



15  
Zejan

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CONFORMABILIDAD DE UNIONES ZINALCO -  
ALUMINIO OBTENIDAS POR LAMINADO  
CONJUNTO**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N ,  
ALEJANDRO DE ALZUA ROMO  
HECTOR M, GALICIA MUÑOZ  
MIGUEL T. MENDEZ NUÑEZ  
GRACIANO NOLASCO CHAVEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:**

**M. C. ARTURO BARBA PINGARRON  
ING. JAVIER CERVANTES CABELLO**

**MEXICO, D. F.**

**1995**

**FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.

**A MIS PADRES:  
HECTOR Y JOSEFINA**

POR HABERME BRINDADO LA OPORTUNIDAD DE ESTUDIAR UNA CARRERA  
UNIVERSITARIA, ADEMAS DE SU CARÑO Y COMPRENSION INCONDICIONALES.

**A MIS HERMANOS:  
MARIA HELENA, HECTOR JOSE., MIGUEL ANGEL, JOSEFINA Y  
EDUARDO**

POR SU MOTIVACION Y EJEMPLO.

**A BLANCA:**

AGRADECIDO POR TU COMPRENSION, APOYO Y CARÑO DURANTE ESTOS AÑOS.

**A MI QUERIDA FACULTAD DE INGENIERIA  
A MIS PROFESORES Y COMPAÑEROS.**

POR EL CUMULO DE CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS.

GRACIAS

ALEJANDRO

**A MIS PADRES:**

**DEJO CONSTANCIA DE MI AGRADECIMIENTO POR LA CONFIANZA Y APOYO QUE SIEMPRE ME HAN BRINDADO EN LOS BUENOS Y MALOS MOMENTOS DE LA VIDA.**

**POR SU GRAN ESFUERZO REALIZADO PARA DARMÉ LA POSIBILIDAD DE ESTUDIAR.**

**A MIS HERMANOS:**

**POR SUS CONSEJOS Y APOYO INCONDICIONAL**

**ARA**

**GRACIAS POR TU PACIENCIA Y COMPRENSION DURANTE TODO ESTE TIEMPO.**

**A MI FACULTAD DE INGENIERIA**

**POR LOS CONOCIMIENTOS RECIBIDOS DURANTE MI FORMACION**

**GRACIAS**

**HECTOR**

**A MIS PADRES:**

**QUE TUVIERON LA DELICADEZA DE TOMAR EN CUENTA MI EDUCACION, SIENDO  
ESTA LA MEJOR HERENCIA QUE ME DEJAN.**

**A MIS HERMANOS:**

**POR SU APOYO SIEMPRE INCONDICIONAL Y POR SU AYUDA EN LA ELECCION DE  
TAN BONITA CARRERA.**

**A LA FACULTAD DE INGENIERIA:**

**AL DIRECTOR DE TESIS Y DEMAS PROFESORES QUE SON MODELOS  
A SEGUIR E IMITAR.**

**GRACIAS**

**MIGUEL**

A mis padres:  
COSME Y RITA

A mis hermanos:  
MIGUEL, LETICIA, HECTOR, LOURDES  
GUSTAVO, ROCIO Y ARACELI.

POR HABER TENIDO LA  
OPORTUNIDAD DE ESTUDIAR UNA  
LICENCIATURA Y HABER ESPERADO  
LA TERMINACION DE ESTA.

A DIOS GRACIAS POR PERMITIRME  
LOGRAR TERMINAR MIS ESTUDIOS  
Y EL DESARROLLO DE ESTE  
TRABAJO.

DESEO A MIS COMPAÑEROS EXITO EN SUS VIDAS Y EN SU TRABAJO, QUE CUMPLAN CON  
SATISFACCION TODAS SUS METAS TRAZADAS.

GRACIAS MIL A MI FACULTAD DE INGENIERIA.

GRACIANO

AGRADECEMOS A:

TODOS LOS PROFESORES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
POR COMPARTIR SUS CONOCIMIENTOS.

EN ESPECIAL A:

M.C. ARTURO BARBA PINGARRON POR EL APOYO BRINDADO PARA LA REALIZACION DE  
ESTA TESIS.

ING. JAVIER CERVANTES CABELLO POR SU VALIOSA COLABORACION PARA LA  
CULMINACION DE ESTE TRABAJO

# CONFORMABILIDAD DE UNIONES ZINALCO-ALUMINIO OBTENIDAS POR LAMINADO CONJUNTO

## INDICE

OBJETIVOS	I
INTRODUCCION	II
CAPITULO I	
<b>1 GENERALIDADES SOBRE ZINALCO Y ALUMINIO</b>	
<b>1.1 El Znalco</b>	<b>1</b>
1.1.1 Propiedades físicas	2
1.1.2 Propiedades mecánicas	3
1.1.3 Resistencia a la corrosión	5
1.1.4 Procesos	6
1.1.5 Campos de aplicación	7
<b>1.2 El Aluminio</b>	<b>9</b>
1.2.1 Antecedentes históricos	9
1.2.2 Obtención	9
1.2.3 Propiedades	11
1.2.4 Clasificación	13
1.2.5 Métodos de conformado	18
1.2.6 Usos y aplicaciones	19
CAPITULO II	
<b>2. PROCESOS DE LAMINACION</b>	
2.1 Introducción	20
2.2 Definición del proceso.	20
2.3 Clasificación general	21
2.4 Arreglos	22
2.5 Técnicas de laminación	26
2.5.1 Laminación en caliente	26
2.5.2 Laminación en frío	27
2.6 Teoría de laminación	28
2.6.1 Análisis de carga y relaciones geométricas	28
2.6.2 Velocidad de deformación	33
2.6.3 Cálculo de la carga en frío	33
2.6.4 Cálculo de la carga en caliente	39
2.6.5 Par y potencia	42
2.6.6 Coeficiente de fricción	43
2.6.8 Cálculo del ensanchamiento	44
2.7 Variables principales	46
2.8 Defectos de los productos laminados	48

<b>CAPITULO III</b>	
<b>3. PROCESO CLAD METALS</b>	
3.1 Antecedentes	51
3.2 Definición	52
3.3 Descripción del proceso	53
3.4 Aplicaciones y ventajas	57
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>4. EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD</b>	
4.1 Factores que afectan la conformabilidad	60
4.1.1 Mecanismos de fractura	60
4.1.2 Localización de la deformación	62
4.1.3 Consideraciones metalúrgicas	62
4.2 Variables del proceso que controlan la conformabilidad	65
4.2.1 Deformación	65
4.2.2 Velocidad de deformación	66
4.2.3 Temperatura	68
4.2.4 Fricción	69
4.2.5 Estado de esfuerzos	69
4.3 Evaluación de la conformabilidad por conformado secundario	70
4.3.1 Tipos de conformado	70
4.3.2 Problemas en el conformado	71
4.4 Tipos de pruebas de conformabilidad	71
4.5 Superplasticidad	72
<b>CAPITULO V</b>	
<b>5. PRODUCCION EXPERIMENTAL DEL MATERIAL COLAMINADO ZINALCO-ALUMINIO</b>	
5.1 Material utilizado en las pruebas	73
5.2 Equipo empleado	73
5.3 Producción del material	74
5.4 Obtención de resultados	81
5.4.1 Evaluación de la unión	81
5.4.2 Prueba de desgarre	81
5.4.3 Microscopia electrónica de barrido	84
<b>CAPITULO VI</b>	
<b>6. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD</b>	
6.1 Prueba de tensión	103
6.2 Prueba de embutido	110

## CAPITULO VII

### 7. ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 Obtención del material colaminado	112
7.2 Análisis de la unión	112
7.2.1 Prueba de desgarre	113
7.2.2 Análisis de microscopia electrónica	113
7.2.3 Comportamiento de las propiedades mecánicas del material compuesto	114
7.3 Evaluación de la conformabilidad del material compuesto	115
7.3.1 Análisis del comportamiento de las curvas	116
7.3.2 Comparación de las curvas a diferentes temperaturas	117
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>118</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>120</b>

## **OBJETIVOS.**

El presente trabajo consta de dos objetivos fundamentales, siendo el primero de ellos lograr la obtención de un material compuesto zinco-aluminio mediante técnicas de laminado conjunto así como la determinación del tipo de unión que se presenta en la interfase de estos materiales.

El segundo objetivo consiste en determinar la capacidad de conformación que se obtendrá con este nuevo material compuesto, así como su resistencia a fin de vislumbrar sus posibilidades de aplicación.

## INTRODUCCION.

Desde la antigüedad, el Hombre ha hecho uso de los metales para resolver muchas de sus necesidades materiales, inicialmente en su forma pura y después en forma de aleación. Esto último tal vez de manera accidental en un principio, pero posteriormente la búsqueda sistemática de nuevos metales y aleaciones así como de procedimientos más eficaces para trabajar y utilizar los ya conocidos, dio origen a la metalurgia.

Casi ningún metal en su forma pura reúne características apropiadas para sus aplicaciones industriales. El aluminio por ejemplo es muy blando y el zinc es sumamente frágil debido a su cristalización en forma de granos hexagonales muy gruesos. Sin embargo, los metales en combinación con otros metales forman aleaciones las cuales sometidas a diferentes tratamientos termomecánicos, adquieren propiedades físicas que permiten transformarlas mediante diferentes procesos para obtener una gran variedad de productos.

Hoy la búsqueda de nuevos materiales no radica en la exploración de yacimientos o de metales desconocidos, sino en la obtención de materiales por medio de la combinación de propiedades de los ya conocidos, es decir, de las aleaciones.

Aún se desconocen las características de muchos materiales. Por eso cuando se descubren propiedades de alguno de ellos es muy posible que desplacen con suma facilidad del mercado a los más usuales. Por ejemplo, cuando apareció el aluminio, los países productores de cobre, como Chile, fueron gravemente afectados, pues el aluminio resultó ser mejor como cable de alta tensión. La fibra óptica desplaza también rápidamente al cobre como alambre conductor de señales. Otro caso es el de los plásticos, empleados en una gran cantidad de industrias de distinta índole, como la automotriz, electrónica, electricidad, plomería, etc. De esta manera, la fuente de producción de un país que sirve para ganar divisas y emplear a una buena parte de su población se ve de pronto inutilizada por la irrupción de otros materiales más efectivos y menos costosos.

En México este problema presenta rasgos particulares ya que se hace uso de un gran volumen de materiales de importación y se descuidan las reservas de metales con que se cuenta en buen volumen y calidad, tal es el caso del cobre y el zinc, que están perdiendo terreno en sus aplicaciones a nivel mundial. La mayor parte de la producción nacional de zinc se exporta como mineral o concentrados, sin mucho beneficio para el país. De las 200 mil toneladas anuales de zinc que producimos, por lo menos hacia 1989, alrededor de la mitad se vendían como metal crudo, a un precio relativamente bajo.

Hasta 1986, la caída en el precio mundial del zinc fue constante. En ese año Japón empezó a utilizarlo en el galvanizado de las carrocerías para automóviles. Entonces la demanda subió, pero el uso para el cual era destinado no varió. El 50 o 60% del zinc en el mundo sigue utilizándose para proteger al acero de la corrosión.

En México el zinc ha estado durante mucho tiempo subutilizado. Así, con la idea de mejorar sus aplicaciones, se inició la investigación del material para tratar de introducirlo en otros campos.

Por otra parte, México no posee bauxita, mineral del que se extrae el aluminio; y la electricidad -necesaria en el proceso de obtención del metal-, no es barata ni abundante. Así, la mayor parte del aluminio que utilizamos es importado.

Como sabemos, la industria de la construcción consume el 70% de aluminio. Esta dependencia es significativa y peligrosa. El problema, no es que nos enfrentemos a una escasez mundial de aluminio, sino que debido a su precio ya no podamos pagar los incrementos anuales provocados por su demanda.

México acostumbra vender su materia prima y comprarla procesada, en lugar de aprovechar sus recursos naturales y producir a partir de éstos sus propios productos terminados. En nuestro país hay grandes yacimientos de bismuto, arsénico, selenio, cadmio, zinc, y muchos más, entre los más importantes.

Con respecto del zinc se ha trabajado en la realización de aleaciones con el objeto de desarrollar nuevos campos de aplicación para este metal, del cual México es un importante productor a nivel mundial, y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio. Los resultados de las investigaciones realizadas con este material condujeron al desarrollo de la aleación zinalco la cual, puede tener diversas aplicaciones dada su posibilidad de ser transformada tanto por procesos de fundición como por procesos de deformación plástica, lo cual ha permitido que esta aleación pueda tener varias aplicaciones entre las que se pueden contar las siguientes:

- Perfiles arquitectónicos para intemperie
- Perfiles para ventanería
- Fabricación de piezas automotrices
- Componentes para torres eléctricas de transmisión
- Productos laminados para la industria de la construcción
- Elementos para cerrajería
- Transporte colectivo.

Sin embargo, los productos obtenidos con esta aleación presentan un aspecto blanco grisáceo muy parecido al aluminio, el cual se torna más gris conforme pasa el tiempo hasta lograr un aspecto más gris parecido al del plomo, por lo cual las piezas no tienen gran aceptación. De ahí que la intención de este trabajo es ofrecer un mejor aspecto mediante la aplicación de un recubrimiento superficial que permita que dichos productos permanescan con una coloración semejante a la del aluminio.

Para lograr el aspecto del aluminio en el zinalco, se propuso la sobreposición de una delgada capa de aluminio (de 5 a 20 % del espesor del zinalco), que se mantuviera unida firmemente, el procedimiento seguido para lograr este propósito se detalla en el contenido del presente trabajo, el cual se encuentra estructurado de tres partes fundamentales. La primera parte consiste de la recopilación de información relativa a las propiedades y características de los materiales empleados en la producción del material compuesto zinalco-aluminio. La segunda sección corresponde a la explicación del método empleado para la obtención del material compuesto. Finalmente la tercera sección corresponde a las pruebas realizadas en la caracterización de las propiedades del material, así como el análisis de las mismas.

# **CAPITULO**

**I**

## GENERALIDADES

### 1. GENERALIDADES SOBRE ZINALCO Y ALUMINIO.

#### 1.1 EL ZINALCO.

En 1978 se inició en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, un programa de investigación auspiciado por la OEA, sobre el zinc y sus aleaciones con el objeto de desarrollar nuevos campos de aplicación para este metal, del cual México es un productor a nivel mundial, y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio. Los resultados de las investigaciones condujeron al desarrollo de la aleación zinalco (MR) la cual, además de tener aplicaciones en la rama de la fundición, también puede incursionar en el campo de la extrusión, en el de la forja y en el de la laminación, entre otros.

Para obtener el zinalco, el doctor Gabriel Torres Villaseñor y su grupo de trabajo del Departamento de Metalurgia y Cerámicos del mencionado Instituto, investigaron alrededor de ocho años.

Hoy, su aporte bien puede considerarse desde una doble perspectiva: la utilidad del material descubierto que, por sus propiedades y características, es apto para la fabricación de una amplia gama de productos, mediante procesos convencionales de transformación. Y la ventaja que representa para el país una aleación cuyo principal componente es el zinc, metal del que México, como ya se apuntó, es un importante productor.

Esto permite que el zinalco resulte altamente competitivo, en comparación con aleaciones de cobre, aceros inoxidable y latones, según se explica en un informe del grupo Falmex-Galvotec, única empresa que decidió arriesgar su capital en un proyecto conjunto con la UNAM, encaminado a ensayar las aplicaciones del zinalco en la industria.

En 1984 el grupo Falmex-Galvotec inició el desarrollo industrial de esta nueva aleación ahora disponible para la industria.

En principio se eligió la composición del eutéctico zinc-aluminio cuyas propiedades permitían prever su aplicación en la industria de la construcción donde, antes que el peso, los factores importantes son la resistencia a la corrosión y la presentación.

Los científicos encontraron que, combinado con el aluminio, la densidad del zinc bajaba hasta hacerlo 35% más ligero que el hierro y el acero. Adicionalmente, las pruebas mostraron que el material desarrolla un óxido protector que impide su posterior oxidación. Este comportamiento, similar al que presentan las aleaciones de aluminio, asegura su utilización en diseños arquitectónicos expuestos a la intemperie, como ventanas y perfiles.

Por otro lado, la presencia del cobre en la aleación también tuvo sus efectos: Las propiedades mecánicas de la aleación se ven sensiblemente mejoradas con la adición de dicho elemento ya que tanto su dureza como su esfuerzo de cedencia en compresión se ven aumentados.

El zinalco es básicamente la aleación eutéctico zinc- aluminio, modificada con cobre, conjuga la alta resistencia mecánica del acero estructural con la resistencia a la corrosión del aluminio. Es decir, incorpora en sí mismo las mejores propiedades de los dos materiales más utilizados por la industria mundial.

## GENERALIDADES

Básicamente, el zinalco tiene una microestructura compuesta de dos fases; la fase alfa ( $\alpha$ ), es aluminio con menos del 1% del zinc disuelto y la fase beta ( $\beta$ ), es zinc con menos del 0.5% de aluminio disuelto y en ambas fases hay una cierta cantidad de cobre, no bien determinada, que también se encuentra en solución. La forma geométrica que toman estas fases depende de la trayectoria seguida durante el enfriamiento a partir de una temperatura superior a 280°C pero inferior a 420°C, que es la región en donde el zinalco adquiere una estructura atómica idéntica a la del aluminio (cúbica F). Si se enfría rápidamente, la estructura resultante está formada por granos muy finos de fase alfa y beta, mientras que si se enfría lentamente las fases alfa y beta se arreglan en forma de láminas alternadas dando una estructura perlítica similar a la observada en los aceros.

En ambos casos los granos o las láminas son tan finos que sólo son observables con la ayuda de las técnicas de microscopía electrónica. Su ancho, o diámetro, es menor a 3 micrómetros.

El zinalco viene a llenar un vacío existente entre los dos materiales con más aplicaciones industriales, el hierro y el aluminio. La densidad del zinalco es de 5.4 gr/cm<sup>3</sup> lo cual lo hace 31% más ligero que el acero (7.8 gr/cm<sup>3</sup>); y aunque pesa el doble que el aluminio (2.7 gr/cm<sup>3</sup>) su resistencia mecánica, semejante a la de un acero bajo en carbono, permite diseñar piezas tan ligeras como las de aluminio. Por otra parte, su resistencia a la corrosión es intermedia entre el aluminio y el zinc, lo cual lo coloca entre los metales con buena resistencia a la corrosión. Un metal con estas propiedades puede incursionar en algunos de los campos de aplicaciones del acero, latón, bronce, zamak y aun en los del aluminio.

### 1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS.

Las principales propiedades físicas se muestran en la Tabla 1.1. Como podemos notar, la aleación tiene un intervalo de solidificación bastante amplio que va de 421°C a 481°C, lo que permite inyectar el material en los moldes en un estado cuasilíquido que produce una menor contracción durante la solidificación.

Tabla 1.1 Propiedades físicas del zinalco

Temperatura de fusión	421 a 481°C
Densidad	5.4 gr/cm <sup>3</sup>
Módulo elástico	110-130 GPa
Conductividad eléctrica	37%
Conductividad térmica	37%
Coefficiente de expansión térmica	25 $\mu\text{m}/\text{mm K}$
Color	Blanco grisáceo

El bajo punto de fusión de esta aleación, en comparación con el aluminio, latón, bronce o hierro de fundición, nos permite ahorros considerables de energía. La Figura 1.1 nos da una idea del consumo de energía requerida para fundir el zinalco, el hierro, el bronce y el aluminio. Podemos notar que el zinalco requiere de 150 Wh/Kg mientras que el mismo volumen de aluminio requiere cerca de 400 Wh/Kg.

## GENERALIDADES

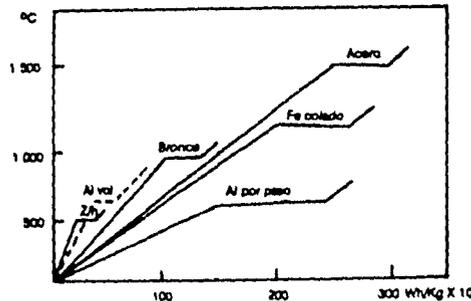


Figura 1.1 Cantidad de energía usada para fundir 1 Kg de diferentes metales.

El zinalco funde casi con el doble de rapidez que el aluminio y tres veces más rápido que el bronce.

La densidad de la aleación la coloca en una posición intermedia entre el acero y el aluminio, comparativamente es 18% más ligera que el zamak (que es la aleación más conocida del zinc para fundición), 30% más ligera que el hierro de fundición y 40% más ligera que el latón y pesa el doble que el aluminio. Su coeficiente de expansión térmica, que reviste importancia en situaciones como ajustes de ventanas o fundiciones de precisión, es muy similar al del aluminio.

### 1.1.2 PROPIEDADES MECANICAS.

Las propiedades del zinalco dependen de su microestructura, que es una mezcla de dos fases, una alfa rica en aluminio y otra beta rica en zinc. Esta estructura bifásica no desaparece con tratamientos térmicos, tan sólo cambia de geometría. Un enfriamiento lento desde 300°C nos produce una estructura perlítica similar a la del acero. El temple desde la misma temperatura nos produce una estructura de granos finos equiaxiales. Esta microestructura de dos fases tiene una energía de cohesión relativamente baja que provoca que el mecanismo de deformación sea por deslizamiento de una fase sobre otra, sin sufrir deformación plástica alguna de las fases.

Este mecanismo, que en los metales comunes se observa sólo cerca de su punto de fusión, es el mecanismo con el cual el zinalco se deforma a temperatura ambiente. Esto da como resultado una serie de fenómenos muy singulares, como el de no sufrir endurecimiento por deformación, efecto que es común en todos los metales. En esta forma las curvas de esfuerzo-deformación presentan un esfuerzo de cedencia muy indefinido.

## GENERALIDADES

La temperatura tiene un gran efecto sobre las propiedades mecánicas, ya que la fuerza de cohesión que une los granos del material, decae muy rápidamente con la temperatura, esto se traduce en una fuerte disminución del esfuerzo de tensión y al mismo tiempo en un impresionante aumento de la ductilidad. Este comportamiento limita sus aplicaciones a aquellas en las que la temperatura de trabajo, no sobrepasa los 100°C.

Las diferentes microestructuras que podemos inducirle al zinalco nos proporcionan una gran gama de propiedades mecánicas, las cuales se han resumido en la Tabla 1.2, en la que aparecen los dos tipos de zinalco que actualmente están siendo comercializados por la Compañía Zinalco Extrusiones, S.A., perteneciente al grupo Falmex-Galvotec.

El zinalco II, tiene una resistencia mecánica superior a la versión uno y no pierde sus propiedades mecánicas tan rápidamente con la temperatura pudiéndose extender su temperatura de trabajo hasta los 150°C. Esta variante del zinalco fue diseñada especialmente para usarse en fundición.

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del zinalco.

Zinalco I.				
	Fundición en arena.	Fundición inyección	Extruido 270-300°C	Laminado.
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	270-290
Esfuerzo de cedencia (MPa)	280-300	290-310	280-320	300-310
Deformación máxima (°)	3-5	8-10	30-35	80-100
Dureza (R.B)	50-55	60-65	40-55	25-30

Zinalco II.		
	Fundición en arena.	Fundición inyección.
Resistencia a la tensión (MPa)	350-390	400-420
Límite elástico (MPa)	260-270	340-370
Deformación máxima (°)	5-8	6-10
Dureza (R.B)	65-80	55-70

El módulo elástico del zinalco, medido a partir de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación está entre 110 y 130 GPa.

El mecanismo utilizado para aumentar la resistencia fue el de añadir elementos que se segreguen en las fronteras de grano como el silicio, el magnesio, o el calcio; con lo cual el deslizamiento de un grano sobre otro se verá impedido de ocurrir fácilmente produciendo endurecimiento en el material.

## GENERALIDADES

El material que resulta de la extrusión es el que mejores propiedades adquiere, ya que retiene alta resistencia (410 MPa) con alta ductilidad (40%) a temperatura ambiente y una dureza intermedia de 40 R.B. que le da una maquinabilidad semejante a la del duraluminio. La lámina es muy blanda y de muy alta ductilidad, con propiedades superplásticas, es decir, se puede termoformar como si fuera plástico y al mismo tiempo puede adquirir altas durezas (55 R.B.), a través de tratamientos térmicos apropiados.

### 1.1.3 RESISTENCIA A LA CORROSION.

La resistencia a la corrosión del zinco es una de sus propiedades más atractivas ya que es superior a la que presentan los productos galvanizados, además de aceptar recubrimientos protectores por anodizado o inmersión en baños de cromatos. La aleación también puede ser pintada siempre y cuando la superficie esté perfectamente limpia.

Los electrodeósitos de cobre-níquel-cromo son otras posibilidades de dar acabados a esta aleación, con la ventaja de que la adherencia que tiene esta aleación a los electrodeósitos es superior a la que presenta el zinc puro o los plásticos.

Entre los resultados más relevantes obtenidos en este estudio, se encuentra el hecho de que el zinco con cualquiera de sus microestructuras tiende a formar una capa de óxido protector al someterlo al vapor de agua. El material deformado presenta una mayor ganancia en peso, posiblemente debido a que, la deformación produce levantamiento de los granos (relieve superficial); esto implica un aumento de la superficie efectiva reflejándose en una mayor cantidad de óxido protector formado.

La película protectora está formada principalmente de alúmina, es decir, el aluminio contenido en la aleación hace el papel de cromo en el acero inoxidable. La capa así formada alcanza un espesor de 1  $\mu\text{m}$ , lo que es suficiente para mantener el brillo y color natural de la aleación, aunque esté expuesta a la atmósfera de la Ciudad de México.

La Figura 1.2 nos muestra el efecto de tres diferentes medios corrosivos sobre aluminio 380 y zinco. Los efectos son medidos a través de los cambios de peso que sufre una muestra con un decímetro cuadrado de área. En todos los casos, el aluminio 380 sufrió un ataque mayor al presentado por el zinco. En el caso de presentarse  $\text{SO}_2$  en el ambiente, el zinco presenta una clara pasivación, mientras que el aluminio 380 sufre un severo ataque. Este resultado es particularmente importante cuando el material se enfrenta a medios tan severos como el de las ciudades.

## GENERALIDADES



- a) Humedad 100%, Temp. 50°C, 1000 hrs
- b) 100% humedad + 100 ppm de SO<sub>2</sub>
- c) Ambiente salino

Figura 1.2 Resultado de las pruebas de corrosión en diversos medios, para el Zinalco y Al 380. En general, el Zinalco se comporta mejor.

Experimentos detallados realizados en la Facultad de Química de la UNAM han demostrado que el zinalco resiste mejor la corrosión que el aluminio en la Ciudad de México.

Las pruebas realizadas en cámara salina nos muestran que después de 10 horas de prueba el material pierde su brillantez y se torna grisáceo, a las 200 horas aparecen depósitos blancos localizados en ciertas zonas de la superficie. El cambio de color se debe a la formación de una película de óxidos protectores que protegen al material de una corrosión progresiva. Al formarse esta capa se tiene la ganancia de peso en el material. Los depósitos blancos se originan en impurezas especialmente compuestas de hierro-aluminio.

El nivel de corrosión observado no es particularmente severo, en comparación con el sufrido por otros materiales comúnmente usados en aplicaciones ingenieriles.

### 1.1.4 PROCESOS.

**FUNDICION.**-Utilizando los procesos por molde de arena, molde permanente, por gravedad o por inyección a baja presión, sustituye al hierro gris, aluminio, bronce y latón.

**INYECCION.**-El zinalco es el único material en el mercado que, contando con una resistencia similar a la del acero, se puede inyectar, permitiendo de esta manera la fabricación de piezas elaboradas en otros materiales, y elaborando pasos de transformación y ensamble.

**EXTRUSION.**-No requiere de instalaciones especiales, pudiéndose utilizar los mismos equipos empleados para extruir aluminio, las barras y soleras constituyen un material inmejorable por su excelente maquinabilidad.

## GENERALIDADES

**LAMINACION.**-La principal cualidad que presenta la lamina de zinalco es su resistencia a la corrosión, así como la posibilidad de deformarse utilizando la propiedad de ser superplástico.

### 1.1.5 CAMPOS DE APLICACION.

Las características físico-químicas del zinalco lo hacen apto para la fabricación de una amplia gama de productos mediante procesos convencionales de transformación, entre los que destacan la fundición, extrusión, inyección, laminación, troquelado y forja.

El uso del zinalco representa una alternativa para la fabricación de piezas en las que tradicionalmente se ha utilizado zamak, aluminio, bronce, latón, hierro gris e incluso acero.

En la tabla 1.3 se comparan características y propiedades del zinalco con otros materiales.

Tabla 1.3 Comparación de características y propiedades del Zinalco y diversos materiales.

MATERIAL PROPIEDAD	ZINALCO I				ZINALCO II		ZAMAK I	ALUMINIO 99	LATON	BRONCE	BIERRO GRIS
TIPO DE MEDIDO	FUERZ EN ASBIA	FUERZ POR PTE.	EXTENDI O	LAMINA DO	FUNDICION EN ASBIA	FUNDICION POR INYECCION	FUERZ POR PTE.	FUERZ POR PTE.	FUERZ EN ASBIA	FUERZ EN ASBIA	FUERZ EN ASBIA
DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	5.4				5.4		6.7	2.74	8.5	8.88	7.4
PUNTO DE FUSION (°C)	421-481				421-481		380- 386	540- 586	925- 940	762- 428	1232
COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA (E.L.)	26				26		26.9	21.8	20	18.5	11.9
COEFICIENTE TERMICA (W/M.C.E.L.)	126				126		132	96	90	47	..
COEFICIENTE ELASTICA (N/AS.C.E.L.)	38				38		26	27	20	10	6
RESISTENCIA A LA TRACCION (MPa)	290- 300	310- 320	380- 410	270- 290	350-390	400-420	280- 330	324	230	240	214
RESISTENCIA A LA TRACCION (MPa)	280- 300	290- 310	280- 320	300- 310	260-270	340-370	*	158	117	124	124
DEFORMACION MAXIMA (W)	3-5	8-10	30-35	80- 100	5-8	6-10	7	3.5	30	20	2
DUREZA (HV)	50-55	60-65	40-56	25-30	65-80	55-70	80-85	80-85	60	65	210
RESISTENCIA AL IMPACTO (J)	2-3	2-3	7-8	8-9	2-3	2-3	50-60	2-3	15	15	54-88
MODULO DE ELASTICIDAD (GPa)	110-130				110-130		*	71	90	80	172

La introducción del zinalco al mercado no ha sido fácil. Se ha logrado hacer eficiente la producción del zinalco industrialmente. Y eso no sólo incluye la producción del lingote. Deben resolverse los problemas que presenta durante los procesos de fundición, inyección y extrusión.

## GENERALIDADES

Algunos ejemplos de piezas producidas con zinc son:

Las punteras negativas para el sistema de transporte colectivo, como esas piezas friccionan contra los rieles su desgaste obliga a cambiarlas constantemente, antes se fabricaban con una aleación de cobre muy cara. La pieza de zinc es 30% más económica y con ella se surte el 50% del consumo total. Así el metro logra un ahorro anual cercano a 400 000 nuevos pesos aproximadamente.

El metro de Guadalajara sustituyó los boletos de cinta magnética con fichas de zinc inyectadas a presión. Con el mismo proceso, Falmex fabricará 2000 válvulas de gas diarias para la empresa que controla el 40% del mercado de tanques. El precio es entre 20 y 30% abajo de los costos internacionales.

Toyota, el fabricante de automóviles más grande del mundo, está por concretar la posibilidad del uso del zinc en la producción de piezas automotrices; se habló de rines de zinc y, a largo plazo, quizás toda la carrocería de los coches.

La maquinabilidad del zinc es excelente, esta propiedad le permite encontrar una gran variedad de aplicaciones, como la correspondiente a diseños para portamuestras de microscopio electrónico, en el cual también juega un papel importante su baja resistencia eléctrica. Los tornillos fabricados con esta aleación tendrán la propiedad de alta resistencia a la corrosión y no forman par eléctrico ni con aluminio ni con el acero, pudiéndose usar tanto en torres eléctricas como en el ensamble de ventanas.

La posibilidad de producir perfiles arquitectónicos con zinc abre una nueva perspectiva a la arquitectura e ingeniería ya que estos perfiles tienen alta resistencia mecánica y pueden ser soldados para la fabricación de naves para bodegas o nuevas formas de ventanas. La lámina en su estado normal podría aplicarse a la fabricación de muebles de cocina, con la ventaja de resistir la corrosión.

Sin duda, el nuevo material indujo mejores y más económicas tecnologías en la industria de la construcción, instalaciones eléctricas, cerrajería, arquitectura, transporte colectivo y autopartes.

En forma general mencionaremos algunas ventajas de esta nueva aleación:

- a) Requiere una energía baja para ser procesado, de hecho la extrusión, la forja y la fundición consumen menos energía que cualquier otro metal de uso ingenieril.
- b) Alto grado de limpieza en su proceso al grado de no requerir equipo anticontaminante.
- c) Insuperable colabilidad, mejor aún que el aluminio y el bronce.
- d) Alta resistencia mecánica, comparable a la de un acero de bajo carbono.
- e) Menor costo que el bronce. Su alta resistencia mecánica permite diseñar piezas más delgadas que pueden abatir el precio del aluminio.
- f) Buena resistencia a la corrosión, comparable a la del aluminio.

Las áreas de aplicación de este material empiezan a crecer rápidamente reemplazando al hierro, bronce, aluminio y plástico.

## GENERALIDADES

### 1.2 EL ALUMINIO.

#### 1.2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS.

El nombre aluminio es más viejo que el propio metal. En 1807 reconoció Davy que la «tierra» obtenida a partir del alumbre era el óxido de un metal que no pudo obtener, pero al que adjudicó ya el nombre de aluminio.

El aislamiento del metal a partir de la alúmina lo consiguió por primera vez en 1825 el danés Oersted y en 1827 lo obtuvo en forma de polvo el alemán Wöhler.

En 1876 se encontró en la región de Les Baux, al noreste de Arlés un mineral de oxihidrato de aluminio, en grandes cantidades y con gran riqueza en aluminio (50-60%). Por el nombre de la región, se denomina el mineral bauxita y todos los yacimientos encontrados en distintos países se denominan hoy de igual manera.

El aluminio es, con mucho, el metal más abundante en la corteza terrestre de la que constituye el 7.51% mientras el hierro, que le sigue, forma sólo el 4.7%. Debido a su gran afinidad para el oxígeno, el aluminio no se presenta nativo sino en forma de combinaciones, de las que las más importantes son los feldespatos, gneis, micas, arcillas y bauxitas. Actualmente, sólo se utilizan las bauxitas para la obtención del aluminio. La composición de aquellas es 55-60%  $Al_2O_3$ , 20-25%  $Fe_2O_3$ , 2-3%  $SiO_2$ , 2.5-3%  $TiO_2$  y 12-15% de agua.

#### 1.2.2 OBTENCION.

El proceso de obtención del aluminio se divide en dos partes: obtención de alúmina y obtención de aluminio (figura 1.3).

1. Obtención de alúmina ( $Al_2O_3$ ) a partir de la bauxita (óxido complejo de aluminio, de hierro y de titanio en el que predomina la alúmina).

a) Digestión. Se tritura y muele la bauxita y se le agrega sosa cáustica; se le aplica presión y calor a la mezcla en autoclaves llamados digestores. La sosa reacciona con el óxido de aluminio, formando una solución de aluminato de sodio, como las impurezas son insolubles, se depositan en el fondo, formando el llamado "lodo rojo".

b) Clarificación. Se pasa la solución (aluminato de sodio y lodo rojo) por reductores de presión, filtros prensa y filtros textiles para eliminar el lodo rojo, después se enfría en intercambiadores de calor.

