

96  
2oj.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACION DE LAMINADO CONJUNTO PARA LA  
ELABORACION DE UNIONES  
ACERO INOXIDABLE -- ACERO AL CARBONO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
FELIPE MENDOZA SORIANO  
GABRIEL GOMEZ PEYRET

ASESORES:

ING. JAVIER JIMENEZ GARCIA

M. EN C. ARTURO BARBA PINGARRON



MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

### INTRODUCCIÓN

#### I. MATERIALES COMPUESTOS.

##### I.1. TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS.

I.1.1. LAMINARES.

I.1.2. FIBRAS.

I.1.3. GRANULARES.

I.1.4. DE ESTRUCTURA.

##### I.2. PROCESOS DE UNIÓN.

I.2.1. MÉTODOS DE UNIÓN MECÁNICA.

I.2.2. MÉTODOS DE SOLDADURA.

##### I.3. FACTORES QUE MODIFICAN LA CALIDAD DE LA SOLDADURA.

I.4. SOLDADURA FUERTE Y SOLDADURA SUAVE.

I.5. SOLDADURA DE PLÁSTICOS.

I.6. ADHESIVOS.

I.6.1. HUMIDIFICACIÓN Y ENLACE.

I.6.2. RESISTENCIA DEL ENLACE POR COHESIÓN Y DEL ENLACE INTERFÁSICO.

#### II. ACEROS AL CARBONO, ACEROS INOXIDABLES Y ALUMINIO.

##### II.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS AL CARBONO.

II.1.1. ACEROS CON 0.10 A 0.25% DE C.(ACEROS DE BAJO CARBONO).

II.1.2. ACEROS CON 0.25 A 0.55% DE C.(ACEROS DE MEDIO CARBONO).

II.1.3. ACEROS CON 0.55 A 1.00% DE C.(ACEROS DE ALTO CARBONO).

##### II.2. ESPECIFICACIONES DE ACEROS AL CARBONO.

II.2.1. OTROS ELEMENTOS EN LOS ACEROS AL CARBONO.

II.2.2. PROPIEDADES DE LOS ACEROS AL CARBONO.

**II.3. ACEROS INOXIDABLES.**

**II.3.1. GENERALIDADES.**

**II.3.2. CLASIFICACIÓN.**

II.3.2.1. DESIGNACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES POR SERIE.

II.3.2.2. CLASIFICACIÓN POR SU MICROESTRUCTURA.

**II.3.3. PRECIPITACIÓN DE CARBUROS.**

**II.3.4. CLASIFICACIÓN DE PRODUCTOS DE ACERO INOXIDABLE POR TAMAÑO, FORMA Y ACABADO.**

**II.3.5. SOLDADURA.**

II.3.5.1. SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.

II.3.5.2. SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS.

II.3.5.3. SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS.

**II.3.6. CLASIFICACIÓN DE LOS ELECTRODOS PARA ACERO INOXIDABLE.**

**II.4. ALUMINIO.**

**II.4.1. GENERALIDADES.**

**II.4.2. CLASIFICACIÓN.**

II.4.2.1. SISTEMA DE DESIGNACIÓN DE ALEACIONES FORJADAS.

II.4.2.2. SISTEMA DE DESIGNACIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO COLADO.

II.4.2.3. DESIGNACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO.

**III. TÉCNICAS DE REVESTIMIENTO CON ACEROS INOXIDABLES (CLADDING).**

**III.1. TÉCNICAS DE UNIÓN.**

**III.1.1. TIPOS DE PRODUCTOS.**

- III.1.2. TRATAMIENTO Y FABRICACIÓN.
- III.1.3. USOS Y PROPIEDADES.
- III.2. REVESTIMIENTO DE ACERO INOXIDABLE CON ALUMINIO.
  - III.2.1. TÉCNICAS DE UNIÓN.
  - III.2.2. TRATAMIENTO Y FABRICACIÓN.
  - III.2.3. USOS Y PROPIEDADES.
- III.3. REVESTIMIENTO DE ACERO INOXIDABLE CON COBRE.
  - III.3.1. TÉCNICAS DE UNIÓN.
  - III.3.2. TRATAMIENTO Y FABRICACIÓN.
  - III.3.3. USOS Y PROPIEDADES.

#### IV. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE LAMINADO.

- IV.1. LAMINADO EN CALIENTE.
  - IV.1.1. CAMBIOS DE TEMPERATURA DURANTE LA DEFORMACIÓN.
  - IV.1.2. CAMBIOS DE TEMPERATURA DURANTE EL LAMINADO.
  - IV.1.3. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA.
  - IV.1.4. EFECTO COMBINADO DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN.
- IV.2. EFECTO DE LAS VARIABLES DE LAMINACIÓN EN LA MICROESTRUCTURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.
  - IV.2.1. PROCESOS DE RESTAURACIÓN.
  - IV.2.2. PROCESOS DE RESTAURACIÓN DINÁMICOS.
    - IV.2.2.1. RECUPERACIÓN DINÁMICA.
    - IV.2.2.2. RECRISTALIZACIÓN DINÁMICA.
- IV.3. PROCESOS DE RESTAURACIÓN ESTÁTICOS.
  - IV.3.1. RECUPERACIÓN ESTÁTICA.
  - IV.3.2. RECRISTALIZACIÓN ESTÁTICA.

#### V. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

- V.1. MATERIAL EMPLEADO.
- V.2. EQUIPO.
- V.3. TÉCNICA EXPERIMENTAL.

**VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

**VII. CONCLUSIONES.**

**ANEXO A. PROGRAMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

**ANEXO B. DATOS ESTADÍSTICOS.**

**ANEXO C. EVALUACIÓN DE REVESTIMIENTOS.**

**ANEXO D. PROPIEDADES DE ACEROS INOXIDABLES.**

**BIBLIOGRAFÍA.**

## INTRODUCCION.

Los materiales compuestos se producen cuando dos o más materiales se unen para lograr una combinación de las propiedades de los mismos obteniendo propiedades superadas. Estos materiales pueden seleccionarse para proporcionar combinaciones que mejoren características como rigidez, resistencia, resistencia a la corrosión, conductividad, etc., y/o costo. Así pues las propiedades que exhiben los materiales compuestos están fuertemente influenciadas por las de los constituyentes individuales, sus cantidades respectivas, su forma, su forma de unión, orientación y distribución.

Dentro de los materiales compuestos están los materiales compuestos laminares que se emplean en volumen creciente y en una variedad de campos cada vez más diversa.

En el caso de los metales, es común el revestimiento de un material de alta aleación, y generalmente caro, con un acero al carbono de baja aleación. El producto de esta unión es equivalente al del metal de revestimiento macizo, sin embargo, resulta aproximadamente un tercio más económico.

Se emplean diferentes métodos de unión para que ésta sea fuerte y permanente, como recubrimientos electrolíticos o para usos más severos se pueden usar métodos como el de revestimiento por soldadura, laminado conjunto o el de vaciado de fundición.

En particular nosotros desarrollamos un método de unión por laminación conjunta, que consiste en la aplicación simultánea de carga y temperatura en un proceso de laminación.

Los materiales elegidos para la experimentación fueron los siguientes acero inoxidable AISI 304, un acero de bajo carbono, y aluminio, los cuales se introdujeron a una máquina laminadora constituyendo un paquete que previamente fue preparado, ensamblado y calentado, para lograr la unión con un determinado porcentaje y velocidad de laminación. Dicha unión fue evaluada por medio de microscopía óptica y electrónica, ensayos de combado y tracción.

Encontrándose así, un método que nos permite lograr la unión de manera permanente por medio de laminación conjunta a bajas temperaturas. Al mismo tiempo estamos proporcionando los resultados de nuestra experimentación de donde proponemos una serie de parámetros del proceso como mejor opción de rango de operación y hacemos comentarios respecto a los efectos de la variación de estos.

Existe toda una gama de combinaciones de materiales que pueden ser utilizadas para crear materiales compuestos laminares colaminados, por ejemplo, cobre, aceros al carbono, aluminio, níquel, aceros inoxidables, titanio, oro, etc., conjuntos que pueden ser muy apropiados para múltiples aplicaciones en diversos campos y equipos tales como barcos, utensilios domésticos e instalaciones de cocina, recipientes a presión, ornamentación arquitectónica, evaporadores, termostatos, fabricación de equipo para la industria farmacéutica y de alimentos, calderas, etc.

En razón de todo lo anteriormente mencionado, consideramos justificable tanto desde el punto de vista económico como estratégico, el desarrollo de técnicas de laminado conjunto para diferentes combinaciones de aleaciones, con el fin de integrar la tecnología necesaria para su fabricación en el país, campo aún incipiente.



## CAPITULO UNO

## I. MATERIALES COMPUESTOS.

Los materiales utilizados en ingeniería (ya sean elementos o compuestos químicos), que constituyen una fase sólida, generalmente no están en estado puro; por ejemplo, como se ha hecho en los metales, estos se utilizan aleados con otros elementos; ejemplo de ello son los aceros que contienen carbono. También se encuentran los cerámicos que están constituidos por una gran variedad de componentes. Es decir que, de modo general, los materiales tecnológicos están constituidos por varias fases.

La disposición, la composición y el tamaño de las diferentes fases constituyentes del sólido, son los factores que determinan sus propiedades.

Los materiales compuestos se han utilizado desde los inicios de la civilización, como por ejemplo la mezcla de paja y arcilla; los materiales compuestos son los que se fabrican con dos o más materiales diferentes, a fin de asegurar la combinación óptima de las propiedades de los constituyentes. La aplicación práctica de nuevos materiales compuestos se relaciona directamente con los problemas de diseño en ingeniería.

### I.1. TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS.

La definición de los materiales compuestos no puede hacerse de forma precisa por existir un factor de escala, ya que en realidad todos los materiales están compuestos, por ejemplo de partículas atómicas, de átomos o iones; de moléculas o cristales; de constituyentes microscópicos con apariencia homogénea; o de diferentes sólidos acopiados formando estructuras heterogéneas perfectamente diferenciables. Sin embargo un aspecto general de los materiales compuestos nos permite identificarlos, ya que son combinaciones de materiales que difieren en composición o forma

manteniendo sus propiedades individuales aún cuando están unidos. De dicha unión el material compuesto posee nuevas características aportadas por las propiedades de los materiales unidos como por ejemplo, resistencia a la corrosión, mayor resistencia mecánica, etc.

Ejemplos de materiales compuestos naturales son madera y las rocas sedimentarias. Entre los artificiales el hormigón armado, el acilad y los plásticos laminados.

Una clasificación de los materiales compuestos que se sigue frecuentemente es la siguiente:

*Laminares* .- Estan constituidos por distintas capas de materiales.

*Fibrosos* .- Estos estan compuestos de fibras, generalmente embebidas en una matriz.

*Granulares* .- Estan formados por particulas dispersas en una matriz.

*De estructura* .- Estan constituidos por un esqueleto resistente, complementado por uno o más materiales adicionales.

### I.1.1. LAMINARES.

Los materiales compuestos laminares, se usan desde tiempos remotos. La madera en forma de triplay se conocía desde hace más de veinte siglos, y con varias láminas metálicas se conformaban armas y armaduras. Actualmente existen muchos tipos de materiales

industriales que se fabrican uniendo láminas, para conseguir diferentes objetivos, como mejores propiedades mecánicas, mayor resistencia con menor peso, menor deformabilidad, aislamiento térmico, obtención de formas resistentes al desgaste o a la corrosión, etc.

Entre los materiales laminados se encuentran:

#### MADERAS CONTRACHAPEADAS (TRIPLAY).

Se forman con varias láminas de madera, adheridas entre sí. Se obtienen estas láminas de troncos cilíndricos, haciéndolos girar sobre su propio eje, mientras una cuchilla va cortando en toda la longitud a lo largo de una generatriz. Estas láminas son más resistentes en el sentido de las fibras, y se solapan cruzando sus fibras a 45 o 90 grados, utilizando distintos adhesivos. Cuando se usan para ornamentación, las capas exteriores de estos tableros son de maderas más finas.

Las maderas mejoradas utilizan como elemento de unión baquelita sin que está solidifique totalmente, impregnándola y distribuyéndola entre las láminas de madera en cantidad suficiente efectuando la presión, en caliente, para un posterior secado y endurecimiento.

#### METALES PLAQUEADOS.

Los materiales más utilizados con este proceso son las aleaciones de aluminio de alta resistencia mecánica, como son Al-Cu y Al-Zn. Estas aleaciones debido a la presencia de átomos metálicos diferentes favorecen la corrosión electroquímica. Para lograr una mayor resistencia a la oxidación, se recubren las superficies de estas aleaciones con láminas de aluminio puro, que soportan mucho mejor los procesos de corrosión. Este tipo de materiales se utiliza en la fabricación de aviones.

Este mismo proceso se sigue con otros metales y aleaciones disponiendo en las capas exteriores los materiales resistentes, y que además sean anódicos respecto al metal del núcleo para que, en caso de que se produzcan rayaduras o fisuras de la capa exterior continúe el núcleo protegido. Los aceros inoxidables, el níquel y sus aleaciones, se utilizan para recubrir aceros al carbono, dándoles resistencia a la corrosión. En otros casos, en la industria química y de alimentación, calderas de agua y aplicaciones similares, se revisten los materiales con cerámicos o polímeros orgánicos, resistentes a agentes químicos.

#### BIMETALES.

Los fenómenos que tienen lugar en la utilización de dos metales con diferentes coeficientes de dilatación, en una misma lámina, se puede utilizar en muchos procesos en los que se producen variaciones de temperatura. Una lámina de este material se deforma acorde con dichas variaciones, dando lugar a flexión, alargamientos o giros, lo cual permite utilizarlas en multitud de usos, corte de circuitos eléctricos, control de posición, actuando como termostatos o autorregulando diferentes mecanismos.

#### LAMINADOS DE VIDRIO Y PLASTICOS.

Los vidrios ordinarios son frágiles y se puede aumentar su resistencia al impacto por un tratamiento térmico superficial. La resistencia al impacto se mejora notablemente empleando los vidrios <<triplex>>, constituidos por dos láminas exteriores de vidrio, unidas firmemente a una lámina central de un polímero orgánico (acetato de celulosa o butirato de polivinilo). Estos vidrios de seguridad soportan mucho más la penetración por impacto y en caso de rotura de alguna de las láminas de vidrio, esta no se desprende en trozos, quedando adheridos a la lámina central.

En esta técnica, usando capas de tejidos de vidrios o de nylon, con resinas sintéticas, se logran laminados que, en comparación con el acero, tendrán igual peso pero que serán superiores en la resistencia al impacto, utilizándose en la defensa de personas contra proyectiles.

### I.1.2. FIBRAS.

En la TABLA I.1. se presentan algunas propiedades de varios tipos de fibras y su relación con la densidad, propiedad muy significativa en aplicaciones aeronáuticas y espaciales donde el peso tiene tanta importancia.

TABLA I.1.

| Fibras             | Densidad           | Punto de fusión | Resistencia a tracción | Módulo elástico       |
|--------------------|--------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|
|                    | gr/cm <sup>3</sup> | °C              | kg/mm <sup>2</sup>     | Kg/mm <sup>2</sup> E3 |
| Silice fundida     | 2.20               | 1,927           | 700                    | 7.0                   |
| Vidrios            | 2.49               | 1,649           | 490                    | 8.8                   |
| Vidrio E           | 2.55               | 1,319           | 350                    | 7.4                   |
| Carbono            | 1.40               | 3,704           | 175                    | 20.0                  |
| Grafito            | 1.40               | 3,649           | 175                    | 25.9                  |
| Berilio            | 1.84               | 1,280           | 175                    | 30.8                  |
| Poliáamida         | 1.14               | 250             | 84                     | 0.3                   |
| Asbesto            | 2.50               | 1,921           | 140                    | 17.5                  |
| Acero              | 7.87               | 1,604           | 420                    | 21.0                  |
| Poliéster          | 1.40               | 250             | 70                     | 0.4                   |
| Carburo de berilio | 2.44               | 2,093           | 105                    | 31.5                  |
| Titanio            | 4.72               | 1,820           | 198                    | 11.7                  |
| Aluminio           | 2.70               | 660             | 63                     | 7.4                   |
| Volframio          | 19.30              | 3,410           | 434                    | 40.6                  |
| Alúmina            | 3.97               | 2,082           | 70                     | 53.2                  |
| Molibdeno          | 10.20              | 2,625           | 140                    | 36.4                  |
| Tántalo            | 16.60              | 2,997           | 63                     | 19.6                  |

Fuente: ADVANCED COMPOSITES FOR STRUCTURES G.P. PETERSON J. OF AIRCRAFT.

Se acostumbra utilizar estas fibras monocristalinas embebidas en una matriz, que normalmente es menos resistente, de bajo módulo elástico y de menor densidad. Se obtienen, así materiales compuestos, que dan lugar a productos con mayor resistencia y rigidez que la que tienen los componentes aislados.

La producción de estas fibras, está presentando un incremento muy grande, con lo cual bajan fuertemente sus precios, que inicialmente eran muy elevados.

La disposición de las fibras puede ser orientada, es decir situada en posiciones paralelas, o distribuidas arbitrariamente, formando en el primer caso materiales con propiedades diferentes en las distintas direcciones teniendo su mayor resistencia en la dirección longitudinal, mientras que en la transversal la resistencia es la de la matriz, o bien constituyendo materiales casi isotrópicos. Es frecuente utilizar las fibras formando previamente un tejido, en cuyo caso los materiales que se obtienen son ortotrópicos.

Las fibras más empleadas son las de vidrio, sueltas o en forma de tejidos, mientras que las matrices más frecuentemente usadas son polímeros orgánicos, poliésteres, fenólicos y epoxi. Por ello, sus temperaturas de uso están limitadas a las temperaturas de degradación de estas resinas sintéticas. Para trabajos a mayores temperaturas se utilizan fibras de sílice, grafito, alúmina y metálicas, en matrices de metales como aluminio, plata y aleaciones de wolframio.

### I.1.3. GRANULARES.

Este grupo de materiales es el más frecuente, siendo un ejemplo típico el concreto, compuesto por partículas cerámicas embebidas en una matriz también cerámica.

## METAL EN METAL.

La adición de plomo al acero, permite un mejor mecanizado dando lugar a virutas cortas que se eliminan fácilmente. Metales de punto de fusión alto, manifiestan a la temperatura ambiente una gran fragilidad; embebiendo partículas de estos metales, wolframio, molibdeno, en una matriz de un metal más ductil, cosa que puede lograrse por sinterización o por adición a la matriz fundida de las partículas de metal, se mejoran las propiedades de ambos.

## METALES Y CERAMICOS.

Son usados en la protección de algunos metales. Se usan también incluyendo partículas de cerámicos en matrices metálicas, obteniéndose materiales muy variados. Herramientas de corte y matrices para hilera de trefilar, se fabrican con carburos de wolframio embebido en matriz de cobalto. Piezas que trabajan a altas temperaturas, como partes de turbinas, se fabrican con carburo de titanio en matriz de níquel. Oxido de uranio, y carburo de boro, con matriz de aceros al cromo-níquel, se emplean también en equipos de control de centrales nucleares.

Los óxidos metálicos, y metales se asocian, siendo uno u otro la matriz, fabricándose con ellos herramientas de corte, elementos de fuerza a altas temperaturas, protecciones de termopares y piezas sometidas a procesos de erosión a temperaturas elevadas.

## METALES EN PLASTICOS.

Se encuentran en este grupo los materiales obtenidos por adiciones de metales pulverizados sobre polimeros orgánicos,



obteniéndose características que normalmente no poseen estos, tales como conductividad eléctrica (cobre sobre resina epoxi), absorción de sonido o de radiaciones (plomo), moldes de plástico a los que se confiere conductividad térmica y mayor dureza por adición de polvos de hierro y cojinetes de teflón con inclusiones metálicas que también mejoran su conductibilidad térmica, disminuye su dilatación y se reduce además el desgaste.

#### INORGANICOS-ORGANICOS.

Un ejemplo de material compuesto, aunque no resistente, es de los propulsores sólidos de tipo compuesto formados por materiales oxidantes (percloratos) y reductores (polvo de aluminio y polimeros orgánicos). Estos materiales propulsores asocian, en una matriz orgánica, elastómeros polifusores o poliuretanos, partículas inorgánicas del oxidante y del aluminio. Este propulsor está compuesto por un 75% de partículas y un 25% de matriz.

#### I.1.4. DE ESTRUCTURA.

Se incluyen por último en este grupo, los materiales compuestos constituidos por un esqueleto o estructura de algunos materiales, asociados con otros, que bien completan y llenan los volúmenes abiertos, o bien actúan como elementos de unión. Los materiales que conforman la estructura pueden ser cualquier sólido apropiado, y el material de relleno muchas veces es fluido solidificándose, después de aplicado, por procesos químicos (polimerización) o físicos (enfriamiento o evaporación del disolvente).

Se pueden obtener así materiales porosos (esqueleto) en los

que se embeben líquidos (aceites) o sólidos de baja fricción, que les dan propiedades lubricantes. En otros casos, puede corregirse la porosidad de las piezas fundidas, por adición de resinas, o mejorar su estabilidad a altas temperaturas, o sus características eléctricas.

Ejemplos de estos materiales son los constituidos por telas metálicas embebidas en ácidos, y en aviación las estructuras formadas por láminas plegadas y soldadas, formando estructuras regulares, constituyendo un conjunto de prismas de lados comunes.

La forma más frecuente es la hexagonal, constituyendo el llamado panal de abeja (honeycomb), formado por láminas metálicas de aluminio o acero inoxidable, que se cortan con la forma deseada y se unen con adhesivos especiales, a los revestimientos exteriores. Se fabrican así superficies sustentadoras, aletas de mando, registros y elementos estructurales, en los que todo el volumen interior está ocupado por el panal, que solamente requiere el revestimiento para quedar terminado.

Estos procesos requieren técnicas especiales, pues el trabajo ha de realizarse con toda exactitud y las piezas deben estar absolutamente limpias de impurezas para que los adhesivos logren las características mecánicas exigidas a las mismas. El curado es decir, la polimerización del adhesivo debe hacerse manteniendo las piezas a presión, cosa que se logra situándolas en camas apropiadas y disponiendo una manta y a un ciclo de temperaturas conveniente para lograr la completa polimerización y curado del adhesivo. (1)

## 1.2. PROCESOS DE UNION.

Casi todas las estructuras de ingeniería se construyen de diversas partes que tienen que unirse para constituirse en

unidades. Los metales, las maderas, las piedras, la cerámica, los plásticos y los cauchos se encuentran entre los materiales más usados en la construcción, y para poderlos utilizar en forma eficaz, deben unirse mediante varios procesos.

Dichos materiales de construcción pueden unirse mediante medios mecánicos y soldadura, de diversos tipos.

### 1.2.1. METODOS DE UNION MECANICA.

Los métodos de unión mecánica consisten en la remachadura y el apernado o atornillado; se limita a materiales, principalmente metales y madera, que deben perforarse o agujerarse sin llegar al agrietamiento. Los métodos de unión mecánicos tienen muchas desventajas, como la necesidad de agujeros que disminuyen la resistencia inherente del material, e incrementan la tendencia a la corrosión por hendiduras. Por estas razones, los metales se unen, siempre que es posible, mediante soldadura.

### 1.2.2. METODOS DE SOLDADURA.

La soldadura consiste en la unión íntima de dos partes de material mediante el calentamiento de éstas hasta que se alcanza un estado plástico o de fusión, con aplicación de presión mecánica o sin ella. La soldadura se aplica predominantemente para unir partes del mismo metal, y algunas veces se utiliza para unir metales diferentes. Todos los procesos de soldadura de metal se pueden dividir en métodos de soldadura por fusión y a presión. En casi todos ellos es necesario el calentamiento, y sólo en unos cuantos procesos comerciales se usa la soldadura en frío, con presión únicamente. La generación de calor para la soldadura se puede obtener a partir de medios eléctricos, químicos o mecánicos,

y en consecuencia, numerosos procesos de soldadura se clasifican en esta forma. El problema fundamental de la soldadura es simplemente la eliminación del gas absorbido y las capas de óxido, de las superficies por unir, a fin de obtener un contacto directo entre las superficies de las partes unidas. Constantemente se crean nuevos procesos de soldadura para aplicación industrial específica, a fin de obtener propiedades mejoradas en las uniones de soldadura, una mejor apariencia, así como acelerar el proceso de soldadura y reducir costos.

#### SOLDADURA POR PRESION.

La soldadura por presión, conocida frecuentemente como soldadura de fase sólida, es esencialmente un proceso de unión de piezas metálicas que han sido calentadas, en el área por unir, hasta alcanzar un estado sumamente plástico, de tal modo que se forme una unión completa después de la aplicación de presión o martilleo. La acción combinada del calentamiento y la presión produce deformación plástica extensa en las superficies del metal. Esto conduce a la rotura o agrietamiento de las capas de óxido presentes en la superficie del metal, con lo que se logra que las partes del metal queden en contacto íntimo. De este modo, se facilita la difusión de los átomos de una superficie metálica a otra; aún más, el enlace entre éstos puede ser tan fuerte como el metal original. En todos los casos es importante que las dos superficies que se van a unir estén limpias y libres de cualquier impureza externa.

Los procesos de soldadura por presión más utilizados son la soldadura por forja y la soldadura por resistencia. La soldadura por forja de tipo simple se puede representar mediante el conocido método de herrería que consiste en unir los metales mediante

martillado con cambios de temperatura, pero en la actualidad se utilizan más bien máquinas especiales que ejercen una presión constante. La soldadura por resistencia entrafía el calentamiento de las superficies del metal por unir, mediante el paso de corriente eléctrica a través de éstas. Esto se logra mediante presión mecánica, lo cual produce la unión directa de las dos partes.

Si la soldadura por presión se lleva a efecto a temperaturas bajas, se conoce como soldadura en frío. Para esto es necesario una deformación muy grande y presiones muy elevadas, hasta romper las capas de óxido. Sin embargo, no entrafía gran transferencia de materia en la interfase. La liga resulta de la interacción de las fuerzas atómicas de los metales. Los nuevos progresos en la soldadura de fase sólida son la soldadura por fricción, la soldadura de alta energía (soldadura por explosión), la soldadura ultrasónica y el enlace por difusión.

En los procesos de soldadura por fricción las piezas trabajadas se unen bajo la acción de carga, y una parte gira contra la otra, de tal modo que se genera calor por fricción en la interfase. En la soldadura ultrasónica, dos piezas metálicas se empalman entre un yunque y una varilla o sonda que emite las vibraciones, conocida como sonotrodo. Con ello se logra una vibración lateral, que produce un deslizamiento local entre las superficies empalmadas, lo que desintegra las capas superficiales empalmadas y eleva la temperatura. La mayor utilidad de la soldadura ultrasónica consiste en su capacidad de unir materiales muy delgados con pequeñas deformaciones, y baja entrada o aporte de energía. La soldadura explosiva suele lograrse mediante la detonación de una carga explosiva. En ella surge una deformación plástica considerable en la zona inmediata a la superficie de empalme, lo que incrementa en forma extraordinaria la dureza de la interfase, en comparación con la del metal original.

En la liga por difusión, una capa delgada de otro metal se coloca entre las dos partes de metal por unir. En vista de que los átomos extraños se difunden con mayor facilidad que los átomos de metales iguales, los átomos de la capa se difundirán en las dos superficies, de tal modo que, al final, la unión no presentará signo alguno de la capa intermedia. Otra modificación de los procesos de unión por difusión, es la de asegurar la unión y tratar el ensamble en forma térmica, de tal modo que el metal de ensamble se difunda dentro del metal original. La soldadura por difusión se utiliza principalmente en metales nobles con atmósfera protectora y a temperaturas elevadas.

#### SOLDADURA POR FUSION.

La soldadura por fusión se logra mediante la fusión del metal, para efectuar la unión deseada entre dos piezas. Para producir una unión fuerte, el metal líquido debe primero humedecer la superficie del metal sólido. Se logra una buena humidificación si el metal líquido y el sólido presentan solubilidad mutua, o forman compuestos intermetálicos. El metal fundido generalmente se obtiene como depósito de una fuente externa, conocida como varilla de soldadura o varilla de resello, aunque en algunos casos, las superficies simplemente se funden para formar la unión. La soldadura por fusión se ha logrado mediante métodos seleccionados según las características metalúrgicas y químicas del metal que se va a unir, las propiedades necesarias en la soldadura, las condiciones específicas de la pieza en cuestión. Estos métodos consisten en la soldadura de gas y la soldadura eléctrica. En la primera, ocasionalmente se emplea una flama de oxiacetileno, que puede ser de carácter neutro, oxidante o reductor, lo que depende de las proporciones de acetileno y el aire, o del oxígeno a utilizar. Esto a su vez, depende del tipo de metal que se soldará.

y en general, se utiliza mucho una flama neutra. Se agrega un metal adicional a la varilla de soldadura, pero no se utilizan fundentes.

Los métodos de soldadura por arco eléctrico incluyen la soldadura por arco de carbono, la soldadura de hidrógeno atómico, la soldadura de arco inerte, y la soldadura de arco múltiple. Un arco eléctrico se coloca entre un electrodo de carbono o de metal, y del material que se va a soldar. El calor intenso del arco produce la fusión de la base metálica, en el caso de que se necesite una cantidad adicional de metal para la soldadura. Prácticamente toda la soldadura con el arco metálico se realiza con el arco cubierto o protegido, en el cual el electrodo metálico se cubre con una capa espesa de ingredientes fundentes. El efecto de pantalla se debe a los ingredientes fundentes, los cuales funden y forman una cubierta de escoria sobre la soldadura, con lo que se protege el metal fundido, del aire.

Para metales reactivos se utiliza la soldadura por arco inerte, multiarco, e hidrógeno atómico. En la soldadura de arco inerte, se utiliza un electrodo de tungsteno o de carbono. El gas inerte, ya sea helio o argón, se suministra mediante una manguera que rodea al electrodo en la cabeza del soplete, y protege en forma completa el arco y el depósito de metal fundido del contacto con la atmósfera. En la soldadura por hidrógeno atómico, una corriente de hidrógeno pasa a través del arco que se encuentra entre dos electrodos de tungsteno. El calor intenso descompone el hidrógeno molecular en hidrógeno atómico, que se combina con la superficie del metal que se va a soldar, y produce la misma cantidad de calor que se absorba durante la disociación. Este método se utiliza mucho para evitar la oxidación de la soldadura del aluminio.

La soldadura de arco inerte, es aquella en la cual un gas es ionizado cuando pasa a través del arco eléctrico y choca con la

superficie que se va a unir. Se generan temperaturas muy elevadas, lo que produce una soldadura rápida de las dos partes.

Un progreso reciente de la soldadura por fusión es el emplear energía de radiación, como la soldadura laser y por haz de electrones. El carácter esencial de estos procesos consiste en que la energía radiante se concentra en la pieza que se trabaja, y el calor es generado sólo cuando se intercepta el haz concentrado. Esto aminora la posibilidad de deformación, y hace que la soldadura tenga mejores propiedades. Con este método, es posible la utilización del haz de radiación para perforar huecos muy finos en los diamantes y otros materiales muy duros. Las superficies sumamente reflectoras no se sueldan fácilmente. En la soldaduras por haz de electrones, la energía se suministra por el impacto de un haz concentrado de electrones. El hacer las operaciones en el vacío es una ventaja adicional cuando los metales que se buscan soldar son sensibles a la contaminación por la atmósfera.

### I.3. FACTORES QUE MODIFICAN LA CALIDAD DE LA SOLDADURA.

Los procesos que ocurren durante la soldadura son esencialmente iguales a los que se llevan a efecto en la fundición y solidificación de metales en las operaciones de fundición normales. En consecuencia, los metales soldados están sometidos a cambios metalúrgicos como el tratamiento térmico y las transformaciones de fase. Sin embargo, una característica común de todas las soldaduras por fusión es que el depósito de soldadura consiste en el metal colado, mientras que el metal que sirve de base es maleable en la mayor parte de los casos. En el depósito de soldadura, el metal colado se enfría en forma muy rápida desde una temperatura por encima del punto de fusión, hasta otra por debajo del calentamiento extremo. Esto se debe a que un volumen pequeño del metal en una gota cae sobre una masa grande de metal frío. La



microestructura de la soldadura se enfría rápidamente y adquiere un tamaño de grano más fino que el del metal original. La microestructura varía con los métodos de soldadura utilizados. Por ejemplo, en la soldadura por gas, el enfriamiento es menos rápido que en la soldadura por arco y, por consiguiente, el depósito es de grano más grueso en la primera que en la segunda. Los microconstituyentes están dispersos de modo más uniforme en las soldaduras por arco, lo cual produce, en general, soldaduras más resistentes que las soldaduras por gas. Los orígenes posibles de los defectos de la soldadura son los gases atrapados o retenidos y las inclusiones no metálicas como los óxidos, los cuales disminuyen la resistencia de la soldadura.

Otros factores que alteran la calidad de la soldadura son de naturaleza física. Como resultado de los cambios rápidos de la temperatura en la parte soldada, puede ocurrir la contracción y expansión de la soldadura y del metal original, lo que puede causar la deformación o combadura del metal soldado, o incluso producir un agrietamiento de las soldaduras. Siempre que se coloca una gota de metal, la soldadura y el metal original adyacente están sometidos a cambios de temperatura que no son uniformes, y que conducen a esfuerzos residuales en el conjunto de partes soldadas. A menos que se tomen precauciones especiales, dichos esfuerzos residuales siempre estarán presentes y pueden ser muy grandes para una sección transversal mayor de 1/2", o para combinaciones de secciones gruesas o delgadas, y pueden producir el desarrollo de grietas en la fabricación o en la utilización del material. El riesgo de agrietamiento aumenta con la dimensión de la estructura soldada. Siempre que es posible, se utiliza un recocido apropiado para eliminar los esfuerzos residuales en la parte soldada.

Como resultado de la soldadura, también se calienta a temperatura elevada el metal original adyacente a la parte

soldada. El calentamiento puede entrañar cambios metalúrgicos del metal original, como la precipitación de carburos de cromo en la parte soldada de acero inoxidable austenítico, o producir el reblandecimiento de un material previamente trabajado en frío, o la precipitación de una aleación endurecible. El efecto de reblandamiento puede variar, lo que depende de la conductividad térmica de los metales utilizados, pero suele aminorar la resistencia de cualquier metal endurecido, al nivel del material recocido básico. Esto demuestra que la soldadura nunca puede tener una resistencia mayor que la del metal original recocido.

#### I.4. SOLDADURA FUERTE Y SOLDADURA SUAVE.

La soldadura fuerte y la soldadura débil (o suave) son procesos de unión de metales en los cuales se utiliza otro metal o aleación que posee un punto de fusión considerablemente menor al del metal que se va a unir. En la soldadura fuerte se utilizan mucho las aleaciones de cobre o de plata; en la soldadura suave se utilizan aleaciones de baja fusión, de estaño y de plomo. El primer tipo de soldadura se utiliza a temperaturas por encima de 535°C, pero siempre son temperaturas menores a las del punto de fusión del metal que se va a unir. La soldadura suave difiere de la fuerte en que el metal fundido que se introduce tiene un punto de reblandecimiento mucho menor que el de la aleación de soldadura fuerte. Las soldaduras suaves suelen ser aleaciones de plomo y estaño de composición variable, pero se emplean con mayor frecuencia composiciones de 50% de cada uno y de 60 ó 40% de plomo y estaño.

Los factores esenciales para obtener buenas uniones en la soldadura fuerte o en la suave, son un diseño apropiado de la junta, la preparación de las superficies de la junta, fundentes, ensamblado, el calentamiento y la limpieza final. En vista de que

no existe la fusión del metal original, la aleación de la soldadura fuerte se funde mediante el flujo entre las superficies calentadas de los miembros de la junta, o es fundida entre dichas superficies. Las superficies limpias son esenciales para proporcionar la adhesión de la soldadura fuerte al metal original. Esta adhesión se obtiene utilizando fundente que disuelve la capa de óxido de la superficie metálica y al mismo tiempo evita la oxidación del metal de precalentamiento. Los fundentes deben tener un punto de fusión menor que el de la aleación de soldadura fuerte, para que humedezca y limpie fácilmente la superficie antes de que se aplique la aleación de soldadura fuerte fundida. Los fundentes pueden ser ácidos o compuestos que se descomponen en sustancias ácidas que corroen el metal que se va a unir. Los fundentes de la soldadura fuerte suelen ser mezclas de bórax y ácido bórico, o de bórax con un agregado de cloruro de cinc.

#### I.5. SOLDADURA DE PLÁSTICOS.

Sólo los termoplásticos se pueden soldar, pero la técnica de la soldadura es bastante diferente de la de los metales, debido a la baja resistencia térmica de los plásticos en comparación de los metales. La soldadura es especialmente útil en caso de plásticos como el polietileno, y los polifluorocarburos, que son difíciles de unir mediante adhesivos.

Con mayor frecuencia la soldadura se lleva a cabo mediante el calentamiento del material de 190 a 260°C, lo que depende de la estabilidad térmica del plástico; por medios eléctricos o de combustión en algunos casos, produciéndose así su fusión y en algunos casos agregando material fundido de aporte, llevando una fusión directa entre la superficie y la soldadura.

Entre otras técnicas para soldar, la que se ha utilizado en

forma reciente es la soldadura ultrasónica, que facilita la unión entre plásticos y metales. El calor necesario se genera mediante la fricción que resulta de la vibración de una superficie contra la otra. Los plásticos más rígidos como el ABS, se adaptan mejor a la soldadura ultrasónica, que los más blandos. La soldadura por rotación o fricción es la más adecuada para unir partes termoplásticas de formas circulares, que giran entre sí en forma encontrada, hasta que el calor resultante de la fricción produce la fundición de las superficies en rozamiento.

## I.6. ADHESIVOS.

Una junta adhesiva consiste de dos materiales sólidos (adherentes) unidos mediante una capa delgada de un adhesivo. El adhesivo se puede definir como cualquier substancia capaz de conservar los materiales unidos mediante la adhesión de sus superficies. La ventaja que tienen los adhesivos en comparación con otros métodos de unión, radica en que estos se pueden aplicar a superficies de cualquier material, con lo que se pueden unir materiales como: vidrio con metal, metal con metal, metal con plástico, cerámicos con cerámicos, etc. Los elementos que se unen mediante adhesivos están prácticamente libres de cualquier esfuerzo residual. Una desventaja importante de los adhesivos es que, debido a que la mayoría de estos materiales son orgánicos, no se pueden utilizar a temperaturas elevadas, y su resistencia disminuye en forma rápida conforme aumenta la temperatura.

