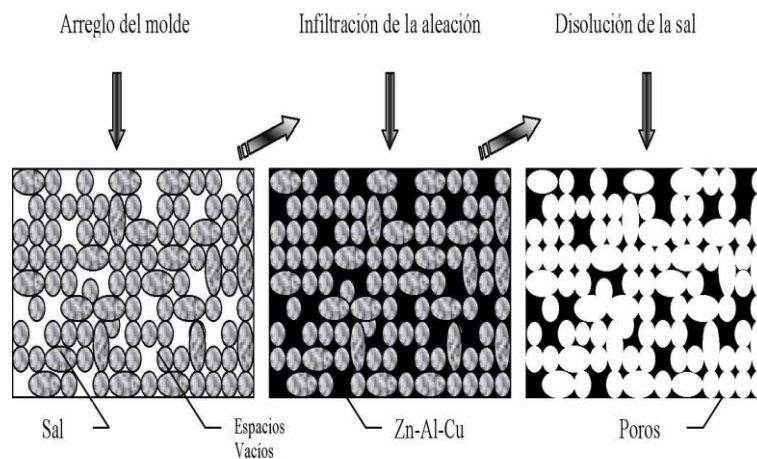


Figura 31 Método de Producción de Espumas de ZINALCO

1. Materia Prima y Accesorios

Metal base: las espumas se fabricaron utilizando la aleación Zn-22Al-2Cu (ZINALCO), la materia prima contiene un grado de pureza comercial (99,9%), el procedimiento para la obtención de lingotes esta basada en el proceso clásico de fusión de aleaciones base Zinc. El Zinalco tiene un punto de fusión de 694° a 754°K y una densidad de 5,4 g/cm³.

Cloruro de Sodio: se utilizó la denomina sal de grano de uso comercial, de diferentes marcas. La sal tiene una densidad de 2,2 g/cm³ y un punto de fusión de 883°C.

Molde: se utilizaron latas de acero de forma cilíndrica con capacidad para 0,5lts, el cierre de su tapa es a base de presión.

Cribas: de la marca DUVESA, con malla de acero inoxidable y cuerpo de latón, se ocuparon tres cribas con diferentes tamaños de apertura:

- Criba de Numero 8
- Criba de Numero 10
- Criba de numero 16

Accesorios:

- 2 muflas
- broca para acero de alta velocidad de 3/16"
- crisol de carburo de silicio.
- moldes de aluminio en forma de plato.
- Balanza electrónica granataria

2. Descripción de Etapas de Elaboración

La figura 32 muestra las etapas necesarias de las que consta el proceso propuesto.

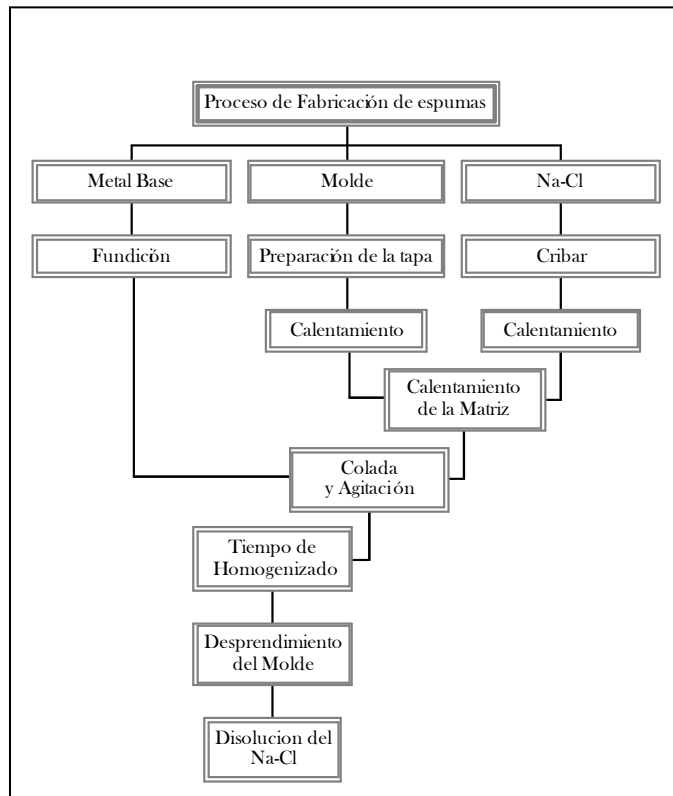


Figura 32. Etapas necesarias para lograr la espuma metálica base ZINALCO

Fundición: Apartir de lingotes de Zinalco se lleva a cabo la fundición en un crisol de carburo de silicio en condiciones normales de laboratorio. El material es fundido a una

temperatura superior a su punto de fusión para lograr la fluidez del metal dentro del molde.

Molde: La tapa del molde debe ser perforada para tener, por un lado, huecos por donde el metal pueda penetrar a la matriz de sal, y por otro evitar que los granos de Na-Cl salgan del molde debido a que su densidad es menor que la del ZINALCO. Para evitar un choque térmico y la rápida solidificación del material base, el molde se precalienta a una temperatura cercana a la del punto de fusión del material base. Además de evitar estos problemas, el calentamiento nos ayuda a que el material no pierda su fluidez y pueda llegar hasta el fondo del molde.

Na-Cl: La sal con que se trabaja es de grano (comercial), se utilizan cribas para lograr una separación uniforme de los tamaños de cristales que ella contiene. Utilizamos tres cribas diferentes, con lo que obtenemos 4 diferentes grupos de cristales. El proceso de elaboración no cambia si el grano a utilizar es diferente. Solo para el grano de tamaño "D" la temperatura de calentamiento de la matriz es de 470°C. El punto de fusión de la sal es superior a 800°C y la temperatura de calentamiento de la matriz es de 450-470°C, por lo que este calentamiento no tiene mayor efecto sobre sus características. El calentamiento del NaCl tiene por objetivo, además de mantener la fluidez del material al momento de la colada, eliminar la humedad que contiene. El calentamiento de los cristales de NaCl se lleva a cabo en un molde de aluminio para evitar contaminaciones.

Pasadas 3 horas de calentamiento, el NaCl se introduce al molde y se calienta la matriz 30 minutos más.

Colada y Agitación: Para este tiempo, el metal base se encuentra ya en estado líquido y se procede a la colada; se realiza por la parte superior del molde y se agita la matriz para ayudar a que el metal base fluya hasta el fondo del molde (se agrega un poco de fundición y se agita, la decantación del metal fundido se realiza en pausas) Es notoria la saturación de la matriz, ya que el material fundido empieza a escurrir por las paredes externas del molde

Tiempo de Homogenizado: cuando se llega a la saturación, el molde, conteniendo la sal y el metal aun líquido, se introduce al horno, ya apagado, donde se fundió el metal, esto con la intención de lograr una homogenización en la distribución del metal, ya que la primera parte que se introdujo puede haber llegado a la solidificación. Pasado el tiempo definido, se saca el molde y se deja enfriar al medio ambiente.

Desprendimiento del Molde: el tiempo de homogenizado provoca que haya una difusión entre el molde y la espuma, por lo cual, es necesario romper el molde y desprenderlo de la pared sólida de la espuma.

Disolución del Na-Cl: Para llevar a cabo la disolución del NaCl es necesario hacer dos cortes transversales en los extremos del producto obtenido, ya que debido a la superficie lisa del molde, la pared de la periferia de la espuma y sus caras, son completamente sólidas, por lo que es necesario descubrir la estructura porosa y permitir que el agua se vaya infiltrando poco a poco, conforme vaya disolviendo la sal. El cribar las sal nos brinda la oportunidad de agrupar, de manera uniforme, los granos de acuerdo a su tamaño, fueron 4 los grupos de granos que se pudieron identificar, y con cada uno de ellos se realizó el proceso para obtener espumas. Las variables involucradas en proceso, para cada tipo de grano, son:

- Tamaño de cristal de NaCl utilizado (milímetros)
- Temperatura de calentamiento de la matriz (°C)
- Temperatura de la fundición (°C)
- Tiempo de Homogenizado (minutos)

La determinación de los valores de las variables tales como: temperatura de calentamiento de la matriz, temperatura de la fundición y el tiempo de homogenizado, se llevo a cabo de forma experimental. Partiendo de una temperatura de la fundición de 650°C y una temperatura de calentamiento de la matriz de 400°C, se realizaron otras combinaciones de temperaturas, las cuales se muestran en la siguiente tabla.

El tiempo de homogenizado también se determinó en forma experimental utilizando tres valores: 20, 10 y 5 minutos.

