

104
2 es.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



258158

“CONFORMADO SUPERPLASTICO DE LA ALEACION Cd-Zn”

T E S I S

Que para obtener el título de:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA INDUSTRIAL)**

Presenta:

JORGE ANTONIO LLANES BRICEÑO



México, D.F.

1998



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Muy en especial al **Dr. Gabriel Torres Villaseñor** por todo el apoyo moral, intelectual y material brindado durante el tiempo transcurrido en el desarrollo de este trabajo; por la dirección del mismo así como por su amistad, **muchas gracias**.

A los Honorables Miembros del Jurado **Dr. Gabriel Torres Villaseñor; M. en I. Armando Ortiz Prado; Ing. Ubaldo Eduardo Márquez Amador; M. en I. Javier Cervantes Cabello e Ing. Moisés Mondoza Lineros** quienes tuvieron a bien revisar el presente y a quienes les agradezco las observaciones, el tiempo y las atenciones brindadas.

A todos los **miembros académicos y administrativos del Instituto de Investigaciones en Materiales** por haberme permitido el desarrollo de la presente investigación y particularmente:

A mis compañeros: **Julio, Yazaret, Mario, Said, Alberto, Karina, Benito, Julieta, Teresita, Eréndira, y Folipe** por su compañía y recomendaciones y muy en especial a **Hugo** por su apoyo incondicional durante todo el desarrollo.

A los Doctores **Cristina Piña, Elizabeth Martínez, Mirna Estrada, Enrique Gefroid, Raúl Reyes, Julio Juárez, Horacio Flores, Gonzálo González, Guillermo Aguilar, Raúl Valenzuela** y todos aquellos que se me escapan, por todo el apoyo recibido a lo largo de mi estancia en el Instituto.

A la **M. en C. Leticia Baños, Ing. Alfredo Maciel, M. en C. José Mendoza y Sr. Caballero** por sus asesorías, tiempo y servicios prestados.

Por último quiero agradecer muy particularmente al **Instituto de Investigaciones en Materiales, a la Fundación UNAM y al Sistema Nacional de Investigadores** por los **apoyos económicos** recibidos durante la realización del presente trabajo.

PRÓLOGO

El presente trabajo se realizó dentro del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y tuvo como objetivo "Comprobar la viabilidad de los Procesos de Conformado Superplástico", para cubrirlo cabalmente empezamos por presentar la historia y los conceptos básicos de la SUPERPLASTICIDAD, las aleaciones superplásticas existentes y su comercialización en el primer mundo (capítulo I) para luego hacer una presentación de todos los procesos de conformado superplástico presentados internacionalmente (capítulo II). Estos primeros dos capítulos fueron pensados para poderse presentar como documento de apoyo para cualquier estudiante que quiera incursionar en el tema por lo que tienen un carácter principalmente documental, cualquier punto sobre el cual se quiera profundizar cuenta con las referencias necesarias para empezar otro estudio más especializado, en particular el capítulo dos trata de presentar todas las ideas alguna vez publicadas internacionalmente y especifica claramente aquellos procesos que actualmente están comercialmente en uso, nuevamente se anexan las referencias pertinentes.

Por otro lado la última parte tiene un enfoque ciento por ciento experimental, se plantearon los experimentos requeridos para poder cumplir el objetivo, se llevaron a cabo los mismos y se discutieron y organizaron los resultados, esta parte es el capítulo tres y está pensada para funcionar de guía en la caracterización de otras aleaciones superplásticas. Todos los pasos requeridos para poder obtener piezas conformadas superplásticamente se presentan de una forma detallada, desde los sistemas necesarios hasta el conformado en si para terminar presentando un análisis de los costos asociados a este tipo de procesos. Hay que aclarar que los desarrollos experimentales continúan en proceso por lo que esto es solo un primer paso, pero para aquellas personas que no han tenido contacto con el fenómeno y quieren empezar creemos que el material presentado es un muy buen comienzo.

Jorge Antonio Llanes Briceño
México D.F. primavera del 97

Al momento de encontrarse en revisión este trabajo, Sherby Wadsworth y Nieh publicaron un libro muy completo, este no fue utilizado para el desarrollo del presente pero me permito anexar la referencia bibliográfica pues lo considero el mejor compendio de información sobre superplasticidad realizado hasta el momento.

Jorge A. Llanes B.
México D.F. enero 98

INDICE

INTRODUCCIÓN.....1

CAPÍTULO I EL CONFORMADO SUPERPLÁSTICO

1.1 Generalidades.....2
1.2 La Evolución de la Superplasticidad.....3
1.3 La Ingeniería de la Superplasticidad.....10
1.4 Prerrequisitos Básicos de la superplasticidad.....11
1.5 Las Aleaciones Superplásticas.....17
1.6 Comercialización en el Primer Mundo.....22

CAPÍTULO II LOS PROCESOS DE CONFORMADO SUPERPLÁSTICO

2.1 Generalidades.....27
2.2 Conformado Hidráulico.....28
2.3 Termoformado de Lámina.....29
2.4 Conformado Superplástico y Soldadura por Difusión.....40
2.5 Moldeo por Inflado.....49
2.6 Trefilado Superplástico (Sin Matriz).....53
2.7 Embutido Profundo.....53
2.8 Aplicaciones de los Procesos Convencionales.....55
2.9 Procesos de Metalurgia de Polvos.....58
2.10 Conformado con Diafragma (Membranas de Sacrificio).....59
2.11 Conformado por impulso60
2.12 Proceso de Tiro Impulsivo.....62

CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Obtención de la Aleación.....63
3.2 Transformación a Lámina.....68
3.3 Producción de Piezas Conformadas.....73
3.4 Aspectos económicos.....95
3.5 Conclusiones.....98

CITAS.....100

BIBLIOGRAFÍA.....103

INTRODUCCIÓN

Los procesos de conformado superplástico han tenido un desarrollo muy importante en los últimos treinta años, esto se ha dado en países desarrollados en donde las investigaciones se han centrado en materiales producidos por los mismos y que tienen aplicaciones en el área aeroespacial y aerocomercial. Sin embargo, en los últimos años estas aplicaciones se han diversificado considerablemente de modo que hoy en día se utilizan para producir artículos deportivos, diseños arquitectónicos, piezas de transportes (trenes y automóviles) e incluso artículos médicos, con esto se abren las posibilidades de aplicación de dichos procesos en países en vías de desarrollo como México.

El presente trabajo tiene como objetivo principal el comprobar la viabilidad de los procesos de conformado superplástico utilizando para ello una aleación superplástica basada en elementos de alta abundancia en el país como lo son el cadmio y el zinc. Para cumplir cabalmente dicho objetivo se realizó la caracterización del proceso de conformado superplástico de lámina de la aleación Cd-17.4Zn trabajando con presión de gas y presión atmosférica como herramientas de conformado, con lo que se obtuvieron los parámetros mínimos indispensables para su aplicación (índice de sensibilidad a la rapidez de deformación, deformación máxima, temperaturas, presiones, tiempos, etc..).

Además, la metodología planteada para la caracterización del proceso se puede aplicar al conformado de futuras aleaciones superplásticas

I EI CONFORMADO SUPERPLÁSTICO

I.1 GENERALIDADES

Hoy en día el conformado superplástico (CSP en adelante) se encuentra muy avanzado. Si hace algunos años se pronosticaba la "revolución de los superplásticos" en el área metal mecánica hoy por hoy la encontramos en pleno desarrollo, de hecho el CSP tiene ya treinta años de haber sido reconocido como un proceso de manufactura industrial con bastante demanda como para impulsar sus propios desarrollos. En México la industria no le ha dado importancia debido a que las aplicaciones rentables que hoy en día se explotan son en su mayoría para la industria aeroespacial, en la cual el país prácticamente no participa. Dadas estas condiciones creemos que es importante tener desarrollos nacionales dentro del área, poco a poco se empieza a vislumbrar el gran potencial de esta forma de conformado y dentro de no muchos años las aplicaciones serán más variadas debido a que el uso de aleaciones superplásticas tiene ventajas contundentes, a continuación se mencionan algunas de ellas:

- La semejanza en el comportamiento de los materiales superplásticos y los termoplásticos es clara por lo que se pueden adaptar técnicas de termoformado para obtener piezas de aleaciones metálicas superplásticas. Las técnicas de termoformado permiten el uso de la presión atmosférica y vacío para láminas no muy gruesas y el uso de presiones de gas para mayores espesores, lo cual nos permite bajar nuestra inversión inicial pues se puede prescindir de la costosa maquinaria hidráulica y/o mecánica convencional.

- Al utilizar aleaciones metálicas superplásticas en los procesos de conformado convencionales (troquelado, doblado, forjado, etc..) el esfuerzo requerido para lograr una deformación plástica es menor por lo que se necesita menos carga, lo cual implica un ahorro energético. Además, por la misma razón la vida útil de las herramientas se ve incrementada.

-Otra ventaja de este nuevo proceso de conformado de metales, es que los componentes de formas complejas pueden ser fabricados en una sola operación en contraste con los métodos que implican varias etapas sucesivas o ensamblados de varias partes menores. El costo de matricería es relativamente bajo, debido a que en la mayoría de los casos el uso de una matriz es suficiente para toda una producción ya que no hay desgaste por golpes u otra clase de esfuerzos"(1).

Pero como todo presenta ciertas desventajas, por un lado para lograr un comportamiento superplástico en el material se tiene que deformar trabajando a ciertas velocidades de deformación la cuales resultan ser muy bajas lo que da como resultado una baja productividad en piezas por unidad de tiempo, es decir se requiere mucho tiempo de conformado, así "los procesos de conformado

convencionales para aleaciones y metales son 3 o 4 veces más rápidos que aquellos procesos en donde se observa una superplasticidad óptima" (2).

Si por el otro tomamos en cuenta que los diseñadores se muestran renuentes a adoptar procesos de conformado novedosos y más aún a utilizar nuevos materiales; que existe la necesidad de un control de proceso cuidadoso con el cual éste se pueda llevar a cabo a determinada temperatura y rapidez de deformación para poder obtener un alto grado de superplasticidad; y que existen muy poca cantidad de aleaciones superplásticas comerciales disponibles que nos permitan darle el tamaño de grano requerido para procesarlo y además tenga las propiedades mecánicas necesarias para su uso después del conformado entonces nos podemos explicar el por qué no se tiene el éxito esperado.

Pero.... si se analiza la situación se tiene que: el hecho de que el proceso en sí ocupe más tiempo para poder aprovechar las características superplásticas de las aleaciones no impide el desarrollo de conformados simultáneos de varias piezas, con lo cual se compensaría esa lentitud; en cuanto al control del proceso hoy en día se encuentran sistemas totalmente desarrollados y trabajando (como se verá adelante) que permiten tener un perfecto control de temperatura y carga; en lo que se refiere a la disponibilidad de aleaciones superplásticas se ve que poco a poco se va incrementando el uso y desarrollo de las mismas, incluso en el país se cuenta con patentes de aleaciones superplásticas nacionales a base de Zn-Al-Cu (Zinalco) que se encuentran comercializadas, en el primer mundo "el grueso del conformado superplástico comercial ha corrido a cargo de aleaciones de aluminio tales como la Supral 100,150,220 y 5000,Al-7475 y Lital A(Al-8090) y aleaciones de titanio como Ti-6Al-4V" (3) y en realidad si se tiene acceso a dichos productos, lo que pasa es que no se conocen, lo que hace recordar el último punto: a la gente va a ser muy difícil convencerla con razones en papel, desafortunadamente en ese aspecto los empresarios nacionales se convencerán cuando la competencia extranjera les demuestre que es la única opción.

1.2 LA EVOLUCION DE LA SUPERPLASTICIDAD

Aunque el estudio y desarrollo formal del fenómeno superplástico se ha presentado en este siglo, se tiene información verídica que indica que los árabes utilizaban acero superplástico alrededor del siglo XI, al respecto hay una anécdota muy conocida, en 1972 el Dr. Oleg D. Sherby (Stanford University) publicó la noticia de la obtención de aceros superplásticos, pero al poco tiempo unos arqueólogos llegaron a la conclusión de que era el mismo acero que ocupaban los árabes y que trascendió a su tiempo debido a las famosas espadas de Damasco, Sherby había descubierto como los árabes transformaban el acero de fundición que obtenían de la india en acero superplástico con el cual fabricaban las espadas; incluso este mismo Sherby publica en 1990 un artículo en

donde se presenta la posibilidad de que los broncees antiguos usados en Turquía en la edad de bronce (Cu-10As) pudieran haber sido superplásticos (4), esto colocaría a la superplasticidad por el año 2000 a/c y se esquematiza mediante la figura 1.1 en donde además se puede ver lo poco que se tiene registrado en el tema, en los diagramas subsecuentes se detalla ese poco tiempo que la ciencia moderna ha estudiado el fenómeno.

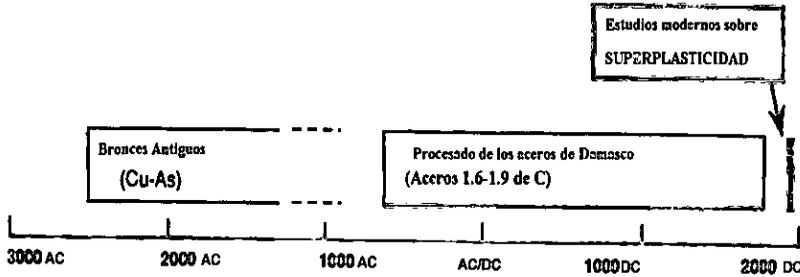


Fig. 1.1 .- Perspectiva histórica de la superplasticidad (4).

El primer reporte científico del fenómeno se registra en 1912 cuando Bengough (6) describe "cierto latón especial que fue llevado a un punto fino (pulled out to a fine point), como si fuera vidrio y en donde se obtienen enormes elongaciones". En 1928 Jenkins (7) publica la primera fotografía del fenómeno en donde se presenta una probeta deformada 300 % (fig. 1.2) pero no le da mucha importancia y por lo tanto no presenta conclusiones al respecto. En 1934 Pearson (8) demuestra que elongaciones muy grandes pueden ser obtenidas en materiales de dos fases con un grano fino, para esto presenta una probeta de bismuto estaño deformada 1950 % figura 1.3 .

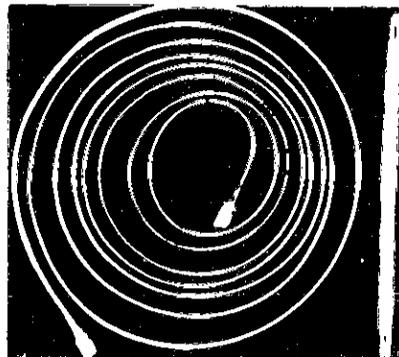


Fig. 1.2 Foto publicada por Jenkins en 1928 (7).

Fig. 1.3 Foto publicada por Pearson en 1934 (8).

Esta fotografía (1.3) le dió (erróneamente) el crédito de ser el primero en demostrar la superplasticidad. En el occidente los resultados de Pearson no

pasaron de ser considerados como una curiosidad, sin embargo, no pasó lo mismo con los rusos los cuales fueron los primeros en estudiar el fenómeno con grupos de investigación y en 1945 en un artículo de aleaciones superplásticas Bochvar y Sviderskaya acuñan el término "sverkhplastichnost" que es entendido como plasticidad ultra alta (ultrahigh plasticity) (9). Apparently el término "superplasticity" aparece por primera vez en el lenguaje inglés en 1959 en una publicación hecha por Lozinsky y Simeonova (10). En el siguiente diagrama se presentan los hechos más importantes durante estos 50 años.

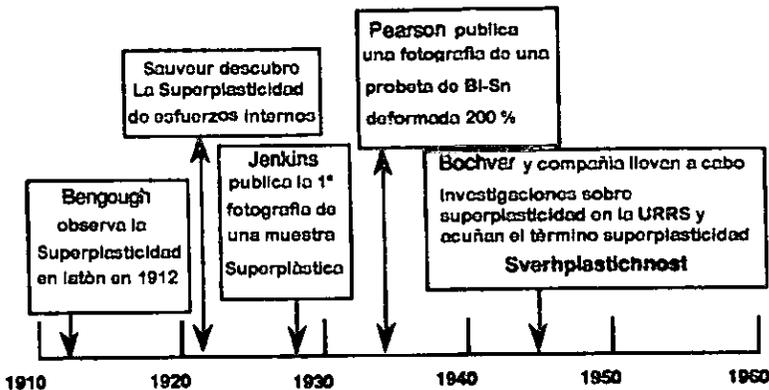


Fig. 1.4 Esquema que muestra la historia de los desarrollos de la superplasticidad de 1919 a 1960.

Esto a suscitado diferencias respecto a quién descubrió la superplasticidad, por su parte Bochvar es indiscutiblemente el primero en estudiar a fondo el fenómeno, para ello hizo todo un estudio de las propiedades de la aleación Zn-Al a diferentes composiciones y llegó a la conclusión de que la composición Zn-20Al (%en peso) presentaba, bajo condiciones particulares de temperatura y rapidez de deformación, un comportamiento muy especial que se caracterizaba por lograr grandes deformaciones, a esto le llamó superplasticidad. Por su parte Pearson queda en el olvido y después de 30 años Avery y Backofen (11) lo encuentran y al poco tiempo se vuelve clásico¹, la diferencia se presenta cuando Langdon en un congreso internacional (Japón en 1991) dice que los estudios de Bochvar fueron motivados por los resultados publicados por Pearson, entonces los Rusos se quejan y para ello aprovechan el siguiente simposium internacional (Rusia 1994) en donde lo aclaran, no nada mas no fueron motivados por el estudio de Pearson sino que no tenían el objetivo de trabajar con esa aleación en un principio, Langdon acepta la confusión y establece que Bochvar re descubrió el fenómeno y no solo lo estudia sino lo bautiza.

¹ Hay que tener en cuenta que la primera cita de Pearson la realizan los mismos Bochvar y Sviderskaya en 1960 (11)

Aunque por esta época algunos papeles eran publicados, el que llamó el interés de investigadores occidentales fue un artículo de revisión publicado por Underwood (12) en 1962, en él se presenta una gráfica (fig. 1.5) en donde se presenta la ductilidad de la aleación Zn-Al después de un templeado desde 375°C. Una deformación máxima de 650% es lograda a 250°C con una composición de 20% de aluminio y 80% de zinc. Esto llamó la atención del profesor Backofen del MIT ya que se presentaban deformaciones muy marcadas y esto se lograba con solo dar un proceso de templeado a la aleación.

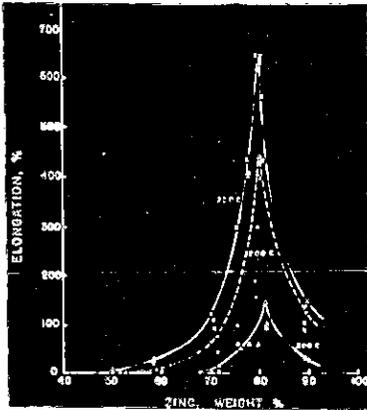


Fig.1.5 Gráfica publicada por Underwood en 1962(12).



Fig.1.6 Foto publicada por Backofen et.al. en 1964 (13).

Así Backofen y sus estudiantes (13) estudiaron con detalle la aleación eutectoide Zn-Al así como la aleación Pb-Sn en su punto eutéctico. La contribución más importante de este reporte radica en que mostraron que la aleación superplástica Zn-20Al puede ser conformada en una forma útil (medio círculo) con simple presión de aire, como si fuera vidrio soplado (fig.1.6). Este ejemplo práctico mostró la gran conformabilidad que tienen las aleaciones metálicas superplásticas y fue el detonador de toda una carrera de investigación en el tema, a los cuatro años, en 1968 se publica un artículo de divulgación por parte de Chaudhari, en 1969 el autor ruso Presnyakov publica el primer libro en el tema (14) y la carrera está en su apogeo, para ilustrar esto se presenta la figura 1.7 en donde se ilustra muy bien el incremento en los artículos presentados al respecto en el periodo 1960-91.

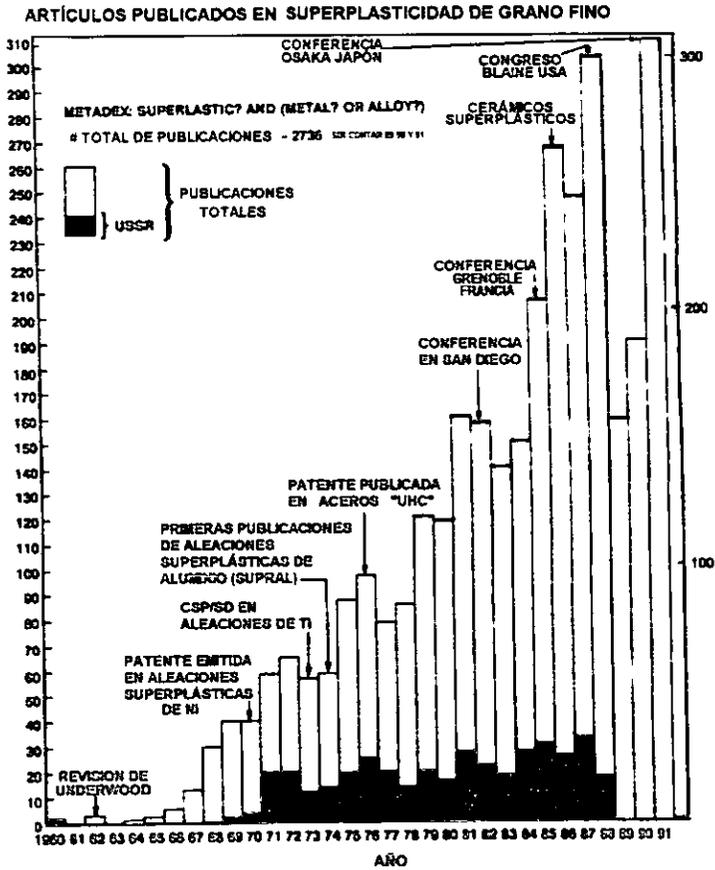
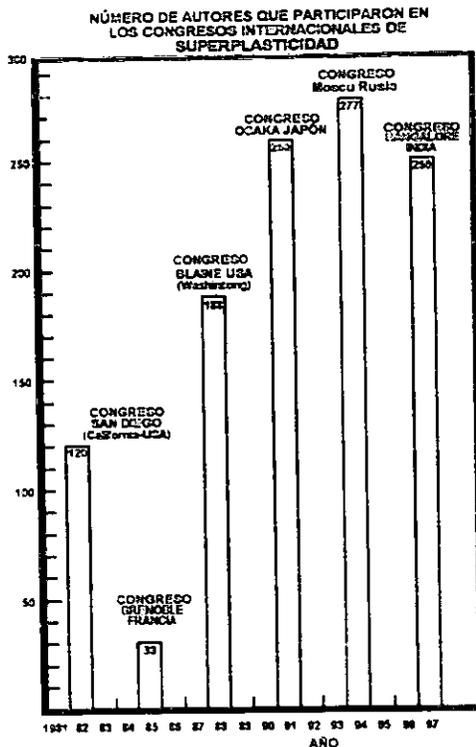


Fig.1.7 Gráfica en donde se ejemplifica el gran aumento del interés científico en el tema de 1960 a 1991.

Este incremento tan acelerado en el interés comercial se debe a las ventajas que se presentan al tener baja resistencia a la deformación plástica y al mismo tiempo una alta plasticidad. Esta combinación coloca al proceso como el ideal ya que es posible obtener piezas complejas con el mínimo gasto de energía, además la estructura fina puede dar mejores propiedades de servicio en el producto terminado.

A finales de los setentas había ya muchas investigaciones en el tema por lo que la gente del Shaping and Forming Committee y del Titanium Committee (ambos de The Metallurgical Society of AIME) deciden organizar un simposium

internacional en el tema, así para 1982 se organizó en San Diego California (15) el primer simposium internacional sobre superplasticidad y la comunidad científica interesada en el tema propuso que este simposium se repitiera cada tres años, así en 1985 se realizó en Grenoble Francia (16), en 1988 en Blain Washington (17), en 1991 en Osaka Japón (18), en 1994 en Moscú Rusia (19), en 1997 en Bangalore India (20) y se propuso Florida U.S.A. para el 2000. Como se ve los países primermundistas erogaron bastantes recursos en la investigación y desarrollo del fenómeno, para tener una idea de los recursos humanos involucrados se presenta la siguiente figura, la cual cuenta el número de autores que participaron en los diferentes congresos internacionales antes señalados.



Hay que aclarar que en el congreso de Francia (1985) la organización estuvo a cargo de gentes de varios países sin embargo faltó convocatoria pues la participación fue mínima, incluso los investigadores Mexicanos que normalmente asisten a estos congresos no fueron avisados, lo mismo pudo suceder con los demás.

En la siguiente figura (1.8) Sherby (21) esquematiza muy bien lo desarrollado en las décadas de los 60's a los 80' y se presenta anexando la información relativa a los 90's.

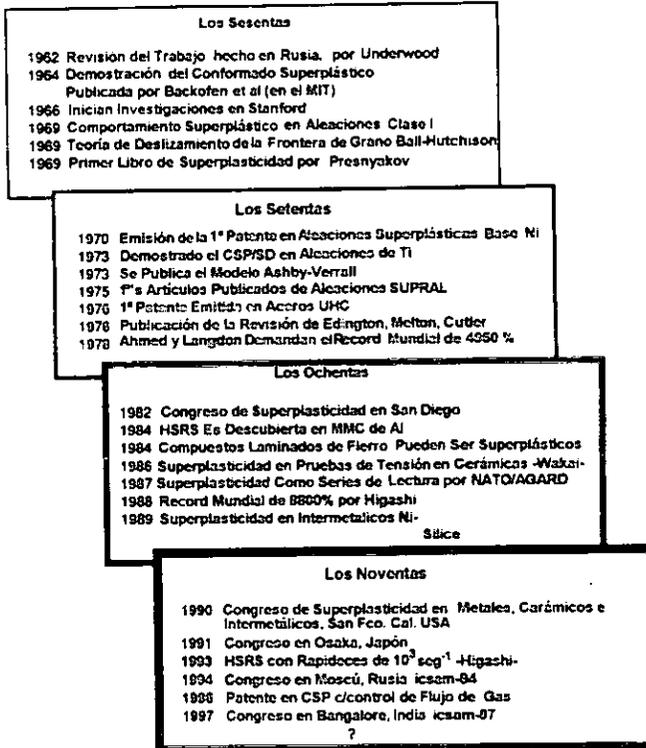


Fig 1.8 Eventos clave en la historia de la superplasticidad (21)

Falta entonces mencionar los avances que se han presentado en lo que va de los 90's, y en realidad lo que se ha realizado (aparte de subir el record a 10,000 % de deformación) es una estandarización de los procesos que si bien por cuestiones de know-how no se tiene la información a la mano, si se ha llevado a un punto en donde la metodología está desarrollada y el fenómeno totalmente controlado. La tendencia actual está enfocada a los procesos de alta rapidez de deformación, en ese sentido se han realizado estudios en aluminios superplásticos que pueden deformarse en segundos, haciendo muy competitivos a estos procesos, publicaciones consistentes han sido presentadas desde 1991 (ver sección 1.4.2.1).

Hay que tener en cuenta que la mayoría de las aleaciones superplásticas desarrolladas a la fecha exhiben comportamientos óptimos de deformación en pruebas de tensión logrando deformaciones de 300 a 1000 % con lo que se pueden lograr piezas de una gran complejidad obtenidas en una sola pieza y consumiendo poca energía.

1.3 LA INGENIERÍA DE LA SUPERPLASTICIDAD

Los metales convencionales tienen el inconveniente de que son inestables cuando son deformados plásticamente por fuerzas de tracción (esto produce la formación del cuello - adelgazamiento localizado - en donde se presenta la fractura en estas pruebas) lo cual limita el grado de deformación uniforme posible en procesos como trefilado o estirado de alambre en donde se involucran fuerzas de este tipo. Por el otro lado los metales superplásticos son relativamente estables cuando se deforman en tracción lo que ha provocado que recientemente la atención comercial se enfoque sobre ellos. Este comportamiento tan particular se debe a que bajo las condiciones apropiadas el esfuerzo de flujo (esfuerzo requerido para lograr una deformación plástica) es muy sensible a la velocidad de deformación. La ecuación que normalmente se utiliza para describir este comportamiento es:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \text{ ----- (1.1)}$$

Donde σ es el esfuerzo de flujo, K es una constante que depende del tamaño de grano, de la temperatura y de los defectos de estructura de la muestra; $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación y m es la sensibilidad a la velocidad de deformación y es la pendiente de la gráfica σ Vs $\dot{\epsilon}$ (ver fig. 1.10^a) pág. 16). Este valor m describe la capacidad del material a no formar un cuello y ha sido usado como un criterio para medir el grado de superplasticidad del material. La sensibilidad óptima esta asociada a velocidades de deformación relativamente bajas. Bajo estas condiciones el esfuerzo de flujo de estos materiales es más bajo que el de los materiales convencionales.

En una prueba de tracción la sensibilidad a la velocidad de deformación provoca que la muestra se deforme sin presentar adelgazamiento localizado (aunque la razón de adelgazamiento es mayor en aquellas zonas más delgadas), lo que pasa es que las variaciones en el área de la sección transversal tienden a propagarse despacio con lo que se difunde el adelgazamiento y se presenta una deformación relativamente uniforme. Respecto a la sensibilidad a la velocidad de deformación m cabe aclarar lo siguiente: el valor máximo que puede tomar es de 1 cuando el material se comporte como líquido viscoso. En la práctica

el valor de m de las aleaciones superplásticas comerciales varía entre 0.4-0.9 presentando una mejor resistencia al adelgazamiento localizado aquellas con los mayores valores de sensibilidad a la deformación (22). Normalmente valores de m arriba de 0.3 es suficiente para catalogar a una aleación como superplástica.

I.4 REQUISITOS BÁSICOS DE LA SUPERPLASTICIDAD

Ahora bien, se debe tener presente que para poder hacer uso de las propiedades superplásticas hay que cumplir ciertos requisitos, el más importante es que el material tenga un alto índice de sensibilidad a la rapidez de deformación (m) y esto se puede lograr por medio de esfuerzos internos (con lo que se tiene la llamada "environmental superplasticity" (23)) con procesos como ciclos térmicos alrededor de la temperatura de transformación de fase por ejemplo; o por refinamiento de grano - llamada "superplasticidad estructural" o de grano fino ("structural superplasticity") (24)- que es la más estudiada y de mayor aplicación; el otro es el tamaño de grano y no se debe olvidar la temperatura.