### I.6.1. HUMIDIFICACION Y ENLACE.

En vista de que las superficies sólidas reales tienen muchas irregularidades, el área superficial verdadera es mucho mayor que

el área superficial aparente y, en forma subsecuente, la acción de la adhesión debe ser mucho mayor que la calculada para el área aparente. Sin embargo, la principal dificultad radica en llenar en forma completa todos los poros en la superficie adherente, de tal modo que no exista bolsa de aire o vacíos entre la superficie del sólido y el adhesivo. Para lograr esto el adhesivo líquido debe penetrar en todos los poros y hendiduras, y eliminar las bolsas de aire de tal modo que se produzca un enlace homogéneo entre las superficies de adhesión y el adhesivo. Para obtener una buena humidificación, el ángulo de contacto entre el adhesivo líquido y el adherente sólido, debe ser tan pequeño como sea posible, y la viscosidad del adhesivo durante su aplicación debe ser baja, para hacer que fluya fácilmente por los poros y hendiduras.

En ausencia de presión externa, la fuerza impulsora que produce la humidificación es la presión capilar del adhesivo líquido de los poros e intersticios de la superficie adherente. Mientras la humidificación disminuye, aumenta la tendencia a la formación de bolsas de aire en las interfases de adhesivo y adherente. Estas bolsas de aire funcionan como elementos que incrementan la concentración de esfuerzos, lo que menoscaba la resistencia de la unión.

#### I.6.2. RESISTENCIA DEL ENLACE POR COHESION Y DEL ENLACE INTERFASICO.

El funcionamiento de un adhesivo depende de la resistencia del enlace cohesivo, y de la resistencia del enlace interfásico entre el adhesivo y la superficie adherente. La resistencia cohesiva es la resistencia del adhesivo completo, y no es alterada por factores de la interfase. Si el adhesivo humidifica por completo la superficie adherente, las fuerzas intermoleculares de

la interfase son lo suficientemente fuertes para que ocurra una falla dentro del adhesivo, y no en la interfase del adhesivo y el adherente. En este caso, la resistencia de una junta adhesiva será la del enlace cohesivo, del adhesivo mismo. La resistencia del enlace interfásico depende de la capacidad del adhesivo para humidificar la superficie adherente, y se calcula mediante la resistencia tangencial (o al corte), en la interfase.[2]

## CAPITULO DOS

## II. ACEROS AL CARBONO.

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono, aunque pueden contener otros elementos de aleación en diversas cantidades. El carbono es un constituyente muy importante porque tiene la capacidad de influir en la dureza y la resistencia del acero.

Las diferentes fases que un acero puede presentar en calentamiento o enfriamiento son:

**Austenita ( $\gamma$ ):** es el nombre dado a la solución sólida intersticial de carbono en hierro  $\gamma$  (estructura cúbica de caras centradas), con una solubilidad máxima de 2% de carbono a 1148°C.

**Cementita o carburo de hierro ( $Fe_3C$ ):** es un compuesto intersticial típicamente duro y frágil. Contiene 6.67% de carbono por peso.

**Ferrita ( $\alpha$ ):** nombre dado a la solución sólida intersticial de carbono en hierro (estructura cúbica centrada en el cuerpo), con una concentración máxima de carbono de 0.025%. Si su apariencia es de color claro, formando grupos compactos se denomina ferrita masiva ( $F^m$ ); si tiene forma acicular, se conoce como ferrita de Widmanstätten, la cual reduce la resistencia al impacto.

**Perlita:** es una mezcla fina, de tipo laminar, de ferrita y cementita que resulta de la reacción eutectoide (descomposición de una fase sólida en dos fases sólidas nuevas) de la austenita; su concentración eutectoide es de 0.8% de carbono.

**Martensita:** fase metaestable del acero. Es una solución sólida intersticial sobresaturada de carbono en hierro, con una red tetragonal centrada en el cuerpo. Su aparición depende de la rapidez del enfriamiento desde la temperatura de austenización. Su microestructura se caracteriza por una forma acicular o tipo aguja.



**Bainita:** es el producto de descomposición de la austenita que consiste en un agregado de ferrita y carburo. En general, se forma a temperaturas inferiores a aquellas en que se forma perlita fina y superiores a aquellas en que la martensita se empieza a formar al enfriar. Su apariencia es plumosa si se forma en la parte superior del intervalo de temperatura, y acicular, pareciendo martensita revenida si se forma en la parte inferior.

Los aceros se pueden clasificar en diferentes tipos de acuerdo al contenido de sus constituyentes. Como el carbono es el elemento más importante, todos los aceros se clasifican de acuerdo con el contenido de este elemento.

Así, se tienen dos grupos generales en que se dividen los aceros:

**Aceros al carbono:** contienen aproximadamente hasta 2% de carbono y una pequeña cantidad de elementos residuales, excepto aquellos agregados para desoxidación con silicio limitado generalmente a 0.6% y manganeso a 1.65% aproximadamente.

**Aceros aleados:** contienen grandes cantidades de elementos de aleación (distintos del carbono y de las cantidades comúnmente aceptadas de manganeso, silicio, azufre y fósforo), agregados para provocar cambios en las propiedades mecánicas o físicas.

## II.1. CARACTERISTICAS DE LOS ACEROS AL CARBONO.

Los aceros al carbono se producen en mayor cantidad y tienen un uso más extendido que cualquier otro metal. Esto se debe a su versatilidad y bajo costo.

Antes de 1940 se trató de reemplazar los aceros al carbono por aceros aleados, pero el comienzo de la Segunda Guerra Mundial

provocó una escasez de elementos de aleación que causó una revalorización de los aceros al carbono, y en muchos casos los usuarios regresaron a la utilización de estos aceros. Las razones por las que estos materiales resultaron satisfactorios fueron:

- (a) Aunque su templabilidad es menor que la de los aceros aleados, resultó adecuada para muchas partes, debido a que se reduce el agrietamiento por temple.
- (b) El refinamiento de los métodos de tratamiento térmico, tales como el endurecimiento por inducción y el endurecimiento a la flama, permite obtener mejores propiedades de los aceros al carbono que las que se obtenían antes.
- (c) Se desarrollaron composiciones nuevas que permitieron más diferencias en la selección.

La versatilidad de los aceros al carbono se ha extendido además, por la disponibilidad de varios grados con adiciones de elementos de aleación nuevos en bajas concentraciones, tales como plomo, cobre, silicio, molibdeno, vanadio, titanio, niobio (Aceros microaleados), etc.

Los aceros al carbono se pueden dividir en tres intervalos arbitrarios en el contenido de carbono.

#### II.1.1. ACEROS CON 0.10 A 0.25% DE C. (Aceros de bajo carbono).

Hay tres tipos principales de tratamientos térmicos que se usan para este grupo de aceros:

(a) Tratamientos acondicionantes, como el recocido en proceso, que prepara al acero para ciertas operaciones de fabricación.

(b) Carburización. Donde el medio de endurecimiento se hace en caja.

(c) Temple y revenido, utilizado para mejorar las propiedades mecánicas. El mejoramiento que se puede lograr en estos aceros por temple continuo y revenido, generalmente no amerita el costo.

Un ejemplo del recocido en proceso es el tratamiento de pernos de aceros de bajo carbono cabeceados en frío, hechos de alambre estirado también en frío. A veces las deformaciones introducidas por el trabajo en frío debilitan las cabezas a tal grado, que se rompen en la porción sometida a trabajo mayor, por acción de una deformación adicional pequeña. El recocido en proceso mejora esta situación porque las temperaturas usadas están cercanas a la menor temperatura de transformación; este tratamiento ocasiona una reducción considerable de las propiedades mecánicas del extremo del perno que fue cabeceado en frío.

Un tratamiento más conveniente, es el relevado de esfuerzos a aproximadamente  $540^{\circ}\text{C}$  con el objeto de retener casi toda la resistencia adquirida en el trabajo en frío y además mejorar la tenacidad. Una práctica común consiste en combinar un tratamiento de relevado de esfuerzos con un temple desde la temperatura de transformación superior, o un poco por debajo de ella, lo que produce propiedades mecánicas que se aproximan a las de los materiales estirados en frío. Un medio de temple común es una solución de aceite "soluble" en agua, cuyo uso produce dos resultados deseables:

(a) La superficie de las partes adquiere un color negro aceptado como acabado comercial.

(b) La velocidad del temple se reduce hasta el punto en que la dureza de temple no es completa, por lo que es innecesario revenir las partes.

Frecuentemente se emplean tratamientos térmicos para mejorar

la maquinabilidad, la cual generalmente es pobre es los aceros de bajo carbono, excepto los que contienen azufre u otros elementos de aleación especiales. Esto se debe a que la proporción de ferrita libre a carburos es alta. La situación no se puede cambiar totalmente, pero la maquinabilidad puede mejorarse si el carburo se encuentra formando perlita, y ésta distribuida uniformemente en la ferrita masiva. El normalizado se usa comunmente con éxito, pero se obtienen resultados mejores con el temple del acero en aceite desde 815 a 871°C. A excepción de los aceros 1024 y 1025, no se forma martensita, y las partes no requieren revenido.

#### II.1.2. ACEROS CON 0.25 A 0.55% DE C. (Aceros de medio carbono).

Estos aceros se utilizan a menudo endurecidos y revenidos, debido a su mayor contenido de carbono. Seleccionando el medio de temple y la temperatura de revenido adecuada, se puede obtener una gran variedad de propiedades mecánicas. De los tres grupos de aceros al carbono, son los más versátiles y se usan comunmente para cigüeñales, acoplamientos, tirantes y muchas otras partes donde los valores de dureza requeridos están dentro del intervalo de 229 a 447 Bhn.

En este grupo de aceros hay un cambio continuo, desde los tipos endurecibles en agua hasta los endurecibles en aceite. La templabilidad es muy sensible a los cambios en la composición química, especialmente al contenido de manganeso, silicio y elementos residuales, y al tamaño de grano; los aceros también son sensibles a los cambios de sección.

La velocidad de calentamiento de las partes a temprar tiene, bajo ciertas condiciones, un gran efecto en la templabilidad. Si la estructura no es uniforme debido a un doblado severo o a la

ausencia de un normalizado adecuado o de recocido, un calentamiento extremadamente rápido, como el que se puede obtener con baños líquidos, requerirá un tiempo suficiente para la difusión del carbono y otros elementos en la austenita. Si el tiempo es breve se producirá una dureza no uniforme y/o baja a menos que se alargue la duración de la austenización. En el calentamiento de aceros que contienen carburo libre, por ejemplo material esferoidizado, se debe permitir un tiempo de austenización suficiente para que se realice la disolución de los carburos; de otro modo, la austenita tendrá un menor contenido de carbono que el indicado por la composición química del acero y se pueden obtener resultados decepcionantes.

Estos aceros de medio carbono comunmente deben ser normalizados o recocidos antes del endurecimiento, a fin de obtener las mejores propiedades mecánicas después del temple y revenido.

La mayor parte de las barras, tanto las terminadas en caliente como en frío, se maquinan tal como se reciben, exceptos los grados de alto carbono y los tamaños pequeños que requieren de un recocido para reducir su dureza. Las barras forjadas generalmente se normalizan, porque este tratamiento evita el ablandamiento extremo y la reducción de maquinabilidad que resulta del recocido.

En algunos casos se usa un tratamiento térmico cíclico. En esta práctica las partes se callentan como para el normalizado y después se enfrían en el horno hasta una temperatura un poco arriba de la nariz de la curva S, que está dentro del intervalo de transformación en que se obtiene perlita. Luego, las partes se mantienen a esa temperatura o se enfrían lentamente, hasta que se obtiene la cantidad de transformación deseada; después de esto, se enfrían de cualquier manera conveniente. Para este procedimiento se requieren hornos arreglados especialmente. Los detalles de los

tratamientos varían mucho y se determinan a menudo por el tipo de horno disponible.

Los productos cabeceados en frío se hacen comúnmente de estos aceros, especialmente de los que contienen menos de 0.40% de C. El recocido en proceso antes del trabajo en frío es necesario porque el aumento de carbono disminuye la capacidad de ser trabajado. Para algunos usos, estos aceros se normalizan o se recocen por encima de la temperatura de transformación máxima, pero más a menudo se usa un tratamiento de esferoidización. El grado de esferoidización requerido depende de la aplicación. Después que se termina con las operaciones de formado, las partes se tratan térmicamente por temple y revenido.

Estos aceros se usan mucho para partes de maquinaria de uso no extremo. Cuando estas partes se maquinan después del tratamiento térmico, la dureza máxima se mantiene habitualmente a 321 Bhn, aunque con frecuencia es bastante menor.

El medio templante de uso más común es el agua, porque es el más barato y fácil de instalar. Una solución de sosa caústica (5 a 10% de NaOH por peso) se usa en muchos casos con mejores resultados. Comparado con el agua, es más veloz y por lo tanto, produce un temple más completo y uniforme, que genera mejores propiedades mecánicas en todas las secciones. Debido a su rápida acción, se desprenden más escamas en la superficie de las partes.

### II.1.3. ACEROS CON 0.55 A 1.00% DE C. (Aceros de alto carbono).

La aplicación de estos aceros es más restringida que los aceros con 0.25 a 0.55% de C ya que es más costoso fabricarlos, debido a que su maquinabilidad es menor y la formabilidad y soldabilidad son pobres. Además, cuando están tratados

térmicamente son más frágiles. Los aceros como los 1070 a 1095 son adecuados especialmente para resortes, en donde se requiere resistencia a la fatiga. Además, se usan en aplicaciones donde la resistencia a la abrasión es el requerimiento principal y se emplean completamente endurecidos, 55Rc y mayores, como es el caso de herramientas agrícolas, tales como arados y cuchillas para cortar granos.

Las piezas forjadas deben recocerse porque el refinamiento de la estructura es importante para obtener un producto endurecido de alta calidad, y porque salen de la forja demasiado duras para un desbaste en frío del sobrante o para un maquinado económico. Un recocido ordinario se hace por enfriamiento en el horno hasta 594 °C y resulta satisfactorio para muchas piezas.

La mayoría de las piezas hechas de aceros de este grupo se endurecen por temple convencional. Sin embargo, a veces se necesita una técnica especial. Se usa tanto el temple en aceite como en agua (agua, para las secciones gruesas en los aceros de bajo carbono y para bordes cortantes; aceite, para uso general). El bainitizado (austemperig) y el temple interrumpido (martemperig) se aplican comúnmente para estos aceros; las principales ventajas de estos dos tratamientos son que la distorsión se reduce considerablemente, y hay eliminación de la formación de grietas en muchos casos, y mayor espesor a una dureza alta.

Para piezas de maquinaria pesada, como ejes, collares y otras semejantes, pueden usarse los aceros 1055 y 1061, ya sea normalizados y revenidos, cuando se desea obtener una resistencia baja, o templados y revenidos cuando se espera tener una resistencia moderada. Se pueden usar otros aceros del grupo, pero la combinación de carbono y manganeso en los 1055 y 1061 los hace adecuados para esas aplicaciones. (3)

## II.2. ESPECIFICACIONES DE ACEROS AL CARBONO.

Esencialmente, cuatro son las especificaciones más empleadas para los aceros al carbono y son:

- A) Especificaciones S.A.E. (Society of Automotive Engineers).
- B) Especificaciones A.I.S.I. (American Iron and Steel Institute).
- C) Especificaciones A.P.I. (American Petroleum Institute).
- D) Especificaciones A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials).

De todas, las más empleadas, por su sencillez, son las dos primeras.

Tanto las especificaciones S.A.E., como las A.I.S.I., basan su clasificación en el análisis químico, factor que puede verificarse de manera relativamente simple en el laboratorio.

En forma general, se clasifican todos los aceros al carbono bajo una denominación de 4 cifras; las dos primeras, se designan a este tipo de aceros y las dos últimas, dan idea del contenido de carbono, multiplicado por cien.

A manera de ejemplo, se verá un acero S.A.E. 1020, el número 10 implica que se trata de un acero al carbono; el 20 indica que contiene 0.20% de carbono.

Generalizando, las especificaciones S.A.E. y A.I.S.I. clasifican a los aceros de la siguiente manera:

- A) Se expresa como 10XX, donde las letras X indican el porcentaje de carbono multiplicado por cien.



- B) Debe notarse que, en los aceros al carbono, siempre aparece el número diez al principio.
- C) Para diferenciar las especificaciones mencionadas, se anteponen las siglas de la institución que originó la especificación.

S.A.E. 10XX es un acero cuya especificación surgió de la Sociedad de Ingenieros Automotrices. De forma similar, A.I.S.I. 10XX es un acero cuya clasificación proviene del Instituto Americano del Hierro y el Acero.

Ambas especificaciones mencionadas marcan una tolerancia en el contenido de carbono. Estos límites son de tres centesimas de carbono tanto en el límite superior como en el inferior.

Así, un acero 1020 tiene un contenido de carbono de 0.20% <sup>+</sup>0.03%, lo que hace oscilar el porcentaje de 0.17 a 0.23% de carbono.

Por supuesto, las especificaciones S.A.E. y A.I.S.I. toman en cuenta también las propiedades físicas y mecánicas, pero ponen especial énfasis en la composición.

En la composición de los aceros al carbono, no sólo se controla el contenido de carbono, también intervienen otros elementos que son, manganeso, fósforo y azufre principalmente, así como silicio y aluminio. Estos elementos también son mencionados en las especificaciones S.A.E. y A.I.S.I.

El manganeso es un elemento que se emplea como desoxidante en la aceración y tanto la S.A.E. como la A.I.S.I. consideran que un contenido normal de manganeso debe oscilar entre 0.30 y 0.60%. Algunos aceros tienen mayor porcentaje de manganeso; estos aceros, aún cuando son considerados como aceros al carbono, también se pueden enlistar en otra clasificación A.I.S.I., la A.I.S.I. 15XX.

El contenido de manganeso en estos aceros, llamados aceros al carbono de alto manganeso, oscila entre 0.60 y 0.90% pero en algunos casos especiales, se eleva de 0.70 a 1.65%.

Por lo que respecta al fósforo y azufre, tanto la Sociedad de Ingenieros Automotrices como el Instituto Americano del Hierro y el Acero están acordes en que el contenido de cada uno de estos elementos debe ser un máximo de 0.040%.

Las especificaciones del Instituto Americano del Petróleo, a diferencia de las anteriormente mencionadas, prestan mayor atención a las propiedades mecánicas de los aceros y practicamente no hacen mención de su composición.

Para hacer la verificación respecto a esta especificación, es necesario contar con un equipo mucho más caro que el que se emplea para corroborar el análisis químico.

Por último, las especificaciones A.S.T.M. toman en cuenta la composición y las propiedades mecánicas de los aceros, pero las denominaciones no dan idea de ninguna de estas propiedades ya que estan agrupadas de una forma más bien cronologica.

De todo lo anterior se puede concluir:

- A) Las especificaciones más fáciles de verificar son las S.A.E. y/o A.I.S.I.
- B) Son especificaciones muy sencillas y fáciles de entender.
- C) Son fáciles de comparar respecto a las especificaciones que se vieron con anterioridad.

#### II.2.1. OTROS ELEMENTOS EN LOS ACEROS AL CARBONO.

Se vió anteriormente que existen otros tres elementos que son inherentes a los aceros al carbono, a saber:

A) Manganeso.- Es un elemento que aumenta la dureza y tenacidad de los aceros aunque en menor proporción que el carbono. Se emplea como desoxidante en los procesos de aceración y en consecuencia, del proceso de desoxidación se obtienen los contenidos en los aceros.

B) Fósforo.- Este elemento proviene, al igual que el azufre, de los minerales usados en la obtención del arrabio (hierro de primera fusión), que a su vez, es la materia prima en los procesos de aceración. Tiende a formar un componente estructural en el hierro, llamado esteadita que provoca fragilidad en caliente y, por lo tanto, evita que se consiga un buen tratamiento en aceros con alto contenido de este elemento.

C) Azufre.- Ya se dijo que proviene de los minerales empleados en los procesos de obtención. Provoca fragilidad en frío y en caliente, cuando está en alta proporción. Tanto este elemento, como el fósforo, son considerados como impurezas y, así, su efecto, considerado de manera general, es nocivo.

Existen dos elementos que intervienen en la obtención de los aceros, empleados como los principales desoxidantes en la aceración; estos dos elementos son el aluminio y el silicio. Aún cuando intervienen de manera muy importante, su contenido en los aceros al carbono es relativamente bajo y no son nocivos para las propiedades.

Esencialmente, independientemente del horno usado en la aceración, las especificaciones vistas están acordes en que el contenido de estos elementos en los aceros al carbono debe ser:

|           |            |
|-----------|------------|
| Manganeso | 0.30-0.60% |
| Fósforo   | 0.04% Máx. |
| Azufre    | 0.04% Máx. |

## II.2.2. PROPIEDADES DE LOS ACEROS AL CARBONO.

Se puede decir que las especificaciones que se vieron enlistan las propiedades químicas de los aceros al carbono. Sobre esta base, las propiedades a que se refiere este apartado, son propiedades físicas.

A) Dureza.- Esta propiedad tiende a incrementarse conforme aumentan los contenidos de carbono y manganeso. Se puede determinar de varias maneras, siendo las más usuales por medio de los métodos Rockwell y Brinell.

B) Resistencia a la Tracción.- Es otra propiedad que tiende a aumentar con el contenido de carbono y de manganeso. Se determina en una máquina universal, por aplicación de una cierta carga a probetas o especímenes de prueba de dimensiones normalizadas. Con esta prueba se obtienen como datos los límites elásticos y de ruptura de los materiales probados.

C) Resistencia al Impacto.- Mide la energía necesaria para fracturar un espécimen por medio de una carga que choca contra el cuerpo de prueba. Esta propiedad es directamente proporcional a los contenidos de carbono y manganeso. Los ensayos más usados son los de Izod y Charpy, que dan idea de la tenacidad del material.

D) Resistencia a la Fatiga.- Se realiza con equipos especiales en los que se somete al material a un esfuerzo repetitivo, midiéndose la deformación obtenida en un cierto número de ciclos. Las pruebas anteriormente mencionadas dan una cierta idea de lo que se puede esperar en cuanto a resistencia a la fatiga se refiere, se puede decir que, por ejemplo, si se obtuvo un valor alto en el límite elástico, se debe obtener una resistencia a la fatiga alta.

E) Penetración del Temple.- Aún cuando no es una prueba que se realice frecuentemente, es una prueba que aporta datos del comportamiento de un acero respecto a los tratamientos térmicos. Los dos métodos más empleados son los de Jominy y el de Grossman.

F) Soldabilidad.- Es la facultad que tienen los aceros de soldarse adecuadamente. Desciende con el contenido de carbono.

Todas las propiedades mencionadas decrecen al aumentar el contenido de fósforo y azufre. (6)

### II.3. ACEROS INOXIDABLES.

#### II.3.1. GENERALIDADES.

El común denominador de este tipo de aceros es que tiene en su composición química, un mínimo de 12% de cromo y lógicamente el hecho de que presentan una buena resistencia a la corrosión. Con respecto a los aceros al carbono y a los de baja aleación, estos aceros presentan una alta resistencia a la acción de una gran gama de reactivos y a condiciones adversas del medio ambiente manteniendo inalterada su superficie, o en algunos casos solo requerirán un mínimo de mantenimiento para conservarse.

Estas características aunadas a una serie de propiedades mecánicas y metalúrgicas han propiciado una importante versatilidad en cuanto a sus campos de aplicación, de los cuales podríamos citar: elementos arquitectónicos (internos y externos), maquinarias y equipos para la industria marina, alimenticia, química, petroquímica, instrumentales quirúrgicos, partes de implementos nucleares y componentes mecánicos, los cuales de una u otra forma serán sometidos a condiciones que ocasionarían la degradación de cualquier otro tipo de aceros.

Estos aceros presentan dicha resistencia a medios corrosivos debido a la propiedad de pasivarse cuando son sometidos a un medio oxidante; esta pasividad consiste en la formación de una película superficial de óxido de cromo, invisible, muy adherente y resistente que protege la parte interna del metal de una posterior oxidación o corrosión.

Para que estos aceros se mantengan pasivados y sigan presentando una resistencia a la corrosión y oxidación es necesario que prevalezca una condición oxidante en el medio al que se haya sometido el material, tal como el que puede proporcionar una buena ventilación o la circulación del fluido con el cual esté en contacto el acero inoxidable.

En forma general se puede considerar que los principales agentes que tienden a destruir la película de óxido de cromo y deprimir las propiedades anticorrosivas de los aceros inoxidables son los iones de elementos halógenos como el cloro y el fluor, estos tienden a atacar zonas localizadas de la estructura del acero provocando la aparición de grietas ocasionadas por las tensiones creadas, a su vez, por los puntos, por ejemplo de corrosión bajo tensión.

Otra importante característica de los aceros inoxidables es que son aceros refractarios ó sea que resisten la oxidación y la corrosión a temperaturas elevadas, presentando mayormente esta propiedad los aceros ferríticos con alto contenido de cromo, en ambientes tanto oxidantes como reductores.

Los tipos austeníticos con alto contenido de cromo y níquel resisten perfectamente a la alta temperatura pero solo en atmósferas oxidantes, sin embargo tienen la ventaja de mantener sus propiedades mecánicas en cualquier condición.

No podemos admitir que exista algún acero del tipo inoxidable que resista todos los tipos de corrosión u oxidación, sin embargo existen aceros que resisten perfectamente la acción de ciertos agentes corrosivos, pero son oxidados o corroidos por otros agentes o bien en determinadas circunstancias.

Cuando sea necesaria la selección de un acero para una aplicación específica, es necesario tomar en consideración los siguientes factores: composición, concentración, temperatura y presión del medio de trabajo, características mecánicas requeridas tanto a temperatura ambiente como a la de operación, etc., requerimientos de soldadura y tratamiento térmico antes o después de la soldadura, verificación de que el acero esté en contacto con otros materiales durante su operación y condiciones superficiales del material.

### II.3.2. CLASIFICACION.

Para identificar los aceros inoxidables se utiliza un sistema de tres cifras de las cuales la primera indica el grupo al que pertenecen las dos segundas nos da el tipo del que se trata, esta codificación ha sido establecida por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE):

#### II.3.2.1. DESIGNACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES POR SERIE.

- 2XX Cromo-niquel-manganeso; no templable, austenitico, no magnético.
- 3XX Cromo-niquel; no templable, austenitico, no magnético.
- 4XX Cromo; no templable, ferritico, magnético.
- 4XX Cromo; templable, martensitico, magnético.
- 5XX Cromo; bajo en cromo, resistente a la temperatura.(7)

A veces las cifras de designación pueden ser acompañadas por un sufijo, que presentamos en la tabla siguiente, con el objeto de indicar la eventual característica:

| Sufijo | Significado                                   |
|--------|---|
| B      | Contenido de alto silicio (1.5 a 3%).         |
| Se     | Alto contenido de selenio (de fácil fresado). |
| L      | Contenido de muy bajo carbono (0.03% máx.).   |
| N      | Adición de nitrógeno (acero para cojinetes).  |
| S      | Contenido de bajo carbono (0.08% máx.).       |
| F      | Alto contenido de azufre (de fácil fresado).  |



## II.3.2.2. CLASIFICACION POR SU MICROESTRUCTURA.

### A) ACEROS AUSTENITICOS.

Los aceros inoxidable austeniticos son aceros fabricados con alto contenido de Cr y Ni (de 16 a 26% de cromo y de 6 a 22% de niquel). En estos aceros el carbono se encuentra presente como elemento residual y es controlado dentro de los límites más bajos posibles. Estos aceros no se endurecen por tratamiento térmico; por que su estructura metalográfica es en base a cristales de austenita cuya estabilidad se prolonga hasta temperaturas más bajas debido a la acción del Ni, que no presenta ninguna transformación al ser calentados o enfriados; pero pueden ser trabajados en frio para desarrollar en ellos altos niveles de resistencia.

Los aceros austeniticos tienen considerablemente mejor resistencia a la corrosión que los aceros martensiticos y ferriticos y se caracterizan por su excelente resistencia mecánica y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas.

En estado recocido estos aceros no son magnéticos pero llegan a presentar un ligero indice de permeabilidad magnética después de trabajarse en frio.

Los aceros austeniticos son notables por su excepcional ductilidad y tenacidad; y son particularmente adecuados para operaciones de trabajo en frio.

Estos aceros pueden ser trabajados en caliente sin mucha dificultad y al igual que los aceros ferriticos pueden ser enfriados en aire después del trabajo en caliente, sin peligro de que se agrieten.

Para la maquinabilidad de los aceros austeniticos se requieren cortes más profundos y velocidades más bajas que las empleadas en los aceros ferriticos y los martensiticos.

Una característica de los aceros de este grupo es la susceptibilidad a la corrosión intergranular después de prolongados calentamientos dentro del intervalo de temperaturas de 400 a 900°C; cuando estos aceros se calientan dentro de este intervalo crítico, el cromo se precipita en los límites de grano en forma de carburos de cromo, con lo que se reduce considerablemente la resistencia a la corrosión en los bordes de los granos, consecuentemente, es recomendable solubilizar los aceros austeníticos a una temperatura comprendida entre 1000 y 1100°C, sometiénolos a un enfriamiento rápido en agua (Proceso llamado temple austenítico o hipertemple).

El problema de la corrosión intergranular puede ser evitado por el uso de aceros estabilizados con titanio o columbio, estos elementos se combinan con el carbono formando carburos de titanio o columbio en lugar de carburos de cromo; o bien se puede disminuir el contenido de carbono ( $C < 0.03\%$ ).

En estos aceros y en general en todos los inoxidable y refractarios, el tiempo de permanencia a la temperatura de tratamiento térmico es como mínimo del doble que los aceros al carbono, debido a su baja conductividad térmica.

Estos aceros son esencialmente no magnéticos en su condición de recocido, pero pueden ser ligeramente magnéticos después de que son trabajados en frío al transformarse parte de la austenita en martensita.

Estos aceros engrosan el grano a temperaturas elevadas o con permanencias largas, pero la fragilidad que adquieren no es tan peligrosa como en los aceros ferríticos.

Una de las buenas propiedades del acero austenítico es la ausencia de fragilidad a bajas temperaturas, todo lo contrario de lo que sucede en los martensíticos y los ferríticos, manteniendo resiliencias excelentes a temperaturas cercanas al cero absoluto. Por el contrario, el resto de las propiedades mecánicas varía aumentando la carga de ruptura y el límite elástico y disminuyendo el alargamiento.

Este grupo de aceros puede soldarse fácilmente obteniéndose uniones fuertes y tenaces. Sin embargo, al calentar el área soldada no se puede evitar que pase por las temperaturas críticas en las cuales precipitan los carburos de cromo. De ahí que en estos casos es necesario solubilizar como ya se indicó, después de soldar o cuando no sea posible el recocido, resulta necesario el empleo de aceros estabilizados.

La maleabilidad de estos aceros es muy grande, por lo que se emplean en la fabricación de piezas embutidas.

En los Estados Unidos la falta de níquel durante la época de emergencia nacional supuso un grave problema para los fabricantes y consumidores de acero inoxidable, por ello a partir de la segunda guerra mundial y durante la guerra de Corea se llevan a cabo multitud de trabajos destinados a la sustitución del níquel por el manganeso en los aceros inoxidables, obteniéndose los tipos 201 y 202; dando origen así a la serie de aceros inoxidables austeníticos al Ni-Cr-Mn.

La composición nominal del tipo 201 es 17% Cr, 4.5% Ni, 6.5% Mn, el cual sustituye satisfactoriamente al tipo 301 con 17% Cr, 7% Ni, cuando las características de fácil maquinabilidad y capacidad de sufrir grandes conformados no son importantes. En los casos en que los aceros debiesen presentar estas características, el tipo 202 cuya composición nominal es 18% Cr, 5% Ni, 8% Mn, es el más adecuado ya que debido a su contenido de manganeso más elevado, el endurecimiento por trabajo en frío tarda más en presentarse. Esto obedece a que el manganeso tiende a estabilizar más la austenita presente en el material. Dicha estabilización provocará que la transformación a martensita debida a la deformación en frío, tarde más en aparecer, lo cual obviamente provocará un retardo en la aparición de dureza más elevada.

Industrialmente tanto en México, como en los países altamente industrializados, los aceros austeníticos son los más ampliamente utilizados.

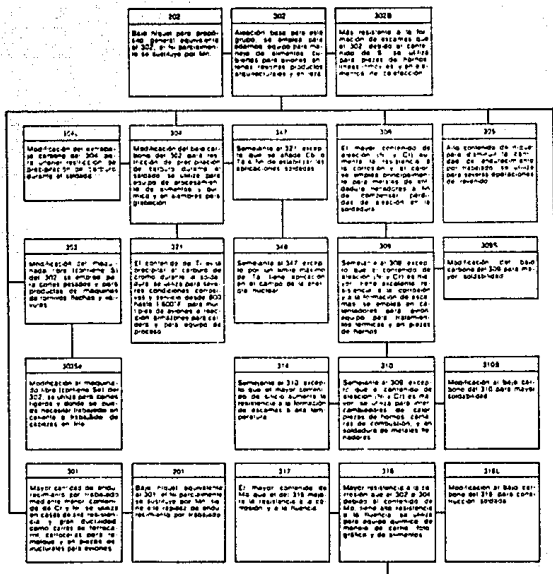


FIG. II.1. ACEROS AUSTENITICOS INOXIDABLES.

(Tomada del Libro Machine Design, Metals Reference Issue, The Penton Publishing Co., Cleveland, Ohio, 1967).

La composición nominal y la designación de los más comunes aceros inoxidable austeníticos según la AISI y SAE se listan a continuación agregando además el electrodo apropiado para su soldadura:

TABLA II.1.

ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS Y ELECTRODOS APROPIADOS PARA SU SOLDADURA

| AISI  | C         | Mn         | P     | S        | Si        | Cr        | Ni         | Mo        | OTROS             | ELECTRODO   |
|-------|-----------|------------|-------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-------------------|-------------|
| 201   | 0.15      | 5.50-7.50  | 0.060 | 0.03     | 1.0       | 16.0-18.0 | 3.50-5.50  | -         | 0.25N             | E-308       |
| 202   | 0.15      | 7.50-10.0  | 0.060 | 0.03     | 1.0       | 17.0-19.0 | 4.0-6.0    | -         | 0.25N             | E-308       |
| 205   | 0.12-0.15 | 14.0-15.50 | 0.060 | 0.03     | 1.0       | 16.5-18.0 | 1.0-1.75   | -         | 0.032-0.040N      | E-308       |
| 301   | 0.15      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 16.0-18.0 | 6.0-8.0    | -         | -                 | E-308       |
| 302   | 0.15      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 17.0-19.0 | 8.0-10.0   | -         | -                 | E-308       |
| 302B  | 0.15      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 2.0-3.0   | 17.0-19.0 | 8.0-10.0   | -         | -                 | E-308       |
| 303   | 0.15      | 2.0        | 0.20  | 0.15min. | 1.0       | 17.0-19.0 | 8.0-10.0   | 0.60      | -                 | (1)         |
| 303S8 | 0.15      | 2.0        | 0.20  | 0.060    | 1.0       | 17.0-19.0 | 8.0-10.0   | -         | 0.155gmin.        | (1)         |
| 304   | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 18.0-20.0 | 8.0-10.50  | -         | -                 | E-308       |
| 304L  | 0.030     | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 18.0-20.0 | 8.0-12.0   | -         | -                 | E-308L      |
| 304N  | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 18.0-20.0 | 8.0-10.50  | -         | 0.10-0.16N        | E-308       |
| 305   | 0.12      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 17.0-19.0 | 10.50-13.0 | -         | -                 | E-308,310   |
| 308   | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 19.0-21.0 | 10.0-12.0  | -         | -                 | E-308       |
| 309   | 0.20      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 22.0-24.0 | 12.0-15.0  | -         | -                 | E-309       |
| 309S  | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 22.0-24.0 | 12.0-15.0  | -         | -                 | E-309       |
| 310   | 0.25      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.50      | 24.0-26.0 | 19.0-22.0  | -         | -                 | E-310       |
| 310S  | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.50      | 24.0-26.0 | 19.0-22.0  | -         | -                 | E-310       |
| 314   | 0.25      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.50-3.0  | 23.0-26.0 | 19.0-22.0  | -         | -                 | E-310,312   |
| 316   | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03min. | 1.0       | 16.0-18.0 | 10.0-14.0  | 2.0-3.0   | -                 | E-316       |
| 316F  | 0.08      | 2.0        | 0.20  | 0.10     | 1.0       | 16.0-18.0 | 10.0-14.0  | 1.75-2.50 | -                 | (1)         |
| 316L  | 0.030     | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 16.0-18.0 | 10.0-14.0  | 2.0-3.0   | -                 | E-316L      |
| 316N  | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 16.0-18.0 | 10.0-14.0  | 2.0       | 0.10-0.16N        | E-316       |
| 317   | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 18.0-20.0 | 11.0-15.0  | 3.0-4.0   | -                 | E-317       |
| 317L  | 0.030     | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 18.0-20.0 | 11.0-15.0  | 3.0-4.0   | -                 | E-317L      |
| 321   | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 17.0-19.0 | 9.0-12.0   | -         | Ti,SnCmin.        | E-321,E-347 |
| 330   | 0.08      | 2.0        | 0.040 | 0.03     | 0.75-1.50 | 17.0-20.0 | 34.0-37.0  | -         | -                 | E-330       |
| 347   | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 17.0-19.0 | 9.0-13.0   | -         | Cb,1a             | E-347       |
|       |           |            |       |          |           |           |            |           | 10-Cmin.<br>Cb,1a |             |
| 348   | 0.08      | 2.0        | 0.045 | 0.03     | 1.0       | 17.0-19.0 | 9.0-13.0   | -         | -                 | E-348       |

## B) ACEROS FERRITICOS.

Los aceros inoxidables ferríticos son aceros fabricados con contenidos del 12 al 27% de Cr, con el contenido de C controlado al más bajo porcentaje práctico posible, para disminuir su efecto nocivo en cuanto a su resistencia a la corrosión.