Tabla 3 *Temperaturas utilizadas para cada tamaño de cristal, para obtener la espuma de cristales mas pequeños, fue necesario aumentar 20°C la temperatura de la fundición*

Combinación	Temperatura de Fundición (°C)	Temperatura de Matriz (°C)
1	650	300
2	650	400
3	650	450
4	670*	450*

3. Caracterización Física de las Espumas Obtenidas

Las principales características físicas de las espumas metálicas son su densidad, su tamaño promedio de poro (diámetro) y el grosor de la pared de poro.

Para determinar la Densidad de cada tipo de espuma obtenida se maquinaron probetas de 1,5 X 1,5 X 3,5 cm, con lo que se tiene un volumen constante. Con la ayuda de una balanza electrónica se determinó la masa de cada una de las muestras, y haciendo uso de la relación peso/volumen se calculó la densidad de cada tipo de espuma. El tamaño medio del poro se obtuvo utilizando la mismas muestras con las que se determina su densidad. Se tomo una fotografía a una de las caras de cada muestra, la muestra iba acompañada de una escala visible en mm. Con ayuda del programa Adobe Photo Shop se realizó la medición de los poros. Se trazaron líneas paralelas entre si, en los contra puntos mas lejanos del poro, las líneas se trazaron perpendicular a la dirección del poro. Posteriormente se midió la distancia entre las líneas paralelas. Haciendo una extrapolación entre la escala que maneja el programa y la que llevaba la fotografía, se determinó el diámetro de los poros en mm. Este método fue el mismo que se utilizó para medir el espesor de la pared del poro.

4. Ensayos de Compresión

Como ya se mencionó, el estudio del comportamiento de las espumas metálicas bajo ensayos de compresión nos brinda una visión de las propiedades y aplicaciones de las espumas, por lo tanto es importante estudiar este comportamiento en las espumas de Zinalco obtenidas. Para la realización de estos ensayos, se maquinaron muestras, de cada tipo de espumas, con sección cuadrada de 15 X 15mm y una longitud de 35mm. Estos ensayos se realizaron en una maquina Universal INSTRON tipo 5500R. Las especificaciones de los ensayos se muestran a continuación.

- Frecuencia de datos: 10 pts/seg
- Velocidad del cabezal: 1mm/min
- Temperatura del cuarto: 73°F
- Humedad relativa del cuarto: 50%
- Distancia del plato: 35,5mm

Las graficas que se obtienen directamente de la maquina INSTRON muestran, en las abscisas, el alargamiento en mm y en las ordenadas la carga en Kg. Por lo tanto debemos transformar los valores de carga en Esfuerzo, esto es F/A, y los valores del alargamiento a valores de deformación unitaria. Para transformar los valores de deformación, se debe tomar en cuenta que la distancia inicial del plato de la máquina INSTRON es 0,5mm mas larga que la de la probeta, por lo que se debe descontar estos 0,5mm a los valores obtenidos de deformación y las gráficas se deben empezar en el punto 300, ya que es ahí donde el cabezal recorre 0,5mm.

La transformación de los datos de los ensayos de compresión se hicieron en el programa EXCEL de la siguiente manera:

- Para determinar el valor del Esfuerzo en cada punto : $(P*9,81)/2,25^{-4}$; donde P es el valor de la carga en cada punto, $2,25^{-4}$ es el valor del área de la probeta sobre la que es aplicada la fuerza y 9,81 es el valor de la gravedad. Un análisis dimensional nos indica.

$$\frac{P * g}{A} = \frac{Kg * (m/s^2)}{m^2} = \frac{N}{m^2} = Pa$$

- Para el caso de la deformación unitaria se utilizaron los valores en mm ya que se utilizo la formula $((d-0,5)*100)/35$. Donde d es la deformación en cada punto, 0,5 es la distancia inicial del plato, 100 es una constante para que el resultado sea en % y 35 es la longitud de la probeta. Un análisis dimensional nos indica:

$$\frac{(d-0,5)*100}{35} = \frac{(mm-mm)}{mm} = \frac{mm}{mm} = \%$$

5. Absorción de Energía.

Para determinar la capacidad de absorción de energía que tienen las espumas metálicas obtenidas se realizaron los siguientes cálculos. La definición de estas propiedades se hizo al 20% de deformación.

- **Energía por Unidad de Volumen:** como ya se mencionó, la energía que por unidad de volumen pueden absorber las espumas metálicas viene dada directamente por el área bajo la curva esfuerzo-deformación, por lo tanto, de los datos obtenidos por los ensayos de compresión, solo se multiplicó el valor del esfuerzo por el valor de la

deformación, ver figura 33. Esta multiplicación se realizó para cada uno de los puntos muestreados por la maquina y para realizar las gráficas se tomo en cuenta desde el punto 300 que es, como ya se dijo, el punto en el cual el plato recorre 0,5mm. Un análisis dimensional de esta multiplicación nos dice:

$$W_v = \sigma \cdot \varepsilon = \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m}{m} = \frac{MJ}{m^3}$$

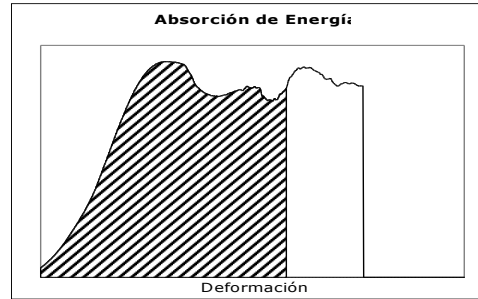


Figura 33 Izq. Formula y analisis dimensional para calculo de la energía por unidad de volumen;
Der. Representación de la energía por unidad de volumen dentro del diagrama esfuerzo -deformación.

- **Energía Absorbida (W):** si el valor de W_v lo multiplicamos por el volumen de la muestra, el resultado es el valor de la energía absorbida W , este valor viene dado en Joules (J) y es útil para el cálculo de la eficiencia de absorción de energía y para saber la cantidad de energía que por unidad de masa absorben las espumas.
- **Energía por Unidad de Masa (W_m):** para cada muestra se dividió el valor de W entre la masa:

$$W_m = \frac{W}{M} = \frac{J}{Kg}$$

- **Eficiencia de Absorción de Energía (η):** como ya se dijo la eficiencia de absorción de energía es la relación de la energía real entre la energía ideal, el valor de la energía real es W y el valor de la energía ideal se tomó como el producto del valor máximo del esfuerzo por la distancia establecida (20% de deformación). Esta relación solo se aplicó para la zona plana, ver figura 25.

6. Módulo de Young

Como ya se dijo, propiedades tales como el módulo de Young, la conductividad térmica y la conductividad eléctrica dependen de la densidad relativa de la espuma y obedecen a la siguiente ecuación.

$$A = A_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n$$

Donde A es la propiedad de interés (módulo elástico, la conductividad térmica y eléctrica), A_0 es la propiedad del material sólido, ρ es la densidad de la espuma, ρ_0 es la densidad del material sólido y n es el valor de la relación exponencial que existe entre la densidad y el esfuerzo a compresión.

El procedimiento para calcular el módulo de Young fue el siguiente:

1.- Determinar n: En la distribución gráfica del esfuerzo con respecto a la densidad se observó que esta relación es de forma exponencial, esto es:

$$\sigma_{com} = \rho^n$$

por lo tanto esta relación se aplicó para cada muestra de los cuatro tamaños de espumas. Al final se determinó el valor promedio de n para tomarlo como representativo.

2.- Conociendo el valor de n, se sustituyen los valores de n, A_0 , ρ_0 y ρ en la ecuación para sistemas porosos.

$$A = A_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n$$

RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSIÓN

1. RESULTADOS DEL PROCESO DE ELABORACION

Con la combinación de temperaturas No 1 (tabla 4,1) no fue posible lograr que el metal se infiltrara dentro de toda la matriz, llegando a cubrir solo el 30% de la longitud del molde. Por el modo de solidificación, es notorio que al momento de colar la parte central de la matriz se encuentra a una menor temperatura que la zona de la periferia del molde; esta diferencia de temperaturas provoca que la parte central solidifique de manera prematura. La figura 34 muestra la espuma que se obtiene al colar el metal dentro de la matriz que se

encuentra a 350°C ; el metal llega a cubrir cerca de 60% de la matriz solo en la región que se encuentra en contacto con la pared del contenedor metálico, la parte central esta hueca.