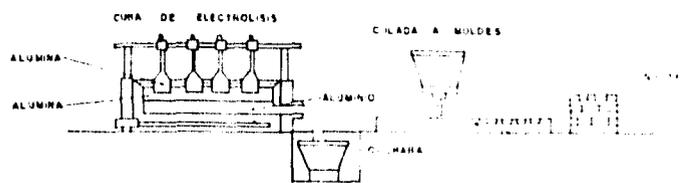
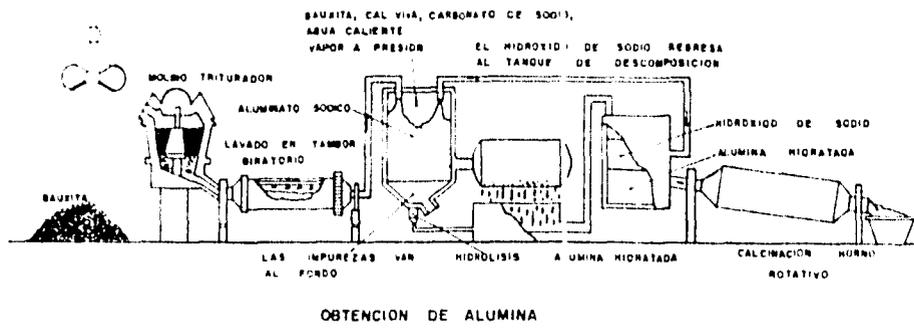
c) Precipitación. Se usa para la mezcla de aluminato de sodio a los precipitadores y se agregan cristales de alúmina hidratada que aceleran la separación de cristales del aluminato, con lo que se forman cristales pesados que se precipitan, después se seleccionan y se lavan para eliminar impurezas.

d) Calcinación. En un horno rotativo se calientan los cristales a 1 000 °C para secarlos y deshidratarlos.

2. Obtención del aluminio a partir de la alúmina. Se disuelve la alúmina en criolita (Cloruro de Al y fluoruro de Na), ésta juega un papel importante en el proceso electrolítico, debido a su bajo punto de fusión y a su aptitud para disolver la alúmina, la operación tiene lugar dentro de una cuba de acero

**GENERALIDADES**

recubierta con carbón a 950 °C; para ello, se insertan ánodos de carbón y se hace circular corriente eléctrica; el carbón forma  $CO_2$  con el oxígeno y el Al fundido se deposita en el fondo por ser más denso que la criolita. Cuando se junta suficiente aluminio, se succiona éste a un horno, donde se decantan las impurezas y después de un reposo se vacía en las lingoteras. El aluminio así obtenido tiene una pureza de 99.80 %.



**Figura 1.3** Obtención de aluminio.

## GENERALIDADES

### 1.2.3 PROPIEDADES

Las propiedades en las que estriba la importancia industrial del aluminio son su conformabilidad, poco peso, resistencia a la corrosión y buena conductividad eléctrica y térmica. La densidad del aluminio es de 2.7 gr/cm<sup>3</sup>, mientras que la del acero es de 7.85 gr/cm<sup>3</sup>. Además, cuando se expone al aire, en la superficie del aluminio se forma una capa de óxido que lo protege contra la corrosión. Por tanto, el aluminio es excelente para aquellas aplicaciones en las que debe combinarse una resistencia a la corrosión relativamente alta con un peso reducido. En otras aplicaciones se aprovechan sus buenas conductividades térmica y eléctrica.

Probablemente el peor inconveniente del aluminio, desde un punto de vista tecnológico, sea su relativamente bajo módulo de elasticidad que es más o menos un tercio del módulo del acero. (o sea, bajo la misma carga, el aluminio se deforma el triple que el acero). Este factor, unido a su elevado costo, hace necesario emplear secciones en las que el material se distribuya adecuadamente para conseguir una rigidez máxima con un mínimo de material. Afortunadamente, ello puede hacerse a menudo con relativa facilidad a causa de sus buenas cualidades de conformación.

En estado puro, el aluminio es blando, dúctil y no muy resistente y, por ello, no suele emplearse en ese estado. Tiene una resistencia a la tracción de 61.803 MPa. (9 000 psi) en forma cristalina, a 164.808 MPa (24 000 psi) cuando está endurecido. Su conductividad eléctrica es aproximadamente un 60% de la del cobre, y 3.5 veces la del hierro, razón por la cual se emplea mucho en líneas de transmisión, pero habitualmente reforzado con un alma de acero para conseguir la resistencia conveniente. En la mayoría de sus demás aplicaciones se alea con cobre, manganeso, o silicio para aumentar su resistencia y dureza. La dureza del aluminio varía desde 25 Brinell cuando está recocido, a 40 Brinell si está endurecido.

Una forma del aluminio ultrapuro se utiliza para reflectores fotográficos con el fin de aprovechar sus características de alta reflectividad a la luz y de no decoloración superficial. Además, el aluminio no es tóxico, ni magnético y no produce chispa.

Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de deformación; se puede fundir mediante cualquier método conocido, laminar a cualquier espesor deseado, estampar, estirar, forjar y extruir a casi cualquier forma imaginable.

El aluminio comercialmente puro, aleación 1 100 (99.0 + % de Al.), es adecuado para aplicaciones en las que se requiere buena formabilidad o gran resistencia a la corrosión (o ambas) y en las que no se necesita alta resistencia. (utensilios para cocina, componentes arquitectónicos, almacenamiento de alimentos y agentes químicos, así como en ensables soldados).

El aluminio puro ofrece una resistencia mecánica sólo del orden de un quinto de la del acero ordinario para estructuras, y su módulo de elasticidad sólo la tercera parte. Aunque su costo por kilogramo sea superior al del acero, su densidad es sólo de algo más de un tercio de la de éste, por lo que resulta más barato por unidad de volumen. Aunque las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión relativamente bajas comparadas con las del acero, su relación resistencia-peso, como se define enseguida, es excelente.

## GENERALIDADES

$$\text{Relacion resistencia - peso} = \frac{\text{resistencia a la tensión}}{\text{densidad}}$$

En base a la relación resistencia-peso, la mayoría de las aleaciones de aluminio son superiores al acero, pero son algo inferiores en lo que respecta a desgaste, fluencia y fatiga.

Propiedades anticorrosivas del aluminio y sus aleaciones. El aluminio puro es muy reactivo químicamente y, tan pronto se expone al aire, en su superficie se forma una capa de óxido adherente y compacto. Este óxido resiste a gran número de ambientes corrosivos y hace de barrera anticorrosiva protegiendo al aluminio subyacente. Cuando el aluminio se alea, se retarda algo la formación del óxido por lo que las aleaciones de aluminio no tienen, en general, las magníficas características anticorrosivas del aluminio puro.

En las aleaciones de aluminio, la capa de óxido puede causar alguna dificultad en lo que atañe a su soldabilidad. Al soldar por resistencia eléctrica, suele ser necesario eliminar el óxido inmediatamente antes de soldar, con objeto de conseguir resultados correctos. En la soldadura por fusión, el aluminio se oxida con tal facilidad que se hace necesario emplear fundentes especiales o atmósferas protectoras de gas inerte. Se han desarrollado técnicas adecuadas que permitan soldar el aluminio sin problemas, tanto del punto de vista de calidad como económico.

Casi siempre, el aluminio reemplaza al acero o a la fundición de hierro cuando la necesidad de poco peso, resistencia a la corrosión, gastos de mantenimiento reducidos o conductividades eléctrica o térmica compensa el costo adicional. El aluminio juega un papel de primer orden en la reducción del peso y tamaño de los motores.

El aluminio también responde fácilmente a los mecanismos de endurecimiento. La Tabla 1.4 compara la resistencia del aluminio puro recocido con aleaciones endurecidas mediante diversas técnicas. Las aleaciones pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

## GENERALIDADES

Tabla 1.4 Efecto de los mecanismos de endurecimiento en el aluminio y en las aleaciones de aluminio.

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de fluencia (psi)	Elongación (%)	Esfuerzo fluencia(aleación) Esfuerzo de fluencia (puro)
Aluminio puro recocido (99.999% Al)	6 500	2 500	60	
Aluminio puro comercial (recocido, 99% Al)	13 000	5 000	45	2.0
Endurecido por solución sólida (1.2% Mn)	16 000	6 000	35	2.4
Aluminio puro trabajado en frío un 75%	24 000	22 000	15	8.8
Endurecido por dispersión (5% Mg)	42 000	22 000	35	8.8
Endurecido por envejecimiento (5.6% Zn-2.5% Mg)	83 000	73 000	11	29.2

### 1.2.4 CLASIFICACION.

La designación del aluminio forjado y de las aleaciones forjadas al aluminio fue estandarizada por The Aluminum Association en 1954. Consta de un sistema de numeración de cuatro dígitos. El primero indica la aleación, el segundo señala el cambio de la aleación original o límite de impureza; el cero se utiliza para la aleación original, y los enteros del uno al nueve indican las modificaciones de la aleación. En el grupo 1xxx para el aluminio con un mínimo de purezas del 99% y mayores, los dos últimos dígitos son los mismos que los dos a la derecha del punto decimal en el porcentaje de mínimo de aluminio cuando se expresa a casi el 0.01%. De este modo, 1060 indica un material del 99.60% mínimo de pureza de aluminio y ningún control especial sobre las impurezas individuales.

En los grupos de aleación del 2xxx al 8xxx, los dos últimos dígitos sirven sólo para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo como se muestra en la tabla 1.5.

## GENERALIDADES

Tabla 1.5 Clasificación para los grupos de aleación.

Aluminio, 99% y mayor, principal elemento de aleación	1xxx
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otro elemento	8xxx
Series no utilizadas	9xxx

La designación de Tratamiento Térmico (T.T) sigue a la aleación y se halla separada de ésta por un guión. El sistema estándar de designación del T.T consta de una letra que indica el T.T básico, excepto para los tratamientos en condición de recocido y aquellos en condición de fabricado sin T.T se define más específicamente por la adición de uno o más dígitos. Hay cuatro condiciones básicas: F, condición de fabricado; O, recocido; H, endurecido por deformación y T, tratado térmicamente.

ALEACIONES ALUMINIO-COBRE (2xxx). La Figura 1.4 muestra el extremo rico en aluminio del diagrama de equilibrio aluminio-cobre. La máxima solubilidad del cobre en aluminio es de 5.65% a 547°C y luego decrece hasta 0.45% a 300°C; por lo tanto las aleaciones que contienen entre 2.5 y 5% de cobre responderán al tratamiento térmico endureciéndose por precipitación. La fase  $\theta$  es una fase intermedia de aleación, cuya composición corresponde estrechamente al compuesto  $\text{CuAl}_2$ . El tratamiento de solución se lleva a cabo al calentar la aleación hasta la región unifásica  $\alpha$ , seguida por un enfriamiento rápido. El envejecimiento subsecuente, ya sea natural o artificial, permitirá precipitar la fase  $\theta$ , incrementando así la resistencia de la aleación.

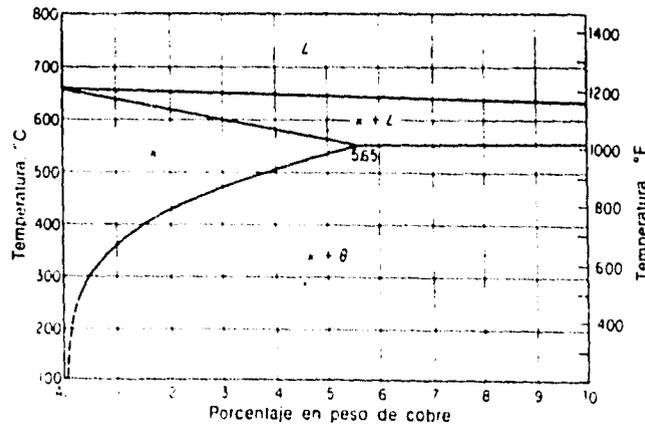


Figura 1.4 Porción rica en aluminio del sistema de aleación cobre-aluminio.

## GENERALIDADES

Las aleaciones aluminio-cobre forjado que más se utilizan son las 2014, 2017 y la 2024. La más vieja de todas las aleaciones al aluminio tratables térmicamente es el duralumin-duraluminio (2017), que contiene 4% de cobre. Como es una aleación que envejece en forma natural, después del tratamiento de solución, se refrigera para evitar el envejecimiento.

La aleación 2014 tiene mayor contenido de cobre y manganeso que la 2017 y es susceptible de envejecimiento artificial. Con tratamiento llamado envejecimiento artificial, la 2014 tiene mayor resistencia tensil, mucho mayor resistencia a la cedencia y menor elongación que la 2017. La aleación 2024, que contiene 4.5% de cobre y 1.5% de magnesio, desarrolla las resistencias más altas que cualquier tipo de aleación aluminio-cobre envejecido en forma natural. El mayor contenido de magnesio, comparado con la 2017, la hace más difícil de fabricar.

La única aleación binaria aluminio-cobre fundido es la 195, que contiene 4% de cobre. Con el tratamiento térmico adecuado, esta aleación tiene una excelente combinación de resistencia y ductilidad.

ALEACIONES ALUMINIO-MANGANESO (3xxx). Debido a la limitada solubilidad, el manganeso no se emplea como principal elemento de aleación en ninguna aleación de fundición y sólo se utiliza en algunas aleaciones forjadas.

ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO (4xxx). Estas aleaciones suelen ser no tratables térmicamente. La aleación forjada 4032, que tiene 12.5% de silicio, tiene gran capacidad de forjado y bajo coeficiente de expansión térmica. Las aleaciones aluminio-silicio de fundición tienen excelente capacidad de fundido y resistencia a la corrosión.

ALEACIONES ALUMINIO-MAGNESIO (5xxx). La mayoría de las aleaciones comerciales forjadas de este grupo tienen menos del 5% de magnesio y, con bajo contenido de silicio, no se pueden tratar térmicamente. Las aleaciones forjadas se caracterizan por tener gran capacidad de soldabilidad, buena resistencia a la corrosión y moderada resistencia en general.

ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO-MAGNESIO (6xxx). El magnesio y el silicio se combinan para formar un compuesto siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ), que a su vez forma un sistema eutéctico simple con el aluminio. Estas aleaciones se caracterizan por la excelente resistencia a la corrosión y se pueden trabajar más que otras, tratables térmicamente.

ALEACIONES ALUMINIO-ZINC (7xxx). La Figura 1.5 muestra la porción rica en aluminio del sistema de aleación aluminio-zinc. La solubilidad del zinc en aluminio es del 31.6% a 275°C disminuyendo hasta 5.6% a 125°C, las aleaciones comerciales forjadas contienen zinc, magnesio y cobre, con adiciones menores de manganeso y cromo.

## GENERALIDADES

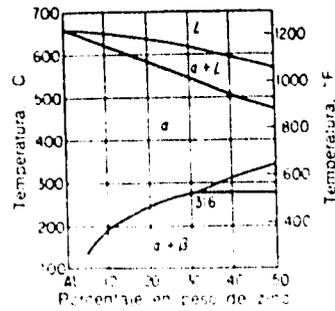


Figura 1.5 Porción rica en aluminio del sistema de aleación aluminio-zinc.

Mediante la adición de cromo y el tratamiento térmico adecuado, la susceptibilidad de estas aleaciones a la corrosión por esfuerzo se ha minimizado. La aleación de fundición aluminio-zinc, conocida como 40E, que contiene 5.5% de zinc, 0.6% de magnesio, 0.5% de cromo y 0.2% de titanio, proporciona altas propiedades mecánicas sin tratamiento de solución. Esta aleación también tiene regulares características de fundición, buena resistencia a la corrosión y muy buena maquinabilidad.

Las composiciones y las propiedades de aleaciones típicas se dan en la Tabla 1.6

GENERALIDADES

Tabla 1.6 Propiedades de algunas aleaciones de aluminio.

Aleación	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de fluencia (psi)	Elongación (%)	Comentarios
<b>Aleaciones para forja no tratables térmicamente</b>				
1100-O >99% Al	13 000	5 000	40	Componentes eléctricos, hojas metálicas finas ("papel"), resistencia a la corrosión. Latas para bebidas, aplicaciones arquitectónicas. Metal de relleno en soldadura, recipientes, componentes marinos.
1100-H18	24 000	22 000	10	
3003-O 1.2% Mn	16 000	6 000	35	
3003-H18	29 000	27 000	7	
4043-O 5.2% Si	21 000	10 000	22	
5056-O 5% Mg	42 000	22 000	35	
5056-H18	60 000	50 000	15	
<b>Aleaciones para forja tratables térmicamente</b>				
2024-O 4.4% Cu	27 000	11 000	20	Trasportes, aeronáutica, astronáutica y otras aplicaciones de alta resistencia.
2024-T4	68 000	47 000	20	
4032-T6 12% Si-1% Mg	55 000	46 000	9	
6061-T6 1% Mg-0.6% Si	45 000	40 000	15	
7075-T6 5.6% Zn-2.5% Mg	83 000	73 000	11	
<b>Aleaciones para fundición.</b>				
295-T6 4.5% Cu-0.8% Si	36 000	24 000	5	Arena
319-F 6% Si-3.5% Cu	27 000	18 000	2	Arena
	34 000	19 000	2.5	Molde permanente
356-T6 7% Si-0.3% Mg	33 000	24 000	3.5	Arena
	38 000	27 000	5	Molde permanente
380-F 8.5% Si-3.5% Cu	46 000	23 000	3.5	Molde permanente
390-F 17% Si-4.5% Cu-0.6% Mg	41 000	35 000	1	Coquilla
443-F 5.2% Si	19 000	8 000	8	Arena
	23 000	9 000	10	Molde permanente
	33 000	16 000	9	Coquilla
713-T5 7.5% Zn-0.7% Cu-0.35% Mg	30 000	22 000	4	Arena

## GENERALIDADES

### 1.2.5 METODOS DE CONFORMADO.

El aluminio es un material bastante conocido por el Hombre ya que constituye el metal más abundante en la corteza terrestre aún sobre el acero, el cual es el segundo material más aprovechado, en base a sus propiedades vistas anteriormente, quizá la característica más importante en este metal sea su maquinabilidad y su capacidad de ser trabajado, ya que de los métodos de conformado conocidos los que comúnmente se emplean en el aluminio son:

a) Debido a su bajo punto de fusión y la fluidez que tiene el material podemos fundirlo mediante cualquier proceso conocido, ya sea fundición en arena, moldeado en cerámicos, moldeado por centrifugado, fundición a presión, etc. Esto nos representa un ahorro de energía, tiempo y costos de operación, por lo que podemos elegir el tipo de proceso más conveniente donde cumplamos todos los requisitos que se tienen, siendo esto una gran ventaja en esta operación de conformado.

b) En base a su capacidad de deformación el aluminio podemos deformarlo haciéndolo pasar entre dos cilindros cuya separación sea inferior al espesor inicial; esta operación llamada laminación nos permite obtener productos como láminas, soleras, placas, perfiles estructurales, barras de diferentes tipos de sección transversal, perfiles distintos, etc. Se puede realizar la laminación en frío o en caliente, los cilindros del laminador son pequeños comparados con los del laminador para el acero; se ha logrado una laminación a hojas de 0.004 mm de espesor. Las ventajas en este proceso son obtención de secciones transversales constantes, grandes longitudes, control de la deformación y de las propiedades mecánicas, bajos costos de operación, etc.

c) Podemos obtener piezas por compresión directa a través de dos dados (matrices), por medio de prensas o martillos. La operación de forja en el aluminio no requiere demasiada energía y es muy común que se emplee la forja en prensa ya que obtenemos mejor acabado superficial, buena precisión dimensional, altas velocidades de producción y se obtienen piezas de forma compleja.

d) Un proceso por compresión indirecta lo constituye la extrusión, este proceso consiste en formar productos de sección transversal constante, al forzar al material a pasar a través de un dado o boquilla el cual cuenta con la forma deseada. El aluminio se puede extruir a casi cualquier forma imaginable debido a las características especiales con las que cuenta; los productos que comúnmente se obtienen son perfiles, cancelerías, tubos, barras; podemos tener una extrusión en frío o en caliente siendo esta última la de mayor aplicación.

e) Otro proceso por compresión indirecta lo es el estirado (drawing), este básicamente se realiza a temperaturas bajas por lo que es un proceso en frío, los productos que podemos obtener son alambres, tubos, perfiles comerciales o cualquier producto de sección transversal constante. Este proceso parte de productos laminados en caliente, las ventajas que se obtienen es un control de las propiedades mecánicas, excelente acabado superficial, buena precisión dimensional y alta producción.

f) Embutición, este proceso se puede efectuar en frío o en caliente y permite obtener piezas de formas muy variadas con un ritmo de producción muy elevado. Los productos que se obtienen en el aluminio son recipientes para líquidos como lo son las latas de cerveza y refresco, generalmente son de forma cilíndricas aun cuando podemos obtener recipientes esféricos, cuadrados, rectangulares, este es un proceso para altas velocidades de producción.

## GENERALIDADES

g) Otros procesos de conformado que podemos mencionar para el aluminio son el Estampado, Rolado, Trefilado, además de que podemos realizar la soldadura del aluminio y sus aleaciones si evitamos la formación de la película de alúmina que impide el contacto entre las diferentes partes fundidas, esta operación se puede realizar bajo un flux decapante o bien al arco en atmósfera de argón logrando así la soldadura del aluminio y sus aleaciones.

Como se puede observar el aluminio es un material bastante útil en la vida del hombre, la mayor parte de los procesos de conformado que tenemos se pueden dar en este material, se le puede dar cualquier forma imaginable, obtener diferentes tipos de secciones transversales, espesores de micras, fundirlo, unirlo, etc.

### 1.2.6 USOS Y APLICACIONES.

Debido a su bajo peso específico, sus buenas cualidades metálicas, su resistencia a la corrosión y a la facilidad con que forma aleaciones, el aluminio y sus aleaciones han llegado a ser muy utilizadas, por ejemplo, en la construcción de automóviles y aviones, como partes de edificios, como envases industriales, para aparatos, en electrotecnia, para objetos de adorno, utensilios para cocina. Aparentemente la futura expansión del aluminio está en sus aplicaciones en envases, en especial latas en donde se ha observado una expansión continua. En el campo de la industria del transporte ha resultado insustituible, se estima que para la década de los 90's los carros usarán alrededor de 90 kg de aluminio, actualmente se llevan 55 kg por unidad. Esto compensa un poco el bajo avance que ha registrado en aplicaciones eléctricas, en donde a perdido terreno frente al cobre o en la fabricación de objetos duraderos en donde los plásticos mantienen superioridad.

Una forma de aluminio puro se utiliza para reflectores fotográficos con el fin de aprovechar sus características de alta reflectividad a la luz y de no decoloración superficial.

El aluminio no es tóxico, ni magnético y no produce chispa. La característica no magnética hace al aluminio útil para diversos fines de protección eléctrica, como cajas para barras conductoras o cubiertas para equipo eléctrico.

Su conductividad eléctrica lo hace apropiado como conductor eléctrico para muchas aplicaciones industriales. También se utiliza aluminio como reductor para reacciones químicas.

# **CAPITULO**

## **II**

## 2. PROCESOS DE LAMINACION.

### 2.1 INTRODUCCION.

Llamamos laminación al proceso consistente en deformar plásticamente los metales haciéndolos pasar entre cilindros. Es el procedimiento más extendido para el trabajo de los metales, porque es el que mejor se presta a las producciones elevadas y permite obtener un buen control de los productos finales.

Los antecedentes más antiguos del proceso se remontan a 1550, cuando se obtienen las primeras hojas de metal laminado, estas se caracterizan por su espesor uniforme a diferencia de las producidas por forja. Es fácil suponer que rápidamente el proceso se difundió, empleándose posteriormente no solo para ajustar el espesor de las hojas, sino también para reducir su espesor. En un principio el proceso no fue aplicado para el hierro, teniendo que transcurrir más de un siglo para que esto sucediera.

El verdadero nacimiento de la laminación se produce hacia 1783, cuando el inglés Henry Cort, obtiene la patente británica No. 1351, la cual cubre su introducción de rodillos ranurados empleados en la manufactura de barras de hierro.

### 2.2 DEFINICION DEL PROCESO.

La laminación consiste en la reducción de la sección transversal de un material, al hacerlo pasar entre dos rodillos cilíndricos girando en sentido opuesto. Dichos cilindros producen la deformación plástica del material por medio de esfuerzos compresivos y cortantes. Los compresivos se deben a que según el material se introduce entre los rodillos, el espesor libre entre ellos va siendo menor, los esfuerzos cortantes son debidos a que las fibras externas del material están sujetas a la fuerza de fricción de los rodillos.

Hoy en día, la laminación es el medio más económico de reducir la sección transversal de un material y tiene, por esto, un gran campo de aplicaciones tanto en frío como en caliente.

2.3 CLASIFICACION GENERAL.

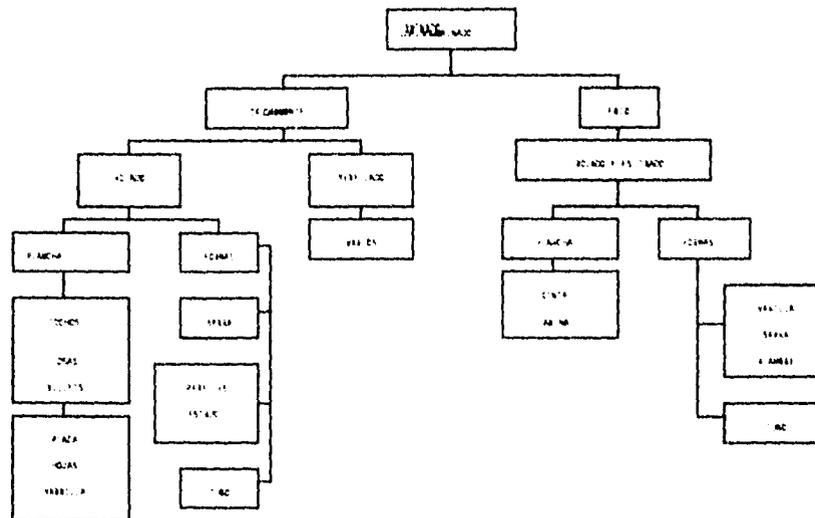


Figura 2.1 Tipos de procesos y productos de las plantas de laminación primaria.

El lingote inicial se transforma en desbastes pesados (blooms) y palanquilla, generalmente por laminación en caliente. Los desbastes se continúan laminando en caliente hasta obtener planchas o chapas gruesas, chapa fina, barras, varillas, tubos, carriles o perfiles estructurales. La laminación en frío ha adquirido gran importancia industrial. En frío se lamina la chapa fina y extrafina, el fleje, etc., obteniéndose productos con muy buen acabado superficial y mejor resistencia mecánica, a la vez que se consigue una gran precisión en las dimensiones del producto.

Un desbaste pesado o bloom es el primer producto de la laminación del lingote; suele ser de sección cuadrada o rectangular, pero el ancho suele ser inferior al doble del espesor y el área no suele pasar de 230 cm<sup>2</sup>. Con una mayor reducción en la laminación en caliente se obtiene la palanquilla, cuya área transversal mínima suele ser de 15 cm<sup>2</sup>. En la metalurgia de los metales no ferrosos se llama palanquilla a cualquier lingote que ha sufrido trabajo en caliente por laminación, forja o extrusión, o incluso a un lingote colado en forma y dimensiones adecuadas para el trabajo posterior en caliente. Un desbaste plano o slab es un producto de la laminación del lingote con una sección transversal no mayor de 100 cm<sup>2</sup> y con un ancho superior al doble del espesor. Los desbastes pesados y ligeros, blooms, palanquillas y slabs, se conocen con el nombre genérico de productos semiacabados o semiproductos, porque se emplean como materia prima para obtener otros productos de laminación. La diferencia entre chapa gruesa, chapa mediana y chapa fina se hace por el espesor, suele ser considerada como chapa fina a la que tiene menos de 3 mm de espesor. El nombre de fleje suele referirse a chapa fina de menos de 30 cm de ancho.

## LAMINACION

Recientemente se ha desarrollado la laminación de polvos, en la que se introducen entre los cilindros polvos metálicos que se comprimen entre ellos para formar un "fleje verde", que luego se sinteriza para darle mayor densidad. La ventaja que se asigna a este procedimiento es la eliminación de trabajo en caliente, con lo cual se consigue una menor contaminación, más fino el tamaño de grano y ausencia de texturas en la chapa obtenida. La laminación de polvos parece que tiene ventajas definitivas para el caso de metales muy reactivos.

El perfilado de la chapa con rodillos, que a veces se llama perfilado por laminación, es una operación especial de trabajo en frío en el que la chapa o fleje se pliega progresivamente, para obtener perfiles estructurales de formas complejas, pasándolas a través de series de cilindros o rodillos accionados mecánicamente. Otro tipo especial de laminación es la laminación de roscas, en las que se pasan piezas en bruto entre canales para roscar.

### 2.4 ARREGLOS.

La unidad básica a través de la cual se realiza el proceso se denomina caja de laminación, y está constituida por el bastidor, chumaceras, medios de accionamiento y sistemas de ajuste de la apertura de los rodillos, así como de otros elementos auxiliares tales como las guías de entrada y salida. Estos arreglos se designan o clasifican de acuerdo al número y disposición de los rodillos, teniéndose entonces:

**LAMINADOR o ARREGLO DUO:** Esta es la disposición más antigua, sencilla y versátil, ya que son empleados tanto en desbaste como en acabado. Consiste de un par de rodillos que giran en sentido opuesto, su eje de rotación es horizontal, siendo contenidos en un mismo plano vertical (Figuras 2.2 y 2.4a). En el caso de contar con una sola caja para realizar el proceso este será lento debido al tiempo que se pierde al llevar al material a la entrada del laminador, necesitando además de mesas elevadoras.

El desarrollo lógico a partir de lo anterior fue el laminador dúo reversible, en donde el material puede ser laminado en ambos sentidos (Figura 2.4b). Este arreglo está limitado por la longitud del material y por la velocidad de laminación. Se emplean en el desbaste de hasta 10 m de longitud.

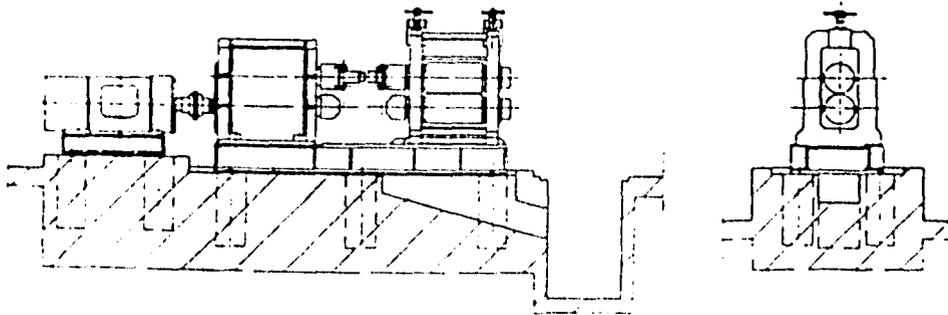


Figura 2.2 Laminador dúo.

## LAMINACION

**ARREGLO TRIO:** Consiste de tres rodillos de igual diámetro, con eje de rotación horizontal, los ejes de los tres se encuentran contenidos en un mismo plano vertical. Presenta las ventajas del dúo y dúo reversible, razón por la que es utilizado en desbaste así como también en trenes desplegados (Figuras 2.3 y 2.4 c). En el caso de ser empleados en el desbaste será necesario que cuenten con mesas elevadoras en ambos lados.

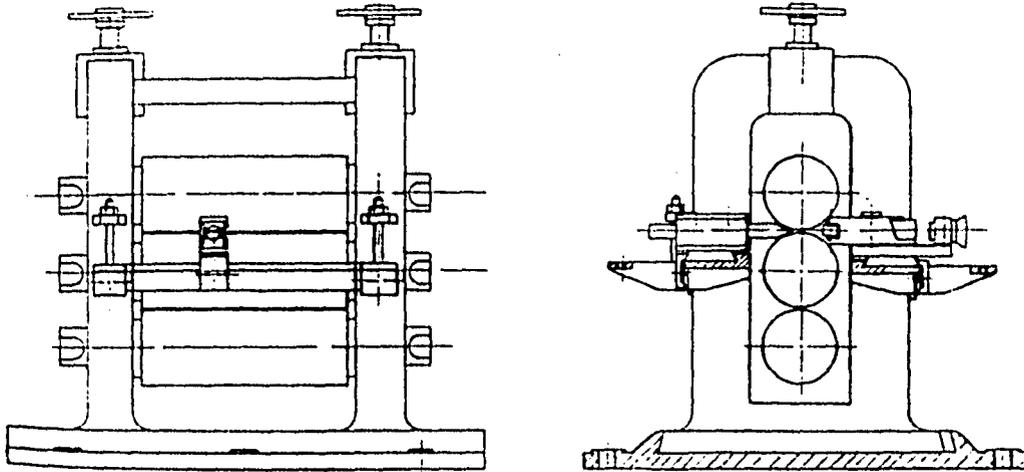


Figura 2.3 Laminador trio.

**LAMINADOR CUARTO:** Esta compuesto por cuatro rodillos, dos de trabajo y dos de apoyo, cuyo eje de rotación está contenido en un mismo plano vertical. Los rodillos interiores (de trabajo) normalmente son forjados y su diámetro es de  $1/2$  a  $1/3$  de los de apoyo (Figura 2.4 d).

Este tipo de arreglo se emplea básicamente en los pasos de acabado de hoja, se busca en estos reducir la carga y evitar variaciones, sobre el eje transversal, del espesor de la lámina (se evita la flexión de los rodillos). En algunas ocasiones estos arreglos se aplican para el desbaste de aleaciones muy tenaces tales como los Hastelloy (Ni, Cr, Mo, Fe).

Se puede conseguir una notable disminución en la potencia necesaria para la laminación empleando cilindros de pequeño diámetro, pero los cilindros delgados tienen menos resistencia y rigidez que los gruesos y han de ser soportados por cilindros de apoyo de mayor diámetro.

**LAMINADOR DE RACIMO:** Este consiste de dos rodillos de trabajo de pequeño diámetro y cuatro o más rodillos de apoyo, contenidos en varios planos verticales. Se emplean en el acabado de hoja metálica de alta resistencia a pequeño espesor (Figura 2.4 e).

## LAMINACION

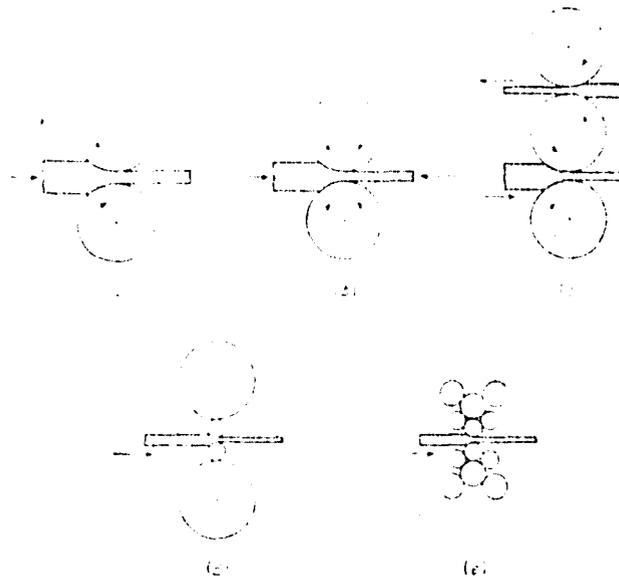


Figura 2.4 Disposiciones típicas de los cilindros. a) Dúo; b) dúo reversible; c) trío; d) cuarto y e) racimo.

**LAMINADOR SENDZIMER:** Es una refinación del arreglo de racimo, en el que se tienen del orden de 18 rodillos de apoyo. Se emplean cuando se van a laminar metales muy tenaces, en anchos mayores a 1 m y a espesores muy pequeños. La aplicación del rodillo de pequeño diámetro permite reducir la carga y por lo tanto la potencia necesaria, además de facilitar la laminación a pequeños espesores así como el preciso control del espesor. Por ejemplo en estos laminadores se puede trabajar hoja de acero inoxidable de hasta 1.6 m de ancho con los rodillos de 85 mm de diámetro.

**LAMINADOR PLANETARIO:** Este arreglo combina los efectos de forja y laminación, permitiendo grandes reducciones en una sola etapa. Se podrá entonces pasar de un planchón a lámina (reducción de 90% o aún mayores), con lo cual este laminador hace las veces de todo un tren. Consiste en una serie de rodillos de pequeño diámetro, los cuales giran sobre dos rodillos de apoyo de mayor diámetro. Dadas las grandes reducciones y las obvias características del producto acabado, es necesario contar con rodillos de empuje así como también con cuando menos un par de rodillos acabadores (Figura 2.5).