Estos aceros prácticamente no se endurecen por tratamiento térmico por caracterizarse por presentar una estructura ferrítica a cualquier temperatura.

Son ferromagnéticos y pueden endurecerse moderadamente por trabajo en frío, son menos resistentes a la alta temperatura que los tipos martensíticos. pero presentan mejor resistencia a la corrosión y a la formación de escoria que estos mismos.

Pueden ser forjados y trabajados en caliente más fácilmente que los martensíticos y pueden ser enfriados al aire sin peligro de que se agrieten.

Su maquinabilidad es comparable con la de los aceros al carbono, y pueden ser soldados fácilmente, sin embargo los aceros de este grupo fabricados con alto contenido de cromo, son susceptibles al crecimiento de grano y por esta razón tienden a fragilizarse en las zonas afectadas por el calor de la soldadura. El crecimiento del grano en los aceros ferríticos no se puede remediar con tratamiento térmico debido a que no es posible eliminar la fragilidad existente por esta causa.

A veces se añade nitrógeno en proporciones de 0.10 a 0.25% para reducir a temperaturas elevadas la velocidad de crecimiento de los granos.

En los aceros ferríticos con un elevado contenido de cromo puede aparecer la fase sigma cuando se les mantiene durante mucho tiempo a temperaturas comprendidas entre 500 y 900°C. Para disolver esta fase es necesario calentar de nuevo por encima de los 900°C.

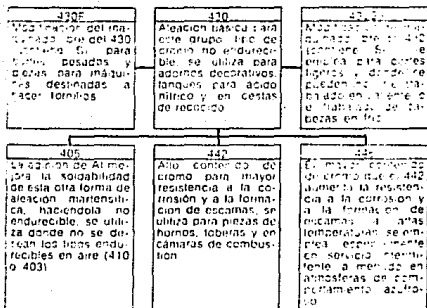


FIG. 11.2. ACEROS FERRÍTICOS INOXIDABLES.

(Tomada del Libro Machine Design, Metals Reference Issue, The Penton Publishing Co., Cleveland, Ohio, 1967).

### C) ACEROS MARTENSÍTICOS.

Los aceros inoxidable martensíticos se fabrican principalmente con contenidos de cromo variables entre 11.5 a 18% junto con cantidades cuidadosamente controladas de carbono impartíéndose de esta manera la propiedad de endurecerse por tratamiento térmico (tienen una estructura austenítica a elevadas temperaturas que pueden ser transformadas en martensita mediante enfriamiento a temperatura ambiente). De esta forma tienen la facultad de adquirir gran dureza.

Sin embargo, al aumentar el contenido de carbono, se favorece la formación de una mayor cantidad de carburos de cromo, lo cual obliga a una subsecuente disminución del contenido de cromo, en la matriz del material. De acuerdo con esto, junto a cualquier incremento del contenido de carbono deberá aumentarse el contenido de cromo, de tal manera que se obtenga un adecuado balance metalúrgico llevandonos esto a una resistencia a la corrosión similar a la de los tipos martensíticos de bajo carbono.

Los aceros martensíticos muestran una excelente resistencia a la corrosión en medios ligeramente corrosivos tales como ácidos débiles, vapor, agua fresca, medio ambiente, etc.. La máxima resistencia a la corrosión de estos aceros, se obtiene cuando son templados a su máxima dureza. Los aceros de esta clase particularmente los tipos de bajo carbono, son utilizados para servicio a alta temperatura, ya que resisten la oxidación hasta temperaturas de 650°C, presentando buenas propiedades mecánicas hasta 540°C.

Los aceros de este grupo son magnéticos, se forjan y trabajan fácilmente, generalmente se puede trabajar en frío con menor dificultad que los austeníticos especialmente con bajo contenido de carbono, y se trabajan fácilmente en caliente. Alcanzan su óptima resistencia a la corrosión cuando se endurecen desde la temperatura recomendada, pero no son tan buenos como los aceros austeníticos o ferríticos inoxidables. Pueden ser soldados, sin embargo, debido a su propiedad de templarse al aire deberán tomarse precauciones para evitar que se agrieten en las áreas soldadas. (10)



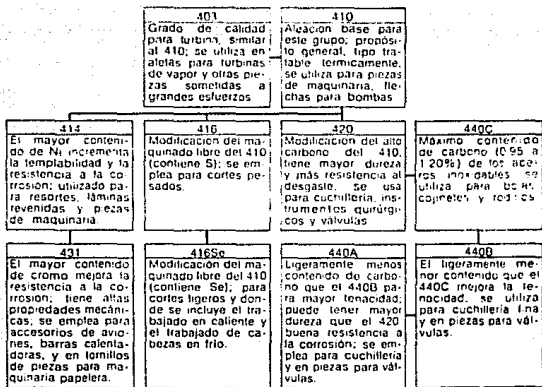


FIG. 11.3. ACEROS MARTENSÍTICOS INOXIDABLES.

(Tomada del Libro Machine Design, Metals Reference Issue, The Penton Publishing Co., Cleveland, Ohio, 1967).

A continuación se enlistan la composición química de los aceros inoxidables martensíticos y ferríticos más comunes, así como, el electrodo apropiado para su soldadura:

TABLA II.2.

ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS Y FERRITICOS, CON ELECTRODOS APROPIADOS PARA SU SOLDADURA

|      | C         | Mn   | P     | S        | Cr   | Ni         | Mo        | OTROS       | ELECTRODO                  |
|------|-----------|------|-------|----------|------|------------|-----------|-------------|----------------------------|
| 403  | 0.15      | 1.0  | 0.040 | 0.03     | 0.50 | 11.5-13.0  | -         | -           | E-410, E-309<br>o el E-310 |
| 410  | 0.15      | 1.0  | 0.040 | 0.03     | 1.0  | 11.5-13.5  | -         | -           | E-410, E-309<br>o el E-310 |
| 414  | 0.15      | 1.05 | 0.040 | 0.03     | 1.0  | 11.5-12.5  | 1.25-2.50 | -           | E-410, E-309<br>o el E-310 |
| 416  | 0.15      | 1.25 | 0.060 | 0.15min. | 1.0  | 12.0-14.0  | -         | 0.60        | E-410, E-309               |
| 416S | 0.15      | 1.25 | 0.060 | 0.060    | 1.0  | 12.0-14.0  | -         | 0.15Se min. | (1)                        |
| 420  | 0.15      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 12.0-14.0  | -         | -           | E-420                      |
| 420F | 0.15min.  | 1.25 | 0.060 | 0.15min. | 1.0  | 12.0-14.0  | -         | 0.60        | (1)                        |
| 422  | 0.20-0.25 | 1.0  | 0.025 | 0.025    | 0.75 | 11.0-13.0  | 0.50-1.0  | 0.75-1.25   | 0.15-0.30V<br>0.75-1.25W   |
| 431  | 0.20      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 15.0-17.0  | 1.25-2.50 | -           | E-309                      |
| 440A | 0.60-0.75 | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 16.0-18.0  | -         | 0.75        | (2)                        |
| 440B | 0.75-0.90 | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 16.0-18.0  | -         | 0.75        | (2)                        |
| 440C | 0.95-1.20 | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 16.0-18.0  | -         | 0.75        | (2)                        |
| 440C | 0.08      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 11.5-14.5  | -         | -           | 0.10-0.30Al<br>o el E-310  |
| 409  | 0.08      | 1.0  | 0.045 | 0.045    | 1.0  | 10.5-11.75 | -         | -           | Ti, 6X, Cmin.<br>0.75      |
| 429  | 0.12      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 14.0-16.0  | -         | -           | E-430                      |
| 430  | 0.12      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 16.0-18.0  | -         | -           | E-430                      |
| 430F | 0.12      | 1.25 | 0.060 | 0.15min. | 1.0  | 16.0-18.0  | -         | 0.60        | (1)                        |
| 434  | 0.12      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 16.0-18.0  | -         | 0.75-1.25   | E-430                      |
| 436  | 0.12      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 16.0-18.0  | -         | 0.75-1.25   | Cb-Ta5+C<br>min. 0.70max.  |
| 442  | 0.20      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 18.0-23.0  | -         | -           | E-310                      |
| 446  | 0.20      | 1.50 | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 23.0-27.0  | -         | -           | 0.25N<br>E-310             |
| 501  | 0.10min.  | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 4.0-6.0    | -         | 0.40-0.65   | E-502                      |
|      | 0.10      | 1.0  | 0.040 | 0.030    | 1.0  | 4.0-6.0    | -         | 0.40-0.65   | E-502                      |

### II.3.3. PRECIPITACION DE CARBUROS.

Cuando los aceros inoxidables se hallan a temperaturas comprendidas entre los 450 y 900°C Celcius durante cierto tiempo, o se les enfría lentamente en dicho intervalo de temperaturas se origina en ellos una precipitación, fundamentalmente de carburos de hierro y cromo. Esta precipitación es más intensa en el intervalo de los 600 a los 850°C.

Por lo general estos carburos se precipitan en las uniones de los granos disminuyendo la cohesión de los mismos y haciendo que las zonas contiguas queden espobrecidas en cromo, con lo que pierde su carácter de inoxidables en esas zonas y, por consiguiente, su resistencia a la corrosión. De esta manera, en ciertos medios corrosivos se puede producir un ataque intergranular, cuya intensidad dependerá de la temperatura a que han estado expuestos y del tiempo transcurrido, así como de la composición química y del tratamiento previo realizado en el acero.

Esta precipitación se produce preferentemente en los aceros inoxidables austeníticos y es típico en las zonas cercanas a los cordones de soldadura. Los carburos precipitados son del tipo  $C_{\kappa}(Cr, Fe)_{\lambda}$ ; donde  $\kappa$  es un subíndice igual a 6 y  $\lambda$  es otro subíndice igual a 23.

Se evita esta precipitación de carburos en las uniones de los granos fabricando los aceros con un contenido máximo de carbono de 0.03%. (Como se dijo antes en una de las formas).

### II.3.4. CLASIFICACION DE PRODUCTOS DE ACERO INOXIDABLE POR TAMAÑO, FORMA Y ACABADO.

Tradicionalmente los productos siderúrgicos se dividen en planos y no planos. Los aceros inoxidables planos son fabricados

normalmente en forma de productos acabados como chapa gruesa o placa, chapa media o lámina y flejes, siendo la clasificación establecida por las normas nacionales vigentes, la siguiente:

**PLACA.** - Se define la placa como el producto plano laminado o forjado con un espesor mayor a 3/16" y un ancho mayor a 10".

Los acabados comunes para placa son:

- Sin decapar
- Decapada y granallada
- Con superficie limpia y pulida.

**LAMINA.** - Este producto es también denominado chapa y se define como un material con un espesor menor de 3/16" y su ancho mayor de 24"

Este producto puede ser surtido en forma de rollo o cortado en hojas.

Los acabados más comunes para lámina son los siguientes:

- Acabado no. 1
- Acabado no. 2D
- Acabado no. 2B
- Acabado no. 3 (P3)
- Acabado no. 4 (P4).

**FLEJE.** - Este es un material laminado en frío cuyo espesor es menor de 3/16" y anchos menores de 24". Al igual que la chapa o lámina, puede ser surtido en forma de rollo o cortado longitudinalmente en tramos.

Los acabados en que se fabrican son:

- Acabado no. 2D
- Acabado no. 2B.

Dentro de la fabricación de flejes existe lo que se denomina: ESTADOS DE DUREZA POR ACRITUD, es decir, que los flejes de

todos los aceros inoxidables pueden fabricarse con un endurecimiento por laminación en frío, obteniendo así un fleje de alta resistencia. (111)

Este fleje de alta resistencia es generalmente de acero tipo AISI-301 y puede fabricarse en los grados estándar de endurecimiento que se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 11.3.

| GRADO DE<br>ENDURECIMIENTO         | 1/4 DURO | 1/2 DURO | 3/4 DURO | FULL<br>HARD |
|------------------------------------|----------|----------|----------|--------------|
| RESISTENCIA A LA<br>TRACCION (MPa) | 862      | 1034     | 1206     | 1275         |
| LIMITE ELASTICO<br>(MPa)           | 576      | 758      | 930      | 985          |
| ELONGACION %                       | 25       | 18       | 12       | 9            |
| DUREZA (*) (HRC)                   | 25       | 32       | 37       | 41           |

(\*): Valores típicos, ya que no se garantiza la dureza.

### II.3.5. SOLDADURA.

Los tres grupos de aceros inoxidables pueden ser soldados por cualquiera de los métodos conocidos, con excepción del método de soldadura por forjado. Efectivamente, al calentar estos aceros a la temperatura necesaria para el forjado, se forma un depósito de óxido en la superficie. Dicho óxido no es soluble en flujo alguno y al aplicar la presión necesaria para unir las partes que se quieren soldar, las mismas quedan separadas por la capa de óxido, lo cual impide la unión íntima de las superficies en contacto.

Los demás métodos pueden ser aplicables, más para obtener buenos resultados, se debe seguir una técnica algo diferente de la empleada para soldar los aceros comunes al carbono, puesto que los aceros inoxidables difieren en las características que detallamos a continuación.

La conductividad térmica de los aceros inoxidables es sensiblemente menor que la de los aceros comunes. En la serie 400 es de solo 50 a 60% de la de los comunes y en el caso de la serie 300 es de 40 a 50% de la de los comunes. Esto significa que en el proceso de soldadura se llega más rápidamente a temperaturas más altas, concentradas en superficies relativamente reducidas. Cuando se suelda chapa fina existe peligro de quemarla y agujerarla.

El coeficiente de dilatación de los grados de la serie 400 es aproximadamente igual o algo inferior al de los aceros comunes, mientras que los de la serie 300, es del 50 al 60% mayor que el coeficiente de los aceros comunes. Esta propiedad de los aceros austeníticos, junto con su conductividad térmica reducida, hace que al ser soldados, los mismos tengan tendencia a deformarse y retener tensiones residuales.

El punto de fusión de los aceros inoxidables es algo más bajo que el de los aceros comunes, siendo necesario por tanto, un menor aporte de calor para soldarlos.

La resistencia eléctrica de los aceros inoxidables es muy superior a la de los aceros comunes, de seis a ocho veces en el caso de los aceros martensíticos y ferríticos, de ocho a nueve veces en el caso de los aceros auteníticos en el estado recocido y aún más cuando estos han sido endurecidos por trabajo en frío. La soldadura de los aceros inoxidables por los métodos que emplean la resistencia eléctrica del metal, es por tanto efectuada en un tiempo más corto y necesita corriente de menor intensidad que para los aceros comunes, siendo estos métodos particularmente aplicables a los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos.

Todos los métodos someten el material a temperaturas altas,

necesarias para derretir el metal y hacer posible la unión íntima de las partes. Todos los grados son afectados en cierta medida por estas temperaturas, siendo el efecto producido variable según la composición química del acero.

Los aceros inoxidable al cromo-níquel, al estar expuestos a una temperatura comprendida entre 420 y 870°C, sufren una transformación en su microestructura: el carbono se combina con los diferentes elementos de la aleación, sobre todo con el cromo y precipita en forma de carburos en los límites intergranulares, dejando al hierro de las zonas adyacentes desprovisto de protección contra el ataque corrosivo. La importancia práctica de esta transformación depende de las condiciones de trabajo que el equipo tenga que enfrentar, puesto que los carburos precipitados podrían ser atacados selectivamente por ciertos medios corrosivos. En general tal ataque es producido solamente a temperaturas superiores a 500°C de modo que, a temperaturas inferiores el riesgo es menor. También los medios corrosivos activos encontrarán una menor resistencia al ataque en las zonas donde se ha efectuado la precipitación de los carburos. La zona adyacente a la soldadura, en un ancho de 3 a 10 mm, de cada lado de la costura, esta sometida a altas temperaturas durante el proceso de soldar, pasando, al enfriarse, por el intervalo crítico. Como la precipitación de carburos es una función del tiempo, adoptando medios adecuados para la rápida disipación del calor, la importancia del fenómeno se verá reducida. Los métodos de prevención de la precipitación ya fueron comentados.

Los aceros ferríticos al ser soldados endurecen por el crecimiento de grano y la formación de pequeños fragmentos de austenita, -repartidos entre los granos- la cual al enfriarse, se convierte en martensita. De esta manera se vuelve quebradizo a la temperatura ambiente, por lo que no es aconsejable su uso en piezas sometidas a vibraciones. Cabe hacer notar que al aplicarlos a temperaturas de 200 a 250°C recuperan su ductilidad, pero al ser

trabajados entre 400 y 800°C permaneciendo por largo tiempo en este intervalo vuelven a ser quebradizos a la temperatura ambiente.

### II.3.5.1. SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

Son aceros extremadamente tenaces en todas las temperaturas, resistentes a casi todos los agentes corrosivos, mucho más que los martensíticos y los ferríticos; además, no admiten temple y no son magnéticos.

Los aceros inoxidables austeníticos son los más fáciles de soldar de los tres grupos. Sin embargo, algunos tipos de estos aceros, especialmente los de la serie 300 con porcentajes mayores de 0.08 de carbono están expuestos a precipitación de carburos.

Para evitar la formación de carburos es recomendable enfriar rápidamente la soldadura después de haber aplicado a temperaturas debajo de 420°C. Hay dos formas de evitar la precipitación de carburos:

- 1.-Utilizar metal base y electrodos estabilizados con columbio ya que este elemento impide la migración de cromo a los límites de grano.

- 2.-Usar electrodos de diámetro pequeño, emplear bajos amperes, aplicar cordones alternados e ir enfriando al mismo tiempo que se aplica la soldadura.

También se pueden redissolver los carburos llevando la pieza a una temperatura entre 1000 y 1050°C, y enfriar rápidamente a menos de 420°C.

Para la soldadura del acero austenítico, a continuación se dan algunos ejemplos: aceros al cromo níquel tipos AISI 201-202-301-302-304-305-308. Para dichos tipos de acero un electrodo de



extrabajo carbono como el AWS-308 es recomendable, porque se puede usar en todas las posiciones, con características de operación excepcionales y es resistente a la corrosión intercrystalina.

Por todo lo anterior la soldadura con gas inerte es la preferida de todos los trabajos. Por ejemplo, el proceso TIG puede dar todas las garantías de calidad deseadas. Se puede utilizar como primer paso (fondeo) en tubería, obteniendo resultados excepcionales y se rellena con electrodos, o bien para espesores menores se puede aplicar el TIG por completo llegando a depositar hasta tres capas de cordones delgados.

### II.3.8.2. SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.

Los aceros inoxidable de este grupo, con un contenido de cromo menor del 19%, ofrecen dificultad al soldarlos debido a que después de la soldadura quedan en su estado duro y quebradizo. Estos aceros no contienen níquel, son magnéticos y además tienen propiedad de endurecer con el aire.

Para la soldadura de un acero AISI-410 es aconsejable precalentar el material base a 200°C y mantenerlo estable a esta temperatura para evitar grietas o roturas durante la operación de soldadura, y además recocer el material soldado a una temperatura de 750°C durante una hora, dejándolo enfriar lentamente para que desarrolle al máximo las propiedades de resistencia y ductilidad de la soldadura.

Para soldar aceros del tipo AISI-501-502 en que se requiera alta resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas, es recomendable hacer las mismas operaciones de precalentamiento y postcalentamiento para revenir.

Los aceros inoxidable que contienen de 11 a 24% de cromo o más se caracterizan por ser algo más quebradizos que los aceros de

menor contenido de cromo en su estado recocido. Lo quebradizo no se debe confundir con el endurecimiento. Si los aceros que pertenecen a este grupo se mantienen arriba de los 900°C el tamaño de los granos en la estructura tiende a aumentar y con el aumento viene la fragilidad. El crecimiento de granos en los aceros ferríticos no se puede remediar con tratamiento térmico debido a que no es posible eliminar la fragilidad existente por esta causa.

Otra causa de fragilidad en estos aceros es cuando se le permite un enfriamiento lento desde 640°C y/o cuando se mantiene en este rango de temperatura.

La mejor forma de evitar las causas es prevenir el aumento del tamaño de grano disminuyendo lo más posible la entrada de calor durante la operación de soldadura y evitar el enfriamiento lento. Dichos aceros son soldables en frío o caliente.

#### II.3.8. CLASIFICACION DE LOS ELECTRODOS PARA ACERO INOXIDABLE.

La designación de material de aporte para la soldadura de aceros inoxidable se basa en el análisis químico del metal de soldadura, y en el tipo de corriente de soldadura a usar. Veamos a continuación cuales son los elementos principales de esta designación. La designación de los electrodos inicia con la letra E, esto significa que el material de aporte es electrodo.

Los números siguientes a las letra E, indican la composición química del metal a soldar. En algunas designaciones se puede ver que la composición química del electrodo, es seguida por una o dos letras, y a veces también con números, por tanto cuando nos encontremos con estos casos, los interpretaremos de la siguiente forma:

E-XXXL = La letra "L" (Low, en inglés), nos indica que el electrodo es de un porcentaje de carbono muy bajo.

E-XXXCb = indica que el electrodo tiene un contenido de Columbio (Niobio), el cual actúa como elemento estabilizador para impedir la corrosión intergranular.

E-XXXMo = para este caso el electrodo contiene molibdeno, lo cual aumenta la resistencia a la corrosión, y favorece la resistencia mecánica en caliente.

E-XXX15 = el tipo de electrodo que viene representado con estos dos números finales, se usará exclusivamente con corriente directa, con el porta electrodo conectado en el polo positivo, o sea, con la polaridad invertida.

E-XXX16 = En este caso el electrodo se puede usar con corriente directa, usando la polaridad invertida, o con corriente alterna.(12)

En la siguiente tabla se presentan las composiciones químicas de algunos electrodos revestidos de acero inoxidable, y resistentes a la corrosión.

TABLA II.4. COMPOSICION QUIMICA DE ALGUNOS ELECTRODOS REVESTIDOS DE ACERO INOXIDABLE Y RESISTENTES A LA CORROSION.

| Electrodos | Composicion Quimica en % |           |           |     |      |      |      |           |          |         |
|------------|--------------------------|-----------|-----------|-----|------|------|------|-----------|----------|---------|
|            | Clas.AWS                 | C         | Cr        | Ni  | Mn   | Si   | P    | B         | Mo       | Cb+Ta   |
| E-308      | 0.08                     | 18.0-21.0 | 9.0-11.0  | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-308L     | 0.04                     | 18.0-21.0 | 9.0-11.0  | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-309      | 0.15                     | 22.0-25.0 | 12.0-14.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-309Cb    | 0.12                     | 22.0-25.0 | 12.0-14.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-309Mo    | 0.12                     | 22.0-25.0 | 12.0-14.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 2.0-3.0   | -        | -       |
| E-310      | 0.20                     | 25.0-28.0 | 20.0-22.5 | 2.5 | 0.75 | 0.03 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-310Cb    | 0.12                     | 25.0-28.0 | 20.0-22.5 | 2.5 | 0.75 | 0.03 | 0.03 | -         | -        | 0.070   |
| E-310Mo    | 0.12                     | 25.0-28.0 | 20.0-22.5 | 2.5 | 0.75 | 0.03 | 0.03 | 2.0-3.0   | -        | -       |
| E-312      | 0.15                     | 28.0-32.0 | 8.0-10.5  | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-316      | 0.08                     | 17.0-20.0 | 11.0-14.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 2.0-2.5   | -        | -       |
| E-316L     | 0.04                     | 17.0-20.0 | 11.0-14.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 2.0-2.5   | -        | -       |
| E-317      | 0.08                     | 18.0-21.0 | 12.0-14.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 3.0-4.0   | -        | -       |
| E-318      | 0.08                     | 17.0-20.0 | 11.0-14.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 2.0-2.5   | 1.0max.  | -       |
| E-320      | 0.07                     | 19.0-21.0 | 32.0-36.0 | 2.5 | 0.60 | 0.04 | 0.03 | 2.0-3.0   | 1.0max.  | -       |
| E-330      | 0.25                     | 14.0-17.0 | 33.0-37.0 | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-347      | 0.08                     | 18.0-21.0 | 9.0-11.0  | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | 1.0max. |
| E-349      | 0.13                     | 18.0-21.0 | 8.0-10.0  | 2.5 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 0.35-0.65 | 0.75-1.2 | -       |
| E-410      | 0.12                     | 11.0-13.5 | -0.60     | 1.0 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-430      | 0.10                     | 15.0-18.0 | -0.60     | 1.0 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | -         | -        | -       |
| E-502      | 0.10                     | 4.0-6.0   | -0.40     | 1.0 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 0.45-0.65 | -        | -       |
| E-505      | 0.10                     | 8.0-10.5  | -0.40     | 1.0 | 0.90 | 0.04 | 0.03 | 0.85-1.20 | -        | -       |

## II.4. ALUMINIO.

### II.4.1. GENERALIDADES.

Abunda mucho en la naturaleza combinado, constituye el 7.5% de la corteza terrestre. Esta presente en las arcillas, los feldespatos, las micas, las alúminas, etc., su principal mena es la bauxita, de la que se obtiene por fusión electrolítica.

Se obtiene por electrólisis de la bauxita en criolita fundida.

Es un metal blanco brillante con matiz ligeramente azulado, de estructura fibrosa, blando, muy ligero. Punto de fusión,  $658^{\circ}\text{C}$ . Es muy dúctil y maleable, pudiendo obtenerse en hilos y hojas, como el oro. El aluminio tiene una gran conductividad térmica y eléctrica. Las resistencias mecánicas dependen del grado de pureza: cuanto más lo es, disminuyen la resistencia y dureza y aumenta el alargamiento.

La mejor temperatura para laminación en caliente es alrededor de los  $400^{\circ}\text{C}$ , y de la colada,  $700^{\circ}\text{C}$ .

El aluminio puede soldarse con soplete o eléctricamente, debiéndose emplear fundentes para eliminar la capa de óxido, con sales halogenadas de los metales alcalino-térreos y metal de soldar muy flúido a base de aluminio, cobre, níquel, manganeso, estaño, etc., a  $540-630^{\circ}\text{C}$ . La soldadura poco flúida no contiene aluminio y son a base de zinc o estaño, con cadmio, plomo y bismuto a temperatura de  $150-450^{\circ}\text{C}$ . Las soldaduras no son muy resistentes a la corrosión.

Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de trabajo; se puede fundir mediante cualquier método conocido y vaciado, laminado a cualquier espesor deseado, estampado, estirado, roiado, forjado, y extruido a casi cualquier forma imaginable.

El aluminio como se usa en el comercio, tiene una pureza de cerca de 99% y el resto es silicio y hierro. Tiene una estructura cúbica de cara centrada y una densidad de  $2.70\text{g/cm}^3$ . Su resistencia a la corrosión es buena, excepto ante las soluciones alcalinas fuertes. Su resistencia a la corrosión proviene de la formación natural de una capa de óxido. Esta resistencia del aluminio y sus aleaciones a la corrosión se puede mejorar con el anodizado. Este es un proceso electroquímico en el que se desarrolla sobre la superficie de aluminio una capa adherente de óxido. El espesor y la uniformidad de la capa de óxido es mucho mayor que los naturales y además se puede teñir para producir efectos decorativos interesantes.

El aluminio no produce chispas y no es magnético. Sus características amagnéticas lo hacen útil en aplicaciones de protección eléctrica, mientras que su capacidad de no producir chispazos lo hacen menos peligroso en la proximidad de sustancias inflamables o explosivas. El aluminio también tiene una conductividad eléctrica excelente y se usa como conductor eléctrico. Sin embargo, en base a volumen su conductividad solamente es el 61% de la del cobre.

El aluminio tampoco es tóxico y esto implica su utilización en utensilios de cocina, en depósitos de agua y para envolver alimentos (en forma de hojas de aluminio), equipo de manejo y almacenamiento de alimentos y agentes químicos, así como en ensamblajes soldados.

Uno de los inconvenientes importantes del aluminio y sus aleaciones es que tienen una resistencia pobre al desgaste en aplicaciones donde hay contacto de metal a metal. La resistencia al desgaste de las aleaciones de aluminio se puede mejorar mucho dándoles un recubrimiento duro. Esto se hace con un procedimiento electroquímico semejante a la anodización, excepto que la capa que se obtiene es mucho más gruesa y dura. Se proporciona una capa como de cerámica relativamente gruesa (de 0.50 a 0.25mm) que se enlaza de modo integral con el sustrato metálico.

El aluminio puro en el comercio se utiliza principalmente en forma de hojas, alambre y como pigmento para pintura. El aluminio puro tiene una resistencia a la tensión de alrededor de 12,000 psi. Se puede incrementar este valor (más bien bajo), por tres medios principales:

1. Endurecimiento por deformación producida en frío.
2. Incremento de la resistencia de la solución sólida por aleación.
3. Endurecimiento por precipitación (en algunas).

El aluminio y sus aleaciones se pueden trabajar en frío con facilidad para mejorar su resistencia, aunque al incrementarse la resistencia hay una disminución correspondiente de la ductilidad. La aleación es otro mecanismo que se puede utilizar para incrementar los niveles de resistencia, este mecanismo se puede usar individualmente o en combinación para lograr los diversos niveles apropiados. Los elementos principales de aleación que se usan con el aluminio son cobre, silicio, magnesio, zinc, manganeso y cromo. (13)

#### II.4.2. CLASIFICACION.

##### II.4.2.1 SISTEMA DE DESIGNACION DE ALEACIONES FORJADAS.

La designación del aluminio forjado y de las aleaciones forjadas al aluminio fue estandarizada por The Aluminum Association. Consta de un sistema de numeración de cuatro dígitos. El primero indica el grupo de aleación (TABLA II.5.), el segundo señala el cambio de la aleación original o límites de impureza; el cero se utiliza para la aleación original, y los enteros del 1 al 9 indican las modificaciones de la aleación. En el grupo lxxx para

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 de 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.

TABLA II.5. DESIGNACIÓN PARA LOS GRUPOS DE ALEACIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO.\*

| NÚMERO DE ASOCIACIÓN DE ALUMINIO. | ELEMENTO DE ALEACIÓN.    |
|-----------------------------------|--------------------------|
| 1xxx                              | Aluminio, 99% y mayores. |
| 2xxx                              | Cobre.                   |
| 3xxx                              | Manganeso.               |
| 4xxx                              | Silicio.                 |
| 5xxx                              | Magnesio.                |
| 6xxx                              | Magnesio y silicio.      |
| 7xxx                              | Zinc.                    |
| 8xxx                              | Otro elemento.           |
| 9xxx                              | Series no utilizadas.    |

\* Fuente: The Aluminum Association.

#### II.4.2.2. SISTEMA DE DESIGNACION PARA ALEACIONES DE ALUMINIO COLADO.

La designación de la composición de las aleaciones coladas es un poco diferente y en general, consiste en una designación de dos o tres dígitos, como las que se muestran en la tabla (II.8.).

TABLA II.6. COMPOSICIONES NOMINALES DE GRUPOS SELECTOS DE  
 ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO.

| Almoxar | Cu   | Si      | Fe   | Mn   | Mg   | Zn                      | Cr   | Ni  | Otros   |
|---------|------|---------|------|------|------|-------------------------|------|-----|---------|
| IC      | 0.05 | 0.15    | 0.15 | 0.1  | 0.01 | Max. de Impurezas 0.10% | 0.01 | -   | -       |
| 1050    | 0.05 | 0.25    | 0.4  | 0.05 | 0.05 | 0.05                    | 0.01 | -   | TI 0.01 |
| 1100    | 0.2  | 51 + Fe | 1    | 0.05 | -    | 0.10                    | -    | -   | -       |
| 2014    | 4.4  | 0.9     | 1    | 0.8  | 0.5  | 0.25                    | 0.10 | -   | TI 0.15 |
| 2018    | 4.3  | 0.5     | 1    | 0.2  | 0.3  | 0.25                    | 0.10 | 2   | -       |
| 2024    | 4.3  | 0.5     | 1    | 0.5  | 1.5  | 0.25                    | 0.10 | -   | -       |
| 2118    | 2.8  | 0.8     | 1    | 0.2  | 0.1  | 0.25                    | 0.10 | -   | -       |
| 2418    | 1.3  | 0.35    | 1.1  | 0.1  | 1.5  | 0.25                    | 0.10 | 1   | TI 0.01 |
| 3003    | 0.2  | 0.4     | 0.1  | 1.2  | -    | 0.10                    | -    | -   | -       |
| 3004    | 0.25 | 0.1     | 0.7  | 1.2  | 1    | 0.25                    | -    | -   | -       |
| 4032    | 0.9  | 12.3    | 1    | -    | 1    | 0.25                    | 0.10 | 0.9 | -       |
| 4033    | 0.7  | 5.0     | 0.4  | 0.05 | 0.05 | 0.10                    | -    | -   | TI 0.10 |
| 4047    | 0.2  | 0.2     | 0.2  | 0.1  | 0.1  | 0.10                    | -    | -   | -       |
| 5055    | 0.2  | 0.4     | 0.3  | 0.10 | 0.8  | 0.25                    | 0.10 | -   | -       |
| 5057    | 0.1  | 51 + Fe | 0.45 | 0.1  | 2.5  | 0.10                    | 0.25 | -   | -       |
| 5058    | 0.1  | 0.3     | 0.4  | 0.12 | 5    | 0.10                    | 0.13 | -   | -       |
| 5058    | 0.1  | 0.4     | 0.5  | 0.5  | 4    | 0.25                    | 0.15 | -   | TI 0.15 |
| 5148    | 0.1  | 51 + Fe | 0.45 | 0.1  | 1.5  | 0.20                    | 0.25 | -   | TI 0.10 |
| 5148    | 0.1  | 51 + Fe | 0.40 | 0.12 | 1.1  | 0.10                    | 0.13 | -   | TI 0.10 |
| 5148    | 0.1  | 51 + Fe | 0.40 | 0.12 | 1.1  | 0.10                    | 0.13 | -   | TI 0.10 |
| 5148    | 0.2  | 51 + Fe | 0.40 | 0.12 | 5    | 0.25                    | 0.13 | -   | TI 0.20 |
| 5554    | 0.1  | 51 + Fe | 0.40 | 0.15 | 2.7  | 0.25                    | 0.13 | -   | TI 0.12 |
| 5554    | 0.1  | 51 + Fe | 0.40 | 0.15 | 5    | 0.25                    | 0.13 | -   | TI 0.12 |
| 5657    | 0.04 | 51 + Fe | 0.40 | 0.01 | 2.5  | 0.10                    | 0.25 | -   | -       |
| 6061    | 0.27 | 0.8     | 0.7  | 0.15 | 1    | 0.25                    | 0.25 | -   | TI 0.15 |
| 6061    | 0.15 | 0.8     | 0.15 | 0.10 | 0.42 | 0.25                    | 0.25 | -   | TI 0.10 |
| 6152    | 0.15 | 0.8     | 0.15 | 0.10 | 0.42 | 0.25                    | 0.25 | -   | TI 0.10 |
| 6152    | 0.1  | 0.4     | 0.5  | -    | 0.35 | 1                       | 0.25 | -   | TI 0.11 |
| 6153    | 0.1  | 0.4     | 0.5  | -    | 0.35 | 1                       | 0.25 | -   | TI 0.11 |
| 6461    | 0.2  | 0.4     | 0.15 | 0.05 | 0.41 | -                       | -    | -   | -       |
| 6461    | 0.21 | 0.1     | 0.4  | 0.10 | 0.4  | 0.10                    | -    | -   | -       |
| 7075    | 1.4  | 0.5     | 0.7  | 0.30 | 2.5  | 5.6                     | 0.3  | -   | TI 0.20 |
| 7075    | 0.45 | 0.4     | 0.4  | 0.3  | 1.4  | 1.5                     | -    | -   | TI 0.20 |
| 7178    | 2.8  | 0.3     | 0.4  | 0.2  | 2.7  | 4.4                     | 0.15 | -   | TI 0.10 |
| 7178    | 1.2  | 0.5     | 0.1  | 0.1  | 2.1  | 4.4                     | 0.15 | -   | TI 0.10 |
| 7377    | 1.2  | 0.5     | -    | -    | -    | -                       | -    | -   | -       |



TABLA II.7.

PROPIEDADES MECANICAS TÍPICAS DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO.

| Aleación, condición | Resistencia de tensión (psi)~ | Resistencia de fluencia (psi)~ | Elongación (% en 2 in.) | Dureza Brinell (500-Kg de carga, esfera de 10 mm) | Resistencia al cortante (psi)~ |
|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---|--------------------------------|
| EC-0                | 12000                         | 4000                           | -                       | -   | 8000                           |
| EC-H19              | 27000                         | 24000                          | -                       | -   | 15000                          |
| 2EC-T6              | 32000                         | 9000                           | 19                      | -   | -                              |
| 2EC-T64             | 17000                         | 9000                           | 24                      | -   | -                              |
| 1060-0              | 10000                         | 4000                           | 45                      | 19  | 7000                           |
| 1060-H18            | 19000                         | 18000                          | 10                      | 35  | 11000                          |
| 1100-0              | 13000                         | 5000                           | 45                      | 23  | 9000                           |
| 1100-H18            | 24000                         | 22000                          | 15                      | 44  | 13000                          |
| 2011-T3             | 55000                         | 43000                          | 15                      | 95  | 32000                          |
| 2011-T6             | 57000                         | 39000                          | 17                      | 97  | 34000                          |
| 2011-T8             | 59000                         | 45000                          | 12                      | 100   | 35000                          |
| 2014-0              | 27000                         | 14000                          | 18                      | 45  | 18000                          |
| 2014-T4             | 62000                         | 42000                          | 20                      | 105   | 38000                          |
| 2014-T6             | 70000                         | 60000                          | 13                      | 135   | 42000                          |
| 2017-0              | 26000                         | 10000                          | 22                      | 45  | 18000                          |
| 2017-T4             | 62000                         | 40000                          | 22                      | 105   | 38000                          |
| 2024-0              | 27000                         | 11000                          | 22                      | 47  | 18000                          |
| 2024-T3             | 70000                         | 50000                          | 20                      | 120   | 41000                          |
| 2024-T36            | 72000                         | 57000                          | 15                      | 130   | 42000                          |
| 2024-T4             | 68000                         | 47000                          | 19                      | 120   | 41000                          |
| 2024-T81            | 70000                         | 65000                          | 10                      | 128   | 43000                          |
| 2024-T86            | 75000                         | 71000                          | 8                       | 135   | 45000                          |
| 6061-0              | 18000                         | 8000                           | 30                      | 30  | -                              |
| 6061-T6             | 45000                         | 40000                          | 12                      | 95  | -                              |
| 7075-0              | 33000                         | 15000                          | 16                      | -   | -                              |
| 7075-T6             | 83000                         | 73000                          | 11                      | -   | -                              |
| 7178-0              | 33000                         | 15000                          | 16                      | 60  | -                              |
| 7178-T6             | 88000                         | 78000                          | 10                      | 160   | -                              |

~Multiplicar por 6.9 X 10E-3 para obtener MPa.