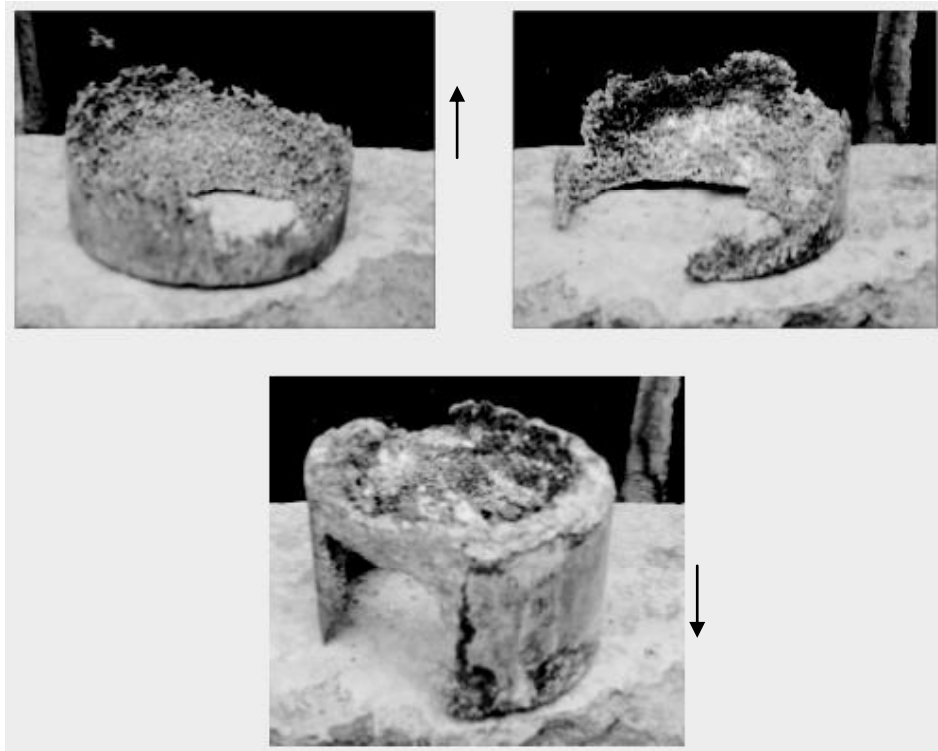


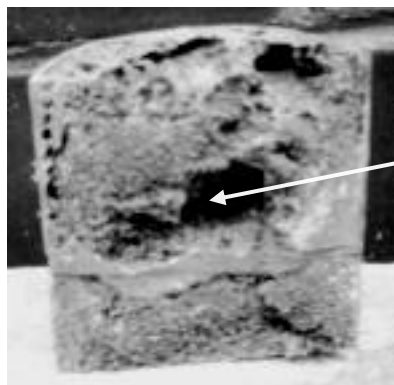
Figura 34 Espumas obtenidas con 350°C de calentamiento de la matriz, la mayor infiltración del metal se registra en la zona pegada a la pared del contenedor metálico. La flecha indica la dirección de la colada.

Al aumentar la temperatura de calentamiento de la matriz, la parte central de la misma permanece mas tiempo con temperatura elevada y permite que el metal mantenga su temperatura de colada mas tiempo y pueda infiltrarse un poco mas al fondo de la matriz. Aun así, se llega a cubrir solo un 70-80% del volumen total de la matriz, ver figura 35, ya que el metal solidifica y se derrama el resto por la parte superior.



Figura 35 *400°C de calentamiento a la matriz permite que el metal fluya de forma mas lineal y ya no tener el centro de la espuma hueco. La flecha indica la dirección de la colada*

Con la combinación de temperaturas No. 3 se logró que el metal penetrara hasta el fondo de la matriz, pero generando una estructura poco homogénea, ya que, como se muestra en la figura 36, existen zonas donde el metal no pudo entrar y otras zonas donde existe una aglomeración del metal, la zona de metal sólido es debido al método de fabricación, ya que la etapa de agitación, si se realiza con muchos espaciamientos, genera un enfriamiento de la matriz y del metal ya dentro de ella, esto se refleja también, al observar que la zona donde no se infiltró el metal está por encima de la parte sólida, lo que indica que la parte central no tiene la misma temperatura. En la figura 37 se observan zonas donde el material es completamente sólido, estas zonas se encuentran cercanas al centro de la espuma generando que la estructura de los poros no sea completamente visible. Este tipo de defectos en la distribución del material generan zonas de muy alta densidad que afectan el comportamiento bajo los ensayos y mediciones necesarias para la caracterización de la espumas metálicas.. Bajo estas circunstancias es que surgió el concepto de “homogenizado”, ya que al derramarse el metal liquido por el borde de la tapa de la matriz, indica que la matriz esta saturada de metal, pero dando como resultado una espuma con poca homogeneidad en la distribución del metal y estructura de poros.



Zona de la espuma donde el metal no se infiltró

Figura 36 *Corte longitudinal a una espuma metálica en donde el metal llegó al fondo de la matriz, pero generando una estructura poco homogénea.*

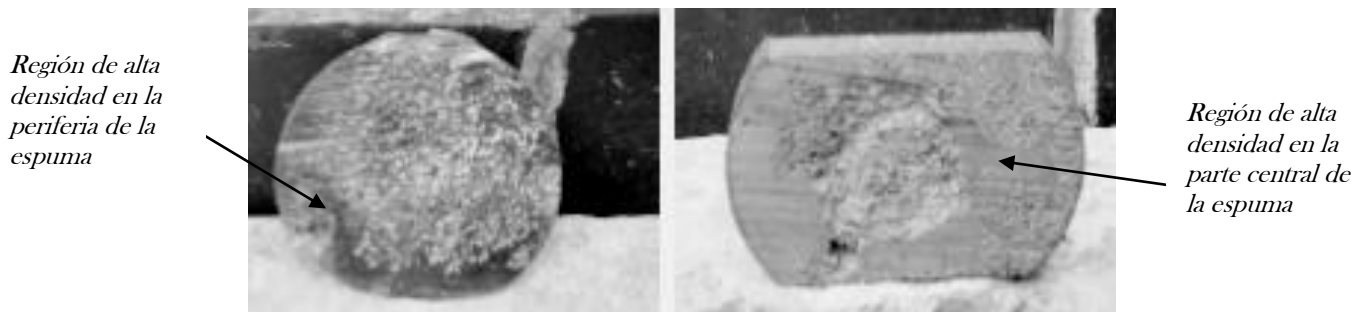


Figura 37 Corte transversal a dos espumas de diferentes tamaños de poro en las cuales existe zonas de alta concentración de metal sólido.

El tiempo de homogenizado también se determinó en forma experimental, partiendo con un tiempo de 20min:

- 20 minutos dentro del horno dio como resultado que el material se mantuviera en estado líquido por mucho tiempo y, con la presión que ejerce los granos de sal hacia las paredes del molde, se derramara por las uniones del molde.
- 10 minutos dentro del horno dio como resultado un derrame del material menor, pero al solidificar fuera del horno, se realizó una difusión de la lamina del molde a la superficie externa de la espuma,
- 5 minutos fue el tiempo justo en el cual no existió derrame del material, la difusión del molde en la espuma fue despreciable y la estructura de la espuma fue completamente homogénea en su sección longitudinal y transversal, ver figura 38^a y 38b.



Figura 38a 450°C de calentamiento de la matriz y 5min de homogenizado permiten que el metal tenga la fluidez necesaria para llegar al fondo de la matriz en una forma estable

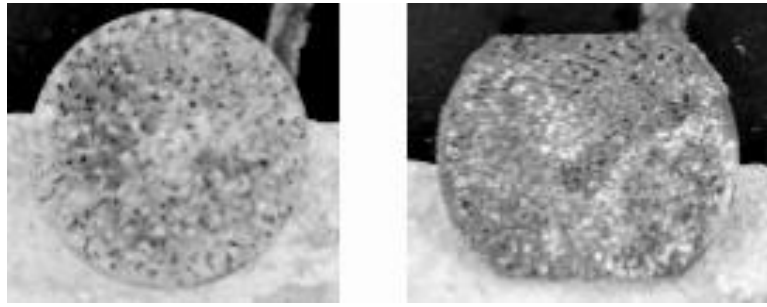


Figura 38b *la estructura de las espumas finales no tiene zonas de metal solido en la parte central, ya que con el homogenizado, el metal se distribuye y se aglomera en la pared del molde.*

Con esta serie de experimentos podemos establecer que las condiciones necesarias para obtener una espuma con un tamaño y estructura bien definida son 650°C de la fundición y 450°C de la calentamiento de la matriz, con un tiempo de homogenizado de 5min. Solo para el tamaño “D” los cristales de NaCl fue necesario 670°C de temperatura en la fundición.