I.4.1 REQUISITOS METALGRÁFICOS ESTRUCTURALES

Para poder emplear eficazmente el fenómeno de la superplasticidad estructural y así tener un comportamiento superplástico óptimo se deben atender a varios requisitos que debe tener la aleación a conformar - esto además de atender a la temperatura y rapidez de deformación particular de cada aleación -, éstos son los requisitos metalográficos estructurales y de ellos los más importantes se presentan a continuación² (25):

- Tamaño de grano
- Presencia de una segunda fase
- Fuerza o dureza de la segunda fase
- Distribución y tamaño de la segunda fase
- Naturaleza de la estructura de la frontera de grano
- Movilidad de las fronteras de grano
- Forma de los granos
- Fronteras de grano resistentes a la separación por tensión.

² El primero de estos requisitos se trata más ampliamente en el siguiente punto, algo más detallado de los demás se puede encontrar en la referencia (25).

I.4.1.1 TAMAÑO DE GRANO

Una característica metalúrgica básica es el tamaño de grano el cual debe ser menor a 10 micrómetros. Actualmente muchas de las aleaciones utilizadas comercialmente no tienen el tamaño adecuado de forma natural (los aluminios por ej.) y lo que se hace es reducir el tamaño de grano con tratamientos mecánicos, térmicos o termomecánicos.

Algunas aleaciones (como la Ti-6Al-4V) presentan la microestructura necesaria desde que se obtienen y debido a esta característica se les nombra superplásticos de 1ª generación. Por su parte a aquellos materiales a los que se les induce el tamaño de grano requerido les llamamos superplásticos de 2ª generación. Para observar claramente como influye el tamaño de grano en el proceso véase la figura 1.9 en donde se aprecia la gran ventaja que se obtiene en el tiempo de conformado al reducir el tamaño de grano, esto hace al proceso mucho más eficiente y por lo tanto más rentable. Como es de esperarse hoy en día se tienen líneas de investigación en nanocristales (materiales con tamaño de grano del orden de nanómetros) pues todo parece indicar que se puede seguir reduciendo el tiempo de conformado.

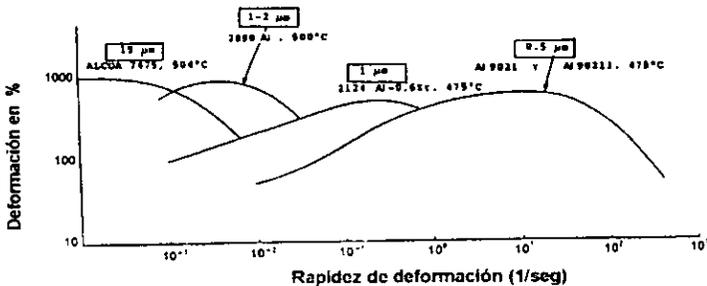


Fig 1.9 Influencia del tamaño de grano en el comportamiento de conformado para aleaciones de aluminio

Ante esta situación se han llevado a cabo numerosos estudios para poder reducir el tamaño de grano, ya desde principios de los ochenta se tenían bien estudiados los fenómenos físicos involucrados por lo que numerosos métodos fueron desarrollados incluidos el de transformación de fase, recristalización, trabajo mecánico en aleaciones dúplex (de dos fases), y separación de fase también en dúplex. En los dos primeros el objetivo es poder lograr que granos de una "nucleen" dentro de los granos de la otra fase o material; en el tercero, deformación mecánica en aleaciones dúplex, los granos de las dos fases son fraccionados y redondeados por trabajo mecánico, normalmente la

deformación va seguida por recristalización con lo que se ayuda al refinamiento; en el cuarto, separación de fase en aleaciones dúplex, la estructura inicial no es la de equilibrio, generalmente es martensítica o una solución sólida supersaturada, la separación de fase de las fases en dos fases en equilibrio puede producir una microestructura dúplex de grano fino (26).

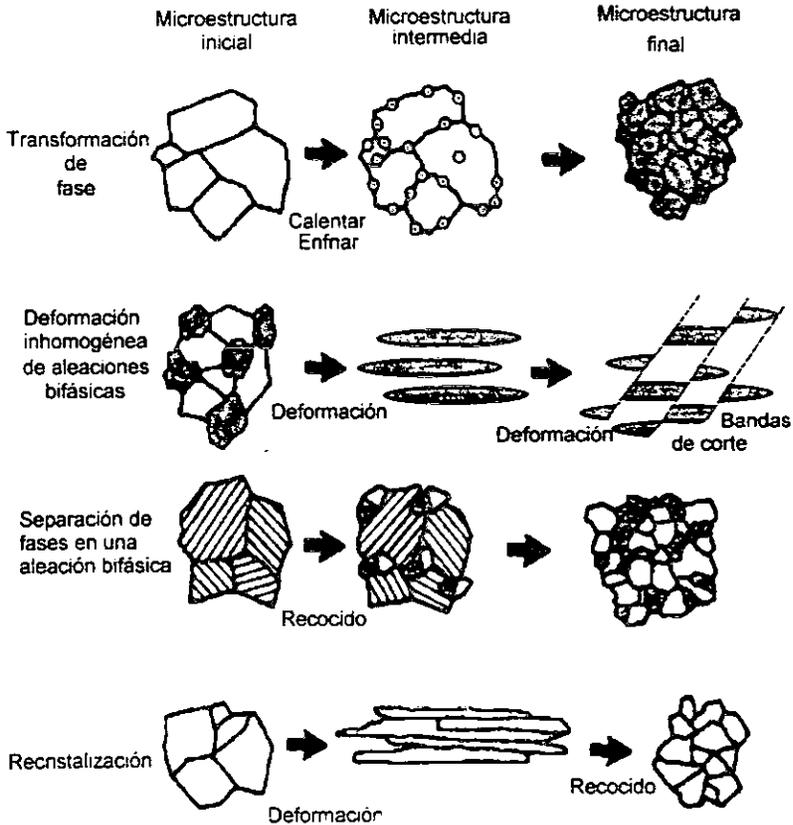


Fig. 1.10 Diagrama esquemático de los mecanismos generales de refinamiento de grano (26).

1.4.2 RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN

Para poder tener un comportamiento adecuado es necesario establecer una rapidez de deformación óptima (las rapideces correspondientes a las crestas de las gráficas de la fig. 1.9 son las rapideces óptimas para las diferentes aleaciones ya que las crestas implican los mayores % de deformación) y una vez establecida mantenerla de la forma más precisa posible. Por esto es indispensable tener un control muy preciso de la rapidez de deformación, usualmente esta rapidez varía alrededor de los 10^{-3} seg^{-1} . Esta velocidad de deformación óptima es particular de cada material y tiene que ser determinada pues como se verá tanto el tamaño de grano como la temperatura tienen incidencia directa sobre esta.

"Es generalmente aceptado que el deslizamiento de la frontera de grano y la termofluencia por difusión contribuyen apreciablemente a la deformación total al imponer velocidades de deformación bajas. A baja rapidez de deformación se requieren esfuerzos relativamente bajos para guiar el deslizamiento del límite de grano y la termofluencia por difusión. A alta rapidez de deformación el deslizamiento de grano y la termofluencia por difusión ocurre muy despacio para poder contribuir apreciablemente a la deformación total, la deformación se presenta principalmente por movimiento de dislocaciones"(27).

Por otra parte la deformación por dislocaciones requiere un esfuerzo de cedencia mayor que por deslizamiento de los límites de grano y termofluencia por difusión, además con estos últimos métodos logramos altos índices de sensibilidad a la rapidez de deformación (m) que como ya se dijo es de las características básicas del fenómeno.

1.4.2.1 SUPERPLASTICIDAD DE ALTA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN

La superplasticidad a alta rapidez de deformación (HSRS en adelante-High Strain Rate Superplasticity-) ha sido observada en varios materiales, incluyendo aleaciones convencionales modificadas, aleaciones aleadas mecánicamente y compuestos de matriz metálica (metal matrix composites). A pesar de las diferencias en la composición química de la matriz base todas ellas presentan propiedades superplásticas similares, a saber: presentan deformaciones máximas del orden de 300 % con rapideces de deformación de entre 0.1 - 1 seg^{-1} . Incluso desde 1993 Higashi reporta rapideces de deformación del orden de 10^{-3} seg^{-1} y en 1989 Sherby y Wadsworth predicen rapideces del orden de 10^{-4} - 10^{-5} seg^{-1} (28). La HSRS toma importancia debido a que una de las limitantes de los procesos de conformado superplástico es precisamente la lentitud del proceso (normalmente entre 10^{-6} y 10^{-3} s^{-1}).

"Existen evidencias que sugieren la presencia de una fase líquida que resulta de las condiciones de prueba, o la presencia de regiones con bajo punto de fusión causado por segregación del soluto ("solute") que pueden ser los responsables del fenómeno de superplasticidad de alta velocidad de deformación. Un tamaño fino de grano es necesario pero no suficiente"(29).

Existen diferencias básicas entre la superplasticidad convencional y la HSRS: primero, parece ser que se presentan esfuerzos umbrales (threshold stresses) causados por el tamaño, forma y composición de las partículas; segundo, el acomodamiento por resbalamiento (slip accommodation) parece contribuir significativamente al proceso de deformación; tercero, la fusión incipiente tiene un efecto remarcable de permitir grandes deformaciones anómalas cuando la temperatura se fija para fundir solamente los puntos triples de la frontera de grano (grain boundary triplé points). Para que los diseñadores y fabricantes puedan considerar seriamente el uso de la HSRS se requieren más investigaciones. Una de ellas, quizá la más importante, es desarrollar métodos de reducción del tamaño de grano más competitivos económicamente (30). La temperatura juega un papel muy importante pues para que se presente el fenómeno de HSRS se requieren temperaturas superiores a las convencionales (ver el siguiente punto).

1.4.3 TEMPERATURA

Para que una aleación pueda ser deformada superplásticamente es indispensable atender a los dos puntos anteriores y además llevar a cabo la deformación con una temperatura especial, esta temperatura corresponde a la mitad de la temperatura de fusión en escala absoluta y como veremos su variación tiene consecuencias interesantes.

$$T_s \geq 0.5 T_f \text{ (en K)} \quad \begin{array}{l} T_s = \text{temperatura superplástica en } ^\circ\text{K} \\ T_f = \text{temperatura de fusión de la aleación en } ^\circ\text{K} \end{array}$$

Cabe hacer la aclaración de que esa T_s es la temperatura para que se presente el fenómeno, para conformados hay que determinar la óptima experimentalmente pero normalmente varía entre 0.6 y 0.9 de T_f en $^\circ\text{K}$.

Estos tres parámetros determinan la forma en que se va a presentar la deformación. Para ver como lo hacen nos basaremos en la fig. 1.10^a) en donde se presenta una representación esquemática de la variación de $\dot{\epsilon}$ Vs σ , como partimos de la ec 1.1 podemos obtener directamente la gráfica de encima en donde tenemos $\dot{\epsilon}$ Vs ϵ ; m se toma directo de la de abajo (hay que recordar que m es la pendiente de la gráfica inferior).

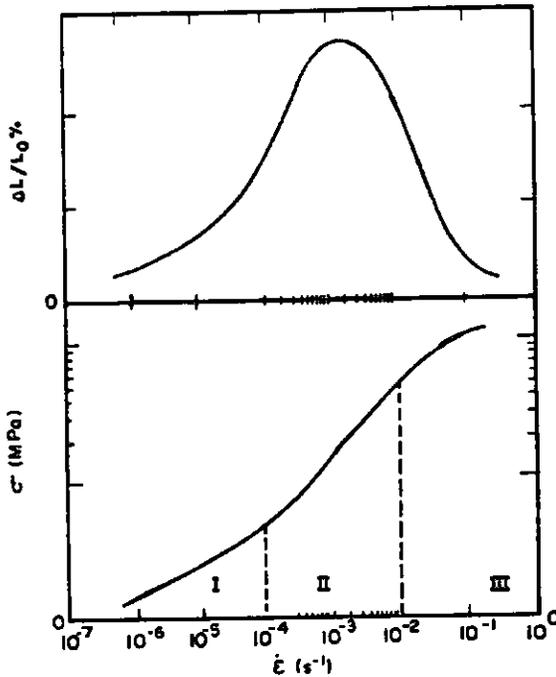


Figura 1.10a).- Gráfica $\dot{\epsilon}$ vs σ en escala logarítmica y dividida en tres partes (I-II-III) arriba $\dot{\epsilon}$ vs ϵ (en escala logarítmica)

Por conveniencia la gráfica $\dot{\epsilon}$ vs σ se divide en tres partes, a las regiones I y III les corresponde valores muy pequeños de m ($m < 0.3$) lo que quiere decir que a velocidades muy bajas o muy altas el material no va a presentar las propiedades buscadas, por otro lado la región II presenta unos valores de m mayores o iguales a 0.3 y corresponde a la región superplástica que es lo que se requiere pues con esto se logran altos porcentajes de deformación. Esto se ilustra en la parte de arriba en donde se grafica la deformación contra la rapidez de deformación ($\dot{\epsilon}$ vs ϵ). Obviamente el valor de m es mayor para materiales superplásticos y para éstos es menor el esfuerzo máximo.

Como se ve la superplasticidad es un fenómeno de alta temperatura que en general se presenta arriba de la mitad del punto de fusión en escala absoluta, la influencia que tiene ésta sobre el esfuerzo de fluencia y la rapidez de deformación ha sido bien discutida para varios materiales y en general al incrementar la temperatura de conformado se tiene que (31):

- El valor del esfuerzo máximo de fluencia disminuye y el efecto se hace menor para altos valores de rapidez de deformación ($\dot{\epsilon}$). Este efecto es mayor en aleaciones superplásticas que en aleaciones convencionales o de grano grueso.

- El valor máximo del índice de sensibilidad a la rapidez (m) se incrementa y es desplazado hacia valores altos de rapidez de deformación.

- Las transiciones entre las regiones I/II y las regiones II/III son desplazadas a valores altos de rapidez de deformación.

- En los valores extremos de rapidez de deformación (zonas I y III) el valor del índice de sensibilidad a la rapidez de deformación (m), es menos sensible a la variación de la temperatura que en la región superplástica II.

Como ya se resaltó anteriormente "el comportamiento superplástico es observado para tamaños de grano cuyo diámetro es menor o igual a diez micrómetros " y si se analiza la gráfica de la fig. 1.10^a) variando el tamaño de grano se verá que el efecto que provoca la reducción en el tamaño de grano es muy similar al del incremento en la temperatura, a saber (32):

- Disminuye el esfuerzo máximo de fluencia para todos los valores de rapidez de deformación ($\dot{\epsilon}$) excepto en la región III, y este efecto es más marcado a bajos valores de rapidez de deformación.

- La transición entre las regiones II y III se desplaza hacia valores altos de rapidez de deformación.

- El valor máximo del índice de sensibilidad a la rapidez de deformación (m), se incrementa y se mueve hacia valores altos de $\dot{\epsilon}$.

1.5 LAS ALEACIONES SUPERPLÁSTICAS.

Antes que nada hay que aclarar una situación, los materiales superplásticos pueden ser metálicos, cerámicos o compuestos de estos dos, el presente trabajo se enfocó exclusivamente a aleaciones metálicas y por lo mismo no se encontrará alusión alguna aparte de la presente en todo el texto acerca de los materiales superplásticos cerámicos o compuestos, para obtener información de estos materiales se sugiere consultar el simposium internacional de 1990, referencia (5) en el capítulo de cerámicos superplásticos, si bien los estudios en el tema empezaron en 1986 es hasta éste simposium cuando se tratan con la importancia debida.

Al hablar de materiales superplásticos debemos mencionar que existen aquellos utilizados en laboratorios de investigación y aquellos otros que ya superaron esa etapa y son comerciales. Cuando el fenómeno era tratado como una rareza, algo exclusivo para investigación, se desarrollaron aleaciones que tenían las características superplásticas sin atender a que se pudieran utilizar comercialmente. Entonces se utilizaron aleaciones como la Cd-Zn, Bi-Sn, Pb-Sn y la Zn-Al, como se menciona adelante esta última fue la primera en comercializarse, pero todas ellas contribuyeron a definir el comportamiento superplástico y con ello se plantearon los lineamientos para obtener otras potencialmente comerciales, así en los últimos 25 años un gran número de aleaciones superplásticas han sido descubiertas, pero pocas de ellas tienen importancia comercial. Algunas aleaciones han sido diseñadas para superplasticidad pero su acceso al mundo comercial se ha visto detenido por la perspectiva tan cautelosa de los diseñadores y usuarios de las mismas principalmente en la industria aeroespacial y aerocomercial (donde la aplicación del fenómeno es rentable), así lo que se está haciendo actualmente es tomar aleaciones que tienen sus propiedades de servicio bien establecidas y procesarlas para que puedan presentar un comportamiento superplástico.

Las aleaciones superplásticas se pueden dividir en dos tipos principales: aquellas de pseudo fase simple y las microduplex. En ambas los precipitados (adiciones de otros elementos) tienen un papel importante pues ayudan al desarrollo de un tamaño de grano fino al ser sometido a tratamientos termomecánicos al mismo tiempo que evitan el crecimiento de grano en el proceso de deformación superplástica. Del primer grupo se tienen las aleaciones de aluminio y cobre, mientras en el segundo a los aceros y titanios; y se mencionan sólo éstas pues son las de importancia comercial. Una buena recopilación al respecto es presentada por Pilling & Radley (33).

1.5.1 ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio se han desarrollado rápidamente debido a que han tenido una muy buena aceptación en la industria aérea, y éstas se dividen en dos categorías, aquellas que presentan recristalización dinámica durante la deformación superplástica como la familia Supral: Supral 100(Al-6Cu-0.4Zr) (la llamada 2004 es la misma que ésta última), Supral 220(Al-6Cu-0.4Zr-0.3Mg-0.1Ge-0.1Si), y la familia 8090 de Al-Li (Al-2.4Li-1.2Cu-6Mg-0.12Zr) y por otro lado aquellas que presentan recristalización estática durante procesamientos termomecánicos como la 5083(Al-4Mg-0.4Mn-0.05Cr en sus rangos mínimos) y la 7475(Al-5.7Zr-2.3Mg-1.5Cu-0.2Cr) (34). Hoy por hoy estas aleaciones son de las más estudiadas pues se han logrado velocidades de deformación relativamente bajas, lo que implica grandes posibilidades de comercialización, a continuación se muestran dos figuras que conjugan muy bien la información de interés al respecto.

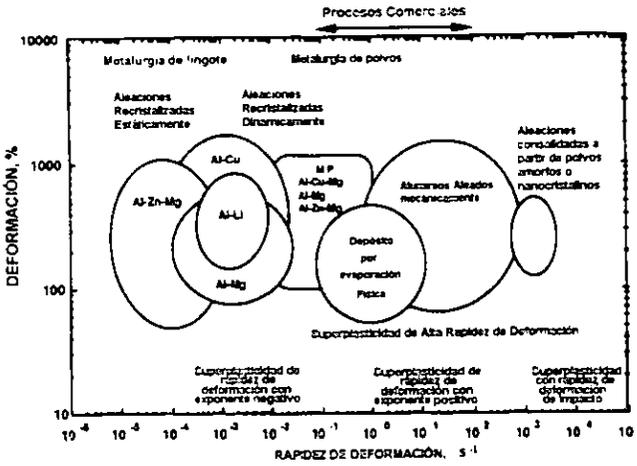


Fig. 11 Relación entre deformación superplástica y rapidez de deformación para varias aleaciones de aluminio(35)

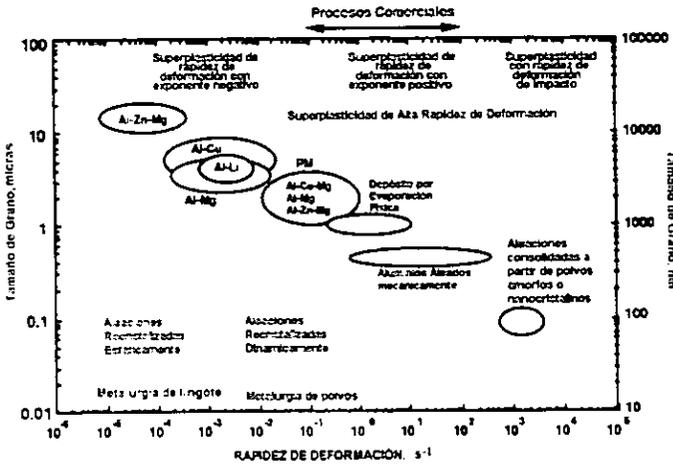


Fig. 12 Cambio en la rapidez de deformación óptima para varias aleaciones de Al con diferentes tamaños de grano y obtenidos por dif. Medios (35)

Es importante resaltar el hecho de que hoy en día se tienen plenamente desarrollados métodos para inferir un tamaño de grano tan pequeño que las velocidades de conformado empiezan a ser competitivas con los métodos convencionales en lo que es tiempo (ver punto 1.4.2.1). En el primer mundo los

aluminios superplásticos son de los elementos más utilizados, su distribución se esquematiza muy bien mediante la siguiente figura:

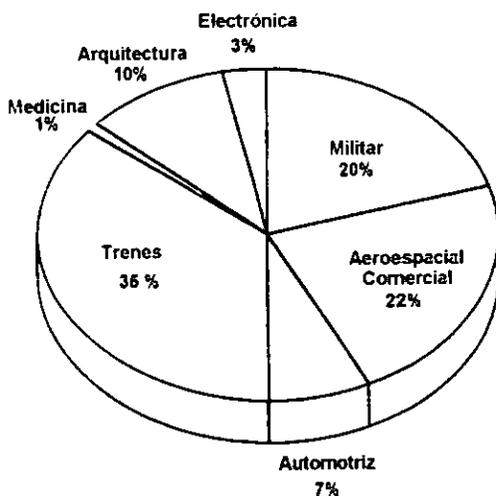


Fig 1.13.- Distribución actual de piezas de aluminio conformadas superplásticamente(36).

1.5.2 ALEACIONES DE COBRE

Se ha observado una gran superplasticidad en aleaciones comerciales de cobre (Cu-10Al-5Fe-5Ni) por parte de Higashi y colaboradores, los cuales han reportado elongaciones del 1000% con velocidades de 10^{-2} a 10^{-1} seg^{-1} y deformaciones sin falla del orden de 5500% con velocidades iniciales de 6×10^{-3} y temperatura de 800°C - incluso en 1990 reclamaban el record de 8000 % de deformación con esta misma aleación (37) -. Hay que mencionar que por lo regular estas aleaciones presentan crecimiento de grano durante el conformado y que son muy susceptibles a la cavitación. Además los procesos para inferir las propiedades superplásticas son complicados - laminado a 900 , recocido a 700 , laminado a 640 , laminado - sin embargo solventando esas situaciones se tienen buenos resultados (38).

1.5.3 ACEROS

Como se sabe el acero es el material más versátil, y en muchos contextos, el más importante de los materiales estructurales, no es de extrañar entonces que desde que empezó el estudio de la superplasticidad se realizaran numerosas investigaciones en torno a los aceros superplásticos, los cuales los podemos dividir en:

- Aleaciones hierro-carbono. Aquí se incluyen los aceros con más del 1% de carbono, aceros de ultra alto carbono (UHC) \approx 1.2-2.1 % de C y las fundiciones de hierro blanco $<$ 2.1 % de C.
- Aceros de baja y mediana aleación y
- Aceros inoxidables Dúplex (39).

Dos son los que se han comercializado principalmente, aquellos de ultra alto carbono patentado por Sherby en los 70's y los aceros inoxidables "microduplex α / β ". El proceso para la obtención de estos últimos es presentado por Walser and Ritter (40). Allí se presentan varios aceros inoxidables dúplex comercialmente disponibles y en los cuales después de un laminado en caliente se obtiene una estructura dúplex de grano fino adecuado para el CSP. Estudios previos de estos materiales muestran que se pueden obtener deformaciones en tracción mayores al 1000% de deformación y pueden ser conformados exitosamente por el método de hembra simple (39). Una de las marcas comerciales disponibles es la SuperDux64(Fe-25Cr-6.5Ni-3.2Mo). "En Europa hay numerosos aceros inoxidables disponibles comercialmente ya que han sido usados para obtener conformados superplásticos de lámina" (41).

1.5.4 ALEACIONES DE TITANIO

Las aleaciones de titanio se han desarrollado muy bien pues son las que más se ocupan en la industria aeroespacial. Estas aleaciones tienen la ventaja de presentar la microestructura necesaria para el CSP desde que se obtienen (son de los llamados superplásticos de primera generación), por lo que no se invierte tiempo y dinero para que tenga las propiedades requeridas. También se tiene al punto el proceso de soldadura por difusión para estas aleaciones y esto presenta grandes ventajas para su conformado (ver CSP y soldadura por difusión en el siguiente capítulo). Actualmente de estas aleaciones la más utilizada es la Ti 6/4 (Ti-6Al-4V) aunque tiene su competencia en Asia con la SP700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo) y se tienen estudiadas otras como la Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo y la Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si; es de esperarse que se sigan desarrollando

aleaciones de Ti debido a la gran aplicación aeroespacial que presentan y al gran ahorro de material obtenido con este proceso.

1.5.5 ALEACIONES DE NIQUEL

A finales de los 60's se empezaron a desarrollar estas aleaciones, y en general podemos decir que hay de dos tipos, aquellas producidas por procesos convencionales de fundición y posteriores termomaquinados y aquellos que son fabricados por metalurgia de polvos (42). Comercialmente se maneja la llamada "INCONEL 718" que presenta una "m" de 0.7-0.9 lo que le permite lograr grandes deformaciones (43).

1.5.6 ALEACIONES EUTECTICAS Y EUTECTOIDES.

Aquí se engloban las llamadas de laboratorio, de las cuales podemos mencionar las siguientes: (44)

ALEACIÓN	T _c en cent.	RAP-DEF (1/min)	"m"	% de def.
Mg-33Al	350 - 400	0.6 - 60	0.6 - 0.8	- 2100
Pb-62Sn	20 - 100	-	0.5 - 0.7	- 4850
Bi-44Sn	30	-	-	- 1950
Zn-22Al	200 - 250	0.1 - 10	0.4 - 0.66	500 - 2900
Ag-28Cu	650 - 730	0.025	-	500

De las aleaciones anteriores la que ha salido al mundo comercial es la Zn-22Al que como se verá en el siguiente punto fue de las primeras en comercializarse.

1.6 LA COMERCIALIZACIÓN EN EL PRIMER MUNDO

Parece ser que los primeros en ocupar de una manera comercial el fenómeno fueron los estadounidenses pues se tienen datos que revelan que la transnacional IBM fabricaba las coberturas exteriores de aparatos como medidores de viscosidad e instrumentos de medición en la aleación Zn-20Al a mediados de los 60's e incluso se pensaba utilizar en la industria automotriz desde

aquel entonces, de hecho la aleación Zn-Al se comercializaba con la marca registrada "Prestal"⁽⁴⁵⁾.

Desde 1973 aleaciones de aluminio han sido usadas para conformarse superplásticamente en forma comercial, de hecho miles de piezas han sido producidas con Supral 2004 tanto por Superform Metals (compañía inglesa ubicada en Worchester) como por Superform USA Inc. (en California) incluso se han utilizado aleaciones del tipo 7475 SPF y últimamente aleaciones de aluminio-litio como la 8090 SPF la cual fue utilizada por primera vez en 1982 y desde 1987 se encuentra en producción comercial; la compañía suiza Swiss Aluminium Ltd (Aluisse) produce la aleación de aluminio 5083 y la comercializa como FORMALL 545 (46) desde finales de los 80's. Como se ve en los últimos 25 años se han estudiado aleaciones de aluminio como aleaciones con mucho potencial superplástico.

En 1994 Barnes (47) presenta un cuadro (fig. 1.14) en donde se resumen las aleaciones de aluminio que utiliza su compañía (Superform USA), hay que aclarar que dos de ellas (la 2004 y la 5083) son las más usadas, casi el 95% de la producción de la empresa se realiza con éstas.

Aleación	Composición	0.2%PS MPa	UTS MPa	Módulo GPa	Densidad Mgm-3
2004	Al-6%Cu-0.4%Zr	300	420	74	2.83
2090	Al-2.5%Cu-2.3%Li-0.1Zr	340	450	79	2.57
2095	Al-4.7%Cu-0.37%Mg-1.3%Li-0.4%Ag-1.4%Zr	585	620	78	2.7
5083	Al-4.5%Mg-1%Cr	150	30	72	2.67
7475	Al-5.7%Zr-2.3%Mg-1.5%Cu-2%Cr	500	550	70	2.8
8090	Al-2.4%Li-1.2%Cu-0.6%Mg-0.1Zr	350	450	78	2.55

Fig. 1.14 Composición y propiedades típicas de aleaciones superplásticas de Al actualmente en uso.

Por otra parte los Rusos tienen industria superplástica de primer nivel, aunque no reportan muchas aplicaciones se sabe que la explotan pues desde 1971 venden souvenirs conformados por éste método (48) (además de que son los que más tiempo llevan estudiando el fenómeno), en la figura 1.15 se

¹ Aquí hay que ver la veocidad el fenómeno lo empezaron a estudiar en el MIT (Backofen) a partir de la publicación de Underwood en 1952, en 1954 publica Backofen y en 1965 se están fabricando en IBM.

presentan las características de las más importantes aleaciones superplásticas Rusas.

Materia Registrada Rusia	Aleación	Forma	UTS a 20°C MPa	Aleación Esencial	Tamaño de Grano micra μm	T ₀₂₀ °C	Razón de Deformación ϵ^1	Esfuerzo de Flujo MPa	Deformación Total %
LSA22	Zn-Al	TMT	300	SP2	0.7	250 250	$1 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^3$	13 4	2400 2000
СПА-1	Al-Ce-S	Usual	100	-	0.6 and 1.2	550	$1 \cdot 10^3$	4	1000
АМФ	Al-Mg-Mn-Cr	Usual	250	5033	8	550	$1 \cdot 10^3$	2	600
1970	Al-Zn-Mg-Mn-Sc-Zr	Usual	500	-	-	475	$8 \cdot 10^3$	12	500
01997	Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr	Usual	500	-	-	475	$1 \cdot 10^3$	8	700
1420	Al-Mg-Li-Zr	TMT	420	-	8	470	$1 \cdot 10^4$	3	350
Д19	Al-Cu-Mg-Mn	TMT	450	-	6	490	$2 \cdot 10^4$	2	900
Д20	Al-Cu-Mn-Ti	TMT	450	203*	2	530	$6 \cdot 10^4$	2	700
BT6	Ti-Al-V	TMT	1000	Ti-6Al-4V	2 (a) 1 (B)	900 800	$3 \cdot 10^3$ $1 \cdot 10^3$	7 14	1000 800
BT6	Ti-Al-V-Mo	TMT	1000	-	1	850	$1 \cdot 10^2$	15	1000
ДНМАЛ59-1-1	Cu-Zn-Fe-Mn	TMT	400	-	4	560	$1 \cdot 10^3$	8	500
О3Х26Н3Т	Fe-Cr-Ni-Ti	TMT	700	НТ44	2	950	$1 \cdot 10^3$	10	800

Fig 1.15 Algunas de las aleaciones usadas en Rusia para CSP.