TABLA II.8. COMPOSICIONES NOMINALES DE VARIAS ALEACIONES DE ALUMINIO COLADO

% de elementos de aleación

| Aleación | Forma  | Cu  | Fe  | Si   | Mg   | Zn  | Ni  |
|----------|--------|-----|-----|------|------|-----|-----|
| 43       | SC, PM | 0.1 | 0.8 | 5    | 0.05 | 0.2 | 0   |
| 108      | SC     | 4   | 1   | 3    | 0.03 | 0.2 | 0   |
| 112      | SC     | 7   | 1.5 | 1    | 0.07 | 2.2 | 0.3 |
| 113      | SC, PM | 7   | 1.4 | 2    | 0.07 | 2.2 | 0.3 |
| 122      | SC, PM | 10  | 1.5 | 1    | 0.2  | 0.5 | 0.3 |
| 142      | SC, PM | 4   | 0.8 | 0.6  | 1.5  | 0.1 | 2   |
| 195      | SC     | 4.5 | 1   | 1.2  | 0.03 | 0.3 | 0   |
| 212      | SC     | 8   | 1.4 | 1.2  | 0.05 | 0.2 | 0   |
| 214      | SC     | 0.1 | 0.4 | 0.3  | 4    | 0.1 | 0   |
| B214     | SC     | 0.1 | 0.4 | 1.8  | 4    | 0.1 | 0   |
| F214     | SC     | 0.1 | 0.4 | 0.5  | 4    | 0.1 | 0   |
| 220      | SC     | 0.2 | 0.3 | 0.2  | 10   | 0.1 | 0   |
| 319      | SC     | 3.5 | 1.2 | 6.3  | 0.5  | 1   | 0.5 |
| 355      | SC, PM | 1.3 | 0.6 | 5    | 0.5  | 0.2 | 0   |
| A355     | SC     | 1.5 | 0.6 | 5    | 0.5  | 0.1 | 0.8 |
| 356      | SC, PM | 0.2 | 0.5 | 7    | 0.3  | 0.2 | 0   |
| A612     | SC     | 0.5 | 0.5 | 0.15 | 0.7  | 6.5 | 0   |
| 750      | SC, PM | 1   | 0.7 | 0.7  | 0    | 0   | 1   |
| A750     | SC, PM | 1   | 0.7 | 2.5  | 0    | 0   | 0.5 |
| B750     | SC, PM | 2   | 0.7 | 0.4  | 0.75 | 0   | 1.2 |

#### II.4.2.3. DESIGNACION DE TRATAMIENTO TERMICO.

Esta designación sigue a la de aleación y se halla separada de ésta por un guión. La designación fue hecha por The Aluminum Association Temper Designation System; se utiliza para el aluminio y aleaciones al aluminio forjadas y fundidas. Se basa en las secuencias de los tratamientos básicos utilizados para producir diversos resultados. El sistema estándar de designación consta de una letra que indica el tratamiento básico. Excepto para las piezas en condición de recocido y aquellas en condición de fabricado sin tratamiento térmico se define más específicamente por la adición de uno o más dígitos. Hay cuatro condiciones básicas: F, condición de fabricado; O, recocido; H, endurecimiento por deformación y T, tratado térmicamente.

-F: Condición de fabricado. Aplicado a productos que adquieren algún endurecimiento como resultado de las operaciones de manufactura. No hay garantía de propiedades mecánicas.

-O: Recocido, recristalizado. Es la condición más suave de los productos de aleación forjados.

-H: Endurecido por deformación. Se aplica a productos susceptibles de incrementar sus propiedades mecánicas mediante trabajado en frío solamente. La -H siempre es seguida por dos o más dígitos. El primero indica la combinación específica de las operaciones básicas como sigue:

-H1: Endurecido por deformación solamente. El segundo dígito designa la cantidad de trabajo en frío realizada, cuyo número 8 representa la condición de dureza total; por tanto, una dureza media es -H14, una dureza de un cuarto es -H12, etc. Los estados extraduros se designan con el 9. Un tercer dígito se emplea a menudo para indicar el grado de control del proceso o para identificar un conjunto de propiedades mecánicas específico.

-H2: Endurecimiento por deformación y luego recocido

parcialmente. Se aplica a productos trabajados en frío para obtener una mayor dureza y luego mediante el mismo método que los de la serie -H1.

-H3: Endurecido por deformación y luego estabilizado. Se aplica sólo a aleaciones que contienen magnesio a las cuales se da un calentamiento a baja temperatura para estabilizar sus propiedades. El grado de endurecimiento por deformación remanente después del tratamiento de estabilización se indica en la forma usual por uno o más dígitos.

-W: Tratados térmicamente en solución. Es un proceso inestable que se aplica sólo a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico en solución. Debido al envejecimiento natural, esta designación es específica sólo cuando se indica el período de envejecimiento; por ejemplo, 2024-W(1/2 hr).

-T: Tratado térmicamente. Se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementaria, para producir propiedades estables. La -T sigue de los números 2 al 10, designando una combinación específica de operaciones básicas. Las variaciones deliberadas de las condiciones, que dan lugar a características significativamente distintas para el producto, se indican añadiendo uno o más dígitos a la designación básica:

-T2: Recocido(sólo productos fundidos).

-T3: Tratados térmicamente a solución y luego trabajada en frío.

-T4: Tratados térmicamente a solución y envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estable.

-T5: Sólo envejecido artificialmente. Se aplica a productos envejecidos artificialmente después de un proceso de fabricación a alta temperatura seguido por enfriamiento rápido, tal como fundición o extrusión.

-T6: Tratado térmicamente y en solución luego envejecida artificialmente.

-T7: Tratado térmicamente y en solución luego estabilizada: se aplica a productos en que las condiciones de temperatura y tiempo para estabilización son tales que la aleación se lleva más allá del punto de dureza máxima, proporcionando control de crecimiento y/o esfuerzos residuales.

-T8: Tratados térmicamente, en solución trabajo en frío y luego envejecida en forma artificial.

-T9: Tratados térmicamente en solución, envejecida artificialmente y luego trabajado en frío.

-T10: Tratados térmicamente y luego trabajada en frío, lo mismo que en -T5, pero seguida por trabajado en frío a fin de mejorar la resistencia. (8)

## CAPITULO TRES

### III. REVESTIMIENTOS CON ACEROS INOXIDABLES.

El uso de medios adecuados para unir diferentes metales se puede citar desde la antigüedad, Antes de Cristo. El hombre a través de los tiempos ha realizado avances en la combinación de las propiedades de los metales para obtener una composición que es superior a cualquiera de los componentes que integran a la misma de una o más formas. A principios de este siglo, se desarrolló un nuevo trabajo de revestimiento que se hace con aceros inoxidable junto con otros materiales. Se desarrolló en aceros inoxidable porque se necesita un material que sea más resistente a la corrosión y que sea menos susceptible a presentar oxidación en su superficie como es el caso de los aceros de bajo carbono. La ventaja del revestimiento de aceros al carbono con aceros inoxidable será pronto reconocida para la edición en breve de patentes, para el desarrollo de equipo con este tipo de materiales.

#### III.1. TECNICAS DE UNION.

Existen varios métodos de unión que se llevan a efecto con la intención de unir aceros de bajo carbono con aceros inoxidable, los cuales se han desarrollado en los últimos años. Uno de estos consistía en colocar dos placas de acero inoxidable que serían soldadas juntas en el interior de un molde. Hecho esto se vierte el acero fundido repartiendo alrededor de las placas. La masa solidificada sera después rolada en caliente a un espesor conveniente y las áreas soldadas de las placas inoxidable se cortarán posteriormente. Esto entonces provee dos únicas placas cubiertas, esto es, dos placas que constan de acero inoxidable en una cara y acero de bajo carbono en la otra. La doble cubierta que es inoxidable en uno u otro lado del acero de bajo contenido de carbono, se produce de manera similar; excepto que el

posicionamiento de las placas inoxidable es en el interior del molde y el acero derretido se vierte en medio de ellas.

Otro método usado es uno en el cual una aleación para producir aceros inoxidable es colocada sobre una placa de acero y se soldan materiales granulados en la superficie de la placa por medio de arcos eléctricos. El compuesto solidificado es reducido entonces a un espesor conveniente por laminado. Otro método similar usado hoy en día, emplea arcos eléctricos para derretir la placa de acero al carbono en una de las caras, así como, lo requieren las ferroaleaciones y otros metales para formar los aceros inoxidable. El molde es usado verticalmente alrededor de la placa de acero al carbono para retener el material fundido, hasta que la solidificación ocurra. En este método, así como, en el primer procedimiento se emplearía normalmente escoria protectora.

Quizas el método más comunmente usado es uno que emplea un paquete de montaje. Al producir un material revestido por un lado, en este método las dos placas de acero inoxidable son colocadas juntas. A partir de esto se coloca un compuesto que se vierte en medio de las caras en contacto de las placas previamente unidas. La parte compuesta consta de un material inerte adecuado para evitar la unión en las caras del inoxidable, como el óxido de cromo. Se van colocando las placas de acero al carbono y van siendo expuestas en las caras del acero inoxidable como se puede observar en la figura (III.1.). Las orillas del paquete son soldadas por dos razones. Soldando se tiende a minimizar la oxidación en las superficies al ser unidas y protegemos los elementos componentes para un proceso adicional. Después de soldar el ensamble, es calentado y laminado en caliente lo suficiente para llevar a cabo la unión. Una vez que las placas han sido unidas, las orillas soldadas pueden ser removidas posteriormente y dando como resultado un material revestido con menores dimensiones al final.





FIG. III.1. Esquema del espacuetamiento y ensamble para obtener un revestimiento sencillo con acero inoxidable y acero al carbono.

En la producción de un doble material revestido por este método, las placas de acero inoxidable son colocadas en uno u otro lado de la placa de acero al carbono. El montaje es totalmente soldado -usualmente por el empleo de acero inoxidable en la placa secundaria-, esto se hace alrededor de las cuatro orillas de la placa de acero al carbono para llenar el espacio entre las placas inoxidables, como se observa en la figura (III.2.). Por otra parte las placas de inoxidable son más anchas y largas que la placa de acero al carbono, lo que permite un espacio adicional para la expansión y movimiento durante el calentamiento y laminado. Por otro lado en virtud del alto contenido de cromo del acero inoxidable, hay una fuerte tendencia para la formación de óxido de cromo en la superficie al estar a una alta temperatura. Este deteriora severamente la unión, dado que dicha oxidación en la superficie a unir no permite el enlace de los átomos de ambos materiales. En un esfuerzo para prevenir esta formación de óxido de cromo, hay varias técnicas desarrolladas y descritas en patentes. En una de estas, la superficie del inoxidable es niquelada. En otra, en el paquete es evacuada toda la atmósfera oxidante por una baja presión residual después de soldar. (25)

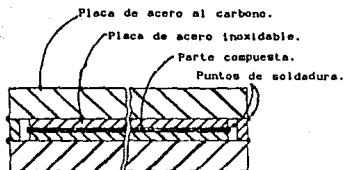


FIG. III.2. Esquema del empaquetamiento y ensamble para obtener un doble revestimiento con acero inoxidable y acero al carbono.

Si se desea alcanzar una óptima unión, es importante que toda la superficie a ser unida se limpie y quede tan libre de óxido como sea posible. También, el ensamble debe estar a la temperatura conveniente del laminado. Una reducción suficiente debe ser tomada en cuenta en el paso de laminado, al producirse en la superficie de contacto y un rompimiento adecuado sobre la película de óxido que se pueda haber formado.

Otra técnica para el revestimiento de aceros inoxidables con acero al carbono es la de soldadura con latón (brazing) al vacío. Con esta técnica la aleación de soldadura es colocada en medio de las superficies del inoxidable y del acero al carbono, a ser unidas. El ensamble es soldado alrededor de todas las orillas, evacuando y calentando en vacío para llevar a cabo la unión. El vacío actúa para crear un contacto uniforme en medio del revestimiento y los metales base, asegurando así una unión continua de las áreas. Esto también es útil en la remoción de cualquier residuo de oxígeno, el cual todavía permanece o evoluciona en las superficies al ser unidas. En la operación del

ensamble, las placas que generalmente son usadas en estas, requieren una reducción anterior para llevar a cabo la unión y al final obtener el espesor deseado.

Otro tipo diferente de técnica que es usada para unir aceros inoxidables con acero al carbono u otros metales y aleaciones es la que emplea explosivos. La figura (III.3.) muestra un esbozo, observando en ella el arreglo para el uso de esta técnica de unión. Con esta técnica el metal revestido es retenido y controlado a distancia desde la base del metal y la carga explosiva es detonada. Esto conduce a que las superficies se unan en un contacto más íntimo y la unión se lleve a cabo favorablemente en toda la superficie. En esta técnica no es necesario calentar los materiales anteriormente a la unión o el uso de algún intermediario entre el revestimiento y los metales base.

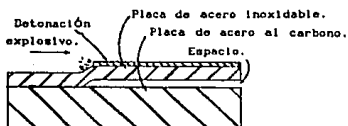


FIG. III.3. Esquema ilustrativo donde se observa como se realiza la técnica de revestimiento con explosivos.

Algunas técnicas para unir aceros inoxidables con aceros al carbono u otras aleaciones fueron brevemente descritas. Varias de estas técnicas son comercialmente empleadas en la producción de

revestimientos inoxidables. El objetivo de este trabajo no es detallar cada una de las técnicas, si no, hacer un bosquejo de las mismas, esta información puede ser generalmente obtenida de la literatura y también las técnicas no están necesariamente limitadas en la producción de revestimientos inoxidables. Estas pueden ser usadas para la producción de varios materiales revestidos. Este capítulo se concreta únicamente a los revestimientos inoxidables.

### III.1.1. TIPOS DE PRODUCTOS.

Los aceros revestidos con inoxidables están generalmente disponibles como placas, láminas y rollos. Ambos revestimientos el sencillo (revestimiento por un lado) y el doble (revestimiento por ambos lados) son disponibles, sin embargo, en el caso del revestimiento sencillo es más común encontrarlo en estas presentaciones. Por otra parte el revestimiento doble es más común en láminas.

La placa revestida de acero inoxidable esta comercialmente disponible en muchos grados. La composición de los aceros inoxidables esta generalmente dada por el uso del revestimiento. Existen grados y niveles de calidad en los cuales están disponibles. Estos son mencionados en la tabla (III.1.).

TABLA III.1. TIPOS DE ACEROS DE RESPALDO USADOS  
PARA PRODUCIR ACEROS INOXIDABLES RECUBIERTOS.

| ACEROS |          | EFUERZA A<br>TENSIL,<br>PSI | FLETO DE<br>REDENCHA<br>MIL/PUL | ELONGACION<br>EN 1/4"<br>MIL. % | GRABONO<br>MIL. 50<br>PLACA 250. | Mn<br>Max. % | SI        | Mo        | Cr        |
|--------|----------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| A 285  | GRADO C  | 55 45000                    | 30000                           | 24                              |                                  | 0.80         |           |           |           |
| A 285  | GRADO A  | 45 35000                    | 20000                           | 29                              | 0.17                             | 0.80         |           |           |           |
|        | GRADO B  | 50 45000                    | 20000                           | 27                              | 0.22                             | 0.80         |           |           |           |
|        | GRADO C  | 55 45000                    | 30000                           | 25                              | 0.30                             | 0.80         |           |           |           |
| A 201  | GRADO A  | 55 45000                    | 30000                           | 25                              | 0.24                             | 0.80         |           |           |           |
|        | GRADO B  | 60 72000                    | 32000                           | 27                              | 0.27                             | 0.80         |           |           |           |
| A 212  | GRADO A  | 45 77000                    | 35000                           | 21                              | 0.31                             | 0.90         |           |           |           |
|        | GRADO B  | 70 85000                    | 38000                           | 19                              | 0.33                             | 0.90         |           |           |           |
| A 515  | GRADO 55 | 55 45000                    | 30000                           | 25                              | 0.22                             | 0.90         |           |           |           |
|        | GRADO 60 | 60 72000                    | 32000                           | 23                              | 0.27                             | 0.90         |           |           |           |
|        | GRADO 65 | 65 77000                    | 35000                           | 21                              | 0.31                             | 0.90         |           |           |           |
|        | GRADO 70 | 70 85000                    | 38000                           | 19                              | 0.33                             | 0.90         |           |           |           |
| A 201  | GRADO A  | 65 77000                    | 37000                           | 21                              | 0.17                             | 0.80         | 2.00-2.75 |           |           |
|        | GRADO B  | 70 85000                    | 40000                           | 19                              | 0.20                             | 0.80         | 2.00-2.75 |           |           |
|        | GRADO C  | 85 90000                    | 43000                           | 18                              | 0.23                             | 0.80         | 2.00-2.75 |           |           |
| A 204  | GRADO A  | 65 77000                    | 37000                           | 21                              | 0.21                             | 0.90         |           | 0.40-0.60 |           |
|        | GRADO B  | 70 85000                    | 40000                           | 19                              | 0.23                             | 0.90         |           | 0.40-0.60 |           |
|        | GRADO C  | 75 90000                    | 43000                           | 18                              | 0.24                             | 0.80         |           | 0.40-0.60 |           |
| A 187  | GRADO A  | 65 77000                    | 40000                           | 20                              | 0.21                             | 0.84         |           | 0.40-0.70 | 0.44-0.74 |
|        | GRADO B  | 70 85000                    | 35000                           | 21                              | 0.17                             | 0.89         |           | 0.40-0.70 | 0.75-1.31 |
|        | GRADO C  | 75 90000                    | 35000                           | 23                              | 0.17                             | 0.89         |           | 0.40-0.70 | 0.94-1.36 |
| A 102  | GRADO A  | 75 90000                    | 45000                           | 17                              | 0.23                             | 1.35         |           | 0.41-0.64 |           |
|        | GRADO B  | 80 100000                   | 50000                           | 17                              | 0.23                             | 1.55         |           | 0.41-0.64 |           |

FUERTE: Luken Steel Company.

La cantidad de revestimiento, se expresa como porcentaje del espesor total de la placa, es disponible en espesores desde 5 a 50%. El espesor de revestimiento más extensamente usado es de 10 y 20%. El principal uso de artículos con aceros inoxidable revestidos es para la manufactura de artículos de cocina. En esta aplicación, materiales de doble revestimiento son usados con un porcentaje de aproximadamente 20%. El tipo de acero inoxidable 304 es uno de los más usados para revestir acero de bajo carbono como son los tipos SAE 1006 o 1008 empleados como material base.

### III.1.2. TRATAMIENTO Y FABRICACION.

En el manejo de aceros revestidos con inoxidable es importante el considerar varios factores. Durante el decapado es necesario utilizar soluciones ácidas, las cuales pueden causar el ataque rápido en la base de acero al carbono. Para prevenir esto, se usan técnicas normales de decapado para el acero al carbono pudiendose emplear, por ejemplo, una solución al 10% de ácido sulfúrico con inhibidor a una temperatura de 150-180 °F. Al final el ácido nítrico al 10% puede usarse para pasivar el inoxidable en la superficie. Hidróxido de sodio, así como, desengrasantes son usados para el decapado. La diferencia en el coeficiente de expansión térmica de los dos componentes es muy importante, dicha distorsión puede ocurrir, como resultado del calentamiento y enfriamiento en el proceso de unión. Esto no es del todo común en combinaciones bimetalicas. Estos efectos tienden a minimizarse en el caso de un material con doble revestimiento y donde el material es formado dentro de figuras tales como tanques circulares. La extensión de esta torcedura difiere tanto por los diferentes aceros inoxidable usados, como el material de revestimiento, por que el coeficiente de expansión es diferente. Por ejemplo, los coeficientes de expansión térmica de las series 400 de aceros inoxidable, son mucho más cercanas para aceros al carbono que las de la serie 300.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

El tratamiento térmico puede variar dependiendo de:

- (1) Si se da un trabajo adicional en el proceso o en la fabricación que se lleva a cabo.
- (2) La naturaleza de un proceso adicional posterior y,
- (3) El uso final del producto.

El tratamiento térmico puede ser hecho en favor de un material o del otro o del revestimiento en conjunto, dependiendo del orden de propiedades deseadas en el producto final. Usualmente lo que se busca en el tratamiento es conseguir una óptima resistencia a la corrosión y mejores propiedades mecánicas. Esto es posible al mantener la integridad del acero inoxidable que se usó como revestimiento, por que de estos beneficios el más buscado es el de la resistencia a la corrosión. La migración del carbono puede ocurrir desde la base del metal al revestimiento mismo; esto es una función del tiempo a una elevada temperatura. En el proceso normal al producir el acero recubierto, ocurren pequeñas migraciones, a pesar del corto tiempo durante el cual ocurre la unión, el revestimiento está sobre un rango de temperatura elevado en el que ocurre la significativa migración. En la descripción de los métodos antes mencionados para la fabricación de aceros revestidos, se puede mencionar una técnica usando una placa de níquel en una de las caras del acero inoxidable para prevenir la formación de óxido. El níquel también sirve como una barrera para la migración del carbono.

Cuando se trabaja con aceros inoxidables revestidos, donde el revestimiento es compuesto por un acero inoxidable de la serie 300, es decir, del tipo cromo-níquel, es importante que se tomen algunas precauciones, una de ellas, es que se tome un rango máximo de oxidación para el metal. Si los aceros son calentados en el rango de 800 a 1500°F, esto es importante ya que se recocen totalmente. Si no, puede ocurrir rápidamente un ataque intergranular bajo condiciones corrosivas, por que se presenta la formación de carburos durante el calentamiento sobre este rango.

La fabricación de aceros revestidos con inoxidable puede ser usualmente llevada a cabo de manera similar con acero al carbono, es decir, esto puede ser con trabajo en caliente o en frío para formarlos, curvarlos o cortarlos lo bastante como cualquier acero al carbono. En el corte de una única placa de revestimiento es deseable que el corte se haga del lado del inoxidable. En el corte con flama de oxígeno, el corte debe empezar desde el reverso, del lado del acero al carbono; la presión del oxígeno debe ser baja.

Al soldar el acero revestido con inoxidable, usualmente se hace una ranura primero del lado del acero al carbono. El lado inoxidable es luego ranurado y soldado. Esto es una práctica común al usar soldadura de barra rica con elementos de aleación como los que tiene el revestimiento original. Esto se hace cuando tiende a ocurrir disolución, los altos porcentajes de elementos en el llenado sirven para mantener la composición del revestimiento asegurando así la resistencia a la corrosión y otras propiedades asociadas con el acero inoxidable. El recocido después de soldar puede ser requerido por varias razones dadas, por ejemplo, la formación de carburos. Por otro lado el recocido no es posible cuando se utilizan revestimientos de aceros inoxidables que contienen cobalto o titanio. El metal de aporte o llenado al soldar este tipo de revestimientos contiene igualmente uno de estos elementos. El soldeo puede ser hecho por arco protector de gas o por procesos de arco sumergido.

### III.1.3. USOS Y PROPIEDADES.

El uso de los revestimientos de acero inoxidable sobre aceros al carbono fue establecido por varias razones. Así, al requerir un material de alta aleación con un espesor considerable, como es el caso de los aceros inoxidables, este necesariamente resulta más



caro. Sin embargo puede ser más provechoso, desde el punto de vista del costo, utilizar productos recubiertos que tuvieran alrededor de un 10 a un 20% de acero inoxidable. Actualmente, el ahorro comparado con el costo de los aceros inoxidables sólidos no es grande como podría especularse. Esto resulta del costo adicional involucrado por el proceso mismo de revestimiento. Sin embargo, hay ahorros que pueden justificar el uso. En suma el ahorro depende de un número de factores los cuales incluyen los siguientes puntos:

- 1.-Tipos de aceros inoxidables usados;
- 2.-Tipo y calidad de los aceros usados como respaldos.
- 3.-Porcentaje del espesor, de los aceros inoxidables usados para revestir;
- 4.-Temperatura y porcentaje de deformación necesarios para la unión.

Por supuesto, existen otros factores que considerar. Uno de estos es la elección del acero de respaldo que puede ser prevista por el rango de propiedades mecánicas que aporte dicha elección. Esto nos permite designar la capacidad de utilización de acuerdo al valor del esfuerzo más alto permisible.

Una de las cualidades considerables de los revestimientos de aceros inoxidables con aceros al carbono es usada en la producción de utensilios de cocina. Se encontró uso en esta área, por que dichos revestimientos tienen características de transferencia de calor superiores a la de los aceros inoxidables sólidos. El doble revestimiento es usado en este tipo de aplicación, por que se obtiene a la vez gran resistencia a la corrosión y buena apariencia ofrecida por el acero inoxidable en ambos lados de las superficies. El acero al carbono en el centro actúa horizontalmente como un disipador térmico.

Entre otros usos de los revestimientos de aceros inoxidables en forma de lámina encontramos un gran número en lo referente a las industrias que utilizan procesos químicos, refinerías de aceite e industria alimenticia. Los revestimientos de acero inoxidable pueden ser usados en recipientes a presión donde su uso es seguro, o también pueden ser usados por su valor estético ya que la fina apariencia del acero inoxidable es vista en el exterior del producto terminado.

Los revestimientos de acero inoxidable pueden ser considerados para su aplicación en sitios donde las ventajas del acero inoxidable (por ejemplo su resistencia a la corrosión) sean importantes. Sin embargo, uno debe de ser cuidadoso al asignar cierto valor a las ventajas y desventajas de los revestimientos de acero inoxidable sobre los aceros inoxidables sólidos. De antemano, existen desventajas en el uso de revestimientos de acero inoxidable.

Las propiedades mecánicas de los revestimientos de acero inoxidable son generalmente relacionadas con las propiedades de los componentes individuales. La influencia del acero inoxidable con respecto a la resistencia, por ejemplo, depende del espesor de la capa como un porcentaje del espesor total. Esto generalmente puede ser asumido como el mínimo esfuerzo que esta representado por el del acero de apoyo que se usa en el centro.

El esfuerzo de ligadura del revestimiento de acero inoxidable comercial excede de 20,000 Psi requeridos por las especificaciones de la ASTM, en las normas A-263 y A-264. Esto generalmente es de aproximadamente dos veces este valor.

Con una óptima unión del material este puede ser doblado con el acero inoxidable en tensión o compresión sin efectos adversos.

El radio de los objetos a través del curvado es hecho generalmente entre 1 o 2 veces el espesor dependiendo del espesor utilizado en el revestimiento.

### III.2. REVESTIMIENTOS DE ACERO INOXIDABLE CON ALUMINIO.

El acero inoxidable también es usado como revestimiento para el aluminio. Esto representa una combinación metálica muy interesante. Dicha unión combina, una gran afinidad de limpieza, resistencia a la corrosión, dureza y tenacidad del acero inoxidable con la ligereza y excelentes características térmicas del aluminio.

#### III.2.1. TECNICAS DE UNION.

Esta composición es generalmente producida en placas, láminas, o en rollos formados de la siguiente manera:

- 1.-Limpiando y lijando la superficie a ser unida.
- 2.-Calentando.
- 3.-Laminando.

Los espesores del acero inoxidable y el aluminio son elegidos adecuadamente para una posterior deformación por laminación, la cual es requerida para llevar a cabo la unión, ya que estos determinarán el espesor final. Esto es importante para futuros laminados; una vez alcanzada la unión con las deformaciones requeridas, estas pueden ocasionar endurecimiento por trabajo en los aceros inoxidables. Cuando esto ocurre, ya no pueden ser restablecidas la máxima ductilidad y maleabilidad, por las diferencias en las propiedades de los metales trabajados para

llevar a cabo el material compuesto. La temperatura para el alivio de esfuerzos requerida para el acero inoxidable excede el punto de fusión del aluminio. Por lo tanto dicha temperatura no hace posible el eliminar dichos esfuerzos.

### III.2.2. TRATAMIENTO Y FABRICACION.

El revestimiento de acero inoxidable con el aluminio puede ser bastante grande. Este también puede ser formado por laminado en vacío; obtenido éste, se puede cortar a la dimensión requerida. El acabado en las superficies no presenta usualmente problemas; existen técnicas normales para el pulido que se utilizan en metales sólidos, que pueden ser usadas como abrasivos en forma de cinta o en rueda para el pulido de los revestimientos.

Dentro del control del revestimiento la temperatura es importante, ya que un compuesto intermetálico quebradizo se forma cuando la temperatura es excesiva. Este compuesto intermetálico es el  $FeAl_3$ , el cual se forma rápidamente arriba de  $1000^{\circ} F$ .

Por otro lado los coeficientes de expansión térmica del acero inoxidable y del aluminio son significativamente diferentes. Por lo tanto, como resultado del calentamiento o del enfriamiento, el material se puede deformar considerablemente. En el caso del revestimiento de acero inoxidable con acero al carbono es más factible un simple revestimiento que un doble revestimiento. Estos efectos tienden a ser minimizados cuando el material es conformado en una forma cerrada como lo son los tanques circulares.

Si a altas temperaturas se llegara a generar óxido en la superficie del acero inoxidable, este puede ser removido con el uso de 10% de solución de ácido nítrico calentada aproximadamente

a 130°F, también el óxido puede ser removido calentando ligeramente el material y empleando una operación normal de pulido.

La soldadura del revestimiento de acero inoxidable con el aluminio presenta ciertos problemas. Para lograr una satisfactoria soldadura en la porción del acero inoxidable es importante que no se mezcle aluminio con el acero fundido en dicha porción. Fundamentalmente antes de soldar el acero inoxidable, el aluminio es removido antes de que se agregue el material de aporte.

Una vez que el acero inoxidable fue soldado, el remanente produce ranuras en el aluminio; a causa de las temperaturas relativamente altas para soldar al acero inoxidable, además de la formación del compuesto intermetálico que se forma en el aluminio, dificultando e imposibilitando la unión al efectuar la operación de soldadura. Por esta razón la operación de soldeo se prefiere con temperaturas muy bajas.

### III.2.3. USOS Y PROPIEDADES.

El principal uso de los revestimientos de acero inoxidable con aluminio es en la manufactura de utensilios de cocina. Esta unión se presta para muy buenas aplicaciones, a causa de esto puede ser atractivo y prospero, pues ofrece una superficie limpia y resistente además de tener excelentes propiedades para la transferencia de calor. La figura (III.4.) muestra las características de transferencia de calor de estos revestimientos metálicos en relación con otros materiales. Los datos proporcionados en la figura (III.4.) fueron obtenidos por la colocación de una fuente de calor en el centro de una lámina específica y midiendo la temperatura en una esquina del especimen

en función del tiempo. Todos los especímenes tienen un espesor nominal. Los espesores de las uniones (por lado) varían desde aproximadamente 20% en el caso del centro de acero al carbono, a 25% en el caso del centro de aluminio y aproximadamente del 35% para el caso del centro de cobre. En la figura se puede observar que las uniones del revestimiento de acero inoxidable con aluminio muestran las mejores propiedades térmicas para un buen flujo de calor. Las uniones simples son mejores que las uniones dobles en lo que respecta a este punto. Los revestimientos de acero inoxidable con centros de cobre son similares que los revestimientos dobles de acero inoxidable con aluminio. Esto es más notorio en los espesores de las capas de acero inoxidable, que son más grandes al utilizar cobre como material base. En la figura (III.4.) se incluyen también los revestimientos de acero inoxidable con acero al carbono, los cuales muestran propiedades significativamente mejores que el acero inoxidable sólido.

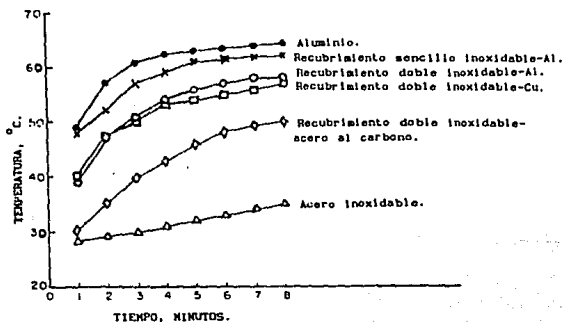


FIG. III.4. Características de transferencia de calor de diferentes materiales.

El esfuerzo máximo de los revestimientos de acero inoxidable con aluminio varía en función del espesor del revestimiento de acero inoxidable. La figura (III.5.) muestra que el esfuerzo a tensión aumenta proporcionalmente con los espesores del revestimiento del acero inoxidable. El valor de la elongación fue establecido para rangos menores que el normal para el aluminio recocido y es aproximadamente similar que el del acero inoxidable recocido. Para el esfuerzo de elongación se encontró que el valor más grande lo obtuvo la placa que la lámina. Los efectos del incremento de endurecimiento por trabajo, aparentemente ocurren como resultado de la evidente operación de unión. El valor de la elongación medido desde el lado del acero inoxidable es un poco más pequeño que el medido por el lado del aluminio del material compuesto.

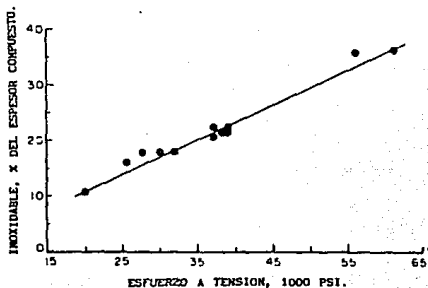


FIG. III.5. Gráfica donde se observa el esfuerzo a la tensión del revestimiento de acero inoxidable sobre el aluminio en función del porcentaje de acero inoxidable en el material compuesto.

El valor del módulo elástico del aluminio revestido de acero inoxidable es más alto que el del aluminio sólido y se aproxima al valor del acero inoxidable sólido, a medida que el % de inoxidable se incrementa en el material compuesto.

Las características de curvado del aluminio revestido de acero inoxidable son generalmente buenas. Este puede ser curvado  $180^\circ$ , alrededor de unos 17 radios o menos con uno u otro lado del acero inoxidable o del aluminio en la superficie externa. Materiales con espesores como de una pulgada pueden ser sujetas para pruebas semejantes.

Los resultados de pruebas hechas en el rango de temperaturas de  $-320^\circ\text{F}$  a  $+320^\circ\text{F}$  muestran propiedades uniformes en el material. Valores de 60 ft-lb pueden ser obtenidos para espesores de placas de  $3/8''$ . Para un espécimen que utiliza una capa delgada de material, su standar nos proporciona un valor más bajo. Dichos valores son favorables para aplicaciones criogénicas.

La figura (III.8.) es una fotomicrografía para una sección de la unión del acero inoxidable y aluminio mostrando la interfase en medio del acero inoxidable y el aluminio. Como se observa dicha sección esta libre de óxidos. Esto es típico de buenas uniones entre los materiales.



FIG. III.8. La fotomicrografía muestra la interfase del revestimiento de acero inoxidable sobre el Al 600X.



En la evaluación de la unión tienen que emplearse severas pruebas. Las pruebas de revestimiento las cuales constan de probetas de 1" de ancho deben soportar de 100lb o más de fuerza, requeridas para provocar la separación.

Se buscan pruebas a través de la fase de unión para la evaluación del producto compuesto, aprovechando que se conoce el valor del esfuerzo de corte del aluminio puro.

Las buenas propiedades eléctricas del aluminio combinadas con las propiedades del acero inoxidable proveen un nuevo y útil producto para el campo de la electricidad.

### III.3. REVESTIMIENTO DE ACERO INOXIDABLE CON COBRE.

Los procesos de revestimientos de acero inoxidable con cobre poseen los mismos atributos de los revestimientos de acero inoxidable con aluminio. Los aceros inoxidables ofrecen limpieza, resistencia a la oxidación, resistencia a esfuerzos y dureza. El cobre ofrece excelentes características de transferencia de calor, por lo que este revestimiento de acero inoxidable con cobre encuentra semejanza al del revestimiento de acero inoxidable con aluminio.

#### III.3.1 TECNICAS DE UNION.

Los revestimientos de acero inoxidable con cobre pueden ser fabricados por las mismas técnicas descritas anteriormente cuando discutimos los otros revestimientos de acero inoxidable. Una técnica usada es la técnica del sandwich, en la cual, la placa de acero inoxidable es colocada en uno y otro lado del cobre y el

ensamble es soldado usando una barra o electrodo de acero inoxidable, alrededor de las cuatro orillas de la placa de cobre. El espacio entre las placas laterales y la placa de cobre es dejado para permitir la expansión durante el laminado en caliente.

Las experiencias muestran que el cobre no debe tener contacto con el oxígeno del medio ambiente para una unión satisfactoria.

Como previamente hicimos notar, existe una fuerte tendencia para que óxidos de cromo se formen en la superficie del acero inoxidable si el oxígeno aparece. Al usar cobre, el contenido de oxígeno en la atmósfera debe de ser bajo, ya que al soldar el empaquetamiento se debe evacuar el oxígeno residente por medio de una presión residual.

Si el revestimiento de acero inoxidable con cobre es hecho por medio de un fuerte estirado, es importante que el tamaño de grano del material base, en este caso el cobre, sea relativamente fino. De otro modo, originará una superficie irregular indeseable, denominada "piel de naranja", la cual se presenta en la laminación del artículo. Una "piel de naranja" muy fuerte, no podrá ser removida por procedimientos sencillos; haciendo así inútil al artículo.

Un apropiado control en el tamaño de grano puede ser de gran dificultad debido a las temperaturas de laminación en caliente utilizadas y los procesos de recocido para el material compuesto. Estos mismos elementos pueden ser utilizados para controlar el tamaño de grano. Algunas consideraciones económicas excluyen a varios de ellos.