La espumas tiene una dimensiones de 84 mm de diámetro con una altura de 85 mm y la cara exterior es completamente sólida, como cáscara. La longitud de la muestra es la longitud total del molde, lo que indica que el material entra perfectamente en todo el molde y envuelve a todos los cristales de NaCl.

Una vez que se ha obtenido la espuma, con la forma completa del molde, el siguiente paso es disolver los cristales de NaCl, y al realizar cortes longitudinales a las espumas, se puede observar que la sal ya se ha disuelto, esto gracias a que existe una interconexión entre los granos de Na-Cl, dando como resultado una espuma con estructura de poros abiertos.

2. CARACTERISTICAS FISICAS

Como ya se mencionó, los cristales de NaCl se dividieron en cuatro grupos, la figura 39 muestra la sección cuadrada de las espumas que se obtuvieron con esta división. La letra mayúscula en cada una corresponde a su identificación.

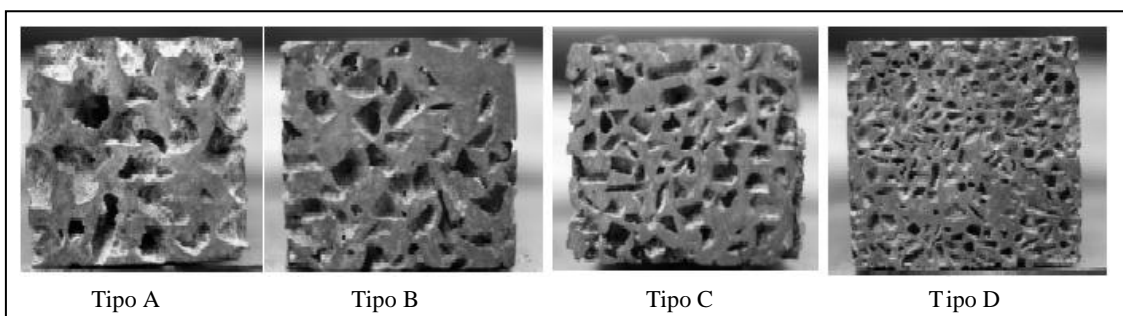


Figura 39 Area de las muestras utilizadas para ensayos de compresión de 15mm X 15mm

En la figura 40 se muestra los valores de densidad de 36 muestras de las espumas de Zinalco. La distribución de estos valores muestra que no existe una relación directa entre el tamaño de poro y el valor de densidad obtenido. El tamaño del molde metálico utilizado siempre fue de las mismas dimensiones, por lo tanto, la cantidad de NaCl y metal que podía entrar fue la misma, sin importar el tamaño de cristal utilizado. Con este proceso se obtuvieron valores de densidad de 50-30% con respecto al material base solido.

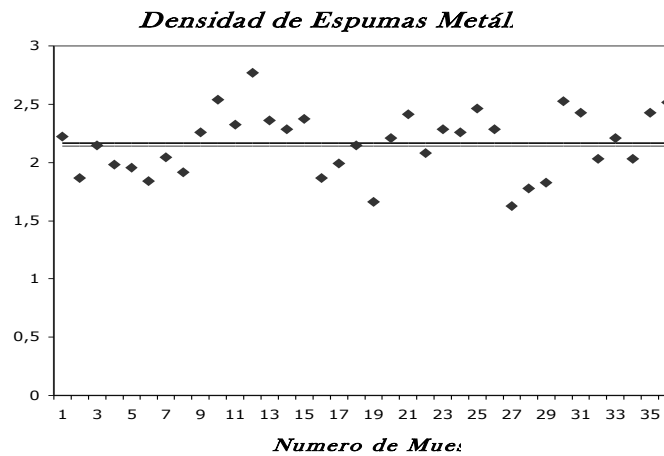


Figura 40. Los valores de los puntos del 1 al 8 corresponden al tamaño de espuma A; los valores del 9 al 21 al tamaño B; los valores del 22 al 25 al tamaño C; los valores del 26 al 36 al tamaño D. La línea continua es la media de todos los valores

La variación de los valores de densidad se debe a la distribución de los cristales, ya que, como se ve en la figura 39, se generan zonas de alta densidad. La tabla 4 muestra los resultados promedio de las mediciones de las propiedades físicas de las espumas obtenidas. La diferencia de densidades se debe a la distribución poco homogénea de los cristales de NaCl, ya que se generan lugares donde el material se agrupa generando zonas de alta densidad. Es notorio que al disminuir el diámetro del poro, se disminuye también el espesor de la pared de poro, sin embargo, la relación que existe entre el diámetro del poro y su pared aumenta ya que para el tamaño A, el espesor de la pared de poro representa el 33% del diámetro de poro, para el tamaño B el 31%, para el tamaño C el 50% y para el tamaño D el 57%. Esta relación afecta directamente el comportamiento bajo ensayos de compresión.

Tabla 4 *Propiedades físicas de las espumas obtenidas*

Característica	Unidad	Tipo de Espuma			
		Tamaño A	Tamaño B	Tamaño C	Tamaño D
Tamaño de poro	mm	3	2,2	1,3	0,7
Espesor de pared de poro	mm	1	0,7	0,6	0,4
Densidad	g/cm ³	2	2,2	2,3	2,1

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESION

En la Figura 41 se muestran las curvas de σ - ϵ que se obtuvieron de los ensayos de compresión para cada tipo de espuma. Así mismo, se muestra en la tabla 5 el esfuerzo de compresión promedio que para cada tipo de espuma fue calculado; existen varias posibilidades de definir el esfuerzo de compresión, en este trabajo se definió utilizando el concepto de UYS (Upper Yield Strength), ya que no todas las curvas presentan el LYS (Low Yield Strength), y por lo tanto no se puede usar el promedio. [2].

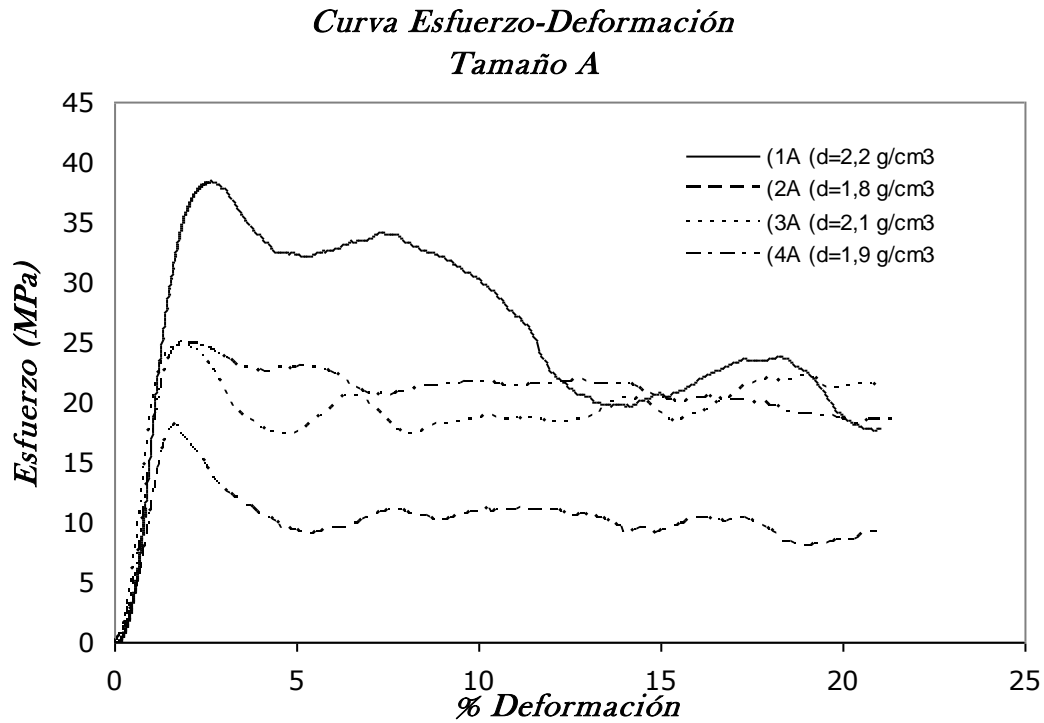


Figura 41 diagramas obtenidos de los ensayos de compresión para cada tipo de espuma