Y no hay que olvidar a los orientales, desde 1980 Japón y China se pusieron de acuerdo para impulsar el desarrollo de la superplasticidad conjuntamente, ya que el mundo occidental les llevaba gran ventaja trabajando unidos se podrían actualizar, y les funcionó, en 1989 nace una compañía japonesa (R&D, NAS/Murdock, Inc.) dedicada exclusivamente a la producción comercial de piezas conformadas superplasticamente y para 1994 Kawazaki y Mitsubishi son catalogadas como las industrias con las técnicas más avanzadas en el campo del conformado superplástico (49). Kawasaki ha desarrollado productos para satélites en Ti-6Al-4V; Mitsubishi ha utilizado otra aleación de titanio que le llaman SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo) la cual es comercializada mundialmente por Nipón Kokan; Sky Aluminum produce aleaciones superplásticas de aluminio y aunque no tienen comercializada la familia 2000 tienen a la venta la A5083-SPF y algunas de la serie 7000; Nippon Yakin Kogyo comercializa aceros inoxidables superplásticos (los llamados dúplex) con los que se logran deformaciones de hasta un 2.500 %, hoy en día la aleación SuperDux64 (Fe-25Cr-6.5Ni-3.2Mo con otros elementos) se encuentra en uso. La figura 1.16 presenta las proporciones de uso de estas aleaciones en el Japón y en la 1.17 se dividen los productos obtenidos de superdux64 con CSP por categorías industriales (50).

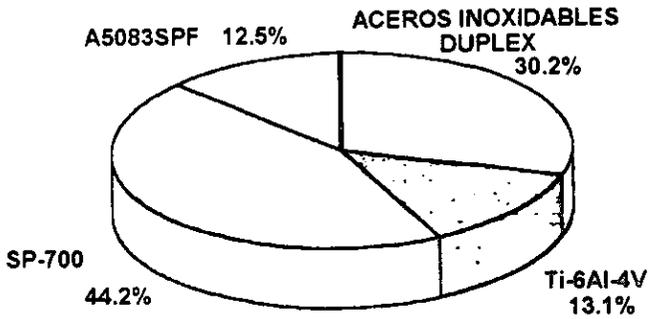


fig.1.16 Materiales superplástico usados en Japón

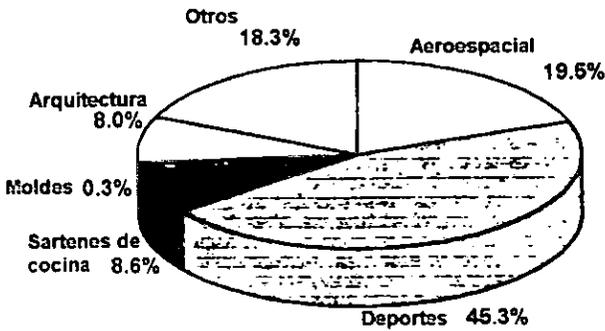


Fig.1 17 Usos de superdux64 por categorías en Japón

Los Franceses son otros que tienen grandes desarrollos en el tema, es bien sabido que Francia es líder en la construcción de aviones militares y la

compañía AVIONS MARCEL DASSAULT desde 1978 utiliza procesos de conformado superplástico en conjunto con procesos de soldadura por difusión para varias piezas de los mismos (51). Respecto a las piezas utilizadas en aviones Chandra presenta la figura 1.18 en el simposium de 1997.

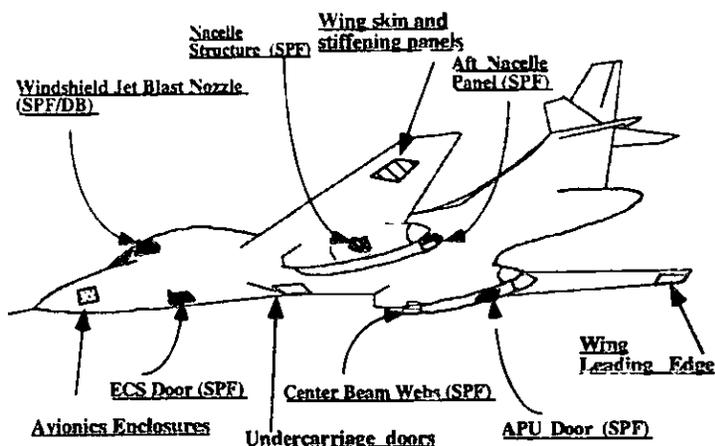


Fig. 1.18 Piezas conformadas superplásticamente actualmente en uso en aviones de combate (52).

Por otra parte se sabe que países como Alemania cuentan con industrias que explotan el fenómeno de la superplasticidad, pero no han publicado que aleaciones fabrican, lo que si es un hecho es que tienen muy bien estudiado el conformado superplástico para usarse en conjunto con la soldadura por difusión (ver cap.II.4).

Actualmente la superplasticidad empieza a entrar en mercados tan diversos como la industria aerocomercial, automotriz, de trenes e incluso en arquitectura y en aparatos médicos y electrónicos (52).

Como se ve hoy en día se tienen desarrolladas varias aleaciones y poco a poco empiezan a ser más accesibles, incluso los procesos necesarios para inferirle las características superplásticas a diferentes aleaciones es relativamente sencillo de determinar. Una vez que se tiene la materia prima hay que darle forma, para esto se han desarrollado varios procesos de conformado superplástico, los más relevantes tanto por la aplicación de conceptos como por su explotación comercial se presentan en el siguiente capítulo.

II LOS PROCESOS DE CONFORMADO SUPERPLÁSTICO

II.1 GENERALIDADES

La transformación del fenómeno de la superplasticidad en una técnica de manufactura se ha llevado a cabo ampliamente en los últimos 30 años. Esto es muy comprensible dada la posibilidad de producir estructuras muy complejas en un solo paso, lo que representa ventajas muy bien conocidas. Hay que tener en cuenta que hoy en día se tienen perspectivas que abren el campo de la superplasticidad a nuevos materiales y por lo tanto a un sin fin de nuevos productos. Así a lo largo de estas tres últimas décadas se han desarrollado varios métodos de CSP. Estos se pueden clasificar en procesos que se derivan de procesos termoplásticos; aquellos derivados de procesos convencionales para manufactura de metales y algunos otros que han sido diseñados para aleaciones superplásticas, los más importantes se presentan en este capítulo, sin embargo vale la pena hacer algunas consideraciones previas ya que hay ciertos aspectos que son válidos para todos los procesos de conformado de lámina en general.

Se debe tener siempre presente que el conformado superplástico es una operación que se realiza en caliente, que la temperatura depende del material (0.5 de la temperatura de fusión en escala absoluta) y que los valores de deformación máxima son función tanto del tamaño de grano como de la rapidez de deformación (ver capítulo I). Como se detalla adelante el conformado se realiza logrando que el material tome la forma interna de la matriz. Gases como el argón son adecuados para utilizarse como herramienta de conformado ya que simultáneamente protege la superficie de posible contaminación provocada por la atmósfera y/o presencia de humedad.

Las condiciones óptimas para el CSP son determinadas mediante varias pruebas a diferentes rapidezces de deformación, con los resultados de éstas se obtiene la correlación entre el valor de m (factor determinante del fenómeno) y la rapidez de deformación. La rapidez de deformación que se tiene con el valor máximo de m corresponde a la rapidez de deformación óptima y es utilizada en otra serie de pruebas en donde se obtienen unas curvas presión - tiempo ($P-t$) las cuales nos sirven para determinar la presión adecuada con la que se obtiene un diseño del proceso que involucre el menor tiempo posible. Cálculos con métodos de elemento finito se encuentran en desarrollo para sustentar las predicciones del ciclo óptimo de $P-t$ el cual asegure una velocidad de deformación constante en el rango del valor óptimo de m en las áreas críticas para cada parte(53).

Prensas especiales para conformado en caliente son usadas para el CSP, éstas cumplen con una doble tarea, por un lado calientan la lámina y los dados a la temperatura deseada mientras que por el otro aseguran que el gas presione las dos mitades del dado simultáneamente sin que la presión escape. En los últimos años se han desarrollado prensas para el CSP con áreas de trabajo de

200cm x 300cm y que cuentan con equipos periféricos sofisticados como cuartos de recalentamiento y preparación de herramienta así como unidades de control con microprocesadores. La primera de estas máquinas se usó comercialmente en 1974 (54) y los diseños no se encuentran disponibles.

II.2 CONFORMADO HIDRÁULICO

Ya desde mediados de los 60's Backofen et al. (13) demostraron la gran ventaja que se obtiene al adaptar procesos comúnmente utilizados para plásticos en el conformado de aleaciones superplásticas, en particular estableció un experimento en el cual se lograba inflar una lámina superplástica (Zn-Al en el eutéctico) logrando una altura de deformación mayor al diámetro original. Este es uno de los procesos más simples y consiste en fijar una lámina a un molde circular a donde se pueda aplicar presión hidrostática de un lado (fig. 2.1).

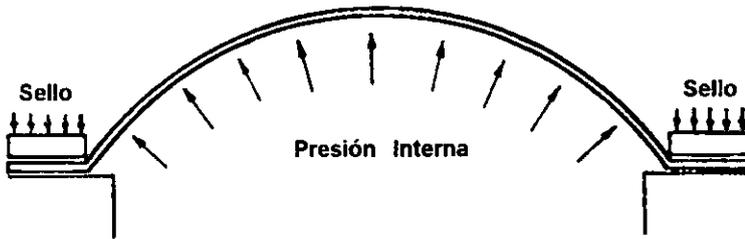


Fig. 2.1 Representación esquemática del conformado hidráulico

Esta presión se puede obtener de alguna prensa hidráulica, un compresor o simplemente creando vacío de un lado y dejando que la presión atmosférica trabaje desde el otro. Se debe tomar en cuenta que no intervienen los mismos factores si se trabaja de manera que el conformado se realice dentro del molde que si lo inflamos libremente, ya que en uno se presenta el fenómeno de fricción lo que tiene como consecuencia que tengamos variaciones en el espesor, al inflarlo no hay fricción por lo que la presión al carecer de fuerzas contrarias presenta un esfuerzo más uniformemente distribuido con lo que se obtienen espesores más parejos, cabe hacer la aclaración que este método es plenamente experimental y sirve para caracterizar las diferentes aleaciones. Para cada aleación se tienen velocidades de deformación particulares (para obtener comportamientos superplásticos óptimos) la cual puede ser determinada con ayuda de este método, también se utiliza para identificar los problemas a vencer para poderlo llevar a niveles industriales, en particular se debe buscar una velocidad de deformación que permita el comportamiento superplástico de la aleación al menor tiempo posible. Sin embargo "mientras el inflado libre de una lámina puede ser usado para medir el comportamiento del material un

acercamiento más correcto a la evaluación del conformado de lámina de aleaciones superplásticas es usar expansión en una cavidad cerrada" (55).

II.3 TERMOFORMADO DE LAMINA

En el conformado de lámina la orilla de la misma está invariablemente detenida de algo que provee al mismo tiempo un sello para poder meter gas a presión o realizar vacío, para lograr esto se tiene que fijar y sellar toda la orilla, lo que provoca un sistema de esfuerzos que varía a lo largo de la lámina a la hora de conformarse y eso produce diferencias indeseables en el espesor final de la lámina, en las secciones II.3.4.,5.,6 se analizan las soluciones a este problema inherente a todos los conformados superplásticos de lámina.

Una gran ventaja de este proceso es que permite la realización de estructuras complejas con un alto grado de deformación en una sola operación, si se compara con el proceso convencional de producción para una pieza equivalente tendríamos una diferencia de algunos pasos los cuales requerirían recocidos intermedios o en su defecto tendrían que ser varias piezas que requieren ser unidas con procesos que no son nada económicos y que además consumen tiempo. En la figura 2.2 se muestran diferentes tipos de estructura de lámina sencilla en donde el conformado superplástico es usado con ventajas económicas.



Fig.2.2 Partes CSP típicas en Ti-Al-V y en AA7475 (56)

En estas piezas "además de reducir el número de partes por configuración integral el conformado superplástico ofrece ventajas adicionales tales como una extrema precisión en el formado sin efectos de recuperación elástica ("springback"), fácil variación del espesor de la pared y de otros detalles durante el desarrollo del prototipo, y la ausencia de esfuerzos residuales" (56). Como se verá adelante la aplicación del CSP se ha visto incrementado al ser usado en combinación con métodos especiales de soldadura (principalmente la

soldadura por difusión -SD en adelante-) con lo que se incrementan tanto la flexibilidad de diseño como el número de partes que pueden ser fabricadas por este método.

II.3.1 CONFORMADO c/HEMBRA SIMPLE

De los métodos de CSP éste es uno de los más sencillos y consiste en que una lámina tome la forma del molde hembra (fig.2.3), la presión puede ser proporcionada por cualquier medio e incluso se puede hacer vacío y dejar que la presión que trabaje sea la atmosférica.

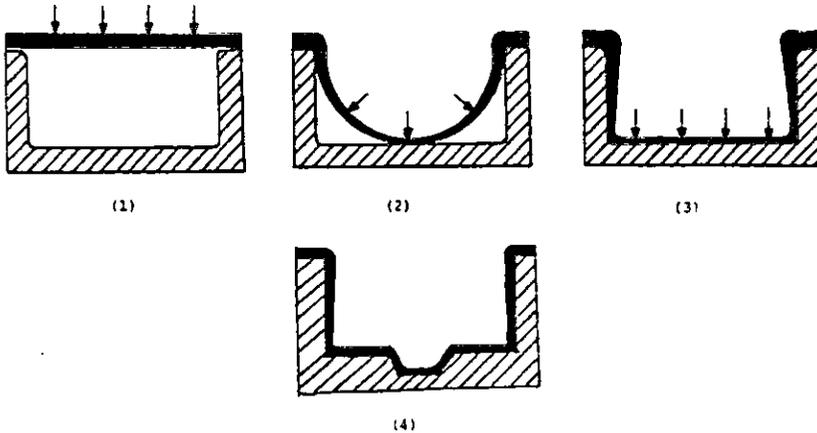


Fig 2.3 Representación esquemática del proceso de Conformado c/Hembra Simple.

Para que el material se deforme correctamente hay que empalmarlo y fijarlo bien en toda la periferia (1), además de tener en cuenta ciertos fenómenos: al inicio de la deformación ésta se concentra en el centro de la pieza por lo que ahí se tiene un mayor adelgazamiento (evidentemente también ahí se concentran los esfuerzos); al llegar al fondo y entrar en contacto con el molde la fricción y la presión evita que esa parte se siga deformando (2); las partes que se encuentran libres de contacto son ahora las que se deforman lo que provoca un espesor más uniforme al final (3); como las esquinas del molde siempre son las últimas en llenarse podemos esperar que las mayores deformaciones se presenten en esos puntos. Así: "los factores limitantes en este proceso son la razón grueso-profundidad y el radio de las esquinas. Por lo general se prefiere esta técnica a cualquier otra cuando la razón grueso-profundidad es baja o

cuando la superficie convexa final de la pieza requiera una forma específica, sin atender tanto al espesor"(57).

Por otra parte si se requiere incrementar la rigidez de la pieza se pueden incorporar partes más profundas o algún tipo de muesca en el molde con mucha facilidad (fig. 2.3-(4)), la lámina al tomar esas formas va a presentar una mayor rigidez la cual es lograda con una diferencia mínima de energía. Probablemente éste sea el método de CSP más utilizado. Para llevar el método a niveles industriales se desarrolló un ciclo de cuatro pasos (58) para láminas precalentadas el cual se presenta a continuación:

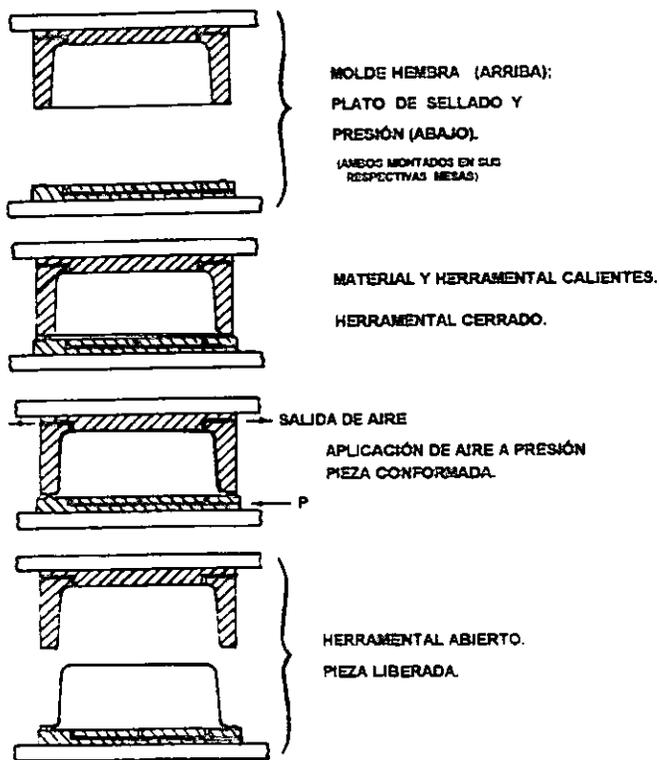


Fig. 2.4 -CSP de una lámina o: gándola a tomar la forma de: molde hembra con gas a presión (58)

II.3.2 CONFORMADO c/HEMBRA COMPLEJA

Aquí el objetivo es que la lámina tome la forma del molde hembra en el cual previamente se colocó uno o varios herramientas machos (en donde se maquinó el negativo del detalle que nos interesa obtener en nuestra pieza final). Lo que sucede es que la lámina baja, entra en contacto con el dado y se deja de adelgazar en esa área, entonces se aplica una presión mayor que se deja unos momentos y con la cual el material toma la forma de los detalles contenidos en el dado (fig. 2.5). En este proceso se obtiene una distribución de espesores relativamente uniforme en la superficie del dado macho debido a los fenómenos de fricción descritos anteriormente.

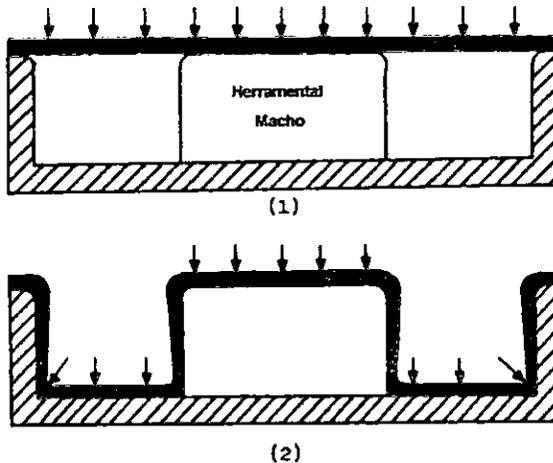


Fig.2.5 Diagrama esquemático del proceso de conformado c/Hembra Compleja .

En este proceso se pueden poner varios dados pequeños con lo que se conforman varias piezas al mismo tiempo, estas deben ser cortadas, pero aún así conviene debido al gran ahorro en costos que se obtiene. Sobre el uso de este método tenemos que " el conformado con hembra compleja se prefiere sobre el de hembra simple cuando las tolerancias dimensionales de la superficie cóncava del componente terminado es importante" (59). También se puede aplicar este método para obtener piezas más complejas o con geometrías específicas como lo ilustra el ciclo de cuatro partes que se presenta a continuación:

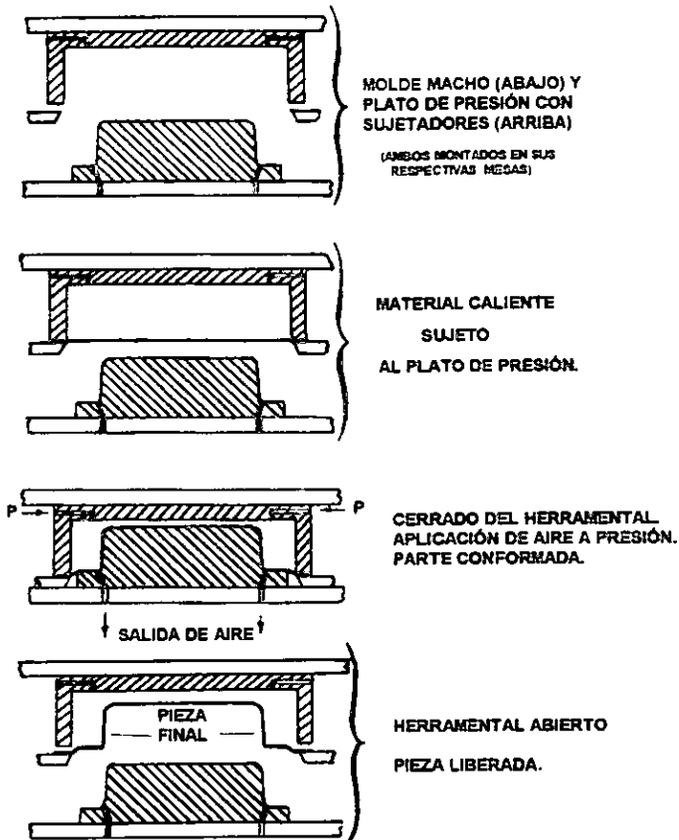


Fig.2.6 Diagrama esquematizado completo del proceso de CSP para un Conformado c/Hembra Compleja (60).

II.3.3 CONFORMADO SUPERPLÁSTICO REVERSIBLE (Reverse Bulging o Bilowing)

Este proceso consiste en inflar la lámina hacia afuera del molde hembra en donde se conformará finalmente (fig. 2.7) para luego invertir la presión de conformado obligando a la lámina a plegarse sobre si misma y así tomar la forma deseada. Al inflar la lámina la deformación se concentra en el polo del domo formado, al ser invertida la presión la lámina baja y el polo mencionado es el que

primero entra en contacto con el molde, esto provoca que la deformación requerida en el material para obtener la pieza se lleve a cabo en la parte de la periferia con lo que se logra una uniformidad en el espesor del producto final que no se podría igualar con el proceso de hembra simple.

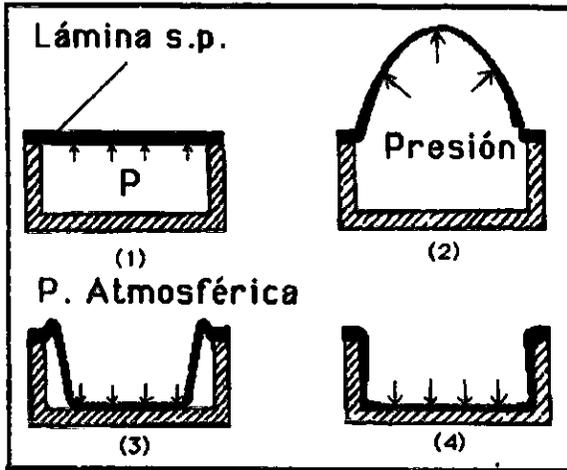


Fig.2.7 Proceso de CSP Reversible.

En lo que respecta a la altura de inflado inicial se recomienda que no sea mayor en un diez por ciento que la altura final de conformado ya que "si la altura de la burbuja es muy grande entonces es probable que se desarrollen pliegues o arrugas en el producto terminado" (61).

Estos procesos involucran el adelgazamiento de la lámina en alguna parte específica de la misma, así en el conformado con hembra simple el adelgazamiento tiene lugar en la parte central de la lámina (II.3.1) mientras que en el de hembra compleja (II.3.2) se presenta en el espacio entre los sujetadores y el macho utilizado para obtener la forma. Como es de suponer el poder controlar las variaciones en el espesor es de mucha importancia, a este respecto las "industrias que trabajan con plástico han desarrollado cierto número de sofisticadas modificaciones de los dos procesos básicos encaminados a lograr este control" (58) los cuales son descritos a continuación:

II.3.4 APLICACIÓN DIRECTA DE PRESIÓN

La aplicación directa de presión es utilizada para incrementar la transferencia de calor y con eso aumentar el valor de la deformación de las regiones cercanas a donde está fijo el material, así, el material que normalmente conserva espesores mayores es preadegazado (60).

II.3.5 CONFORMADO ASISTIDO POR PISTÓN

Con un pistón auxiliar se puede lograr un preadegazamiento de regiones específicas de la lámina a conformar como se ilustra en la figura 2.8 .

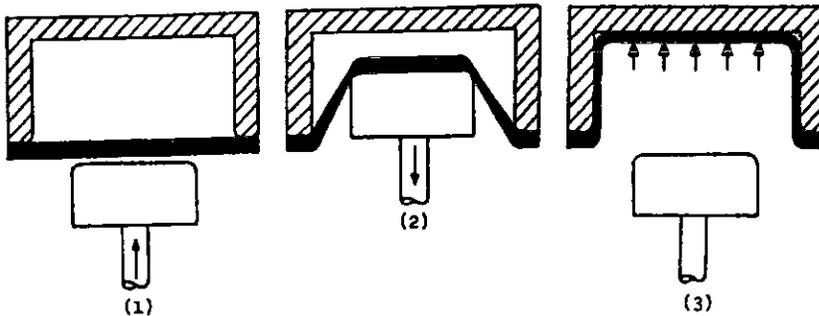


Fig.2.8 Conformado Asistido por Pistón

El pistón se mueve pasando el plano original de conformado (1) con lo que se tiene un adelgazamiento de las partes libres de la lámina ya que el material que está en contacto con el pistón conserva el espesor original debido a las fuerzas de fricción que se presentan entre la lámina y el pistón y al mismo tiempo transfieren la deformación a las partes libres mencionadas (2). Después de realizado este pre-estiramiento el pistón es retirado y el conformado es terminado por presión de gas o por vacío como en los métodos antes descritos (3). En la práctica cuando la geometría de la pieza es compleja se tiene que realizar un procedimiento de prueba y error para balancear la distribución de deformación. Una variante de este método consiste en inflar primero la lámina para después completar la operación de conformado (fig. 2.9).

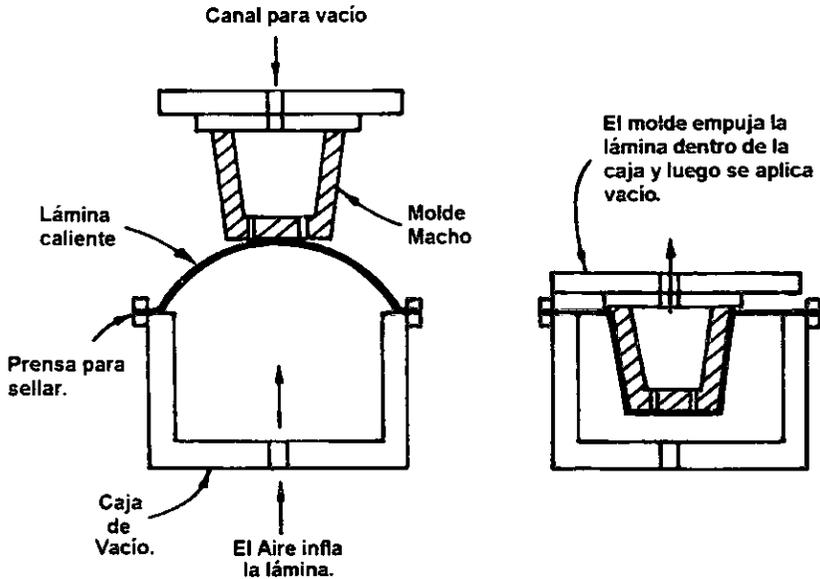


Fig. 2.9 CSP asistido c/ pistón con un pre-inflado.

Con este método se pueden controlar tanto el espesor del fondo de la pieza como el adelgazamiento de las paredes esto mediante el control de la profundidad a la que llega el pistón o de la altura de inflado en el primer paso (62).

II.3.6 CONFORMADO SUPERPLÁSTICO CON MANDRIL

En este método el pistón o herramienta utilizado tiene la forma del negativo de la pieza deseada, primeramente la lámina es termoformada convencionalmente expandiéndola dentro de un molde hembra para luego darle la forma final ya sea por vacío creado en el herramental o por presión de gas proporcionado desde el molde hembra figura 2.10 .

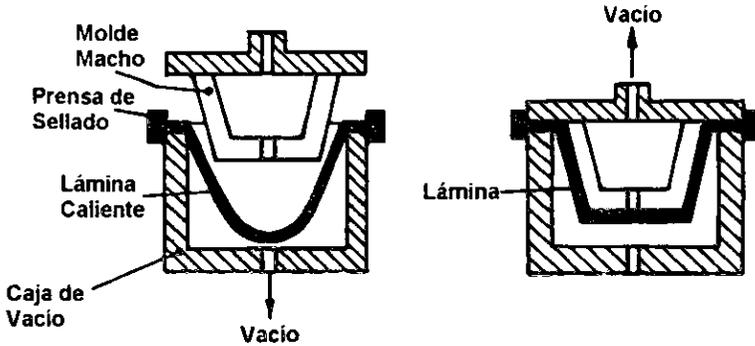


Fig.2.10 CPF Con Mandril y con vacío.

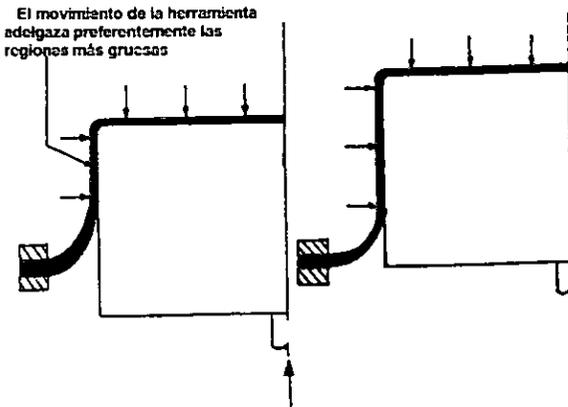


Fig. 2.11 Variación en el espesor al implementar el Mandril (63).

Cuando el movimiento del pistón continúa y se suministra presión en sentido inverso al movimiento del mismo una combinación de fricción y presión de conformado fijan la lámina en contacto con el pistón y evita deformaciones posteriores en esta zona. Cuando el pistón se sigue moviendo la deformación se presenta entonces al material que relativamente no se ha deformado a la orilla de donde está fijo (fig. 2.11).

Todos estos procesos de termoformado de lámina presentan una ventaja adicional, y ésta radica en que se pueden obtener piezas con pestañas de geometría diversa en la parte superior de la pieza (figura 2.12) o simplemente

lograr círculos con la boca de menor diámetro.