En ciertas ocasiones se utiliza la combinación de rodillos en una misma caja de laminación, teniendo un par de estos girados 90° con respecto a los otros, a este arreglo se le conoce como caja universal, y block "x" cuando los rodillos se encuentran en planos a 45° con respecto a la horizontal. Estos arreglos pueden ser utilizados en la fabricación de vigas "I" o en el ajuste de los costados de placas.

## LAMINACION

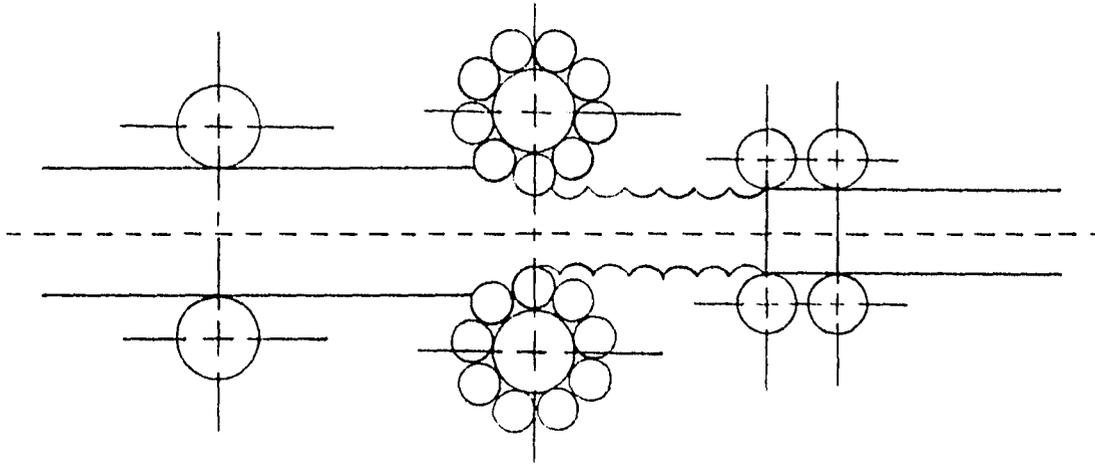


Figura 2.5 Laminador planetario.

**TREN DE LAMINACION:** Cuando se desea obtener un determinado producto, tal como la varilla corrugada, barra hexagonal, cuadrada, circular, perfiles tales como vigas "I", "T", etc., siendo que se requiere un gran volumen de producción, será necesario recurrir a un tren de laminación. Estos están formados por una o más cajas de laminación, las cuales trabajan de manera secuencial (Figura 2.6). Los trenes de laminación se clasifican tanto en base al producto obtenido, como también de acuerdo a la disposición de las cajas que los constituyen, tenemos entonces:

- a) **Tren continuo**, compuesto por cajas que se encuentran una a continuación de otra, pasando el material que se está laminando de una a otra caja sin interrupción, laminando la misma barra varias veces a la vez (cajas acomodadas en serie).
- b) **Semicontinuos**, es la misma disposición del continuo con la diferencia que en estos se puede retirar el material en pasadas intermedias si así se desea.
- c) **En línea o desplegados**, compuestos por cajas alineadas o dispuestas en líneas paralelas. Entre caja y caja existen dispositivos volvedores y formadores de lazo, normalmente un único motor principal acciona todas las cajas del tren. En estos se emplean cajas trio, donde el tercer rodillo sirve únicamente como árbol de transmisión.
- d) **En zig-zag**, combinación de tren continuo y de línea.

## LAMINACION

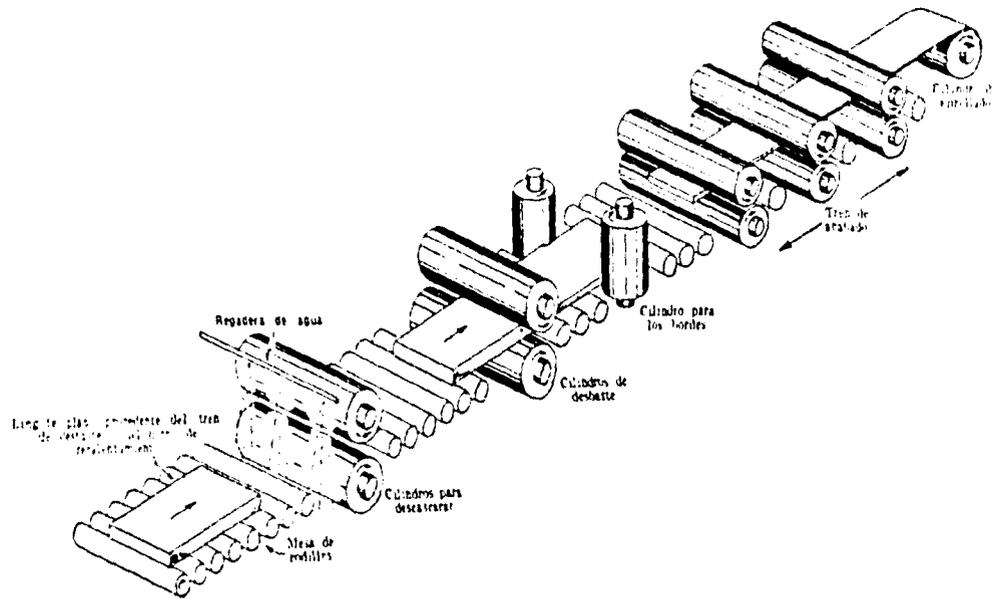


Figura 2.6 Tren de laminación.

### 2.5 TECNICAS DE LAMINACION.

#### 2.5.1 LAMINACION EN CALIENTE.

La mayor parte de las barras de secciones transversales rectangulares, circulares o más complicadas, se producen mediante grandes reducciones de sección por laminado en caliente. Esta operación también mejora las propiedades del metal fundido, rompiendo la estructura de fundición y refinando el tamaño de grano, obteniéndose una mejor homogeneidad y una mayor tenacidad y resistencia.

Los trenes de laminación en caliente, utilizados para la producción de desbastes a partir de lingotes, se conocen como trenes de desbaste, y normalmente tienen dos grandes cilindros, montados verticalmente uno encima del otro. Este tipo de laminador se conoce como tren laminador dúo, en contraste con el laminador cuarto y con los otros trenes más complejos utilizados en el laminado en frío. Para producir por laminación en caliente perfiles de diversas secciones: redondos, hexagonales, en "U", angulares, vigas en "I", etc., se utilizan cilindros con perfiles especiales. Estos perfiles tienen una importancia económica considerable, ya que se producen en grandes cantidades, pero los cilindros se diseñan normalmente de manera empírica, siguiendo unas cuantas reglas generales, ya que el problema, como en la forja con estampa cerrada, es principalmente un problema de rellenado de formas, del cual existen por el momento pocos conocimientos teóricos.

## LAMINACION

En todas las laminaciones en caliente hay hornos, conocidos con el nombre de hornos pit, que calientan al acero para poderlo laminar. Estos hornos se calientan de ordinario con gas, frecuentemente gases de altos hornos, o de hornos de coque. El acero se calienta a una temperatura comprendida entre 1037°C y 1232°C (1900 y 2250°F) dependiendo de la clase de acero que se está fabricando. Cuando se hacen pequeñas cantidades de aceros para herramientas o aceros aleados, los lingotes se dejan enfriar antes de calentarlos para la subsiguiente laminación; en cambio, los lingotes grandes se cargan en los hornos pit lo antes posible después de sacarlos del molde. A pesar de que los lingotes están al rojo vivo cuando se cargan en los pit, se requiere de una a dos horas para dejarlos a la temperatura apropiada para la laminación. Cuando se calienta para laminar, es preciso tener cuidado de calentar tanto el interior como el exterior del lingote aproximadamente a la misma temperatura.

### 2.5.2 LAMINACION EN FRIO.

El laminado en frío se emplea mucho para dar el acabado a los metales laminados en caliente. Comunica una superficie lisa y brillante, asegura la exactitud de dimensiones, y aumenta apreciablemente la resistencia a la tracción del producto acabado. El laminado en frío se utiliza para fabricar chapas, flejes, barras para ejes, alambres planos, etc. La mayoría de los materiales laminados en caliente se limpian antes de laminarlos en frío. La operación de limpieza consiste usualmente en sumergir el producto laminado en caliente en una solución ácida apropiada. El acero se limpia con una solución caliente de ácido sulfúrico en agua. La principal acción de la operación de limpieza es quitar las escamas superficiales. Este proceso se denomina decapado.

Después del decapado, el metal se lava con agua para quitar el ácido. Frecuentemente, a continuación se sumerge en una solución caliente de cal en agua, la cual después de seca forma una película protectora del metal.

Tanto el laminado en frío como el laminado en caliente pueden efectuarse en un laminador de dos o cuatro cilindros, o en un laminador continuo. El laminado en frío se continúa hasta que la sección laminada se hace demasiado dura para continuar el proceso o hasta que alcanza el tamaño final. Puede resultar necesario recocer el metal después de varias pasadas a través del laminador en frío, con el fin de mantenerlo en estado trabajable. Si el recocido se lleva a cabo en hornos abiertos, hay que decapar de nuevo antes de relaminar con el fin de quitar las escamas y limpiar el metal. En la actualidad el recocido de productos laminados en frío se realiza en hornos especiales que efectúan el recocido sin formar escama superficial o incluso sin decoloración.

Los trenes cuarto de alta velocidad, con tres o cuatro cajas, se emplean para laminar en frío la chapa de acero, aluminio y aleaciones de cobre. Este tipo de trenes se diseñan generalmente para trabajar con tensiones hacia atrás y adelante. Los trenes continuos tienen una gran capacidad y necesitan muy poca mano de obra. Sin embargo, estos equipos exigen una inversión inicial de capital muy grande y no tienen versatilidad. Los trenes de una sola caja cuarta reversible, con tensión hacia adelante y hacia atrás, representan una instalación más versátil. Este tipo de trenes se emplea frecuentemente para fabricaciones especiales de gran variedad de dimensiones, pero no pueden competir con los trenes continuos que elaboran muchas toneladas de material.

## LAMINACION

La eliminación del límite elástico aparente en la chapa de acero recocida es un problema de gran importancia práctica, porque su existencia en la chapa es causa de deformación no uniforme en las operaciones de conformación, originándose marcas de deformación durante la embutición profunda. El procedimiento usual empleado para eliminarlo es dar a la chapa recocida una pasada final de laminación en frío con muy pequeña reducción o el enderezado por estirado. El primero consiste en pasar la chapa entre dos conjuntos de cilindros de pequeño diámetro, dispuestos de forma que no coinciden las filas superior e inferior, con lo que la chapa ha de flexionarse arriba y abajo al pasar entre ellos y se endereza al salir de la máquina. El segundo procedimiento consiste en agarrar la chapa por los extremos con dos mordazas y enderezarla por estirado bajo simples esfuerzos de tracción.

### 2.6 TEORIA DE LAMINACION

#### 2.6.1 ANALISIS DE CARGA Y RELACIONES GEOMETRICAS.

Es importante poder determinar la carga y potencia demandadas por el proceso, considerando para esto, las relaciones involucradas entre la geometría de los rodillos y las fuerzas, así como también el efecto de la temperatura, velocidad, reducción y acabado que presentan los rodillos.

Al tener una deformación plástica el gasto volumétrico a la entrada y salida son iguales:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_f \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.1}) \\ &\text{ó} \\ b_0 h_0 V_0 &= b_f h_f V_f \end{aligned}$$

donde 0 es la condición de entrada; f es la condición de salida; b es el ancho; h es el espesor y V es la velocidad.

$$V_f = V_0 \left( \frac{h_0 b_0}{h_f b_f} \right) \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.2})$$

En el laminado de productos planos se puede considerar que el ensanchamiento es nulo, por lo que:  $b_0 = b_f$ , entonces:

$$V_f = V_0 \left( \frac{h_0}{h_f} \right) \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.3})$$

Además tenemos que:

$$\text{a la salida } V_f > aR \qquad \text{a la entrada } V_0 < aR$$

Solo en un punto de la superficie de contacto entre el material y los cilindros pueden ser iguales las velocidades de ambos, este punto se llama punto de no deslizamiento o punto neutro (N):  $V_{Nv} = aR$

LAMINACION

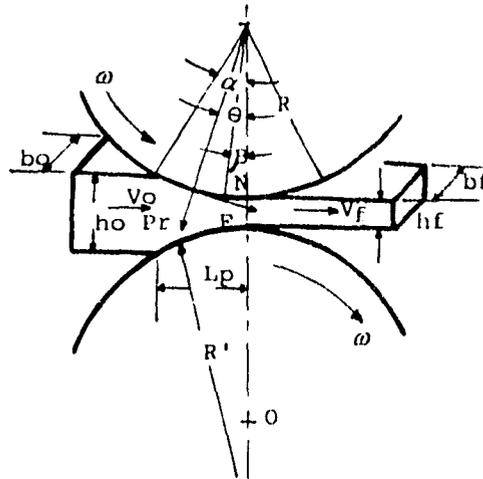


Figura 2.7. Distribución de presiones en laminación

Subíndices: 0 entrada  
f salida  
r radial

Designación de literales:  
h espesor  
b ancho  
R radio del rodillo  
R' radio del arco de contacto del rodillo  
 $\omega$  velocidad angular  
N plano neutro  
P presión  
F fuerza de fricción

DEFINICION: La presión de laminado se aplica sobre el arco de contacto. para facilitar el análisis, la proyección de éste en la dirección de laminado, a esta variable la consideraremos como longitud del arco de contacto ( $L_p$ ).

Por trigonometría de la Figura 2.7

$$L_p^2 + \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = R^2$$

$$L_p^2 + R^2 - \frac{2R\Delta h}{2} + \frac{\Delta h^2}{4} = R^2$$

$$L_p^2 = R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}$$

## LAMINACION

Como  $\Delta h \ll R$  la expresión anterior se reduce a:

$$L_f = \sqrt{R\Delta h} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.4})$$

Por lo tanto la carga de laminación será:

$$P = \bar{p}bL_f \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.5})$$

$\bar{p}$  - Presión específica de laminación, es función del esfuerzo de cedencia para una condición biaxial de deformación " $\sigma_0$ ", y de la reducción "r". La presión específica de laminación es igual a la carga de laminación dividida por la superficie de contacto ( $bL_f$ ).

DEFINICION. El ángulo formado por el plano de entrada y el ángulo que contiene los ejes de rotación de los rodillos, se denomina ángulo de mordedura o contacto ( $\alpha$ ) y está dado por:

$$\alpha = \text{ang sen } \frac{L_f}{R} \text{ ó } \alpha = \tan^{-1} \frac{L_f}{R - \Delta h/2} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.6})$$

En la laminación la deformación se produce por una fuerza de compresión y por una fuerza de fricción. La fuerza de fricción tiene que contrarrestar la fuerza de empuje componente de la compresión del rodillo que rechaza al material del espacio entre rodillos.

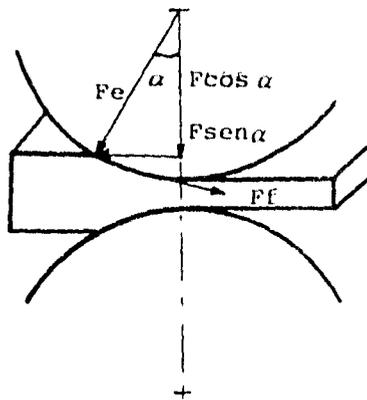


Figura 2.8. Fuerzas en la laminación.

LAMINACION

Fuerza de empuje =  $F \text{ sen } \alpha$   
 Fuerza de fricción =  $Ff = \mu F \text{ cos } \alpha$

De la figura 2.8:  $\sum F_x = 0$

$$F \text{ sen } \alpha = \mu F \text{ cos } \alpha$$

despejando el coeficiente de fricción  $\mu$ :

$$\mu = \frac{F \text{ sen } \alpha}{F \text{ cos } \alpha} = \frac{\text{sen } \alpha}{\text{cos } \alpha} = \tan \alpha$$

Por otra parte de la figura 2.7:  $\tan \alpha = \frac{L_p}{R - \Delta h/2}$

como  $\Delta h \ll R$ , implica:  $\mu = \frac{L_p}{R}$

igualando a  $\tan \alpha$  y sustituyendo el valor de  $L_p$ :

$$\mu = \frac{(R\Delta h)^{1/2}}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

despejando  $\Delta h$ :

$$\Delta h = \mu^2 R \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.7})$$

La ecuación 2.7 nos indica la máxima reducción que se puede obtener, limitada por el coeficiente de fricción y el radio de los cilindros, razón que justifica los grandes diámetros en el desbaste.

Por definición: La mínima reducción que se puede obtener será:

$$h_{\text{min}} \propto \sigma_0 / R$$

$$h_{\text{min}} = \text{cte } \sigma_0 / R \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.8})$$

DEFINICIONES:

Las grandes fuerzas necesarias para deformar el material durante el laminado provocan dos tipos fundamentales de deformación elástica en los rodillos. Primero los rodillos tienden a flexionarse debido a que el material tiende a separarlos, mientras que el movimiento axial de los muñones está restringido, esto puede provocar variaciones de espesor a lo ancho de la hoja, lo cual será compensado con coronamiento del rodillo. Segundo, los rodillos se deforman en la región de contacto, por esta razón el radio en la zona de contacto se incrementa a un valor  $R'$  el cual se calcula como :

Teoría de Hertz para compresión elástica de dos cilindros.

$$R' = R \left[ 1 + (c P / b \Delta h) \right] \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.9})$$

## LAMINACION

Donde:  $R'$  - Radio de contacto  
 $R$  - Radio del rodillo  
 $P$  - Carga de laminación

$c$  - Constante elástica del material del rodillo,  $c = 16(1 - \nu^2) / E\pi$

$\nu$  - Coeficiente de Poisson  
 $E$  - Módulo de elasticidad del material

Otro de los parámetros más importantes y de más fácil determinación es la reducción ( $r$ ):

$$r = \frac{A_2 - A_1}{A_3} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.10})$$

Para productos planos se considera que  $A_3 = 0$ , lo cual implica:

$$r = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.11})$$

Porcentaje de reducción,  $\% r = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot 100$

Por otro lado a los deslizamientos existentes entre rodillos y material a la salida de este se le denomina avance ( $S$ ):

$$S = \frac{V_f - V_r}{V_f} = \frac{V_f - \alpha R}{\alpha R}$$

Donde:  $V_f$  = velocidad final del material  
 $V_r$  = velocidad de los rodillos

También el deslizamiento está relacionado con el ángulo de mordedura y el coeficiente de fricción por:

$$S = \frac{1}{3} \left( \frac{r}{1-r} \right) \left( 1 + \frac{\alpha}{2\mu} \right) \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.12})$$

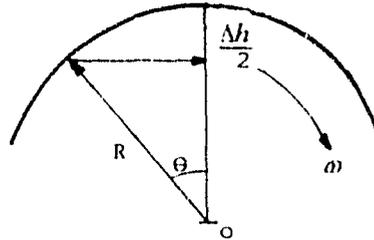
2.6.2. VELOCIDAD DE DEFORMACION.

$$\dot{\xi} = \frac{\xi}{t} \text{ ó } \frac{d\xi}{dt}$$

$$d\xi = \frac{dh}{h}$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{dh}{dh}$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{V_{PR}}{h}$$



$$V_{PR} = \text{Velocidad vertical del rodillo} = \frac{dh}{dt}$$

$$\dot{\xi}_\theta = \frac{aR \text{ sen } \theta}{h_\theta}$$

$$h_\theta = h_f + 2(R - R \cos \theta)$$

$$\dot{\xi}_\theta = \frac{aR \text{ sen } \theta}{h_f + 2(R - R \cos \theta)} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.13})$$

La ecuación 2.13 nos indica la velocidad de deformación para un punto cualquiera.

2.6.3. EFECTO DE LA CARGA EN FRÍO.

A la fecha existen diversos métodos tanto analíticos, empíricos y experimentales a partir de los cuales se podrá evaluar de forma aproximada la carga de laminación. La exactitud de estos estará delimitada por las características del proceso en particular que se analice.

La ecuación más sencilla se dedujo considerando aplastamiento libre del material, si consideramos un 20% adicional por fricción tenemos:

Si la carga de laminación es  $P = \hat{p}bl_f$  ; si  $\hat{p} = \sigma_0$  tenemos:

$$P = 1.2 \sigma_0 bl_f \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.14})$$

Donde  $\sigma_0$  = Esfuerzo de cedencia para una condición biaxial de deformación.  
 Del criterio de la energía de distorsión para la deformación plana:

## LAMINACION

$$\sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_v \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.15})$$

Donde  $\sigma_y$  - Esfuerzo de cedencia para la deformación homogénea.

Normalmente se emplea " $\sigma_y$ "; ya que en la laminación de productos planos el ensanchamiento es prácticamente nulo, para determinar el empleo de uno u otro se tiene.

si  $\frac{b}{L_r} \leq 4$  entonces se considera deformación homogénea.

Realizando una analogía de laminación con forja las expresiones a las que se llega para el cálculo de la carga son

condiciones de no deslizamiento

$$P = \sigma_y b L_r \left[ 1 + \frac{L_r}{4\bar{h}} \right] \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.16})$$

fricción con deslizamiento

$$P = \bar{\sigma}_0 b L_r \left[ 1 + \frac{\mu L_r}{2\bar{h}} \right] \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:  $\bar{h}$  - espesor promedio;  $\bar{h} = \frac{h_0 - h_f}{2}$

$\mu$  - coeficiente de fricción

$\bar{\sigma}_0$  - esfuerzo de cedencia

**ANÁLISIS TEÓRICO DE LA CARGA:** Uno de los problemas de conformado mecánico que más se ha estudiado es la laminación. En todos estos estudios se han pretendido expresar a las presiones y fuerzas que se generan durante el proceso en función de variables geométricas y de la resistencia del material. Dada la variedad de casos que pudieran presentarse esto ha resultado en soluciones complejas. La ecuación diferencial de equilibrio para un material, siendo deformado entre rodillos, es común para todas las teorías; para desarrollar ésta se debe de cumplir que:

- 1.- Existan condiciones de deformación plana.
- 2.- No presenten deformación elástica los rodillos.
- 3.- La velocidad periférica de los rodillos sea constante.
- 4.- Se pueda emplear el criterio de cedencia de Tresca.
- 5.- La deformación elástica del material sea despreciable (cuerpo sólido - plástico perfecto).

## LAMINACION

Las condiciones anteriormente mencionadas básicamente se cumplirán para laminación en frío, para el caso de laminación en caliente no se podrá resolver la ecuación diferencial resultante debido a la compleja dependencia existente del esfuerzo de cedencia con respecto a la velocidad de deformación y temperatura, así como también se complicará la solución analítica al no poder justificar la simplificación de dicha ecuación ya que los ángulos de mordedura son mucho mayores.

Analizando dos secciones, antes y después del punto neutro tenemos respectivamente:

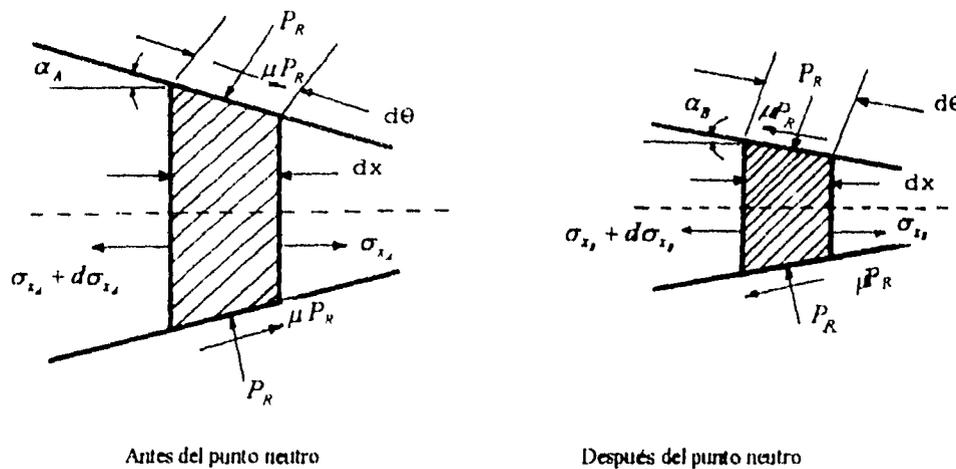


Figura 2.9

Al realizar un balance de fuerzas antes y después del punto neutro la única diferencia será el sentido y por tanto el signo de la fuerza de fricción.

Variables empleadas:

$P_R$  - presión radial.

$\sigma_x$  - esfuerzo longitudinal debido a la presencia de freno o devanador.

$\Theta$  - ángulo definido con respecto al plano de salida.

$x$  - coordenada paralela al eje de laminación.

a) Carga debida a esfuerzos longitudinales (considerando unidad de ancho).

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - \sigma_x h$$

b) Carga debida a la fuerza de fricción.

$\mu P_R$ : fuerza de fricción, su proyección sobre el eje x es:

$$A = \frac{dx}{\cos \Theta}$$

LAMINACION

Considerando que se aplica en los rodillos carga de fricción:

$$\pm 2 P_f \mu (dx / \cos \Theta) \cos \Theta$$

- neutro a la salida
- neutro a la entrada

Por ultimo tenemos la carga debida a la presión radial:

$$\text{fuerza radial} = P_R \cdot A ; A = dx / \cos \Theta$$

Proyección sobre el eje x =  $P_R \sin \Theta$

Fuerza con respecto al eje x debida a  $P_R$  (considerando dos rodillos)

$$2 P_R (dx / \cos \Theta) \sin \Theta$$

Haciendo  $\sum F_x = 0$ , por ser movimiento uniforme, tenemos:

$$-\sigma_1 \cdot d\sigma_1 \cdot h + dh - \sigma_1 h \pm \mu 2 P_R (dx / \cos \Theta) \cos \Theta + 2 P_R (dx / \cos \Theta) \sin \Theta = 0 \quad \text{.....(Ec. 2.18)}$$

Desarrollando la ecuación anterior se llega a:

$$\sigma_1 dh + h d\sigma_1 + d\sigma_1 dh \pm 2 \mu P_R dx + 2 P_R \tan \Theta dx = 0 \quad \text{.....(Ec. 2.19)}$$

Se puede simplificar la ecuación 2.19 considerando despreciable el producto de dos diferenciales  $d\sigma_1 dh \approx 0$ , además:

$$\sigma_1 dh + h d\sigma_1 = d(\sigma_1 h), \text{ por lo que la ecuación 2.19 resulta:}$$

$$d(\sigma_1 h) \pm 2 \mu P_R dx + 2 P_R \tan \Theta dx \quad \text{.....(Ec. 2.20)}$$

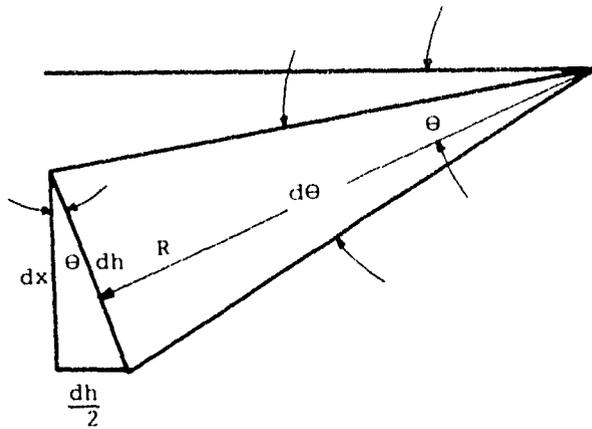


Figura 2.10

## LAMINACION

Pero  $\tan \Theta = \frac{dh/2}{dx}$ , despejando  $dx = \frac{dh}{2 \tan \Theta}$

Sustituyendo en la ecuación 2.20

$$d(\sigma_r h) \pm 2\mu P_R \left( \frac{dh}{2 \tan \Theta} \right) + 2P_R \tan \Theta \left( \frac{dh}{2 \tan \Theta} \right)$$

pero la  $\tan \Theta = 1/\cot \Theta$ , por lo que:

$$d(\sigma_r h) \pm \mu P_R \cot \Theta dh + P_R dh \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.21})$$

Pero  $\cot \Theta = (dh/2)/Rd\Theta$ , despejando el  $dh = 2R \cot \Theta d\Theta$  y sustituyendo en la ecuación 2.21:

$$d(\sigma_r h) \pm \mu P_R \cot \Theta (2R \cot \Theta d\Theta) + 2P_R R \cot \Theta d\Theta$$

$$d(\sigma_r h) \pm 2\mu R P_R \cot^2 \Theta d\Theta + 2R P_R \cot \Theta d\Theta \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.22})$$

Despejando  $[d(\sigma_r h)]$  de la ecuación 2.22 tenemos:

$$d(\sigma_r h) = -2P_R R (\cot^2 \Theta \pm \mu \cot \Theta) d\Theta \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.23})$$

A la expresión 2.23 se le conoce como ecuación de Von Karman ó ecuación diferencial de laminación.

Desarrollando la ecuación 2.23 para laminado en frío:

Bland y Ford han propuesto algunas simplificaciones. Restringiendo el análisis de laminación en frío a condiciones de baja fricción para ángulos menores a 6°, pudieron admitir que:

$\cot \Theta \cong \Theta$ ,  $\cos \Theta = 1$ , de lo anterior la ecuación 2.23 queda:

$$d(\sigma_r h) = -2R P_R (\Theta \pm \mu) d\Theta \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.24})$$

De la ecuación de Von Mises para la fluencia tenemos:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

donde:  $\sigma_0$  - esfuerzo de cedencia aparente.

$\sigma_1, \sigma_3$  - esfuerzos principales.

Analizando el diagrama se tiene que los esfuerzos principales son:  
P- presión de laminación.

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_3 = P$$

Por lo tanto:

$$\sigma_x - (-P) = \sigma_0; \Rightarrow \sigma_x + P = \sigma_0; \Rightarrow \sigma_x = \sigma_0 - P$$

Realizando  $\sum F_y = 0$  para determinar la relación entre la presión radial y la presión de laminación.

LAMINACION

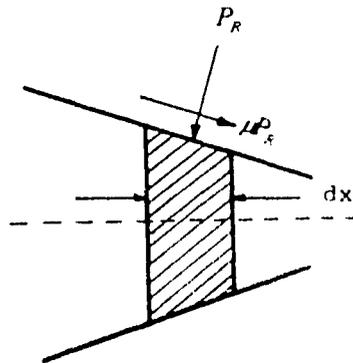


Figura 2.11.

$$P_r(dx / \cos \Theta) \cos \Theta \pm \mu P_r(dx / \cos \Theta) \sin \Theta - P dx = 0$$

$$P = P_r(1 \pm \mu \tan \Theta) \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.25})$$

La ecuación 2.23 se puede integrar con la ayuda de la ecuación 2.25 y el criterio de Von Mises. Desgraciadamente, el tratamiento matemático es muy complicado, y es necesario utilizar diversas aproximaciones para obtener una solución manejable.

De lo hecho por Bland y Ford se obtienen ecuaciones relativamente sencillas para la presión radial:

Presión de la entrada al neutro

$$P_r(\Theta) = \frac{\sigma_0 \bar{h}}{h_0} \left( 1 - \frac{\sigma_{x0}}{\sigma_{\theta 0}} \right) e^{\mu(H_0 - H)} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.26})$$

Presión del neutro a la salida

$$P_r(\Theta) = \frac{\sigma_f \bar{h}}{h_f} \left( 1 - \frac{\sigma_f}{\sigma_{\theta f}} \right) e^{\mu H} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.27})$$

$$H_0 = 2 \left( \frac{R}{h_0} \right)^{1/2} \tan^{-1} \left[ \left( \frac{R}{h_f} \right)^{1/2} \Theta \right] \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.28})$$

## LAMINACION

Donde:

$\sigma_0$  = esfuerzo de cedencia promedio

$\sigma_{x0}$  = esfuerzo longitudinal debido a la presencia de un desenrollador

$H_0$  = valor de H para  $\Theta = \alpha$

$\sigma_{yf}$  = esfuerzo longitudinal debido a la presencia de un enrollador

$\sigma_{00}$  = esfuerzo de cedencia en el plano de entrada

$\sigma_{0f}$  = esfuerzo de cedencia en el plano de salida

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2}$$

Las ecuaciones desarrolladas anteriormente permiten calcular la presión radial para cualquier posición, de esto la carga podrá ser evaluada como:

$$P = R' b \int_0^{\Theta-\alpha} P_R d\Theta \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.29})$$

### 2.6.4 CALCULO DE LA CARGA EN CALIENTE.

Las teorías desarrolladas para laminado en caliente no han alcanzado el estado de conocimiento que para laminado en frío, debido principalmente a que las condiciones de fricción no han sido bien precisadas, además de que el esfuerzo de cedencia es una función compleja de la temperatura y de la velocidad de deformación, para un material dado. La velocidad de deformación considerando fricción sin deslizamiento, para un punto de contacto cualquiera, está dada por:

$$\dot{\xi} = \frac{V_f'}{h} = \frac{2V_R' \sin\Theta}{h_f + D(1 - \cos\alpha)} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.30})$$

De la ec. 2.30 se comprueba que la máxima velocidad de deformación se presenta cerca de la entrada del material a los rodillos, para evaluar el esfuerzo de cedencia promedio durante la laminación se deberá partir del conocimiento de la velocidad de deformación promedio, la cual está dada por:

$$\dot{\xi} = \frac{V_R' \sqrt{r}}{\sqrt{Rh_0}} \left[ 1 + \frac{r}{4} \right] \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.31})$$

o por 
$$\dot{\xi} = V_R' \left[ \frac{2}{D(h_0 - h_f)} \right]^{1/2} \ln \frac{h_0}{h_f} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.32})$$

LAMINACION

Donde:  $V_p$  - velocidad radial o periférica de los rodillos  
 $r$  - reducción fraccional

A partir de la ecuación diferencial básica de laminación, (2.23) desarrollada por Von Karman y sustituyendo una solución propuesta por Orowan, con las aproximaciones propuestas por Bland y Ford, Sims desarrollo una ecuación para la carga de laminación, que en su forma simplificada queda:

$$P = \sigma_y b L_p Q \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.33})$$

Sims supone que hay adherencia perfecta ya que todo el proceso de laminación puede compararse con la deformación entre placas rugosas oblicuas.