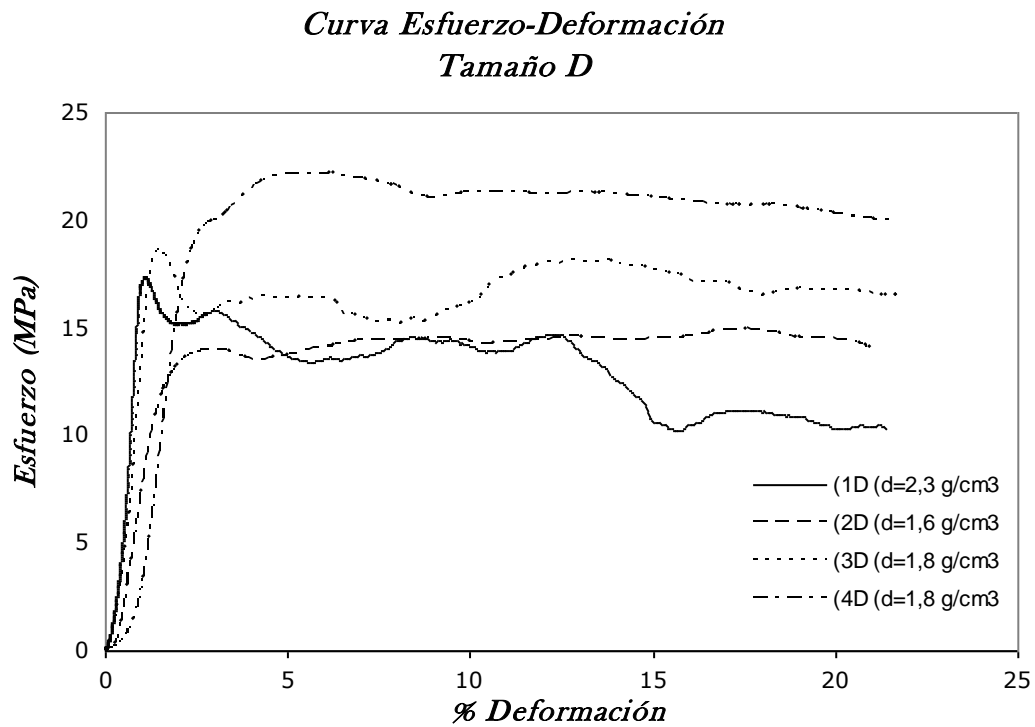
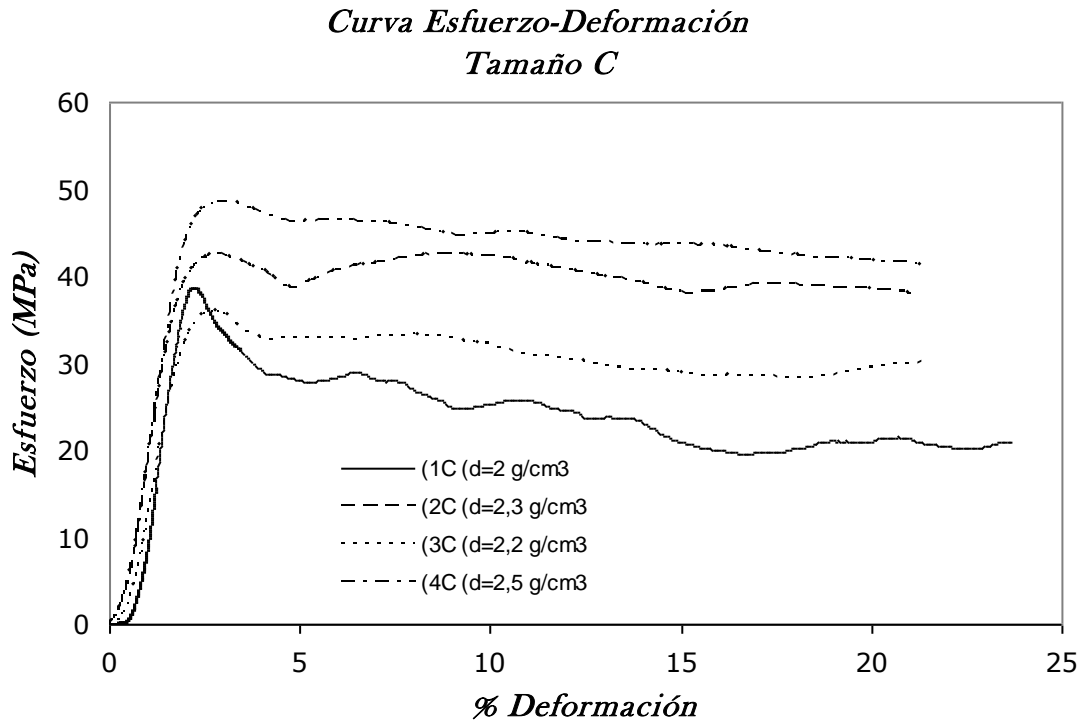


Figura 41 diagramas obtenidos de los ensayos de compresión para cada tipo de espuma

Tabla 5 Resultados de los ensayos de Compresión para los 4 tamaños de espumas

Tipo de muestra	Unidad	A	B	C	D
Esfuerzo de compresión	MPa	25,6	53,8	41,5	17,4
Absorción de Energía a 20% de deformación	KJ	24,3	76,6	51,5	24,5
	MJ/m ³	3,1	9,7	6,5	3,1
	KJ/Kg	1,5	3,8	2,8	1,8
Eficiencia de absorción de energía	%	76	93	87	90

Independientemente del tamaño de poro de las muestras, existe una relación exponencial entre la densidad y el esfuerzo de compresión obtenido; dicha relación se muestra en la figura 42b). Es notorio que al aumentar la densidad, con valores en el rango de 1,6 a 2,76g/cm³, el esfuerzo de compresión también aumenta en forma exponencial desde 13,95 a 68MPa. Otro aspecto importante es que con la disminución del tamaño de poro, la variación de los esfuerzos de compresión es menor, esto se aprecia mejor en la figura 42^a), ya que en el las espumas del tipo A existe una variación de 20Mpa entre los esfuerzos máximos obtenidos, mientras que en el tamaño D se tiene una variación de 6Mpa.

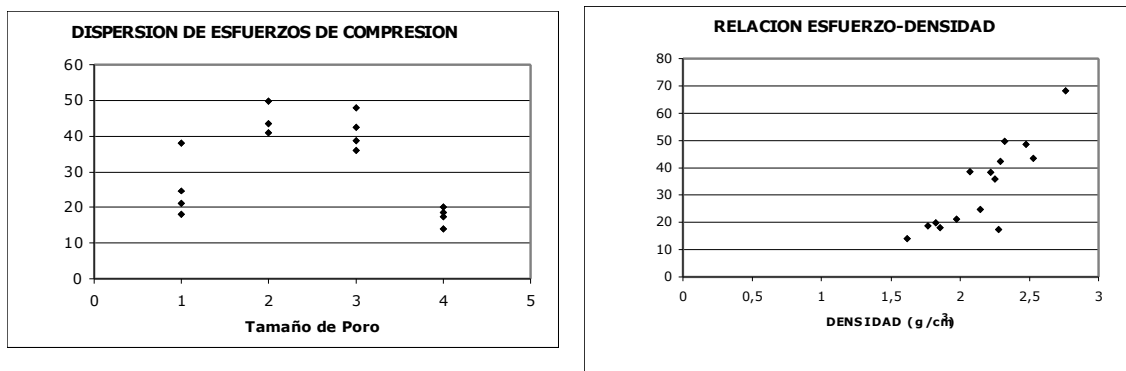


Figura 42. A) *Dispersión de los valores de esfuerzo de compresión con respecto a al tamaño de poro;* B) *relación exponencial del Esfuerzo con respecto a la densidad.*

La curvas resultantes de los ensayos de compresión tiene una forma semejante a la que presentan las espumas de aluminio obtenidas por otros procesos, en la cual, se presenta una zona nástico-plástica, cercana al 3%, se denomina nástico-plástica ya que en ella las paredes de poros de menor densidad se fracturan; al llegar a un máximo, el esfuerzo cae significativamente, esto se debe a la abrupta fractura de una o mas capas de poros de

densidad relativamente alta. Después de esta caída en el esfuerzo, viene una zona “plana” en la que el esfuerzo es “constante.” Las variaciones que tiene esta zona plana son por la poca homogeneidad, de los diámetros y forma de los poros, así como de las paredes de poros. Sobre este comportamiento, es notorio que al disminuir el tamaño de poro, la caída del esfuerzo máximo es menor, o inexistente, además de que mientras mas pequeño es el tamaño de poro, la variación del esfuerzo en la zona plana es menos significativa. Otro efecto, presentado en la figura 42, es que la dispersión de los valores de esfuerzo disminuye con el tamaño de poro. Las figuras 43 son fotografías de las muestras fracturadas, todas las muestras tiene el mismo modo de deformación, debido a la forma poliédrica del poro [7], en el cual existe un deslizamiento entre las caras de los poros (cercano a un ángulo de 45°).