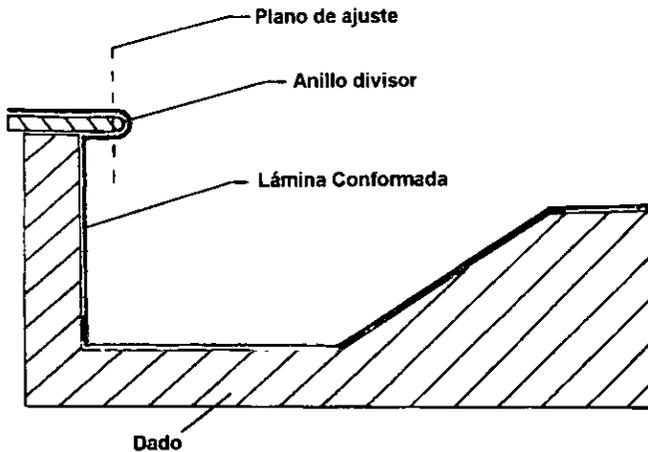


Fig.2.12 Implementación de geometrías diferentes en la periferia de la pieza en el CSP de lámina.

Para esto lo que se hace es poner otro anillo encima del dado original con el diámetro requerido (o el detalle que se pretenda) sobre el cual se fija la lámina a deformar, este anillo debe estar diseñado de forma tal que pueda ser removido sin dificultad (dos medios anillos serían suficientes) (64).

Aunque todos los procesos anteriores han sido probados en laboratorio, solo unos pocos se desarrollaron industrialmente en los 60's de hecho el fenómeno encontró su uso más común en los 70's cuando se empezó a usar en combinación con la soldadura por difusión, para los 80's las investigaciones dieron frutos explotándose muchos materiales superplásticos; actualmente los esfuerzos de todos se enfocan a diversificar aplicaciones industriales.

II.3.7 CSP CON CONTROL DE FLUJO DE GAS

Recientemente (la publicación es de 97) la compañía Mc Donnell Douglas Corporation (California), patentó un nuevo proceso de conformado superplástico de lámina, el cual denominó "proceso de conformado superplástico de masa de gas" (gass mass superplastic forming process-GMF-), este proceso tiene dos versiones y ambas se utilizan tanto para conformar lámina como para ser usado en combinación con la soldadura por difusión. Los procesos de CSP de lámina ya fueron tratados (puntos II.3.1 al .6) y los de soldadura por difusión -SD- se tratarán en el siguiente punto (II.4) por lo que solo mencionamos los adelantos.

Este nuevo concepto le da mayor simplicidad y viabilidad a los procesos de CSP y de SD/CSP, aquí el objetivo es medir y regular el flujo de gas para conformado, no se requieren los cálculos para obtener el ciclo de presión ni tampoco herramientas especiales. Dado que el ciclo de presión no es calculado, la necesidad de contar con datos del material superplástico, de temperatura y de control del adelgazamiento del material se suprime (65).

Existen dos métodos de CSP de masa de gas (CSP-MG) uno designado masa constante dentro -MCD- y otro masa constante fuera -MCF- y ambos se ilustran a continuación:

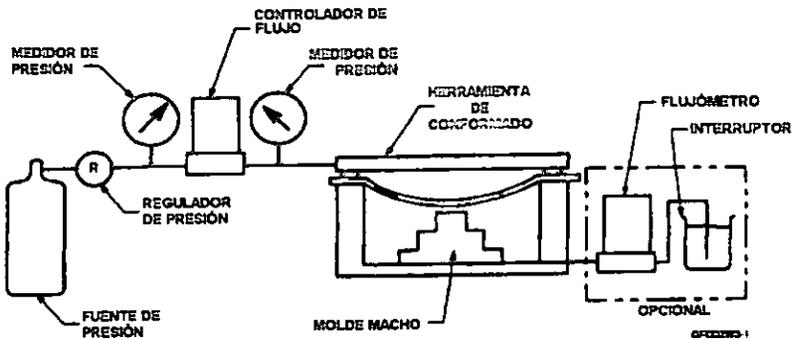


Fig.2.13 Diagrama Esquemático de un sistema de MCD para CSP

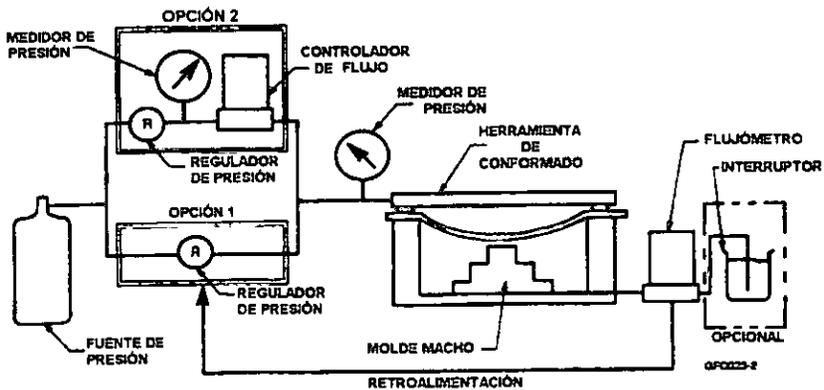


Fig.2.14.-Diagrama Esquemático de un sistema de MCF para CSP

En el proceso de MCD el objetivo es meter cierta cantidad de masa de gas con la ayuda de un controlador de flujo másico, con ello la presión va variando conforme se va conformando la pieza, y así se va autoregulando; el de MCF utiliza una retroalimentación en tiempo real para mantener una rapidez de

flujo constante de gas sin presurizar desde la cavidad del dado al irse desplazando la pieza conformada. "El CSP-MG es un proceso auto-regulable y responde naturalmente a los cambios geométricos que ocurren en la pieza al irse formando evitando tanto la ruptura de la parte como la aceleración del conformado", cabe hacer la aclaración de que en ambos procesos para que se conformen los últimos pequeños espacios y esquinas se requiere incrementar la presión por unos momentos al final del conformado (65).

II.4 CONFORMADO SUPERPLÁSTICO Y SOLDADURA POR DIFUSIÓN

La flexibilidad en el diseño que se obtiene al utilizar la combinación de CSP y técnicas especiales de unión es muy grande y se puede ilustrar muy bien mediante la siguiente figura:

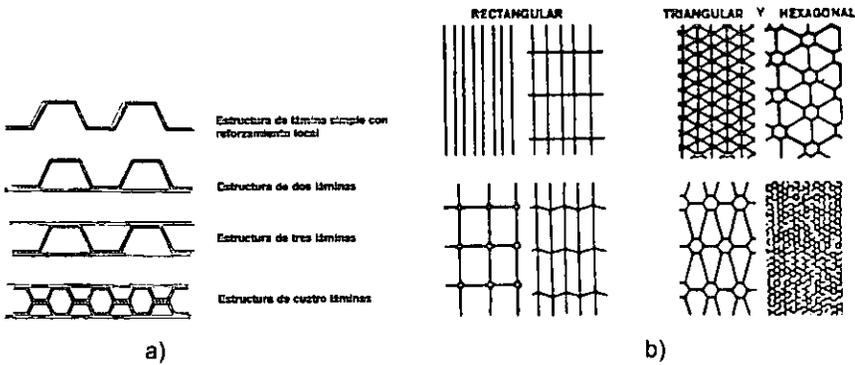


Fig.2.15 a)Flexibilidad en el diseño al poder utilizar piezas de 1,2,3 o hasta 4 láminas en el CSP/SD;
 b)Diferentes tipos de patrones para la configuración central.

El reforzamiento de estructuras de láminas simples permite tanto superar el problema que causa el adelgazamiento en áreas de alta deformación como utilizar los componentes en condiciones de esfuerzo más grandes. La mayoría de las estructuras de 2 láminas son piezas rígidas que normalmente se fabrican realizando la unión antes del conformado. Las estructuras de tres o más láminas permiten diseñar y fabricar estructuras rígidas y ligeras, el conjunto central puede ser configurado en varias formas y maneras diferentes con lo que se pueden diseñar productos para cargas específicas. La unión se puede realizar antes o después del conformado dependiendo del tipo de parte: "En cualquier caso el realizar la unión antes del conformado superplástico trae como resultado uniones mucho mejores y la unión después del conformado superplástico hace que se demande una fuerte calidad de la atmósfera ya que cualquier oxidación o rugosidad degrada la fuerza de la unión" (66).

II.4.1 SOLDADURA POR DIFUSIÓN

Normalmente la técnica empleada para realizar la unión es la soldadura por difusión (SD en adelante) la cual consiste en unir las piezas con una presión que no alcance a deformar plásticamente a los materiales y calentarlas a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión para inducir el proceso de difusión (movimiento de los átomos en un material), poco a poco los átomos van emigrando y llenando los espacios existentes entre las dos piezas hasta que al cabo de cierto tiempo se tiene una unión con una excelente resistencia, como si fuera una sola pieza y no dos unidas, cumpliendo con las propiedades del material base.

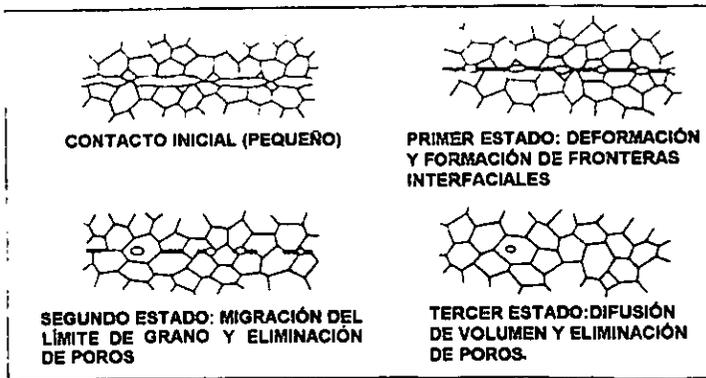


Fig. 2.16.- (0) inicialmente el área de contacto es pequeña, (1) la aplicación de presión deforma la superficie, incrementando el área de unión, (2) la difusión de límite de grano permite a los huecos contraerse, (3) los huecos se rellenan al presentarse difusión volumétrica.

Aunque en realidad la calidad de la soldadura por difusión solo puede ser medida comparando las características de las fracturas en la unión con la fractura de material base sometido a un tratamiento térmico que simule el proceso, el interés general se encuentra en pruebas no destructivas a las que puedan ser sometidas todas las piezas por lo que en las investigaciones de esta década se han desarrollado principalmente pruebas con ultrasonido incluyendo métodos ultrasónicos convencionales, espectroscopía ultrasónica y ultrasonido de alta frecuencia (67).

Este método de unión es muy utilizado en aleaciones de titanio (Ti-6Al-4V) y para este material el esfuerzo de corte del material base y de la unión es el mismo (575 MPa), en el aluminio se presentan ciertos problemas pero las uniones tienen un esfuerzo de corte de aproximadamente el 50% del material

base (150-170 MPa). Si se compara éstos últimos con métodos de unión convencionales se verá claramente la diferencia, por ejemplo una unión por remachado típico presenta un esfuerzo de corte del orden de 10 MPa, y unión por cinta adhesiva se encuentra entre los 20 y 40 MPa (68).

Sin embargo en algunas aplicaciones no se requiere que la unión tenga las características del metal base para lo cual se han desarrollado técnicas de soldadura con material de aporte para sustituir a la soldadura por difusión. La ventaja de este método radica en que se puede realizar la unión en minutos en lugar de horas, además de poder unir diferentes materiales (69).

Cuando las piezas a unir son aleaciones de aluminio se presenta un problema extra, la capa de óxido que se forma en la superficie se mantiene incluso a altas temperaturas, lo que dificulta la unión, actualmente se encuentran en desarrollo diferentes técnicas para superar el problema, se han tenido buenos resultados poniendo capas intermedias de zinc u otro elemento que destruya la capa de óxido, proteja la superficie del aluminio, tenga un bajo punto de fusión y sea relativamente soluble en la matriz de aluminio (70).

Otra familia de aleaciones con la que se han realizado estudios de SD con éxito son las de base níquel, después de las de titanio y aluminio son probablemente las más importantes, de hecho se ha demostrado que aleaciones de base níquel- como la Ni-718 - puede ser soldada por difusión y conformada superplásticamente de una manera similar a como se hace comercialmente con el titanio (71).

Acerca del titanio se han realizado experimentos para soldar por difusión la aleación Ti-6Al-4V con algunas otras aleaciones avanzadas de titanio obteniéndose resultados positivos y procesos bien caracterizados(72).

II.4.2 LA INTEGRACIÓN DE LOS PROCESOS

Hoy por hoy lo que se usa industrialmente es la soldadura por difusión en conjunto con el conformado superplástico ya que con estos procesos se pueden obtener estructuras celulares de alta rigidez, a un bajo costo y con bajo peso, esto coloca al proceso como el idóneo para la industria aeroespacial. Aquí como en el proceso de CSP se hace uso de prensas especiales para trabajar en caliente, las cuales cumplen con dos tareas, elevar la temperatura del molde y la lámina (o paquete de láminas) a la temperatura de SD y/o de CSP y proveer la presión tanto para mantener los dados unidos y sin fugas como para el conformado mismo. Como se citó anteriormente existen dos versiones, en la primera la soldadura por difusión se realiza antes del conformado superplástico, en la segunda se realiza después, ambos se detallan a continuación.

II.4.2.1 SD/CSP & CSP/SD

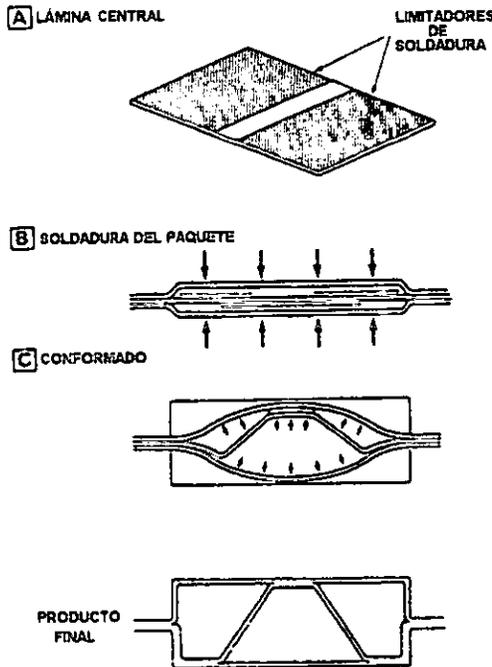


Fig. 2.17 Esquema de un proceso de SD-CSP para un arreglo de 3 láminas (73).

La figura anterior muestra un ejemplo del proceso SD/CSP para un emparedado de tres láminas. Las láminas están unidas en un paquete; la configuración central es determinada al preparar la superficie de la lámina central de tal manera que ésta tome la forma deseada a la hora del conformado, para esto es necesario determinar las zonas a unir, entre las partes que queremos se "inflen" se debe poner algo que evite dicha unión, de forma tal que al realizar la soldadura esta sólo se lleve a cabo en las partes de interés. Una forma de lograr esto es poner un material que evite que los átomos emigren y que después nos pueda ayudar a realizar el conformado, el papel por ejemplo ayuda a evitar la unión en partes determinadas (en donde se ponga) pero al tenerlo "dentro" del emparedado de láminas permite utilizarlo como herramienta de conformado, una vez realizada la soldadura se calienta lo suficiente para que el papel se queme, entonces se producen gases de combustión que dan la presión interna necesaria para el conformado, se acostumbra usar unas "tintas" especiales (con las que se pintan las partes que no deseamos se solden) las cuales han dado muy buenos resultados. En determinados materiales se deben dejar "ductos" en el

emparedado para poder aplicar gas a presión y con ello lograr el conformado. Ahora bien, el conformado por inflado puede ser realizado en un paso dentro de un ciclo de temperatura o en un proceso de dos pasos, si bien el proceso de un solo paso no requiere desensamble intermedio, el proceso de dos pasos ofrece ciertas ventajas (73):

- La presión para la soldadura por difusión puede ser proporcionada por otro medio (mecánico por ej.),
- la temperatura para soldar puede diferir de la temperatura de conformado,
- soldaduras de estado sólido pueden ser aplicadas aparte de que las uniones se pueden probar antes de intentar conformarlas,
- varios paquetes de lámina pueden ser unidos en una operación lo que tiene como consecuencia una disminución de costos.

Por su parte el proceso opuesto (CSP/SD) se ilustra a continuación:

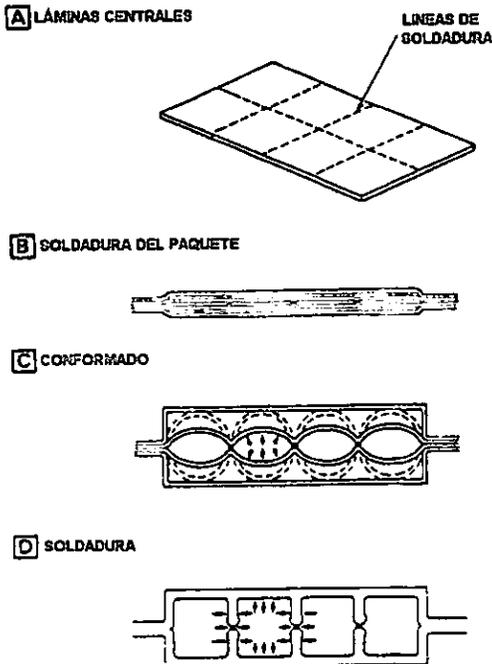


Fig. 2.18 esquema de un proceso de CSP-SD para una estructura de cuatro láminas (73)

De igual forma que en el proceso anterior la complejidad del arreglo interno depende de como se prepare la configuración central, la distribución de los espacios soldados y los no unidos determinarán la forma interna del conformado, en el ejemplo se tienen dos configuraciones centrales previamente preparadas que forman el paquete a conformar (B), éste se realiza proporcionando presión en medio de las cuatro láminas al mismo tiempo (C) y en el paso (D) se unen las dos por SD. Esta soldadura por difusión secundaria es mucho mas difícil de lograr que la primera (donde se forman las dos configuraciones centrales básicas), la presión solo puede ser proporcionada por medio de gas. La contaminación de las superficies a soldar durante el tiempo de conformado previo (C) deterioran la calidad de la unión.

Nuevamente, para poder mantener la velocidad de deformación en rangos aceptables del índice de sensibilidad a la rapidez de deformación (m) hay que ir optimizando los ciclos de P-t. En este sentido se realizan numerosos estudios para poder caracterizar los procesos con técnicas de elemento finito, empresas como la MARC Analysis Research Corporation tienen procedimientos de análisis que han dado buenos resultados, al respecto dicen: "La aplicación de análisis de elemento finito a los problemas de conformado de metales es muy complicado. El flujo del metal, la fricción entre el dado y la pieza, la generación y transferencia de calor y las propiedades microestructurales durante el flujo plástico son difíciles de predecir y analizar. Así, el uso de métodos de elemento finito es esencial para capturar los mecanismos de deformación superplástica. El uso de simulación por computadora puede predecir el adelgazamiento, tiempo y presión de conformado, las áreas que permiten deformación, aparte de que puede usarse de último momento para optimizar la configuración de partes antes de la producción" (74). Hoy en día se han desarrollado otros procesos (II.3.7) con los que esto se suprime, e incluso se fabrican paneles de 6 y 8 láminas como se ilustran a continuación (65):

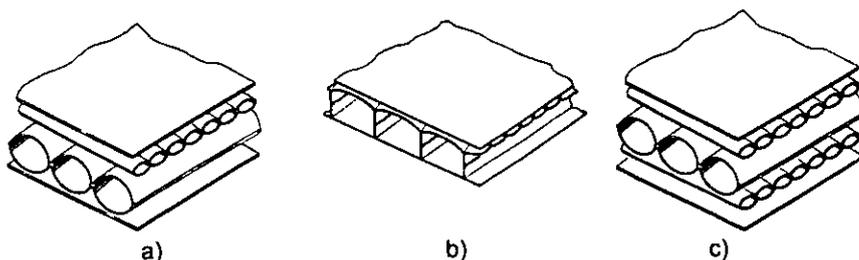
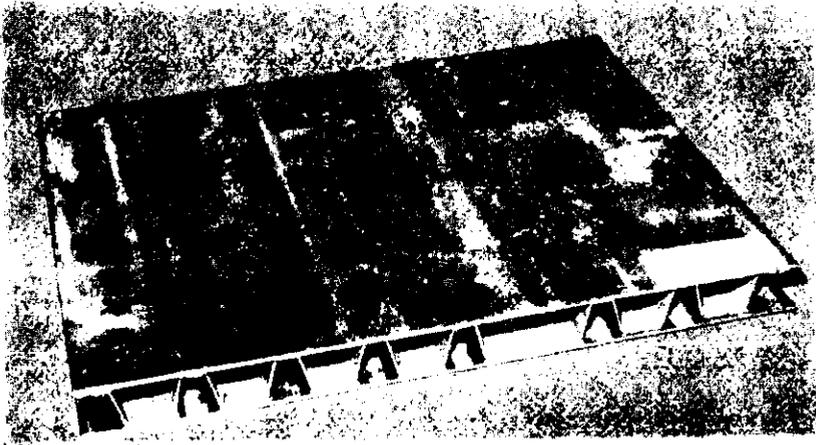


Fig.2.19 a)Panel de seis hojas parcialmente conformado
 b)Panel de seis hojas terminado
 c)Panel de ocho hojas parcialmente conformado.



a)



b)

Figura 2.20 Diferentes piezas obtenidas por estos métodos
a)c/brazing; b)c/SD.

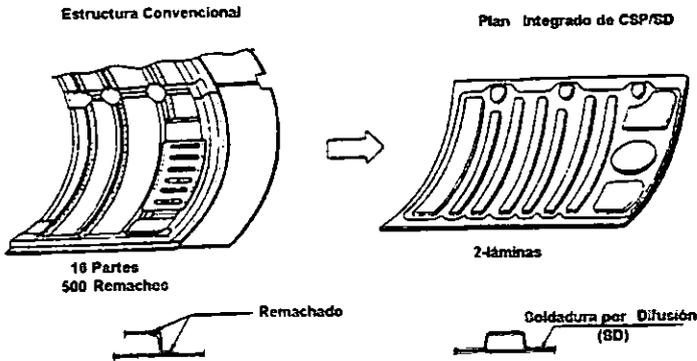


Figura 2.21 Comparación de procesos izq. convencional; der. SD/CSP(75)

Hay ocasiones en las que se requieren superficies curvas (las puertas de la figura 2.21 por ej.) para conformarse por este método, para ello se han probado varias técnicas:

- Se sueldan las láminas o conformar en un conjunto plano, el cual se coloca entre dos moldes con la curvatura requerida, se calienta y se presionan los moldes hasta que el conjunto soldado de láminas tome la forma requerida (figura II.22).
- Se conforman las láminas individualmente dentro de platos curvos a alta temperatura y entonces se sueldan para obtener el paquete curvo requerido.
- Se empalman las láminas bien apretadas, usando moldes curvos se obliga al paquete a deformarse a temperatura ambiente, entonces se sueldan para obtener un paquete curvo.

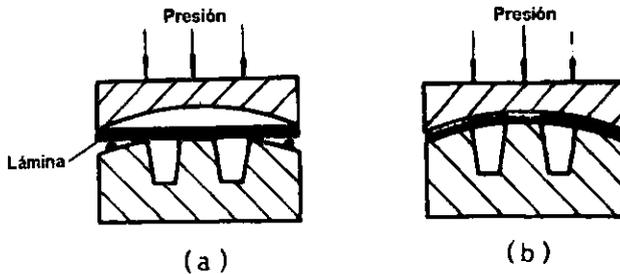


Fig. 2.22 Diagrama esquemático para producir superficies curvas edo. Inicial a) y estado final b)(76)

"Estas técnicas presentan ventajas y desventajas pero la tercera es relativamente factible" (76).

Pero también se pueden ocupar estos métodos para fabricar piezas circulares, al respecto el Dr. Friedrich (77) presentó en 1988 una manera muy inteligente de conformar conchas rotativas, las fotos se presentan tal y como las publica (figura 2.23)

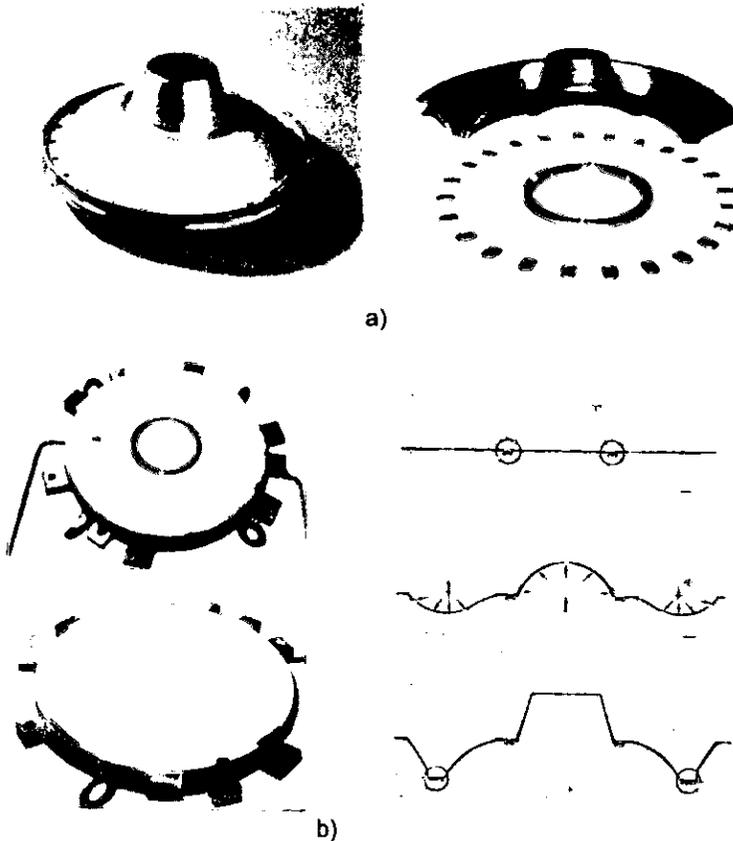


Fig. 2.23 Conformado de conchas rotativas con un proceso de SD/CSP/SD (77) , primero se suelda el anillo a la lámina sin conformar, se realiza el conformado superplástico simultáneamente en los dos sentidos y por último se suelda el refuerzo. a)foto del producto terminado y de los componentes; b)molde y diagrama de conformado.

II.5 MOLDEO POR INFLADO

Existen técnicas usadas comúnmente para producir botellas de plástico o de vidrio que han sido adaptadas para trabajar correctamente con metales superplásticos. Una pre-forma es colocada dentro del molde para luego ser calentada e inflada con gas a presión para que tome la forma deseada tal como se muestra en la figura.

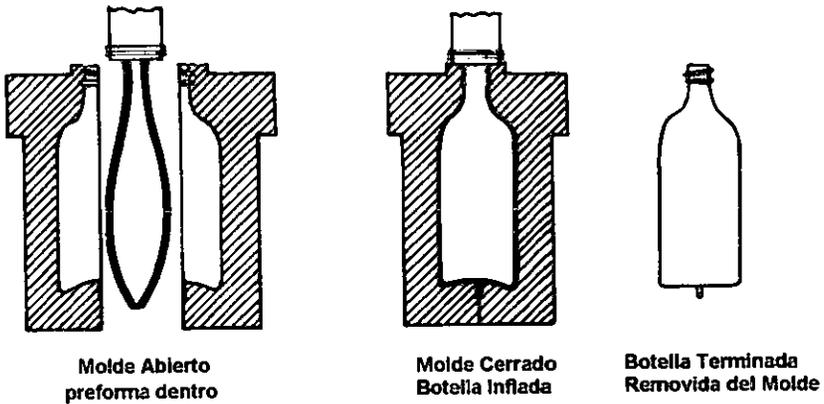


Fig. 2.24 proceso de "botella-soplada" (78)

La pre-forma puede ser un pedazo de vaina perforada, lámina bien unida o tubo extruido (78), pero se debe tener mucho cuidado con el cerrado, fijado y sellado tanto de la pre-forma como de las soldaduras (en su caso).

Por otra parte se han diseñado procesos especiales para el conformado superplástico de esferas en aleaciones de titanio debido a la gran economía que se puede tener en la cantidad de material. Se hace hincapié en que son de titanio pues es para este material en particular que se han diseñado los procesos que se presentan a continuación.

II.5.1 CONFORMADO POR "INFLADO" APARTIR DE LÁMINA

El proceso tecnológico empleado para obtener vasijas circulares se representa muy bien mediante la siguiente figura:

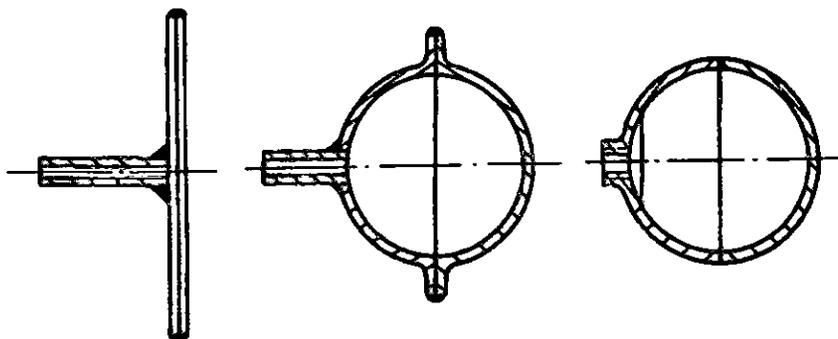


Fig. 2.25 Conformado superplástico usando lámina

Tomando de base el diámetro de la vasija requerida es que se debe determinar el diámetro del claro de la lámina original, una buena aproximación experimental es obtenida con la expresión $D_1 = (1.4 \sim 1.5) D_0$; donde D_1 es el diámetro del claro de la lámina y D_0 el diámetro de la esfera. Un hoyo circular de 6mm de diámetro es realizado en una de las láminas en donde se fija un tubito - también de 6mm de diámetro externo- por soldadura de arco eléctrico. Se empalma esta lámina con otra sin tubo y éstas son unidas en la periferia con soldadura de arco, entonces están listas para llevarse a la temperatura indicada y proporcionando presión de gas se obliga a la lámina a tomar la forma del dado dentro del que se encuentra, los bordes son posteriormente removidos (79).

Una variante de este método consiste en fabricar media circunferencia con los métodos clásicos de conformado (ya sea de hembra simple o conformado hidráulico -ver secc. II.2 y .3-) las cuales son posteriormente unidas, la boquilla deberá ser unida con otros métodos.

II.5.2 CONFORMADO POR "INFLADO" A PARTIR DE TUBO

El desarrollo de la tecnología de rechazado trae consigo nuevas formas para obtener vasijas circulares, se propone poner un tubo sin costura y maquinarlo de acuerdo a las dimensiones requeridas.