### III.3.2. TRATAMIENTO Y FABRICACION.

En las discusiones de los otros revestimientos de acero inoxidable se ha puntualizado lo siguiente; las distorsiones ocasionadas por calentamientos excesivos se deben a las diferencias entre los coeficientes de dilatación térmica de los dos componentes. En el caso del revestimiento de acero inoxidable con cobre, en el cual, se usa un acero inoxidable a base de cromo-níquel, existe una pequeña diferencia en el coeficiente lo cual no es problema, para llevar a efecto la unión.

Los revestimientos de acero inoxidable con cobre pueden fabricarse rápidamente. Este puede ser formado por rolado, con grandes deformaciones, cortada y aserrada. La soldadura presenta problemas de inclusión de cobre en el fondo del molde de acero resultando insatisfactoria y no muy buena la soldadura. Es necesario remover el cobre a una considerable distancia del área a soldar.

### III.3.3. USOS Y PROPIEDADES.

Los revestimientos de acero inoxidable con cobre son usados en la manufactura de utensilios de cocina, porque presentan muy buenas propiedades de transferencia de calor, así como, una fácil limpieza, y la resistencia a la oxidación que son características del acero inoxidable. En los productos del campo de la electricidad tienen también interés, no solo por las buenas propiedades que aporta la base de cobre sino también por sus características de transferencia de calor.

Diversos revestimientos de acero inoxidable con otros materiales tienen que ser desarrollados en un futuro próximo.

Tenemos que establecer un espacio para su uso en el mundo de hoy; son importantes ya que poseen propiedades únicas obtenidas por la combinación de sus componentes, en este caso metales. A partir de estas expectativas, con nuestro ingenio y el empuje adicional que les demos encontraremos nuevos y fascinantes desarrollos tecnológicos.

## CAPITULO CUATRO

#### IV. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE LAMINADO.

La laminación es un proceso de compresión directa entre los rodillos y el material a procesar, deformándolo plásticamente. El volumen como la masa del material permanecen sin cambio en este proceso.

Las variables que intervienen en este tipo de proceso son:

- a). El diámetro del rodillo.
- b). La resistencia a la deformación plástica del metal, debido a su microestructura, temperatura de trabajo y rapidez de deformación.
- c). La fricción entre los rodillos y la pieza tratada.
- d). Las tensiones que actúan en el plano de deformación, en sentido opuesto y paralelo a la dirección de laminado.

Existen dos formas para llevar a cabo este proceso:

- Laminado en frío y
- Laminado en caliente.

Mediante un análisis de esfuerzos se obtiene, que la presión promedio de deformación de la pieza en contacto con los rodillos, está dada por:

$$\bar{p} = \frac{\sigma_0'}{Q} (e^Q - 1) \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma_0'$  = es el valor medio del esfuerzo aplicado, sobre el plano de deformación.
- $Q$  = coeficiente de fricción entre los rodillos y la pieza ( $Q = \mu L_p / \bar{h}$ ,  $L_p = (RAh)^{1/2}$ ;  $R$  es el radio del rodillo,  $\Delta h$  es la diferencia entre el grosor inicial y el final,  $\bar{h}$  es el grosor promedio entre la

entrada y la salida,  $\mu$  es el ángulo de ataque.

$L_p$  = longitud proyectada del arco de contacto.

Teniendo en cuenta que el ancho del material tratado no cambia debido a la deformación sufrida, la carga de deformación total a la que se encuentra sometida la pieza está dada por:

$$P = \bar{p} b L_p \quad (2)$$

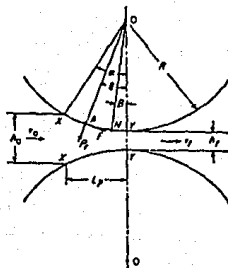


FIG. IV.1. Fuerzas que actúan durante el laminado.

Sustituyendo la ecuación (1) en la (2), para encontrar la carga de deformación, se obtiene la siguiente ecuación.

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \left[ \frac{1}{Q} (e^Q - 1) b \sqrt{R \Delta d} \right] \quad (3)$$

Donde  $b$  es el ancho de la placa a laminar, el factor  $2/\sqrt{3}$  es debido al criterio de Von Mises, para una condición de deformación plana; en la ecuación se puede ver, que  $e^0$  es la contribución de la fricción a la carga total.

En la ecuación (3), se da la dependencia entre la carga total  $P$  y el radio del rodillo  $R$ . Este radio es importante porque nos permite conocer, cuál es el grosor mínimo al que se puede llegar en un tren de laminación. La fuerza de fricción entre los rodillos y la pieza es necesaria, porque es la que introduce a la placa entre los rodillos. Es también necesario conocer más acerca del ángulo de ataque, por que forma parte de la fuerza de fricción; para ello se considera, que en el área de contacto entre el rodillo hay un punto, en el cual, la velocidad tangencial del rodillo, es igual a la velocidad de desplazamiento de la hoja; a este punto se le conoce con el nombre de punto neutral y esta indicado en la figura iv.1. como el punto  $N$ . En este punto no existe el deslizamiento, además en el lado de entrada de la hoja, con respecto al punto  $N$ , la fuerza de fricción actúa en el sentido de la dirección opuesta. La carga total de laminado  $P$  y el torque  $Mt$  (por unidad de ancho  $b$ ) están dados por:

$$\frac{P}{b} = \int_0^{Lp} p \, dx$$

$$\frac{Mt}{b} = \int_0^{Lp} (\mu_p \, dx)R = \mu R \int_0^{Lp} p \, dx = \mu R \frac{P}{b}$$

despejando a  $\mu$  de las ecuaciones anteriores resulta:

$$\mu = \frac{Mt}{PR} \quad (4)$$



La determinación de este punto neutral es importante, por que nos permite saber bajo cuáles condiciones, la velocidad de salida de la hoja, sea igual a la velocidad de la superficie del rodillo; mediante la aplicación de tensiones, con dirección contraria a la dirección del laminado.

La presencia de tensiones inversas a la dirección de laminado, puede reducir la carga de laminado; se demuestra lo anterior a partir de una consideración del criterio de Von Mises, para deformación plana:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0$$

$$p - (-\sigma_h) = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0$$

despejando la p

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 - \sigma_h \quad (5)$$

donde la p es la presión  $\sigma_1 = p$ ,  $\sigma_3 = -\sigma_h$  es el esfuerzo de tensión horizontal a la hoja,  $\bar{\sigma}_0$  es el esfuerzo promedio de compresión sobre la hoja. En la ecuación (5) observamos, que la presión de laminado, se reduce en proporción directa, con respecto a la tensión en el plano de la hoja. En forma similar, se aplica al caso de esfuerzos en la dirección de laminado.

La carga  $P_t$ , cuando se aplican las tensiones inversas y en dirección del laminado puede ser calculada por:

$$P_t = P \left[ 1 - \frac{\sigma_b - \sigma_r}{\bar{\sigma}_0} \frac{\beta}{\alpha} \right] \quad (6)$$

Donde:  $P$  = carga de laminado, pero sin la presencia de las tensiones.

$\sigma_b$  = tensión inversa.

$\sigma_r$  = tensión en dirección de laminado.

$\sigma_0$  = esfuerzo promedio de compresión sobre la hoja.

$\alpha$  = ángulo de contacto.

$$\beta = \text{ángulo donde no hay deslizamiento} = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\alpha}{2} \right]^2$$

Para un análisis mecánico de laminación, se debe hacer una serie de suposiciones tales como:

- 1) El arco de contacto es circular, o sea no hay deformación elástica de los rodillos.
- 2) El coeficiente de fricción es constante, en todos los puntos de contacto.
- 3) No hay dispersión, sólo se trata como un problema en el plano de deformación.
- 4) Las secciones verticales permanecen planas.
- 5) La velocidad de rodillos en la periferia es constante.
- 6) La deformación elástica de la hoja es despreciable, con relación a la deformación plástica.
- 7) Se considera pura deformación plana, apoyada por:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma_0' \quad (7)$$

La laminación es un proceso de deformación plástica, que se considera como un cambio de forma, que sufre un cuerpo bajo carga, el cual no se recupera cuando ésta se elimina. La deformación intercrystalina se lleva a cabo usualmente, a alta temperatura y baja rapidez de deformación, mientras que la deformación

intergranular, se lleva a cabo a bajas temperaturas y alta rapidez de deformación, en este caso hay deslizamiento a lo largo de los planos cristalográficos definidos. (18)

#### IV.1. LAMINADO EN CALIENTE.

En el laminado en caliente, se necesita una menor energía para deformar el material y se aumenta la habilidad para que fluya sin que se presenten grietas. Los espacios tales, como cavidades y porosidades son eliminados durante el laminado y los grandes granos columnares se afinan, hasta pequeños granos recristalizados.

Como las deformaciones en la superficie, son mayores que en el interior del material, se obtendrá un grano más fino en la superficie que en el centro, ya que en el interior, existe mayor temperatura y se tarda más en enfriar, dando lugar a un fenómeno de crecimiento de grano.

Para el trabajo en caliente, el límite inferior de la temperatura está determinado por la razón de recristalización, de tal manera, que ésta sea lo suficientemente rápida, como para eliminar el endurecimiento por deformación; se debe tener en cuenta la cantidad de deformación, porque a mayor grado de ésta, menor es la temperatura requerida.

El límite superior de la temperatura, está dado por la temperatura de fusión y la oxidación excesiva. Generalmente se requiere material de grano fino, para conseguir esto, es necesario que en el paso final del laminado, se efectúe una gran deformación a baja temperatura.

#### IV.1.1. CAMBIOS DE TEMPERATURA DURANTE LA DEFORMACION.

Durante las operaciones de trabajo en caliente, la temperatura de la pieza a tratar puede cambiar, debido a uno o más de los siguientes factores.

- 1) Radiación o convección al aire o al medio de enfriamiento (agua pulverizada durante el laminado).
- 2) Conducción a las herramientas de trabajo o dados. En el caso del laminado, la conducción es a los rodillos, los manipuladores y la mesa de laminación.
- 3) El trabajo que se hace durante la deformación, da calentamiento adiabático.
- 4) Calentamiento por fricción en la superficie de la pieza, en contacto con los rodillos.

#### IV.1.2. CAMBIOS DE TEMPERATURA DURANTE EL LAMINADO.

La distribución de temperatura durante el laminado, está determinada por dos factores: enfriamiento en contacto con el aire y las mesas de la laminadora en cada paso de laminado y el contacto con los rodillos durante cualquier paso. El enfriamiento con los rodillos, es más rápido que el enfriamiento por aire, debido a la gran masa térmica de los rodillos; y el problema se hace más complejo, debido a la reducción de espesor en cada etapa.

#### IV.1.3. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA.

A medida que aumenta la temperatura, la resistencia, disminuye y la ductilidad aumenta. Cambios estructurales como la precipitación, envejecimiento por deformación y recristalización

pueden presentarse en ciertos rangos de temperatura, alterando con esto su comportamiento general. A altas temperaturas, dichos cambios estructurales, dan por resultado una deformación, que depende del tiempo de aplicación de la carga a una temperatura dada, es decir del fenómeno de termofluencia.

La figura (iv.2.), muestra la variación de la resistencia a la deformación con la temperatura, tanto para metales cúbicos de cuerpo centrado, tantalio, tungsteno, molibdeno, hierro; como para metales cúbicos de caras centradas, como níquel. Para metales CCuC presenta un aumento en el esfuerzo a la cedencia, cuando la temperatura disminuye; mientras que para metales CCaC, el esfuerzo no es muy dependiente de la temperatura.

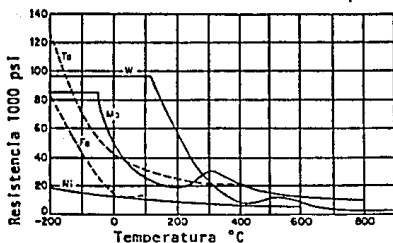


FIG. IV.2. Efecto de la temperatura sobre la resistencia a la deformación, de metales cúbicos de cuerpo centrado como Ta, W, Mo, Fe y cúbico de caras centradas, Ni.

La dependencia del esfuerzo de la temperatura a deformación y rapidez de deformación constantes, está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma = C \exp [Q/RT] \dot{\epsilon}^n \quad (8)$$

donde: Q = energía de activación para flujo plástico.

R = constante universal de los gases.

T = temperatura absoluta a la que se efectúa la prueba.

C = constante.

El valor del refuerzo depende de la estructura de dislocaciones, que existe en el momento que se efectúa la medida. La estructura de dislocaciones cambiará con la temperatura, rapidez de deformación y de la deformación.

#### IV.1.4. EFECTO COMBINADO DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD DE DEFORMACION.

En el comportamiento mecánico de metales, en el cual intervienen la temperatura y la velocidad de deformación, dichos metales presentan fenómenos de endurecimiento, recuperación dinámica y recristalización dinámica durante la laminación. Dicho comportamiento se indica mediante las curvas esfuerzo-deformación figura (iv.3.).

La relación que existe entre el esfuerzo aplicado con la temperatura y rapidez de deformación, está dada por la ecuación:

$$\sigma = f(\dot{\epsilon}) = f \left[ C e^{\Delta H/RT} \right] \quad (9)$$

donde  $\Delta H$  es una energía de activación para difusión propia autodifusión, (calorías por mol), y está relacionada con  $Q$  de la ecuación (8) por  $Q = m \Delta H$ , donde  $m$ , es la sensibilidad a la velocidad de deformación. La cantidad  $Z$ , es el parámetro de Zener-Hollomon.

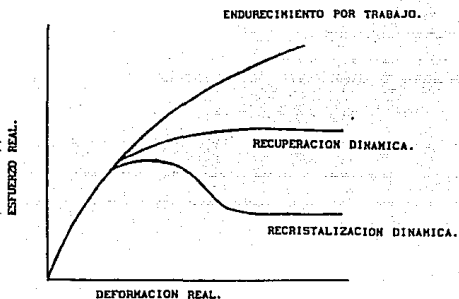


FIG. IV.3. Curvas esfuerzo-deformación.

Se ha sugerido que el parámetro de Zener-Hollomon, representa una ecuación de estado mecánico, el esfuerzo depende solamente de valores instantáneos de deformación, velocidad de deformación y temperatura; de la misma forma que la presión de un gas ideal, depende de valores instantáneos de volumen y temperatura.

El comportamiento mecánico antes descrito, indica que un aumento en la velocidad de deformación, o una reducción en la temperatura eleva el nivel de la curva.

La combinación de una velocidad de deformación elevada y una temperatura alta es de interés, ya que la disminución en el nivel de la curva de esfuerzo contra deformación debida a la

temperatura, puede compensarse por el aumento de la velocidad de deformación. Si bien esta compensación sólo ocurre cuando la velocidad de deformación sea elevada, puede ser importante en aquellos casos en que la vida de la pieza sea corta. A temperaturas elevadas la resistencia disminuye por varias razones. La velocidad de endurecimiento disminuye a medida que la temperatura aumenta, ya que los procesos de recuperación se activan y es imposible mantener una estructura "deformada en frío". Además, con un aumento mayor en la temperatura, se puede producir recristalización y crecimiento de grano, con lo cual se disminuye el efecto producido por el grano fino. Sin embargo, si el flujo plástico se produce a una velocidad mayor que aquella a la cual la difusión puede eliminar sus efectos, el metal puede usarse, a temperaturas elevadas, con condiciones de velocidad de deformación alta y niveles elevados de esfuerzo.

#### IV.2. EFECTO DE LAS VARIABLES DE LAMINACION EN LA MICROESTRUCTURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

Los cambios en la microestructura de aceros inoxidables austeníticos durante la laminación en caliente se ven afectados por los mecanismos de restauración tanto dinámicos como estáticos, los cuales determinan las curvas esfuerzo-deformación del material. Estos mecanismos de restauración o ablandamiento dependen de los parámetros del proceso como son: deformación  $\epsilon$ , velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$  y temperatura  $T_s$  y de los parámetros del material como son: tamaño de grano original  $d_0$ , composición química y energía de falla de apilamiento. A continuación se describen brevemente estos mecanismos. (15)

De acuerdo a lo anterior, durante la deformación en caliente de metales y aleaciones a temperaturas arriba del 0.6 de la



temperatura de fusión, como es el caso de la laminación, el ablandamiento de dichos metales puede ocurrir, ya sea por el mecanismo de recuperación o de recristalización dinámica y por los mecanismos de recuperación y recristalización estática entre las deformaciones sucesivas.

El mecanismo de ablandamiento predominante, depende de la interacción de los parámetros del proceso tales como temperatura, deformación y velocidad de deformación, así como también de los parámetros del material: Tamaño de grano original, energía de falla de apilamiento y las características de precipitación. En el caso de los aceros austeníticos éstos tienen una baja energía de falla de apilamiento y como consecuencia, una baja velocidad de ablandamiento por recuperación dinámica. La recristalización dinámica es posible en este tipo de materiales a valores suficientes de deformación, sin embargo, este mecanismo no es importante para las condiciones en el rolado en caliente. La cantidad de recuperación después de la deformación en aceros con baja energía de falla de apilamiento (aceros inoxidable austeníticos) es también limitada de tal forma que el mecanismo de ablandamiento importante en este tipo de material es el de la recristalización estática.

Por otro lado, la resistencia en caliente del material determina la capacidad del proceso y la forma de las curvas esfuerzo-deformación esta dada por el mecanismo de ablandamiento que tiene lugar; por lo tanto el conocimiento de la evolución de la microestructura durante la laminación debe ser tomado en cuenta para el cálculo de las cargas necesarias para deformar el material en cualquier etapa del proceso.

#### IV.2.1. PROCESOS DE RESTAURACION.

En las operaciones del trabajo en caliente, tales como laminación donde la deformación ocurre en una serie de pasos a distintas temperaturas y velocidades de deformación, la microestructura y propiedades están influenciadas por los cambios dinámicos y estáticos que ocurren en el material (durante y después de la deformación, respectivamente). Al deformarse a temperaturas altas, todos los metales presentan el clásico endurecimiento por trabajado y el mecanismo de restauración dinámico correspondiente. Las microestructuras producidas por esta deformación son inestables y al mantenerlas a esta temperatura después de la deformación presentan cambios estructurales estáticos.

En operaciones de laminación en donde hay poca deformación los granos se ablandan por recuperación dinámica. En metales con una alta energía de falla de apilamiento, el mecanismo de recuperación estática ocurre durante el enfriamiento, mientras que en metales con baja energía de falla de apilamiento la recristalización estática también ocurre rápidamente durante el enfriamiento. En operaciones donde la deformación es alta (extrusión), los metales con una alta energía de falla de apilamiento exhiben recuperación dinámica seguida por recuperación y recristalización estática, por otro lado, metales con una baja energía de falla de apilamiento presentan recuperación y recristalización dinámica seguidas por recuperación y recristalización estática.

El efecto de estos mecanismos en las curvas-esfuerzo-deformación de un acero AISI 304 puede verse en la figura (iv.4.).

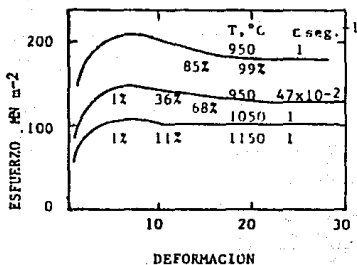


FIG. IV.4. Efecto de los mecanismos de recuperación y recristalización sobre las curvas esfuerzo-deformación de un acero AISI 304.

#### IV.2.2. PROCESOS DE RESTAURACION DINAMICOS.

##### IV.2.2.1. RECUPERACION DINAMICA.

Existen dos distintos mecanismos de restauración que operan durante la laminación en caliente. La recuperación dinámica es el único mecanismo responsable de la aniquilación de dislocaciones en todos los metales durante la etapa de endurecimiento por deformación de la curva de flujo, esto da lugar a una velocidad de endurecimiento por trabajo menor que la velocidad de endurecimiento en el trabajo en frío. Los metales que muestran recuperación dinámica como mecanismos de ablandamiento aún a deformaciones altas son: Al y sus aleaciones Zn, Mg, Sn, Fe<sub>α</sub> de baja pureza o aceros ferríticos. [15]

Durante la etapa de endurecimiento por deformación, la densidad de dislocaciones aumenta, hasta que llega a formar marañas de dislocaciones y se empieza a desarrollar una estructura celular. En el tiempo en el que se logra el estado estacionario, las dislocaciones se han arreglado para formar subgranos. La velocidad de acumulación de dislocaciones disminuye conforme la deformación aumenta, conduciendo al estado estacionario, permitiendo continuar con la deformación a valores de esfuerzo, velocidad de deformación y temperatura constantes.

Las principales características de esta subestructura son: la densidad de dislocaciones entre muros, el espacio promedio entre ellas y la orientación entre subgranos no cambia durante el curso de la deformación en el estado estacionario.

Esta condición de una densidad esencial de dislocaciones que es necesaria para la ausencia de endurecimiento por deformación resulta de la obtención de un equilibrio dinámico entre las velocidades de generación de dislocaciones y la velocidad de aniquilación.

La velocidad de generación está en función de la velocidad de deformación y el esfuerzo asociado-efectivo, pero es relativamente independiente de la deformación. La velocidad de aniquilación depende de la densidad de dislocaciones y de la facilidad de operación del mecanismo de recuperación, tal como trepado y deslizamiento cruzado de dislocaciones y su desanclado.

Las subestructuras producidas solamente por recuperación dinámica para deformaciones que son menores que la deformación máxima, exhiben subgranos más grandes y perfectos conforme  $Z$  disminuye, esto es, los procesos de ablandamiento son térmicamente activados dando una dependencia del esfuerzo sobre la velocidad de deformación y la temperatura. Así, a una mayor temperatura de

deformación o a una velocidad de deformación baja, los subgranos formados son más grandes.

Esta relación puede ser descrita en términos del parámetro de Zener-Hollomon como:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp [Q/(RT)] \quad (10)$$

donde Q es la energía de activación responsable del proceso,  $\dot{\epsilon}$  es la velocidad de deformación en  $\text{seg}^{-1}$  y R es la constante de los gases en  $\text{J/mol}^\circ\text{K}$ .

Para los aceros inoxidable austeníticos los subgranos son mucho menores y menos recuperados que en aluminio, debido a la energía de falla de apilamiento menor.

#### IV.2.2.2. RECRISTALIZACION DINAMICA.

El mecanismo de recristalización dinámica empieza a operar cuando, debido a una pobre recuperación, la subestructura formada por dislocaciones llega a ser lo suficientemente densa y heterogénea lo que provoca que nuevos granos lleguen a nuclearse. La etapa del endurecimiento por deformación termina en el esfuerzo máximo ( $\sigma_p$ ) conforme la aparición de suficientes granos libres de deformación prosigue, esto conduce a una disminución en el esfuerzo. Eventualmente, después de uno o más esfuerzos máximos, el flujo en el estado estacionario se establece debido a la distribución de regiones en todas las etapas de deformación, desde subestructuras recientemente recristalizadas hasta las estructuras endurecidas hasta  $\epsilon_c$ , en las cuales la nucleación ocurre nuevamente. Por medio de microscopía óptica, TEM (Microscopía Electrónica de Transmisión) y SEM (Microscopía Electrónica por

Sonda) se ha confirmado que el mecanismo de recristalización dinámica ocurre en los siguientes metales y aleaciones en los cuales el grado de recuperación dinámica esta restringido: Cu, CuAl, Ag, aceros inoxidables austeníticos, aceros al carbono y Fe.

La recristalización dinámica no sólo es importante por la reducción en el esfuerzo al flujo sino también por el refinamiento del grano y el aumento en la ductilidad. Las características estructurales peculiares de metales con baja recuperación dinámica que contribuyen para la nucleación de recristalización dinámica son:

- La gran efectividad con la cual un borde de grano es anclado por los muros de dislocaciones y
- La gran diferencia en energía de deformación entre la región dentro del grano y la de enfrente.

De acuerdo a los experimentos de Nakamura y Ueki, Cook, Rossard y Blain la relación entre  $Z$  y  $c_p$  en pruebas con materiales precalentados a la misma temperatura que la de deformación, muestran la tendencia de un aumento de  $c_p$  a altas temperaturas. Así mismo, de acuerdo a Sellars un aumento en el tamaño de grano original conduce a un aumento de  $c_p$  en base a la siguiente ecuación:

$$c_p = Ad^{1/2} Z^n \quad (11)$$

El tamaño de grano recristalizado parece ser independiente del tamaño de grano original del material, aunque éste tiene influencia sobre la cinética del primer ciclo de recristalización, debido a que los bordes de grano preexistentes actúan como sitios preferenciales de nucleación, por lo tanto es de esperarse que la velocidad de recristalización dinámica disminuya fuertemente al aumentar el tamaño de grano original.

En mediciones de tamaño de grano recrystalizado dinámicamente, se ha encontrado que dicho tamaño de grano está solamente determinado por el esfuerzo, (independiente de la temperatura de deformación), por una ecuación de la forma:

$$\sigma_s = M d^{-n} \quad (12)$$

donde M es una constante empírica y n es aproximadamente 0.75 en aleaciones Ni-Fe.

Se tiene que a velocidades de deformación altas, la deformación concurrente destruye la fuerza motriz para el crecimiento después de un brote de crecimiento a partir del núcleo. La recrystalización prosigue por la continua formación de núcleos y su crecimiento restringido. Este mecanismo difiere del de recrystalización estática en el cual la nucleación tiene lugar y la recrystalización prosigue por el crecimiento continuo de estos núcleos, hasta que el choque de los granos que están creciendo ocurre.

Al final de la laminación cuando la temperatura es baja, no es posible que el material recrystalice dinámicamente bajo condiciones normales de laminación. Por otro lado, es razonable despreciar la posible ocurrencia de recrystalización dinámica. Sin embargo cuando el material no recrystaliza completamente entre pases de laminación, la deformación acumulada puede causar que se exceda el valor de  $\epsilon_c$  y que el material recrystalice dinámicamente, o en la producción de lámina donde la reducción por paso es mayor, esto puede no ser posible ya que se puede alcanzar el valor de  $\epsilon_c$  o  $\epsilon_p$ .

#### IV.3. PROCESOS DE RESTAURACION ESTATICOS.

Si la deformación es interrumpida pero se mantiene el

material a altas temperaturas (pases de laminación), la microestructura sufre cambios posteriores en función del tiempo por la aparición de recuperación estática, recrystalización y crecimiento de grano. Estos cambios estructurales se reflejan por el ablandamiento del material en función del tiempo después de la deformación. Esto se muestra claramente en la forma de la curva esfuerzo-deformación; si se continúa deformando el acero después de diferentes periodos de descanso como se ve en la figura (iv.s.). El ablandamiento prosigue hasta que la recrystalización es completa.

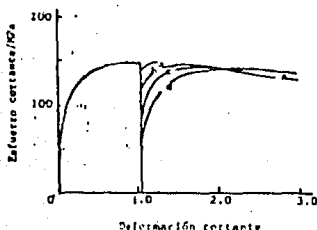


FIG. IV.5. Efecto del aumento en el tiempo de permanencia en las curvas esfuerzo-deformación para un Acero Inoxidable Austenítico 18:8 a una velocidad de deformación equivalente de  $34 \text{ s}^{-1}$  a  $918^\circ \text{C}$ , a 1 seg; b 20 seg; c 50 seg; d 300 seg.

#### IV.3.1. RECUPERACION ESTATICA.

La recuperación estática ocurre inmediatamente después que la deformación ha sido interrumpida y prosigue a una velocidad



decreciente con respecto al tiempo. Este proceso involucra la aniquilación de dislocaciones en eventos individuales y es responsable de un 40-50% del ablandamiento total a deformaciones altas. A bajas deformaciones la energía almacenada es suficiente para promover la recristalización estática y un ablandamiento limitado tiene lugar por recuperación estática solamente.

Las principales variables experimentales que afectan la velocidad de recuperación son la temperatura, deformación, velocidad de deformación y composición. El efecto de la temperatura sobre la velocidad de recuperación es evidente, es decir, la recuperación es proporcional a la temperatura, pero no particularmente debido a que la cantidad de energía almacenada que es la fuerza motora para la recuperación disminuya conforme la temperatura de deformación aumenta.

En general un aumento en la deformación origina un aumento en la velocidad de recuperación, esto puede ser atribuido al aumento en la densidad de dislocaciones y por lo tanto en la fuerza motora.

La deformación crítica para recristalización estática es generalmente del orden de 0.05-0.1. Si esta deformación crítica es excedida, un período de incubación es necesario para que la recristalización comience. La longitud de este período de incubación depende de la temperatura y de la cantidad de deformación anterior, por lo tanto el ablandamiento por recuperación estática sólo puede ocurrir durante el período de incubación anterior a la recristalización. Más aún si la deformación crítica para recristalización no se alcanza, el proceso de recuperación estática no origina un ablandamiento total del material.

#### IV.3.2. RECRISTALIZACION ESTATICA.

Para las condiciones de deformación, deformaciones mayores que la crítica para recristalización estática pero menores que  $c_c$  (como es el caso de la laminación de aceros inoxidables austeníticos), los cambios en microestructura son debidos a la recristalización estática o clásica después de un periodo de incubación en el cual los procesos de recuperación crean núcleos de recristalización. La velocidad de recristalización está determinada por la energía almacenada, la densidad de sitios favorables para la nucleación y la temperatura. (18)

## CAPITULO CINCO

## V. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

### V.1. MATERIAL EMPLEADO.

Para el desarrollo de la técnica de laminado conjunto de este trabajo se utilizaron los materiales siguientes con las características que se mencionan a continuación; como primer elemento se utilizó acero inoxidable 304 austenítico en forma de lámina, calibre 16 (0.508mm); acero al carbono en forma de lámina (lámina negra) calibre 18 (1.016mm); aluminio también en forma de lámina calibre 28 (0.044mm); además se utilizarán como elementos de limpieza para cada uno de ellos, en este caso, lijas y un desengrasante industrial para eliminar de la superficie impurezas, grasa y polvo que pudieran contener dichos materiales.

### V.2. EQUIPO.

El equipo empleado para las pruebas de laminado conjunto fue una laminadora experimental de marca Hille con capacidad de 30 toneladas, en la cual se puede controlar el porcentaje y la velocidad de deformación; además de un horno para calentar las probetas a la temperatura de experimentación, marca CAISA MOD. 439-DL, el calentamiento es por medio de resistencias y también cuenta con un control de temperatura variable. Cada uno de estos equipos se calibró y probó antes de iniciar las pruebas de laminado conjunto.

Como equipo adicional para evaluar la unión obtenida en el proceso se hizo uso de una máquina de ensayos mecánicos marca INSTRON modelo 4206, con capacidad de 15 toneladas, que se encuentra conectada a una microcomputadora, gracias a lo cual es posible programar las condiciones de la prueba y obtener un

reporte con los resultados y la gráfica correspondiente; un macroscopio marca Wild Heerbrug y un microscopio electrónico de barrido marca JEOL MOD. JSM-T20 perteneciente al Instituto de Física, para observar la interfase en dicha unión a diferentes aumentos.

Para la fabricación de las probetas que se utilizaron en las pruebas mecánicas se empleó una cortadora de disco abrasivo marca BUEHLER LTD. MOD. 10-1114-160; una rectificadora de superficies planas marca TOS de manufactura Checoslovaca, MOD. BPH-20; una cizalla marca CHICAGO MOD. FS-416; una dobladora marca CHICAGO MOD. BP-416-6, y una soldadora de puntos marca MAC'S MOD. PM12 con una potencia de 8.4KW.

### V.3. TECNICA EXPERIMENTAL.

Del análisis de los distintos procesos de unión para obtener el recubrimiento de acero inoxidable con acero al carbono se encontró como más factible de llevar a cabo de acuerdo con el equipo con que se cuenta, el proceso de laminación conjunta por medio del método de emparedado (sandwich) o montaje en paquete. Este montaje se ilustra en la figura (v.1.).

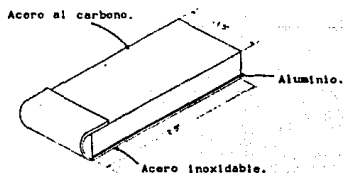


FIG. V.1. Vista lateral de la probeta de laminado conjunto con el montaje de emparedado (sandwich).

El montaje en paquete consiste en colocar tres placas o láminas con la siguiente ubicación; una lámina de acero al carbono o de baja aleación, luego una lámina muy delgada de aluminio (hoja de aluminio) y por último una lámina de revestimiento, en este caso acero inoxidable austenítico AISI 304.

Previamente al empaquetamiento usado las láminas se cortan a las siguientes dimensiones 1.5 " de ancho por 2.5" de largo (esta dimensión es igual para la lámina de acero al carbono y para la lámina de aluminio); la dimensión que se le dio a la lámina de acero inoxidable es un poco más grande en longitud y fue de 3". Dicho aumento en la longitud del acero inoxidable es con el fin de hacer un pequeño doblez como se muestra en la figura anterior, además, tomando en cuenta que durante la laminación el acero al carbono y el aluminio se alargan más que el acero inoxidable. Por otro lado, en uno de los extremos del montaje se soldó por medio de puntos de soldadura eléctrica en algunos casos.

Posteriormente las láminas son sometidas a un proceso de limpieza que en primer lugar, incluye una etapa de desbaste con lija de esmeril, seguido de una limpieza con un desengrasante industrial de bajo costo. Cabe mencionar que previamente se utilizaron etapas de limpieza con soluciones de ácido nítrico para (el inoxidable) y ácido sulfúrico para (el acero al carbono), de acuerdo a indicaciones de las normas ASTM B 254-53 y ASTM B 183-49, con las que, sin embargo, no se obtuvieron resultados satisfactorios, optándose por el uso del desengrasante industrial.

Una vez terminado el montaje se procedió a calentar las probetas en el horno, a una temperatura seleccionada entre 300 y 500°C durante el tiempo mínimo seleccionado por medio de un programa de computación que calcula la temperatura en función del tiempo, tomando en cuenta las características de los materiales;

dicho programa se muestra en el anexo A junto con las corridas para las temperaturas que se utilizaron durante las pruebas.

Después de haber realizado pruebas con el material base (acero al carbono) de distintos espesores desde 5/16 (7.9mm) hasta 0.040" (1.016mm) se determinó que para facilitar una estandarización se realizaron en lo subsecuente todos los ensayos con un mismo espesor siendo este el de 0.040" (calibre 18). Así mismo se variaron los porcentajes de reducción entre 15 y 50% en las etapas de laminación.

A partir de los resultados obtenidos del mapeo antes descrito se determinó un conjunto de parámetros óptimos, por medio de una matriz de decisiones.

Antes de poder evaluar los parámetros considerados en la matriz de decisiones se realizaron pruebas de combado para cada una de las probetas que se unieron, según Norma NOM-B-277-1989; las probetas que no soportaron dicha prueba se eliminaron de las subsecuentes.

Los parámetros que se consideraron en la matriz de decisiones son los siguientes:

- a) Porcentaje de laminación. Dicho porcentaje se calculó por medio de la siguiente ecuación.

$$\% = \frac{e_0 - e_f}{e_0} \times 100\%$$

Donde  $e_0$  = Espesor inicial.

$e_f$  = Espesor final.

b) Fuerza cortante. Para determinar el valor de esta fuerza se fabricaron dos probetas para cada condición, entendiéndose por condición, el valor de la temperatura, el porcentaje de laminación y la velocidad de laminación; para la fabricación de estas probetas se utilizó una rectificadora para superficies planas. Las probetas en cuestión se maquinaron con las dimensiones que se muestran en la figura (v.2.).

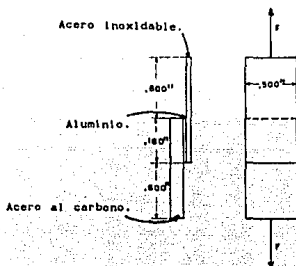


FIG. V.2. Esquema ilustrativo del ensayo para determinar la fuerza cortante.

Por medio de la máquina de ensayos mecánicos INSTRON se aplicaron cargas en ambos extremos de la probeta dándonos como resultado una gráfica y una carga máxima, la cual nos sirvió para determinar el esfuerzo cortante máximo que soportó la unión; con la siguiente ecuación.

$$\sigma_c = \frac{F_{\text{max.}}}{A \times L}$$

Donde  $\sigma_c$  = Esfuerzo máximo de corte.

$F_{\text{max.}}$  = Carga máxima aplicada.

A y L son las dimensiones mostradas en la figura.



- c) Velocidad de laminación. Este parámetro se lee directamente en el tablero de control de la máquina laminadora. Y se varió entre 30 y 60 pies/min.
- d) Temperatura de Laminación. Se manejaron, como ya se mencionó anteriormente temperaturas entre 300 y 500°C.
- e) Acabado superficial. Dicho parámetro se evalúa a simple vista observando con detenimiento si las superficies presentan oxidación, u otro tipo de defectos.
- f) Vista al microscópio óptico. Se observó la unión para determinar si existen separaciones en la superficie de unión.

Del resultado de la evaluación de la matriz de decisiones se eligió la mejor condición, realizando para esta cinco probetas con las mismas condiciones, para efectuar en cada una de ellas las pruebas anteriormente mencionadas. Adicionalmente a esto se realizó en una de ellas, microscopía electrónica de barrido.

## **CAPITULO SEIS**

## VI. DISCUSION DE RESULTADOS.

El resultado del proceso de experimentación fue el siguiente. El montaje y la limpieza de las partes componentes del mismo fueron las adecuadas tras de varias pruebas. De manera que al determinar el método de laminación conjunta se procedió a evaluar pruebas dentro de un rango de temperaturas entre 320-500°C y porcentajes de laminación entre 15-50% de deformación.