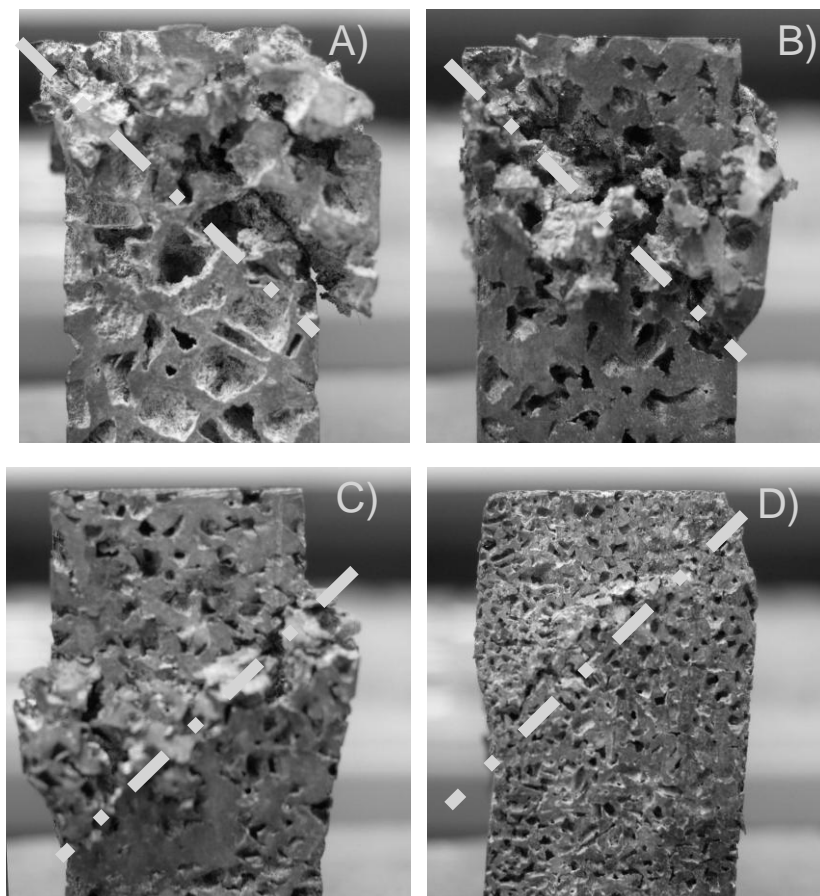


Figura 43 *el tamaño y forma de los poros afecta directamente el modo de deformación de las espumas bajo ensayos de compresión, ya que con el tamaño D se tiene un comportamiento similar al provocado por poros de forma esférica, y el resto se comportan de manera poliédrica*

Existen ya estudios sobre espumas de aluminio fabricadas con NaCl, mediante una técnica de tratamiento de polvos. El comportamiento de estas espumas bajo ensayos de compresión

se muestra en la figura 44. La zona Plana no es tan facil de distinguir, comparandolas con las espumas de zinalco; y el punto de densificación “comienza” cerca del 20%, que es el punto donde comienza la fractura en las espumas de zinalco. Es fácil de distinguir que el comportamiento bajo ensayos de compresión de las espumas de zinalco tiene mas similitud con el comportamiento estándar de todos los materiales porosos que las espumas de aluminio fabricadas con polvos de NaCl. [29]

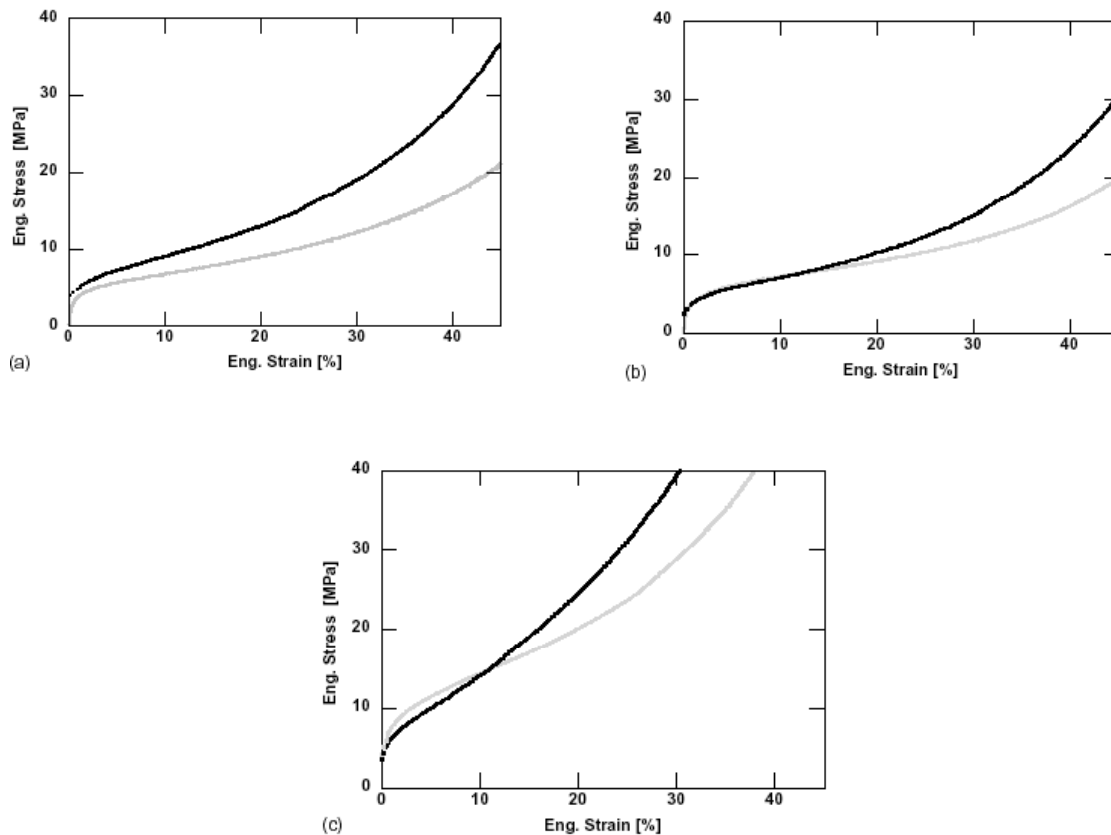


Figura 44 Curvas de esfuerzo-deformación bajo ensayos de compresión de espumas de aluminio obtenidas con polvos de NaCl. A) espuma IV con un valor de densidad de 32% con partículas de NaCl de 10µm. b) espumas V con un valor de densidad de 32% con partículas de NaCl de 63-90µm. c) espuma VI con un valor de densidad de 45%.

En la figura 43 se puede observar que las muestras de poro mas pequeño tienen un modo de deformación cercano al embarrilamiento, aunque es todavía notorio el ángulo de deformación, sin embargo, al aumentar el diámetro de poro, el efecto de embarrilamiento

disminuye provocando un desprendimiento de material, este desprendimiento indica que no se llega a una etapa de densificación de las muestras en los ensayos de compresión, al contrario, se muestra un punto en el que las curvas esfuerzo-deformación van cayendo. El efecto de embarrilamiento aumenta si la relación que existe entre el diámetro de poro y la pared de poro es mayor.

4. Absorción de Energía.

En la tabla 5 también se muestran los valores de E (absorción de energía) y A_E (eficiencia de absorción de energía). Los valores de E se tomaron a 20% de deformación y la fuerza promedio, como muestra la figura 27, se definió solo para la zona plana. La marcha de la energía absorbida, como muestra la gráfica de la figura 45 no es completamente lineal, ya que depende directamente de las variaciones en los esfuerzos de la zona plana de las curvas esfuerzo-deformación, la eficiencia de absorción de energía también depende de la forma de la curva esfuerzo-deformación, ya que si existe una caída del esfuerzo de compresión demasiado abrupta, el valor de la fuerza promedio se ve afectado, y recordemos que la eficiencia está en relación con la fuerza promedio figura 27, por lo tanto las muestras con una curva esfuerzo-deformación más estable tienen una mayor eficiencia y una absorción de energía más lineal.