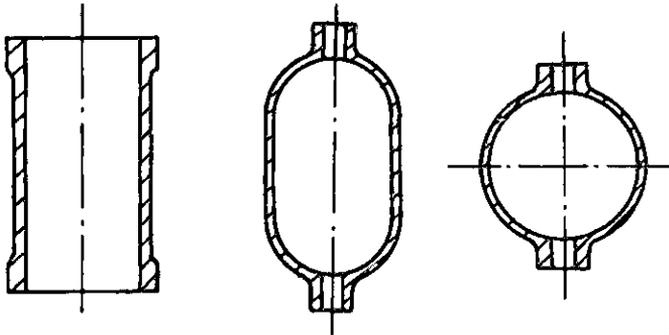
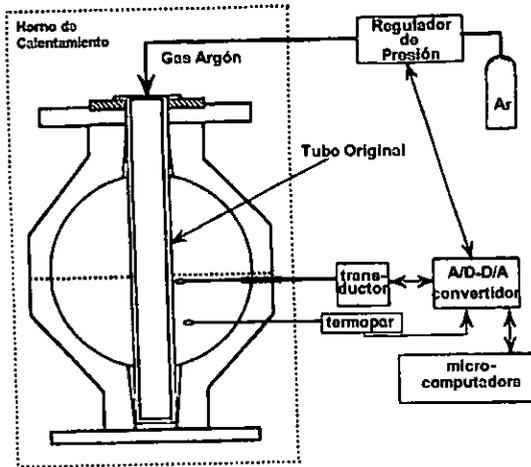


Figura 2.26 conformado superplástico usando tubo sin costura

Uno de los extremos es sellado con soldadura de arco y al otro se le conecta un tubo de titanio puro (79), una vez preparado el tubo se mete a un molde con las dimensiones finales deseadas en donde se lleva a la temperatura adecuada y se le proporciona la presión requerida, en la figura 2.27 se puede observar a) un producto hecho con esta técnica y en b) el esquema de una máquina de este tipo.



a)



b)

Fig.2.27 a) Conformado por "inflado" a partir de tubo sin costura (79)
 b) Equipo para conformado por "inflado" (80)

El arreglo experimental necesario se encuentra muy bien esquematizado en la figura anterior, la presión máxima propuesta en ese arreglo es de 1MPa y es controlada por un microprocesador a través de un convertidor analógico-digital digital-analógico, el dado o molde con el positivo es de acero inoxidable y tiene acoplado un indicador de desplazamiento que permite monitorear la cantidad de deformación, estos valores son mandados al microprocesador cada minuto para calcular la presión requerida y mantener constante la rapidez de deformación (80). Hay que hacer la aclaración que el esquema original no tiene sistema de control de temperatura, en ese sentido se supone que el pirómetro está acoplado al microprocesador. Por último se muestran dos fotografías de productos como están en diferentes etapas del proceso.



Fig. 11.28 Ejemplo de conformado a partir de tubo; en edo. inicial y en edo. final.

II.6 TREFILADO SUPERPLÁSTICO (SIN MATRIZ)

Dado que en los metales normales la inestabilidad plástica produce la formación de un "cuello" a la hora de ser sometidos a un esfuerzo de tensión es que el estirado es poco usado en el conformado de metales. Johnson (81) ideó una manera realmente ocurrente para utilizar el fenómeno de la superplasticidad en el estirado de barras.

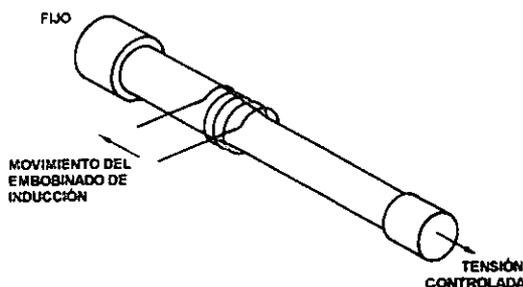


Fig. 2.29 Esquema ilustrativo del proceso de estirado sin matriz, (82) ("die-less drawing").

Como se aprecia en el esquema anterior se aprovecha la estabilidad de los materiales superplásticos para ir reduciendo el esfuerzo en zonas determinadas en donde se va deformando el material, esto se logra mediante un embobinado de inducción que se va moviendo a lo largo de la barra. La reducción en la sección transversal deseada es determinada por valores relativos de velocidad de estirado (V_d) y de la razón de transferencia del embobinado de calentamiento (V_r) (esta dado por $\% = 100 V_d / V_d + V_r$). Trabajos experimentales han demostrado que se pueden lograr deformaciones superiores al 83%. "Este es un proceso algo inusual debido a que es uno de los pocos (sino es que el único) que es capaz de ser adaptado para usarse con aleaciones que exhiben superplasticidad estructural" (82).

II.7 EMBUTIDO PROFUNDO

Las aleaciones superplásticas se deforman a velocidades lentas y en una serie de experimentos realizados en 1970 (83) se comprobó que las aleaciones superplásticas no pueden ser conformadas exitosamente con las herramientas y presiones constantes de sujeción convencionales. A la velocidad normal de embutido la pared de la pieza fallaba antes de completarse el embutido profundo mientras que a una baja velocidad de deformación la pared de la pieza

era estirada y adelgazada sin embutir el material que quedaba bajo la plancha de cierre. Estas fallas se resolvieron al establecer el proceso de embutido profundo con presión aumentada ("pressure-augmentation deep drawing"), la descripción esquemática del proceso se ilustra en la figura 2.30

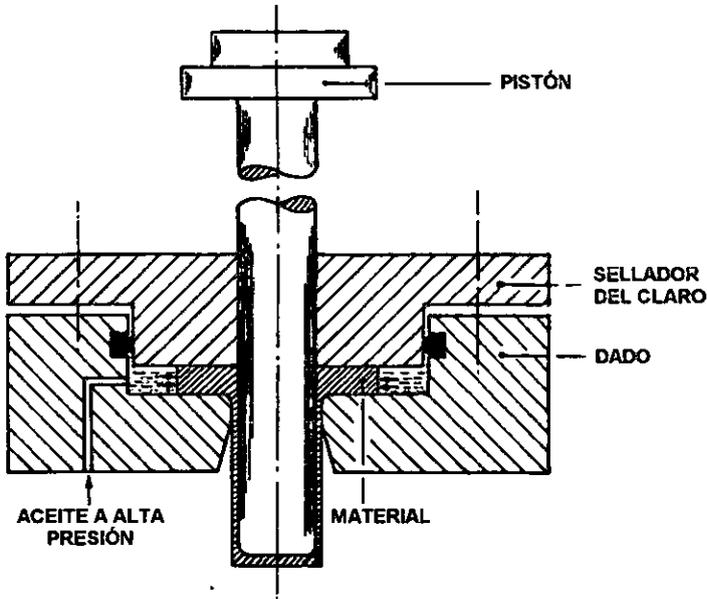


Fig. 2.30 Diagrama del equipo usado para embutido profundo con presión aumentada (83).

Con este equipo fueron conformadas piezas de 24.5 mm de diámetro y 177.8 mm de altura, partiendo de piezas de 57.2 mm de diámetro y 10.2 mm de grueso (83). Realizando estas pruebas se pudieron determinar los rangos de presión que producen esta especie de extrusión.

Posteriormente se realizaron dos estudios que dejaron en claro la factibilidad del conformado de materiales superplásticos cuando se tienen controles especiales del proceso. En el primero de esos estudios se establecieron los límites inferior y superior de la velocidad de conformado que permiten un conformado exitoso. A una velocidad alta de conformado el material falla por falta de ductilidad mientras que a bajas velocidades la falla se produce por falta de fuerza (84). En el segundo estudio el acercamiento fue mucho más científico, determinaron tres formas con las que se proponían superar los problemas relacionados con el embutido profundo de aleaciones superplásticas (85):

- a) Aumento de presión para que el material sea empujado dentro de la garganta del dado siendo empujada por el pistón.
- b) Endurecimiento del metal en contacto con la nariz del pistón para simular un endurecimiento por trabajo mediante el uso de un gradiente de temperatura (de ese modo se puede mantener el material a una temperatura por debajo de la temperatura crítica superplástica con lo que el esfuerzo de flujo es superior al del material que no está en contacto con el pistón).
- c) Con endurecimiento inducido por la velocidad de deformación tomando ventaja del hecho que las velocidades entre el metal y varias de las partes del herramental son muy variables.

La atención se encontró en el método b) ya que se demostró que la capacidad de embutido obtenida mediante este método era significativamente mayor que las obtenidas con materiales convencionales y en aleaciones superplásticas usando otras técnicas. La temperatura del pistón, dado y fijador de masa son controlados y monitoreadas independientemente con lo que se pueden determinar la influencia e interrelación de variables como temperatura de conformado, carga en el fijador de masa, diámetro de la masa, la velocidad de embutido etc...

"Claramente, el embutido profundo modificado es un proceso efectivo para producir copas alargadas y posiblemente su mejor aplicación podrá ser en la manufactura de preformas para subsecuentes procesos" (85), de las aplicaciones que se pueden tener son preformas para inflados posteriores, el producto obtenido tiene un espesor muy uniforme, lo cual favorece mucho el inflado.

II.8 APLICACIONES EN LOS PROCESOS CONVENCIONALES

II.8.1 FORJADO Y ESTAMPADO

Ambos procesos se realizan en dados cerrados y se utilizan para obtener piezas de formas complejas, el uso de materiales superplásticos en este tipo de procesos es totalmente viable si se consideran los aspectos básicos de control (temperatura y velocidad). Para utilizar efectivamente el proceso con materiales superplásticos se debe reducir tanto como sea posible el tiempo de ciclo de forja, lo que se ha propuesto al respecto es dividir el ciclo en dos pasos, uno de velocidad constante, seguido de otro de carga constante.

Otra forma de aplicar la forja superplástica es en el procesado de

moldes para la fabricación de monedas. Estos tipos de dados, hechos con formas detalladas impresas en bloques de material superplástico a una baja velocidad, han sido usados para subsecuentes operaciones de estampado a alta velocidad de deformación siendo exitoso el proceso. Otra buena aplicación es la obtención de moldes para la inyección de plásticos, esto se logra forzando un bloque calentado de material superplástico a que tome la forma del patrón maestro como se ilustra en la figura 2.31 (86).

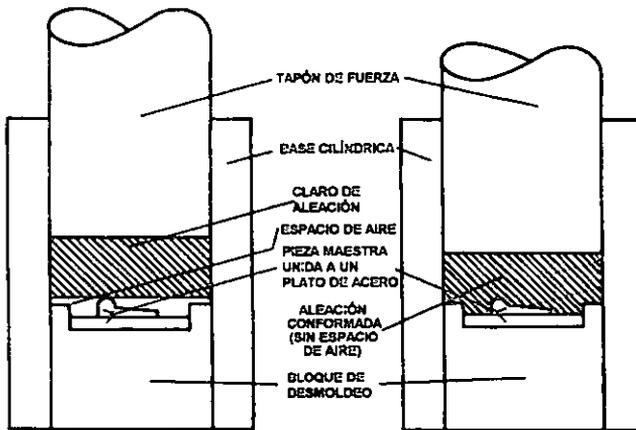


Fig. 2.31 Proceso para la obtención de dados para el moldeo de plásticos mediante la indentación de un bloque de aleación superplástica (87).

Como es evidente este proceso ofrece varias ventajas como la reducción de costos, la facilidad de producción, la precisión etc... .

II.8.2 EXTRUSIÓN

Muchos estudios se han realizado sobre la aplicación de este proceso en materiales superplásticos, al respecto Padmanabhan hace una buena recopilación. Es importante mencionar que "como resultado se concluye que las diferencias son mínimas para extrusiones a diferentes velocidades y dentro de un rango de radios de extrusión" (88). Investigaciones posteriores permiten indicar que:

"Los resultados descritos nos indican firmemente que el

comportamiento en la extrusión de aleaciones superplásticas es bueno aunque hasta ahora poco esfuerzo se ha dado para tomar ventaja de los esfuerzos de deformación más bajos. Probablemente la observación más relevante fue la de Oshita y Takei quienes registraron que el mejor comportamiento ocurrió dentro del rango de óptima superplasticidad." (89).

Hoy en día es bien sabido que el trabajo mecánico mejora las propiedades de las aleaciones superplásticas, procesos como laminado y extruido son normalmente utilizados para procesarlos, sin embargo por cuestiones de ingeniería muchas veces no es posible debido a que este tipo de procesos implican una reducción en la sección transversal, para poder superar este problema es que se ha desarrollado el proceso de extrusión con área constante ("Equal Channel Area Extrusion").

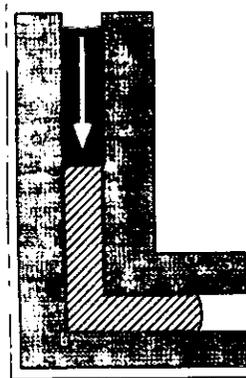


Fig. 2.32 Proceso de Extrusión con Área Constante

Mediante este proceso al material se le puede dar mucho trabajo mecánico, inferirle una buena homogeneidad microestructural y provocar esfuerzos cortantes del orden de 10,000:1 en pocos pasos de éste a través de la camisa en ángulo, manteniendo la sección transversal constante. Dependiendo de la orientación inicial del material en cada paso se puede controlar la textura para hacerla más dura o más dúctil. Este método también ha sido utilizado para obtener materiales con tamaño de grano del orden de nanómetros, que presentan comportamiento superplástico por abajo de la mitad del punto de fusión. Además puede proporcionar el mismo tipo de mezcla mecánica que la aleación mecánica (por metalurgia de polvos) pero sin los costos de ésta (90). Por otra parte un análisis muy bueno y reciente sobre el proceso de extrusión en materiales superplásticos (en particular la Zn-Al en el eutéctico) es presentado por Shilian et al. en la India en 1997 (91).

II.9 PROCESOS DE METALURGIA DE POLVOS

"En este proceso un tamaño de grano ultrafino es obtenido en polvos compactados por extrusión a una temperatura cercana pero por debajo de la temperatura de recrystalización de la aleación. Calentamiento adiabático durante la extrusión inicia la recrystalización que produce la microestructura apropiada para superplasticidad. Entonces la aleación puede ser forjada a rapidez de deformación baja a un tamaño cercano al requerido. Posteriormente las piezas son sometidas a un recocido de alta temperatura para favorecer el crecimiento de grano y disolver los precipitados formados con lo que se elimina la respuesta superplástica. Esto es seguido de un proceso de envejecimiento para obtener propiedades óptimas de servicio" (92). Esta secuencia de eventos es esquematizada muy bien por medio del siguiente diagrama.

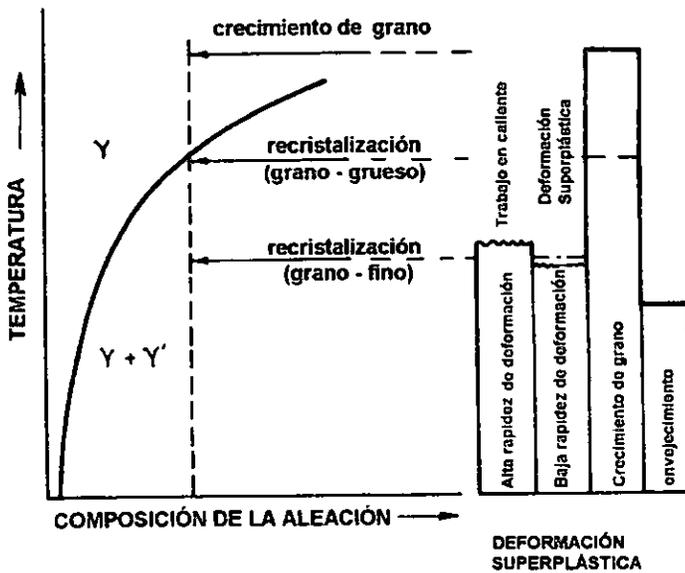


Fig. 2.33 Representación esquemática del programa de procesamiento termomecánico para el conformado de polvo superplástico de superaleaciones consolidadas (92).

"Este es, incuestionablemente, una de las más sofisticadas y exitosas aplicaciones de la superplasticidad en los procesos de conformado."(92).

II.10 CONFORMADO CON DIAFRAGMA (O MEMBRANAS DE SACRIFICIO)

En este proceso se hace uso del conformado superplástico normal para utilizar como herramienta de conformado la lámina superplástica que se termina tirando, el objetivo es que esta lámina de sacrificio obligue a la otra lámina (que es la que nos va a servir) a tomar la forma del molde, esto se ilustra en la siguiente figura:

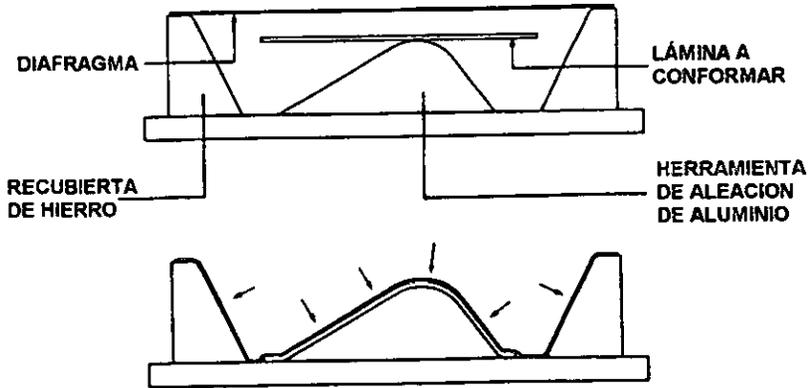


Fig. 2.34 Esquema del proceso de conformado con diafragma ("diaphragm forming") (93).

II.10.1 De Materiales Superplásticos

Como se puede apreciar en la figura 2.34 el componente está libre por lo que prácticamente toma la forma del molde sin sufrir esfuerzos de tensión con esto se evitan los problemas de cavitación y se obtienen espesores regulares, "componentes con grandes grados de curvaturas compuestas son improbablemente apropiados para esta técnica ya que la ausencia de tensión en la pieza la puede hacer propensa a la formación de arrugas" (93). Este proceso es utilizado comercialmente por la compañía del Reino Unido Superform Metals para producir la parte exterior de puertas de aviones militares desde 1994. El producto final es de la aleación Al-Li 8090 y la membrana de sacrificio es de SUPRAL 2004.

II.10.2 De Materiales No Superplásticos

El principio de operación es análogo al del proceso de conformado con diafragma presentado en la sección anterior. Aquí lo que se pretende es utilizar las bondades del conformado superplástico tales como la precisión dimensional y la repetibilidad, a costa del costo de la membrana. Una diferencia con el proceso anterior es que en éste las piezas deben ser preformadas en un acercamiento para que se pueda obtener la pieza requerida, el proceso se ilustra a continuación:

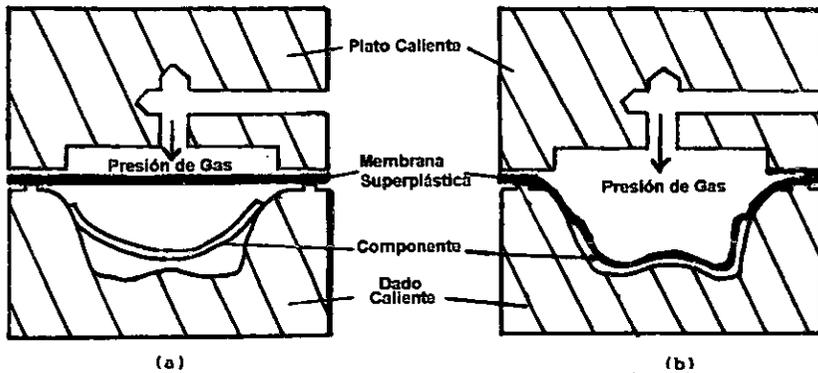


Fig.2.35 Membrana y componente a)antes del conformado b)después del conformado

"Los resultados del conformado con membrana muestran que mientras la membrana es conformada en el proceso estándar de CSP ésta obliga a la lámina no superplástica a tomar la forma del dado junto con ella. Dado que la lámina no superplástica está libre para moverse se conforma con mucho menos adelgazamiento y daño estructural que si hubiera sido estirada para tomar la forma. Aleaciones no superplásticas de níquel, aluminio y titanio han sido conformadas con curvaturas complejas con el conformado con membrana sin daño estructural y con poco o nulo adelgazamiento" (94).

II.11 CONFORMADO POR IMPULSO (Impulse Bulk Forming)

El proceso de conformado por impulso de masa es parecido a un proceso de inyección en donde se aprovechan las propiedades superplásticas del material, este proceso consiste en dos pasos sucesivos, el primero consiste en fundir el material en la parte superior de la instalación (fig. 2.36), justo después de fundido el material un impulso de gas a presión (superior a los 1000 MPa) es

creado dentro de dicha recámara superior, con lo que da comienzo al segundo paso, el metal fundido forma un chorro que al pasar a través del canal de enfriamiento llega a la cavidad (también fría) del molde llenándola completamente. La velocidad del chorro de aleación en el momento de chocar con la superficie del dado es proporcional a la raíz cuadrada de la presión del impulso y depende de la longitud del canal así como de la masa del chorro, a una presión máxima de 1000 MPa la velocidad puede alcanzar niveles del orden de $10^3 - 10^4$ m/s (95).

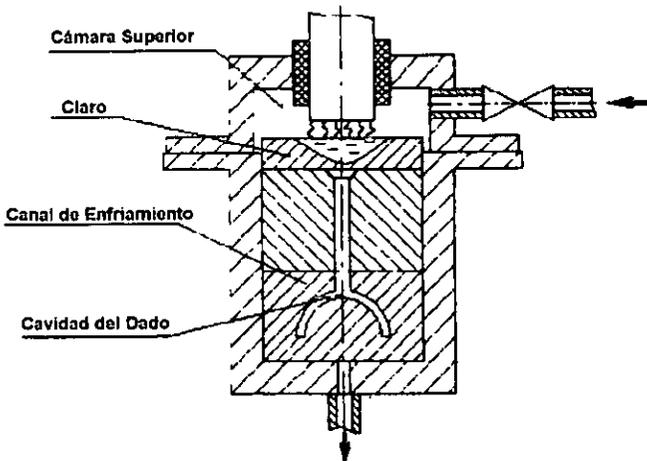


Fig. 2.36.- Esquema de la instalación del conformado por impulso (95).

El impacto producido en el momento del contacto del chorro de fundición con la superficie del dado crea una onda de presión de choque que atraviesa por el chorro y regresa con la velocidad de propagación del sonido en metal fundido que para muchos metales se agrupa entre 2000 y 3000 m/s es decir del mismo orden de magnitud que la velocidad del chorro de fundición. Esta onda de presión crea compresiones elásticas de la fundición por un pequeño período de 10^{-5} - 10^{-4} seg. dependiendo del largo del chorro de fundición. Cuando la compresión de la fundición alcanza un valor crítico ocurre un proceso de solidificación instantánea. La deformación del chorro del material, con rapidez de deformación del orden de 10^3 - 10^4 seg.⁻¹ en combinación con el enfriamiento rápido (velocidades de enfriamiento que alcanzan los 10^5 K/seg.) siguen a la onda de choque, se toman de 10^{-4} - 10^{-2} segundos para completar la deformación y de 10^{-3} - 10^{-1} segundos para enfriar el producto hasta temperatura ambiente (95).

Esta tecnología presenta posibilidades únicas para unir en un solo proceso dos estados del conformado superplástico regular, por un lado se prepara una estructura de grano ultrafino seguida de una deformación superplástica de alta rapidez de deformación que empieza en un estado sólido-liquido y termina en

un estado sólido. La poca experiencia que se tiene usando esta tecnología ha mostrado que en efecto tiene algunas ventajas obvias: (1) la posibilidad de obtener conchas con forma de huecos (shape hollow shells) tanto como conchas bimetálicas;(2) la temperatura de fusión del dado puede ser considerablemente menor que la del material a conformar;(3) se requieren instalaciones pequeñas (95).

II.12 PROCESO DE TIRO IMPULSIVO (shot-impulsive process)

A continuación se presenta un arreglo experimental presentado por Barykin y Kamalov en el simposium de 1994 (96)

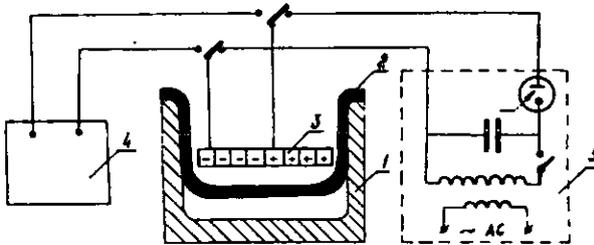


Fig. 2.37 Arreglo experimental (96); 1-dado;2-lámina a conformar;3-inductor; 4-fuente de energía de alta frecuencia;5-fuente de energía impulsiva.

Aquí el objetivo es calentar la lámina por medio de corriente inducida de alta frecuencia, para después deformar utilizando campos magnéticos impulsivos. En 1994 se empezó este estudio, desafortunadamente no se han encontrado más adelantos al respecto.

Con esto se termina lo referente a los procesos de conformado superplástico, por lo que no queda más que presentar los desarrollos experimentales realizados.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para poder demostrar que el explotar el fenómeno de la superplasticidad de manera comercial es una verdadera oportunidad para países como México se tuvieron que llevar a cabo todos los procesos involucrados, a saber:

- Obtención de la aleación.
- Transformación a lámina.
- Producción de piezas conformadas.

En estos tres procesos se engloban todos los desarrollos experimentales realizados y se desglosan a continuación.

III.1 OBTENCIÓN DE LA ALEACIÓN

Para obtener la aleación se desarrollaron dos métodos pero ambos deben partir de tener materiales limpios, en el caso del zinc no hay problema pues al ser México un muy importante productor de zinc a nivel mundial la calidad es bastante buena, desafortunadamente no es el mismo caso con el cadmio, éste trae mucha suciedad en la superficie por lo que se tiene que limpiar.

III.1.1 PREPARACIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUYENTES

Para que esta aleación tenga la composición deseada es pertinente tener las proporciones en peso correctas, para ello hubo la necesidad de cortar los elementos de forma tal que se pudieran obtener los % requeridos, en el caso del cadmio se realizó una limpieza superficial previa pues éste viene con impurezas que se concentran en la superficie.

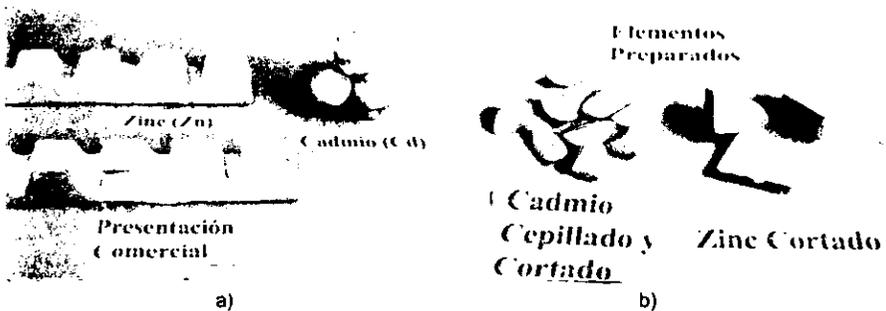


Figura 3.1 a) cadmio en bolas y zinc en lingotes
b) cadmio cepillado y zinc y cadmio cortados.

El cadmio es sometido a una especie de cepillado el cual se realizó con una carda de latón montada en un motor de esmeril y con esto se logra quitar todas las impurezas superficiales, en la figura 3.1 b) se puede observar los poros dejados por el cepillado, lo retirado son impurezas que trae el elemento desde el proceso de obtención. Una vez limpios los elementos hay que cortarlos, el corte de los mismos se realizó con la ayuda de sierras cinta, una horizontal hidráulica marca BERNSTEIN para obtener "rebanadas" de zinc y otra vertical marca LUXO modelo 410, ambas del IIM, para el cadmio se desarrolló una herramienta para poder realizar el primer corte, ya que este viene en bolas las cuales no se pueden fijar con las prensas de las cortadoras, después se obtienen pedaceras de ambos elementos para poder obtener los % en peso correctos, así el último paso en la preparación es pesar las cantidades requeridas para lo que se utilizó una balanza electrónica marca OHAUS modelo E400D del IIM, con precisión de milésimas de gramo. Se determina la cantidad total de aleación a preparar, el 17.4 % debe ser zinc y el 82.6% cadmio, con lo que se logra la composición eutéctica (ver diagrama de fases en la siguiente sección figura 3.2), una vez que se tienen los elementos listos se pasa al proceso de fundición.

III.1.2 FUNDICIÓN

Ya con las proporciones en peso correctas se procede a fundirlos, para este proceso se determinaron dos formas de obtención y las dos dieron resultados positivos, en ambos casos se utilizó una mufla de atmósfera libre marca LINDBERG del IIM y como crisoles vasos de precipitado de vidrio Pyrex.

En los primeros experimentos se trató de lograr que el proceso fuera lo más rápido posible para lo que utilizamos temperaturas superiores a los 500°C pero en todos esos casos se presentaban unos resultados de fluorescencia, obtenidos con el método EDS (Espectroscopia por Dispersión de Energía) con un detector OXFORD PENTAFET conectado al microscopio STEREOSCAN 440 del IIM, muy diferentes a lo esperado (porcentajes en peso de zinc de alrededor del 28 %); después de varios fracasos se llegó a la conclusión de que el cadmio se oxida con gran facilidad arriba de los 500°C y con esta base se propusieron dos caminos:

Se funde el cadmio (temperatura de fusión=321°C) a 350°C y ya fundido se le agrega poco a poco el zinc, al irse fundiendo el zinc la aleación baja su punto de fusión (ver diagrama de fases figura 3.2) con lo que se puede ir bajando la temperatura para protegerla de posible oxidación de los constituyentes (del Cd principalmente). Este método dio resultados favorables en cuanto a la composición final de la aleación pero presenta un problema de tiempo inherente a los fenómenos físicos utilizados, la temperatura de fusión del zinc es de 420 °C aprox., para lograr que el zinc se disuelva en el cadmio a 350 °C se debe esperar a que se "difunda", y este proceso es muy lento. Si bien el hecho de poner los

constituyentes juntos en el crisol desde un principio facilitó el proceso de difusión nunca se pudo obtener la aleación en un tiempo menor de 6 horas, pero eso sí, las composiciones siempre fueron las esperadas.