De dichas pruebas se tienen los siguientes resultados:

| No. | TEMP.<br>°C | % DEFORMACION | VELOCIDAD DE<br>LAMINACION.<br>ft./min. | SE UNIO | PRUEBA DE<br>COMBADO |
|-----|-------------|---------------|---|---------|----------------------|
| 1   | AMBIENTE    | 17            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 2   | AMBIENTE    | 33            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 3   | AMBIENTE    | 42            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 4   | 250         | 16            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 5   | 250         | 34            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 6   | 250         | 47            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 7   | 320         | 18            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 8   | 320         | 36.8          | 60                                      | NO      | ----                 |
| 9   | 320         | 40            | 60                                      | SI      | FALLO                |
| 10  | 320         | 47            | 60                                      | SI      | PASO                 |
| 11  | 400         | 27            | 60                                      | NO      | ----                 |
| 12  | 400         | 33            | 30                                      | NO      | ----                 |
| 13  | 400         | 33            | 60                                      | SI      | PASO                 |
| 14  | 400         | 40            | 60                                      | SI      | PASO                 |
| 15  | 400         | 43            | 60                                      | SI      | PASO                 |
| 16  | 500         | 14.5          | 60                                      | SI      | PASO                 |
| 17  | 500         | 28.9          | 30                                      | SI      | PASO                 |
| 18  | 500         | 28.9          | 60                                      | SI      | PASO                 |
| 19  | 500         | 38            | 40                                      | SI      | PASO                 |
| 20  | 500         | 43.4          | 40                                      | SI      | PASO                 |
| 21  | 500         | 52            | 40                                      | SI      | PASO                 |

**Observaciones:** A temperatura ambiente no se logro la unión aun cuando se aplicó un porcentaje elevado de deformación (42%).

En el rango de 250°C no se alcanzó la unión al aplicar un 47% deformación como máximo para está temperatura. Esto se puede atribuir a que la temperatura no fue la propicia para iniciar o activar el mecanismo de unión entre los materiales, aún cuando se aplicó un porcentaje de deformación grande.

En el rango de 320°C se unio con una deformación del 40%, pero la unión no fue lo bastante fuerte para soportar la prueba de combado. Por lo que al aumentar el porcentaje de deformación hasta un 47% la unión soportó dicha prueba, a este rango de temperatura se tiene un excelente aspecto superficial.

Para el rango de 400°C el porcentaje de laminación en el cual se empezaron a unir las probetas fue del 33% de deformación. A mayor temperatura se necesita una menor deformación mínima critica para lograr la unión. Esta y las pruebas subsecuentes a porcentajes de deformación mayores soportaron la prueba de combado. El aspecto superficial de las probetas es brillante, así como, la textura que presentan es lisa. Cabe mencionar que a un 33% de deformación se varió la velocidad de laminación dandonos como resultado que a una velocidad de 30ft/min la unión no se presento pero a 60ft/min sí se unio. Se observa de esto que para temperaturas bajas son necesarias velocidades de laminación altas y a medida que se aumenta la temperatura las velocidades de laminación pueden ser menores. Por otro lado a menores temperaturas y velocidades altas de laminación nos dió un valor de esfuerzo superior al de las probetas que se laminaron a 500°C con velocidades de laminación menores a 60ft/min.

La disminución de este valor de esfuerzo al corte se debe tal vez a la influencia del choque térmico provocado por los rodillos en el paso de laminación, además del tiempo de permanencia en dicho paso y del efecto del medio ambiente sobre la probeta.

A la temperatura de 500°C la unión se presentó a partir de un 14.5% de deformación con este porcentaje y en los sucesivos la unión de los materiales soportó la prueba de combado. Uno de los parámetros que se modificó fue la velocidad de laminación para observar la influencia de este dentro del proceso. El aspecto superficial no es muy bueno presentando una pequeña capa de óxido por el lado del acero al carbono y por el lado del acero inoxidable su aspecto es opaco, esto es debido a la posible influencia del medio ambiente sobre los materiales, disminuyendo así el valor del esfuerzo necesario para separar la unión.

Como se explicó en el procedimiento experimental las probetas que pasaron la prueba de combado forman parte de la siguiente tabla de resultados a partir de la cual se genera la matriz de decisiones.

TABLA VI.1. TABLA DE RESULTADOS.

| No. Prueba                | 10   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17  | 18   | 19   | 20   |
|---------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| % de Laminación.          | 47   | 33   | 40   | 43   | 15   | 29  | 38   | 43   | 52   |
| Esfuerzo Máximo.<br>(MPa) | 84.3 | 77.3 | 89.2 | 60.6 | 26.9 | --- | 72.9 | 67.8 | 68.2 |
| Velocidad de lam.         | 60   | 60   | 60   | 30   | 60   | 30  | 40   | 40   | 40   |
| Temp.                     | 320  | 400  | 400  | 400  | 500  | 500 | 500  | 500  | 500  |
| Acabado Superficial.      | 10   | 8    | 8    | 8    | 6    | 6   | 6    | 6    | 6    |

\* En la probeta No.17 no se realizó la prueba dado que al maquinarla se rompió. En las probetas No.20 y 21 el valor que se da en la tabla, es el valor máximo que soportaron las probetas debido a la posible influencia del medio ambiente sobre los materiales (posible formación de óxido en el acero al carbono y activación de la precipitación de carburos en el inoxidable).

La escala del valor dado para el acabado superficial es la siguiente: 10 excelente, 8 bueno, 6 malo.

El valor del porcentaje dado para cada uno de los parámetros evaluados en la matriz de decisiones en orden de importancia es: Esfuerzo máximo 40%, temperatura de laminación 23%, porcentaje de laminación 14%, velocidad de laminación 8%, acabado superficial 8%, observación al microscopio 7%.

TABLA VI.2. MATRIZ DE DECISIONES

| NUMERO PRUEBA. | 10    | 13    | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |
|----------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| ESFUERZO       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |
| MAXIMO.        | 8.45  | 10.00 | 9.03 | 8.01 | 3.24 | -    | 8.47 | 8.84 | 8.91 |
| PESO 40%       | 3.38  | 4.00  | 3.81 | 3.20 | 1.29 | -    | 3.78 | 3.83 | 3.58 |
| TEMP. LAM.     | 9.00  | 8.91  | 8.91 | 8.01 | 4.30 | 4.30 | 4.30 | 4.30 | 4.30 |
| PESO 23%       | 2.07  | 1.59  | 1.59 | 1.59 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| % DE LAM.      | 5.64  | 7.05  | 8.29 | 5.87 | 9.00 | 7.48 | 8.51 | 8.87 | 5.00 |
| PESO 14%       | 0.77  | 0.88  | 0.88 | 0.83 | 1.28 | 1.04 | 0.81 | 0.83 | 0.70 |
| VEL. LAM.      | 8.00  | 8.00  | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| PESO 8%        | 0.48  | 0.48  | 0.48 | 0.72 | 0.48 | 0.72 | 0.48 | 0.48 | 0.48 |
| ACABADO        |       |       |      |      |      |      |      |      |      |
| SUPERFICIE     | 10.00 | 8.00  | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| PESO 8%        | 0.80  | 0.64  | 0.64 | 0.64 | 0.48 | 0.40 | 0.48 | 0.48 | 0.48 |
| VISTA AL       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |
| MICROSCOPIO    | 7.00  | 8.00  | 8.00 | 8.00 | 8.00 | -    | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| PESO 7%        | 0.49  | 0.83  | 0.58 | 0.58 | 0.42 | -    | 0.42 | 0.42 | 0.42 |
| TOTAL          | 7.99  | 8.32  | 8.30 | 7.55 | 4.82 | 3.15 | 7.07 | 8.74 | 8.83 |

Como resultado de la matriz de decisiones el valor del conjunto de parámetros óptimo lo obtuvo la probeta No.13. De dicha elección se procedió a realizar más pruebas con las condiciones de % de deformación, temperatura y velocidad de laminación que se dieron en dicha probeta.

A partir de estas pruebas se eligió una al azar para llevar a cabo microscopia electrónica de barrido, obteniéndose las fotomicrografías siguientes.



FOTOMICROGRAFIA VI.1. VISTA LATERAL DEL MATERIAL COMPUESTO ACERO INOXIDABLE - ALUMINIO- ACERO AL CARBONO, VIA MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.

En las fotomicrografías se observa la perfecta unión de los tres materiales al apreciar los límites entre ellos.

Aunado a esto se efectuaron varias pruebas para determinar el esfuerzo máximo cortante en la unión en la máquina de ensayos mecánicos INSTRON dando como resultado los siguientes valores.

TABLA VI.3. TABLA DE RESULTADOS DENTRO DEL RANGO OPTIMO DE PARAMETROS.

| No. Prueba                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|---------------------------|------|------|------|------|------|
| % de Laminación.          | 39   | 39   | 39   | 39   | 39   |
| Esfuerzo Máximo.<br>(MPa) | 66.9 | 79.0 | 47.0 | 77.2 | 58.0 |
| Velocidad de lam.         | 60   | 60   | 60   | 60   | 60   |

COMENTARIOS: Al repetir el proceso en las condiciones que consideramos como optimas, se observa que de la prueba de esfuerzo cortante máximo se obtuvo una fluctuación considerable de los valores que van de 47 a 79 MPa, consideramos que dicha fluctuación puede ser debida, al proceso de preparación de las muestras para tracción, ya que se someten a esfuerzos elevados y localizados.



## CAPITULO SIETE

## CONCLUSIONES

(1) Se ha podido elaborar un material compuesto a base de Acero inoxidable - Aluminio - Acero al carbono, mediante una técnica de laminado conjunto, de manera satisfactoria y con temperaturas más bajas, en comparación con las utilizadas en los métodos convencionales, reportados en la literatura.

(2) Otro de los aspectos importantes es que la reducción en las temperaturas utilizadas, reditúa beneficios económicos adicionales en virtud de aspectos como, la no necesidad de atmósfera controlada para evitar oxidación, reducción en gastos de mantenimiento del equipo al emplear temperaturas más bajas y disminución de costo debido al menor gasto de energía.

(3) Para lograr una unión satisfactoria es determinante el empleo de una técnica de limpieza que asegure una calidad superficial adecuada de las partes a unir. En este sentido, esta necesidad se resolvió mediante el uso de un desengrasante industrial de bajo costo, lo cual colabora a alcanzar una adecuada economía del proceso.

(4) Se encontró que la fuerza de unión está en función de la temperatura de laminación. A temperaturas bajas, se necesita un alto porcentaje de laminación para lograr la unión y conforme se incrementa la temperatura se necesitan porcentajes de deformación bajos, medios y altos; cuando la temperatura sobrepasa los  $600^{\circ}\text{C}$  se oxida rápidamente la superficie del acero al carbono y se generan precipitaciones de carburos en el acero inoxidable.

(5) Otro de los factores importantes es la velocidad de laminación, ésta, según muestran los resultados bajo las mismas condiciones de temperatura y porcentaje de laminación se

obtuvieron mejores resultados a mayores velocidades, esto es debido a que a mayor velocidad, en nuestro caso, se evita la formación de óxido durante la deformación, minimizando el tiempo de interacción del medio ambiente con los materiales a unir. Existe pues, la posibilidad de unión a temperaturas bajas con velocidades de laminación medias o altas, y a temperaturas altas, con velocidades de laminación bajas, medias o altas.

(6) Se encontró que el porcentaje de deformación es otro de los parámetros importantes, ya que a una temperatura constante se tiene un porcentaje de deformación mínimo crítico en el cual se logra la unión y a su vez al ir incrementando el porcentaje de deformación tenemos un límite máximo crítico en donde se obtiene un espesor máximo de reducción.

(7) En virtud de los parámetros antes mencionados y del resultado de la matriz de decisiones las condiciones óptimas encontradas para el proceso y par estudiados son un porcentaje de laminación del 33% a una temperatura de 400°C y con una velocidad de laminación de 60 ft/min.; en dicho rango se puede apreciar un acabado superficial brillante por el lado del acero inoxidable y en la superficie del acero al carbono se tiene una apariencia buena libre de óxido. Por otra parte la prueba de cortante nos reporta el mayor valor del esfuerzo máximo de corte que soportó la unión de los materiales de todas las realizadas dentro del rango de temperaturas escogido.

(8) Se ha encontrado una afinidad entre el aluminio y los dos aceros empleados para obtener el recubrimiento del acero inoxidable sobre el acero al carbono. Ello permitiría sustituir espesores muy grandes de acero inoxidable utilizados en la fabricación de equipo industrial con el material compuesto encontrado; se abatiría así el costo del equipo fabricado, lo cual

nos permitiría pensar en la posibilidad de implementar este proceso a nivel industrial.

(9) Dado el consumo nacional de aceros y la apertura hacia el contexto internacional que se está viviendo, encontramos que de ser aceptado comercialmente este proceso, se podría implementar a nivel industrial con ciertas recomendaciones tanto en el equipo a utilizar como en el control de los parámetros que intervienen en el mismo, además de tener buenas perspectivas para un mercado que tiene un consumo como el de nuestro país.

(10) Dentro del proceso existe la necesidad de controlar el tiempo de calentamiento y de permanencia a esta temperatura, ya que, en el control de este tiempo y de la temperatura misma radica la formación de óxido en la superficie del acero al carbono. Al implementar el proceso a nivel industrial dicho control de temperatura se resolvería con la utilización de trenes de laminación continua así como hornos que cuenten con un control exacto de la temperatura; un estricto control en la limpieza de los materiales a unir, además de un control de la velocidad de laminación y del porcentaje de deformación dado a los materiales.

(11) Las limitaciones en el tamaño del equipo experimental de laminación empleado hacen necesaria la recomendación de ampliar los estudios que permitan valorar de manera más completa y profunda la posible influencia de fenómenos tales como la difusión, recristalización, precipitación de carburos del acero inoxidable, y de condiciones de operaciones tales como la aplicación de tratamientos térmicos adicionales al proceso, control de tiempo de calentamiento y permanencia a la temperatura de laminación, control de la temperatura del horno, etc., tamaño de las laminas a unir, además de las propiedades finales del material compuesto.

## APENDICE A

El presente apéndice tiene como fin explicar las bases del programa que se utilizó para calcular la temperatura de las probetas.

Partiendo de la necesidad de tener un parámetro de control del tiempo, dado que en función de este y de la temperatura esta la formación de óxido en la superficie del acero al carbono, se procedió a diseñar un programa que nos permitiera visualizar las temperaturas de la probeta durante el proceso de calentamiento y durante el transporte de la misma a la laminadora. [33]

#### CONSIDERACIONES.

Antes de entrar al horno las probetas son empaquetadas y como consecuencia de este empaquetamiento las tres laminas quedan unidas solamente en una superficie muy pequeña donde se lleva a cabo el dobles y la superficie restante queda separada como lo muestra la fotografía siguiente, se considerarán como separadas cada una de las láminas durante el calentamiento y hasta llevarla a la laminadora.



FOTOGRAFÍA A.1. Muestra del ensamble unido.

Una lámina con la geometría de la figura (A.1) y con transferencia de calor por convección en todo su alrededor de manera constante tiene un flujo de calor simétrico dando la posibilidad de estudiar este flujo considerando solamente una octava parte del cuerpo teniendo estas las condiciones que muestra la figura (A.2). Y pudiéndose proyectar las temperaturas encontradas en esta sección a las demás secciones del cuerpo.

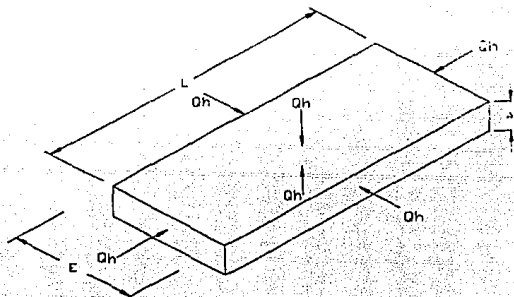


FIG. A.1. Esquema ilustrativo de la transferencia de calor a la que es sometida cada una de las láminas.

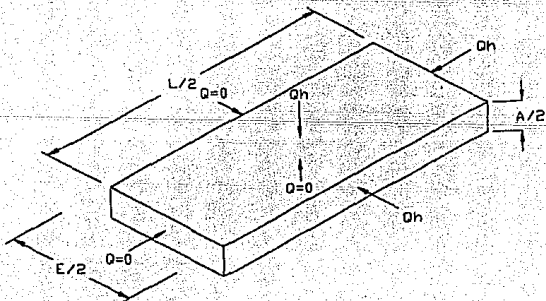


FIG. A.2. Esquema que muestra las condiciones de frontera de la octava parte de una lámina.

A esta octava parte se le puede dividir en elementos finitos, tantos como sea posible, teniendo en cuenta que entre más sean, más fidedigno será el resultado del análisis, pero teniendo en consideración que a cada uno de estos elementos se le realizará una ecuación de balance de energía y que cada ecuación formará parte de un programa que se hará por medio del paquete de computación turbopascal, el cual tiene un límite de memoria disponible. Nosotros dividimos esta octava parte en 48 elementos, lo que nos da como resultado que el cuerpo total se dividió en 384 elementos de aproximadamente  $5.76 \times 10^{-09} \text{ m}^3$  de volumen para el caso del acero 1008 que es el más grande en volumen de las tres láminas, los elementos finitos quedaron distribuidos como se muestra en la figura (A.3) con las dimensiones dadas por las siguientes fórmulas:

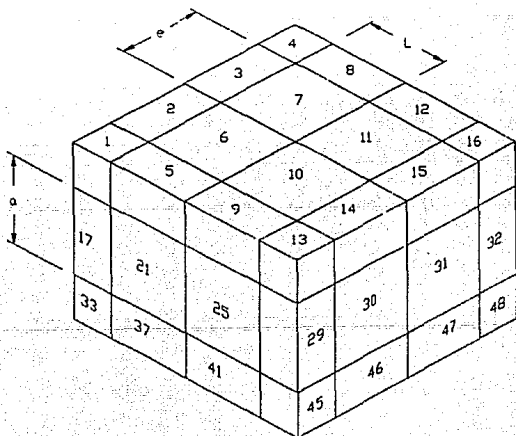


FIG. A.3. Esquema que muestra el volumen de cada uno de los elementos finitos de la octava parte de la lámina.



$$A = ATM/4$$

$$E = ETM/6$$

$$L = LTM/6$$

Donde:

ETM es el ancho de todo el material original.

ATM es el espesor de todo el material.

LTM es el largo de todo el material.

#### PROCEDIMIENTO.

A cada uno de los elementos finitos se le hizo una ecuación de balance de energía que consiste en el análisis que se muestra a continuación:

$$\sum QH + \sum QK = \nabla E_{INT}$$

Donde:

$\sum QH$  es la sumatoria de los flujos de calor que entran menos los que salen por medio de la transferencia de calor por convección en el elemento.

$\sum QK$  es la sumatoria de los flujos de calor que entran menos los que salen por medio de la transferencia de calor por conducción en el elemento.

$\nabla E_{INT}$  es el incremento de la energía interna en el elemento.

Cada uno de estos términos se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$QH = H (\nabla T) A$$

Donde:

H es el coeficiente de transferencia de calor por convección.  
 $\nabla T$  es el incremento de temperatura que hay entre la superficie y el medio.

A es el área que tiene la superficie en relación a este flujo de calor.

$$QK = K \frac{\delta T}{\delta X} A$$

Donde:

K es el coeficiente de transferencia de calor por conducción en el metal, es una propiedad del material.

$\delta T$  es el incremento de temperatura existente entre dos puntos del material (dichos puntos son los centros de nuestros elementos diferenciales).

$\delta X$  es la distancia existente entre las dos diferentes temperaturas.

A es el área transversal al flujo de calor.

$$\nabla E_{int} = (VOL \cdot c \cdot Pe \cdot \nabla T) / t$$

Donde:

VOL es el volumen del elemento diferencial.

c es el calor específico del material.

Pe es el peso específico.

$\nabla T$  es el incremento de temperatura en el elemento en el tiempo, es decir que es la temperatura en el futuro menos la del presente para lo cual en lo sucesivo se usará la letra adicional A a la temperatura presente y sin letra a la futura; por ejemplo T1A es la temperatura en el elemento 1 y en tiempo presente, mientras que T1 es la temperatura en el elemento 1 en el tiempo futuro.

t es el incremento de tiempo que a nosotros nos interesa que calcule el programa en un caso específico; cabe hacer notar que entre más pequeños sean los incrementos de tiempo más fidedigno será el resultado de la corrida del programa.

A manera de ejemplo se muestra el balance de energía aplicado a tres elementos finitos:

Para el elemento 1:

$$H/4 \cdot (T_M - T_1) \cdot E \cdot L - K/4 \cdot (T_1 - T_{17}) \cdot E \cdot L/A + K/4 \cdot (T_5 - T_1) \cdot A \cdot E/L + K/4 \cdot (T_2 - T_1) \cdot A \cdot L/E = VOL/8 \cdot c \cdot \rho \cdot Pe \cdot (T_{1A} - T_1)/t$$

Donde:

A es el ancho del elemento diferencial.

E es el espesor del elemento diferencial.

L es el largo del elemento diferencial.

VOL es el volumen del elemento diferencial como ya se había dicho y este es igual a  $E \cdot A \cdot L$ . Para este elemento es 1/8 del volumen como se ve en la figura (A.3).

$T_M$  es la temperatura del medio.

Para el elemento 16:

$$H/4 \cdot (T_M - T_{16}) \cdot E \cdot L - K/4 \cdot (T_{16} - T_{32}) \cdot E \cdot L/A + H/4 \cdot (T_M - T_{16}) \cdot A \cdot E - K/4 \cdot (T_{16} - T_{12}) \cdot A \cdot E/L + H/4 \cdot (T_M - T_{16}) \cdot A \cdot L - K/4 \cdot (T_{16} - T_{15}) \cdot A \cdot L/E = VOL/8 \cdot c \cdot \rho \cdot Pe \cdot (T_{16A} - T_{16})/t$$

Para el elemento 22:

$$K \cdot (T_6 - T_{22}) \cdot E \cdot L/A - K \cdot (T_{22} - T_{38}) \cdot E \cdot L/A + k \cdot (T_{26} - T_{22}) \cdot A \cdot E/L - K \cdot (T_{22} - T_{18}) \cdot A \cdot E/L + K \cdot (T_{23} - T_{22}) \cdot A \cdot L/E - K \cdot (T_{22} - T_{21}) \cdot A \cdot L/E = VOL \cdot c \cdot \rho \cdot Pe \cdot (T_{22A} - T_{22})/t$$

Una vez hechas las ecuaciones se procedio a reducir las algebraicamente y a despejar la temperatura futura; obteniendose asi ecuaciones de la forma que se utilizaron en el programa. Encontrandose varios factores comunes que se tomaron como variables en el programa, esto se hizo para no saturar la memoria disponible del paquete con las ecuaciones completas.

Las ecuaciones de los ejemplos anteriores quedaron como sigue:

Para el elemento 1:

$$T1 = ( 4 \cdot TH4/A + PCB \cdot T1A + KA4 \cdot T17 + KL4 \cdot T5 + KE4 \cdot T2 )/K1$$

Donde:

$$TH4 = H/4 \cdot TM \text{ como se puede ver en el programa.}$$

$$PCB = 1/8 \cdot Pe \cdot c/t$$

$$KA4 = 38 \cdot K/4 / (ATM \cdot ATH)$$

$$KL4 = 38 \cdot K/4 / (LTM \cdot LTH)$$

$$KE4 = 16 \cdot K/4 / (ETM \cdot ETH)$$

$$K1 = KA4 + KL4 + KE4 + PCB + 4 \cdot H/A$$

Para el elemento 16:

$$T16 = ( TH4 \cdot ( 4/A + 6/L + 6/E ) + KA4 \cdot T32 + PCB \cdot T16A + KL4 \cdot T12 + KE4 \cdot T15 )/KB$$

Donde:

$$KB = 6 \cdot H4/E + 8 \cdot H4/L + K1$$

Para el elemento 22:

$$T22 = ( KA \cdot T38 + PC \cdot T22A + KA \cdot T6 + KE \cdot T21 + KE \cdot T23 + KL \cdot T26 + KL \cdot T18 )/K14$$

Donde:

$$KA = 18^{\circ}K/(ATH^{\circ}ATH)$$

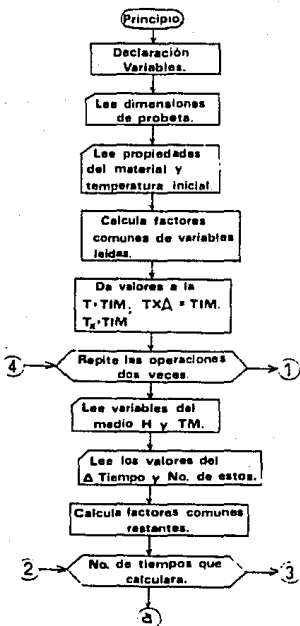
$$PC = Pa^{\circ}c/t$$

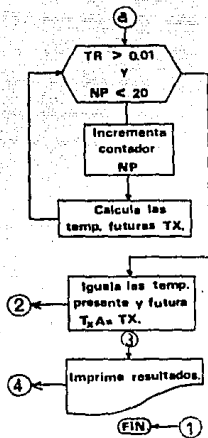
$$KE = 36^{\circ}K/(ETH^{\circ}ETH)$$

$$KL = 36^{\circ}K/(LTH^{\circ}LTH)$$

$$K14 = 2^{\circ}KA + 2^{\circ}KE + 2^{\circ}KL + PC$$

ALGORITMO DEL PROGRAMA.





PROGRAMA.

VAR

```
T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,
T22,T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31,T32,T33,T34,T35,T36,T37,T38,T39,T40,
T41,T42,T43,T44,T45,T46,T47,T48,T49,T50,T51,T52,T53,T54,T55,T56,T57,T58,T59,T60,
T11A,T12A,T13A,T14A,T15A,T16A,T17A,T18A,T19A,T20A,T21A,T22A,T23A,T24A,T25A,
T26A,T27A,T28A,T29A,T30A,T31A,T32A,T33A,T34A,T35A,T36A,T37A,T38A,T39A,T40A,
T41A,T42A,T43A,T44A,T45A,T46A,T47A,T48A,TIN,A,E,L,TM,H,PEES,K,CAES,T,TR,KE,
T10R,T1R,T20R,T26R,T33R,T42R,T48R,PC,PC2,PC4,PC8,TH,TH2,TH4,KA,KA2,KA4,KE2,
KE4,KL,KL2,KL4,H2,H4,K0,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,K8,K9,K10,K11,K12,K13,K14,K15,
K16,K17,K18,K19;REAL;
NI,NTE,NM,NP;INTEGER;
```

```
BEGIN
WRITELN('DA LAS DIMENSIONES DEL MATERIAL EN EL SIGUIENTE ORDEN DANDO UN ENTER
DESPUES DE CADA VALOR. ANCHO, ESPESOR Y LARGO');
READLN(A,L);
WRITELN('DA LAS PROPIEDADES EN EL SIGUIENTE ORDEN CALOR ESPECIFICO, K, PESO
ESPECIFICO Y LA TEMPERATURA INICIAL. ');
READLN(CAES,K,PEES,TIN);
KA:=16*K/(A*A); KA2:=0.5*KA; KA4:=0.5*KA2;
KE:=16*K/(E*E); KE2:=0.5*KE; KE4:=.5*KE2;
KL:=16*K/(L*L); KL2:=0.5*KL; KL4:=0.5*KL2;
T1:=TIN; T2:=T1; T3:=T2; T4:=T3; T5:=T4;
T6:=T5; T7:=T6; T8:=T7; T9:=T8; T10:=T9;
T11:=T10; T12:=T11; T13:=T12; T14:=T13; T15:=T14;
T16:=T15; T17:=T16; T18:=T17; T19:=T18; T20:=T19;
T21:=T20; T22:=T21; T23:=T22; T24:=T23; T25:=T24;
T26:=T25; T27:=T26; T28:=T27; T29:=T28; T30:=T29;
T31:=T30; T32:=T31; T33:=T32; T34:=T33; T35:=T34;
T36:=T35; T37:=T36; T38:=T37; T39:=T38; T40:=T39;
T41:=T40; T42:=T41; T43:=T42; T44:=T43; T45:=T44;
T46:=T45; T47:=T46; T48:=T47; T1A:=TIN; T2A:=T1A;
T3A:=T2A; T4A:=T3A; T5A:=T4A; T6A:=T5A; T7A:=T6A;
T8A:=T7A; T9A:=T8A; T10A:=T9A; T11A:=T10A; T12A:=T11A;
T13A:=T12A; T14A:=T13A; T15A:=T14A; T16A:=T15A; T17A:=T16A;
T18A:=T17A; T19A:=T18A; T20A:=T19A; T21A:=T20A; T22A:=T21A;
T23A:=T22A; T24A:=T23A; T25A:=T24A; T26A:=T25A; T27A:=T26A;
T28A:=T27A; T29A:=T28A; T30A:=T29A; T31A:=T30A; T32A:=T31A;
T33A:=T32A; T34A:=T33A; T35A:=T34A; T36A:=T35A; T37A:=T36A;
T38A:=T37A; T39A:=T38A; T40A:=T39A; T41A:=T40A; T42A:=T41A;
T43A:=T42A; T44A:=T43A; T45A:=T44A; T46A:=T45A; T47A:=T46A;
T48A:=T47A; NM:=0;
```

```
WHILE NM<= DO
BEGIN
NM:=NM+1;
NTE:=0;
WRITELN('DA EL VALOR DE H Y DE LA TEMPERATURA DEL MEDIO, ASI COMO EL INCREMENTO
DE TIEMPO Y EL NUMERO DE ESTOS. ');
READLN(H,TH,T,NT);
H:=H+0.00000000000*(TIN*TM)*((TIN*TM)+(TM*TM));
TH2:=H*0.5*TH;
TH4:=TH2*0.5;
TH1:=2*TH2;
H2:=H*0.5; H4:=0.5*H2;
PC1:=PEES*CAES/T;
PC2:=0.5*PC1;
PC4:=0.5*PC2;
PC8:=0.5*PC4;
K0:=KA4*KE4*KL4*PC8;
```

```

K1:=K0+4*H4/A;
K2:=2*K1;
K3:=2*K2;
K4:=K1-6*H4/E;
K5:=K4*2;
K6:=K1+6*H4/L;
K7:=K6*2;
K8:=K6+6*H4/E;
K9:=2*K8;
K10:=2*K9;
K11:=K0+6*H4/E;
K12:=2*K11;
K14:=2*K10;
K16:=2*K14;
K17:=K0+6*H4/L;
K18:=2*K17;
K19:=2*K18;
K13:=K11+6*H4/L;
K15:=2*K13;
FOR N:=1 TO NT DO
BEGIN
NP:=0; TR:=10;
WHILE (NP<1250) AND (TR>0.01) DO
BEGIN
NP:=NP+1;
TR:=TR;
T10R:=T10;
T20R:=T20;
T26R:=T26;
T33R:=T33;
T42R:=T42;
T48R:=T48;
T1:={4*TH4/A+PCB*T1A+KA4*T17+KL4*T5-KE4*T2}/K1;
T2:={4*TH2/A+PC4*T2A+KA2*T18+KL2*T6-KE4*T3+KE4*T11}/K2;
T3:={4*TH2/A+PC4*T2A+KA2*T19+KL2*T7+KE4*T4+KE4*T21}/K2;
T4:={TH4*(4/A+6/E)+PCB*T4A+KA4*T10+KL4*T8+KE4*T31}/K4;
T5:={4*TH2/A+PC4*T2A+KA2*T21+KE2*T6+KL4*T9+KL4*T11}/K2;
T6:={4*TH/A+PC2*T6A+KA*T23+KL2*T10+KL2*T2+KE2*T7+KE2*T8}/K3;
T7:={4*TH/A+PC2*T7A+KA*T23+KL2*T10+KL2*T2+KE2*T6+KE2*T8}/K3;
T8:={TH2*(4/A+6/E)+PC4*T8A+KA2*T24+KL4*T12+KL4*T4+KE2*T71}/K3;
T9:={4*TH2/A+PC4*T2A+KA2*T25+KL4*T13+KL4*T9+KE2*T10}/K2;
T10:={4*TH/A+PC3*T10A+KA*T26+KL2*T14+KL2*T5+KE2*T9+KE2*T111}/K2;
T11:={4*TH/A+PC2*T11A+KA*T27+KL2*T15+KL2*T7+KE2*T10+KE2*T111}/K3;
T12:={TH2*(4/A+6/E)+PC4*T12A+KA2*T28+KL4*T16+KL4*T8+KE2*T111}/K5;
T13:={TH4*(4/A+6/L)+PCB*T13A+KA4*T29+KL4*T9+KE4*T14}/K6;
T14:={TH2*(4/A+6/L)+PC4*T14A+KA2*T30+KE4*T15+KE4*T13+KL2*T101}/K7;
T15:={TH2*(4/A+6/L)+PC4*T15A+KA2*T31+KE4*T16+KE4*T14+KL2*T111}/K7;
T16:={TH4*(4/A+6/L+6/E)+KA4*T32+PCB*T16A+KL4*T12+KE4*T151}/K8;
T17:={KA4*T33+PC4*T17A+KA4*T1+KE2*T18+KL2*T211}/K9;
T18:={KA2*T34+PC2*T18A+KA2*T2+KE2*T17+KE2*T19+KL*T221}/K10;
T19:={KA2*T35+PC2*T19A+KA2*T2+KE2*T18+KE2*T20+KL*T221}/K10;
T20:={4*TH2/E+PC4*T20A+KA4*T24+KA4*T4+KE2*T19+KL*T241}/K12;
T21:={KA2*T37+PC2*T21A+KA2*T6+KE*T22+KL2*T25+KL2*T171}/K10;
T22:={KA*T28+PC*T22A+KA*T6+KE*T21+KE*T23+KL*T26+KL*T181}/K14;
T23:={KA*T39+PC*T23A+KA*T7+KE*T22+KE*T24+KL*T27+KL*T191}/K14;
T24:={6*TH/E+PC2*T24A+KA2*T40+KA2*T8+KE*T23+KL2*T28+KL2*T201}/K16;
T25:={KA*T41+PC2*T25A+KA2*T9+KE*T26+KL2*T29+KL*T211}/K10;
T26:={KA*T42+PC2*T26A+KA*T10+KE*T25+KE*T27+KL*T21+KL*T301}/K14;
T27:={KA*T43+PC2*T27A+KA*T11+KE*T26+KE*T28+KL*T23+KL*T211}/K14;
T28:={6*TH/E+PC2*T28A+KA2*T44+KA2*T12+KE*T27+KL2*T24+KL2*T321}/K16;

```



```

T29:=[6*TH2/L-PC*+T29A-KA4*T45-KA4*T13-KE2*T30-KL2*T25]/K18;
T30:=[6*TH/L-PC2*T30A-KA2*T46-KA2*T14-KE2*T31-KE2*T29-KL*T26]/K19;
T31:=[6*TH/L-PC2*T31A-KA2*T47-KA2*T15-KE2*T30-KE2*T32-KL*T27]/K19;
T32:=[TH2*(6/L*6/E)+PC4*T32A-KA4*T48-KA4*T16-KE2*T31-KL*T28]/K15;
T33:=[KA4*T33-PC8*T33A-KE4*T34-KL4*T37]/K9;
T34:=[KA2*T34-PC4*T34A-KE4*T35-KL4*T38-KL4*T44-KE2*T39]/K12;
T35:=[KA2*T35-PC4*T35A-KE4*T36-KL4*T36-KL2*T39]/K9;
T36:=[6*TH4/E+PC8*T36A-KA4*T20-KL4*T40-KE4*T35]/K11;
T37:=[KA2*T37-PC4*T37A-KL4*T33-KL4*T41-KE2*T38]/K9;
T38:=[KE2*T37A-PC2*T38A-KE2*T39-KL2*T34-KL2*T42-KA*T22]/K10;
T39:=[KE2*T38A-PC2*T39A-KE2*T40-KL2*T35-KL2*T43-KA*T23]/K10;
T40:=[6*TH2/E+PC4*T40A-KA2*T24-KL4*T36-KL4*T44-KE2*T39]/K12;
T41:=[KA2*T25-PC4*T41A-KL4*T37-KL4*T45-KE2*T42]/K9;
T42:=[KE2*T41-PC2*T42A-KE2*T43-KL2*T38-KL2*T46-KA*T26]/K10;
T43:=[KE2*T42-PC2*T43A-KE2*T44-KL2*T39-KL2*T47-KA*T27]/K10;
T44:=[6*TH2/E+PC4*T44A-KA2*T28-KL4*T40-KL4*T48-KE2*T43]/K12;
T45:=[6*TH4/L-PC8*T45A-KA4*T29-KE4*T46-KL4*T41]/K17;
T46:=[6*TH2/L-PC4*T46A-KA2*T30-KE4*T45-KE4*T47-KL2*T42]/K18;
T47:=[6*TH2/L-PC4*T47A-KA2*T31-KE4*T46-KE4*T48-KL2*T43]/K18;
T48:=[TH4*(6/L*6/E)+PC8*T48A-KA4*T32-KE4*T47-KL4*T44]/K13;
TR1=ABS(T1-T1R)+ABS(T10-T10R)+ABS(T20-T20R)+ABS(T26-T26R)+
ABS(T33-T33R)+ABS(T42-T42R)+ABS(T48-T48R);
END;
T1A:=T1;      T2A:=T2;      T3A:=T3;      T4A:=T4;      T5A:=T5;
T6A:=T6;      T7A:=T7;      T8A:=T8;      T9A:=T9;      T10A:=T10;
T11A:=T11;    T12A:=T12;    T13A:=T13;    T14A:=T14;    T15A:=T15;
T16A:=T16;    T17A:=T17;    T18A:=T18;    T19A:=T19;    T20A:=T20;
T21A:=T21;    T22A:=T22;    T23A:=T23;    T24A:=T24;    T25A:=T25;
T26A:=T26;    T27A:=T27;    T28A:=T28;    T29A:=T29;    T30A:=T30;
T31A:=T31;    T32A:=T32;    T33A:=T33;    T34A:=T34;    T35A:=T35;
T36A:=T36;    T37A:=T37;    T38A:=T38;    T39A:=T39;    T40A:=T40;
T41A:=T41;    T42A:=T42;    T43A:=T43;    T44A:=T44;    T45A:=T45;
T46A:=T46;    T47A:=T47;    T48A:=T48;
END;
WRITELN('T1=',T1:5:2,'      T2=',T2:5:2,'      T3=',T3:5:2,'
      T4=',T4:5:2,'      T5=',T5:5:2);
WRITELN('T6=',T6:5:2,'      T7=',T7:5:2,'      T8=',T8:5:2,'
      T9=',T9:5:2,'      T10=',T10:5:2);
WRITELN('T11=',T11:5:2,'      T12=',T12:5:2,'      T13=',T13:5:2,'
      T14=',T14:5:2,'      T15=',T15:5:2);
WRITELN('T16=',T16:5:2,'      T17=',T17:5:2,'      T18=',T18:5:2,'
      T19=',T19:5:2,'      T20=',T20:5:2);
WRITELN('T21=',T21:5:2,'      T22=',T22:5:2,'      T23=',T23:5:2,'
      T24=',T24:5:2,'      T25=',T25:5:2);
WRITELN('T26=',T26:5:2,'      T27=',T27:5:2,'      T28=',T28:5:2,'
      T29=',T29:5:2,'      T30=',T30:5:2);
WRITELN('T31=',T31:5:2,'      T32=',T32:5:2,'      T33=',T33:5:2,'
      T34=',T34:5:2,'      T35=',T35:5:2);
WRITELN('T36=',T36:5:2,'      T37=',T37:5:2,'      T38=',T38:5:2,'
      T39=',T39:5:2,'      T40=',T40:5:2);
WRITELN('T41=',T41:5:2,'      T42=',T42:5:2,'      T43=',T43:5:2,'
      T44=',T44:5:2,'      T45=',T45:5:2);
WRITELN('T46=',T46:5:2,'      T47=',T47:5:2,'      T48=',T48:5:2);
END

```

COMENTARIOS PREVIOS.