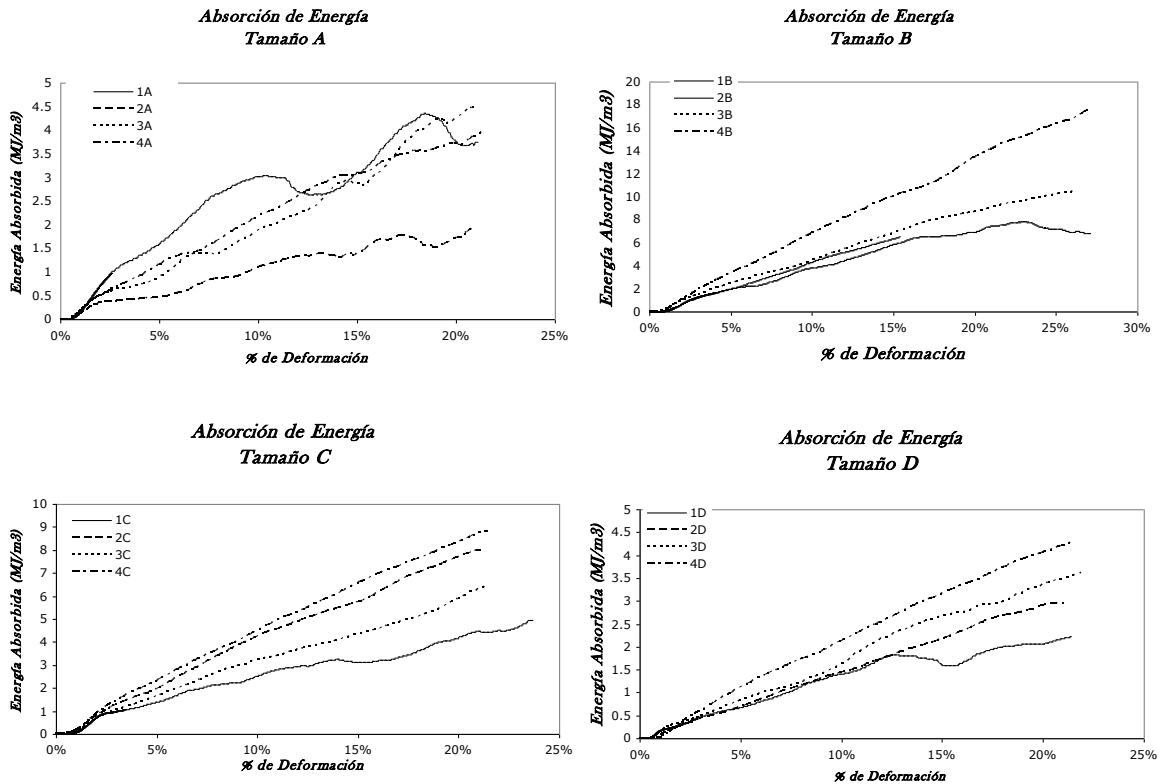


Figura 45 diagramas de absorción de energía

Es lógico que las muestras que presentan mayor esfuerzo a la compresión, tengan la capacidad de absorber mas energía hasta la deformación definida. [8] Sin olvidar que el zinalco sólido tiene un mayor esfuerzo que el aluminio sólido (cercano al doble), se puede hacer una comparación en esta propiedad para las espumas de aluminio y las de zinalco, ya que existe el concepto de Energía absorbida por unidad de masa y por unidad de volumen. La energía por unidad de volumen es notablemente mayor para las espumas de zinalco, esto, como ya se mencionó es debido a las propiedades de metal base, sin embargo la energía por unidad de masa es muy semejante. Y este valor ayuda en el diseño de piezas donde se requiera una buena absorción de energía pero que no afecte en el peso del elemento diseñado, por ejemplo la industria automotriz. La eficiencia de absorción de energía de las espumas de aluminio, dependiendo de la composición de la aleación y del método utilizado, llega a valores cercanos al 90%, la eficiencia de las espumas de Zinalco B y D tienen un valor superior al 90%. Con esto se tiene dos propiedades que hacen que las espumas de zinalco compitan con las de aluminio y sus aleaciones.

5. Modulo de Young

Las espumas metálicas son consideradas cuerpos estadísticos, ya que su estructura y propiedades difieren mucho de un punto a otro, una de estas propiedades físicas que varían, son el tamaño de poro y el espesor de la pared de poro, ya que en una misma capa de poros existen paredes de poros muy delgadas y otras bastante densas, este fenómeno afecta directamente al diagrama esfuerzo-deformación y por la tanto a las propiedades mecánicas que de este diagrama emanan. Para el caso del módulo de young, este no puede ser calculado directamente por la inclinación de la primera parte del diagrama, ya que, como se muestra en la figura 46. Esta primera parte del diagrama no es lineal, (ya se mencionó que se considera elastoplástica), debido a la variación de las paredes de poro, la siguiente figura muestra que la primera parte del diagrama de esfuerzo-deformación no es lineal.

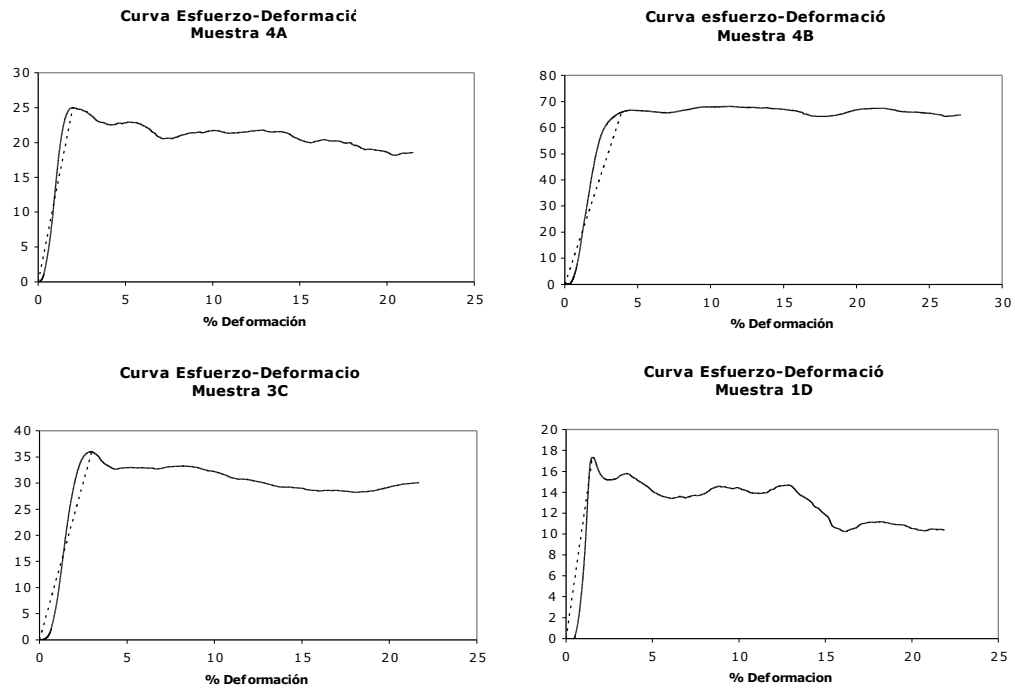


Figura 46 Gráficas de esfuerzo-deformación de una muestra de cada grupo de espumas. La línea continua es la curva esfuerzo deformación real y la línea punteada es la forma lineal que debería de tener la primera parte de la curva

Varios autores, han determinado el módulo de Young, y otras propiedades utilizando la fórmula que aplica a los sistemas porosos [2,7,8,26]: , dicha fórmula exponencial depende de la relación de esfuerzo-densidad. Haciendo uso de este principio, y con los datos ya registrados proponemos que el cálculo del módulo de Young, conductividad eléctrica y

conductividad térmica pueden ser calculados de la misma forma, pero con la fórmula que desprenda la relación esfuerzo-densidad de las espumas de ZINALCO aquí presentadas.

La figura 47 presenta la gráfica de la relación esfuerzo-densidad de las espumas de zinalco, así mismo se muestra la curva, de forma potencial, que arroja la distribución de los valores de esfuerzo de compresión, con la ecuación de la curva de esta gráfica, y anexando la relación de densidades, se genera la caución que aplica para el calculo teórico del Módulo de Young.

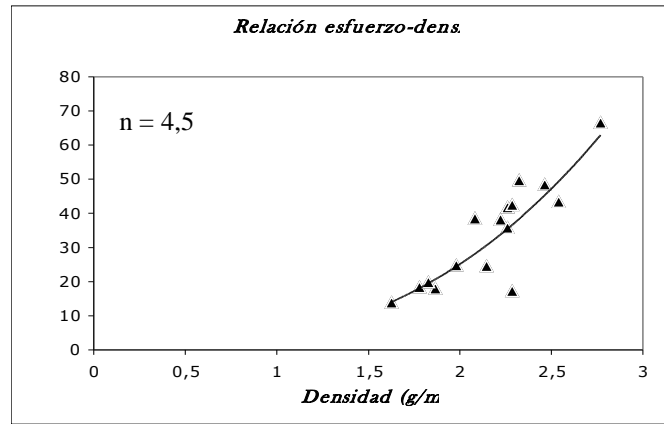


Figura 47 Relación existente entre el esfuerzo y la densidad de las espumas. Los triángulos representan los valores de esfuerzo de cada muestra y la línea continua muestra la relación exponencial que existe.