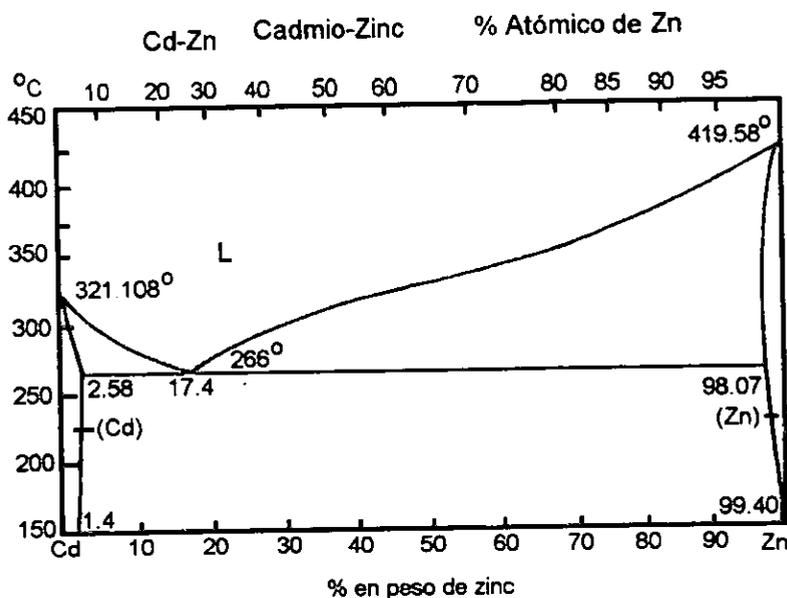


Figura 3.2 Diagrama de fases sistema Cd-Zn

Con la experiencia anterior fue muy fácil determinar un proceso igual de confiable pero más rápido, el problema era que el cadmio se oxidaba en algún momento por lo que había que protegerlo, lo que se hizo fue fundir el zinc con el horno a 450°C, una vez fundido se le agrega una pequeña cantidad de cadmio de forma tal que éste quede cubierto por zinc, de esta forma el cadmio no se oxida y la temperatura de fusión de la aleación baja (ver figura 3.2) con lo que se puede bajar la temperatura del horno y agregar cada vez más cadmio ya que cada vez se tiene más aleación para cubrirlo, aquí como el cadmio funde a una temperatura inferior a la que en el momento se tiene en la aleación el proceso es muy rápido, hay que tener cuidado de no poner mucho cadmio en un principio pues puede suceder que se presente una transferencia de calor muy rápida del Zn al Cd lo que puede provocar la solidificación del Zn en el fondo con lo que se tiene que esperar a que se difunda o en su defecto elevar la temperatura (con lo que se puede oxidar algo de cadmio y con ello la composición no sería la adecuada), otra forma de solucionar éste fenómeno es precalentar el cadmio por separado; una vez fundido todo el cadmio la aleación está lista para el vaciado.

III.1.3 VACIADO Y SOLIDIFICACIÓN.

Para poder tener la aleación en una forma susceptible de ser laminada se tuvieron que diseñar y fabricar las lingoteras, las primeras se fabricaron en acero "cold-rolled" pero los análisis de fluorescencia mostraron que en la aleación se difundía algo de hierro por lo que la última (que en realidad es la que se usa por su mayor capacidad) se fabricó en acero inoxidable dando buenos resultados.

La lingotera debe ser precalentada antes del vaciado para que los rechupes se puedan concentrar en la parte superior y al ser removidos se obtenga un lingote macizo. Una vez en la lingotera la aleación debe ser enfriada en agua para con ello tener una microestructura adecuada para superplasticidad, esto se ilustra muy bien mediante la figura 3.3 :

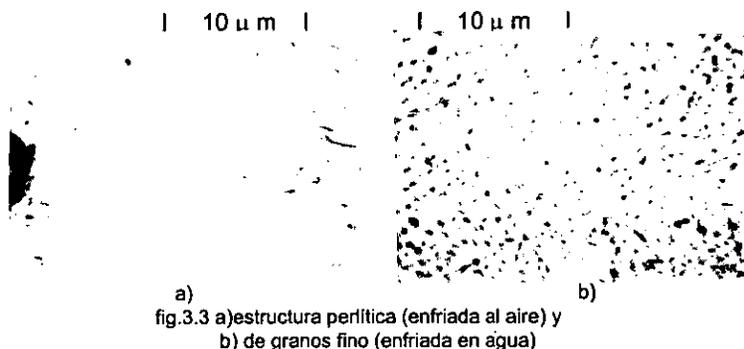


fig.3.3 a) estructura perlítica (enfriada al aire) y
b) de granos fino (enfriada en agua)

La foto a) es una fotografía tomada en un microscopio electrónico de barrido (MEB) a una amplificación de 5000 X templada al aire, como se puede ver la estructura es perlítica y para transformarla en una estructura de granos finos de zinc (menores a 10 micrómetros) en una matriz de cadmio se requieren tratamientos termomecánicos, en cambio al templar en agua se obtiene una estructura de granos finos (fig.3.3b) (amplificación de 7500x) que simplemente debe ser laminada para hacerla más homogénea y entonces poderse usar; además los rechupes son más fáciles de controlar pues al ir metiendo la lingotera en agua se logra que los rechupes se concentren en la parte superior con lo que se puede reducir la cantidad de aleación que debe ser removida para obtener el lingote macizo, cabe aclarar que este problema se resuelve con una mazarota en la lingotera.

III.1.4 HOMEGENIZACIÓN Y PRUEBAS.

Al obtener los lingotes se les hicieron pruebas de fluorescencia y dureza que mostraban variaciones en diferentes partes del lingote, por lo que se decidió homogeneizar los lingotes por 72 horas a 130 °C (que era nuestra temperatura de trabajo original), este proceso hizo más uniforme el material con lo que las medidas de composición obtenidas por fluorescencia fueron más homogéneas (al igual que las de dureza) pero podía haber provocado un crecimiento del grano (recristalización) por lo que se procedió a verificar la microestructura (fig. 3.4)

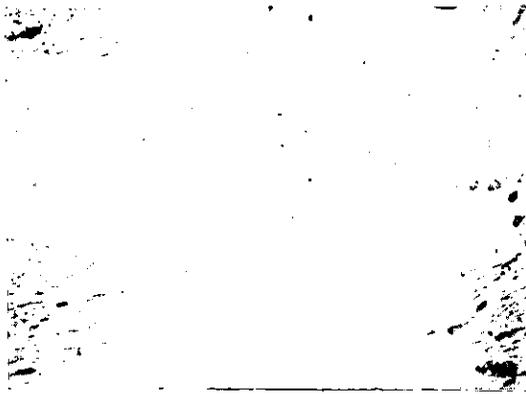


Figura 3.4 fundición homogeneizada

Como se observa el efecto de homogeneizar a 130°C es de acomodar los granos de zinc uniformemente tratando de formar nuevos granos más grandes pero esto no se completa, dentro de dichas fronteras (fig. 3.4) todavía se mantiene la estructura de grano fino requerido. Con todo y esto parece ser que la diferencia en los resultados prácticos de homogeneizar o no, no tiene efecto importante y si lo presenta se compensa en el laminado. Por último se debe comprobar la composición para lo que se realizaron pruebas de fluorescencia con el equipo integrado al Leica STEREOSCAN 440, los valores promedio (seis pruebas) fueron de Cd = 82.26 % y de Zn=17.74% y como podemos observar las variaciones con lo deseado son mínimas con lo que se garantiza la composición correcta; lo único que falta es tener la aleación en forma de lámina y con la estructura adecuada.

III.2 TRANSFORMACIÓN A LÁMINA

Una vez que se tienen los lingotes con las proporciones deseadas y sin rechupes internos no queda más que laminar, pero hay que tener presente cierta condición, si el lingote a laminar fue enfriado al aire tiene una estructura perlítica que hay que romper, por lo que los primeros pasos de laminado tienen que llevarse a cabo para lograr esta transformación, si lo hacemos a temperatura ambiente se llega a requerir hasta más de un 100% de deformación antes de lograr la estructura superplástica con lo que muchas veces se tienen espesores menores a los requeridos, esto se puede evitar laminando en caliente, lo que complica el proceso de laminado, por otro lado si el lingote fue enfriado en agua la estructura se refina un poco más y el laminado puede realizarse pensando en los espesores requeridos desde un principio. Como independientemente todavía no se tiene bien determinado que tanto se refina el grano con el laminado se propone en términos generales laminar en caliente hasta un espesor del doble del requerido para luego ajustar al espesor deseado en frío, este procedimiento fue el que se siguió y para ello se utilizó un taller particular de laminación, en este como las laminadoras están continuamente trabajando al laminar la aleación ésta llegaba rápidamente a una temperatura cercana a los 130°C, se lamina en varias direcciones y hasta un espesor del doble del máximo requerido para luego laminar en frío en el instituto con una laminadora marca D.O. JAMES de 25 Hp hasta los espesores deseados.

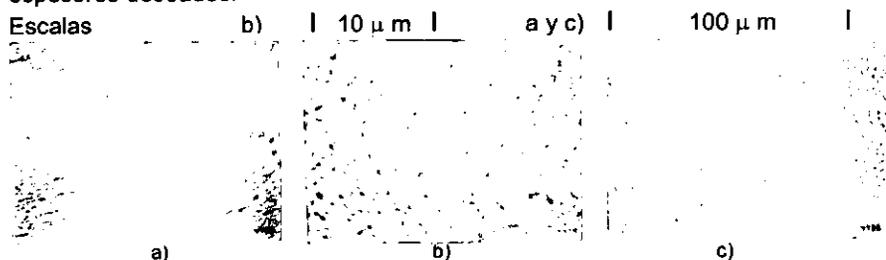


Figura 3.5 Microestructura de la aleación

- a) muestra de fundición homogeneizada sin laminar
- b) laminado a espesor intermedio (laminado del 100%)
- c) laminado a espesor final

En las fotografías de la figura 3.5 se puede observar la microestructura de grano fino requerida, la foto a) está tomada a una amplificación de 1000x; b) es una fotografía a 5000x de una muestra laminada un 100 % de deformación (en 20 pasos de 5 % c/u); por su parte la foto c) está tomada a 1000x y es de una muestra laminada hasta 0.6 mm de espesor partiendo de un lingote igual al de la fotografía a).

Como se puede observar en las fotografías anteriores el efecto de laminar es romper y redondear los granos sin acomodarlos, y aquí conviene hacer la aclaración: no se presenta orientación preferencial de los granos al término del

laminado sino simplemente una reducción y homogeneización en el tamaño de los mismos. Esta estructura es la adecuada para que la aleación pueda tener características superplásticas (pueda pues el tamaño de grano es condición necesaria pero no suficiente - ver capítulo I -) por lo que se comprueba que el proceso de laminación propuesto es adecuado.

Cuando se lamina con los rodillos calientes el lingote adquiere propiedades superplásticas con cuatro o cinco pasos de laminado, esto se hace evidente pues se deforma extremadamente fácil, se ha tomado la temperatura y coincidentemente siempre se tiene una temperatura muy cercana a 130 °C; saliendo de la laminación por lo regular se enfría en agua con la idea de reducir el tamaño de grano aun más o cuando menos evitar el crecimiento de grano en el enfriado lento; posteriormente se lamina en frío para ajustar los diferentes espesores de lámina requeridos, aquí se debe tener presente la velocidad de laminado ya que velocidades mayores a 9 metros por minuto (MPM) provocan grietas ocasionales se propuso 5 MPM y esto dio muy buenos resultados; los pasos de laminación se hicieron con decrementos en el espesor de 1 décima de milímetro cada dos pasos y mientras las dimensiones de la lámina lo permite se va rotando la lámina cada vez que se reduce el espesor, esto para evitar el texturizado pues como se verá da problemas en el conformado. Las láminas se dejaron a diferentes espesores para ver cómo influye tanto en el tiempo como en la presión requerida en el proceso de conformado.

III.2.1. PRUEBAS CON LÁMINA

Una vez que se obtuvo la lámina se procedió a la realización de pruebas con la misma para poder determinar sus características superplásticas y con ellas poder inferir el tipo de piezas a conformar. Para realizar esto se utilizó una máquina "INSTRON" modelo 1125 localizada en el mismo IIM en la cual se realizaron pruebas de tensión a velocidad de cabezal constante.

III.2.1.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Para esto se tuvieron que hacer varias probetas con las dimensiones mostradas en la figura 3.6 y con un espesor de 1 milímetro, éstas fueron maquinadas en el taller del IIM, posteriormente fueron "afinadas" las dimensiones con lija del # 600 tratando de dejarlas lo más uniformes posibles.

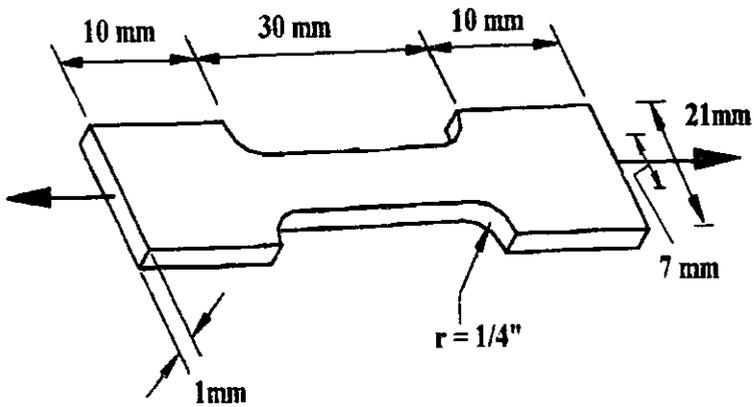


Figura 3.6 Probetas utilizadas

III.2.1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

Con las pruebas de tensión se obtiene información básica de la aleación, al realizar las pruebas a diferentes velocidades de deformación se puede determinar el comportamiento del material a esa variable, análogamente es posible obtener información de la respuesta del mismo a la temperatura (nuevamente se realizan varias pruebas a diferentes temperaturas, con las velocidades de deformación determinadas anteriormente); conjuntamente se obtiene el esfuerzo de cedencia (uniaxial) el cual nos da una idea de las presiones requeridas para el conformado.

Las pruebas se realizaron una a temperatura de 0.75 de la temperatura de fusión $-T_f$ (130°C) ya que esta temperatura se había determinado como la de trabajo, dado que se cuenta con reportes de pruebas de deformación a 0.54 de T_f (temperatura ambiente -20°C -) (30), lo que se hizo fue repetir la prueba de máxima deformación por lo que se esperaba una deformación de cuando más un 400 % a una velocidad de cabezal de 0.1 mm/min, al obtener el resultado esperado se preparó la cámara de calentamiento y se realizaron las pruebas a la temperatura de interés, 0.75 de T_f ; se empezó por una $V_c = 0.12$ mm/min, la siguiente prueba se hizo a 0.05 mm/min y al obtener una menor deformación se decidió hacer las pruebas con velocidades mayores, para obtener valores más significativos los incrementos siempre fueron de un orden de magnitud (desde 10^{-5} seg $^{-1}$ hasta 10^{-1} seg $^{-1}$).

III.2.1.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TENSION

Como se mencionó anteriormente la primera prueba fue a 0.12 mm/min lo que equivale, con los 20 mm de referencia, a una rapidez de deformación de $1 \times 10^{-4} \text{seg}^{-1}$, con esta rapidez se obtuvo la deformación máxima de 700 % y se probó más lento, bajo la influencia de aquel viejo paradigma, que hoy en día se está rompiendo, de que la superplasticidad es un fenómeno que se presenta solamente a una baja velocidad de deformación, la siguiente prueba se realizó a $4.16 \times 10^{-5} \text{seg}^{-1}$ obteniendo una deformación menor con lo que se infirió que esta prueba correspondía a un puntos localizado en la transición de la zona I y II de la gráfica esfuerzo Vs rapidez de deformación, así se decidió hacer pruebas a la derecha, los valores se presentan a continuación:

TABLA 3.1

$\dot{\epsilon}$ Rapidez de Deformación seg ⁻¹	σ Esfuerzo MPa	ϵ Deformación %	V_c Velocidad del cabezal mm/min
1×10^{-1}	29,760	175	120.0
1×10^{-2}	36,170	285	12.0
1×10^{-3}	25,510	475	1.2
1×10^{-4}	3,820	700	0.12
1×10^{-5}	2,360	360	0.0416

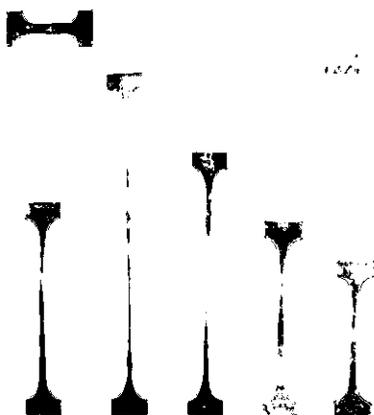


Fig. 3.7 foto resultados pruebas de tensión

En la figura anterior se puede observar claramente como la deformación es altamente dependiente de la rapidez de deformación, como se ve el rango máximo de deformación se encuentra al tener una rapidez de deformación alrededor de los $1 \times 10^{-4} \text{seg}^{-1}$, a esta rapidez de deformación obtuvimos un 700 % de deformación y como se aprecia en la figura la probeta no llegó a fallar, la prueba se detuvo pues la recámara de calentamiento de la INSTRON no permitía más deformación, en la actualidad se tiene un troquel para probetas con claros de prueba de un centímetro con lo que la cámara permitirá % de deformación del orden de los 1400%, un estudio más a fondo es indispensable pues muy recientemente se ha podido determinar que la rapidez de deformación que se puede obtener a valores altos de temperatura (del orden del 0.9 de la temperatura de fusión en escala absoluta) es considerablemente mayor con lo que se podría pensar en ser competitivo industrialmente.

III.2.1.4 DETERMINACION DE "m"

Con los datos de la tabla 3.2 se obtuvo la gráfica $\log \dot{\epsilon}$ Vs $\log \sigma$ tan clásica de estas aleaciones, en este caso se tomaron los valores directos de la tabla y se graficaron en una escala logarítmica, en la misma se graficó la $\dot{\epsilon}$ Vs deformación.

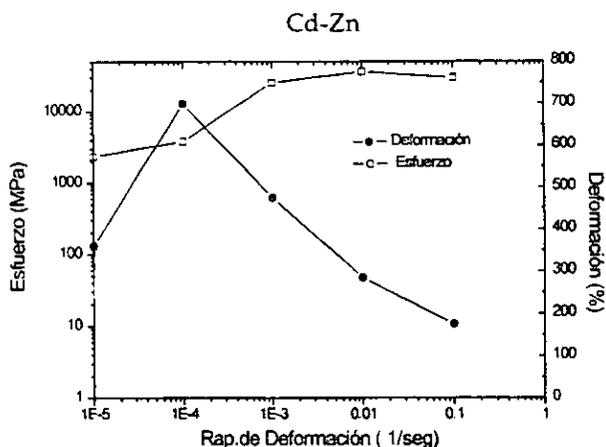


Figura 3.7a).—Gráfica $\dot{\epsilon}$ Vs σ y Vs ϵ . a 130 °C.

De estas gráficas se obtiene la correlación entre rapidez y deformación, como se puede observar la rapidez óptima se encuentra a una velocidad intermedia en la prueba, en la que llamada región II en la gráfica. Cuando se tiene una gráfica proporcionada (es decir que cada orden de magnitud tenga la misma distancia entre las abscisas y las ordenadas) determinar el valor del índice de sensibilidad a la rapidez de deformación es muy sencillo ya que éste está definido como la pendiente de la gráfica $\log \dot{\epsilon}$ Vs $\log \sigma$, que para este caso es de $m = 0.70$ medido directo, es decir por el método geométrico.⁵ Al analizar la gráfica se puede determinar a simple vista que la rapidez óptima de conformado se encuentra entre 1×10^{-4} y $1 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$ (para esta temperatura y tamaño de grano en particular) y que máximo se obtendrá un 800 % de deformación, de ahí la importancia de estas gráficas y de la caracterización de los materiales en general.

III.3 PRODUCCION DE PIEZAS CONFORMADAS

Para poder deformar plásticamente cualquier metal hay que superar su esfuerzo de cedencia, el evaluar teóricamente este tipo de fenómenos tridimensionalmente tiene complicaciones matemáticas fuertes por lo que se acostumbra utilizar algún criterio, en particular el criterio de Von Mises es muy utilizado pues tiene una forma matemática muy sencilla y nos permite inferir los esfuerzos requeridos a partir de un dato uniaxial como lo son los resultados

⁵ Acerca de las diferentes maneras de obtener "m" y los problemas e incongruencias al respecto presenta Enikeev un artículo en India (CSAM-97 (97)).

obtenidos en la prueba de tracción. Este criterio plantea que un material va a deformarse plásticamente al ser igualado su esfuerzo de cedencia (unidimensional) por alguna combinación de los esfuerzos principales normales y/o de corte a los cuales esté sometida nuestra pieza original (98), así se puede tener una idea de las presiones requeridas para el conformado a partir de un dato obtenido previamente en las pruebas de tracción.

Se escogió el proceso de conformado de hembra simple por ser uno de los más prácticos y susceptible de ser modificado, para ello se diseñó un molde cónico pensando en lograr botes con la misma capacidad de los hechos de aluminio para bebidas, actualmente se tiene conocimiento de que los proyectos desarrollados por los antiguos dueños de ese mercado (hoy en manos del aluminio y los tetra-brick) fue tan ambicioso que hoy en día se tienen envases de acero conformados superplásticamente con formas llamativas y novedosas (99).

Sin embargo en realidad sirvió para caracterizar la aleación, poder determinar los requerimientos básicos necesarios al estudiar el fenómeno e identificar las modificaciones necesarias en los procesos previos, así las primeras pruebas presentaron innumerables fallas, tanto en la transferencia de calor del molde mismo como en la lámina obtenida, con el proceso de conformado salieron a flote problemas como "rechupes escondidos" que al no ser identificados a simple vista se laminaron pero al momento de conformar provocaron fallas (con lo que se tuvo que pensar en las mejoras realizadas para el proceso de vaciado y solidificación), la presencia del texturizado en nuestra lámina también provocó fallas prematuras en el conformado (por lo que se realizaron las modificaciones en el proceso de laminación antes descritas).

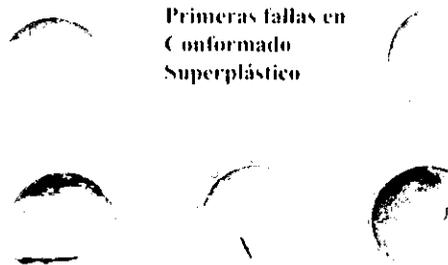


Figura 3.8 fotos de las primeras fallas.

III.3.1 OBTENCIÓN DE MOLDES E INTEGRACIÓN DE SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Como ya se dijo la idea original era obtener botes para bebidas por lo que se mandó a fabricar un molde de aluminio con una salida en el fondo para poder hacer vacío y dejar que la presión atmosférica deformara el material, otro requerimiento era la temperatura, se tiene que tener la lámina a cierta temperatura para lo que se consiguió una resistencia eléctrica de banda, la cual se acopla al molde y era alimentada por un variac, para con él regular la temperatura (que se iba monitoreando manualmente con un termopar), esto traía consigo innumerables problemas, la temperatura era muy difícil mantenerla constante pues las mediciones no podían ser continuas de una manera práctica por lo que se tuvo que implementar un pirómetro, con el cual se pudo tener un control con variaciones de +/- 5 centígrados, otro problema era la transferencia de calor pues es evidente que la lámina se calienta por conducción del calor por todo el molde pero el claro de lámina que queda en el centro es lo último en calentarse, para evitar este problema se puso una tapa con un orificio lo que permitió un calentamiento de la lámina más uniforme así como monitorear tanto la temperatura real de la lámina como la profundidad de deformación en un tiempo determinado. El calentamiento por medio de la resistencia eléctrica de banda era muy tardado y muy ineficiente pues el calor era transmitido en igual área de contacto tanto por el molde como para el ambiente por lo que se pensó en acoplar la resistencia "dentro" del molde. Para estas fechas se encontraba otro diseño en desarrollo, un molde para hacer conformados de hembra simple pero para obtener piezas rectangulares, fue a este molde que se le acoplaron las modificaciones del sistema de calentamiento, para ello se mandaron fabricar cuatro resistencias eléctricas "de cartucho de alta concentración" con una potencia de 550 watts c/u y 120 volts las cuales si se pudieron introducir "dentro" del molde y se conectaron a un termostato comercial de 0-300°C -ver figura 3.9.a) y b)-.



Fig. 3.9 a)foto del molde circular y su respectivo sistema de control de temperatura.
 b)foto del molde rectangular y su respectivo sistema de control de temperatura.

Con estas innovaciones se lograron controles de temperatura de ± 3 °C, mejoramos la eficiencia del sistema de calentamiento y logramos temperaturas más uniformes en la lámina.

Una vez obtenidos los moldes se pasa al conformado. Antes de tratar el siguiente punto es conveniente aclarar que estos moldes son susceptibles de mejoras, en particular en el sistema de sellado, los moldes y las tapas son unidos con tornillos, lo cual hace el proceso muy tardado y en ocasiones ineficiente ya que no se podían meter tornillos de grado pues la rosca se maquina directamente en el molde y al ser este de aluminio se barren continuamente. Una manera de solucionar esto fue atravesar los tornillos, con lo que evitamos el maquinado de roscas. Hoy en día se esta desarrollando un nuevo molde con varias mejoras, el sellado se realiza por medio de una hendidura en la periferia del molde hembra y una protuberancia en la tapa con lo que se utiliza de sello la misma lámina que se va a conformar, se suprimen los tornillos y se piensa integrar un pistón para el abrir y cerrar del molde, actualmente en lugar de pistón se utiliza un gato hidráulico. Aunque este molde se encuentra todavía en proceso de integración de los equipos periféricos las primeras pruebas han dado muy buenos resultados, éste se ilustra en la figura 3.9c).

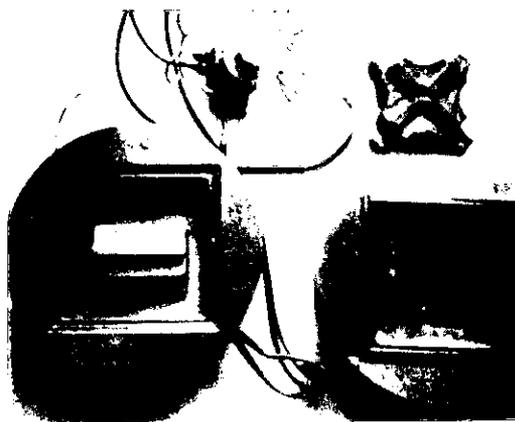


Figura 3.9c).- Fotografía del nuevo molde de CSP

III.3.2 CONFORMADO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Para lograr que la presión que se utilice sea la atmosférica es necesario tener una diferencia de presiones entre el molde y el ambiente, lo cual se logra creando vacío en el interior del molde.

III.3.2.1 SISTEMA DE VACÍO

Para lograr el vacío requerido se utilizó una bomba de vacío marca GAST con presión vacuométrica máxima de 760 mm de Hg la cual es conectada al fondo del molde por medio de un tubo de cobre, el cual funciona como conector y como sistema de enfriamiento, hay que recordar que el molde va a estar trabajando en caliente, el cobre es muy buen conductor térmico por lo que se integró un espiral para que hiciera las veces de disipador de calor (en caso de ser necesario se puede acomodar una estopa húmeda dentro del espiral con lo que se limita el flujo de calor en el sistema), el sistema se presenta en la figura 3.10 .

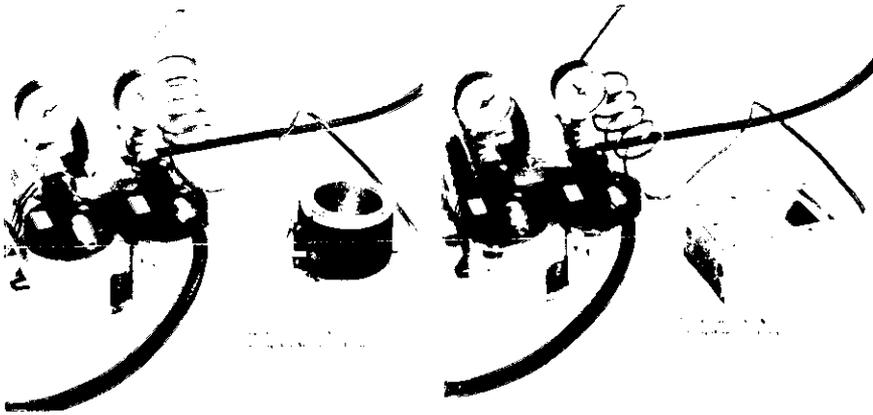


Fig. 3.10 foto Sistema de vacío acoplado al molde

Una vez teniendo el sistema de vacío y de calentamiento se procede a conformar, es importante que tener bien fija la lámina (de lo contrario se tienen fallas en el sellado y por lo tanto en el conformado) lo que causa que la diferencia de presiones sea lo suficientemente grande como para que se conforme nuestra pieza. La presión atmosférica en la ciudad de México es aproximadamente 585 mm de Hg, y la presión máxima obtenida en las pruebas se encuentra alrededor de esos valores (560-570 mm de Hg) por lo que se puede asegurar que se trabajó con toda la carga disponible (si esto se hiciera al nivel del mar sería un poco mejor pues ahí la presión es cercana a los 760 mm de Hg). En la figura 3.11 se muestra el equipo completo con el que se realizaron estas pruebas.

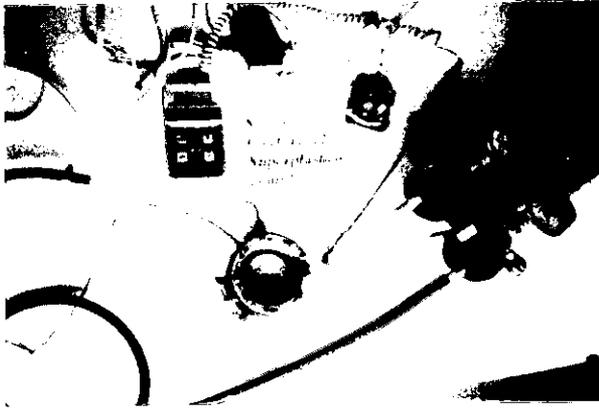


Fig. 3.11 foto Sistema integrado para conformado superplástico de hembra simple a presión atmosférica

Con este sistema se lograron conformar productos terminados, pero presentaba la desventaja de ser un proceso muy lento. Para láminas de un espesores superiores a 1.0 mm se requieren tiempos del orden de horas lo que lo hace totalmente improductivo, aunque este tiempo se reduce conforme se disminuye el espesor y/o aumenta la temperatura nunca llega a ser lo suficientemente rápido como para llamar la atención.