Donde Q es función compleja de la reducción, el espesor y del coeficiente R/h

$$Q = \frac{\overline{h_f}}{\sqrt{4\Delta h}} \left[ \pi \tan^{-1} \left( \frac{\Delta h}{\sqrt{h_0}} - \frac{R}{\sqrt{h_0}} \ln \left( \frac{h_f \mu}{h_0 h_f} \right) \right) \right] \frac{\pi}{4} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.34})$$

Dicho valor puede ser obtenido de la figura 2.12

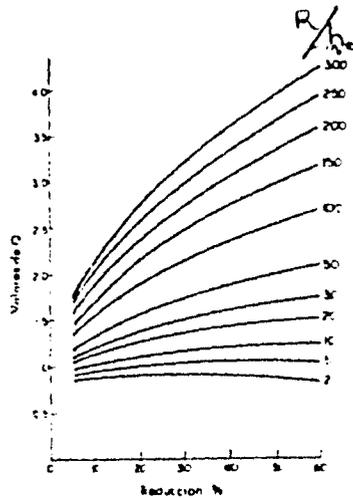


Figura 2.12

Existen otras ecuaciones aplicables a laminado en caliente, entre otras se encuentran las desarrolladas por Bland y Ford empleando análisis de líneas de deslizamiento de campo:

$$P = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{L_p}{(h_0 + h_f)} \right] \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.35})$$

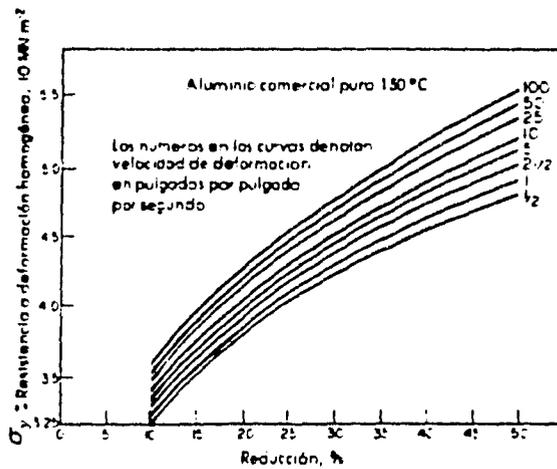
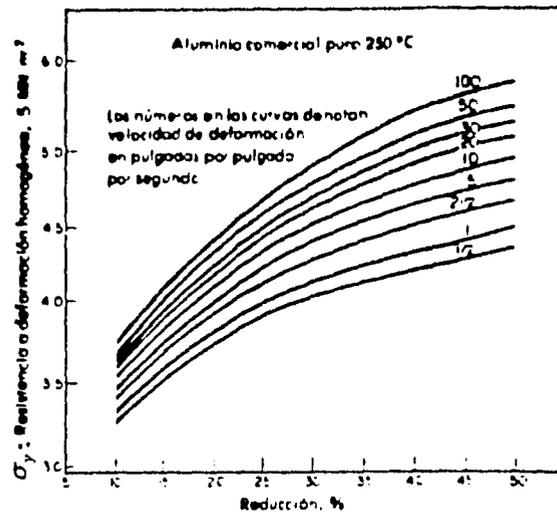
## LAMINACION

Danton y Crane han propuesto:

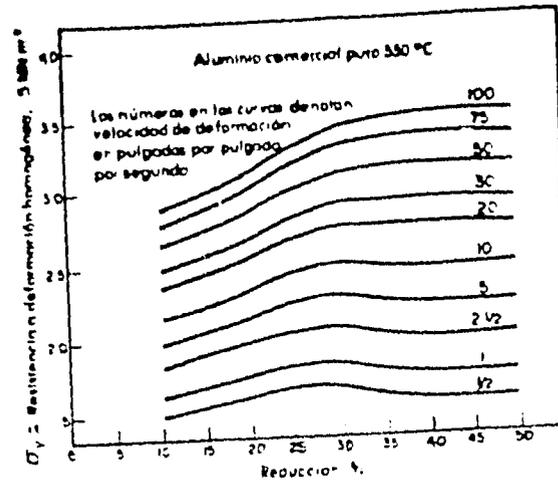
$$P = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_f \left[ 1.31 + \frac{0.53 L_f}{(h_0 \cdot h_f)^{1/2}} \right] \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.36})$$

El esfuerzo de cedencia a la deformación homogénea, se puede obtener gráficamente a partir de la reducción, temperatura y velocidad de deformación, según las siguientes gráficas:

Gráficas para aluminio comercial puro a diferentes temperaturas.



## LAMINACION



### 2.6.5 PAR Y POTENCIA.

La potencia necesaria para laminar un material es consumida principalmente en cuatro puntos:

- 1.- Deformación del material.
- 2.- Pérdidas debidas a fricción en los rodamientos.
- 3.- Pérdidas en reductores de velocidad y en la transmisión general.
- 4.- Pérdidas de tipo eléctrico en motores y generadores.

Las pérdidas producidas por enrolladores y frenos también deberán ser consideradas en este punto.

La potencia de laminación está dada por:

$$\dot{W} = T_L \omega \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.37})$$

El par de laminación efectivo será:

$$T_L = 2T_N = 2Pa; \text{ donde } a = \lambda r$$

Para laminado en caliente se puede considerar que:  $\lambda=0.5$

En el laminado en frío se deberá considerar una corrección por el ensanchamiento elástico sufrido por los rodillos, de acuerdo con Ford:

$$\lambda = 0.5 \left( \frac{R}{R'} \right)^k - (0.5 - \lambda') \left( \frac{R'}{R} \right)^k \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.38})$$

Donde:

$\lambda' = 0.43$  rodillos acabado mate.

$\lambda' = 0.48$  rodillos perfectamente pulidos.

La potencia de laminación en H.P. y KW está dada por:

$$H.P. = \frac{2 T_L \pi N}{33000} = \frac{2 L_p \sqrt{R \Delta h} \pi N}{33000} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.39})$$

$$KW = \frac{2 P \sqrt{R \Delta h} \pi N}{60000} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.40})$$

**2.6.6 COEFICIENTE DE FRICCIÓN.**

La fricción existente entre los rodillos y el material durante el proceso es de gran importancia, en el adecuado desarrollo de éste, por un lado es una función compleja de la velocidad, temperatura, material, acabado de los rodillos, lubricante (refrigerante) empleado y material a laminar, además varía de punto a punto con respecto al arco de contacto. Todo esto hace sumamente complicada su correcta medición, es por esto que en todas las teorías de laminación se toma al coeficiente de rozamiento como un valor constante. Para el laminado en frío con empleo de lubricante se recomienda que el valor de este varíe entre 0.05 y 0.10, mientras que para laminado en caliente es común considerar valores superiores a 0.20, o se podrá evaluar aproximadamente con las siguientes expresiones:

$\mu = 1.05 - 0.0005 T$  (°C) para cilindros de fundición gris.

$\mu = 0.8 (1.05 - 0.0005 T)$  para cilindros de acero.

Para condiciones sin deslizamiento, como ejemplo tenemos que para laminado de acero, con rodillos de acero, a una temperatura de 1100 °C y aplicando grafito coloidal disuelto en agua como lubricante, el coeficiente de fricción varía de 0.20 a 0.40. Es de suma trascendencia el valor de dicho coeficiente, ya que limitará el ángulo de contacto máximo según:

$$\mu = \tan \alpha \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.41})$$

Además el mínimo espesor de la hoja metálica a ser producida será proporcional al coeficiente de fricción.

$$h_{min} \approx c \mu \sigma_0 R \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.8})$$

Por último tenemos que un incremento en el coeficiente de fricción redundará en un deslizamiento del punto neutro hacia la entrada, y por tanto un aumento de la carga y potencia demandada por el proceso. Aún cuando la ec. 2.41 podría ser aplicada para obtener el coeficiente de fricción, el resultado obtenido no será preciso por lo que se descarta este procedimiento.

2.6.8 CALCULO DEL ENSANCHAMIENTO.

En todos los desarrollos teóricos presentados anteriormente se desecha el ensanchamiento sufrido por el material. En la laminación de planchas o tiras de ancho considerable dicha aseveración es correcta, ya que la resistencia friccional en la dirección de laminación de barras angostas, el ensanchamiento del material es mayor, además de que en muchos casos es deseable, esto es debido a que la fricción lateral es de menor magnitud que en el caso anterior y por lo tanto la resistencia que limita el flujo del material en sentido longitudinal.

Los factores que determinan la magnitud del ensanchamiento son:

- a) Reducción de altura.
- b) Diámetro de los rodillos.
- c) Tipo del material de los rodillos.
- d) Tipo de material a laminar.
- e) Temperatura del material.
- f) Coeficiente de fricción entre el material y los rodillos.
- g) Velocidad del proceso.

Se ha comprobado que este último factor no tiene efecto para velocidades de 10 m/seg. Arriba de esta velocidad el ensanchamiento tiende a disminuir ligeramente, de ahí que la mayoría de las ecuaciones desarrolladas omitan dicho factor. Existen una gran cantidad de expresiones de complejidad y precisión muy variada, una de estas es la implementada por Sven Ekelund. Dicha fórmula, aunque compleja y que necesita resolverse a partir de un proceso iterativo, nos garantiza resultados excepcionalmente buenos.

$$\frac{b_f^2 - b_c^2}{2} = 4m\sqrt{r\Delta h} \Delta h - 2m(h_0 + h_f)\sqrt{r\Delta h} \ln \frac{b_f}{b_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.42})$$

$$m = 1.6\mu \frac{\sqrt{r\Delta h} - 1.2\Delta h}{h_0 + h_f} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.43})$$

r - radio de trabajo de los rodillos.

$$r = \frac{D_c + S_c - h_f}{2} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.44})$$

D<sub>c</sub> - diámetro del cuerpo de los rodillos.

S<sub>c</sub> - separación de los rodillos.

Para dar solución a la ecuación propuesta por Ekelund (Ec. 2.59) se pueden utilizar métodos como el de Newton-Raphson, para agilizar esto es fácil desarrollar un programa de computo apropiado:

$$X_n = X_{n-1} - \frac{f(X_{n-1})}{f'(X_{n-1})}$$

## LAMINACION

para  $f(x)=0$

$$A = \frac{b_f^2 - b_0^2}{2}; B = 4m\sqrt{r\Delta h} \Delta h;$$

$$C = 2m(h_0 + h_f)\sqrt{r\Delta h}; D = C \ln \frac{b_f}{b_0}$$

$b_f$  = variable a determinar.

$$f(b_f) = 0 \text{ implica } A - B + D = 0$$

$$f'(b_f) = \left(\frac{dA}{db_f}\right) - \left(\frac{dB}{db_f}\right) + \left(\frac{dD}{db_f}\right) = b_f - 0 + \frac{C}{b_f}$$

$$f'(b_f) = b_f + \frac{C}{b_f}$$

Por lo tanto:

$$b_{f_n} = b_{f_{n-1}} - \frac{A - B + D}{b_{f_{n-1}} + \frac{C}{b_{f_{n-1}}}} \dots \dots \dots (\text{Ec. 2.45})$$

El método de Ekelund fue desarrollado para productos planos, razón por la cual en el caso de no planos, será necesario simplificar la secuencia de pasos a su equivalente de planos, procediendo entonces al cálculo.

A. Lendl propuso un método para lograr lo anterior, este procedimiento se basa en calcular el rectángulo equivalente en función de los puntos donde la sección de entrada intersecta al paso en cuestión. Para definir el rectángulo equivalente de la sección de entrada, se toma como ancho del rectángulo la distancia entre los puntos de intersección. A continuación se calcula el área comprendida por el perímetro de la sección hasta los puntos de intersección. La altura del rectángulo se calcula utilizando los parámetros antes definidos. Este tipo de procedimiento es aplicable a secuencias: redondo-ovalado-redondo, cuadrado-ovalado-cuadrado, y diamante-diamante.

## 2.° VARIABLES PRINCIPALES.

Las variables que gobiernan el proceso de laminación son:

- 1) El diámetro de los cilindros.
- 2) La resistencia a la deformación del metal.
- 3) La fricción entre los cilindros y el metal.
- 4) La presencia de tensiones de tracción hacia adelante o hacia atrás.

Para una reducción de sección y unas condiciones de fricción determinadas, el aumento del diámetro de los cilindros acarrea un aumento grande de la carga de laminación. Para una reducción dada de una chapa de cierto espesor es más grande el área de contacto cuanto mayor es el diámetro de los cilindros. La ecuación 2.4 muestra que el área de contacto es proporcional a  $R^X$ , por lo que, para una presión dada, requerida para obtener la reducción deseada, aumentará la carga total de laminación con el diámetro de los cilindros. Pero la carga total de laminación aumenta con más rapidez que  $R^X$ , ya que tiene que vencer una mayor fuerza de fricción debido a que el área de contacto es más grande.

Si el diámetro del cilindro se mantiene constante, pero varía su altura, en el caso de la tensión uniaxial necesaria para la compresión, aumenta esta al disminuir la altura del cilindro. Cuando la altura es una fracción muy pequeña del diámetro, la fuerza de compresión necesaria para deformar el cilindro aumenta hasta valores muy elevados, con relación a la verdadera tensión de fluencia. Una situación análoga se encuentra en el caso de la laminación cuando el espesor de la chapa es pequeño en comparación con el área de contacto de los cilindros. La carga de laminación aumenta a medida que la chapa que entra en el laminador va disminuyendo de espesor, y puede llegar un momento en que la resistencia a la deformación de la chapa sea tan alta, que la carga de laminación necesaria sea mayor que la que puede aplicarse, por lo que ya no se producirá más reducción de espesor. Cuando se llega a este extremo, los cilindros en contacto con la chapa se deforman elásticamente, ya que es más fácil esta deformación de los cilindros que la deformación plástica de la chapa. El diámetro de los cilindros desempeña un papel importante en la máxima reducción que puede conseguirse con un laminador. Tanto la carga de laminación como el área de contacto disminuyen cuando los cilindros se hacen más pequeños. Esta es la razón por la que, con cilindros de pequeño diámetro, convenientemente protegidos contra la flexión por cilindros de apoyo, se pueden conseguir reducciones mucho mayores sin que aparezca aplastamiento de los cilindros que impida continuar disminuyendo el espesor de la chapa.

La laminación de la chapa es, esencialmente, un proceso de deformación plana, por lo que el valor del límite elástico resultante de la restricción impuesta a la deformación, es igual al valor obtenido para dicho límite en tracción o compresión multiplicado por 2/3. En la laminación en frío la tensión de fluencia no está muy influenciada por la velocidad de deformación o la velocidad de los cilindros pero, como se ha hecho notar anteriormente, en la laminación en caliente se pueden producir variaciones notables en la tensión de fluencia del metal al modificar la velocidad de deformación.

La fricción entre el cilindro y el metal es muy importante en la laminación. No solo por que sea la fricción la que fuerza al metal a entrar entre los rodillos, sino porque afecta también a la magnitud y distribución de la presión del cilindro. Observando la figura 2.13 se hace patente que, cuanto mayores sean las fuerzas de fricción, más grande debe ser la carga de laminación y el máximo de presión del punto neutro se alcanzará con un gradiente más grande. Por influir tanto la lubricación sobre la distribución de la presión, a la distribución de presión de la figura 2.13 se denomina una colina de fricción. La fricción elevada da lugar a grandes cargas de laminación y aumenta el ensanchamiento lateral y el agrietamiento de los bordes. Si, en cambio, la fricción es muy baja, como ocurre en la laminación en frío con cilindros pulimentados y buena lubricación, puede resultar difícil alimentar los laminadores con el material por falta de mordido.

## LAMINACION

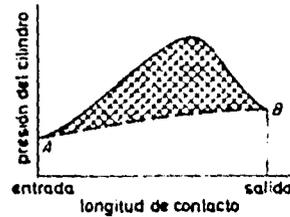


Figura 2.13. Distribución de la presión de laminación a lo largo del arco de contacto.

La fricción varía de un punto a otro a lo largo del arco de contacto del cilindro, pero como es muy difícil medir esta distribución de la presión, todas las teorías de laminación admiten un coeficiente constante de frotamiento. Sobre la base de esta hipótesis, se pueden determinar los coeficientes de frotamiento a partir de la carga de laminación y el par. Si se aplica una tracción hacia atrás, progresivamente creciente, hasta desplazar el punto neutro a la salida de los cilindros, la fricción solo actúa en una dirección.

El espesor mínimo de chapa que se puede laminar en un laminador determinado está relacionado directamente con el coeficiente de frotamiento. Como los coeficientes de fricción en la laminación en caliente del acero oscilan entre 0.20 y 0.70, mientras que en la laminación en frío son más típicos los valores de 0.03 a 0.12, se comprende que se pueden obtener en frío chapas más delgadas. El espesor de la chapa producida en un laminador frío puede variarse apreciablemente modificando la velocidad de los cilindros. Al aumentar la velocidad disminuye el espesor de la chapa. Este efecto se puede atribuir a una disminución del coeficiente de fricción por el aumento de velocidad.

La presencia de esfuerzos de tracción hacia adelante y hacia atrás en el plano de la chapa, produce una disminución de la carga de laminación. Esto puede explicarse fácilmente si se admite que la resistencia a la deformación del metal está gobernada por una ley de tensión de cizallamiento máxima  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_0$ . Como  $\sigma_1$ , presión del cilindro, y  $\sigma_3$ , tracción horizontal, son de signo contrario, se alcanzará la resistencia a la deformación  $\sigma'_0$  para un valor más bajo de  $\sigma_1$  en presencia de  $\sigma_3$ . La reducción de la presión de los cilindros disminuye el desgaste de ellos. Otra ventaja importante que resulta de mantener la chapa en tracción es que mejoran la planeidad de la chapa y la uniformidad de espesores a través del ancho. Un estudio del efecto de la tracción en la laminación ha demostrado que la tracción hacia atrás es aproximadamente dos veces más eficaz que la tracción hacia adelante, con respecto a la reducción de la carga de laminación.

A. Nadai ha desarrollado una teoría de la laminación que permite calcular el efecto de la tracción de la chapa en la distribución de la presión de los rodillos. Como se muestra esquemáticamente en la figura 2.14, la adición de tensiones de tracción hacia adelante y hacia atrás hace disminuir mucho el área que queda bajo la curva, manteniendo casi inalterado el punto neutro. Si solo se aplica tracción hacia atrás, el punto neutro se desplaza hacia la salida y, si la tracción es suficiente, puede alcanzar el punto de salida. Cuando esto ocurre, los cilindros se mueven más rápidamente que el metal y resbalan sobre la superficie. Cuando, al contrario, solo se aplica tracción hacia adelante, el punto neutro se desplaza hacia la entrada.

## LAMINACION

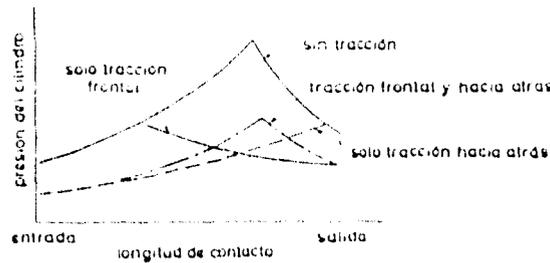


Figura 2.14. Efecto de la tensión del fleje en la distribución de la presión de los cilindros.

### 2.5 DEFECTOS DE LOS PRODUCTOS LAMINADOS.

Los defectos de los productos metálicos laminados pueden provenir del lingote de partida o haberse producido durante la laminación. Los defectos internos, tales como las fisuras resultantes de la soldadura incompleta de rechupes o sopladuras, son consecuencia de defectos de los lingotes. También las bandas de perlitita de los aceros se deben a la forma en que se ha realizado la fabricación y la solidificación.

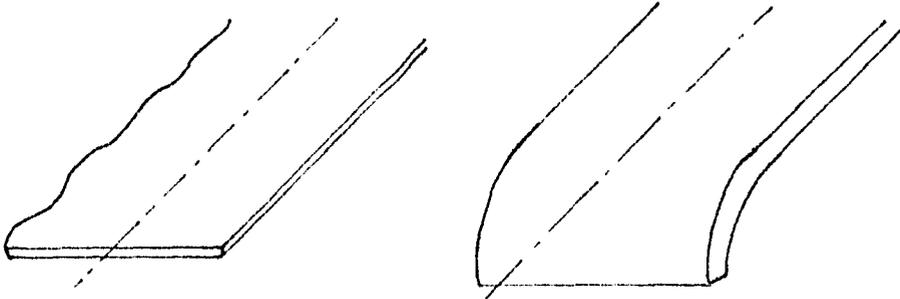
Los productos laminados suelen tener una relación de superficie a volumen muy grande, por lo que el estado de la superficie es de la mayor importancia en todas las fases de la laminación. Para conseguir buenas calidades es necesario que la superficie de las palanquillas se prepare cuidadosamente por escarpado o quemado con lanza de oxígeno, para eliminar los defectos que presente. Defectos superficiales típicos son las grietas. Los pliegues son defectos que parecen grietas pero que son debidos a rebabas que se han laminado contra la superficie. Ocasionalmente se incrustan en la superficie trazos de refractario y de óxidos. Las rayas debidas a defectos de los cilindros o de las guías pueden ser un grave problema en ciertas calidades de chapa laminada en frío.

La prevención de los copos o grietas de enfriamiento es muy importante en el caso de los carriles y otros perfiles laminados. Hay que seguir programas de enfriamiento bien controlado para evitar las tensiones internas, que son la causa principal de estos defectos. El control del espesor y de la planitud de la chapa y el fleje laminados es un problema importante. La mayoría de las variaciones de espesor en la dirección de la laminación se deben a variaciones en la velocidad de los cilindros o la tensión del fleje. Se han desarrollado equipos muy complejos y perfectos para la medición continua del espesor de la chapa y el ajuste de las condiciones de funcionamiento de los trenes continuos de laminación. Las variaciones en el espesor en la dirección de la anchura se deben a la flexión de los cilindros. Cuando un juego de cilindros flexiona bajo carga produce una chapa más gruesa en el centro que en los bordes. Para compensar este defecto se acostumbra diseñar los cilindros con un abarillamiento (camber) adecuado, para que al trabajar bajo carga resulten rectilíneas y paralelas las generatrices de las superficies de contacto. El abarillamiento de los cilindros dependerá de la carga de laminación y, por consiguiente, si los cilindros no trabajan en las condiciones para las que se han diseñado producirán chapas con bordes o centros ondulados.

LAMINACION

DEFECTOS FRECUENTES EN LA LAMINACION.

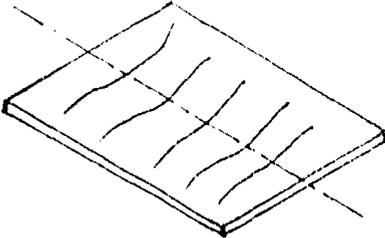
Defectos producidos por que los rodillos estén inclinados hacia un lado (rodillos no paralelos entre ellos).



Pliegues en placas delgadas o material de poca resistencia.

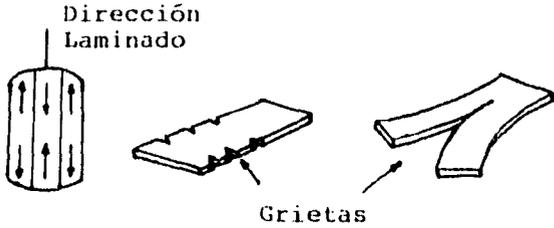
Pliegues en placas más gruesas o material rígido.

Defecto por pandeo de los rodillos de apoyo haciendo que la deformación sea máxima en el centro y mínima en los extremos. Arreglos cuartos o de racimo se presentan.



Para placas muy delgadas.

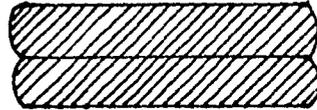
- Defectos por pandeo:
- En láminas muy delgadas.
  - Cuando el material está frío.



## LAMINACION

Sin mucha fricción en los lados:

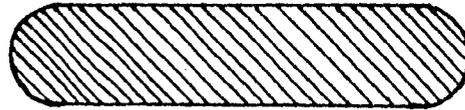
Sección transversal.



labios

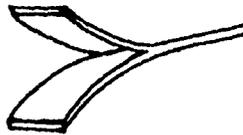
Con mucha fricción en los lados:

Sección transversal.



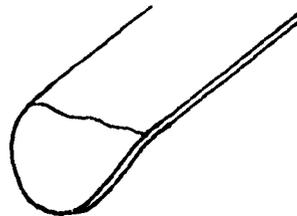
abarrilamiento

Defecto que por mucha fricción se da en los bordes del material.



Boca de lagarto.

Defecto que por falta de fricción se da en la punta del material.



Defecto en las soleras.

# **CAPITULO**

## **III**

3. PROCESO CLAD METALS.

3.1 ANTECEDENTES.

Los laminados compuestos de dos aleaciones de aluminio de diferentes composiciones han sido metalúrgicamente unidos y producidos en grandes cantidades desde 1928. La mayoría de la producción ha sido, y sigue siendo, en laminas, aunque también ha habido alguna producción en alambres y productos tubulares.

La mayoría de estos productos están formados por un núcleo y un revestimiento que se encuentra dispuesto en uno o en ambos lados del núcleo, como se muestra en la figura 3.1:

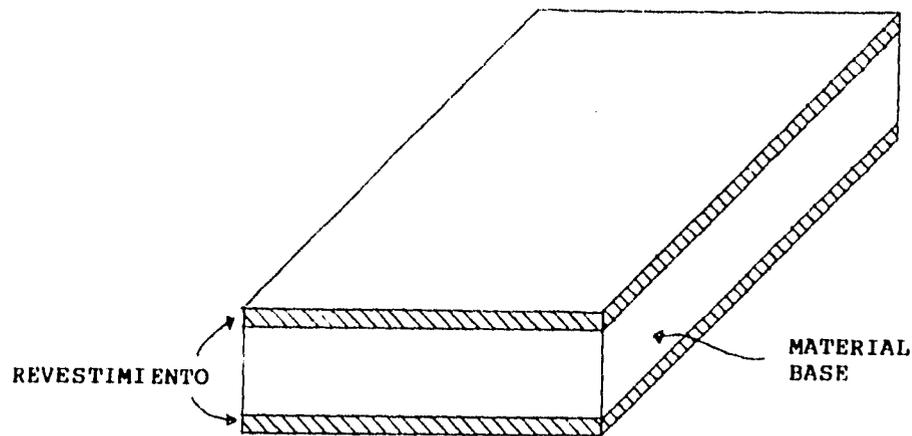


Figura 3.1

## CLAD METALS

El núcleo es elegido de tal forma que tenga las propiedades mecánicas requeridas. Muchos núcleos son usados debido a su alta resistencia, algunos por su ductilidad y algunos otros por su facilidad de fabricación. Los recubrimientos varían en espesores y van desde 1.5 a 15 % del total del espesor del producto. Los recubrimientos originalmente fueron limitados a composiciones que ofrecían un potencial eléctrico en medios anódicos naturales, protegiendo el núcleo de la aleación. Al producto obtenido mediante una combinación de este tipo se le llamo "AL CLAD" por la Compañía de Aluminio de América, la cual registró el término como patente, dicho término así mismo ha sido adoptado por la Asociación de Aluminio; para designar una aleación de Al con un revestimiento que protege al núcleo electroquímicamente. Los productos AL CLAD son únicos ya que ofrecen una protección catódica de larga vida.

Otros tipos de productos laminados de Al, han sido utilizados ampliamente. Un recubrimiento que tiene un punto de fusión apreciablemente más bajo que el núcleo y buena fluidez en el estado líquido, es usado como revestimiento sobre laminas, para aplicaciones donde se requiere resistencia contra soluciones químicas específicas.

Hay un segundo grupo de productos laminados que incluye a aquellos que pueden ser descritos como "Self-Clad" "Autorevestidos", porque el núcleo y recubrimiento son de la misma composición. El alto grado de reducción total impartido a la capa de revestimiento mejora las características del producto.

Mr. E. H. Dix, Jr., el creador de lo que más tarde fue conocido como "Al clad", se interesó alrededor de 1925 por los experimentos en la Bureau of Standards. Estos experimentos relacionados con la protección a la corrosión por aspersión con Al líquido, ofrecían excelente protección contra la corrosión pero el metal solidificado fue poroso y quebradizo, aún con revestimiento dúctil, el rociado del metal no fue considerado práctico para el manejo en áreas relativamente grandes; en 1928 Dix publicó artículos sobre la evaluación de varias pruebas de corrosión de Al clad 2017-T4.

Los datos en este artículo mostraron que el Al comercial puro era anódico, por lo tanto el recubrimiento no solo permitiría protección mecánica en ambientes corrosivos, sino también protegería electroquímicamente áreas expuestas como las orillas. La gran utilidad de este producto es demostrada por el amplio uso que tuvo durante varios años en la aviación, sin debilitamiento de la lámina por corrosión.

El primer producto laminado producido en cantidades relativamente grandes fue Al-clad 2017-T3, originalmente conocido como Al-clad 17S-T. En los años 20's fue usado en varios aviones tales como el trimotor Ford monoplano, el Hamilton metalplano y el Sikorsky S-38. Una aplicación importante en este periodo fue su uso para el forro del dirigible ZMC-2.

### 3.2 DEFINICION.

Desde sus orígenes se empleo como un proceso para recubrir superficies decorativas de oro o plata sobre metales base, el proceso de materiales revestidos (CLAD- METALS), ha avanzado al punto que hoy en día es una tecnología sofisticada usada en cientos de aplicaciones industriales.

Un metal revestido (CLAD- METAL), es la unión de dos o más metales que son metalúrgicamente unidos. Esta unión es lograda por un proceso refinado que esta basado en la tecnología de soldadura de estado sólido y que provee las características de una unión ideal. Esta técnica de unión es tan efectiva que no hay necesidad de aleaciones, adhesivos o soldaduras, es simple, limpia y permanente.

El objetivo del recubrimiento, es lograr la combinación óptima de las propiedades funcionales que se requieren para un producto, lo cual se logra mediante una cuidadosa selección de los materiales componentes, para obtener los mejores resultados del producto así como una reducción en el costo de producción.

### 3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Existe un sorprendente número de técnicas y procesos para unir metales, que van desde métodos electroquímicos y aplicación de presión en caliente, hasta unión por fusión. Desde el punto de vista tecnológico, los procesos de unión pueden ser agrupados de la siguiente manera:

a) Unión por aplicación simultánea de presión y calor, por ejemplo la soldadura por forja se realiza calentando las partes a unir a una temperatura superior a la de recristalización y después se aplica una elevada presión para que se suelden, basándose en este principio se ha desarrollado la soldadura en matriz y la soldadura con rodillos, laminado en frío, laminado en caliente y unión por presión hidrostática. Este puede ser llamado proceso de un solo paso.

b) Unión por aplicación subsecuente de calor, por ejemplo, metalurgia de polvos, en donde el producto es formado en frío mediante el prensado de la mezcla de polvos y posteriormente es calentado para lograr la fusión de al menos uno de los elementos, el cual envuelve a los demás logrando una unión sólida y resistente. En otro caso la mezcla es calentada para lograr la difusión, logrando una unión atómica de gran resistencia. Este proceso es considerado como un proceso de dos pasos.

c) Unión por calor sin presión, esencialmente todos los métodos de fase líquida, por ejemplo, derramar un metal fundido en un metal sólido. Son procesos de un solo paso.

d) Unión sin calor. Es una forma especial de soldadura en la cual no se emplea calor externo y se realiza en una sola etapa de deformación, mediante la aplicación de presión. En este proceso la coalescencia se logra por una rápida aplicación de presión. Para producir una soldadura fría, las superficies a ensamblar se limpian generalmente con cepillos de alambre y se ponen en contacto sometiendo a presiones localizadas que producen deformaciones del orden de 30 a 50 %. Sin duda, algún calentamiento se produce debido al severo trabajo en frío del metal, pero es la presión alta y localizada la que produce la unión.

Los metales recubiertos pueden obtenerse por distintos procesos, el principal método de manufactura usado es un proceso de unión por laminado continuo en el cual dos o más láminas pueden ser unidas. Dicho proceso comprende la creación de una unión metalúrgica entre dos o más materiales por aplicación de presión y temperatura en dos operaciones diferentes. La operación de limpieza activa las superficies, la unión por laminado ocasiona que las dos superficies limpias se junten y, a causa de las grandes deformaciones se origina que el área de la interfase aumente por lo menos 50%.

## CLAD METALS

Las superficies de la interfase son atómicamente limpias, altamente esforzadas y muy reactivas. La incipiente soldadura por presión ocurre en puntos discontinuos a lo largo de la interfase y las superficies del material se encuentran en íntimo contacto atómico. El compartimiento de electrones y la unión sólo se consolidan en pocas áreas específicas. Subsecuentemente un tratamiento térmico es entonces realizado para inducir difusión, incrementando la fuerza de unión, y proveer un alivio de esfuerzos para operaciones de trabajo en frío posteriores. Debe tenerse un cuidado especial con cada combinación de materiales al fortalecer la unión sin formar intermetálicos perjudiciales o fundir uno de los materiales.

Algunas propiedades como resistencia, ductilidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, dilatación térmica, magnéticas y acabados superficiales pueden ser modificadas y mejoradas por revestimientos metálicos.

Una herramienta muy importante para el revestimiento metálico es la regla de las mezclas -una serie de cálculos que se emplean para determinar las propiedades de los nuevos materiales compuestos basándose en las propiedades individuales de cada componente-. La regla de las mezclas nos da una buena aproximación de las propiedades de los materiales compuestos con la finalidad de reducir el campo de posibles combinaciones de materiales durante la etapa de diseño.

La ecuación general de esta regla (3.1) se puede aplicar para calcular propiedades como la densidad, conductividad térmica lateral, conductividad eléctrica y expansión térmica mediante el espesor de las diferentes capas de los materiales:

$$D = \frac{(A_1 D_1 + A_2 D_2 + \dots + A_n D_n)}{100} \dots\dots\dots (\text{Ec. 3.1})$$

Donde  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , son los espesores en porcentaje de los componentes del metal revestido; y  $D_1, D_2, \dots, D_n$ , son propiedades de los mismos componentes.

Propiedades como la conductividad térmica normal a la superficie, expansión térmica a lo largo de la pieza y módulos de elasticidad se pueden calcular con diferentes ecuaciones para la fatiga y resistencia mecánica, por lo que se recomienda hacer pruebas sobre el producto final.

La unión por laminado es factible entre metales idénticos y entre muchas combinaciones de metales diferentes de interés comercial como se muestra en la tabla 3.1, cuando las condiciones de temperatura y presión del proceso son apropiadamente determinadas.

Tabla 3.1 Materiales que pueden ser unidos por laminado.

	Al	Ni	Cu	Latón / Bronce	Acero al carbono	Acero inox.	Aleac. Ni-Fe	Ti	Metales preciosos	Pb-Sn soldados
Aluminio	■		■	■	■	■	■	■		
Níquel			■	■	■	■	■	■	■	■
Cobre	■	■			■	■	■	■	■	■
Latón/Bronce		■			■	■	■		■	■
Ac. al carbono	■	■	■	■		■	■	■	■	■
Ac. inox.	■	■	■	■	■	■	■		■	■
Aleac. Ni-Fe	■	■	■	■	■	■			■	■
Titanio	■	■	■		■					
Met. preciosos		■	■	■	■	■	■		■	■
Aleac. soldadas		■	■	■	■	■	■		■	■

Algunos metales y aleaciones no pueden ser procesados dentro del laminado, una característica que hace que algunos metales sean difíciles o imposibles de combinar por deformación es su baja ductilidad, dichos metales no pueden ser co-deformados hasta el límite necesario para lograr una unión metalúrgica. Otras características que pueden causar problemas es la tendencia de algunos metales para formar una capa de óxido adhesivo que impide la unión. Finalmente, algunos metales son térmicamente inestables; ellos forman compuestos intermetálicos frágiles a ciertas temperaturas. Algunos ejemplos de combinaciones fáciles, difíciles, e imposibles son los siguientes:

Tabla 3.2 No todos los metales pueden ser unidos.

Faciles de unir	Impracticos	Dificiles pero posibles
Cobre/acero	Oro/aluminio	Cobre/aluminio
Cobre/niquel	Zirconio/aluminio	Aluminio/acero al carbono
Cobre/plata	Cobalto/aluminio	Acero inoxidable/aluminio
Cobre/oro		Cobre/tantalio, niobio, titanio
Al/aleaciones de Al	<b>Imposibles</b>	Titanio/acero al carbono, acero inoxidable
Estaño/cobre		Acero inoxidable/acero al carbono
Estaño/niquel	Alfesil/cualquier cosa	Aluminio/niquel
Oro/niquel	Berilio/ cualquier cosa	Niquel/acero
		Cobre/acero inoxidable
		Manganeso/niquel/cobre
		Cobre/manganeso
		Plata/manganeso
		Plata/acero
		Urano/zirconio
		Zirconio/cobre, acero, acero inoxidable
		Platino/niquel, cobre, acero
		Tantalio/niobio

Cuando las condiciones de temperatura y presión del proceso son apropiadamente determinadas, existen cinco pasos básicos en la producción de un material revestido unido por laminado, como se describen a continuación:

#### 1) Preparación del material.

Los materiales para unirse por laminado deben primero ser inspeccionados en sus propiedades físicas y mecánicas. Si es necesario, los materiales son laminados hasta lograr una medida específica para obtener los espesores deseados de las capas. En algunos casos, los materiales serán unidos plenamente en la condición de recocido, en otros casos, los materiales pueden ser laminados para un temple específico.

#### 2) Limpieza.

En todos los casos, las superficies que serán unidas deben estar completamente limpias. Esto es generalmente realizado por métodos mecánicos y/o químicos de las superficies para remover óxidos, aceites y cualquier material extraño. Para evitar reoxidación significativa de las superficies, los materiales deben ser unidos inmediatamente después de su limpieza. En todos los casos, el objetivo del proceso de limpieza es eliminar algunos contaminantes de las superficies que serán unidas.

Procesos alternativos de limpieza pueden incluir abrasión mecánica o bombardeo con perdigones, los cuales no solo limpian la superficie sino que la ponen áspera, resultando una capa superficial altamente esforzada y activada.

### 3) Unión laminada.

Las superficies de metal limpias son unidas en laminadores especialmente diseñados. Normalmente, reducciones que exceden del 60 % son realizadas en un solo paso y garantizan que los materiales serán unidos. Esta unión inicial es incierta y algunas veces se denomina como unión en "verde" y esta hecha de una serie de separaciones mecánicas y pequeñas fases sólidas soldadas.