La ecuación sería la siguiente.

$$A_E = A_Z \left(\frac{\rho_E}{\rho_Z} \right)^{4.5}$$

Donde:

A_E = propiedad de interés de la espuma (módulo de Young, conductividad térmica etc.)

A_Z = propiedad del material sólido

ρ_E = densidad de la espuma

ρ_Z = densidad del material sólido.

4,5 = relación exponencial del esfuerzo contra la densidad

El módulo de Young calculado con esta fórmula, para cada tipo de espuma, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6

Tipo de Espuma	Densidad (g/cm ³)	E (teorico) (Gpa)
Tamaño A	2	20
Tamaño B	2,5	40
Tamaño C	2,3	31
Tamaño D	1,9	18

CONCLUSIONES

El proceso “CASTING AROUND SPACE HOLDER MATERIALS” que aquí se utiliza permite la obtención de espumas metálicas con diversos valores de densidad y propiedades

mecánicas utilizando materia prima nacional, aunado a que las partículas utilizadas son cristales de NaCl común, por lo que este proceso es económico.

Las espumas muestran un comportamiento muy similar a las espumas de aluminio que se obtienen por técnicas mas caras y complejas, tanto en su curva σ - ϵ como en la relación que existe entre la densidad y el esfuerzo de compresión. Los tamaños de poro que se estudiaron presentan efectos sobre el comportamiento bajo compresión de las espumas, ya que mientras mas pequeño es el poro mas estable es el modo de deformación, por lo tanto se tiene una zona plana de la curva σ - ϵ mas constante, esto se refleja en los valores de eficiencia de absorción de energía, y en la repetibilidad que tienen los ensayos.

La energía que puede absorber estas espumas es mayor, debido a que el esfuerzo del zinalco sólido es mayor que el aluminio, sin embargo, con el valor de absorción de energía por unidad de masa pueden competir contra las espumas de aluminio, ya que en diseños donde se requiere una alta absorción, pero que sea necesario que este elemento no aumente demasiado el peso del diseño pueden funcionar muy bien las espumas de zinalco, ya que, como ya se menciona, tienen una alta eficiencia de absorción de energía.

Dentro de todas estas propiedades estudiadas, cabe agregar la buena maquinabilidad de las espumas obtenidas, ya que las muestras, sin importar el tamaño de poro, presentaron superficies rectas y bien delimitadas.

Con este trabajo, y gracias al Instituto de Investigaciones en Materiales, me di cuenta de que en la investigación pones en práctica todos los cocimientos que los profesores quieren compartimos en los semestres que dura la carrera. Regresando a revisar los apuntes de semestres anteriores y estudiando nuevos libros y artículos.

Gracias a la forma de trabajo del Dr. Torres dominas el tema que estudias ya que tienes todo a la mano para estudiar y poner en práctica lo que dicen los libros.

REFERENCIAS

- [1] TORRES VILLASEÑOR G. 1990. Trabajos de Investigación sobre ZINALCO en el periodo 1979-1990. Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

- [2] VALENCIA, C. Tesis, Diseño de una Bicicleta a Base de Zinalco. Universidad Panamericana. (1986)
- [3] BANHART, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Material Science*. No. 46. (2001) p. 559-632.
- [4] BANHART, J., BAUMEISTER, J. Deformation Characteristics of Metal Foams, *Journal of Material Science*. No. 33, (1998) p. 1431 – 1440
- [5] Inco Type R3 Nickel Powder for Powder Metallurgy (PM), Inco Special Products, (1999).
- [6] SCHROERS, J., VEAZEY, C., JOHNSON, L., Amorphous Metallic Foam. *Applied Physics Letters*. Vol. 82. No.3, (2002) p. 370 – 372
- [7] BANHART, J. Matalllic Foams, *Europhysics nems*. Vol. 1, 1999
- [8] BAUMEISTER, J., BANHART, J., WEBER, M. Aluminium Foam for Transport Industry. *Materials & Design*, Vol. 18. No. 4. (1997) p. 217 – 220
- [9] KOZA, E., LEONOWICZ, M., WOJCIECHOWSKI, S., SIMANCIK, F. Compressive Strength of Aluminium Foams. *Materials Letters*. No. 58, (2003) p. 132 – 135
- [10] BANHART, J., WEAIRE, D. On The Road Again: Metal Foams Find Favor. *Physics Today*. July 2002. P. 37 – 42.
- [11] FUGANTI, A., LORENZI, L., HANSSSEN, G., LANGSETH, MAGNUS. Aluminium Foam for Automotive Applications. *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2. No. 4, 2000, p. 200 - 204.
- [12] STÖBENER, K., BAUMEISTER, J., LEHMHUS, D., STANZICK, H., ZOLLNER, V. Composites Based on Metallic Foams: Phenomenology; Production; Properties and Principles. *Internacional Conference “Advanced Metallic Materials”*. 5 – 7 November, 2003, Smolenice, Slovakia.
- [13] MIYOSHI, T., ITOH, M., AKIYAMA, S., KITAHARA, A. Alporas Aluminum Foam: Production Process, Properties and Applications. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 2, No. 4, 2000 p. 179 - 183.
- [14] BERNARD, T., WILHELM, H., HABERLING, C., HALDENWANGER, H. Joining Technologies for Al-Foam-Al Sheet Compound Structures. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 4, (2002) No. 10, p. 798 – 802.
- [15] YU. C., EIFERT. H., BANHART. J., BAUMEISTER. J. Metal Foaming by a Powder Metallurgy method: Production properties and Applications. *Mat. Res. Innovat* (1998) 2: 181-188

- [16] SEELIGER, H-W. Manufacture of Aluminum Foam Sandwich (AFS) Components. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 4, No. 10, (2002) p. 753 – 758
- [17] BANHART, J. Properties and Applications of Cast Aluminium Sponges. *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2. No. 4, (2000) p. 188 – 191
- [18] KÖRNER, C., SINGER, R. Processing of Metal Foams – Challenges and Opportunities. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 2, No. 4, (2000) p. 159 – 165
- [19] DE LA ROSA, L. Tesis, Fabricación de Espumas de Aluminio por Medio de Inyección de Aire. UNAM, 2005
- [20] BANHART, J., BAUMEISTER, J., WEBER, M. Damping Properties of Aluminium Foams. *Materials Science & Engineering*. A205 (1996), p. 221 – 228
- [21] GERGELY, V., CLYNE, B. 2000. The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors. *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2. No. 4, (2000) p. 175 – 178
- [22] DANNEMAN, K., LANKFORD, J., High Strain Rate Compression of Closed-Cell Aluminium Foam. *Materials Science & Engineering*, A293 (2000) p. 157 – 164
- [23] KENESEI, P., KADAR, Cs., RAJKOVITS, Zs., LENDVAI, J. The Influence of Cell-Size Distribution on the Plastic Deformation in Metal Foams. *Scripta Materialia*. No. 50 (2004), p. 295 – 300
- [24] MARKAKI, A., CLYNE, T. The Effect of Cell Wall Microstructure on the Deformation and Fracture of Aluminium-Based Foams. *Acta Materialia*. No. 49 (2001), p. 1677 – 1686
- [25] TIMOSHENKO. 1930. *Resistencia de Materiales I*. Ed. Espasa Calpe, S.A., España.
- [26] SCHAFFER, SAXENA, ANTOLOVICH, SANDERS, WARNWE. *Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería*. Ed. CECESA. 1999
- [27] DIETER, G. *Mechanical Metallurgy*. Internacional. Student Edition 2, McGraw-Hill, 1961
- [28] CASOLCO, S., TORRES VILLASEÑOR, G., GOMEZ, A., LOPEZ-PARA, M. Influencia del Tamaño de Grano del NaCl en el Procesamiento de Espumas de Zn-Al-Cu. *Memorias del XI Congreso Anual Internacional SOMIM*, 2005

- [29] GAILLARD, C., DESPPOIS, J., MORTENSEN, A. Processing of NaCl Powders of Controlled Size and Shape for the Microstructural Tailoring of Aluminium Foams. *Materials Science & Engineering*. A374 (2004), p 250-262