III.3.2.2 RESULTADOS DEL CONFORMADO SUPERPLÁSTICO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Se hicieron pruebas con tres diferentes espesores de lámina para determinar la factibilidad del uso de la presión atmosférica como herramienta de trabajo. Los espesores fueron 0.8, 0.6 y 0.4 mm; lo que se hizo fue reducir la altura del molde circular con unos discos circulares de latón colocados dentro del molde de aluminio, se deja una altura libre (H) de conformado de cuatro centímetros con lo que se tiene una relación $H/D_c = 0.5$ donde D_c es el diámetro original de la lámina a conformar -para el molde circular $D_c = 7.93$ cm-, esta relación H/D es importante pues determina la capacidad del CSP, además de proporcionar información general para determinar la profundidad de conformado que se puede obtener con una aleación a partir del claro disponible (o al contrario, permite determinar el claro necesario para una altura dada de deformación). Se pensó en piezas circulares para que la distribución en el adelgazamiento sea geoméricamente uniforme, ahora bien, es importante determinar la deformación obtenida, para ello se requieren las áreas tanto inicial como final de la lámina, los cálculos se presentan a continuación:

Diámetro inferior de las piezas = $D_i = 7.5 \text{ cm}$

Diámetro del claro inicial = $D_c = 7.93 \text{ cm}$

altura de la pieza conformada = $H = 4 \text{ cm}$

se sabe que $\% \epsilon = [\Delta A / A_0] \times 100$

A_f = área final

y $\Delta A = A_f - A_0$ donde A_0 = área inicial

con las dimensiones de las piezas se calculan A_f y A_0

A_f = área del fondo (A_f) + área de la pared (A_p)

$$A_f = \pi r^2 = \pi (3.75 \text{ cm})^2 = 44.17 \text{ cm}^2$$

$$A_p = \text{perímetro inferior (P)} \times H = \pi (3.75 \text{ cm}) (4 \text{ cm}) = 47.12 \text{ cm}^2$$

$$\therefore A_f = 44.17 \text{ cm}^2 + 47.12 \text{ cm}^2 = 91.29 \text{ cm}^2$$

por otro lado $A_0 = \pi r^2 = \pi (3.96 \text{ cm})^2 = 49.3 \text{ cm}^2$

$$\therefore \% \epsilon = [(91.29 - 49.3) / 49.3] \times 100 = 85.17 \%$$

Todas las piezas se conforman con las mismas dimensiones y lo que interesa obtener son los diferentes tiempos para los diferentes espesores iniciales y la variación de éste a lo largo de la pieza obtenida, dichos tiempos de conformado y los espesores finales obtenidos se presentan en la tabla 3.3, las referencias $H_1, H_2,$ etc... son medidas de acuerdo a la siguiente figura:

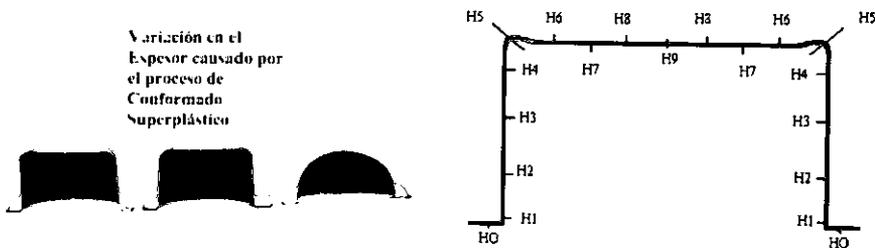


Figura 3.12 Dibujo de como y dónde fueron tomadas las medidas de H

Los resultados se presentan en la tabla 3.2 en donde se anexan los % de reducción del espesor inicial ya que en porcentajes es más fácil determinar las tendencias y generalizar al respecto.

TABLA 3.2

E_0	Presión	tiempo	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}
% de reducción de E_0	0.8 ATM	4'18seg	7%	50%	64%	74%	80%	75%	65%	62%	61%	56%
			0.75	0.40	0.29	0.21	0.16	0.20	0.28	0.30	0.31	0.35
% de reducción de E_0	0.6 ATM	3' min	2%	50%	63%	68%	75%	75%	66%	57%	52%	50%
			0.59	0.30	0.22	0.19	0.15	0.15	0.20	0.26	0.29	0.30
% de reducción de E_0	0.4 ATM	2'11seg	0%	25%	50%	62%	75%	90%	87%	75%	72%	70%
			0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.04	0.05	0.10	0.11	0.12

Como se observa en la tabla 3.2 los tiempos requeridos para el conformado son de minutos, esto pone en desventaja al proceso pues lo hace poco competitivo, hay que aclarar que estas pruebas se hicieron a 230 grados centígrados con lo que se redujeron los tiempos de conformado (la de 0.4 mm por ejemplo se tarda cerca de 14 minutos en conformarse a 180°C), falta monitorear el tamaño de grano y ver su impacto en el tiempo de conformado ya que teóricamente se puede reducir todavía más este último, por lo pronto los tiempos obtenidos al trabajar con presión atmosférica no son muy atractivos si se tienen volúmenes altos de producción, sin embargo para un volumen mediano el proceso podría ser competitivo (ver punto 1.7 en el presente trabajo).

El otro aspecto interesante es la distribución en el espesor del producto terminado, igual que en los procesos de termoformado de polímeros se tienen grandes variaciones y varios métodos se han desarrollado para controlar este fenómeno (ver capítulo I). Como se ve el adelgazamiento es mayor en la parte de las esquinas debido a que ésta es la última parte en conformarse; el espesor en la parte plana inferior de la pieza presenta variaciones, el centro queda más grueso (50-56% de reducción) y se va adelgazando hasta llegar a un máximo de adelgazamiento en orilla (65-66%); la esquina que es lo que se conforma al final es lo que más adelgazado queda (75-80%); las paredes se van adelgazando conforme lo esperado (mayor espesor en las orillas y menores conforme vamos bajando), a dos centímetros de la orilla se tienen reducciones del orden de un 65 %, con lo que sabemos que en este proceso las reducciones en la pared son bastante bruscas. El mayor adelgazamiento registrado fue de 90 % en la lámina de .4 mm de espesor original y se puede concluir que para éste espesor una relación de $H/D=0.5$ es demasiado. En espesores mayores la reducción máxima es de un 75 - 80 % y nuevamente se localiza en la parte que se conforma al último. Se concluye entonces que al trabajar con presión atmosférica como herramienta de trabajo y con relaciones $H/D = 0.5$ se espera una reducción del espesor en el fondo de la pieza de un 50 a 65 % con un tiempo de conformado del orden de minutos.

III.3.3 CONFORMADO SUPERPLÁSTICO CON PRESIÓN DE GAS

Dadas las circunstancias anteriores se planteó hacer pruebas con diferentes presiones. Como resulta mas fácil obtener presiones manométricas altas que vacuométricas mayores a una atmósfera es que se pensó en utilizar gas a presión.

III.3.3.1 SISTEMA DE PRESIÓN

Lo primero que se necesita es la fuente de presión, un tanque de argón industrial funciona muy bien ya que el sistema regulador de presión es muy fácil de instalar y tienen manómetros integrados, en este caso se usó un regulador comercial para argón. Para integrarlo a los moldes se realizaron conexiones con tubos de acero inoxidable y una manguera especial para tanques presurizados, tanto el sistema de presión como el acoplamiento al molde se muestra en la figura 3.13

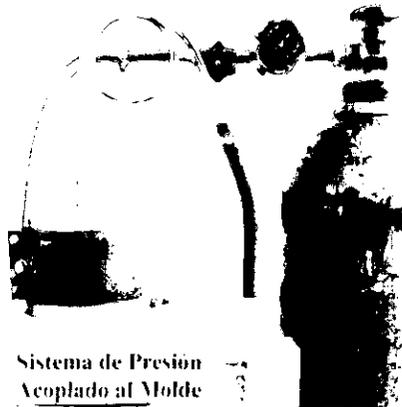


Fig. 3.13 -Sistema para conformado superplástico de hembra simple con argón a presión como herramienta de trabajo.

Con este sistema se lograron obtener productos terminados en un tiempo mucho menor (de 25 a 60 segundos) con lo que se presenta la oportunidad de llamar la atención de la industria.

III.3.3.2 RESULTADOS DEL CONFORMADO SUPERPLÁSTICO CON PRESIÓN DE GAS

De forma análoga a las pruebas de vacío se tomaron tres espesores, se conformaron nuevamente con un 85.17 % de deformación a 230°C y se hicieron las medidas correspondientes agrupándose éstas en la tabla 3.3 .

TABLA 3.3

E_0	Presión	tiempo	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9
% de reducción de E_0	12%	12%	31%	62%	75%	81%	72%	62%	56%	44%		
0.8	200kPa	59 seg.	0.70	0.70	0.55	0.30	0.20	0.15	0.22	0.30	0.35	0.45
% de reducción de E_0	2%	17%	47%	63%	75%	80%	75%	70%	65%	58%		
0.6	200kPa	40 seg	0.59	0.50	0.32	0.22	0.15	0.12	0.15	0.18	0.21	0.25
% de reducción de E_0	12%	25%	50%	67%	75%	85%	75%	72%	62%	57%		
0.4	200kPa	25 seg	0.35	0.30	0.20	0.13	0.10	0.06	0.10	0.11	0.15	0.17

Aquí los tiempos son realmente interesantes pues al tener piezas en 20 a 60 segundos podemos interesar a la industria, nuevamente más investigaciones se requieren ya que como veremos en el punto III.3.5 el incrementar la presión por arriba de los 200 kPa tiene consecuencias interesantes. Digna de mención es la diferencia entre los espesores iniciales y H_0 , esta zona de la lámina en donde se mide H_0 (ver figura 3.12) está sometida a compresión en todas las pruebas pero cuando se utiliza presión de gas debe estar bien apretada para evitar que el gas escape, dadas estas condiciones la lámina se llega a deformar ligeramente como se reporta en las tablas.

Nuevamente como se esperaba el mayor adelgazamiento se presentó en las partes que se conforman al final, en este caso la esquina de las piezas presentaron reducciones del orden del 80 -85 %; en el fondo plano las variaciones son muy considerables, en el centro tienen un promedio de un 53 % de deformación mientras que en la orilla (sobre lo plano) el promedio es de 74%; por su parte en las paredes el adelgazamiento varía de espesor a espesor pero al llegar a H_3 los porcentajes (promedio de 64%) se uniformizan y se mantienen así hasta H_7 , en donde empiezan a variar. Nuevamente en la lámina de 0.4 mm se encuentra un adelgazamiento máximo de un 85 % por lo que no se recomienda su uso en conformados de hembra simple normal para deformaciones con una relación $H/D=0.5$ o mayores. En este caso se esperan tiempos de conformado del orden de segundos con reducciones en el espesor del fondo plano del 50 al 75 %

(lo más grueso en el centro y disminuyendo hacia el extremo), por su parte las reducciones de la pared son paulatinas.

Los tiempos requeridos para conformar con gas son realmente atractivos, los moldes anteriormente utilizados presentaban desventajas en el cerrado y sellado por lo que se mandó maquinar otro molde con mejoras, con este nuevo molde apenas se está empezando a experimentar, pero las pruebas preliminares han dado muy buen resultado, la siguiente figura muestra las primeras pruebas.

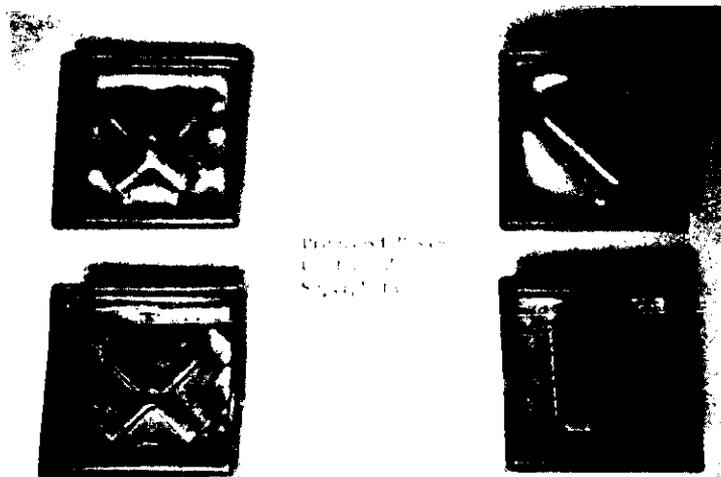


Figura 3.13a).- Fotografía de las primeras fallas en CSP.

Como este proceso tiene posibilidades reales de poder interesar a algún industrial se realizaron estudios sobre el comportamiento microestructural de la aleación al momento de conformarse superplasticamente, para ello se tomaron fotografías de la microestructura en la pared y el polo conformados y se compararon con la obtenida por fundición y laminación, estas fotografías se muestran en la figura 3.13b) .

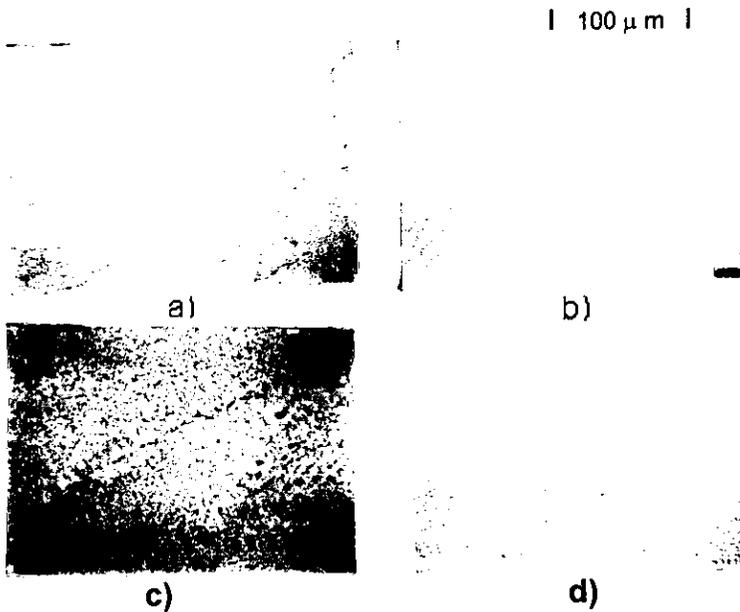


Fig.3.13b)Fotografías tomadas a una amplificación de 500x
 a)Fundición homogeneizada 72 hrs.
 b)mismo material laminado hasta el espesor de conformado
 c)Figura mismo material conformado (en la pared)
 d)mismo material conformado (en el polo)

Al comparar la fotografía de la lámina a conformar (foto b en la figura 3.13b) con la del material conformado (fotos c y d) se observa un crecimiento en el tamaño de grano, sin embargo se conserva un tamaño pequeño con lo que se puede esperar buenas propiedades en nuestro producto terminado (con un pequeño pulido se obtiene una superficie sin rugosidades debido a esta microestructura); por otro lado la densidad granular de Zn (son los puntos más oscuros) cambia de acuerdo a la geometría del producto terminado, presentándose una menor densidad de Zn en la parte del polo (foto d) que en la parte de la pared (foto c), para estas fotos en particular se tomó una pieza conformada en domo y se partió por la mitad (ver pieza derecha de la foto fig3.12) tomando dos muestras, en el mero polo y en lo más pegado a la parte superior (entre H_1 y H_2 - ver fig3.12-) y se puede determinar por simple inspección que la densidad granular de Zn va disminuyendo al tiempo que se va adelgazando la lámina por efecto del conformado superplástico. En este sentido se requieren más pruebas para ir monitoreando la microestructura al momento de conformarse pues estas variaciones en la densidad bien pueden tener consecuencias en el CSP, un estudio a fondo sobre las fallas en el CSP podría dar información de este tan importante problema.

III.3.4 COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS

Para poder realizar la comparación de los procesos se presentan las tablas 3.2 y 3.3 en una sola 3.4, la cual se muestra a continuación:

TABLA 3.4

E ₀	Presión	tiempo	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉
0.8	ATM	4'18seg	0.75	0.40	0.29	0.21	0.16	0.20	0.28	0.30	0.31	0.35
0.8	200kPa	59 seg	0.70	0.70	0.55	0.30	0.20	0.15	0.22	0.30	0.35	0.45
0.6	ATM	3' min	0.59	0.30	0.22	0.19	0.15	0.15	0.20	0.26	0.29	0.30
0.6	200kPa	40 seg	0.59	0.50	0.32	0.22	0.15	0.12	0.15	0.18	0.21	0.25
0.4	ATM	2'11seg	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.04	0.05	0.10	0.11	0.12
0.4	200kPa	25 seg	0.35	0.30	0.20	0.13	0.10	0.06	0.10	0.11	0.15	0.17
0.5												

Es evidente la ventaja que se obtiene en el tiempo al momento de utilizar gas a presión, en ese sentido se debe tener bien presente que el uso de argón es realmente opcional, se puede utilizar aire comprimido obtenido de un compresor cualquiera, la inversión requerida no es muy grande y por el contrario los ahorros en tiempo que se obtienen son realmente interesantes.

Respecto a la variación en el espesor se ve que en el fondo plano se logra un espesor más uniforme al utilizar presión atmosférica que gas a presión, sin embargo parece que se conservan espesores mayores en la pieza final al usar presión de gas. En las paredes resulta al contrario, al usar gas a presión la reducción en el espesor se da más uniforme mientras que con presión atmosférica las reducciones son más bruscas (ver H₁-H₄ en la tabla 3.4). En ambos sistemas el máximo adelgazamiento se da en las esquinas y es relativamente igual para los dos sistemas. Así si el tiempo no es muy importante podemos utilizar presión atmosférica al querer un fondo uniforme o presión de gas si lo que interesa es la pared.

Para poder dar por terminada la comparación de los procesos es necesario comparar la microestructura, para ello se tomaron fotografías con el MEB del IIM de los polos de dos piezas conformadas superplasticamente una con presión de gas y otra con presión atmosférica, ambas se muestran a continuación:

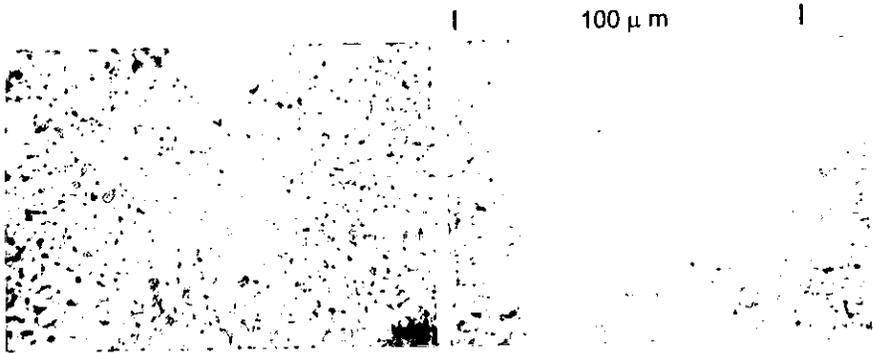


Figura 3-13c).- Fotografías obtenidas con un microscopio electrónico de barrido a una amplificación de 1000x, a la izquierda conformado con presión atmosférica, derecha con gas a presión.

Como se puede observar el conformar con una u otra presión no tiene un impacto significativo en la microestructura de la aleación.

III.3.5 ANALISIS DE LA PROFUNDIDAD DE DEFORMACIÓN EN FUNCION DEL DIÁMETRO

Tener información básica acerca del comportamiento de cierta aleación a la hora de conformar es de gran importancia al momento de llevar los procesos a un nivel industrial, en ese sentido el saber que tanta profundidad de deformación se puede obtener en función del claro de lámina disponible es de gran utilidad pues permite dar un aproximado tanto del claro requerido para cierta pieza en particular como de la complejidad que pueda obtenerse a partir de un dispositivo ya instalado.

Viendo esta necesidad se planteó un experimento que nos diera este tipo de información utilizando los elementos ya existentes, así se mando maquinar una placa de acero con círculos internos de diferentes diámetros que se acoplara al molde circular. Como el claro de lámina estaba limitado al claro del molde se inscribieron cinco círculos con diámetros de 11.9, 16.0, 24.1, 32.1, 40.2 mm.

El procedimiento consistió en realizar conformados de los tres diferentes espesores estudiados a diferentes temperaturas y presiones; el tiempo de conformado para un grupo de láminas (tres espesores de lámina a la misma P y T) lo delimita el conformado de 0.4 mm de espesor pues es la que más rápido falla, para que las pruebas sean comparativas los otros dos espesores se prueban con el mismo tiempo con el que falló la primera. Una vez realizada la prueba se miden las respectivas profundidades máximas de deformación (H) medidas de la

posición original da la lámina al polo de la esfera formada. Dos ejemplos de los conformados obtenidos se muestran en la figura 3.14.

Conformado a diferentes Diámetros



Figura 3.14 Conformado de diferentes diámetros. Al conformar con esta forma se garantiza el tener las mismas condiciones de microestructura, temperatura, presión y tiempo de conformado para cada uno de los cinco diferentes diámetros en cuestión.

Estos valores de profundidad de deformación en función del diámetro original de un espesor dado a T y P constante se agrupan en la tabla 3.5 la cual se presenta en dos partes a continuación:

TABLA 3.5

Diámetro (mm)	0.8-130°C	0.6-130°C	0.4-130°C	0.8-190°C	0.6-190°C	0.4-190°C
	P.= atm (mm)					
11.9	2.00	1.90	2.20	3.05	2.55	2.80
16.0	2.95	2.80	3.10	4.00	3.70	4.30
24.1	4.55	4.50	5.45	7.20	7.00	8.40
32.1	6.70	6.60	8.65	11.20	12.00	15.00
40.2	9.10	9.30	14.05	18.60	21.05	41.00

Diámetro (mm)	0.8-235°C	0.6-235°C	0.4-235°C	0.8-200°C	0.6-200°C	0.4-200°C
	P.= atm (mm)	P.= atm (mm)	P.= atm (mm)	P=200kPa (mm)	P=200kPa (mm)	P=200kPa (mm)
11.9	3.45	3.50	3.30	2.90	3.00	3.10
16.0	4.70	5.35	4.90	3.90	4.40	4.70
24.1	9.10	9.65	9.70	6.65	8.60	9.50
32.1	16.30	19.30	17.40	10.00	13.20	15.20
40.2	30.40	30.00	39.50	16.50	21.50	33.70

Diámetro (mm)	0.8-230°C	0.6-230°C	0.4-230°C	0.8-190°C	0.6-190°C	0.4-190°C
	P=200kPa (mm)	P=200kPa (mm)	P=200kPa (mm)	P=400kPa (mm)	P=400kPa (mm)	P=400kPa (mm)
11.9	3.80	3.70	3.60	3.50	3.50	3.50
16.0	5.60	5.45	5.20	5.08	5.10	5.05
24.1	10.60	10.05	9.60	9.50	9.00	9.75
32.1	17.90	17.30	16.40	16.10	16.10	17.10
40.2	37.40	35.50	-	36.00	30.90	33.15

Una vez con los datos agrupados no queda más que graficarlos, para ello se agruparon en una misma gráfica los comportamientos de los tres diferentes espesores conformados bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y tiempo. Al estudiar las gráficas se puede tener una idea de la tendencia de la misma y así poder hacer estimados basados en extrapolaciones de éstas. Estas gráficas se presentan a continuación:

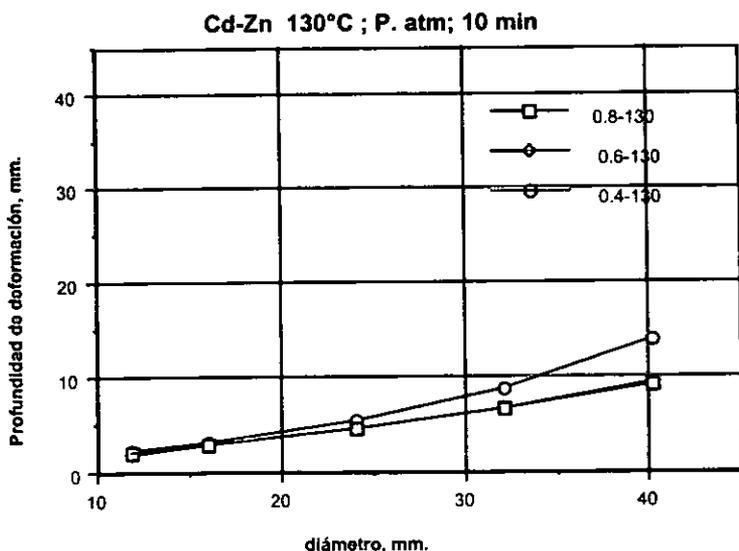


Figura 3.15.- Gráfica de 3 espesores diferentes a presión atmosférica y 130°C.

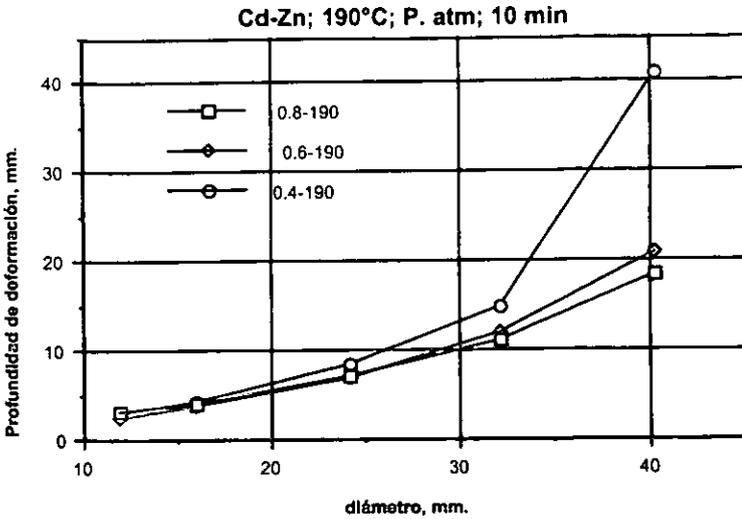


Figura 3.16.- Gráfica de 3 espesores diferentes a presión atmosférica y 190°C.

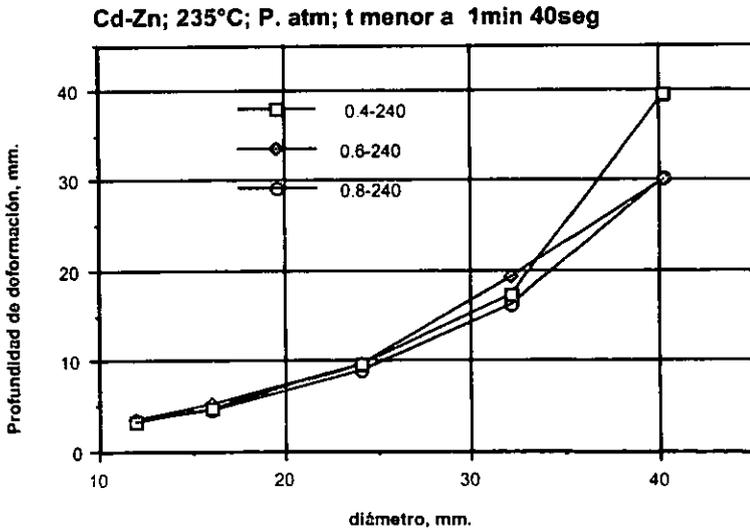


Figura 3.17.- Gráfica de 3 espesores diferentes a presión atmosférica y 235°C.

Los primeros tres grupos de pruebas realizadas (fig. 3.15-3.17) se llevaron a cabo con presión atmosférica a tres diferentes temperaturas, la primera fue a 130 °C y se paró a los 10 minutos obteniendo valores de deformación muy

pequeños; se elevó la temperatura a 190 °C y probamos por otros 10 minutos, ahora las deformaciones fueron mayores; se incrementó la temperatura a 235°C y falló (se rompió) al minuto con 40 segundos, si bien la altura de deformación obtenida a 190°C para el diámetro más grande fue poco mayor que a 235°C (esta variación no pasa el 4%) el tiempo de conformado se redujo drásticamente por lo que se decidió hacer las pruebas con presión de gas a 200 y 230 grados centígrados omitiendo la de 130.

Cd-Zn; T=200°C;P=200kPa;t=1min

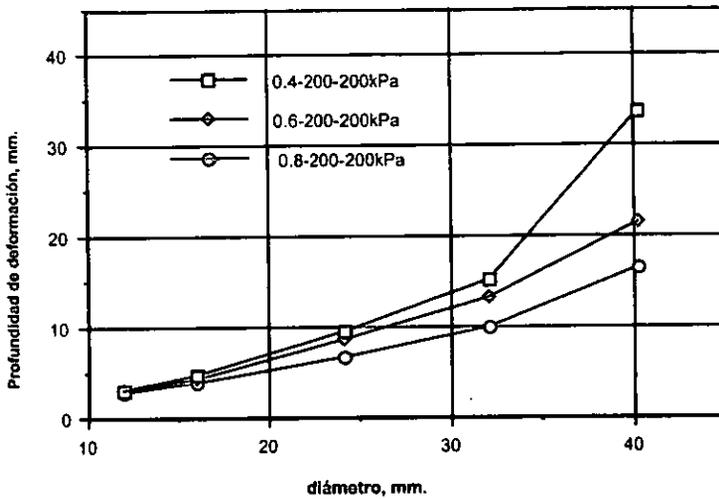


Figura 3.18.- Gráfica de 3 espesores diferentes a P=200 kPa. y 200°C.

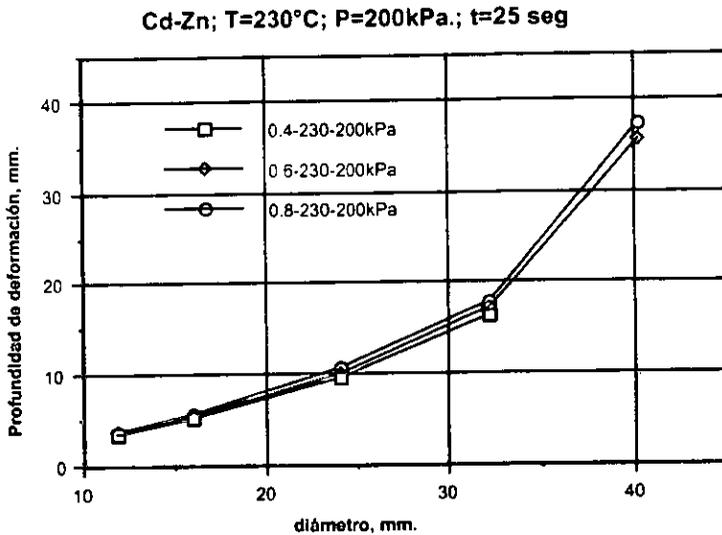


Figura 3.19. Gráfica de 3 espesores diferentes a P=200 kPa. y 230°C.

Como se puede observar en las gráficas de las figuras 3.18 y 3.19 el utilizar un gas a presión como herramienta de trabajo tiene como consecuencia la disminución en el tiempo de falla de la lámina delgada (hay que recordar que estos grupos de pruebas tienen un tiempo de conformado determinado por la lámina de 0.4 mm de espesor debido a que es la que más rápido falla) y del tiempo necesario para lograr deformaciones similares a las logradas con presión atmosférica en los otros espesores. Para el caso de las pruebas de 200°C las deformaciones obtenidas con presión de gas fueron menores para el caso de 0.8 mm de espesor, para la de 0.6mm de espesor fueron mayores y en el caso del 0.4 fueron combinadas (en algunos diámetros aumento y en otros disminuyó), sin embargo en la de 230°C el resultado fue incrementar la altura de deformación obtenida en todos los casos, a la gráfica de la figura 3.19 le faltan valores pues el domo grande de la prueba de 0.4mm de espesor no se pudo recuperar, se hicieron varios intentos y en todos se desprendía violentamente y era imposible realizar la medición.