### 4) Tratamiento térmico.

Para mejorar la unión inicial, el metal revestido es tratado térmicamente. Esta es una operación complicada y sirve para dos propósitos: ablanda al material, y causa difusión a través de la interfase para mejorar la fuerza de la unión.

Debe tenerse cuidado con cada combinación de materiales al fortalecer la unión sin formar intermetálicos perjudiciales, o fundir uno de los materiales.

### 5) Procesamiento subsecuente.

Una vez obtenido el material revestido este puede, en la mayor parte de los casos, ser procesado como un metal monolítico. Las características de conformado de los metales revestidos han recibido poca atención en la literatura técnica, sin embargo ejemplos reales de productos son indicativos de la conformabilidad que puede ser obtenida.

Dificultades en procesamientos subsecuentes pueden surgir cuando los materiales en forma individual tienen temperaturas de fusión significativamente diferentes y, por lo tanto diferentes temperaturas de recocido.

## 3.4 APLICACIONES Y VENTAJAS.

En el desarrollo de la tecnología de metales revestidos, se han hecho miles de combinaciones de metales y aleaciones, en una gran variedad de tamaños y formas.

A causa de sus propiedades únicas, los materiales revestidos son utilizados en muchas aplicaciones integrales para nuestra vida diaria. Los metales recubiertos ofrecen atractivas alternativas de diseño para fabricación convencional y métodos de acabado, frecuentemente sirven para controlar o eliminar corrosión, reemplazan aleaciones costosas, eliminan o simplifican operaciones de subensamble, y se obtiene una mayor resistencia mecánica y mayor resistencia al desgaste, buena apariencia, mejor formabilidad, mejores propiedades magnéticas y térmicas, compatibilidad química, permeabilidad, además de ofrecer durabilidad y una reducción considerable de peso. por lo que ofrecen una serie de variadas aplicaciones; siendo algunas de ellas las siguientes:

## CLAD

Molduras para automóviles han sido hechas de acero inoxidable. Desafortunadamente la carrocería tiende a corroerse en áreas en contacto con la moldura, por la celda galvánica formada entre el acero inoxidable en contacto con el acero de bajo carbono de la carrocería. Esta corrosión es especialmente activada por el uso excesivo de sales en carreteras en climas nórdicos, el problema es solucionado por una composición de acero inoxidable y aluminio. El acero provee resistencia en las superficies decorativas y el aluminio en la superficie opuesta provee protección catódica para la carrocería.

Las defensas cromadas han sido utilizadas en la industria automotriz por mucho tiempo, pero el cromo es frágil y tiende a romperse, dejando expuesto el acero a la corrosión. Utilizando un revestimiento de acero inoxidable se incrementa la resistencia a la corrosión.

Los enchufes de los limpia parabrisas anteriormente eran ensambles de tres piezas: bronce y acero. Ahora hay un revestimiento que pone el bronce que es tan caro solo en la superficie, da un respaldo al acero y reduce la complejidad de ensamblado y manufactura. Esto aumenta la resistencia de los rodamientos y ahorra dinero para los fabricantes de automóviles. Una delgada capa de cobre en la parte posterior del acero aumenta la resistencia a la corrosión y al desgaste de las herramientas.

Las tapas de nodos para batería del tamaño de un botón, antes eran hechas de un ensamble de dos piezas de cobre y una lámina soldada de acero. En la actualidad existe un compuesto recubierto con cobre, acero y níquel. El níquel provee estabilidad química y resistencia a la corrosión, mientras que los otros materiales proveen conformabilidad, apariencia, estética y los requisitos de contacto eléctrico. Las cubiertas de las baterías también utilizan metales recubiertos sustituyendo el níquel puro por un compuesto de níquel / acero inoxidable / níquel.

El cable cubierto solía hacerse de aleaciones de cobre o bronce, ahora es hecho de un compuesto de cobre / acero inoxidable / cobre. El cobre provee conductividad y el acero inoxidable incrementa la resistencia y reduce costos, permitiendo que se utilice un calibre más delgado. La combinación alcanza los requerimientos de resistencia a la tracción y conductividad.

El cable de cobre MAGNA Cu 88 está siendo desarrollado para muchas aplicaciones que requieren su alta resistencia mecánica, conductividad eléctrica y propiedades magnéticas. Este material es un corazón de cobre revestido con acero, el cual es nuevamente revestido con cobre.

La industria de artículos para la cocina en su constante esfuerzo por combinar estética y durabilidad, utiliza muchos de los beneficios de los metales revestidos. Uno de estos productos es el cobre revestido con acero inoxidable. El cobre incrementa la conductividad térmica lateral y el acero ofrece durabilidad, reduce la adhesión de la comida durante su cocinado y protege contra la corrosión contra la acidez de la comida.

Algunos años atrás cuando el costo de la plata se incrementó bruscamente debido a una oferta, un material sustituto tenía que ser encontrado que igualara a la vista y el tacto de la plata. La solución fue un compuesto de materiales, cuproníquel / cobre / cuproníquel el cual proveía la apariencia y la densidad requeridas para la discriminación automática de monedas en las máquinas automáticas.

## CLAD METALS

El número de tipos de producción de metales revestidos en una escala ampliamente comercial esta constantemente creciendo. Mientras los metales revestidos ofrecen diferentes y mayores combinaciones de propiedades útiles que los metales monolíticos, también requieren condiciones especiales de diseño, no solo para acomodar sus propiedades físicas y mecánicas, sino también para hacer consistentes con sus características de conformado y fabricación, las cuales son diferentes de cualquiera de los metales constituyentes.

# **CAPITULO**

## **IV**

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

### 4.- EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD.

El termino conformabilidad se refiere a la relativa facilidad con la que un metal puede ser conformado por medio de la deformación plástica. Nos referimos a la conformabilidad cuando hablamos de materiales conformados mediante procesos de deformación de volumen, tales como forja, extrusión y laminación.

La caracterización del comportamiento mecánico de un material en pruebas de tensión mide dos tipos diferentes de propiedades mecánicas: propiedades de resistencia (esfuerzo de cedencia y esfuerzo último) y propiedades de ductilidad (porcentaje de elongación y porcentaje de reducción en área). La evaluación de la conformabilidad involucra ambas mediciones, de la oposición a la deformación (resistencia) y la determinación de la elongación de una posible deformación plástica antes de que ocurra la fractura (ductilidad). Por lo tanto, una descripción completa de la conformabilidad de un material se determina por su esfuerzo de fluencia en función de las variables del proceso (por ejemplo, deformación, velocidad de deformación, temperatura de precalentamiento y temperatura de la matriz), por su comportamiento a la fractura y por las transformaciones metalúrgicas que caractericen al sistema de aleación correspondiente.

No obstante, la mayor importancia al evaluar la conformabilidad de un material esta en la medición y predicción de los límites de la deformación antes de la fractura. De esta forma podemos definir de manera más general a la conformabilidad como el grado de deformación que puede ser alcanzado en un proceso particular de elaboración de metales sin crear una condición indeseable. Generalmente, la condición indeseable es agrietamiento o fractura, pero puede ser otra, como mal acabado superficial, pardeamiento, o la formación de trastapes, los cuales son defectos creados durante el proceso de forja.

#### 4.1 FACTORES QUE AFECTAN LA CONFORMABILIDAD.

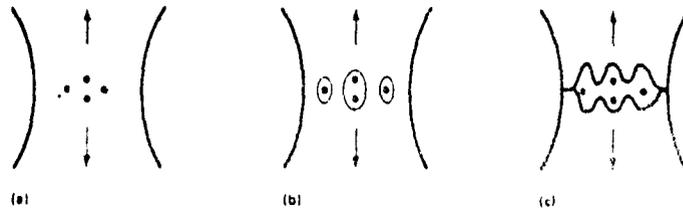
La conformabilidad depende no solo de las características del material, sino también de las variables del proceso, tales como deformación, velocidad de deformación, temperatura y estado de esfuerzos.

##### 4.1.1 MECANISMOS DE FRACTURA.

La fractura en procesos de deformación de volumen ocurre generalmente como fractura dúctil, rara vez como fractura frágil. Sin embargo, dependiendo de la temperatura y de la velocidad de deformación, los detalles en el mecanismo de la fractura dúctil cambian.

Los tres estados de la fractura dúctil se muestran en la figura 4.1. El primer estado es la formación de cavidades, las cuales usualmente ocurren en las partículas de segunda fase o inclusiones. Las cavidades se inician porque las partículas no se deforman, forzando a la matriz dúctil alrededor de las partículas a deformarse más de lo normal produciéndose endurecimiento por deformación al crear un mayor esfuerzo en la matriz cerca de las partículas. Cuando el esfuerzo es muy grande, la interfase puede separarse o las partículas pueden agrietarse.

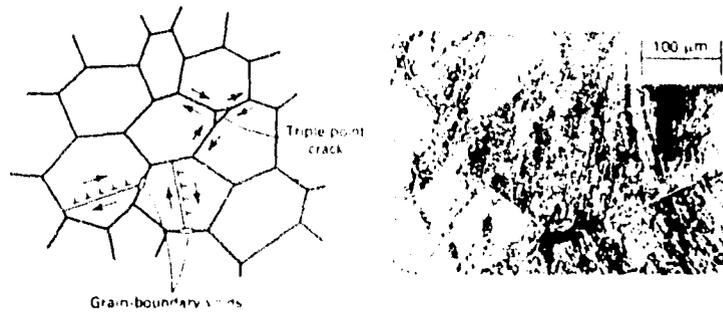
## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD



**Figura 4.1** Estados en la fractura dúctil. (a) Iniciación de cavidades. (b) Crecimiento de cavidades. (c) Coalescencia de huecos.

El segundo estado es el crecimiento de las cavidades, el cual es un proceso controlado por la deformación. Las cavidades se alargan conforme crecen, y la unión del material de la matriz con las cavidades se vuelve débil. Por lo tanto, el estado final es una coalescencia de huecos por la separación de las uniones, resultando un eslabonamiento de huecos.

Incrementos en la temperatura de deformación conducen a cambios significativos en el comportamiento de la deformación y en la forma de la fractura. A temperaturas por arriba de la mitad del punto de fusión, particularmente a bajas velocidades de deformación, el deslizamiento de los límites de grano llega a ser prominente. Esto conduce a la formación de grietas en forma de cuña que se propagan por las fronteras de grano resultando esto en una baja ductilidad. (figura 4.2).



**Figura 4.2** Formación de cavidades en los límites de grano y grietas en los puntos triples a temperaturas de trabajo en tibio y en caliente. (a) El esquema muestra como se forman las cavidades en los límites de grano al deformarse la matriz y como el deslizamiento de los límites de grano en ausencia de migración y recristalización de límites de grano puede causar grietas que abran los puntos triples. (b) Ejemplos de huecos en los límites de grano y agrietamiento de cuña en un punto triple.

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

### 4.1.2 LOCALIZACION DE LA DEFORMACION.

Problemas de conformabilidad pueden surgir cuando la deformación del metal está localizada en una zona angosta. Esto resulta en una región de diferente estructura y propiedades que puede ser el sitio de falla en servicio. La localización de la deformación puede también ser tan severa que conduzca a la ruptura en el proceso de deformación.

La localización de la deformación es comúnmente causada por la formación de una zona de metal inactivo entre la pieza de trabajo y la herramienta. Esto puede surgir por escasa lubricación en la interfase pieza de trabajo/herramienta.

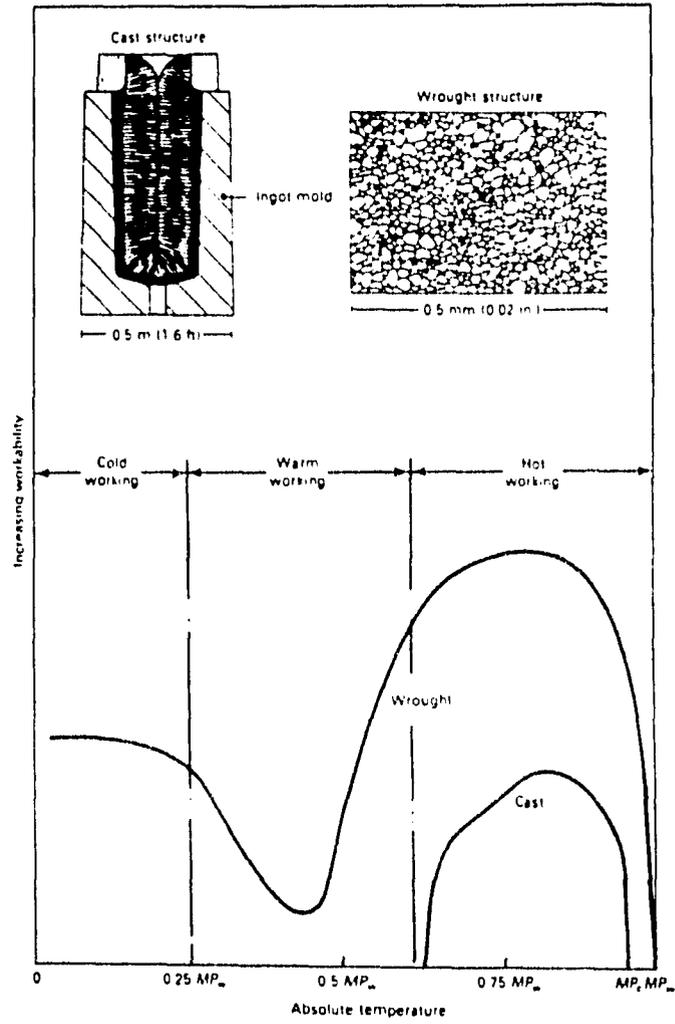
### 4.1.3 CONSIDERACIONES METALURGICAS.

Los problemas de conformado dependen en gran medida del tamaño y estructura de grano. Cuando el tamaño de grano es relativamente grande con respecto al tamaño total de la pieza de trabajo, como en las estructuras convencionales de fundición, la conformabilidad es más baja, porque las grietas pueden iniciarse y propagarse fácilmente a lo largo de los límites de grano. Además, en las estructuras de fundición, las impurezas son segregadas frecuentemente en la punta o en la superficie del ligote, creando regiones de baja conformabilidad.

Generalmente, las estructuras de fundición deben ser trabajadas en caliente. El punto de fusión de una aleación en la condición de fundición es comúnmente más bajo que aquel de la misma aleación en la condición de grano fino recristalizado a causa de las heterogeneidades químicas y de la presencia de un bajo punto de fusión de los componentes. La deformación a temperaturas demasiado cercanas al punto de fusión de esos componentes puede originar agrietamiento en las fronteras de grano cuando el calor desarrollado por la deformación aumenta la temperatura de la pieza de trabajo y produce fundición local.

Este modo de fractura es llamado fragilidad en caliente; puede ser prevenida utilizando una velocidad de deformación suficientemente baja que permita que el calor generado por la deformación sea disipado por la herramienta, utilizando temperaturas más bajas de trabajo, o exponiendo la pieza de trabajo a un tratamiento térmico de homogenización antes del trabajo en caliente. La relación entre la conformabilidad de metales fundidos y metales trabajados con respecto a la temperatura se muestra en la figura 4.3.

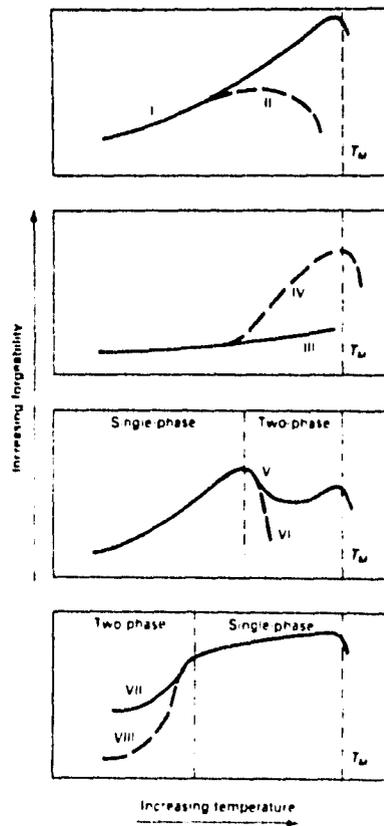
## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD



**Figura 4.3** Conformabilidades relativas de metales de fundición y de metales con trabajo de recristalización a temperaturas de trabajo en frío, en tibio y en caliente. El punto de fusión (o temperatura de solidus) es denotado como MPC (metales de fundición) o MPW (metales trabajados y recristalizados).

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

La relación entre conformabilidad y temperatura para varios sistemas metalúrgicos se resume en la figura 4.4. Generalmente los metales puros y aleaciones de una fase exhiben la mejor conformabilidad, excepto cuando ocurre crecimiento de grano a altas temperaturas.



### I Metales puros y aleaciones de una fase.

- Aleaciones de aluminio
- Aleaciones de tantalio
- Aleaciones de niobio

### II Metales puros y aleaciones de una fase exhibiendo un rápido crecimiento de grano.

- Berilio
- Aleaciones de magnesio
- Aleaciones de tungsteno
- Aleaciones de titanio

### III Aleaciones que contienen elementos que forman compuestos insolubles.

- Acero resulfurizado
- Acero inoxidable que contiene selenio

### IV Aleaciones que contienen elementos que forman compuestos solubles.

- Aleaciones de molibdeno
- Acero inoxidable que contiene carburos o nitruros solubles

### V Aleaciones que forman segundas fases dúctiles en calentamiento.

- Aceros inoxidables con alto contenido de cromo

### VI Aleaciones que forman segundas fases con bajos puntos de fusión en calentamiento.

- Hierro que contiene azufre
- Aleaciones de magnesio que contienen zinc

### VII Aleaciones que forman segundas fases dúctiles en enfriamiento.

- Carbono y aceros de baja aleación
- Aleaciones de titanio

### VIII Aleaciones que forman segundas fases frágiles en enfriamiento.

- Superalaciones
- Aceros inoxidables endurecidos por precipitación.

Figura 4.4. Comportamiento típico de la conformabilidad exhibido por diferentes sistemas de aleación.  $T_m$ : Temperatura de fusión absoluta.

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

### 4.2 VARIABLES DEL PROCESO QUE CONTROLAN LA CONFORMABILIDAD.

#### 4.2.1 DEFORMACION.

El objetivo principal en los procesos de deformación plástica es cambiar la forma del material, y un objetivo secundario es el de mejorar o controlar las propiedades del producto. En procesos de deformación plástica, el volumen de la pieza de trabajo permanece constante:

$$A_0 L_0 = A_1 L_1 \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.1})$$

La deformación producida durante el proceso esta descrita por la deformación ingenieril,  $e$ , como la relación de cambio en la longitud, a la longitud original,  $L_0$

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.2})$$

o alternativamente por la deformación real  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \ln \frac{L_1}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln(e + 1) \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.3})$$

La deformación ingenieril es más fácil de calcular y es satisfactoria para muchas aplicaciones. La deformación real es usada en el análisis teórico de conformabilidad y es ventajosa en las deformaciones sucesivas que pueden ser adicionadas para dar una deformación acumulativa.

La deformación en el conformado de metales se expresa frecuentemente por la reducción en área de la sección transversal,  $R$ :

$$R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.4})$$

La deformación real también puede expresarse como:

$$\epsilon = \ln \frac{L_1}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{1}{1 - R} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.5})$$

Los principales métodos de medición de la deformación son mediciones de marca, extensómetros ópticos y medidores de espesor y forma.

**Mediciones de marca.** El método más ampliamente usado para medir la deformación es marcar la lámina por grabado o trazado o por medios como la tinta o pintura y midiendo los cambios en las separaciones de las marcas causados por la deformación. Las plantillas de marcas rectangulares y series de círculos de diámetro pequeño (por ejemplo 2.5 mm) son frecuentemente usadas.

**Extensómetros.** En algunos casos, un extensómetro es fijado a la lámina o muestra. Medidas de deformación exactas son así obtenidas continuamente durante una operación o prueba de conformado. Los extensómetros ópticos, que son particularmente efectivos para altas velocidades de deformación, también pueden ser usados.

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

**Medidores de espesor y forma.** La medición de espesor, puede hacerse rápidamente por métodos de ultrasonido, y puede utilizarse algunas veces para determinar deformaciones. En la práctica, este método es limitado a situaciones en las cuales el porcentaje de deformación mayor y menor es conocido en mediciones previas, porque muchas combinaciones diferentes de deformaciones pueden llevar al mismo cambio en espesor.

La forma es medida usando plantillas de metal, dispositivos de inspección, radiografías o por un medidor de perfil que emplea un estilete para contactar la superficie. Los medidores de perfil proporcionan dos o tres dimensiones.

### 4.2.2 VELOCIDAD DE DEFORMACION.

La velocidad de deformación expresa la velocidad a la cual la deformación avanza. Esta puede ser una variable importante en experimentos de conformabilidad y por lo general es difícil de controlar. La cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

donde  $\dot{\epsilon}$  = vel. de deformación

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \text{variación de la deformación}$$

respecto al tiempo

**Distribución de la deformación.** Tres propiedades del material determinan la distribución de la deformación en una operación de conformado:

- El coeficiente de endurecimiento por deformación (también conocido como coeficiente de endurecimiento por trabajo o exponente) o valor n.
- La sensibilidad a la velocidad de deformación o valor m.
- La relación de deformación plástica (factor anisotrópico) o valor r.

La capacidad para distribuir la deformación uniformemente depende del valor de n y del de m. La capacidad para alcanzar altos niveles de deformación depende de muchos factores, como son el material base, elementos de aleación, temple, valor de n, valor de m, valor de r, espesor, uniformidad y la no presencia de defectos e inclusiones.

El valor n, o coeficiente de endurecimiento por deformación, es determinado por la dependencia del esfuerzo de fluencia (cedencia) a el nivel de deformación. En materiales con alto valor n, el esfuerzo de fluencia se incrementa rápidamente con la deformación. Un alto valor de n es también una indicación de buena conformabilidad en una operación de estirado.

En la región de elongación uniforme, el valor n es definido como:

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

$$n = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \epsilon} \dots\dots\dots (\text{Ec. 4.6})$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo real (carga/área instantánea). Esta relación implica que la curva de esfuerzo-deformación real del material puede ser aproximada por una ley de fuerza constitutiva:

$$\sigma = k \epsilon^n \dots\dots\dots (\text{Ec. 4.7})$$

donde  $k$  es una constante conocida como coeficiente de resistencia.

El valor  $m$ , o la sensibilidad a la velocidad de deformación, se define como:

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 4.8})$$

donde  $\dot{\epsilon}$  es la velocidad de deformación,  $d\epsilon/dt$ . Esto implica una relación de la forma:

$$\sigma = k \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \dots\dots\dots (\text{Ec. 4.9})$$

donde la Ec. 4.9 incorpora la Ec. 4.7 entre el esfuerzo y la deformación.

La sensibilidad a la velocidad de deformación positiva indica que el esfuerzo de fluencia se incrementa con la velocidad de deformación.

Los metales en el rango superplástico tienen altos valores  $m$  de 0.2 a 0.7, los cuales son de 1 a 2 ordenes en magnitud más altos que los valores típicos para el acero. A temperatura ambiente, algunos metales, como aleaciones de aluminio y cobre, tienen bajos valores  $m$  negativos, los cuales explican su baja elongación postuniforme.

Altos valores  $n$  y  $m$  llevan a una buena conformabilidad en operaciones de estirado, pero tienen poco efecto en el embutido. En una operación de embutido, el metal en el borde debe de embutir sin causar fractura en la pared. En este caso, altos valores  $m$  y  $n$  refuerzan la pared, lo cual es beneficioso, pero estos también refuerzan el borde y lo hacen más duro para embutirlo, lo cual es perjudicial.

El valor  $r$ , o la relación de deformación plástica, se relaciona con el embutido y es conocido como el factor anisotrópico. Este es definido como la relación de deformación de ancho real a la deformación de espesor real en la región de elongación uniforme en un ensayo a la tracción.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \left( \frac{w}{w_0} \right)}{\ln \left( \frac{t}{t_0} \right)} \dots\dots\dots (\text{Ec. 4.10})$$

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

El valor  $r$  es una medida de la capacidad de un material para resistir la delgadez. En embutido, el material en el borde es estirado en una dirección (radialmente) y comprimido en la dirección perpendicular (circunferencialmente). Un alto valor  $r$  indica un material con buenas propiedades de embutido.

### 4.2.3 TEMPERATURA.

Los procesos de conformado de metales son comúnmente clasificados como operaciones de trabajo en caliente o de trabajo en frío. El trabajo en caliente se refiere a la deformación bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación tales que los procesos de recuperación ocurren simultáneamente con la deformación. El trabajo en frío se refiere a la deformación llevada bajo condiciones para las cuales los procesos de recuperación no se efectúan durante el proceso. En el trabajo en caliente, el endurecimiento por deformación y la estructura de grano distorsionada son eliminados rápidamente por la formación de nuevos granos libres de deformación como resultado de la recristalización durante o inmediatamente después del proceso.

Deformaciones muy grandes son posibles en el trabajo en caliente, porque los procesos de recuperación mantienen el paso con la deformación. En el trabajo en caliente el esfuerzo de fluencia (límite elástico o tensión de fluencia) permanece prácticamente constante, y como este esfuerzo disminuye con la temperatura, la energía necesaria para el conformado es generalmente menor que en el trabajo en frío. En el trabajo en frío, el endurecimiento por deformación no es aliviado, y el esfuerzo de fluencia se incrementa continuamente con la deformación. Por lo tanto, la deformación total posible antes de la fractura es menor para el trabajo en frío, a menos que los efectos del endurecimiento por la deformación sean eliminados por medio de recocidos intermedios.

Un cambio en la temperatura global modifica las propiedades del material, lo cual afecta la conformabilidad. En consecuencia diferencias locales de temperatura dentro de una deformación lleva a diferencias locales en las propiedades que afectan la conformabilidad.

A temperaturas altas, arriba de la mitad del punto de fusión en la escala de temperatura absoluta, aluminio de grano extremadamente fino, cobre, magnesio, níquel, acero inoxidable, acero, titanio, zinc y otras aleaciones llegan a ser superplásticas. La superplasticidad está caracterizada por una elongación extremadamente alta, con rangos de varios cientos a más de 1000 %, pero solo a bajas velocidades de deformación (generalmente abajo de  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) a altas temperaturas.

Los requerimientos de temperaturas altas y bajas velocidades de conformado han limitado el formado superplástico a volúmenes bajos de producción. En la industria aeroespacial, el titanio es formado de esta manera. El proceso es particularmente atractivo para aleaciones de zinc porque estas requieren comparativamente bajas temperaturas (  $270^\circ\text{C}$  ).

Un método para mejorar la embutibilidad es crear diferentes temperaturas locales las cuales han sido desarrolladas y son usadas comercialmente. Esto implica enfriar con agua el punzón en una operación de embutido profundo. Esto disminuye la temperatura del material donde contacta el punzón, la cual es la zona de falla principal, e incrementa el esfuerzo de fluencia local. El calentamiento del dado para disminuir el esfuerzo de fluencia en la zona de deformación en la parte de arriba de la pared del embutido ha sido benéfico.

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

### 4.2.4 FRICCION.

Un variable importante en todo proceso práctico de conformado de metales es la fricción entre la pieza de trabajo y las herramientas y/o matrices que aplican la fuerza y obligan al cambio de forma. La fricción ocurre porque las superficies de metal, al menos en una microescala, nunca están perfectamente lisas. El movimiento relativo entre tales superficies es dificultado por contacto bajo presión. La existencia de fricción incrementa el valor de la fuerza para la deformación y hace que la deformación sea menos homogénea, aumentando la propensión a la fractura.

El control de la fricción a través de lubricación es un aspecto importante del conformado de metales. Alta fricción conduce a varios defectos que limitan la conformabilidad. Sin embargo, la mayor parte de las pruebas de conformabilidad se realizan sin una estipulación para la reproducción de las condiciones de fricción que existen en el proceso de producción; en consecuencia, pueden resultar serios problemas en la correlación de los resultados del ensayo con las condiciones de producción reales.

### 4.2.5 ESTADO DE ESFUERZOS.

A causa de las diferentes geometrías de las herramientas y piezas de trabajo y de las distintas maneras en las que las fuerzas de deformación son aplicadas, diferentes procesos de conformado de metales producen distintos estados de esfuerzos. Un sistema común de clasificación de estados de esfuerzos encontrados en los procesos de conformado de metales es:

#### Sistemas de tensión-compresión.

- Tensión biaxial-compresión uniaxial, como en el rolado de un laminador rotatorio.
- Tensión uniaxial-compresión uniaxial, como en el resalte de una copa en embutido profundo.
- Tensión uniaxial-compresión biaxial, como en la zona de deformación de un alambre o barra en estirado.

#### Sistemas de compresión.

- Esfuerzo uniaxial, como en el forjado y recalado en matrices cerradas.
- Esfuerzo biaxial, como entre los rodillos de un tren de laminación cuando opera sin tensión delantera o trasera.
- Esfuerzo triaxial, como en extrusión.

#### Sistemas de esfuerzos de tensión.

- Esfuerzo biaxial, como en el conformado por estirado.

La facilidad con la cual un metal cede plásticamente o fluye es un factor importante de la conformabilidad. Si un metal puede ser deformado con bajos esfuerzos, como en deformación superplástica, entonces los niveles de esfuerzo para toda la pieza de trabajo son bajos y la fractura es menos probable. Las condiciones metalúrgicas dominantes y la temperatura son variables importantes, como también lo es el estado de esfuerzos.

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

### 4.3 EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD POR CONFORMADO SECUNDARIO (LAMINAS).

El conformado de láminas de metal es el proceso de convertir una lámina de metal a determinada parte o forma deseada sin fracturas o excesivo adelgazamiento localizado. El proceso puede ser simple, tanto como una operación de doblez, o una secuencia de operaciones muy complejas como aquellas llevadas a cabo en grandes volúmenes en plantas de estampado. En la fabricación de los más grandes estampados, una lámina de metal sostenida en sus orillas por un anillo portapiezas es deformada por medio de un punzón y un dado. El movimiento de la lámina dentro de la cavidad del dado es controlado por la presión entre la parte superior e inferior del anillo portapiezas.

Las operaciones de conformado de láminas de metal son tan diversas en tipo, extensión y proporción que una sola prueba no proporciona una indicación exacta de la conformabilidad de un material en todas las situaciones. Sin embargo, el conocimiento de las propiedades del material y el análisis cuidadoso de las diferentes formas de conformar involucradas al hacer una pieza en particular, son indispensables para la determinación de la probabilidad de éxito en la producción y en el desarrollo de procesos más eficientes.

#### 4.3.1 TIPOS DE CONFORMADO.

Muchas operaciones de conformado son complejas, pero todas consisten en combinaciones o secuencias de las operaciones básicas de conformado - doblado, estirado, y embutido.

**Doblado.** Es el tipo más común de deformación, que ocurre en casi todas las operaciones de conformado. Doblar alrededor de radios pequeños puede llevar al agrietamiento en los primeros pasos del proceso de conformado porque la deformación se localiza y evita parte de la correcta distribución. Lo ideal, sería que la deformación fuera distribuida tan uniformemente como fuera posible para maximizar la cantidad de deformación que puede ser obtenida. Frecuentemente, los dibujos especifican radios más pequeños que el necesario, lo cual trae como resultado problemas en la fabricación e incrementos de costos.

La lubricación no es recomendada cuando el doblado se hace sobre un radio agudo, porque la fricción del dado reduce la deformación localizada por la restricción al movimiento del metal lejos del radio. La orientación de la lámina en relación a la dirección de laminado puede también ser importante en la operación de doblado. Durante el laminado, inclusiones y otros defectos llegan a ser alargados en la dirección de laminado, produciendo zonas de debilidad. Cuando el eje de doblez es en esta dirección hay una tendencia hasta llegar al agrietamiento a lo largo de las zonas de debilidad. Esto baja la resistencia a la fractura comparada con la situación cuando el eje es inclinado en la dirección de laminado.

En ausencia de otros tipos de deformación, el doblado produce esfuerzos de tensión en la superficie exterior. Estos decrecen a cero a un nivel interior conocido como eje neutro. Estos esfuerzos llegan a ser de compresión en la parte interior del doblado. Ellos pueden causar retroceso (distorsión de la forma) al suprimir las fuerzas aplicadas.

**Estirado.** Es causado por esfuerzo de tensión en exceso del esfuerzo de cedencia. Estas fuerzas producen estiramientos biaxiales cuando son aplicadas en direcciones perpendiculares a la sección transversal de la lámina. El estiramiento biaxial balanceado ocurre cuando las fuerzas perpendiculares son iguales.

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

**Embutido.** El embutido de una lámina de metal causa elongación en una dirección y compresión en la dirección perpendicular. El ejemplo más simple es el embutido de un copa cilíndrica de fondo plano. En este proceso, un disco circular es sostenido entre dos dados anulares planos e impactado en el centro por un punzón de fondo plano. Esto embute las orillas del disco hacia adentro para formar la pared de la copa. El metal es estirado radialmente por las fuerzas de tensión producidas por el punzón, pero este es comprimido circunferencialmente a medida que su diámetro disminuye.

### 4.3.2 PROBLEMAS EN EL CONFORMADO.

La mayoría de los problemas encontrados en el conformado de láminas de metal son de fractura, pandeo y arrugamiento, e indeseable textura superficial. La ocurrencia de una o la combinación de estas condiciones pueden presentar a la lámina como una parte indeseable. Los efectos de estos problemas son discutidos a continuación.

**Fractura.** Ocurre cuando una lámina de metal es sometida a estiramiento o cizallamiento con fuerzas que exceden los límites de ruptura del material, velocidad de deformación y temperatura. En estiramiento, inicialmente la lámina adelgaza uniformemente, por lo menos en una área local. Eventualmente, se alcanza un punto en el cual la deformación se concentra y causa una banda de delgadez localizada conocida como cuello, el cual finalmente se fractura. La formación de cuello es generalmente considerada como ruptura porque produce un defecto visible y una debilidad estructural.

**Pandeo y Arrugamiento.** En una típica operación de estampado, el punzón contacta a la lámina, la estira y comienza a empujarla a través del anillo portapiezas. Las orillas de la lámina son empujadas dentro de regiones con perímetros más pequeños progresivamente. Esto produce esfuerzos de compresión en la dirección circunferencial. Si estos esfuerzos alcanzan un nivel crítico característico del material y de su espesor, causan ligeras ondulaciones conocidas como buckles. Los buckles pueden desarrollarse hacia adentro como ondulaciones más pronunciadas u ondas conocidas como arrugas si la presión del portapiezas no es suficientemente alta. Este efecto también puede causar arrugas en otros lugares, particularmente en regiones con cambios bruscos de sección.

**Textura superficial indeseable.** Las láminas de metal fuertemente deformadas, particularmente si son de grano grueso, desarrollan una textura superficial áspera comúnmente conocida como cáscara de naranja. Esto es inaceptable en partes en servicio que son visibles. Otro origen de problemas de superficie ocurre en metales que tienen una pronunciada elongación en el punto de cedencia, esto es, materiales que se alargan varios porcientos sin un incremento en la carga después de la cedencia. En estos metales, la deformación a bajos niveles de deformación es concentrada en bandas irregulares conocidas como líneas o bandas Lüders o como líneas de deformación por elongación local.

Estos defectos desaparecen a niveles de alta y moderada deformación. Sin embargo, casi todas las partes tienen algunas regiones de deformación baja. Estos defectos son desagradables y no son ocultados con pintura. Algunas aleaciones Al-Mg desarrollan severas líneas Lüders.

### 4.4 TIPOS DE PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD.

Las pruebas de conformabilidad son de dos tipos básicamente: intrínsecas y simulativas. Las pruebas intrínsecas miden las propiedades básicas características de los materiales que pueden ser relacionadas con su conformabilidad. Las pruebas simulativas someten al material a deformación que es muy parecida a la deformación que ocurre en operaciones de conformado en particular.

## EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

**Pruebas intrínsecas.** Proveen información general que no están en función del espesor y la condición superficial del material. La más importante y extensiva prueba intrínseca usada es el ensayo a la tracción uniaxial, la cual proporciona los valores de las propiedades de muchos materiales para un rango amplio de operaciones de conformado. Otras pruebas intrínsecas comercialmente importantes son el ensayo a la tracción con deformación plana, las pruebas de estirado de Marciniak, las pruebas de torsión en lámina, la prueba de pandeo hidráulico y pruebas de dureza.