El programa fue corrido con los valores de dimensión reales para cada material: ancho, longitud y espesor. Además de las propiedades que se utilizaron como: calor específico, k, peso específico, temperatura inicial, H, temperatura del medio, incremento del tiempo y número de incrementos del mismo. En la tabla (A.1.) se observan dichos valores para cada material.

TABLA A.1.

| MATERIAL                          | ALUMINIO      | ACERO AL CARBONO | ACERO INOXIDABLE |
|-----------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| ANCHO (m)                         | 0.0381        | 0.0381           | 0.0381           |
| LONGITUD (m)                      | 0.0385        | 0.0835           | 0.0782           |
| ESPESOR (m)                       | 0.00042       | 0.001            | 0.0005           |
| CALOR ESP.<br>(J/Kg °K)           | 903           | 434              | 477              |
| K (W/m °K)                        | 237           | 83.8             | 14.9             |
| PESO ESP.<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | 2702          | 7832             | 7900             |
| TEMP. INICIAL<br>°C               | 18            | 18               | 18               |
| H (W/m <sup>2</sup> °K)           | 25            | 25               | 25               |
| CONDICIONES DENTRO DEL HORNO      |               |                  |                  |
| TEMP. MEDIO<br>°C                 | 320, 400, 500 | 320, 400, 500    | 320, 400, 500    |
| Δ TIEMPO(SEG.)                    | 5             | 5                | 5                |
| No. INCREMENTOS.                  | 24            | 24               | 24               |
| CONDICIONES FUERA DEL HORNO       |               |                  |                  |
| H (W/m <sup>2</sup> °K)           | 50            | 50               | 50               |
| TEMP. MEDIO<br>°C                 | 20            | 20               | 20               |
| Δ TIEMPO(SEG.)                    | 1             | 1                | 1                |
| No. INCREMENTOS.                  | 2             | 2                | 2                |

En todos los casos se uso una temperatura inicial de 20°C. La temperatura del medio durante el tiempo de estancia en el horno fue de 320, 400 y 500°C según el caso. El incremento del tiempo fue de 5 seg. y el número de iteraciones de 24 para calcular los 2 minutos de permanencia en el horno, tomando en cuenta que entre más cortos son los incrementos de tiempo hay más precisión en el sistema, durante este tiempo H = 25.

Después se consideraron para el tiempo de carga del material una H = 50 y una temperatura ambiente de 18°C con incrementos de tiempo de 1 seg. durante 5 seg., en todo este tiempo se considero también un factor de H correspondiente a la radiación igual a  $Hr = c\theta(Tx + T_{MED.})(Tx^2 + T_{MED.}^2)$  donde  $c = 5.67 \times 10^{-8}$  y  $\theta = 0.8$ .

#### CORRIDAS PROGRAMA.

ALUMINIO, TEMPERATURA = 320°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=316.88  | T2=316.87  | T3=317.05  | T4=317.46  | T5=316.65  |
| T6=316.36  | T7=316.53  | T8=317.24  | T9=317.13  | T10=317.15 |
| T11=317.33 | T12=317.71 | T13=317.67 | T14=317.71 | T15=317.89 |
| T16=318.25 | T17=316.87 | T18=316.87 | T19=317.04 | T20=317.46 |
| T21=316.65 | T22=316.35 | T23=316.52 | T24=317.23 | T25=317.13 |
| T26=317.15 | T27=317.32 | T28=317.71 | T29=317.66 | T30=317.71 |
| T31=317.88 | T32=318.25 | T33=316.87 | T34=316.87 | T35=317.04 |
| T36=317.46 | T37=316.65 | T38=316.35 | T39=316.52 | T40=317.23 |
| T41=317.13 | T42=317.15 | T43=317.32 | T44=317.71 | T45=317.66 |
| T46=317.71 | T47=317.88 | T48=318.25 |            |            |

ALUMINIO, TEMPERATURA = 320°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=315.74  | T2=315.77  | T3=315.85  | T4=315.88  | T5=315.73  |
| T6=315.77  | T7=315.84  | T8=315.86  | T9=316.08  | T10=316.11 |
| T11=316.18 | T12=316.22 | T13=316.33 | T14=316.36 | T15=316.44 |
| T16=316.47 | T17=315.74 | T18=315.77 | T19=315.85 | T20=315.88 |
| T21=315.73 | T22=315.77 | T23=315.84 | T24=315.86 | T25=316.08 |
| T26=316.11 | T27=316.18 | T28=316.22 | T29=316.33 | T30=316.36 |
| T31=316.44 | T32=316.47 | T33=315.74 | T34=315.77 | T35=315.85 |
| T36=315.88 | T37=315.73 | T38=315.77 | T39=315.84 | T40=315.86 |
| T41=316.08 | T42=316.11 | T43=316.18 | T44=316.22 | T45=316.33 |
| T46=316.36 | T47=316.44 | T48=316.47 |            |            |

ALUMINIO, TEMPERATURA = 400°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=325.82  | T1=325.92  | T3=326.16  | T4=326.72  | T5=325.62  |
| T6=325.21  | T7=325.44  | T8=326.41  | T9=326.27  | T10=326.30 |
| T11=326.54 | T12=327.07 | T13=327.01 | T14=327.07 | T15=327.31 |
| T16=327.81 | T17=325.92 | T18=325.91 | T19=326.15 | T20=326.72 |
| T21=325.61 | T22=325.20 | T23=325.44 | T24=326.41 | T25=326.26 |
| T26=326.30 | T27=326.54 | T28=327.07 | T29=327.00 | T30=327.06 |
| T31=327.30 | T32=327.80 | T33=325.82 | T34=326.91 | T35=326.35 |
| T36=326.72 | T37=325.61 | T38=325.20 | T39=325.43 | T40=326.41 |
| T41=326.26 | T42=326.30 | T43=326.54 | T44=327.07 | T45=327.00 |
| T46=327.06 | T47=327.30 | T48=327.80 |            |            |

ALUMINIO, TEMPERATURA = 400°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=324.35  | T2=324.39  | T3=324.49  | T4=324.54  | T5=324.33  |
| T6=324.39  | T7=324.48  | T8=324.51  | T9=324.81  | T10=324.86 |
| T11=324.96 | T12=325.00 | T13=325.15 | T14=325.20 | T15=325.30 |
| T16=325.34 | T17=324.35 | T18=324.39 | T19=324.80 | T20=324.54 |
| T21=324.33 | T22=324.39 | T23=324.48 | T24=324.51 | T25=324.81 |
| T26=324.86 | T27=324.96 | T28=325.00 | T29=325.15 | T30=325.20 |
| T31=325.30 | T32=325.34 | T33=324.35 | T34=324.39 | T35=324.50 |
| T36=324.54 | T37=324.33 | T38=324.39 | T39=324.80 | T40=324.51 |
| T41=324.81 | T42=324.86 | T43=324.96 | T44=325.00 | T45=325.15 |
| T46=325.20 | T47=325.10 | T48=325.34 |            |            |

ALUMINIO, TEMPERATURA = 500°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=340.08  | T2=340.07  | T3=340.41  | T4=341.21  | T5=339.64  |
| T6=339.06  | T7=339.39  | T8=340.78  | T9=340.57  | T10=340.62 |
| T11=340.96 | T12=341.71 | T13=341.62 | T14=341.73 | T15=342.05 |
| T16=342.76 | T17=340.07 | T18=340.07 | T19=340.40 | T20=341.21 |
| T21=339.64 | T22=339.06 | T23=339.39 | T24=340.77 | T25=340.57 |
| T26=340.62 | T27=340.95 | T28=341.70 | T29=341.61 | T30=341.70 |
| T31=342.04 | T32=342.75 | T33=340.07 | T34=340.07 | T35=340.40 |
| T36=341.21 | T37=339.64 | T38=339.05 | T39=339.38 | T40=340.77 |
| T41=340.57 | T42=340.61 | T43=340.95 | T44=341.70 | T45=341.61 |
| T46=341.70 | T47=342.04 | T48=342.75 |            |            |

ALUMINIO, TEMPERATURA = 500°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=337.82  | T2=337.88  | T3=338.02  | T4=338.09  | T5=337.79  |
| T6=337.87  | T7=338.01  | T8=338.05  | T9=338.47  | T10=338.53 |
| T11=338.68 | T12=338.74 | T13=338.96 | T14=339.02 | T15=339.17 |
| T16=339.22 | T17=337.82 | T18=337.88 | T19=338.02 | T20=338.09 |
| T21=337.79 | T22=337.87 | T23=338.01 | T24=338.05 | T25=338.47 |
| T26=338.53 | T27=338.68 | T28=338.74 | T29=338.96 | T30=339.02 |
| T31=339.17 | T32=339.23 | T33=337.82 | T34=337.88 | T35=338.02 |
| T36=338.09 | T37=337.79 | T38=337.87 | T39=338.01 | T40=338.05 |
| T41=338.47 | T42=338.53 | T43=338.68 | T44=338.74 | T45=338.96 |
| T46=339.02 | T47=339.17 | T48=339.23 |            |            |

ACERO INOXIDABLE, TEMPERATURA = 320°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=527.86  | T2=527.86  | T3=528.70  | T4=530.60  | T5=525.65  |
| T6=523.51  | T7=524.26  | T8=528.37  | T9=529.36  | T10=529.49 |
| T11=530.33 | T12=532.07 | T13=532.25 | T14=532.49 | T15=533.31 |
| T16=534.88 | T17=527.83 | T18=527.83 | T19=528.67 | T20=530.58 |
| T21=525.62 | T22=523.48 | T23=524.24 | T24=528.35 | T25=529.34 |
| T26=529.46 | T27=530.30 | T28=532.05 | T29=532.23 | T30=532.46 |
| T31=533.28 | T32=534.86 | T33=527.83 | T34=527.83 | T35=528.67 |
| T36=530.58 | T37=525.62 | T38=523.47 | T39=524.23 | T40=528.35 |
| T41=529.34 | T42=529.46 | T43=530.30 | T44=532.05 | T45=532.23 |
| T46=532.46 | T47=533.28 | T48=534.86 |            |            |

ACERO INOXIDABLE, TEMPERATURA = 320°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=475.40  | T2=475.47  | T3=475.68  | T4=474.51  | T5=474.23  |
| T6=474.66  | T7=474.80  | T8=473.31  | T9=476.71  | T10=476.81 |
| T11=477.02 | T12=475.78 | T13=477.24 | T14=477.37 | T15=477.57 |
| T16=476.27 | T17=475.48 | T18=475.54 | T19=475.75 | T20=474.58 |
| T21=474.30 | T22=474.74 | T23=474.88 | T24=475.39 | T25=476.78 |
| T26=476.89 | T27=477.09 | T28=475.85 | T29=477.32 | T30=477.45 |
| T31=477.64 | T32=476.35 | T33=475.50 | T34=475.57 | T35=475.78 |
| T36=474.60 | T37=474.33 | T38=474.76 | T39=474.90 | T40=473.41 |
| T41=476.81 | T42=476.92 | T43=477.12 | T44=475.88 | T45=477.34 |
| T46=477.47 | T47=477.67 | T48=476.37 |            |            |

ACERO INOXIDABLE, TEMPERATURA = 400°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=600.43  | T2=600.42  | T3=601.42  | T4=603.71  | T5=597.72  |
| T6=595.08  | T7=595.97  | T8=600.99  | T9=602.24  | T10=602.39 |
| T11=603.39 | T12=605.49 | T13=605.71 | T14=605.99 | T15=606.97 |
| T16=608.85 | T17=600.40 | T18=600.39 | T19=601.40 | T20=603.69 |
| T21=597.69 | T22=595.04 | T23=595.94 | T24=600.96 | T25=602.22 |
| T26=602.38 | T27=603.36 | T28=605.46 | T29=605.69 | T30=605.97 |
| T31=606.94 | T32=608.82 | T33=600.40 | T34=600.39 | T35=601.39 |
| T36=603.68 | T37=597.69 | T38=595.03 | T39=595.97 | T40=600.96 |
| T41=602.21 | T42=602.36 | T43=603.36 | T44=605.46 | T45=605.69 |
| T46=605.96 | T47=606.94 | T48=608.82 |            |            |

ACERO INOXIDABLE, TEMPERATURA = 400°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=527.70  | T2=527.77  | T3=527.95  | T4=526.20  | T5=526.35  |
| T6=527.02  | T7=527.11  | T8=524.82  | T9=529.23  | T10=529.34 |
| T11=529.51 | T12=527.68 | T13=529.58 | T14=529.73 | T15=529.89 |
| T16=527.99 | T17=527.80 | T18=527.88 | T19=528.05 | T20=526.30 |
| T21=526.45 | T22=527.12 | T23=527.21 | T24=524.82 | T25=528.13 |
| T26=529.44 | T27=529.62 | T28=527.78 | T29=529.88 | T30=529.89 |
| T31=529.99 | T32=528.09 | T33=527.83 | T34=527.91 | T35=528.09 |
| T36=526.33 | T37=526.48 | T38=527.16 | T39=527.25 | T40=524.95 |
| T41=529.36 | T42=529.48 | T43=529.65 | T44=527.81 | T45=529.72 |
| T46=529.86 | T47=530.02 | T48=528.12 |            |            |

ACERO INOXIDABLE, TEMPERATURA = 500°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=699.76  | T2=699.73  | T3=700.89  | T4=702.54  | T5=696.54  |
| T6=693.35  | T7=694.36  | T8=700.29  | T9=701.87  | T10=702.03 |
| T11=703.18 | T12=705.59 | T13=705.88 | T14=706.19 | T15=707.31 |
| T16=709.46 | T17=699.73 | T18=699.70 | T19=700.85 | T20=703.51 |
| T21=696.50 | T22=693.33 | T23=694.32 | T24=700.26 | T25=701.84 |
| T26=702.03 | T27=703.15 | T28=705.56 | T29=705.85 | T30=706.16 |
| T31=707.28 | T32=709.43 | T33=699.72 | T34=699.70 | T35=700.85 |
| T36=703.51 | T37=696.50 | T38=693.30 | T39=694.30 | T40=700.26 |
| T41=701.84 | T42=702.03 | T43=703.14 | T44=705.56 | T45=705.84 |
| T46=706.16 | T47=707.27 | T48=709.42 |            |            |

ACERO INOXIDABLE, TEMPERATURA = 500°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=594.56  | T3=594.64  | T3=594.69  | T4=591.01  | T5=593.12  |
| T6=594.24  | T7=594.18  | T8=590.45  | T9=596.23  | T10=596.35 |
| T11=596.40 | T12=593.54 | T13=596.05 | T14=596.19 | T15=596.22 |
| T16=593.31 | T17=594.70 | T18=594.78 | T19=594.84 | T20=592.06 |
| T21=593.27 | T22=594.39 | T23=594.33 | T24=590.59 | T25=596.38 |
| T26=596.50 | T27=596.55 | T28=593.69 | T29=596.19 | T30=596.33 |
| T31=596.36 | T32=593.45 | T33=594.75 | T34=594.83 | T35=594.89 |
| T36=592.11 | T37=593.31 | T38=594.44 | T39=594.38 | T40=590.64 |
| T41=596.43 | T42=596.55 | T43=596.59 | T44=593.73 | T45=596.24 |
| T46=596.38 | T47=596.41 | T48=593.50 |            |            |

ACERO AL CARBONO, TEMPERATURA = 320°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=437.10  | T2=436.82  | T3=437.31  | T4=438.60  | T5=435.72  |
| T6=433.39  | T7=433.83  | T8=437.15  | T9=440.99  | T10=440.93 |
| T11=441.42 | T12=442.48 | T13=443.85 | T14=443.98 | T15=444.47 |
| T16=445.34 | T17=437.08 | T18=436.80 | T19=437.29 | T20=438.58 |
| T21=435.70 | T22=433.36 | T23=433.80 | T24=437.17 | T25=440.97 |
| T26=440.91 | T27=441.40 | T28=442.46 | T29=443.83 | T30=443.96 |
| T31=444.45 | T32=445.32 | T33=437.08 | T34=436.80 | T35=437.28 |
| T36=438.58 | T37=435.70 | T38=433.33 | T39=433.77 | T40=437.17 |
| T41=440.97 | T42=440.91 | T43=441.40 | T44=442.46 | T45=443.83 |
| T46=443.96 | T47=444.45 | T48=445.31 |            |            |

ACERO AL CARBONO, TEMPERATURA = 320°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=419.43  | T2=419.45  | T3=419.35  | T4=418.91  | T5=419.94  |
| T6=420.27  | T7=420.12  | T8=419.38  | T9=421.81  | T10=421.82 |
| T11=421.72 | T12=421.29 | T13=422.45 | T14=422.44 | T15=422.35 |
| T16=421.93 | T17=419.45 | T18=419.47 | T19=419.37 | T20=418.93 |
| T21=419.96 | T22=420.38 | T23=420.14 | T24=419.40 | T25=421.84 |
| T26=421.84 | T27=421.75 | T28=421.31 | T29=422.47 | T30=422.46 |
| T31=422.38 | T32=421.95 | T33=419.46 | T34=419.48 | T35=419.37 |
| T36=418.94 | T37=419.97 | T38=420.31 | T39=420.16 | T40=419.41 |
| T41=421.84 | T42=421.85 | T43=421.75 | T44=421.32 | T45=422.48 |
| T46=422.47 | T47=422.38 | T48=421.96 |            |            |

ACERO AL CARBONO, TEMPERATURA = 400°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=486.65  | T2=486.28  | T3=486.91  | T4=488.55  | T5=484.83  |
| T6=481.77  | T7=482.34  | T8=486.74  | T9=491.71  | T10=491.63 |
| T11=492.26 | T12=493.64 | T13=495.43 | T14=495.60 | T15=496.23 |
| T16=497.35 | T17=488.62 | T18=486.25 | T19=486.88 | T20=488.56 |
| T21=484.80 | T22=481.73 | T23=482.29 | T24=486.71 | T25=491.68 |
| T26=491.60 | T27=492.24 | T28=493.61 | T29=495.40 | T30=495.57 |
| T31=496.23 | T32=497.32 | T33=486.61 | T34=486.75 | T35=486.87 |
| T36=488.56 | T37=484.80 | T38=481.69 | T39=482.26 | T40=486.70 |
| T41=491.68 | T42=491.60 | T43=492.23 | T44=493.61 | T45=495.40 |
| T46=495.57 | T47=496.20 | T48=497.32 |            |            |

ACERO AL CARBONO, TEMPERATURA = 400°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=462.04  | T2=462.07  | T3=461.91  | T4=461.29  | T5=462.73  |
| T6=463.20  | T7=462.98  | T8=461.92  | T9=465.09  | T10=465.10 |
| T11=464.95 | T12=464.33 | T13=465.84 | T14=465.83 | T15=465.69 |
| T16=465.09 | T17=462.07 | T18=462.10 | T19=461.94 | T20=461.32 |
| T21=462.76 | T22=463.23 | T23=463.01 | T24=461.98 | T25=465.17 |
| T26=465.13 | T27=464.98 | T28=464.36 | T29=465.87 | T30=465.86 |
| T31=465.72 | T32=465.12 | T33=462.08 | T34=462.11 | T35=461.95 |
| T36=461.33 | T37=462.77 | T38=463.25 | T39=463.03 | T40=461.97 |
| T41=465.13 | T42=465.14 | T43=464.99 | T44=464.37 | T45=465.88 |
| T46=465.87 | T47=465.73 | T48=465.13 |            |            |

ACERO AL CARBONO, TEMPERATURA = 500°C, DENTRO DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=559.25  | T2=558.75  | T3=559.57  | T4=561.77  | T5=556.83  |
| T6=552.77  | T7=555.49  | T8=559.30  | T9=555.88  | T10=565.76 |
| T11=566.58 | T12=568.38 | T13=570.73 | T14=570.95 | T15=571.77 |
| T16=573.21 | T17=559.21 | T18=558.71 | T19=559.53 | T20=561.73 |
| T21=556.79 | T22=552.71 | T23=553.43 | T24=559.26 | T25=565.84 |
| T26=565.73 | T27=566.54 | T28=568.34 | T29=570.70 | T30=570.91 |
| T31=571.73 | T32=573.18 | T33=559.20 | T34=558.71 | T35=559.52 |
| T36=561.73 | T37=556.79 | T38=552.67 | T39=553.29 | T40=559.25 |
| T41=565.83 | T42=565.72 | T43=566.54 | T44=568.34 | T45=570.69 |
| T46=570.91 | T47=571.73 | T48=573.18 |            |            |

ACERO AL CARBONO, TEMPERATURA = 500°C, FUERA DEL HORNO.

|            |            |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| T1=523.33  | T2=523.37  | T3=523.11  | T4=522.16  | T5=524.29  |
| T6=525.00  | T7=524.66  | T8=523.06  | T9=527.20  | T10=527.20 |
| T11=526.95 | T12=526.03 | T13=528.00 | T14=527.97 | T15=527.73 |
| T16=526.83 | T17=523.38 | T18=523.41 | T19=523.15 | T20=522.21 |
| T21=524.34 | T22=525.05 | T23=524.70 | T24=523.10 | T25=527.25 |
| T26=527.25 | T27=527.00 | T28=526.07 | T29=528.04 | T30=528.01 |
| T31=527.78 | T32=526.88 | T33=523.39 | T34=523.42 | T35=523.17 |
| T36=522.22 | T37=524.35 | T38=525.07 | T39=524.73 | T40=522.12 |
| T41=527.26 | T42=527.26 | T43=527.01 | T44=526.09 | T45=528.06 |
| T46=528.03 | T47=527.79 | T48=526.89 |            |            |

NOTA: PARA OBTENER °C REALES, RESTAR 273 AL VALOR DADO.

## APPENDICE B



## DATOS ESTADISTICOS.

### INDUSTRIA SIDERURGICA MEXICANA.

#### PRODUCCION.

La Industria Siderúrgica Mexicana registró en 1990 un importante aumento del 10.9%, al obtener un volumen de acero crudo de 8.705 millones de toneladas, convirtiéndose en el único país que consiguió un crecimiento de este orden en América Latina. Este aumento en el acero, es congruente con el crecimiento mostrado por la economía en su conjunto, desarrollada en un marco de mayor modernidad y utilización más eficiente de los equipos de su planta industrial, en la búsqueda de una opción más participativa en el proceso de apertura hacia la competencia internacional.

El esfuerzo por abandonar procesos de producción obsoletos ha continuado. Es así como tiende a desaparecer el proceso de fabricación de acero conocido como "Siemens Martin", ya que en 1990 mediante este proceso se produjo sólo el 8.2% del acero en el país. La producción de acero por cada uno de los procesos fue:

|  |       |
|--|-------|
| 713,000 toneladas Horno de Hogar Abierto                   |       |
| "Siemens Martin"   | 8.2%  |
| 4'462,000 toneladas Horno Eléctrico                        | 51.3% |
| 3'530,000 toneladas Convertidor al Oxígeno Básico (B.O.F.) | 40.5% |

La industria proveedora de ferroaleaciones para la fabricación de acero, bajó su producción en 25.2% registrando un volumen de 265,000 toneladas. El 70% de esa producción correspondió al ferromanganeso (186,000), 20% al silicomanganeso (53,000), 9% al ferrosilicio (25,000) y el 1% restante, se distribuyó en productos tales como: ferrocromo, ferromolibdeno, ferrovandio, etc.

Por otra parte la producción de arrabio y fierro esponja ascendió a 6.2 millones de toneladas, de las cuales 2.5 millones correspondieron al fierro esponja fabricado por el proceso de reducción directa y 3.7 millones de arrabio proveniente del alto horno. Es importante destacar que SICARTSA en su segmento II contribuyó con el 32% de la producción de fierro esponja.

La producción de acero por sectores fue: empresas paraestatales 4'900,000 toneladas, 56,3%; empresas privadas 3'805,000 toneladas, 43.7%. Por empresas los resultados fueron los siguientes:

|             | Miles de Toneladas |       |                |
|-------------|--------------------|-------|----------------|
|             | 1989               | 1990  | Variación<br>% |
| AHMSA       | 2,862              | 3,096 | 8.2            |
| SICARTSA I  | 925                | 1,147 | 24.0           |
| SICARTSA II | 411                | 655   | 59.4           |
| HYLSA       | 1,812              | 1,875 | 3.5            |
| TAMSA       | 468                | 503   | 7.5            |
| MINIACERIAS | 1,373              | 1,429 | 4.1            |
| TOTAL       | 7,851              | 8,705 | 10.9           |

La utilización de la capacidad instalada nominal estimada en 11.2 millones de toneladas fue del 78%. La producción nacional de laminados se incrementó 8.8% en 1990, alcanzando un cifra de 6 millones 462,000 toneladas. La producción de productos planos de 2'685,000 toneladas significó un crecimiento del 4.1%. En relación a los laminados planos su producción fue de 3'447,000 toneladas, presentando un importante aumento del 14.7%, dado el impulso durante el año de los mercados que absorben estos productos.

En la producción de tubos sin costura, se observó una caída del

7% al registrarse un volumen de 330,000 toneladas, atribuible entre otros factores, a una ligera suspensión de actividades en el segundo semestre del año, la fuerte contracción en su mercado interno y el persistente proteccionismo en el mercado internacional.

En el grupo de productos planos la producción de placa mostró un ligero incremento del 2.4% al lograr un nivel de 541,000 toneladas; la lámina rolada en caliente y en frío con volúmenes de 988,000 y 1'072,000 toneladas presentaron aumentos de 15.5% y 4.5%.

Dentro de los productos derivados destacó en primer término el crecimiento en la lámina galvanizada del 12.1% al obtener una cifra récord estimada en 416,000 toneladas, seguido por los avances del 1.9% en tubos con costura que de 367,000 toneladas que se produjeron en 1989 pasó a un volumen de 374,000 toneladas en 1990.

El incremento del 14.7% en los productos no planos estuvo apoyado por crecimientos en varilla corrugada del 21.9%, perfiles comerciales 12.8%, alambón 9.8% y perfiles estructurales 3%. En barras macizas se observó una ligera disminución del 2.1%. Los alambres y derivados por su parte, registraron la más dinámica producción al lograr un volumen de 375,000 toneladas, es decir 12.7% más.

En la producción de laminados no planos (3'447,000 toneladas) la industria integrada ganó una ligera participación (1.6%) al pasar de 1'783,000 toneladas en 1989 (59.3%) a 2'100,000 toneladas en 1990 (60.9%) el resto correspondió a las miniaceras, que aumentaron 2.4% en participación al obtener el 34.3% del total con 1'185,000 toneladas en 1990, en detrimento de la pérdida del 4% en el grupo de empresas relaminadoras, cuya producción sufrió una fuerte caída del 37.9% para situarse en 162,000 toneladas.

## EXPORTACIONES.

En 1990, la Industria Siderúrgica registró un aumento del 3.4% en sus niveles de exportación, colocando en el mercado 1'467,000 toneladas, integradas por: productos planos 169,000 toneladas, productos no planos 258,000 toneladas; tubos sin costura 234,000 toneladas; otros productos 270,000 toneladas y de productos semi-terminados 543,000 toneladas.

La exportación de productos laminados (planos, no planos y tubos sin costura) fue de 654,000 toneladas, inferior en 18% a las 798,000 exportadas el año anterior. Esta baja obedece principalmente al repunte observado en el mercado interno, así como al descenso de los precios en nuestro mercado natural y a la rigidez mostrada por el sistema de cuotas del segundo Acuerdo de Restricción Voluntaria entre los dos países (VRA II).

Esta situación ha permitido mantener la política de diversificación de las exportaciones, llegando así a países como China, Hong-Kong, Filipinas, Singapur y Japón entre otros.

En 1990 se exportaron 573,000 toneladas a través del sistema de cuotas, representando el 39% del total exportado. En esta materia, todos los esfuerzos encaminados hacia la negociación de un más equitativo trato comercial con Estados Unidos y Canadá, mediante el Acuerdo del Libre Comercio, redundarán en mayores volúmenes de exportación de productos mexicanos de acero hacia el mercado de dichos países, mejorando las actuales condiciones de operación del VRA y disminuyendo en forma progresiva las barreras arancelarias y no arancelarias que obstaculizan el flujo comercial de nuestros productos.

## IMPORTACIONES.

Por su parte, las importaciones definitivas de productos siderúrgicos ascendieron a 1'114,000 toneladas, lo que significó un incremento sobre 1989 del 26%; dentro del total de productos terminados de 1'030,000 toneladas, 534,000 corresponden a productos planos (52%); 269,000 a productos no planos (26%); 58,000 a tubos con y sin costura (6%) y los restantes 169,000 a otros productos (16%).

Como resulta evidente, las importaciones de productos siderúrgicos mantuvieron su tendencia ascendente de los últimos tres años, baste señalar que en los productos planos y no planos los incrementos respecto al año anterior son del orden del 40 y 51% respectivamente.

## CONSUMO NACIONAL APARENTE.

El balance positivo registrado en la economía en 1990, repercutió en un aumento en el nivel de la producción siderúrgica del 10.9% y un saldo neto exportador en la balanza comercial en volumen, lo cual dio lugar a un importante crecimiento en el consumo de acero del orden del 16.5%, al alcanzar un volumen de 8'663,000 toneladas.

En productos planos se obtuvo un crecimiento del 15.1% debido a la dinámica de sus mercados como son: productos metálicos, maquinaria y equipo, que creció en 17.9%. La industria automotriz mostró un crecimiento en su producción del orden del 25%, minería 3.2%, extracción de petróleo 1.6%, petroquímica básica 13.2%, industria eléctrica aumentó su capacidad de generación de energía un 5.2%, industrias metálicas básicas 8%, fabricación de tuberías 9%, etc.

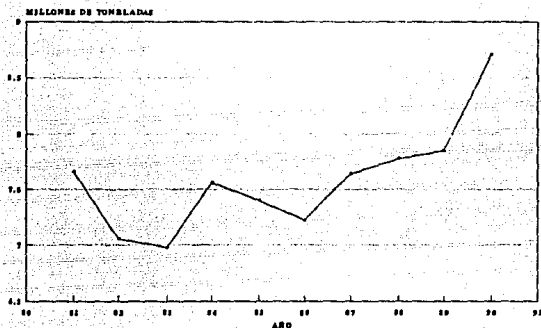
El consumo nacional aparente de los productos no planos fue de 3'398,000 toneladas superior en 15.2% al consumo del año pasado, lo que obedece al positivo desempeño que manifestó la industria de la construcción durante el año de alrededor del 7.7%, por ser esta actividad la que consume la mayor parte de estos productos. La disminución del 6.5% en el consumo de tubería sin costura se explica porque casi toda su producción es canalizada al mercado de exportación.

El consumo de tubos con costura, aumentó 5.9%, apoyado básicamente en la demanda de tubos de diámetros mayores, por parte de entidades gubernamentales como SARH, la CFE, el Departamento del Distrito Federal y PEMEX.

En diámetros menores el consumo registró un ligero incremento de 1%, al pasar de 209,000 toneladas en 1989 a 211,000 en 1990, aumentos motivados por el favorable comportamiento de la industria de la construcción.

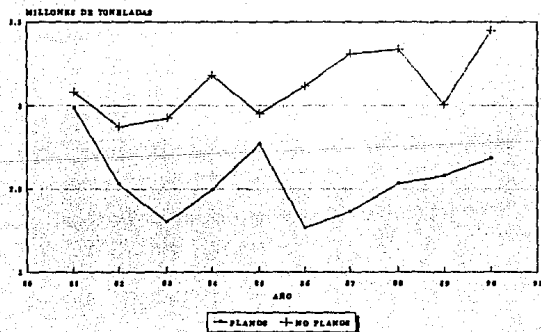
La lámina galvanizada presentó un crecimiento de su consumo estimado en 12.3%, al pasar de 260,000 toneladas en 1989 a 292,000 en 1990, debido a la importante dinámica de sus mercados consumidores entre ellos la industria de la construcción y manufacturas de maquinaria y equipo mecánico y eléctrico. (34)

## PRODUCCION NACIONAL DE ACERO



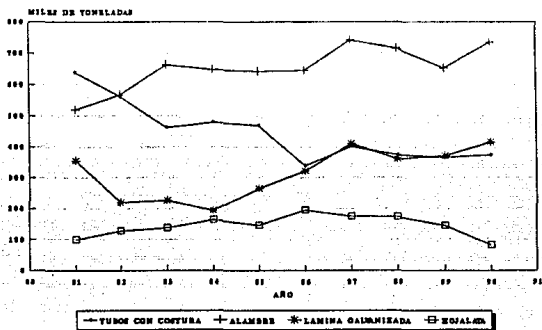
Cifras preliminares para 1990

## PRODUCCION NACIONAL DE LAMINADOS



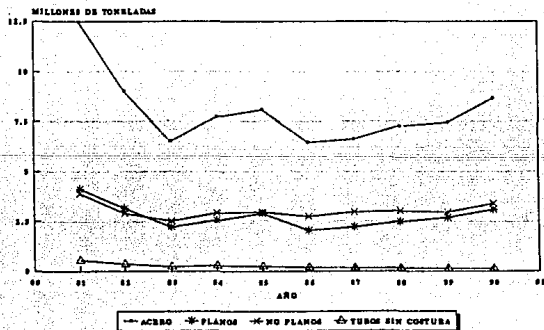
Cifras preliminares para 1990

## PRODUCCION NACIONAL DE PRINCIPALES PRODUCTOS SIDERURGICOS DERIVADOS



Cifras preliminares para 1990

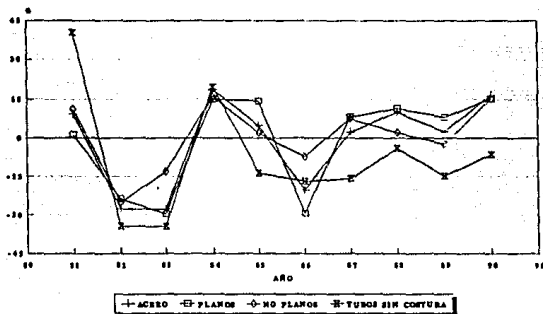
## CONSUMO NACIONAL APARENTE DE ACERO



Cifras preliminares para 1990

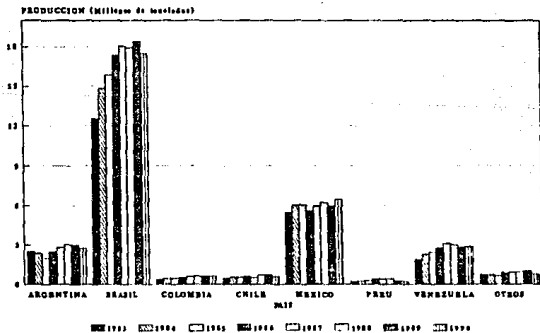


## CONSUMO NACIONAL APARENTE DE ACERO (% DE VARIACION)



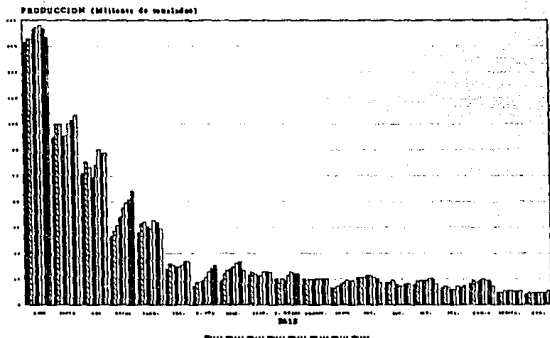
Cifras preliminares para 1990

## PRINCIPALES PRODUCTORES DE LAMINADOS EN A. L.



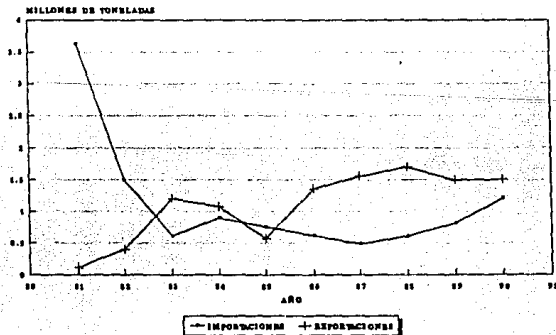
CIFRAS PRELIMINARES PARA 1990

## PRINCIPALES PRODUCTORES DE ACERO EN EL MUNDO



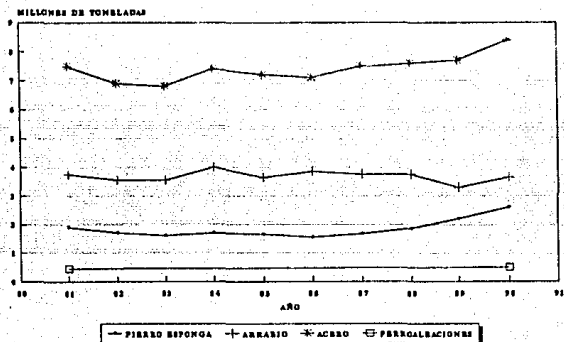
CIIFRAS PRELIMINARES PARA 1996

## EXPORTACION E IMPORTACION SIDERURGICA



Fuente: CANACERO

## PRODUCCION DE MATERIALES SIDERURGICOS BASICOS



Fuente: CANACERO

## **ANEXO C**

## EVALUACION DE PROCESOS DE REVESTIMIENTO OBTENIDOS POR MEDIO DE DIVERSOS MÉTODOS DE UNIÓN DE METALES (CLADDING).

En este anexo se presenta un resumen de los procesos, junto con una selección guiada de los mismos, la cual incluye factores de costo, medio corrosivo y construcción de equipo que puede ser usado para varios procesos comerciales.