Al comparar las gráficas 3.18 y 3.19 podemos ver claramente como el incrementar la temperatura de conformado hace la familia de gráficas más compactas y con un comportamiento exponencial -a mayor diámetro (o claro disponible o requerido) tenemos cada vez mayor profundidad -; por otra parte se presenta un fenómeno esperado a lo largo de todo el desarrollo de estas pruebas, en todas las pruebas anteriores la altura máxima de deformación se obtenía con

el espesor de 0.4 mm algo que se explicaba fácilmente: entre más delgado menos resistencia y más deformación, o al menos es más fácil deformar, pero eso quería decir que no se estaba haciendo uso pleno del mecanismo superplástico de deformación como se comprobó con las pruebas a 230°C y 200kPa; la altura de deformación obtenida con la lámina de 0.4 fue menor que las obtenidas con la de 0.6 mm y esta a su vez también fue menor que la de 0.8 mm, bajo estas circunstancias - y considerando todas las pruebas anteriores - podemos afirmar que la temperatura de conformado ideal se encuentra entre 230 y 240 grados centígrados, al trabajar con ella se puede dejar de pensar en cual lámina se conforma más fácil (todos los espesores probados se conforman extremadamente fácil) y empezar a pensar en cómo lograr las máximas deformaciones y las formas más complejas.

Cd-Zn;190°C;P=400KPa.; menos de 25 seg

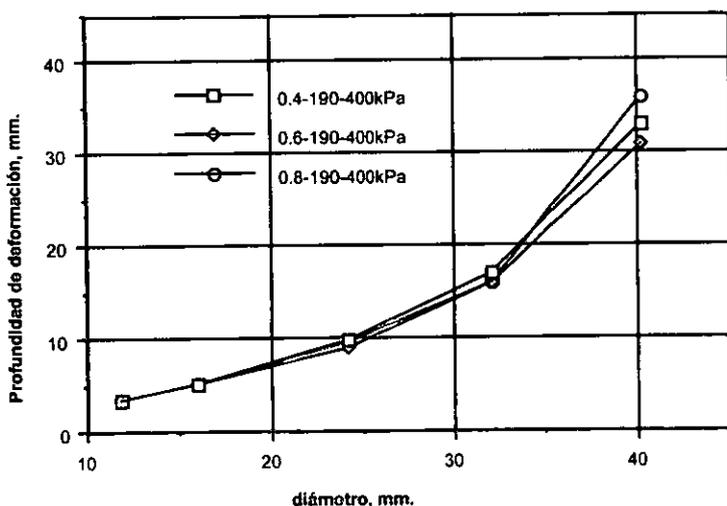


Figura 3.20.- Gráfica de 3 espesores diferentes a P=400 kPa. y 190°C.

Como ya se había determinado las consecuencias de incrementar la presión a 200kPa con muy buenos resultados se pensó en incrementarla a 400 kPa, teniendo como principal consecuencia una disminución aún mayor en el tiempo de conformado (más de la mitad) además de incrementar las alturas de deformación en más de un 100% en las láminas de 0.8 mm de espesor y en un 50% en las de 0.6, en las de 0.4 el resultado fue invertido, parece que para este espesor 400kPa son demasiados y falla antes de poderse deformar.

En base a los resultados obtenidos en esta serie de pruebas se puede generalizar cierto comportamiento: todas las pruebas tienen la característica de presentar la mayor deformación en los claros con mayor diámetro, un comportamiento parecido al de tensión de línea, en donde la fuerza requerida para curvar una cuerda que se encuentra a una tensión conocida entre dos puntos es inversamente proporcional a la distancia de separación de estos últimos, la tensión de superficie presenta un comportamiento similar (ver gráficas 3.15 a 3.20) ya que parece ser que la fuerza requerida para deformar un claro de lámina inscrito en una circunferencia dada es inversamente proporcional al área del claro original, esto se ve claramente al tener las máximas deformaciones en donde se tienen los diámetros más grandes, aquí la comparación es directa, estamos haciendo las pruebas a una carga constante en los diferentes diámetros - el CSP es simultáneo- y la manera de inferir es por la deformación obtenida, a mayor diámetro mayor deformación con la misma carga. Si bien para poder modelar este comportamiento de una manera formal debemos realizar todo un modelado matemático nos permitimos presentar las siguientes expresiones que generalizan el presente análisis:

$$\varepsilon \propto A \qquad F \propto \frac{1}{A}$$

donde ε = deformación; A = Área del claro inicial
 y F = fuerza requerida para lograr la deformación

Dadas estas circunstancias quedan sentadas las bases para seguir investigando ahora con mayores espesores y presiones, el objetivo se ha cubierto, queda comprobada la viabilidad de los procesos de conformado superplástico, estudios específicos de diferentes procesos se realizarán en los años venideros.

III.3.6 PRODUCTOS TERMINADOS

A lo largo de todo el desarrollo anteriormente descrito se fueron obteniendo diferentes piezas que se pueden considerar productos terminados, incluso en una participación que se tuvo dentro de un certamen nacional de ciencia y tecnología a finales del 96 se estuvieron regalando piezas con diferentes estampados los cuales se conformaban en el momento y se copiaba la forma de unos alambres previamente arreglados en forma de perros, como al evento asistían primarias fue muy buen detalle y se ilustraba muy bien la versatilidad del proceso; en otros casos se probaron moldes en yeso obteniendo buenos resultados, en la figura 3.21 y siguientes se ilustran algunos de estos ejemplos.

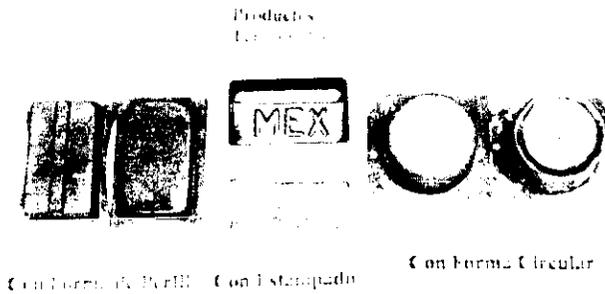
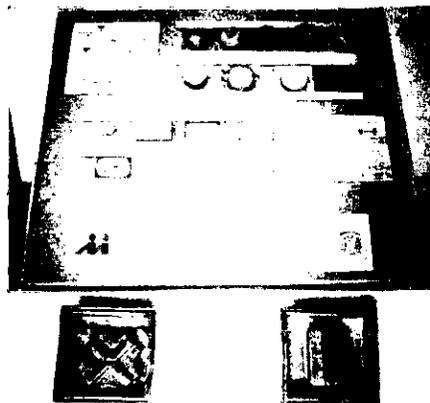


Figura 3.21.- Fotografía de varios productos terminados



3.4 ASPECTOS ECONÓMICOS

3.4.1 COSTOS DEL CSP

Al momento de evaluar económicamente el CSP hay que tener presentes todos los costos involucrados en el proceso para después poder inferir el costo por pieza, viendo estas necesidades se propone una ecuación que toma en cuenta dichos costos y la cual permite inferir el costo por pieza. La ecuación y el desarrollo de la misma se presenta a continuación.

$$\text{Sea} \quad C_T = C_{MC} + C_M$$

donde

$$C_T = \text{costo total}$$

$$C_{MC} = \text{costo de material crudo (procesamiento primario)}$$

$$C_M = \text{costo de manufactura (procesamiento secundario)}$$

A su vez los costos de procesamiento secundario y primario implican consideraciones independientes, a saber:

$$C_{MC} = C_D + C_P$$

donde

$$C_D = \text{costo de desarrollo; es fijo e implica desarrollo de materiales y/o pago de la patente más el costo de la caracterización y/o certificación legal del producto terminado (\$).}$$

$$C_P = \text{costo de producción; en donde se involucran los procesos de producción del material sin conformar es decir transformación del lingote en lámina o en tocho dependiendo del caso, más el costo de la materia prima (\$ por kilo).}$$

Del mismo modo

$$C_M = C_{MP} + C_F$$

donde

$$C_{MP} = \text{costo de moldes y equipos periféricos; es fijo y debe atender a la forma, tamaño, materiales utilizados para el molde y el proceso de fabricación de los mismos (\$).}$$

C_f = costo de fabricación; depende de la cantidad de piezas a conformar y se obtienen de los costos de consumo de energía (ΔT y ΔP) así como de la mano de obra utilizada, los cuales a su vez están en función del tiempo de conformado (\$ por unidad de tiempo).

Teniendo todos esto en cuenta se puede proponer una ecuación para determinar el costo por pieza conformada, a saber:

$$C_{TP} = (C_C + C_{MP} / \# \text{ pzas.}) + C_P (W_p) + C_f(t_p)$$

donde

C_{TP} = costo total por pieza

W_p = peso de cada pieza

t_p = tiempo requerido para conformar una pieza.

Hay que aclarar que tanto C_D como C_{MP} son amortizados en el corto o largo plazo con lo que los costos totales después de logrado esto son sensiblemente menores.

3.4.2 EL NICHU ECONÓMICO DEL CSP

Al analizar el CSP se encuentran tres cosas fundamentales asociadas a los costos:

- La materia prima es primordialmente material en lámina que resulta relativamente cara,
- esta debe ser conformada relativamente lento (el hacerlo más rápido actualmente implica un costo de materia prima superior),
- los moldes y herramientas requeridos son relativamente baratos.

Dadas estas condiciones podemos identificar el nicho tecnoeconómico del conformado superplástico mediante la siguiente gráfica⁴:

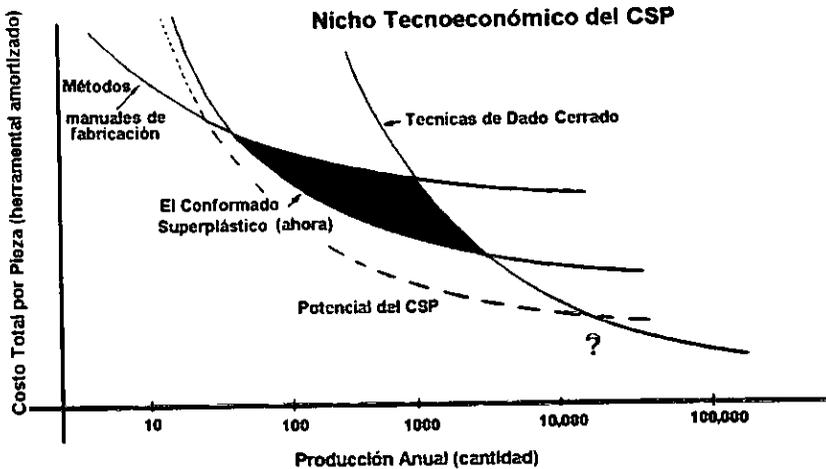


Fig. 3.23 Nicho tecnoeconómico de los procesos de conformado superplástico de lámina

Por último se presenta una tabla publicada por Barnes (100) en 1994 en donde se comparan los precios de diferentes aleaciones de aluminio superplásticas con acero rolado, ya que nos da una idea de que tanto más caro puede ser la materia prima.

	Dólares/libra	normalizado por unidad de volumen	normalizado a la misma rigidez
Acero rolado	0.28	1.0	1.0
Aluminio en tira (5052)	1.15	1.4	2.0
SP 5083 lámina	3.5	4.3	6.2
SP 2004	5.0	6.5	9.4
SP 7475	11.0	14.0	20.2
SP 8090	16.0	19.0	27.0
SP MMC "=\$"	30+	37.0	47.0

Fig.3.24.-Tabla publicada por Barnes (100).

⁴ Si bien estos datos son presentados por Barnes en 1994 para piezas de aluminio específicamente, bien son válidos para todos los materiales y procesos de conformado superplástico (100).

3.5 CONCLUSIONES

Acerca de la aleación Cd-17.4Zn concluimos que:

- La fuerza requerida para deformar un claro de lámina inscrito en una circunferencia dada es inversamente proporcional al área del claro original.
- Dado lo anterior se tiene que para copiar pequeños detalles del fondo en una pieza compleja las presiones a utilizar deben ser considerablemente mayores al del conformado inicial (ya que ahí se tienen claros de conformado muy pequeños) por lo que en esos casos se debe dar un incremento de presión por unos segundos al final del conformado.
- La temperatura óptima de conformado es de 0.93 a 0,95 de la temperatura de fusión en escala absoluta (para este caso 230-240 °C) con ésta se han podido obtener relaciones $H/D > 1$ y conviene probar cualquier otra aleación a estas temperaturas (queda comprobado que el 0.5 de la temperatura de fusión es para que se presente la propiedad superplástica pero de ninguna manera es la óptima para el conformado).
- Presiones de 200 y 400 KPa son adecuadas para conformar lámina con espesor de 0.6 y 0.8 mm; para espesores de 1.0 y superiores se ha probado con 650kPa y ha dado buenos resultados, relaciones de deformación del orden de $H/D=0.5$ son excesivas para espesores de 0.4 y menores y en espesores mayores podemos esperar una reducción en el fondo del orden del 50-60 %
- El índice de sensibilidad a la rapidez de deformación (m) es de 0.70 a 130 grados centígrados

Al respecto de los procesos de CSP en general se tiene que:

- El utilizar un gas a presión como herramienta de trabajo (o en su defecto la presión atmosférica) es totalmente factible, la viabilidad del uso de procesos de termoformado (para conformado de polímeros) para conformar metales superplásticos ha quedado demostrada.
- Los moldes que se utilizan para estos procesos de conformado no requieren acabados especiales ya que no están sometidos a desgaste.
- Los equipos y moldes requeridos para empezar una industria de conformados superplásticos que partan de lámina son relativamente (y

comparativamente) más baratos que su equivalente de manufactura convencional.

- Dadas todas estas circunstancias podemos concluir que el explotar industrialmente el conformado superplástico es una verdadera oportunidad para países con pocos recursos.

Del **trabajo** en si se concluye que:

- Queda cubierto el objetivo ya que se comprobó la viabilidad de los procesos de conformado superplástico al tiempo que se optimizaron las variables del proceso.
- Es vital para cualquier país que quiera ser competitivo internacionalmente en el área metal-mecánica el contar con desarrollo y producción de aleaciones superplásticas nacionales, así como de los procesos de conformado superplástico involucrados,
- el presente trabajo es una buena contribución en ese sentido al ser una de las pocas publicaciones en castellano que tratan el tema de la superplasticidad.
- La metodología planteada en la parte experimental del presente es una buena base para obtener nuevas aleaciones superplásticas, optimizar las variables del proceso y caracterizar el proceso de conformado de éstas.

CITAS TEXTUALES Y REFERENCIAS CAP. I

- (1) - TORRES-VILLASEÑOR Gabriel, en "La revolución metalúrgica que viene los superplásticos", en *Tecnindustria*, CONACYT México dic - ene 1994 número 13 p 50
- (2) - PADMANABHAN, K.A. y DAVIS, G.J. *Superplasticity-Mechanical and structural Aspects Environmental Effects, Fundamentals and Applications* Alemania: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1980 312 pp p 227
- (3) - P'LLING, John y RIDLEY, Norman. *Superplasticity in crystalline solids* Inglaterra. The Institute of Metals. 1989 214 pp p 160
- (4) - SHERBY, O.D. y WADSWORTH, J. "Observations on Historical and Contemporary Developments in Superplasticity" 1990 ref (5) pp 3-14, p 3
- (5) - *Superplasticity in Metals, Ceramics and Intermetallics*. Memorias del simposium con el mismo nombre, abril 16-19 1990, San Francisco California, USA, editado por Memliea J. Mayo Masaru Kobayashi y Jeffrey Wadsworth, Materials Research Society vol. 196, 401 pp
- (6) - BENGOUGH, G.D., "A Study of the Properties of Alloys at High Temperatures", *J. Inst. Metals* 7 (1912), pp 123-174
- (7) - JENKINS, C.H.M. "Strength of Cd-Zn and Sn-Pb Alloy Solder", *J. Ins. Metals*, 40 (1928), pp 21-32
- (8) - PEARSON, C.E., "Viscous Properties of Extruded Eutectic Alloys of Pb-Sn and Bi-Sn" *J. Inst. Met.*, 54 (1934), pp 111-123.
- (9) - Op cit PADMANABHAN y DAVIS, p 1
- (10) - Op cit SHERBY y WADSWORTH, p 4
- (11) - NOVIKOV I.I. "50-TH Anniversary of Russian Investigations on Superplasticity" 1994 ref (19) pp 3-12 p 4
- (12) - UNDERWOOD, E.E., "A Review of Superplasticity and Related Phenomenon", *J. Metals*, 14 (1962), pp 914-919.
- (13) - BACKOFEN, W.A.; TURNER, I.R. y AVERY, D.H., "Superplasticity in an Al-Zn Alloy", *Trans. ASM*, 57 (1964), pp 980-990
- (14) - Op cit SHERBY y WADSWORTH, p 6
- (15) - *Superplastic Forming of Structural Alloys*; memorias del primer simposium internacional sobre superplasticidad, junio 21-24 1982, San Diego, California USA, editado por N.E. PATON y C.H. HAMILTON, The Metallurgical Society of AIME, 414 pp.
- (16) - *Superplasticity - Superplasticité*, memorias del segundo congreso internacional sobre superplasticidad, septiembre 16-19 1985 Grenoble Francia, editado por B. BAUDELET y M. SUERY, Centre National de la Recherche Scientifique
- (17) - *Superplasticity and Superplastic Forming*; memorias del tercer congreso internacional sobre superplasticidad, agosto 1-4 1988, Blaine Washington editado por C. Howard Hamilton y Neil E. Paton, T.M.S., 706 pp
- (18) - *Superplasticity in Advanced Materials*, memorias del cuarto simposium internacional en superplasticidad, junio 3-6 1991, Osaka, Japón, editado por Shigenori Hori, Masaharu Tokizane y Nono Furushiro, Japan Society for Research on Superplasticity, 857 pp.
- (19) - *Superplasticity in Advanced Materials ICSAM-94*, memorias del quinto simposium internacional en superplasticidad mayo 24 - 26 1994, Moscú, Rusia, editado por Terence G. Langdon, Trans Tech Publications, 803 pp
- (20) - *Superplasticity in advanced Materials ICSAM-97*, memorias del sexto simposium internacional en superplasticidad enero 29-31 1997, Bangalore, India 1997, editado por Atul H. Chokshi Trans Tech Publications, 790 pp
- (21) - Op.cit. SHERBY y Wadsworth en la ref (4) p 10
- (22) - LAYCOCK, D.B., en "Superplastic forming of sheet metal", 1982 ref (15), pp.257-272, p 258
- (23) - Op cit PADMANABHAN y DAVIS capítulo 5
- (24) - Ibid capítulo 3
- (25) - SHERBY, O.D. y RUANO, O.A. en "Synthesis and Characteristics of Superplastic Alloys", 1982 ref (15), pp.241-254 p 245.
- (26) - WERT, Jhon A. en "Grain Refinement and Grain Size Control", 1982 ref (15), pp 69-83
- (27) - Ibid, p 69.
- (28) - SMIRNOV, O.M., en "Superplasticity of metals: Phenomenology Based on Rheological Properties and Structural Dynamics" 1997 ref (20) p 447
- (29) - NIEH, T.G. WADSWORTH, J., y HIGASHI, K., en "High Strain Rate Superplasticity in Metals and Composites" en *Advanced Materials '93, III B Composites, Grain Boundaries and Nanophase Materials*, editado por M Sakai et al. Trans Mat Res. Soc. Japan Volume 16B, 1994, p 1027
- (30) - BIELER, T.R. MISHRA, R.S. y MUKHERJEE, A.K., en "High-Strain-Rate Superplasticity in Aluminum-Matrix Composites" en *JOM* febrero de 1996 pp 52-60 p 53

- (31) - MORENO RAMOS, Jose Emilio, *Propiedades Mecánicas de Aleaciones Superplásticas del Sistema Cd-Zn*. Tesis. Facultad de Ciencias. UNAM México 1988. 74 p., p.12
- (32) - *ibid* p 13
- (33) - Op cit. PILLING & RIDLEY, ref (3), capítulo II
- (34) - RIDLEY, N y HAMMOND, C en "Development of Superplastic Behaviour in Various Commercial Materials". 1988 ref (17) pp 365-376 p.368
- (35) - HIGASHI, K., en "Deformation Mechanism of Positive Exponent Superplasticity in Advanced Aluminum Alloys With Nano or near-Nano Scale Grained Structures", 1994 ref. (19) pp 131-140, p. 132.
- (36) - CHANDRA, N., "Industrial Applications of Superplasticity-a Vision of the Future".1997 ref. (20) pp 643-652.p 648.
- (37) - Op cit. SHERBY & WADSWORTH, ref. (4), p. 9.
- (38) - Op cit. RIDLEY & HAMMOND ref. (34), p. 369.
- (39) - RIDLEY, N en "Superplasticity in Iron-Base Alloys" 1982 ref (15), pp 191-207
- (40) - WALSER, B. y RITTER, J. en "Superplasticity in IRON-BASE ALLOYS". 1985 ref (16) 15.1 - 15.18
- (41) - WARD, D N., en "Superplastic Forming Stainless Steel Sheet", 1982 ref (15), p. 373.
- (42) - Op cit. PILLING y RIDLEY, ref (3), p.41.
- (43) - MERRICK, H. F. en "Superplasticity in Nickel-Base Alloys". 1982 ref (15), pp 209-223 p.209
- (44) - Op cit. PILLING & RIDLEY, ref (3), p. 47
- (45) - LANGDON, T.G., en "Superplasticity and Superplastic Forming Applications in Zn-Al alloys", en *Recent advances in Science, Technology and Applications of Zn-Al Alloys* memorias del tercer congreso internacional en aleaciones Zn-Al, editado por G. Torres-Vilaseñor, C. Peña-Barba, y Yachua Zhu. IIM UNAM, México marzo 29-30 de 1994, pp 177-182.
- (46) - DUNWOODY, B. J., STRACEY, R.J. y BARNES, A.J., en "Mechanical Properties of 5083 SPF After Superplastic Deformation", 1990 referencia (5) pp. 161-166
- (47) - BARNES, A.J., en "Superplastic Forming of Aluminum Alloys", 1994 ref (19) pp. 701-714, p 704
- (48) - Op cit., NOVIKOV, 1994 ref (11), p. 8
- (49) - OSADA, K. y YOSHIDA, H., en "Recent Applications of Superplastic Materials in Japan" -1994 ref. (19) pp.715-724. - p. 716.
- (50) - *ibid*, página 718
- (51) - ROLLAND, Bruno en "SPF-DB Applications for Military Aircraft", 1988 ref (17) pp 601-612.
- (52) - Op cit. CHANDRA, ref. (36), p.647

CITAS TEXTUALES Y REFERENCIAS CAP.II

- (53) - WINKLER, P.J en "Superplasticity in use: a Critical Review of its status, trends and limits" 1990 ref (5) pp 123-136, p. 128.
- (54) - Op cit. LAYCOCK, 1982 ref (22), p. 269
- (55) - Op cit. PADMANABHAN & DAVIS, 1980 ref (2) p 231
- (56) - Op cit. WINKLER, P.J., 1990 ref (53), p. 124
- (57) - Op.cit. PILLING & RIDLEY, 1989 ref.(3), p. 162.
- (58) - Op.cit. PADMANABHAN & DAVIS, p. 232.
- (59) - Op.cit. PILLING & RIDLEY, p. 163.
- (60) - Op.cit. PADMANABHAN & DAVIS, p. 233
- (61) - Op.cit. PILLING & RIDLEY, p. 164
- (62) - Op.cit. PADMANABHAN & DAVIS, p. 235
- (63) - Op.cit. PILLING & RIDLEY, p. 166
- (64) - Op.cit. PADMANABHAN & DAVIS, p. 236
- (65) - KAHANDAL, R. y YASUI, K. "Recent Advancements in Superplastic Forming and Diffusion Bonding (SPF DB) Technology". 1997 ref (20), pp 687-694 p. 688.
- (66) - Op.cit. WINKLER, ref (53), p. 131.
- (67) - WINKLER, P.J., en "Diffusion Bonding and Superplastic Forming, two Complementary Manufacturing Technics" 1988 ref (17), pp 491-506, p. 504
- (68) - *ibid* p. 499
- (69) - Op.cit. WINKLER, ref (53) p. 131

- (70) - RICKS, R.A. et al. "Bonding of Aluminium-Lithium Base Alloys Using Roll Coated Zinc Interlayers" ref (17) pp 557-561
- (71) - Op.cit. PILLING & RIDLEY p 194
- (72) - RIDLEY, N. et al. en "Diffusion Bonding of Dissimilar Superplastic Titanium Alloys". 1997 ref (20) pp 669-674.
- (73) - Op.cit. WINKLER ref (67) p 502 y 503
- (74) - SADEGHI, R. y PURSELL, Z., en "Finite Element Modeling of Superplastic Forming Using Analytical Contact Surfaces", 1997 ref (20) pp 719-728.
- (75) - Op.cit. WINKLER ref (67), p 495
- (76) - WENHAI, J., et al. en "Development of SPF and SPF/DB Techniques for Ti and Al Alloys and their Applications" 1990 ref (5), pp 173-180 p 178
- (77) - FRIEDRICH, H.E. et al. en "SPF/DB on the Way to the Production Stage for Ti and Al Applications within Military and Civil Projects" 1988 ref (17), pp 649-664, p.655.
- (78) - Op.cit. PADMANABHAN & DAVIS, p 237.
- (79) - BINGKONG, Ch. y JINTAO, H., en "Superplastic Forming of Ti-Alloy Vessel", 1988 ref (17), pp.315-319, p 317
- (80) - AKKUS, N., et al., en "A Technological Analysis of Superplastic Deformation of Titanium Alloy Pipes into Spherical Shape", 1994 ref (19), pp 633-638, p 636.
- (81) - Op.cit. PADMANABHAN & DAVIS p 247
- (82) - Ibid. p 248
- (83) - Ibid. p 239
- (84) - Ibid. p 240
- (85) - Ibid. p 241
- (86) - Ibid. p 243.
- (87) - Ibid. p 246
- (88) - Ibid. p 246
- (89) - Ibid. p 247
- (90) - Op.cit. BIELER, T.R., MISHRA, R.S. y MUKHERJEE, A.K., ref (30), p.52.
- (91) - SHILIAN et al., en "Engineering Calculation of Metal Extrusion Deformation Force in the Condition of Superplasticity" 1997 ref (20), pp 751-756.
- (92) - Op.cit. PADMANABHAN & DAVIS, p 249.
- (93) - TRACEY, R.J. y BUTLER, R.G., en "The Manufacture of Military Aircraft Doors From Alloy 8090". 1994 ref (19), pp 725-730, p 728
- (94) - WARD, D.M., "Forming Non-Superplastic Materials with Superplastic Membranes". 1988 ref (17), pp 595-599, p 595
- (95) - SMIRNOV, O.M., en "Superplasticity of Metals: Phenomenology Based on Rheological Properties and Structural Dynamics", 1997 ref (20), pp 443-452, p 450
- (96) - BARYKIN, N.P. y KAMALOV, Z.G., en "On Prospects of Intensive Electrotechnology Application to Superplastic Deformation", 1994 ref (19), pp 693-698, p.694
- (97) - ENIKEEV, F.U., en "Strain-Rate Index: Definition, Determination, Narrowness" 1997 ref (20) pp 77-82
- (98) - DIETER, George E. Jr. *Mechanical Metallurgy* edit. Mc Graw-Hill, 3ª edición 1986 p 77
- (99) - NEUVILLE, Luc., en "Envases del Futuro", *Acero-NASJ* (North American Steel Journal), ju. o-agosto 1996 vol. I No 9, pp 7-9
- (100) - Op.cit. BARNES ref (47), p 713

BIBLIOGRAFÍA

PADMANABHAN, K.A. y DAVIS, G.J. : *Superplasticity-Mechanical and structural Aspects, Environmental Effects, Fundamentals and Applications*, Alemania, Spring-Verlag Berlin Heidelberg New York 1980, 312 pp..

Superplastic Forming of Structural Alloys; memorias del primer simposium internacional sobre superplasticidad, junio 21-24 1982, San Diego, California USA ,editado por N.E. PATON y C.H. HAMILTON, The Metallurgical Society of AIME, 414 pp.

Superplasticity - Superplasticité memorias del segundo congreso internacional sobre superplasticidad, septiembre 16-19 1985, Grenoble Francia, editado por B. BAUDELET y M. SUERY, Centre National de la Recherche Scientifique.

Superplasticity and Superplastic Forming; memorias del tercer congreso internacional sobre superplasticidad, agosto 1-4 1988, Blaine Washinton, editado por C. Howard Hamilton y Neil E. Paton, T M S, 706 pp.

PILLING, John y RIDLEY, Norman : *Superplasticity in crystalline solids*, Inglaterra, The Institute of Metals, 1989, 214 pp..

Superplasticity in Metals, Ceramics, and Intermetallics; memorias del simposium con el mismo nombre, abril 16-19 1990, San Francisco California, USA, editado por Merrilea J.Mayo, Masaru Kobayashi y Jeffrey Wadsworth, Materials Research Society vol. 196, 401 pp..

Superplasticity in Advanced Materials; memorias del cuarto simposium intrnacional en superplasticidad, junio 3-6 1991, Osaka, Japón, editado por Shigenori Hori, Masaharu Tokizane y Norio Furushiro, Japan Society for Research on Superplasticity, 857 pp..

Advanced Materials '93, III / B: Composites, Grain Boundaries and Nanophase Materials, editado por M.Sakai et al. Trans. Mat. Res. Soc. Japan., Volume 16B, 1994, 1596 pp..

Recent advances in Science, Technology and Applications of Zn-Al Alloys, memorias del tercer congreso internacional en aleaciones Zn-Al, editado por G. Torres-Villaseñor, C. Piña-Barba, y Yoahua Zhu, IIM UNAM, México marzo 29-30 de 1994.

Superplasticity in Advanced Materials ICSAM-94; memorias del quinto simposium internacional en superplasticidad, mayo 24 - 26 1994, Moscú, Rusia, editado por Terence G. Langdon, Trans Tech Publications, 803 pp..

Superplasticity in advanced Materials ICSAM-97, memorias del sexto simposium internacional en superplasticidad, enero 29-31 1997, Bangalore, India 1997, editado por Atul H. Chokshi, Trans Tech Publications, 790 pp..

NIEH, T.G., WADSWORTH, J., SHERBY, O.D.: *Superplasticity in Metals and Ceramics*, Cambridge University Press, first published 1997, United Kingdom, 273 pp..