**Pruebas simulativas.** Proporcionan información específica y limitada que generalmente es sensible al espesor, condición superficial, lubricación, geometría y tipo de mecanizado. Esta información generalmente se relaciona con un solo tipo de operación de conformado. Muchas pruebas simulativas, como la prueba de copa de Olsen y Erichsen, prueba de doblado, etc. han sido usadas extensamente por muchos años con buena correlación para la producción en casos específicos.

### 4.5 SUPERPLASTICIDAD .

Los metales superplásticos son capaces de soportar muy altas elongaciones cuando son deformados a temperaturas elevadas. Esta alta ductilidad proporciona una importante herramienta industrial ya que la buena fluidez de los metales superplásticos a bajos esfuerzos dan la posibilidad de fabricar piezas complejas utilizando una simple operación de conformado.

Cuando los materiales policristalinos son deformados en tensión, usualmente se fracturan con bajos porcentajes de deformación plástica. Sin embargo, hay una clase de materiales, conocidos como aleaciones superplásticas en las cuales se logran muy altas elongaciones bajo condiciones de tensión.

Se requieren dos condiciones principales para lograr una ductilidad superplástica en los metales. Primero, la superplasticidad es un proceso de difusión controlada por lo que se requiere una temperatura de operación alta, típicamente del orden de 0.5 de la temperatura de fusión o superior. Segundo, la superplasticidad depende de los desplazamientos relativos de los granos individuales a través de los límites de grano, en la práctica se encuentra que la superplasticidad se presenta solo en materiales donde el tamaño de grano es muy pequeño, menor de 10µm.

El requerimiento de un tamaño de grano pequeño y homogéneo a altas temperaturas excluye a los metales puros y aleaciones de solución sólida simple de considerarse como materiales superplásticos. La superplasticidad óptima ocurre en la práctica en aleaciones con fase eutéctica o eutectoide donde el crecimiento de grano es inhibido por la presencia de dos fases diferentes o en aleaciones comerciales donde una fina dispersión de una segunda fase es introducida para refinar el tamaño de grano. La aleación eutectoide Zn-22%Al es un ejemplo clásico de un material superplástico en el cual se logran elongaciones mayores al 1000% dentro de un rango de esfuerzos y temperaturas limitado.

# **CAPITULO**

## **V**

## 5.- PRODUCCION EXPERIMENTAL DEL MATERIAL COLAMINADO ZINALCO-ALUMINIO.

Debido a la escasa información y producción de este tipo de material, fué necesario realizar su producción mediante un programa experimental cuyo objetivo es la obtención y la evaluación de las propiedades mecánicas, incluyendo la capacidad de conformación de este nuevo material compuesto.

### 5.1 MATERIAL UTILIZADO EN LAS PRUEBAS.

Para el desarrollo de la técnica de colaminado de este trabajo se emplearon los siguientes materiales: Zinalco I (70-30) extruido, el cual fue proporcionado por el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Lámina de aluminio 1200-H14 calibre 24 con una pureza del 99.9%, lo que permite una mejor unión de los materiales. La relación de espesores fue de 80% Zinalco y 20% Aluminio.

### 5.2 EQUIPO EMPLEADO.

El desarrollo experimental se realizó en los siguientes equipos:

**LAMINADORA.**-El laminador empleado, fue un laminador dúo con posibilidades de arreglarse como cuarto de la marca HILLE con capacidad de carga de 30 toneladas, en el cual se puede controlar la velocidad de laminación y el porcentaje de deformación.

Es importante destacar que este laminador estaba afectado en su sistema de carga, por lo cual se realizaron las reparaciones necesarias para ponerlo en marcha nuevamente. Así mismo, mediante los recursos ofrecidos por la Dirección General de Personal Académico (DGPA), para la realización de este proyecto, se instalaron en la laminadora sensores de carga y temperatura, registradas y mostradas por medio de display, facilitando así la investigación.

**HORNO ELECTRICO.**-Para realizar el calentamiento de las probetas de unión Zinalco-Aluminio a la temperatura de trabajo, se empleó un horno eléctrico marca LIMBERG modelo 439-DL, el cual realiza el calentamiento por medio de resistencias eléctricas y cuenta con control de temperatura variable, además de un sistema de atmósfera controlada a base de argón.

**MAQUINA PARA ENSAYOS DE TENSION.**-El equipo que se utilizó para evaluar la unión lograda fué una máquina universal de ensayos marca INSTRON modelo 4206, con capacidad de 15 toneladas. Dicha máquina cuenta con una microcomputadora en la cual es posible programar las condiciones de la prueba y obtener un reporte con los resultados, así como las gráficas correspondientes a cada ensayo.

**MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.**- Empleado para observar la interfase de la unión a diferentes aumentos y en diferentes secciones de las probetas, las características del microscopio son las siguientes:

## PRODUCCION EXPERIMENTAL

- Voltaje de aceleración 0 - 30 Kv.
- Detector de electrones secundarios y retrodispersados.
- Almacenamiento de información: cámara fotográfica de 35mm, videoprint y disco duro de sistema de cómputo.
- Equipo de microanálisis por dispersión de energía.

**EQUIPOS AUXILIARES.**- Para la fabricación de las probetas que se utilizaron en las pruebas se empleó una cizalla de pedal marca CHICAGO MOD. FS-416; con capacidad de corte de calibre 18 y una soldadora de resistencia de puntos marca MAC'S MOD>PM12 con potencia de 8.4KW.

### 5.3 PRODUCCION DEL MATERIAL.

La preparación que requieren los materiales (Zinco-Aluminio) que fueron unidos por la técnica de colaminación, es de suma importancia, ya que de ello depende el que puedan ser unidos. Al ser la preparación un factor de fundamental importancia, se explica a continuación en forma detallada.

La primera etapa consiste en cortar los materiales a las dimensiones apropiadas para laminarlos, esto depende del tipo de máquina que se utilice, en el caso industrial el material puede ser de bobina para lograr una producción continua. En particular para esta investigación, los materiales fueron cortados en tramos de 26 x 90 mm y en tramos de 90x300mm para las pruebas de embutido, según lo requiere la norma de la prueba realizada (ASTM E 643-84)

Una vez obtenidos los materiales con las dimensiones requeridas se procedió a realizar el proceso de limpieza, el cual se inicia con el lijado de las superficies tanto del Zinco de mayor espesor (2.4 mm), como del Aluminio de menor espesor (0.6 mm). Para esta actividad se empleó lija de carburo de silicio del número 180, con la cual se lijaron las superficies en la dirección longitudinal y transversal, produciendo un mallado, con la finalidad de eliminar impurezas y permitir una mejor unión mecánica durante la etapa de deformación.

Concluida la limpieza mecánica se dispuso de las laminas en forma de paquete como se muestra en la Figura 5.1. Lo cual consiste en colocar la lámina de Aluminio sobre la lámina de Zinco, haciendo incidir las superficies limpias. Posteriormente se sueldan las laminas mediante soldadura por puntos en el extremo que pasará primero a través de los rodillos, la finalidad de la soldadura es la de impedir el corrimiento de alguno de los materiales cuando inicia el proceso.

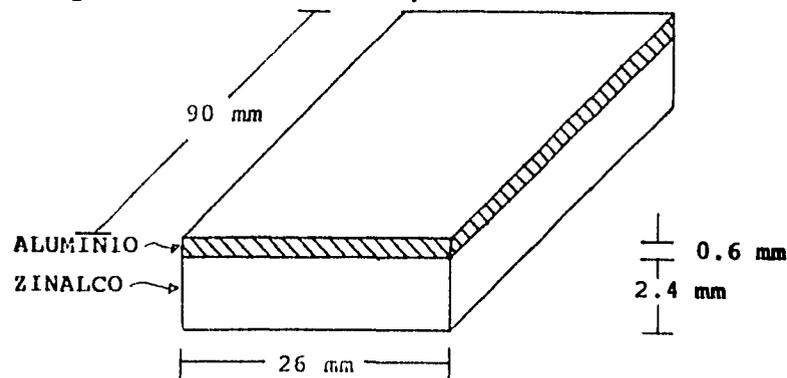


Figura 5.1

## PRODUCCION EXPERIMENTAL

Con esta preparación los materiales son limpiados mediante ultrasonido en una solución de acetona durante un tiempo de siete minutos. El empleo de la acetona se justifica porque no oxida superficialmente al zinc como lo haría el agua, que forma una capa superficial que impide la unión de las piezas. El proceso de limpieza hasta aquí descrito, ha permitido lograr la unión, pero para llegar a este proceso se ha incursionado un gran camino en cuanto a la utilización de diversos agentes limpiadores como son: solventes y limpiadores industriales.

El paso siguiente para la obtención del material compuesto consiste en someter las probetas a un precalentamiento de cinco minutos, para después ser laminadas, variando porcentaje de deformación y temperatura con la finalidad de obtener los parámetros óptimos para lograr una buena unión. Las pruebas iniciales se realizaron a baja temperatura con una velocidad de laminación constante de 10 ft/mín, un espesor inicial de 3 mm y a diferentes porcentajes de deformación como se muestra en las Tablas 5.1 a 5.5

Tabla 5.1 Colaminación a temperatura ambiente (20 °C)

No probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
1	10	2.66	2.83
	10	2.66	2.70
2	20	4.01	2.76
	20	6.11	1.97
3	20	4.61	2.75
	20	6.16	2.10
4	30	6.07	2.39
	30	8.02	1.29
5	30	5.99	2.39
	30	8.08	1.29
6	50	9.02	1.62
7	50	8.83	1.64
8	50	8.87	1.72
9	50	8.73	1.68

hf = espesor final

PRODUCCION EXPERIMENTAL

Tabla 5.2 Colaminación a 220 °C

No. probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
10	20	3.23	2.67
	20	5.10	1.94
11	20	3.01	2.74
	20	4.44	1.93
12	30	4.35	2.30
	30	7.24	1.11
13	30	4.27	2.41
	30	7.33	1.48
14	50	7.75	1.58
15	50	7.17	1.56

Tabla 5.3 Colaminación a 240 °C

No. probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
16	20	3.45	2.40
	20	5.15	1.64
17	20	3.65	2.23
	20	4.87	1.67
18	30	5.82	2.06
	30	7.42	1.08
19	30	6.45	2.06
	30	7.32	1.06
20	50	7.48	1.50
21	50	7.35	1.62

PRODUCCION EXPERIMENTAL

Tabla 5.4 Colaminación a 260 °C

No. probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
22	20	4.14	2.25
	20	4.37	1.58
23	20	3.22	2.24
	20	4.50	1.60
24	30	4.38	2.00
	30	7.06	1.06
25	30	4.91	1.97
	30	7.72	1.10
26	50	6.90	1.44
27	50	7.18	1.40

Tabla 5.5 Colaminación a 280 °C

No. probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
28	20	3.17	2.80
	20	4.37	1.65
29	20	3.19	2.74
	20	4.12	1.60
30	30	4.03	2.39
	30	6.91	1.54
31	30	4.04	2.01
	30	6.71	1.03
32	50	6.30	1.46
33	50	6.48	1.47

Posteriormente se procedió a realizar un recocido a las probetas con número non a una temperatura de 270 °C durante un tiempo de 15 minutos y enfriamiento en el horno.

En estas pruebas se observó que la unión no era adecuada, por lo cual se procedió a realizar las pruebas a mayor temperatura en base al diagrama de fases Aluminio-Zinc, mostrado en la figura 5.2

PRODUCCION EXPERIMENTAL

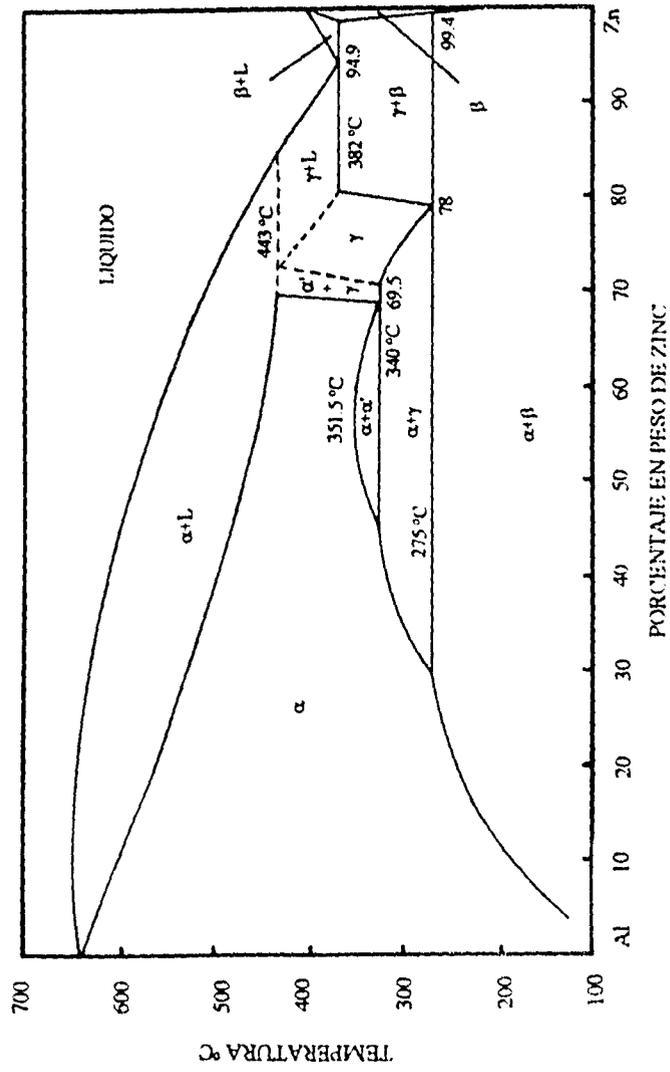


Figura 5.2 Diagrama de fases Al-Zn.

**PRODUCCION EXPERIMENTAL**

Basados en el diagrama de fases y de acuerdo con la composición del Zinalco (76 % Zn), se determinó trabajar a temperaturas superiores a 300 °C, temperatura a la cual se supone una solución sólida y con la estructura del Aluminio. Las pruebas realizadas a estas temperaturas se muestran a continuación en las tablas 5.6 a 5.8. A las probetas con número non se les dio un recocido bajo las mismas condiciones de las pruebas iniciales.

**Tabla 5.6 Colaminación a 320 °C**

No. probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
34	20	2.37	2.60
	20	3.75	2.00
35	20	2.54	2.47
	20	3.70	2.02
36	30	3.45	2.24
	30	3.94	1.57
37	30	3.25	2.21
	30	4.70	1.55
38	50	4.84	1.85
	50	9.33	0.73
39	50	5.06	1.81
	50	9.73	0.73
40	30	3.65	2.26
	30	4.72	1.56
	30	6.92	0.89
41	30	3.45	2.28
	30	4.67	1.60
	30	7.14	0.89

Stamp: INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS (IVIC)

PRODUCCION EXPERIMENTAL

Tabla 5.7 Colaminación a 350 °C.

No. probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
42	20	2.20	2.50
	20	2.94	2.26
43	20	2.12	2.46
	20	3.01	2.01
44	30	4.62	2.22
	30	5.34	1.59
45	30	4.68	2.28
	30	5.05	1.53
46	50	5.14	1.80
	50	9.60	0.69
47	50	5.12	1.75
	50	9.61	0.71
48	30	3.87	2.22
	30	4.88	1.54
	30	7.33	0.90
49	30	3.34	2.20
	30	4.89	1.56
	30	7.49	0.90
50	50	5.15	1.89
	50	10.11	0.80
51	50	5.61	1.84
	50	10.09	0.84
52	100	11.32	0.74
53	100	11.40	0.76

## PRODUCCION EXPERIMENTAL

Tabla 5.8 Colaminación a 380 °C.

No. probeta	% trabajo	carga [Ton]	hf [mm]
54	20	1.91	2.50
	20	3.60	2.15
55	20	1.87	2.67
	20	3.34	2.37
56	30	3.20	2.36
	30	5.07	1.53
57	30	3.65	2.27
	30	5.65	1.57
58	50	5.16	1.81
	50	10.62	0.71
59	50	4.96	1.87
	50	10.33	0.77
60	30	3.17	2.26
	30	4.82	1.54
	30	7.75	0.88
61	30	3.02	2.31
	30	4.43	1.63
	30	7.78	0.87
62	100	13.96	0.80
63	100	14.26	0.80

### 5.4 OBTENCION DE RESULTADOS.

#### 5.4.1 EVALUACION DE LA UNION.

Una vez realizadas las pruebas bajo diferentes condiciones de deformación y temperatura, se procedió a evaluar la calidad de la unión mediante pruebas de desgarre y microscopía electrónica de barrido con la finalidad de determinar con cuales parámetros se obtienen las mejores condiciones de unión.

#### 5.4.2 PRUEBA DE DESGARRE.

La prueba de desgarre se realizó en las probetas colaminadas a diferentes condiciones de unión, dichas probetas fueron preparadas como se muestra en la figura 5.3 y posteriormente ensayadas, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6.

PRODUCCION EXPERIMENTAL

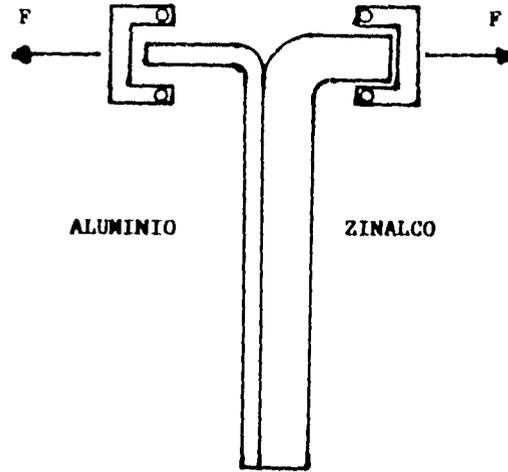


Figura 5.3 Preparación de la probeta para prueba de desgarre.

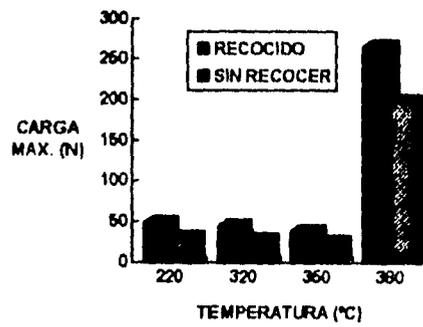


Figura 5.4 Colaminación a 40 % de deformación.

PRODUCCION EXPERIMENTAL

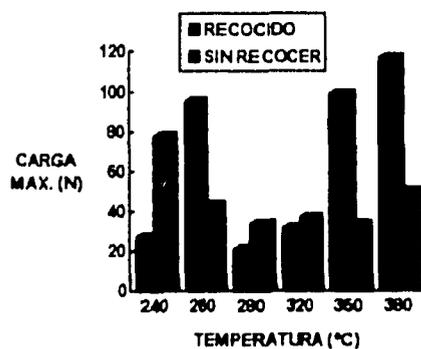


Figura 5.5 Colaminación a 60 % de deformación.

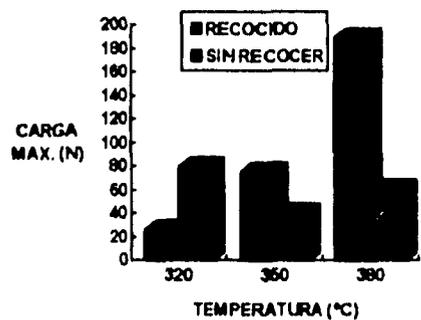
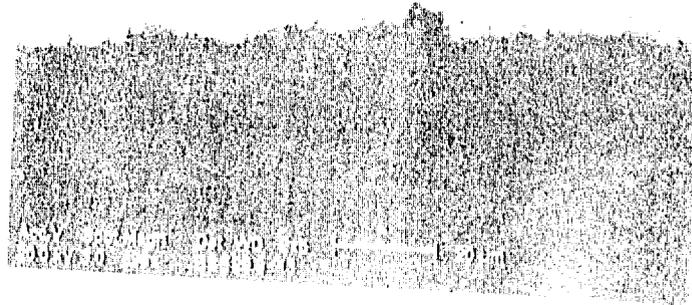


Figura 5.6 Colaminación a 90 % de deformación.

Nota: Las muestras colaminadas a 100 % de deformación, no pudieron ser ensayadas bajo esta prueba debido a que la unión entre los materiales fué muy resistente y se rompía el aluminio de espesor delgado al intentar preparar las probetas.

5.4.3 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.

De las probetas colaminadas se obtuvieron muestras en la dirección longitudinal y transversal de laminación, las cuales se montaron en baquelita, realizando un pulido mecánico con lijas de carburo de silicio del número 180 al 600 y un acabado con acetona y alúmina, a continuación se les dio un baño de oro en la superficie pulida, procediendo a observarlas en el microscópio electrónico de barrido. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes fotografías.

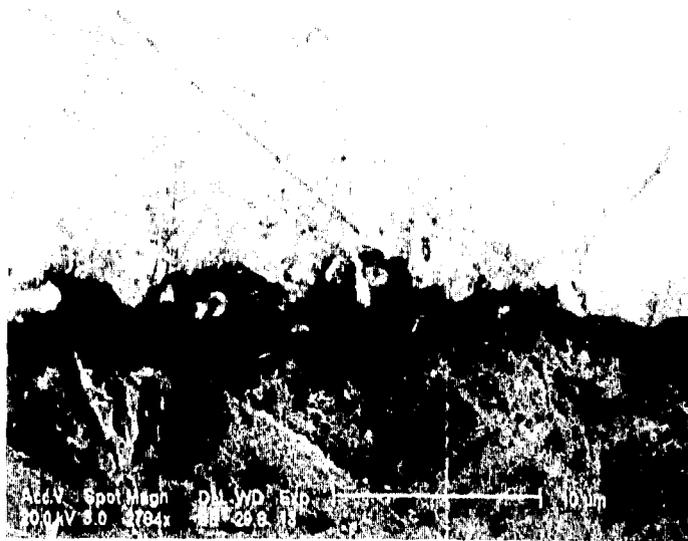


Fotografía 1



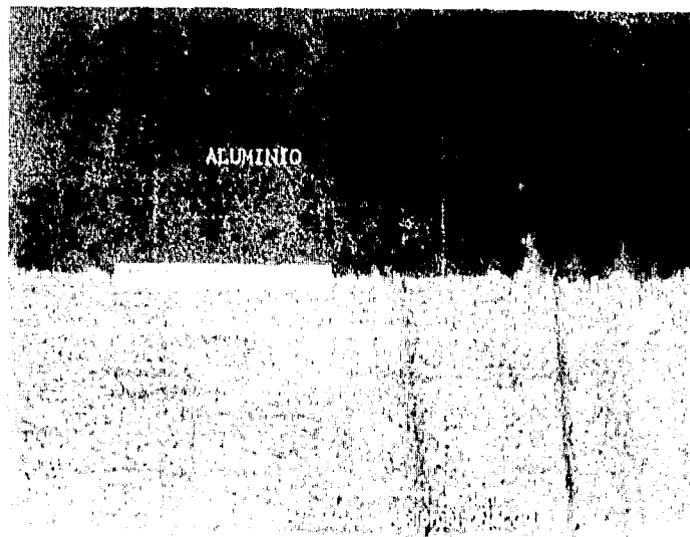
Fotografía 2

PRODUCCION EXPERIMENTAL



Fotografía 3

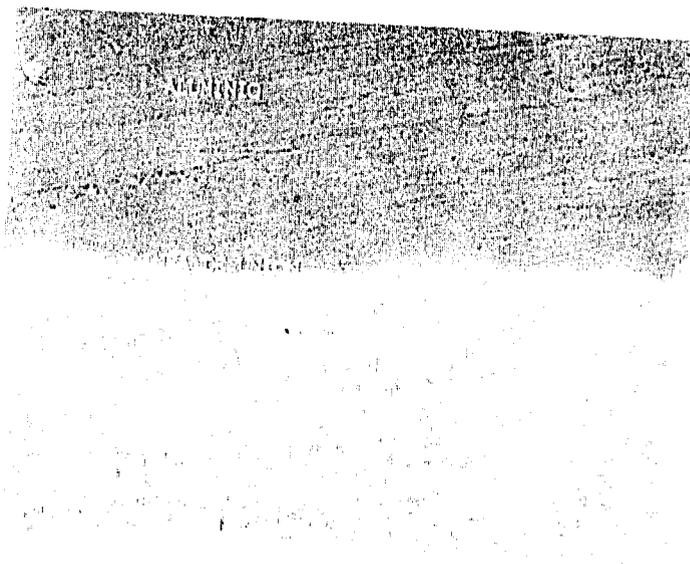
Fotografías 1,2 y 3: Material colaminado Zinalco-Aluminio a 90 % de deformación y temperatura de 380 °C a diferentes aumentos; aparente unión mecánica, interfase defectuosa, sin unión, producto de una deficiente limpieza.



Fotografía 4

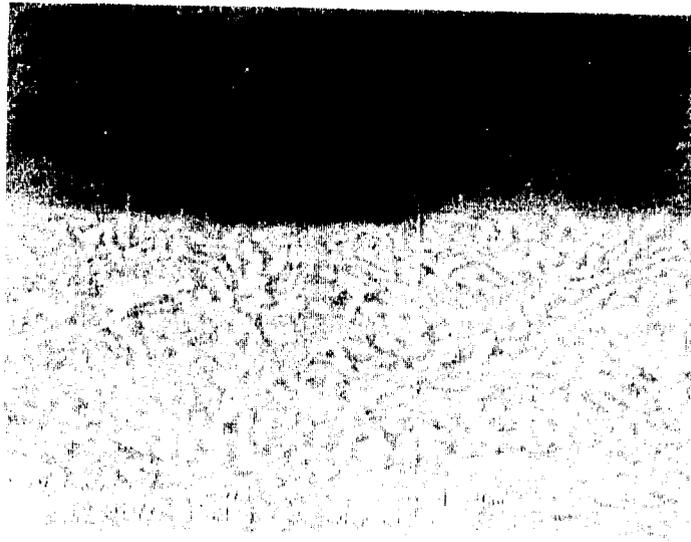


Fotografia 5



Fotografia 6

PRODUCCION EXPERIMENTAL



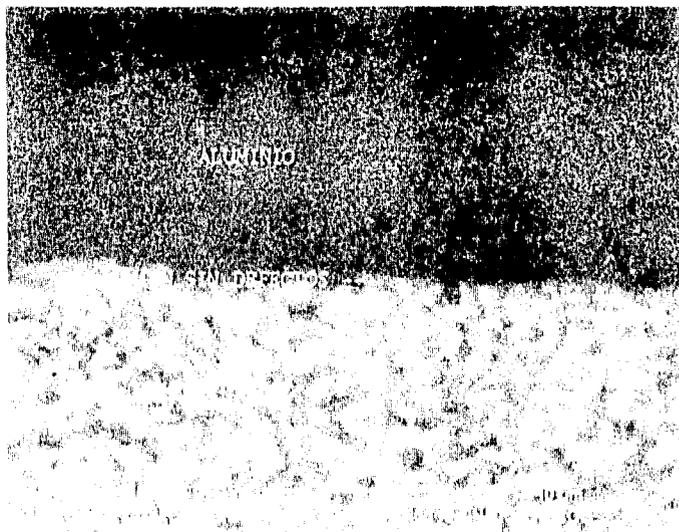
Fotografía 7

Fotografías 4,5,6 y 7. Material colaminado Zinalco-Aluminio a 90 % de deformación y temperatura de 380 °C sin recocido. Diferentes aumentos, aparente unión mecánica, interfase limpia libre de defectos.



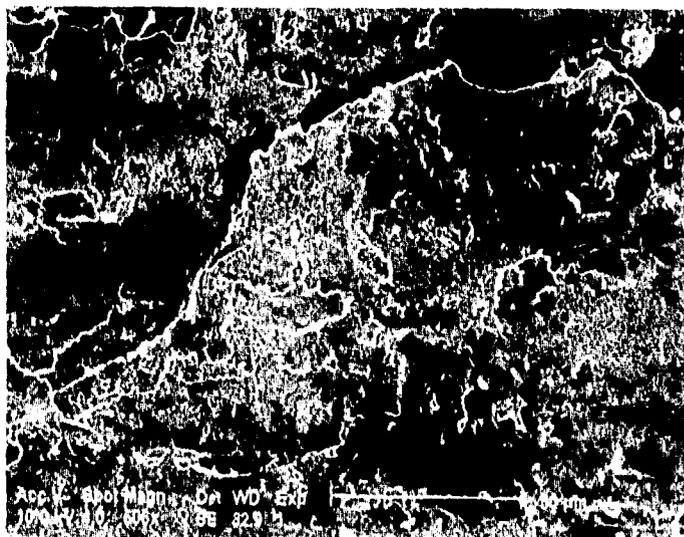
Fotografía 8

PRODUCCION EXPERIMENTAL.



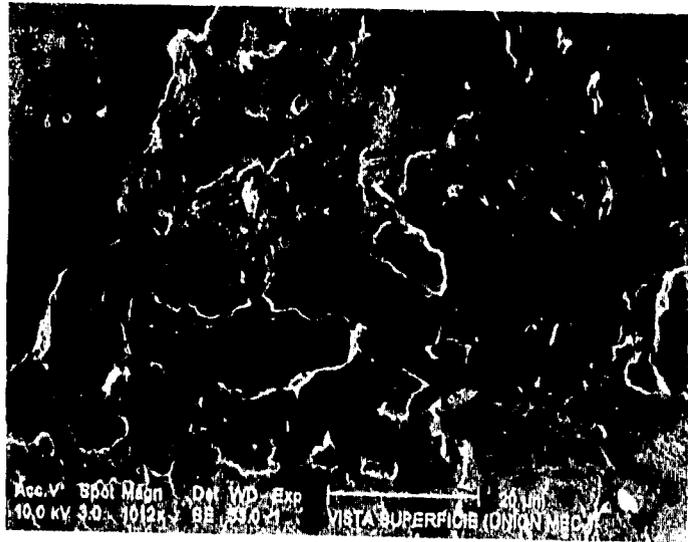
Fotografía 9

Fotografías 8 y 9. Material colaminado Zinc-Aluminio a 90 % de deformación y temperatura de 380 °C, recocido a 270 °C durante 15 minutos. Unión libre de defectos y fronteras delimitadas.

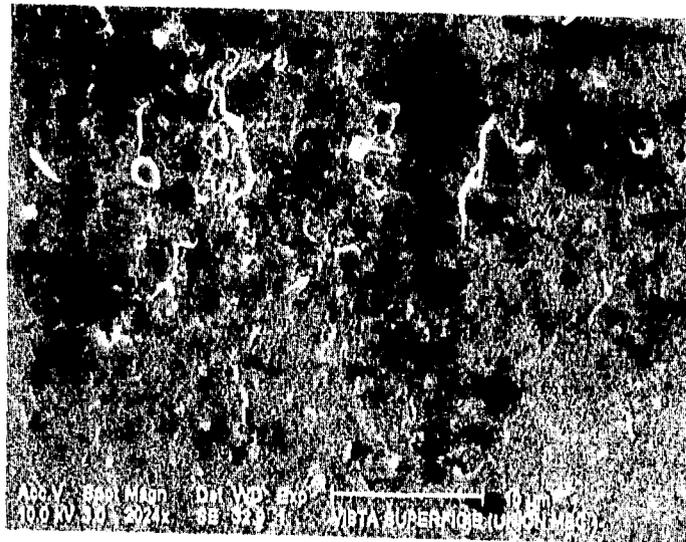


Fotografía 10

PRODUCCION EXPERIMENTAL.



Fotografía 11



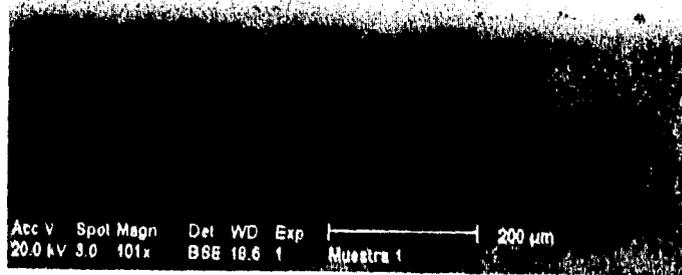
Fotografía 12

Fotografías 10,11 y 12. Vista superficial del Zinalco, obtenida después de la prueba de desgarre a diferentes aumentos. Colaminación a 90 % de deformación y 380 °C.

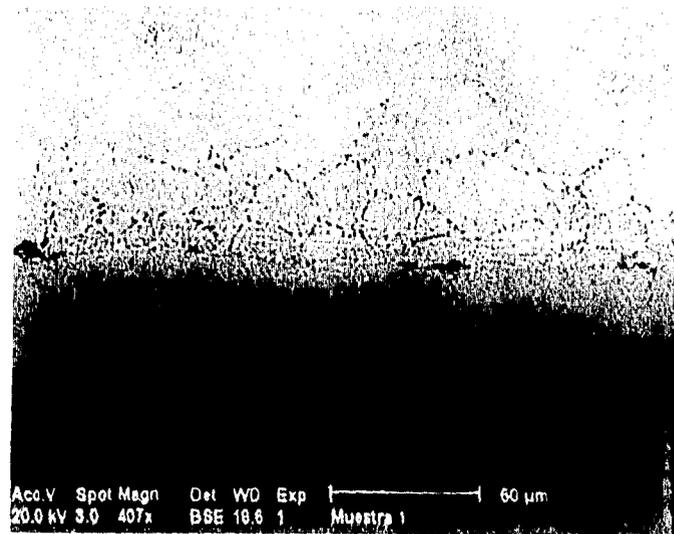
## PRODUCCION EXPERIMENTAL

Observando las fotografías anteriores y los resultados de las pruebas de desgarre, se determinó que la unión lograda bajo las condiciones de tiempo y temperatura de recocido, no ofreció los resultados deseados, por lo cual se procedió a realizar más ensayos. Dichos ensayos se realizaron manteniendo el porcentaje de deformación y temperatura, ya que éstos ofrecieron las condiciones óptimas en la prueba de desgarre. El parámetro que se modificó para los siguientes ensayos fue el tiempo de recocido, siendo este determinado de 1 hora a la misma temperatura (270 °C).

Los resultados obtenidos en estas pruebas son mostrados en las fotografías 13, 14, 15, 16 y 17 en las que se muestra la zona de unión a diferentes aumentos en los que se puede apreciar con buen grado de detalle que en estas muestras sí se logró una unión por difusión como se pretendía.