La combinación de altas temperaturas y presiones, junto con el uso de sustancias químicas cada vez más fuertes, ocasionan ambientes más severos en plantas de procesos químicos industriales. Por ello es que se requiere una mayor resistencia al deterioro en equipos. Una respuesta para este problema de materiales es hacer equipo con metales de alto funcionamiento. Esto, sin embargo, es costoso y el equipo puede carecer de una integridad estructural. Puesto que la corrosión es un fenómeno superficial, es necesaria en muchas ocasiones solo una capa resistente a la corrosión o sea el revestimiento. Una capa gruesa de un material estructural menos costoso se usa para cubrir los requisitos mecánicos.

Aunque hay una significativa diferencia en el precio entre el revestimiento y sustrato, y la fracción del revestimiento (cladding) usado es del 10-20% del peso total, el costo puede ser menor que la mitad respecto al que correspondería si solo se empleará una aleación resistente a la corrosión. Sin embargo, el costo del revestimiento (cladding) puede exceder el costo del supuesto ahorro en metal si los espesores se acercan a los del sustrato, si el sustrato es delgado, o si el envase es pequeño. [20]

## TIPOS DE PROCESOS DE REVESTIMIENTO POR UNIÓN DE METALES (Cladding).

La tabla (c.1) menciona varios métodos de revestimiento (cladding), junto con sus ventajas y limitaciones. Discutiremos estos métodos a continuación:

**LOOSE LINING** (Revestimiento por forro disuelto conocido en algunas industrias como "Lainado").- Este es quizás el método más simple empleado para obtener revestimientos (por cladding) metálicos. El equipo es fabricado a partir de metales estructurales convencionales del espesor apropiado. Así una lámina de metal muy delgada (típicamente de 0.3-2mm de espesor) resistente a la corrosión, es colocada como una especie de forro o revestimiento. Dicho forro o revestimiento puede usarse internamente como en recipientes a presión o en intercambiadores de calor. Este proceso también puede utilizarse para revestir un agitador. El "lainado" es utilizado básicamente por su resistencia a la corrosión; siempre que las propiedades del sustrato satisfagan los requerimientos estructurales. En tanto el forro no sea sometido al vacío, el equipo operará satisfactoriamente.

**RESISTANCE CLADDING** (Revestimiento por resistencia).- Este tipo de revestimiento emplea las propiedades de un material que funge como capa intermedia, la combinación se logra mediante soldadura por resistencia, pudiéndose unir muchos materiales sea que se trate de materiales metalúrgicamente incompatibles o compatibles. Antes de aplicar la soldadura las superficies del revestimiento y del sustrato son preparadas; y la capa intermedia es aplicada junto con las láminas delgadas del revestimiento colocándolas apropiadamente sobre el sustrato.

Un par de electrodos es montado en el interior y exterior de las superficies del sandwich metálico comprimiendo al revestimiento, capa intermedia y substrato. Pulsos eléctricos sincronizados con un mecanismo de rotación, colocan una serie de puntos superpuestos de soldadura. Esta particular disposición crea un área de unión alrededor del ancho de los electrodos del mecanismo.

Las áreas unidas son espaciadas entre 1-6", dependiendo de la aplicación. Para completar las secciones soldadas y proveer una apropiada unión se acercan boquillas y otras aperturas, así como, brazos cercanos, a salientes o irregularidades en el exterior.

El revestimiento por soldadura por resistencia puede ser utilizado en el interior de tuberías de pipas, por abajo de 10" de diámetro y 3ft de longitud. No hay limitación para tamaños grandes, mientras el equipo pueda ser revestido por secciones. Para cierto equipo, si tiene una conductividad térmica o eléctrica suficiente, puede alcanzarse un enlace completo. Dicho enlace puede lograrse por medio de costuras superpuestas soldadas, al llevarse a cabo un llenado completo en la superficie de unión.

Después el revestimiento es aplicado a la estructura de los miembros del equipo y las partes son ensambladas, los bordes del substrato de las láminas adyacentes son unidos por soldadura convencional. El revestimiento es unido por soldadura de arco de tungsteno usando una atmósfera protectora.

**TERMOROCIADO.** - El proceso de pulverizado térmico es parte del grupo de procesos, cuya finalidad es dividir finamente materiales metálicos y no metálicos depositando estos en un estado semi- o completamente fundidos sobre el substrato para formar una capa o revestimiento. La energía térmica necesaria es provista por el consumo de un combustible (por ejemplo, oxígeno-gas), por arco eléctrico o por plasma. Las partículas del revestimiento metálico son calentadas hasta llegar al estado plástico o en estado

fundido, y son aceleradas por la detonación de una onda de gas, (obviamente la superficie del sustrato debe prepararse). La multicapa de revestimiento es provista por el impacto de las partículas; y consta de depósitos superpuestos. El rango de espesores que se puede obtener por este proceso es de 0.2-2.5mm

La temperatura a la que debe de estar el sustrato la determina el pulverizado térmico que generalmente no debe exceder de 150-200°C; el propósito de esto es minimizar las distorsiones que se pudieran ocasionar sobre el sustrato. Esto elimina diluciones en la capa, lo cual es importante si el revestimiento y el sustrato no son compatibles metalúrgicamente — ciertamente las combinaciones están formadas por mezclas, dichas mezclas pueden ser adversas como resultado de la interacción del intermezclado de las especies. Un ejemplo de ello serían el níquel y el cobre que son metalúrgicamente compatibles; el acero y el zirconio no son compatibles.

WELD OVERLAYING (RECUBRIMIENTO POR SOLDADURA).- Algunas veces llamado soldadura por recubrimiento, este proceso consiste en la aplicación de una capa relativamente rica de metal soldado sobre el sustrato. La técnica es usada para producir superficies resistentes al desgaste y erosión, así como también para la corrosión. Varios de los procesos de soldadura normales pueden ser usados para soldadura por recubrimiento; por medio de arco sumergido, arco de gas con material de aporte, arco de núcleo fundido, soldadura de arco de tungsteno, soldadura con plasma y métodos de soldadura por electroescoria. En la selección de un método de soldadura hay que considerar el objetivo de dicha selección, área y espesor del recubrimiento, la configuración del sustrato, la disponibilidad del equipo de soldadura, trabajo y costo de los materiales y compatibilidad del recubrimiento sobre los sustratos metálicos.



Muchas de las aleaciones comerciales, tales como níquel - y algunas a base de cobre - además de algunos aceros inoxidables pueden ser usadas en la producción de recubrimientos resistentes a la corrosión.

ROLL CLADDING (LAMINADO CONJUNTO).- Este proceso produce una placa (lámina) de un material compuesto. Dos o más metales - típicamente o relativamente finos en la superficie y un substrato grueso son laminados conjuntamente bajo cierta carga y calentamiento hasta que estos son íntegramente unidos a lo largo de toda la superficie de contacto. Dependiendo del recubrimiento metálico, este método puede ser usado para la resistencia al desgaste y abrasión, así como también para la corrosión. La fabricación del proceso consta de múltiples pasos. Para la unión de las superficies estas son preparadas y puestas en contacto. Dos o más piezas pueden ser producidas simultáneamente, colocando sobre las piezas y poniendo separadamente entre ellas los componentes. El apilamiento es sellado con soldadura (la utilización del sellado es con el fin de prevenir escurrimientos o movimientos de los componentes) alrededor de la periferia para formar un "paquete compuesto". El aire es evacuado del paquete, dicho paquete es calentado en un horno a la temperatura conveniente para el proceso. Este paquete es laminado en un molino de laminación para formar una lámina o placa, al alcanzar el estado sólido de unión. Finalmente, el sellado de la soldadura es cortado y las placas recubiertas son separadas. Estas placas o láminas son más tarde conformadas y soldadas por el fabricante.

EXPLOSION CLADDING (REVESTIMIENTO POR EXPLOSION).- En esta línea de procesos la energía de detonación del explosivo es controlada a cierta distancia pudiendo con esto unir dos o más metales. El recubrimiento metálico es acelerado rápidamente ocurriendo la unión metalúrgica cuando se genera el choque entre

el sustrato y el recubrimiento utilizado. Normalmente un intermediario metálico es requerido para la unión. Usualmente este proceso es hecho a temperatura ambiente. Durante la explosión, el sustrato permanece fijo. El recubrimiento es colocado paralelamente junto con el sustrato y a una apropiada distancia. El explosivo es uniformemente distribuido sobre la superficie del recubrimiento y es detonado en cada punto a lo largo de la línea. La detonación es dada en forma progresiva en el sitio donde se pretende la unión, causando con esto una deformación localizada al recubrimiento; acelerando esto en el otro extremo a una distancia conveniente. A pesar que pueden ser recubiertos cilindros por explosión, el proceso frecuentemente es más apropiado para producir placas planas. De esta manera, se producen partes como tapas de recipientes y el armazón. [28]

TABLA C.1. SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE REVESTIMIENTO (CLADDING),  
CONSIDERANDO LAS VENTAJAS Y LIMITACIONES.

PROCESO.

LAINADO (LOOSE LINING).

VENTAJAS. Es relativamente barato; de fácil producción si el sustrato y los metales de revestimiento están fácilmente disponibles; de fácil reparación, por otra parte se puede realizar aun si el sustrato y el recubrimiento no son metalúrgicamente compatibles.

LIMITACIONES. Al introducir vacío puede romperse la capa de lainado. Esto puede ser aliviado agregando periódicamente nuevas capas al sustrato o incrementando su espesor, pero ambas opciones incrementan el costo. Se daña con facilidad, mecánicamente. La transferencia de calor es reducida.

## REVESTIMIENTO POR RESISTENCIA.

**VENTAJAS.** Se pueden unir metales que son metalúrgicamente compatibles. El revestimiento puede ser aplicado después de la fabricación de los componentes del equipo, así como, antes, durante o después del ensamble final. El revestimiento puede aplicarse a equipo usado. Es relativamente barato.

**LIMITACIONES.** El material de revestimiento (ciad material) debe tener baja velocidad de corrosión para las condiciones del proceso, debido al espesor relativamente delgado de la capa de revestimiento. Para geometrías complejas puede ser bastante caro. Un pulido en la superficie final no es posible. No es una alternativa de costo para materiales de construcción baratos.

## TERNOROCIADO.

**VENTAJAS.** Son de rápida producción para materiales de laminado comunes. Su campo de competencia es relativamente común. Son relativamente baratos. El sustrato y el recubrimiento se podrán unir aun si no son metalúrgicamente compatibles.

**LIMITACIONES.** En las piezas complejas se dificulta o en ocasiones que el recubrimiento se una perfectamente a la superficie. La unión primaria es de carácter mecánico. Los recubrimientos son inherentemente porosos, pero esto puede disminuirse aumentando la densificación del recubrimiento, usando medios térmicos o mecánicos. Se puede sellar o rellenar el revestimiento pero este sellado puede originar una débil unión con respecto a la corrosión. La interacción de las partículas plásticas o fundidas, con el medio ambiente del pulverizado puede no ser aceptable con metales reactivos.

## RECUBRIMIENTO POR SOLDADURA.

**VENTAJAS.** Las partes pequeñas y complejas pueden recubrirse. Su campo de acción es relativamente común. Son de rápida producción para materiales de laminado comunes.

**LIMITACIONES.** Usualmente se lleva a cabo después de terminar la fabricación del equipo. En algunos casos se puede restringir el acceso del equipo de soldadura a la pieza. Puede darse un proceso de dilución de la soldadura por la porción del sustrato que funde durante el overlay recubrimiento. El proceso puede distorsionar al equipo. Si el sustrato y el revestimiento son metalúrgicamente incompatible las combinaciones para otros recubrimientos no serán posibles.

## LAMINADO CONJUNTO.

**VENTAJAS.** En este proceso se produce una total unión en la superficie. Tamaños bastante grandes son posibles de obtener. Los espesores del recubrimiento pueden estar en el rango de 5-50% del espesor del material compuesto.

**LIMITACIONES.** Si el sustrato y el material del revestimiento son metalúrgicamente incompatible las combinaciones no podrán ser fabricadas. El proceso no es aplicable para partes conformadas. La unión se debe en parte a un enlace metalúrgico y en otra a un enlace mecánico.

## FORMADO (UNIÓN) POR EXPLOSIÓN.

**VENTAJAS.** Son posibles las uniones de una alta calidad metalúrgica. Es posible la unión pese a la incompatibilidad metalúrgica en ciertos pares metálicos. Las propiedades mecánicas de ambos metales no son alteradas. La interfase entre el recubrimiento y el sustrato es normalmente más fuerte que el más

débil de los dos metales. Metales que tienen muy diferentes propiedades pueden ser unidos. Hay un rango bastante extenso para las relaciones de espesor que son posibles con el recubrimiento y el sustrato. Sustratos de SiO<sub>2</sub> de espesor se pueden utilizar.

**LIMITACIONES.** El recubrimiento metálico debe tener un cierto espesor mínimo. En la periferia de la placa o lámina recubierta se encuentra una unión pobre y muchas veces no está unida. Este proceso es relativamente caro.

TABLA C.2. GUÍA GENERAL PARA LA SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE REVESTIMIENTO (Cladding).

|   | Loose<br>lining | Resistance<br>cladding | Thermal<br>spraying | Weld<br>overlaying | Roll<br>cladding | Explosion<br>cladding |
|---|-----------------|------------------------|---------------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| <b>COMPATIBILIDAD METALURGICA.</b>  |                 |                        |                     |                    |                  |                       |
| -Compatibilidad   |                 |                        |                     | X                  | X                |                       |
| -Incompatibilidad.  | X               | X                      | X                   |                    |                  | X                     |
| <b>RANGO DE CORROSIÓN PERMISIBLE.</b>   |                 |                        |                     |                    |                  |                       |
| -Alto-Require de un espesor grueso para lograr una barrera contra la corrosión. | X               |                        |                     | X                  | X                | X                     |
| -Bajo-No necesita.  |                 | X                      | X                   |                    |                  |                       |
| <b>TIPO DE EQUIPO.</b>  |                 |                        |                     |                    |                  |                       |
| -Básico.  | X               |                        |                     | X                  |                  |                       |
| -Complejo.  |                 | X                      | X                   |                    | X                | X                     |
| -Requerimientos mecánicos rígidos.  |                 | X                      | X                   | X                  | X                | X                     |
| -Requerimientos mecánicos básicos.  | X               |                        |                     |                    |                  |                       |
| <b>COSTO.</b>   |                 |                        |                     |                    |                  |                       |
| -Del grado bajo al alto (1 al 8).   | 1               | 4                      | 5                   | 3                  | 2                | 6                     |

## ANEXO D

**PROPIEDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS, FERRITICOS  
Y MARTENSITICOS MAS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA NACIONAL**

| ACERO TIPO  | 301        | 302        | 304        | 304L       | 310        | 316        | 316L       | 321        |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>PROPIEDADES FISICAS</b>                                  |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Densidad kg/cm <sup>3</sup>                                 | 7.9        | 7.9        | 7.0        | 7.9        | 7.9        | 8.0        | 8.0        | 7.9        |
| Calor específico cal/g/°C de 0-100°C                        | 0.14       | 0.14       | 0.24       | 0.24       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.16       |
| Conductividad térmica a 100°C                               | 0.035      | 0.39       | 0.533      | 0.519      | 0.29       | 0.032      | 0.032      | 0.038      |
| cal/cm <sup>2</sup> /seg/°C/cm a 500°C                      | 0.044      | 0.039      | 0.044      | 0.044      | 0.039      | 0.042      | 0.042      | 0.052      |
| Coefficiente de expansión 0-100°C                           | 17.0       | 17.1       | 17.3       | 17.2       | 14.4       | 14.0       | 14.0       | 16.7       |
| térmica m/°C/m a 0-500°C                                    | 16.5       | 16.7       | 16.7       | 16.8       | 15.5       | 16.5       | 16.5       | 18.1       |
| Temperatura de fusión intervalo°C                           | 1398       | 1398       | 1398       | 1398       | 1398       | 1371       | 1371       | 1398       |
|   | 1420       | 1420       | 1424       | 1424       | 1424       | 1398       | 1398       | 1427       |
| <b>PROPIEDADES ELECTRICAS</b>                               |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Permeabilidad magnética a 300 Hz                            | 1.02       | 1.008      | 1.008      | 1.008      | 1.008      | 1.008      | 1.008      | 1.008      |
| Sensibilidad eléctrica específica<br>micronewton. m. a 30°C | 72         | 70         | 70         | 70         | 68         | 73         | 73         | 72         |
| <b>PROPIEDADES MECANICAS (REDUCCION)</b>                    |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Resistencia a la tensión kg/cm <sup>2</sup>                 | 52         | 52         | 58         | 55         | 57         | 58         | 57         | 60         |
| Resistencia de fluencia kg/cm <sup>2</sup>                  | 30         | 30         | 27         | 27         | 28         | 28         | 29         | 30         |
| Alargamiento en 50.8mm. %                                   | 60         | 55         | 57         | 57         | 45         | 50         | 51         | 52         |
| Reducción de área. %  | 65         | 68         | 60         | 50         | 65         | 50         | 50         | 60         |
| Índice Rockwell DRB   | 85         | 85         | 80         | 77         | 78         | 81         | 79         | 80         |
| Resistencia al impacto kg m                                 | 15.21      | 15.21      | 15.21      | 15.21      | 14.84      | 17.84      | 14.93      | 14.93      |
| <b>RESISTENCIA A ELIMINAR TEMPERATURAS</b>                  |            |            |            |            |            |            |            |            |
|   |            |            |            |            |            |            |            |            |
| A 700°C   |            | 26.0       | 25.1       |            | 35.2       | 33.8       | 27.0       | 10.0       |
| A 820°C   |            | 16.0       | 15.3       |            | 22.5       | 19.7       | 18.0       | 3.5        |
| A 925°C   |            | 10.0       | 9.5        |            | 12.7       | 12.7       | 12.0       | 2.1        |
| <b>TRATAMIENTO TERMICO °C</b>                               |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Ferja temperatura inicial                                   | 1200       | 1200       | 1200       | 1200       | 1133       | 1200       | 1200       | 1200       |
| Temperatura de reacción (intervalo)                         | 1050       | 1050       | 1050       | 987        | 1050       | 987        | 987        | 732        |
|   | 1120       | 1120       |            | 1083       | 1150       | 1083       | 1083       | 814        |
| Ferja temperatura final                                     | máx de 925 | máx de 925 | máx de 925 | máx de 927 | máx de 982 | máx de 927 | máx de 927 | máx de 927 |
| <b>TEMPERATURA MAXIMA DE OPERACION °C</b>                   |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Servicio continuo   | 800        | 800        | 828        | 828        | 1120       | 828        | 828        | 805        |
| Servicio intermitente                                       | 815        | 815        | 844        | 844        | 1080       | 843        | 843        | 874        |
| <b>RESISTENCIA A LA TRIPROFLEXION Kpm/cm<sup>2</sup></b>    |            |            |            |            |            |            |            |            |
| 10000 hrs con 1% de alargamiento                            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| A 340°C   |            |            | 11.95      | 11.95      | 11.95      | 15.47      | 15.47      | 12.44      |
| A 400°C   |            |            | 8.43       | 8.43       | 8.44       | 9.14       | 11.81      | 12.81      |
| A 450°C   |            |            | 6.93       | 6.93       | 6.93       | 6.93       | 7.88       | 7.88       |



| ACERO TIPO   | FERRITICOS |       | MARTENSITICOS |       |
|--|------------|-------|---------------|-------|
|  | 405        | 430   | 410           | 430   |
| <b>PROPIEDADES FISICAS</b>                                     |            |       |               |       |
| Densidad Kg/dm <sup>3</sup>                                    | 7.8        | 7.8   | 7.7           | 7.7   |
| Calor específico cal/g/°C de 0-100°C                           | 0.16       | 0.16  | 0.16          | 0.16  |
| Conductividad térmica a 100°C                                  | 0.046      | 0.049 | 0.059         | 0.055 |
| cm <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> /seg/°C/cm a 300°C            | 0.051      | -     | 0.043         | 0.059 |
| Coefficiente de expansión térmica a 100°C                      | 10.80      | 10.40 | 11.85         | 10.30 |
| térmica a 650°C  | 13.50      | 11.90 | 11.70         | 12.10 |
| Temperatura de fusión Intervalo°C                              | 1483       | 1427  | 1483          | 1454  |
|  | 1532       | 1510  | 1532          | 1510  |
| <b>PROPIEDADES ELECTRICAS</b>                                  |            |       |               |       |
| Permeabilidad magnética a 200 Hz                               | -          | 600   | 700           | -     |
|  | -          | 1100  | 1000          | -     |
| Resistividad eléctrica específica microhohm-cm. A 20°C         | 61         | 60    | 57            | 55    |
| <b>PROPIEDADES MECANICAS (FRECOCIOS)</b>                       |            |       |               |       |
| Resistencia a la tensión Kg/mm <sup>2</sup>                    | 48         | 53    | 40            | 73    |
| Resistencia de fluencia Kg/mm <sup>2</sup>                     | 33         | 35    | 42            | 43    |
| Alargamiento en 20. mm. %                                      | 28         | 28    | 28            | 23    |
| Reducción de Área, %   | 71         | 65    | 72            | 60    |
| Curva Rockwell Bms   | 71         | 80    | 80            | 92    |
| Resistencia al impacto Kg-m                                    | 3.80       | 6.90  | 12.14         | 9.68  |
| <b>RESISTENCIA A ELEVADAS TEMPERATURAS (kg/mm<sup>2</sup>)</b> |            |       |               |       |
| A 700°C  | 11.0       | 9.1   | 9.1           | 18.3  |
| A 810°C  | 5.4        | 3.5   | 3.5           | 9.5   |
| A 925°C  | 3.5        | 2.1   | 2.1           | 6.3   |
| <b>TRATAMIENTO TERMICO °C</b>                                  |            |       |               |       |
| Forja temperatura inicial                                      | 1093       | 1066  | 1093          | 1200  |
| Forja temperatura final  | 760        | 650   | 760           | 816   |
| Temperatura de recocido (intervalo)                            | 732        | -     | -             | -     |
|  | 616        | -     | -             | -     |
| <b>TEMPERATURA MAXIMA DE OPERACION °C</b>                      |            |       |               |       |
| Servicio continuo  | 700        | 643   | 700           | 650   |
| Servicio intermitente  | 790        | 900   | 788           | 760   |
| <b>RESISTENCIA A LA TRINFORMACION Kg/mm<sup>2</sup></b>        |            |       |               |       |
| 10000 hrs con 1% de alargamiento                               | -          | -     | 8.63          | -     |
| A 510°C  | 5.63       | 5.91  | 3.67          | -     |
| A 600°C  | -          | 3.35  | -             | -     |
| A 650°C  | -          | 1.55  | 1.83          | -     |

**RESISTENCIA A LA CORROSION DE LOS ACEROS INOXIDABLES  
EN DIFERENTES MEDIOS DE TRABAJO.**

| AGENTE                        | ACERO TIPO |     |     | AGENTE                          | ACERO TIPO |     |     |
|-------------------------------|------------|-----|-----|---------------------------------|------------|-----|-----|
|                               | 304        | 316 | 430 |                                 | 304        | 316 | 430 |
| <b>SUSTANCIAS ORGANICAS</b>   |            |     |     |                                 |            |     |     |
| Aceite Alquitranado de Pino   | A          | A   | D   | Colofonia                       | A          | A   | A   |
| Aceite de semilla de Soya     | A          | A   | D   | Disulfuro de Carbono            | A          | A   | D   |
| Aceites Minerales y Vegetales | A          | A   | A   | Eter Etílico                    | A          | A   | A   |
| Acetona                       | A          | A   | A   | Fertilizantes a Base de Yodo    | C          | A   | D   |
| Alcanfor                      | A          | A   | A   | Purpural                        | A          | A   | D   |
| Alcohol Etílico               | A          | A   | A   | Jabones                         | A          | A   | A   |
| Alcohol Metílico              | A          | A   | A   | Jugos de Fruta                  | A          | A   | A   |
| Anestesia, Base Alcalina      | A          | A   | C   | Leche Fresca o Agria            | A          | A   | A   |
| Barniz de Copal               | A          | A   | A   | Nafta                           | A          | A   | A   |
| Benzol                        | A          | A   | A   | Parafina Fundida                | A          | A   | A   |
| Bisulfato de Quinina          | D          | A   | D   | Partes Comestibles              | A          | A   | A   |
| Café                          | A          | A   | A   | Sulfato de Sodio                | A          | A   | A   |
| Cloruro de Nitrilo            | A          | A   | A   | Sulfato de Quinina              | A          | A   | D   |
| Cloruro de Metilo             | A          | A   | D   |                                 |            |     |     |
| <b>ACIDOS</b>                 |            |     |     |                                 |            |     |     |
| Acético, Líquido              | D          | A   | D   | Fosfórico al 10%                | A          | A   | B   |
| Acético, vapor                | C          | A   | C   | Gálico                          | A          | A   | A   |
| Arsénico, a 45°C              | A          | A   | D   | Láctico                         | A          | A   | A   |
| Arsénico, a 107°C             | B          | D   | D   | Meláico                         | A          | A   | D   |
| Benzóico                      | A          | A   | A   | Molibdico                       | A          | A   | D   |
| Bórico                        | D          | A   | D   | Nitrico Concentrado             | A          | A   | A   |
| Butírico                      | A          | A   | A   | Oxálico                         | A          | A   | A   |
| Carbólico, al 5%              | A          | A   | A   | Oxálico                         | D          | D   | C   |
| Cianhídrico                   | A          | A   | C   | Píctrico                        | A          | A   | A   |
| Cítrico                       | A          | A   | D   | Pirogálico                      | A          | A   | A   |
| Cloracético                   | C          | C   | D   | Pirogigoso                      | A          | A   | D   |
| Clorhídrico                   | C          | C   | C   | Succínico Fundido               | C          | D   | D   |
| Clorosulfónico, al 10%        | B          | D   | D   | Sulfúrico Concentrado           | A          | A   | C   |
| Cresílico                     | A          | A   | D   | Sulfúrico Diluido, al 15% (max) |            |     |     |
| Crómico, al 30%               | C          | C   | D   | 2% de Dicromato de Potasio      | A          | A   | D   |
| Estéarico Concentrado         | A          | A   | A   | Sulfuroso Concentrado           | C          | A   | B   |
| Fluorhídrico                  | C          | C   | C   | Tánico                          | A          | A   | A   |
| Fórmico                       | C          | D   | D   | Tricloroacético al 10%          | A          | A   | D   |
| Fosfórico                     | A          | A   | C   | Úrico                           | A          | A   | A   |

| SALES                               |   |   |   |                                     |   |   |   |
|-------------------------------------|---|---|---|-------------------------------------|---|---|---|
| Acetato de Plomo                    | A | A | A | Ferricianuro de Potasio             | A | A | A |
| Acetato de Sodio                    | A | A | D | Fluoruro de Aluminio                | A | A | D |
| Alumbre de Amonio                   | A | A | A | Fosfato de Sodio                    | A | A | D |
| Alumbre de Amonio (Amolecal a 93°C) | A | A | D | Hidróxido de Potasio                | A | A | A |
| Azufre, Fundido a 260°C             | A | A | A | Hidróxido u Oxido de Calcio         | A | A | A |
| Bicarbonato de Sodio                | A | A | D | Hipoclorito de Calcio               | C | D | C |
| Bicromato de Sodio                  | A | A | A | Hipoclorito de Sodio                | D | D | C |
| Bisulfato de Sodio                  | A | A | D | Lactato de Sodio                    | A | A | D |
| Borato de Sodio                     | A | A | A | Monofosfato de Amonio               | A | A | D |
| Bromuro de Amonio                   | D | A | D | Nitrato de Cobre                    | A | A | A |
| Bromuro de Plata                    | A | A | A | Nitrato de Magnesio                 | A | A | A |
| Bromuro de Potasio                  | A | A | D | Nitrato de Niquel                   | A | A | A |
| Carbonato Sódico al 10% y a 93°C    | A | A | A | Nitrato de Potasio                  | A | A | A |
| Cianuro de Cobre                    | A | A | A | Nitrito de Sodio                    | A | A | D |
| Cianuro de Mercurio                 | A | A | D | Oxalato de Potasio                  | A | A | A |
| Cianuro de Potasio                  | A | A | A | Peranganato de Potasio              | A | A | A |
| Clorato de Calcio                   | A | A | D | Peróxido de Sodio a 100°C           | A | A | D |
| Clorato de Sodio al 10%             | A | A | A | Sulfato de Aluminio                 | A | A | D |
| Cloruro de Azufre                   | B | D | D | *Saturado con 1% de Acido Sulfúrico | A | A | D |
| Cloruro de Calcio                   | D | D | C | Sulfato de Amonio                   | A | A | A |
| Cloruro Estáñico                    | C | C | D | *Con 0.5% de Acido Sulfúrico        | A | A | D |
| Cloruro Férrico                     | C | D | C | *Con 2% de Acido Sulfúrico          | A | A | D |
| Cloruro de Mercurio                 | D | D | C | Sulfato Férrico                     | A | A | A |
| Cresotas                            | C | D | D | Sulfato de Potasio                  | A | A | A |

| SALES                          |   |   |   |                                     |   |   |   |
|--------------------------------|---|---|---|-------------------------------------|---|---|---|
| Sulfato de Zinc                | A | A | A | Cresotas Hirviente                  | A | A | D |
| Sulfuro de Sodio               | A | A | A | Fluoruro de Sodio                   | B | D | D |
| Tiosulfuro de Sodio al 20%     | B | A | B | Hidróxido de Bario                  | A | A | D |
| Tricloruro Fosforoso           | A | A | D | Hidróxido de Aluminio               | A | A | A |
| Yoduro de Potasio              | A | A | D | Hidróxido de Magnesio               | A | A | D |
| Bromuro de Sodio               | A | A | D | Hipoclorito de Potasio              | C | D | C |
| Carbonato de Amonio            | A | A | A | *Saturado, Alcalino a 93°C          | A | A | D |
| Carbonato de Bario             | A | A | D | Nitrato de Amonio                   | A | A | A |
| Carbonato de Calcio            | A | A | A | Nitrato Férrico                     | A | A | A |
| Carbonato de Cobre             | A | A | A | Nitrato Mercuroso                   | A | A | A |
| Carbonato de Magnesio          | A | A | A | Nitrato de Plata                    | A | A | A |
| Carbonato de Potasio           | A | A | A | Nitrato de Sodio                    | A | A | D |
| Carbonato Sódico al 50% a 90°C | A | A | A | Oxalato de Amonio                   | A | A | D |
| Cianuro de Plata               | A | A | A | Oxocloruro de Azufre                | A | A | D |
| Citrato de Sodio               | A | A | A | Sales de Acido Láctico              | A | A | D |
| Clorato de Potasio             | A | A | A | *Saturado con 1% Carbonato de Sodio | A | A | D |
| Cloruro de Aluminio            | D | D | B | Sulfato de Cobre                    | A | A | A |
| Cloruro de Bario               | A | A | D | Sulfato Férrico                     | A | A | A |
| Cloruro de Cobre               | C | D | D | Sulfato de Magnesio                 | A | A | D |
| Cloruro Estáñico               | B | D | C | Sulfato de Sodio                    | A | A | A |
| Cloruro de Magnesio            | D | D | C | Sulfato de Sodio                    | A | A | A |
| Cloruro de Potasio             | D | D | B | Tetracloruro de Potasio             | A | D | D |
| Cloruro de Zinc                | C | B | D | Con 4 Metabisulfato de Potasio      | A | A | A |
| Cresotas más 1% sal            | C | D | D |                                     |   |   |   |

| <b>DIVERSOS</b>                      |   |   |   |                                   |   |   |   |
|--------------------------------------|---|---|---|-----------------------------------|---|---|---|
| Aceite de Linaza                     | A | A | D | Glicerina                         | A | A | A |
| Aluminio Fundido                     | C | C | C | Jarabes Azucarados                | A | A | D |
| Amoníaco                             | A | A | A | Jugos de Vegetales                | A | A | A |
| Agua                                 | A | A | A | Mercurio                          | A | A | D |
| Bebidas Carbonatadas                 | A | A | A | Plomo Fundido, 327°C              | C | C | D |
| Bromo, Solo o Diluido                | C | C | C | Sidra                             | A | A | A |
| Cadmio Fundido                       | C | C | D | fato de Cobre(Electro-Deposición) | A | A | D |
| Carne                                | A | A | D | sto de Niquel(Electro-Deposición) | A | A | D |
| Cerveza                              | A | A | A | Vapor y Aire                      | A | A | D |
| Cianuro de Cobre(Electro-Deposición) | A | A | D | Vapor, Aire y CO2                 | A | A | D |
| Cianuro de Oro(Electro-Deposición)   | A | A | D | Vapor, Aire, CO2 y SO2            | D | D | B |
| Cianuro de Plata(Electro-Deposición) | A | A | D | Yodo                              | C | D | C |
| Cloro, Seco y Húmedo                 | C | C | C | Zinc, Fundido, 420°C              | C | C | C |

A = EXCELENTE, B = REGULAR, C = NO APROPIADO, D = CONSULTA.

## BIBLIOGRAFIA.

- [1] José Ma. Roman y Arroyo., Química de los materiales para la ingeniería aeronáutica., Cap. 6, Ed. Dossat S.A., Madrid 1968.
- [2] Zbigniew D. Jastrzebski., Naturaleza y Propiedades de los materiales para ingeniería., Ed. Interamericana 2da. Edición. 1970.
- [3] Javier Jiménez G., Diagramas de Enfriamiento continuo de los aceros al carbono nacionales AISI 1038 y 1045., Cap. II Pag. 15-28.
- [4] American Society for Metals. "Metals Handbook", Vol.8, 8a. Edición, USA 1973.
- [5] De Grinberg D.M.K., "Tratamientos Térmicos de los aceros y sus prácticas de laboratorio", Ed. LIMUSA, México 1986.
- [6] Leslie W.C., "The Physical Metallurgy of Steels", Ed. Mc Graw-Hill, USA 1971.
- [7] Massimo Vladimiro Piredda C., Soldadura Eléctrica Manual., Ed. LIMUSA., 2da. Edición, Sección 6., 1987.
- [8] Sydney H. Avner., Introducción a la metalurgia física 2da. Edición, Ed. Mc Graw-Hill, Cap. 9.
- [9] Inchaurreza Zaldia Adrian., Aceros Inoxidables y aceros resistentes al calor., Ed. LIMUSA, México 1981.
- [10] Esquivel Gómez, Marina Edelmira., Aceros Inoxidables, México U.N.A.M. 1989.

- [11] Manuales de MEXINOX S.A. (Introducción a los aceros inoxidables y resistentes a las altas temperaturas), México 1990.
- [12] Ramirez Vivas José Roberto., Revisión de los procedimientos de soldadura para aceros inoxidables., México U.N.A.M. 1988.
- [13] Peter A. Thornton / Vito J. Langelo., Ciencia de materiales para ingeniería., Ed. Prentice - Hall, 1978.
- [14] Felix Orús Asso., Materiales de construcción., Ed. Dossat S.A., Madrid 1970.
- [15] Source Bookan., Stainless Steel, UIA 1978 ASM.
- [16] Arteaga Tellez Carlos E., Laminación de materiales metálicos., México U.N.A.M. 1979.
- [17] Botia Flores, José Salomon., Estudio de los fenómenos de recristalización durante la laminación de un acero austenítico., México U.N.A.M. 1981.
- [18] Avila Espinosa, Hector Alonso., Especificaciones para la soldadura de aceros especiales usados en PEMEX., México U.N.A.M. 1979.
- [19] Vazquez Benitez, Fernando., Laminación de aceros inoxidables planos en frío., México U.N.A.M. 1981.
- [20] Rodriguez Guerra, Pedro A., Estudio teórico práctico sobre aceros inoxidables., México U.N.A.M. 1985.
- [21] H.R. Clauser., Diccionario de materiales y procesos de Ingeniería., 1970.

- [22] H. Van Vlack Lawrence., *Materiales para Ingeniería.*, Ed. C.E.C.S.A., 1984.
- [23] Donald R. Askeland., *La ciencia e Ingeniería de los materiales.*, Grupo Editorial Iberoamericana, 1987.
- [24] Ing. Heberto Balmori Ramirez, Dr. Yoshito Mitani N., Ing. José Antonio Salas Téllez., *Nuevos procesos de modificación de superficies.*, I.P.N. - E.S.I.Q.I.E. Div. de Ingeniería Metalúrgica.
- [25] Dietz H. G. Albert., *Composite Engineering Laminates.*, The Mit. Press. Massachusetts Institute of Technology. Cap.12.
- [26] R. Baboian., *Designing Clad Metals for Corrosion Control.*, Trans. SAE Vol. 81, 1973, p.1763.
- [27] International Metals Reviews., *Hot Workability of Stainless Steels: Influence of deformations parameters, Microstructural components, and Restauration processes.*, Vol. 27, No. 1, p 1-27, 1982.
- [28] Bruce M. Beckwith., *Evaluating Cladding Processes.*, Chemical Engineering., February 16, 1987.
- [29] Robert Baboian and Garner Haynes, Texas Instruments, Inc., *Corrosion of clad metals.*, Metals Handbook, Vol. 4, American Society for Metals.
- [30] Dong Nyung Lee, Yoon Keun Kim., *On the rule of mixtures for flow stresses in stainless - steel clad aluminium sandwich sheet metals.*, Journal of Materials Sciencie, Vol. 23, 1988.

- [31] Robert Blickensderfer., Roll Cladding in a Vacuum., Advanced Materials and Processes Inc. Metal Progress., April 1988.
- [32] Metal Progress Mid - June., Databook 1980, Vol. 118 No.1, American Society for Metals.
- [33] Frank P. Incropera, David P. De Witt, School of Mechanical Engineering Purdue University., Fundamentals of Heat Transfer., Ed. John Wiley and Sons.
- [34] Encuesta Industrial Mensual, 1990 Enero - Septiembre (Cifras Preliminares)., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.