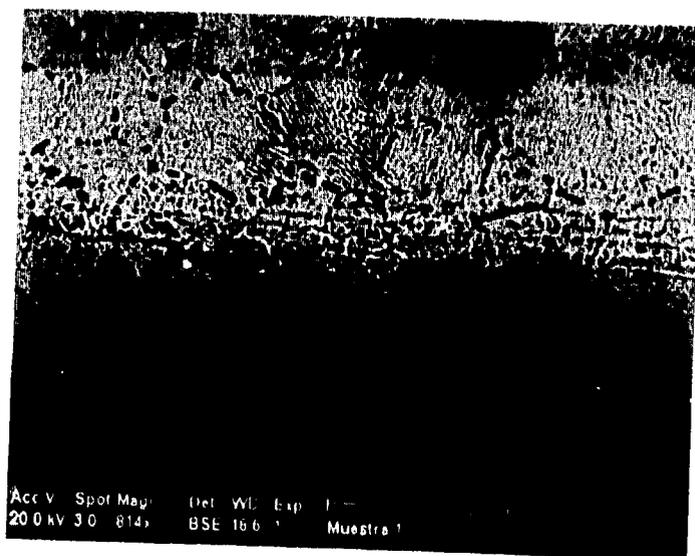


Fotografía 13

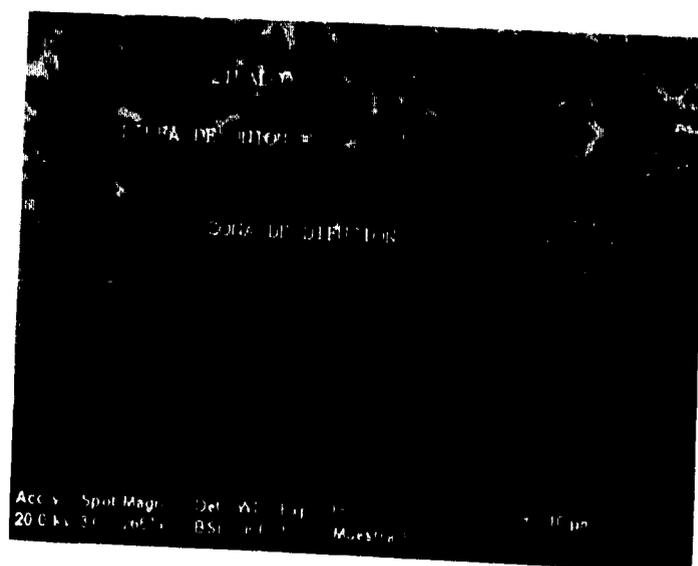


Fotografía 14

PRODUCCION EXPERIMENTAL



Fotografía 15



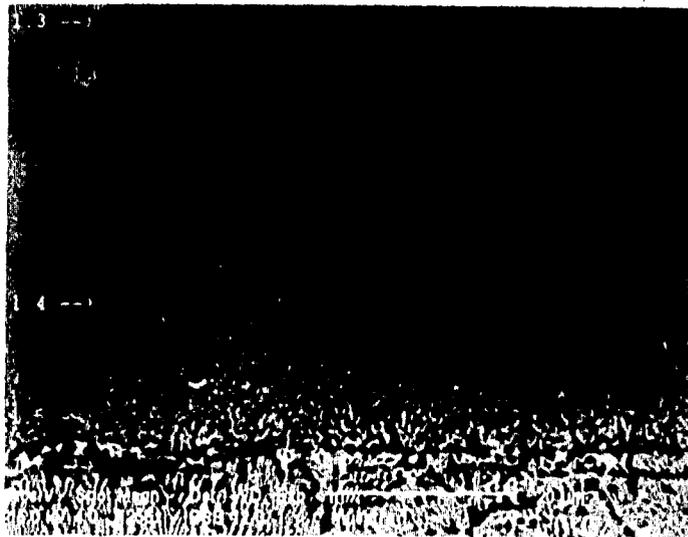
Fotografía 16

## PRODUCCION EXPERIMENTAL



Fotografía 17

Es importante hacer notar que las muestras logradas en estos ensayos no fueron analizadas para la prueba de desgarre, ya que las piezas lograron una unión tan firme que no fue posible preparar las muestras para la prueba de desgarre. Sin embargo, las fotografías muestran que se obtuvo muy buena unión y que se comprueba más aun mediante la realización de pruebas de análisis químico de composición llevadas acabo mediante microscopia electrónica de barrido a lo largo de diferentes secciones de las muestras como se puede apreciar en la fotografía 18 en la que se indican las diferentes secciones en las que se realizó el análisis químico, el cual se da a continuación en las gráficas y tablas correspondientes a las secciones localizadas en la fotografía como secciones 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6.



Fotografía 18

PRODUCCION EXPERIMENTAL

d:\dx4\edslusr\zinal13.spc

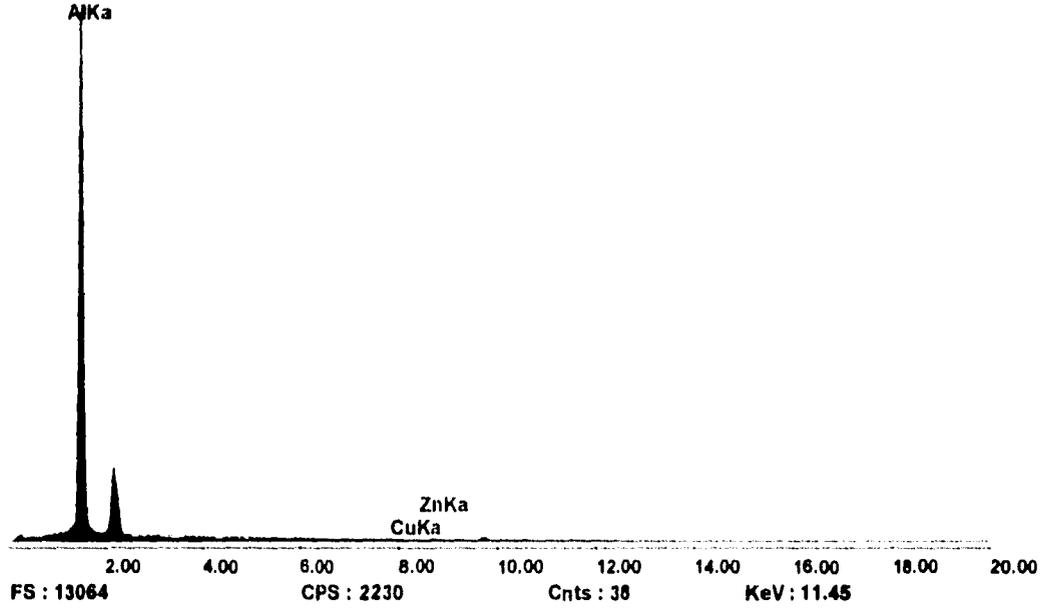
Label:zinal11.spc

Prst:None

Lsec:101

15:02:54

11-22-84



ZAF Quantification Method, Standardless

PEI User Set : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
AlK	0.9560	95.310	98.009
CuK	0.0000	0.000	0.000
ZnK	0.0440	4.690	1.991
Total		100.000	100.000

Element	Net Inten	Backgrd	Inten Error	P/B
AlK	1006.78	16.58	0.32	60.71
CuK	0.00	6.69	0.00	0.00
ZnK	2.00	6.15	14.00	0.33

Element	Z	A	F
AlK	1.0051	0.9186	1.0000
CuK	0.8643	1.0009	1.0000
ZnK	0.8616	1.0018	1.0000

Sección 1.3

PRODUCCION EXPERIMENTAL

zinal11.spc

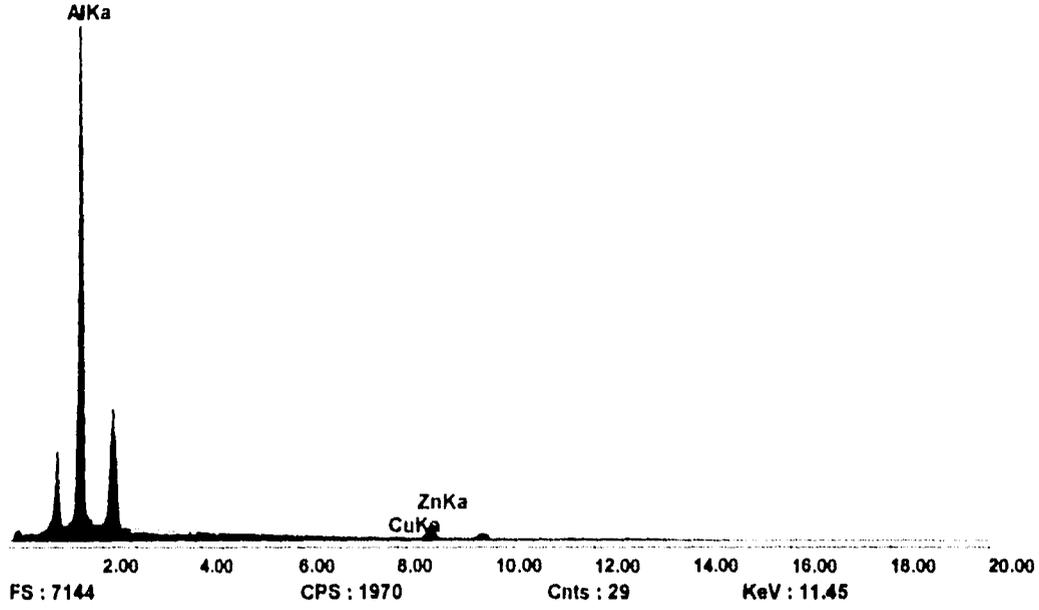
Label:zinal11.spc

Prst:None

Lsec:100

15:07:55

11-22-94



ZAF Quantification Method, Standardless

PEI User Set : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight	Atomic
AlK	0.4799	59.898	78.337
CuK	0.0120	0.921	0.512
ZnK	0.5082	39.181	21.151
Total		100.000	100.000

Element	Net Inten	Backgrd	Inten Error	P/B
AlK	537.34	18.60	0.44	26.89
CuK	1.32	4.60	18.43	0.29
ZnK	24.57	4.25	2.18	5.76

Element	Z	A	F
AlK	1.0468	0.5356	1.0000
CuK	0.9081	1.0001	1.0000
ZnK	0.9066	1.0011	1.0000

Sección 1.4

PRODUCCION EXPERIMENTAL

zinal11.spc

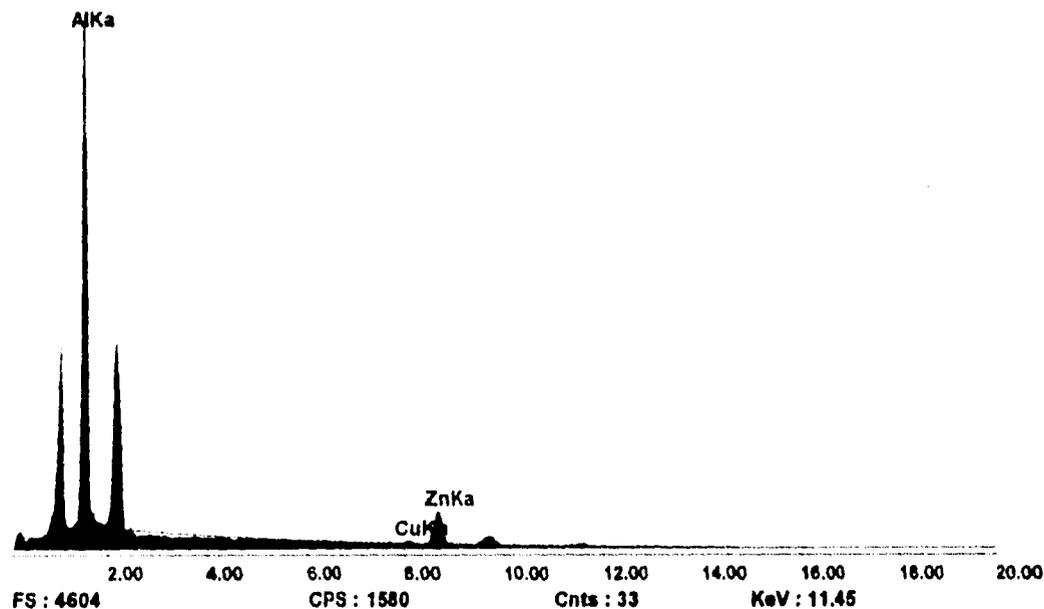
Label:zinal11.spc

Prst:None

Lsec:100

15:13:53

11-22-94



ZAF Quantification Method, Standardless

PEI User Set : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
AlK	0.2760	43.141	64.746
CuK	0.0236	1.855	1.182
ZnK	0.7004	55.004	34.072
Total		100.000	100.000

Element	Net Inten	Backgrd	Inten Error	P/B
AlK	346.03	18.53	0.55	18.67
CuK	2.92	5.15	9.73	0.57
ZnK	37.92	5.10	1.73	7.44

Element	Z	A	F
AlK	1.0689	0.4376	1.0000
CuK	0.9311	0.9997	1.0000
ZnK	0.9303	1.0008	1.0000

Sección 1.5

PRODUCCION EXPERIMENTAL

zinal11.spc

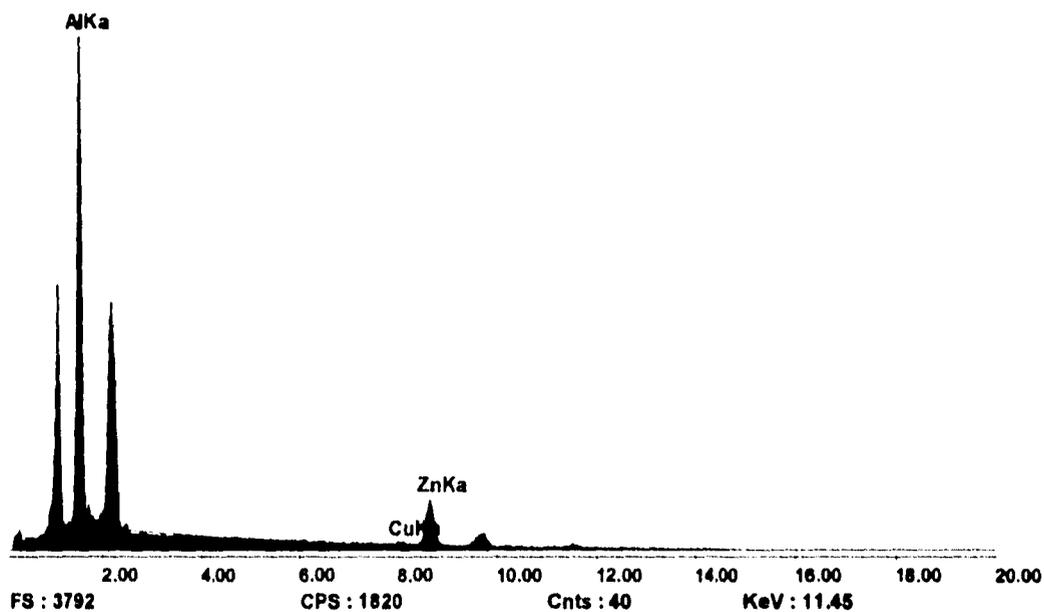
Label:zinal11.spc

Prst:None

Lsec:100

15:18:02

11-22-84



ZAF Quantification Method, Standardless

PEI User Set : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
AlK	0.2131	36.687	58.377
CuK	0.0262	2.105	1.423
ZnK	0.7608	61.207	40.200
Total		100.000	100.000

Element	Net Inten	Backgrd	Inter. Error	P/B
AlK	276.72	18.90	0.62	14.64
CuK	3.35	4.63	8.43	0.72
ZnK	42.66	4.47	1.61	9.54

Element	Z	A	F
AlK	1.0780	0.4077	1.0000
CuK	0.9405	0.9996	1.0000
ZnK	0.9399	1.0007	1.0000

Sección 1.6

## PRODUCCION EXPERIMENTAL

De igual forma se evaluó la composición química de un área determinada cercana a la interfase de unión de los materiales, obteniéndose los resultados mostrados en la fotografía 19 y en la gráfica y tabla correspondientes.



Fotografía 19

PRODUCCION EXPERIMENTAL

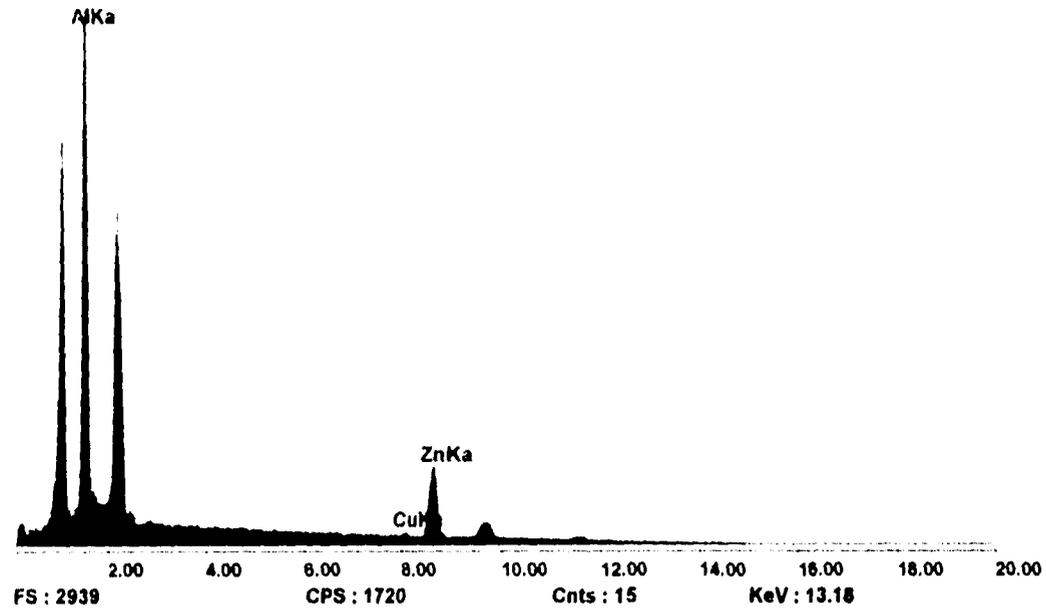
Label:

Prst:None

Lsec:100

15:45:47

11-22-94



ZAF Quantification Method, Standardless

PEI User Set : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
AlK	0.1515	29.268	50.046
CuK	0.0193	1.607	1.167
ZnK	0.8292	69.126	48.788
Total		100.000	100.000

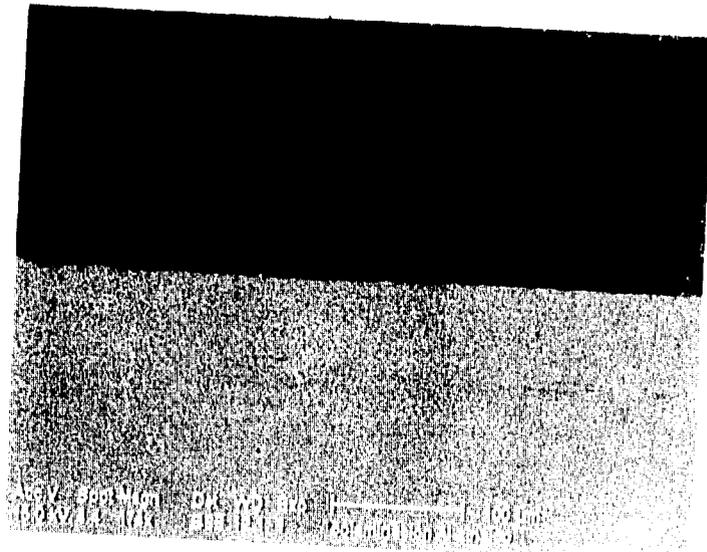
Element	Net Inten	Backgrd	Inten Error	P/B
AlK	217.93	20.34	0.71	10.67
CuK	2.72	5.45	10.51	0.50
ZnK	51.28	5.91	1.47	8.83

Element	Z	A	F
AlK	1.0886	0.3774	1.0000
CuK	0.9515	0.9994	1.0000
ZnK	0.9512	1.0006	1.0000

Análisis químico de la interfase.

## PRODUCCION EXPERIMENTAL

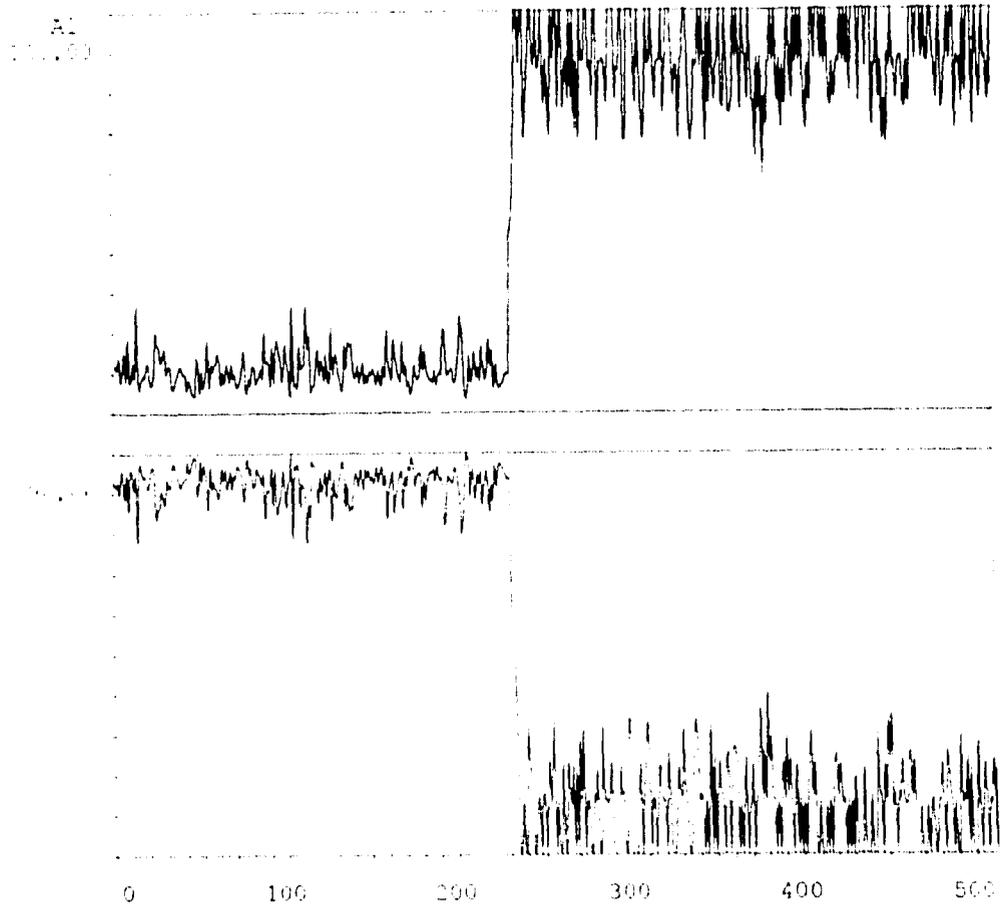
Finalmente para comprobar el efecto de difusión en el material compuesto se realizó una microscopía de barrido perpendicular a la zona de unión en dos muestras diferentes, como se muestra a continuación en las fotografías 20 y 21 con sus respectivas gráficas.



Fotografía 20 unión sin difusión.

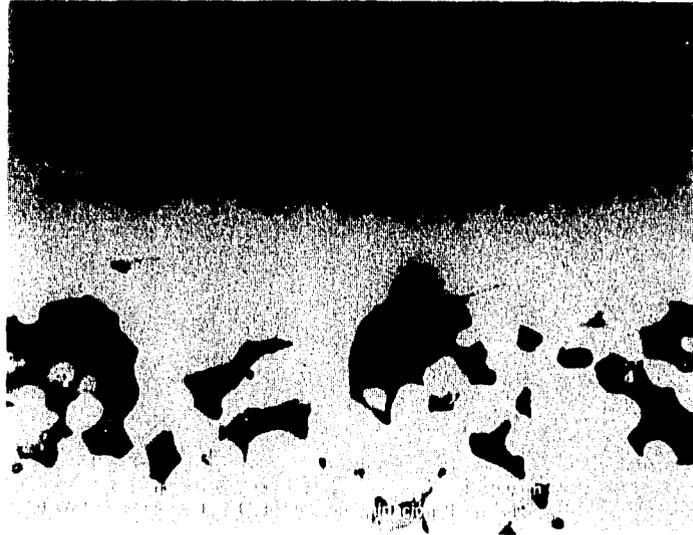
PRODUCCION EXPERIMENTAL

DxAuto Linescan Plot 02-03-1995 13:03:40  
KRatio WT% Concentrations Vertical Scale : Auto



Concentración de Zn-Al en la Interfase

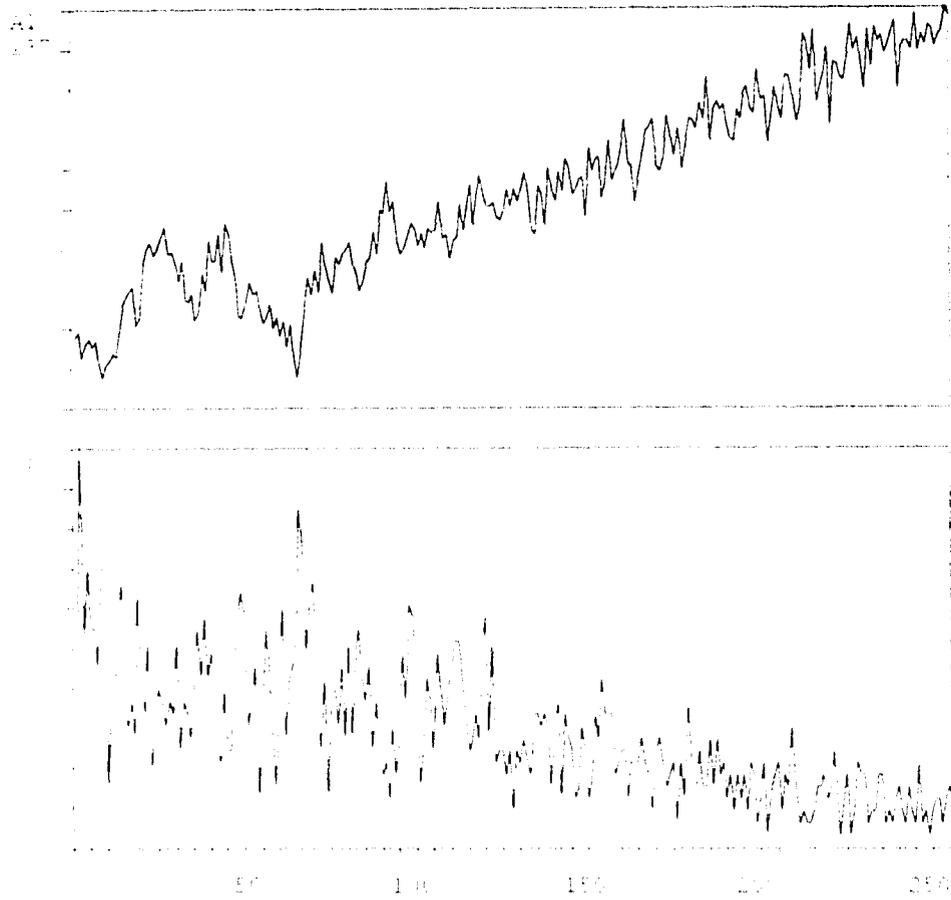
PRODUCCION EXPERIMENTAL



Fotografía 21 unión con difusión.

PRODUCCION EXPERIMENTAL

DxAuto Linescan Plot      05-11-1995    14:54:24  
ROI Integral Intensities    Vertical Scale : Auto



**Concentración de Zn-Al en la interfase**

De la observación y análisis superficial de los resultados obtenidos hasta esta parte se puede determinar que la unión lograda ha sido satisfactoria.

# **CAPITULO**

## **VI**

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

### 6 PRUEBAS EXPERIMENTALES DE EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD

#### 6.1 PRUEBA DE TENSION.

La prueba de tensión se aplicó en las probetas colaminadas con la finalidad de evaluar si la temperatura afecta a las propiedades mecánicas de los materiales, los resultados obtenidos son mostrados en las figuras 6.1 a 6.6.

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

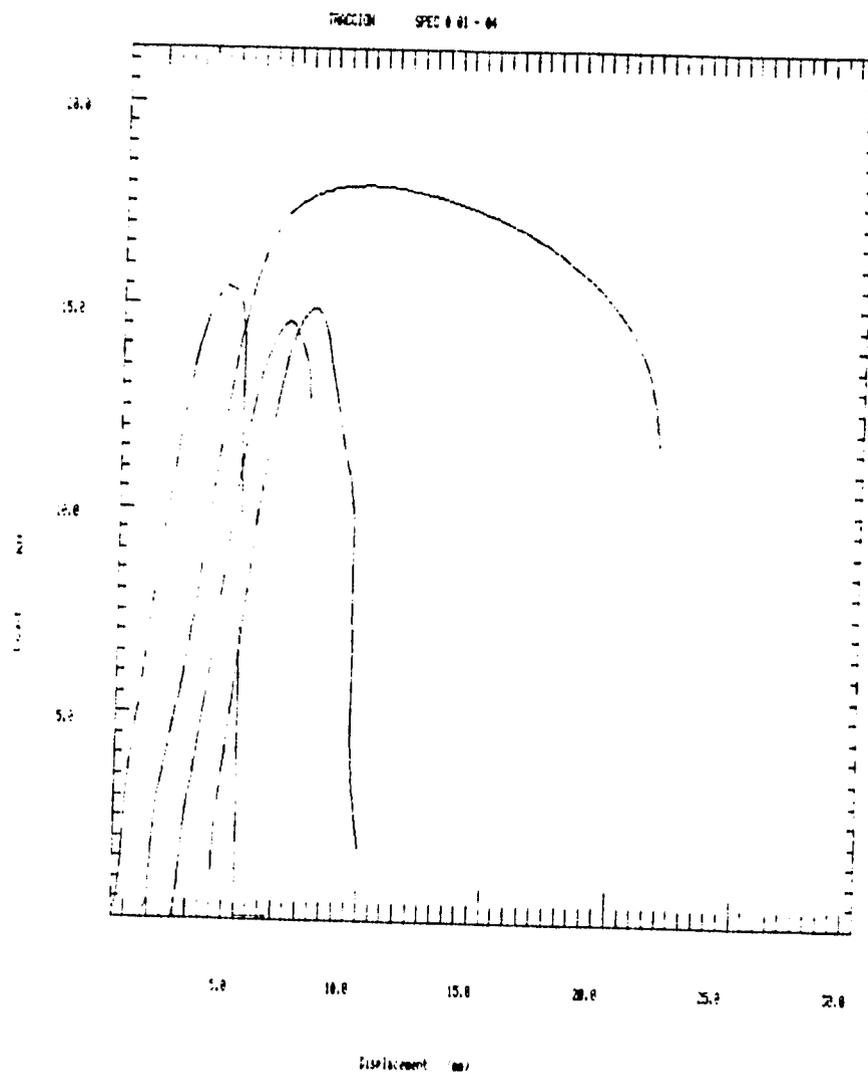


Figura 6.1 Gráfica de carga contra desplazamiento ( temperatura de laminación 320 °C, porcentaje de deformación 40 %), sin recocido y con recocido.

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

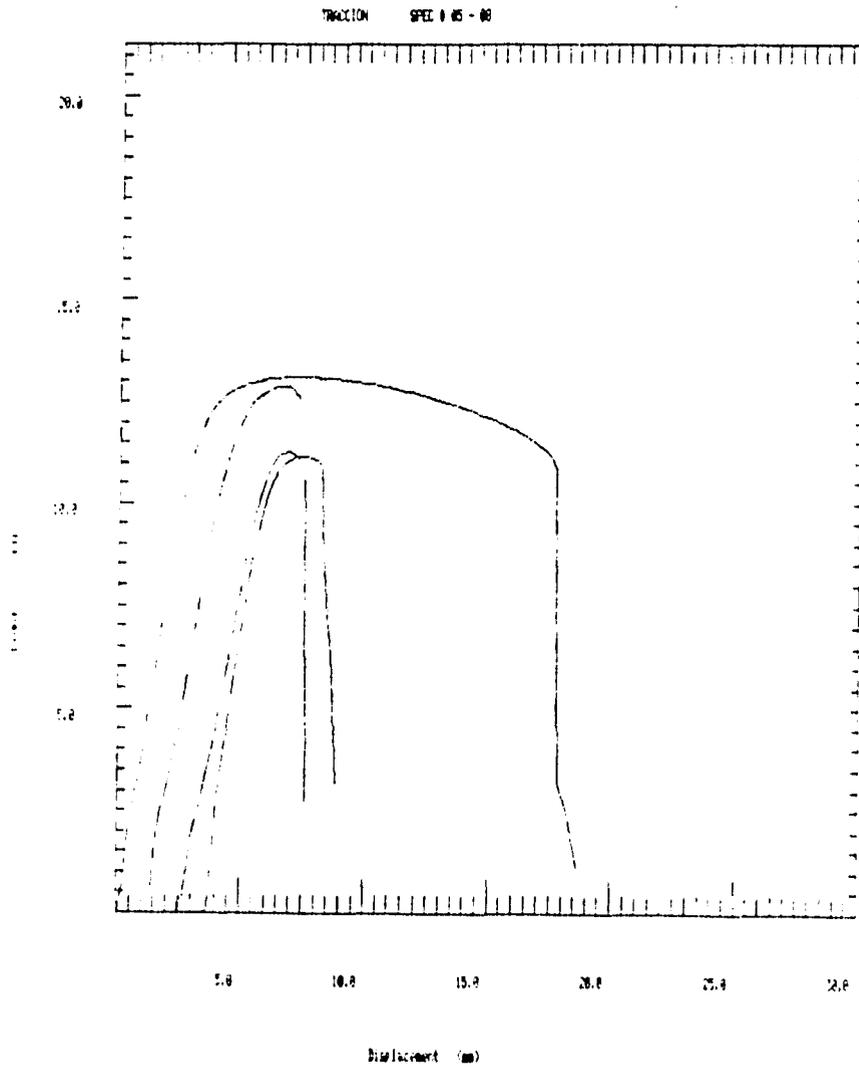


Figura 6.2 Gráfica de carga contra desplazamiento ( temperatura de laminación 320 °C, porcentaje de deformación 60 % ) sin recocido y con recocido.

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

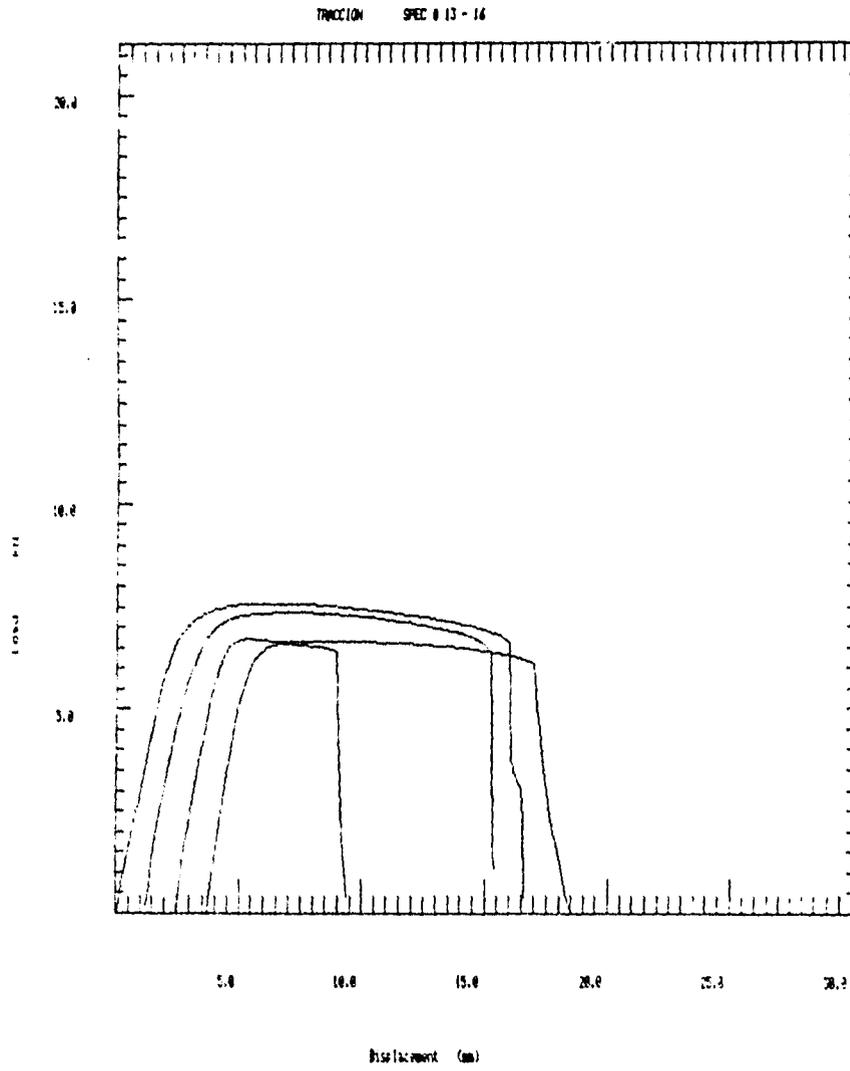


Figura 6.3 Gráfica de carga contra desplazamiento ( temperatura de laminación 320 °C, porcentaje de deformación 90 % ) sin recocido y con recocido.

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

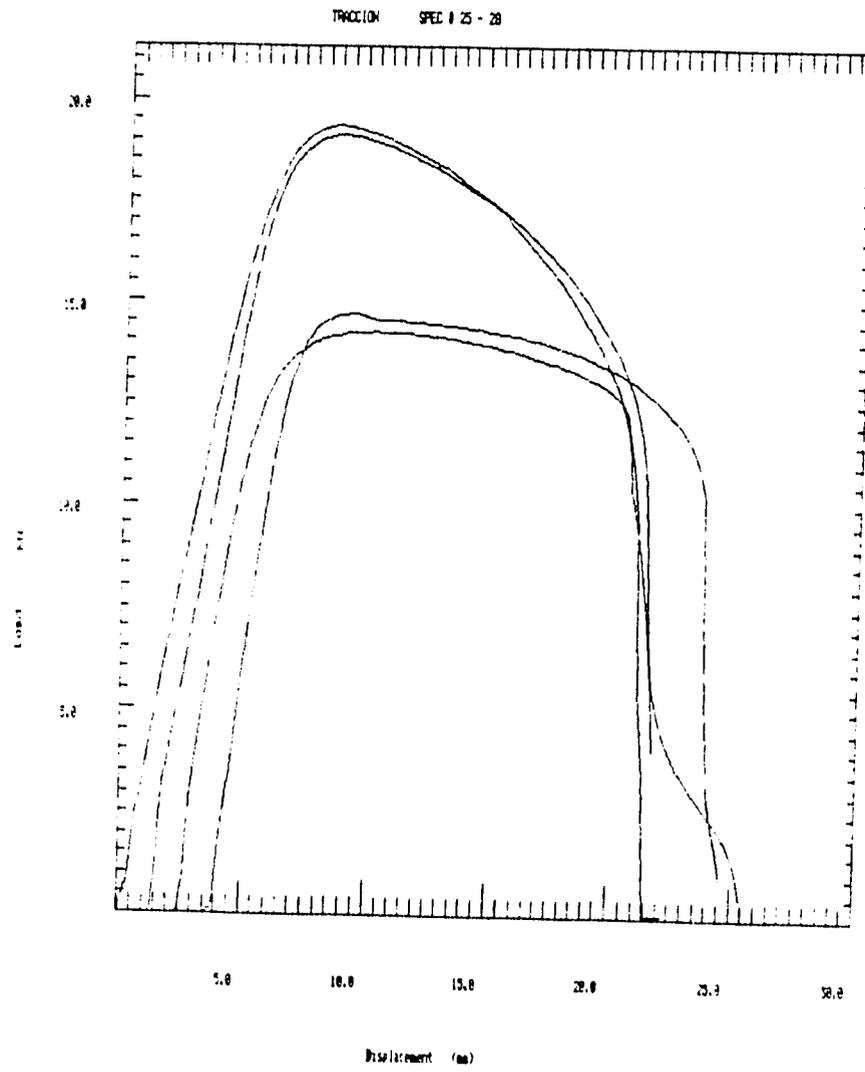


Figura 6.4 Gráfica de carga contra desplazamiento ( temperatura de laminación 380 °C, porcentaje de deformación 40 %) sin recocido y con recocido.

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

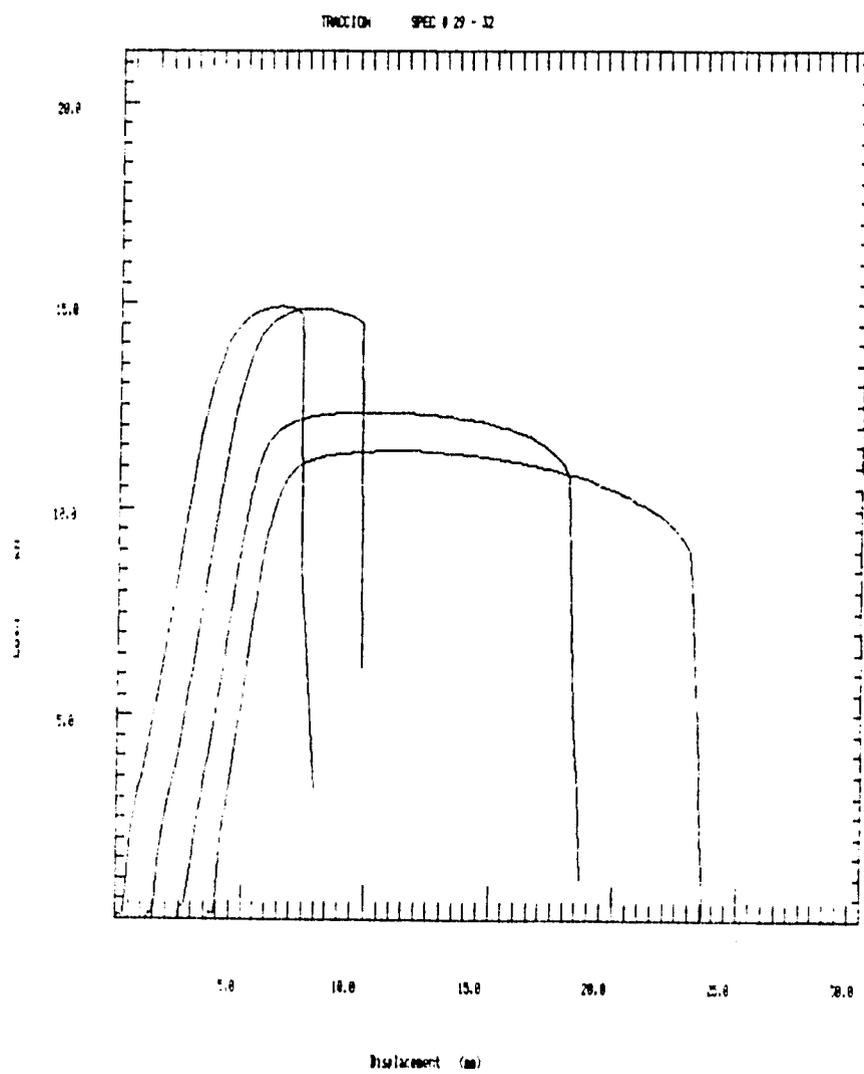


Figura 6.5 Gráfica de carga contra desplazamiento ( temperatura de laminación 380 °C, porcentaje de deformación 60 % ) sin recocido y con recocido.

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

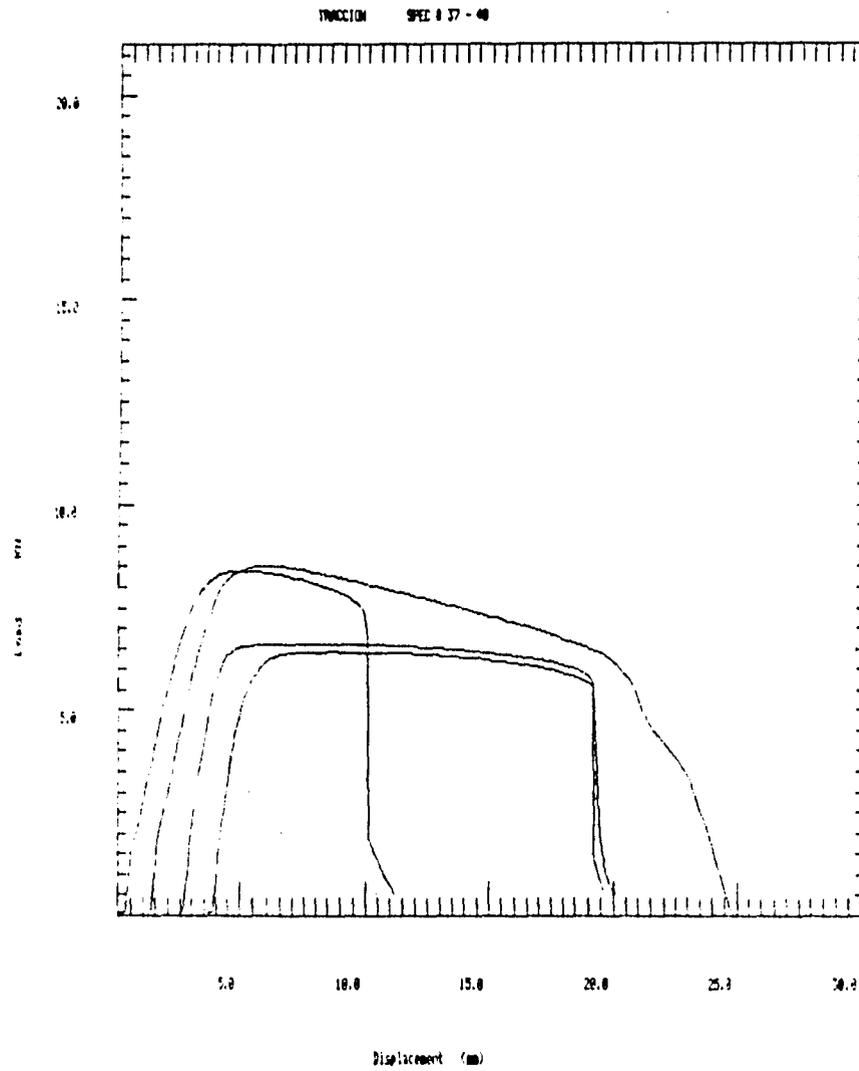


Figura 6.6 Gráfica de carga contra desplazamiento ( temperatura de laminación 380 °C, porcentaje de deformación 90 %) sin recocido y con recocido.

## PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

### 6.2 PRUEBA DE EMBUTIDO.

Una vez encontrados los parámetros óptimos de temperatura y porcentaje de deformación para una buena unión, se procedió a evaluar la conformabilidad de las probetas. La prueba realizada para dicha evaluación fue la prueba Erichsen conforme a la norma ASTM E 643 -84 denominada "deformación con punzón de bola para materiales de lámina delgada". Los resultados son presentados en las figuras 6.7 y 6.8.

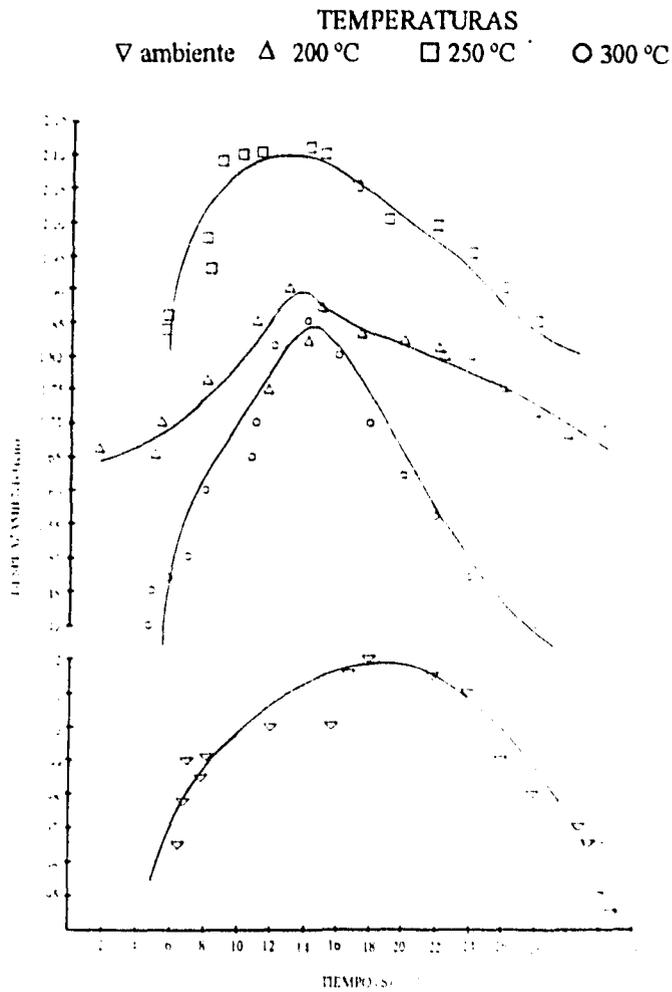


Figura 6.7 Gráfica de desplazamiento contra tiempo de aplicación de carga.

PRUEBAS DE CONFORMABILIDAD

TEMPERATURAS  
▽ ambiente   Δ 200 °C   □ 250 °C   ○ 300 °C

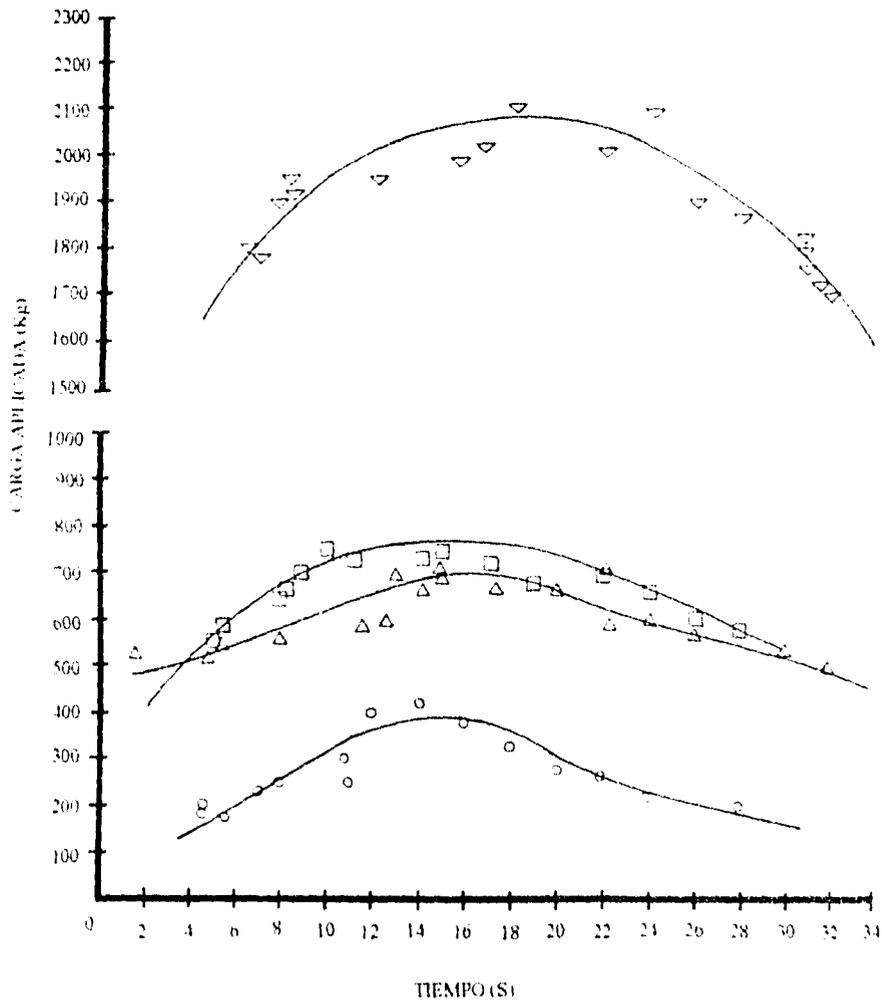


Figura 6.8 Gráfica de carga contra tiempo de aplicación de carga.

# **CAPITULO**

## **VII**

## 7. ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se procederá a analizar los resultados obtenidos, por lo cual se hará referencia continuamente al capítulo anterior.

En general los resultados que se han obtenido son satisfactorios, ya que se ha logrado una buena unión de los materiales que en un principio se pensaba que serían imposibles de unir, dada la tendencia que presentan ambos a la formación de una capa superficial de óxido que los autoprotege de la corrosión, pero que para fines específicos de la unión limita ya que dicha capa se forma instantáneamente (en fracciones de segundo). Por lo cual se requiere que las superficies sean atómicamente limpias y altamente reactivas para facilitar el proceso de unión, lo cual se logra como se explicó en la etapa de la preparación de los materiales.

En cuanto a la conformabilidad que presenta el nuevo material compuesto, ésta es adecuada, ya que los materiales continúan unidos hasta un buen grado de porcentaje de deformación, permaneciendo el Aluminio firmemente adherido mejorando el aspecto grisáceo del Zinalco. El análisis detallado se realiza a continuación.

### 7.1 OBTENCION DEL MATERIAL COLAMINADO.

Es importante notar que durante la obtención del material colaminado se realizaron gran cantidad de pruebas a diferentes temperaturas y porcentajes de deformación mostrados en las tablas 6.1 a 6.6 en las cuales se observa lo siguiente:

- A menores temperaturas ( $T < 275\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

- a) Se requiere de una mayor carga para deformar el material.
- b) No se logra una buena unión.
- c) A temperatura ambiente y grandes deformaciones, el material tiende a agrietarse en los bordes.
- d) El acabado de las superficies presenta un aspecto agradable de textura y brillantez.

- A mayores temperaturas ( $275^{\circ}$  a  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

- a) La carga que se requiere para deformar el material es menor.
- b) Se logran mayores porcentajes de deformación en una sola pasada.
- c) Se logra una mejor unión mecánica a  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 90% de deformación.
- d) El acabado de las superficies es aceptable.

### 7.2 ANALISIS DE LA UNION.

El análisis de la unión se realizó mediante dos pruebas, una de carácter mecánico como lo es la prueba de desgarre explicada en el capítulo anterior, así como por métodos de observación por microscopía electrónica de barrido.

Los resultados obtenidos de la prueba de desgarre son mostrados en las figuras 5.4 a 5.6, en las cuales se observa lo siguiente:

## ANALISIS DE RESULTADOS

### 7.2.1 PRUEBA DE DESGARRE.

1. Es notorio e importante el incremento en la resistencia que se logra cuando las piezas colaminadas son recocidas, lo cual queda manifiesto en las figuras, en la cuales se observa claramente en la mayoría de los casos que las probetas con recocido ofrecen una resistencia superior hasta en un 30% y en algunos otros casos hasta en un 50%. Este efecto es logrado por el hecho de que la unión mecánica obtenida durante la colaminación es reforzada mediante la migración de átomos en ambas direcciones provocada por la temperatura a la que se realizó el tratamiento térmico, así como por el tiempo de exposición. El tiempo de exposición es de gran importancia, ya que de él depende directamente el incremento en la resistencia lograda en la unión; cuando el tiempo es insuficiente la unión no será reforzada, sin embargo cuando el tiempo es el adecuado se obtienen resultados satisfactorios.

2. En las figuras se observa también que la mayor resistencia durante la prueba de desgarre se obtiene cuando la temperatura de colaminación es de 380 °C e independiente del porcentaje de deformación (lo cual se observa en la última columna de todas las gráficas).

3. Así mismo en las figuras se puede determinar que a mayor porcentaje de deformación se logra una unión de mayor resistencia a la prueba de desgarre.

### 7.2.2 ANALISIS DE MICROSCOPIA ELECTRONICA.

La siguiente etapa en la evaluación de la unión se realizó mediante microscopía electrónica, ya que el método permite observar a nivel microestructural los resultados logrados en la unión.

Los resultados obtenidos se muestran en las fotografías 1 a 21, así como en las gráficas correspondientes en las cuales, se muestra el avance logrado en la unión en diferentes etapas.

Fotografías 1 a 3, muestran una aparente unión mecánica con gran cantidad de impurezas en la interfase, producto de una deficiente limpieza de las muestras, lo cual hace obvio que estas muestras no ofrecieron resistencia mecánica durante la prueba de desgarre, aún cuando se obtuvieron con las condiciones óptimas de colaminación, pero sin el tratamiento térmico de recocido.

Fotografías 4 a 7. En estas fotografías obtenidas bajo las mismas condiciones de colaminación se observa el avance logrado en la unión mecánica cuando la limpieza es realizada en forma adecuada, presentando una interfase libre de impurezas, y por ende una mayor resistencia durante la prueba de desgarre.

Fotografías 8 y 9. Estas fotografías muestran el material colaminado con los parámetros óptimos de colaminación y la aplicación de un tratamiento térmico de recocido durante un tiempo de 15 min. a una temperatura de 270 °C, con lo cual no se logró el efecto de difusión que se deseaba, ya que la interfase como se observa esta perfectamente delimitada.

Fotografías 10 a 12. En estas fotografías se confirma la deficiencia del recocido cuando es aplicado en un tiempo de 15 min., ya que durante la observación microscópica posterior a la prueba de desgarre se obtienen solo algunos puntos de contacto entre ambos materiales como se observa en las fotografías.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fotografías 13 a 17. Las fotografías muestran el efecto de difusión logrado cuando el material colaminado bajo los parámetros óptimos es recocido durante 1 hora a temperatura de 270 °C. Las fotografías muestran claramente la zona correspondiente a la interfase de la unión así como sus fronteras en las que se aprecia la variación en las zonas de difusión, lo cual se muestra con diferentes aumentos donde se observa desde una pequeña zona nebulosa a menores aumentos y más detalle de la zona difundida a mayores acercamientos.

Fotografía 18. La fotografía presenta cuatro secciones en las que se realizó microscopía electrónica de barrido y microsonda, con la finalidad de evaluar con más detalle el efecto de difusión logrado, obteniéndose las gráficas de composiciones químicas de las diferentes secciones en donde se realizó el barrido. De las gráficas y composiciones obtenidas se analiza fácilmente que el efecto de difusión fue logrado, ya que las concentraciones de Aluminio y Zinc varían conforme se aproxima el barrido a la zona de unión. La variación es de la siguiente forma.

Aluminio: mayor concentración en la zona 1.3 más lejana de la zona de unión y menor concentración en la zona 1.5 más próxima a la zona de unión.

Zinc: menor concentración en la zona 1.3 más lejana de la zona de unión y mayor concentración en la zona 1.5 más próxima a la zona de unión.

Fotografía 19. En esta muestra se realizó un mapeo en un área específica de la unión en la cual se puede apreciar el efecto de difusión. Lo cual se comprueba al analizar los porcentajes en peso de los elementos del material compuesto, mostrados en la tabla que corresponde a dicha fotografía.

Así mismo la gráfica correspondiente a la fotografía 20 muestra el análisis obtenido de una microscopía de barrido perpendicular a la zona de unión en la que se determina la ausencia de difusión entre ambos materiales, de igual forma la gráfica perteneciente a la fotografía 21 muestran el efecto de difusión en el material compuesto.

### 7.2.3 COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL COMPUESTO.

Una vez lograda la unión de los materiales Zinco-Aluminio, se realizaron pruebas de tensión con la finalidad de evaluar el comportamiento mecánico, a fin de determinar la influencia de los parámetros bajo los cuales se realizó la unión. Los parámetros bajo estudio son los siguientes:

- a) Porcentaje de deformación.
- b) Temperatura bajo la cual se realizó la deformación.
- c) Efecto del tratamiento térmico.

#### 7.2.3.a Comportamiento mecánico como función del porcentaje de deformación durante la colaminación.

Como se aprecia en las figuras 6.1 a 6.6 aparentemente las muestras con menor porcentaje de deformación presentan mayor resistencia a la carga, sin embargo en cuanto al esfuerzo que soportan todas las muestras es proporcionalmente idéntico, ya que se debe recordar que las muestras tenían un espesor inicial constante por lo cual las piezas con menor deformación tienen mayor área y por lo tanto una mayor resistencia a la carga en tensión. De lo cual se deduce que el porcentaje de deformación que se aplica durante la obtención del material colaminado no afecta sus propiedades de resistencia.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

En cuanto al desplazamiento se determina que las muestras no presentan un cambio apreciable como función del porcentaje de deformación aplicado durante el proceso de colaminación. De este análisis se concluye que el porcentaje de deformación que se aplica durante la obtención del colaminado, no influye en la resistencia del producto ni en su capacidad de deformación.

### 7.2.3.b Comportamiento mecánico como función de la temperatura de colaminación.

De las figuras 6.1 a 6.6 se determina que la resistencia del material colaminado no es afectada por la temperatura de precalentamiento a la que se realiza el proceso de colaminación. Sin embargo, dicha temperatura sí afecta en la capacidad de deformación, siendo mayor cuando la temperatura de colaminación aumenta.

### 7.2.3.c Comportamiento mecánico como función del tratamiento térmico de recocido.

Se determina que el tratamiento térmico de recocido permite el incremento en la capacidad de deformación del material colaminado y disminuye la resistencia del material. Lo contrario se presenta cuando el material no es sometido al tratamiento térmico posterior al proceso de colaminación.

## 7.3 EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD DEL MATERIAL COMPUESTO.

En esta parte se analiza la capacidad del material para deformarse plásticamente mediante el proceso de embutido, ya que al ser este un material plano, podrá ser aplicado en la producción de perfiles y estampados; siendo el embutido el proceso de conformado plástico más representativo de la capacidad de deformación plástica de productos planos. Las pruebas de embutido fueron realizadas en el material compuesto colaminado y recocido durante una hora, pero con las siguientes variantes:

1. Se analizó la capacidad de deformación que el colaminado ofrece en frío, por lo cual se realizó la prueba a temperatura ambiente.

2. Se analizó el comportamiento a la deformación del colaminado a temperaturas de 200 y 250 °C. La finalidad de evaluar la capacidad de deformación en caliente se justifica, ya que las propiedades superplásticas del zinc se presentan solamente a una temperatura próxima a 0.5Tf.

Como sabemos los materiales superplásticos son aquellos que en deformación muestran una gran capacidad sin llegar a la fractura, y aún, sin que se presente el efecto de reducción de área localizado, es decir la formación de un "cuello".

La aleación eutéctica Zn-Al posee un comportamiento superplástico a elevadas temperaturas bajo ciertas condiciones de deformación y microestructura, a temperatura ambiente ésta misma pierde esas propiedades.

Así mismo durante este ensayo de embutido en caliente se pretende determinar la posibilidad de que el Aluminio depositado como revestimiento presente un efecto de inducción de superplasticidad.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.3.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS.

Las pruebas realizadas para comprobar los efectos explicados en los párrafos anteriores son mostradas en las figuras 6.7 y 6.8. En las cuales analizando el comportamiento del índice de embutido (eje de las ordenadas) respecto del tiempo de aplicación de carga (eje de las abscisas), así como la relación de ambos establece la velocidad de aplicación de carga. El comportamiento de estas curvas se explica a continuación:

Las figuras 6.7 y 6.8 a y b muestran los datos experimentales obtenidos para esta aleación en un rango de temperaturas de 20 a 250 °C y empleando un tamaño de grano inicial promedio de 7.5  $\mu\text{m}$ . Varias muestras fueron ensayadas hasta la fractura bajo condiciones de velocidad constante, las figuras muestran la carga aplicada graficada como una función del tiempo de aplicación de carga, para muestras ensayadas a diferentes tiempos de aplicación de carga. Cada punto corresponde a una probeta diferente y las probetas fueron embutidas hasta la falla. La parte superior de las figuras muestra el índice de embutido obtenido cuando las probetas fueron ensayadas hasta la ruptura mediante el proceso de embutido por el método Erichsen, como una función del tiempo de aplicación de carga.

Al realizar una inspección detallada de las figuras, es posible llegar a conclusiones importantes:

I. Los puntos experimentales de carga contra tiempo de carga no están a lo largo de una curva senoidal por lo que se divide en tres regiones distintas. A bajos tiempos de aplicación de carga la capacidad de embutido es baja (región 1). Por encima de este rango de tiempos de aplicación de carga la capacidad de embutido es razonablemente alta (región 2). Finalmente, a grandes tiempos de aplicación de carga la capacidad de embutido decrece nuevamente (región 3). En resumen, la capacidad de embutido es esencialmente dependiente de la temperatura.

II. Los puntos de la parte superior de las figuras muestran que la capacidad de embutido máxima está asociada con la región 2, tal que el índice de embutido óptimo es logrado dentro de este rango. Siendo la capacidad de deformación en las regiones 1 y 3 más baja; además la capacidad de embutido dentro de la región 2 depende de la temperatura de la prueba tal que un incremento en ésta provoca un aumento significativo en la magnitud de embutido.

III. Cuando la temperatura se incrementa en las pruebas, el punto máximo en la región 2 es desplazado hacia tiempos de aplicación de carga más grandes. Esta tendencia es consecuencia natural de la capacidad de deformación influenciada por efecto del incremento de temperatura, ya que ésta propicia el flujo superplástico del material.

En cuanto a la región 3 se han reportado datos consistentes con varias investigaciones experimentales reportadas para aleaciones superplásticas Zn-22% Al, en las cuales se cuestiona sobre la validación de esta región a niveles de bajos esfuerzos. Estos problemas han sido resueltos y la presencia de la región 3 ha sido confirmada. Sin embargo reportes recientes han demostrado la posibilidad de eliminar la región 3 y extender la región 2 a tiempos de aplicación de carga más grandes, mediante el empleo de aleaciones con bajos niveles de impurezas.

## ANALISIS DE RESULTADOS

### 7.3.2 COMPARACION DE LAS CURVAS A DIFERENTES TEMPERATURAS.

Observando las figuras 6.7 y 6.8 se determina que efectivamente la temperatura favorece el comportamiento superplástico del Zinalco. En el caso del material compuesto se presenta una mayor deformación cuando la temperatura a la que se realiza el embutido es mayor, ya que como se observa se logra una capacidad de embutido aproximadamente del 200% cuando se compara con el embutido logrado en frío.

Es importante notar que durante el embutido en frío no se presenta un cambio significativo en el espesor del colaminado, en forma contraria durante el embutido en caliente el espesor del material colaminado es reducido considerablemente.

En cuanto al efecto de inducción de superplasticidad del Aluminio se determina que dicho efecto no se presenta, ya que el Aluminio se fractura en un porcentaje inferior de embutido que el presentado por el Zinalco, lo cual es evidente en la fotografía 20; en la cual se observa la cascarrilla de Aluminio deformado y fracturado sobre la superficie del Zinalco que presenta mayor capacidad de deformación.

## 8. CONCLUSIONES

Realizadas las actividades experimentales, así como las pruebas y el análisis de resultados obtenidos durante el desarrollo y evaluación de la conformabilidad del material compuesto obtenido por colaminado se concluye lo siguiente:

1.- Se cumplió con el objetivo de lograr la unión del Zinalco como material base con una delgada capa de Aluminio como revestimiento para mejorar el aspecto superficial del Zinalco.

2.- Se estableció el proceso y los parámetros óptimos para lograr la unión más adecuada. Detallados a continuación:

### PREPARACION DEL MATERIAL.

- Limpieza mecánica. Esta es necesaria para eliminar el óxido presente sobre la superficie de las piezas a unir, así como para eliminar suciedad, polvo y agentes externos al material, logrando una superficie rugosa que facilite la unión.

- Limpieza química. Se debe emplear un agente de limpieza que active las superficies a unir. En este caso se recomienda el empleo de acetona durante el proceso de limpieza ultrasónica.

### PARAMETROS DE COLAMINACION DEL MATERIAL.

De acuerdo con las pruebas realizadas se concluye que los parámetros adecuados para lograr una buena unión son los siguientes:

Se ha comprobado que la velocidad de laminación óptima en el proceso de colaminación es del orden de 3 m/min. ya que a esta velocidad el material no sufre fracturas y permite una gran capacidad de deformación.

El porcentaje de deformación durante la colaminación debe ser del 90% diferido en dos o tres pasos de laminación.

La temperatura de precalentamiento debe ser superior a la temperatura crítica del eutéctico del Zinalco (Zn+22% Al) que corresponde a 275 °C.

Se deberá realizar un tratamiento térmico de recocido durante una hora por abajo de la temperatura eutéctico, a fin de propiciar la unión por difusión de los materiales.

3.- Se concluye de las pruebas de desgarre que se logra una mayor resistencia de la unión cuando las piezas son sometidas al tratamiento térmico de recocido después de la colaminación.

4.- Se comprueba mediante el análisis por microscopía electrónica de barrido que se logra el efecto de difusión cuando las piezas son sometidas a tratamiento térmico.

## CONCLUSIONES

Se comprueba en las fotografías que el Zn presenta mayor difusión hacia el Al, siendo la longitud de difusión de 10  $\mu\text{m}$  aproximadamente

5.- Se establece mediante el ensayo de tensión que las piezas recocidas ofrecen mayor ductilidad, pero menor resistencia que cuando no son sometidas al tratamiento térmico.

### EVALUACION DE LA CONFORMABILIDAD.

Durante la realización de la prueba de embutido se han podido comprobar los siguientes aspectos relativos a la conformabilidad del material compuesto Zinalco-Aluminio:

1. El material compuesto presenta una gran capacidad de deformación a alta temperatura, con lo cual se comprueba que tiene un comportamiento superplástico, ya que presenta una capacidad de deformación de aproximadamente el doble que cuando es embutido en frío.

2. Se determina que el material compuesto presenta mejores condiciones de deformación superplástica dentro de un rango muy restringido de velocidades de aplicación de carga.

3. Se comprueba que el material compuesto incrementa su capacidad de deformación cuando la temperatura a la que se realiza la prueba aumenta dentro de un rango determinado.

4. Se determina que en el Aluminio no se presenta el efecto de inducción de superplasticidad, ya que éste no asimila la capacidad de deformación superplástica presentada por el Zinalco, por lo tanto se fractura con menores porcentajes de deformación.

5. Se comprueba la existencia de las tres regiones características de los materiales superplásticos durante el proceso de deformación a diferentes cargas y tiempos de aplicación de carga, así como la indeterminación de la región 3, ya que no es posible hasta este momento explicar el comportamiento que en ella se presenta.

Logrados los objetivos establecidos como premisa de esta investigación (mejorar el aspecto superficial del Zinalco y determinar su capacidad de conformación) se sugiere la aplicación del material compuesto obtenido, en la fabricación de componentes en los que se requiera gran capacidad de deformación acompañada del buen aspecto que presenta el Aluminio. Siendo las áreas posibles de aplicación: en la fabricación de envases, transporte y construcción.

La utilización de este material compuesto Zinalco-Aluminio redundará en la utilización de insumos de origen nacional con el consiguiente beneficio económico para el país, ya que con esto se disminuiría en buen grado el alto consumo de Aluminio de importación y permitiría el consumo de Zinc, del cual México cuenta con grandes reservas.

## BIBLIOGRAFIA

### BIBLIOGRAFIA

- Annual Book of American Society for Testing Materials (A.S.T.M) Standards, designación de la norma E 290-92, " Standard Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials ".
- Annual Book of American Society for Testing Materials (A.S.T.M) Standards, designación de la norma E 643-90, " Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material".
- Benard J. y Michel A., " Metalurgia General ", editorial Hispano Europea, Barcelona.
- C. Chaussin y G. Hilly., " Metalurgia ", tomo 1, aleaciones metálicas, editorial Urmo, Bilbao
- De Garmo E. Paul, " Materiales y Procesos de Fabricación ", editorial Reverté, España.
- Dieter George E., " Metalurgia Mecánica ", editorial Selecciones Gráficas, España.
- Dietz Albert G. H., " Composite Engineering Laminates ", editado por Massachusetts Institute of Technology.
- Forming and forging, Metals Handbook, volumen 14, 3a. edición, editado por American Society for Metals (A.S.M.).
- Higgins Raymond A., " Ingeniería Metalúrgica ", editorial Continental, México.
- Johnson Carl Gurnard, " Metalurgia ", editorial Reverté, Barcelona.
- Mechanical Testing, Metals Handbook, volumen 8, 3a. edición, editado por American Society for Metals (A.S.M.).
- Ortiz Prado Armando, " Apuntes de Conformado de Materiales ", Facultad de Ingeniería U.N.A.M.
- Sydney H. Avner, " Introducción a la Metalurgia Física ", editorial Mc. Graw-Hill.
- Timings Roger Leslie, " Tecnología de la Fabricación ", editado por Representaciones y Servicios de Ingeniería, México.
- Torres Villaseñor Gabriel, " Trabajos de Investigación realizados sobre el Zinalco en el periodo 1979-1990 ", Instituto de Investigación de Materiales U.N.A.M., (Julio 1990).

### Publicaciones:

- Delagi Richard G. " Design with Clad Metals ", editado por Metallurgical Materials Div., Texas Instruments Inc.

## BIBLIOGRAFIA

- Forster James A. y Jha Sunil, " The Processing and Evaluation of Clad Metals ", revista Overview/ Junio 1993.
- Fundidora Falmex S.A., " Zinalco: un nuevo material para la industria ", México 1993.
- Leyva Jose Angel, " Zinalco: casi un acero ", revista Información Científica y Tecnológica/ volumen 9, No. 134, pp 32-35.
- Rosales Jaime, " Zinalco: natura los creó y la U.N.A.M. los juntó ", revista U.N.A.M.-hoy, pp 53-56.
- Skelty James T., " Clad Metals: design for corrosion control and performance ", revista Metal Progress/ Agosto 1983.
- Tecno Industria/ Dic. 1993- Enero 1994, No. 13, editada por CONACYT.
- Torres Villaseñor Gabriel, " La nueva aleación el Zinalco ", revista Innovaciones y Tecnología, pp 43-47.