



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA LAMINACIÓN Y EL RECOCIDO
EN RECUBRIMIENTOS DE ZINALCO Y ALUMINIO
OBTENIDOS MEDIANTE INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO
SOBRE ACERO AISI 1018

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTAN:

ALAMILLA CRUZ GERMÁN

MACIAS CASTILLO ENRIQUE



MÉXICO, D.F.

DIRECTOR DE TESIS
DR. ARTURO BARBA PINGARRON
M.I. JAVIER CERVANTES CABELLO

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

DEDICATORIA

A mis padres:

Lourdes Cruz Cárdenas y Germán Alamilla Chavira

*Por su apoyo incondicional, su ejemplo de esfuerzo, honestidad y entrega,
no los puedo pagar con nada.*

A mis hermanas:

Lulú y Maggy

Porque se que siempre han estado y estarán ahí. Gracias.

A Carolina

Mañana, tarde, noche... siempre puedo contar con ella.

A Mónica

*Por su AMOR, su encanto, su alegría, su llanto, su AMISTAD... nada
hay que me sea más grato.*

Germán

DEDICATORIA

A mi madre

Maria de Jesús Castillo Vega

Que nunca perdió la fe y la esperanza de que culminara mis estudios.

A ti madre

A mi tía

Rosa Maria Castillo Vega

Gracias por haber confiado en mí por haberme animado a seguir adelante y por todas las ilusiones que sembraste mí.

A mis hermanos

Jorge, Moisés y Ernesto

Quienes me brindaron su comprensión, sus consejos y su apoyo incondicional para lograr esta meta.

Enrique

Reconocimientos

Los autores hacen un reconocimiento a:

*M.I. JAVIER CERVANTES CABELLO
DR. ARTURO BARBA PINGARRON*

Por su dirección, apoyo, comprensión y ayuda incondicional, ya que con su valiosa colaboración, consejos y enseñanza fue posible concluir exitosamente este trabajo.

Así mismo a:

*BIÓLOGO
GERMÁN ÁLVAREZ LOZANO*

De la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería por la ayuda prestada para la realización de las observaciones en microscopía electrónica de barrido.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería por compartir sus conocimientos

ÍNDICE

Estudio del Efecto de la Laminación y el Recocido en Recubrimientos de Zinalco y Aluminio
Obtenidos Mediante Inmersión en Metal Fundido Sobre Acero AISI 1018

ÍNDICE TEMÁTICO

<u>OBJETIVO</u>	VI
<u>INTRODUCCIÓN.</u>	VII
<u>CAPÍTULO I ANTECEDENTES TEÓRICOS.</u>	1
1.1.- Recubrimientos Metálicos por Inmersión en Metal Fundido.	1
1.1.1.- Fundamentos.	1
1.1.2.- Mecanismos de la Difusión.	2
1.2.- Recubrimientos de Aluminio por Inmersión en Caliente.	3
1.3.- Aspectos Principales del Proceso de Inmersión en Caliente.	3
1.4.- Preparación de la Superficie para la Aplicación del Recubrimiento.	4
1.4.1.- Desengrasado.	4
1.4.2.- Decapado.	5
1.4.3.- Activación de la superficie.	6
1.5.- Propiedades de los Recubrimientos de Aluminio.	6
<u>CAPÍTULO II PROPIEDADES DEL ALUMINIO, DEL ZINALCO Y DEL ACERO AISI 1018.</u>	8
2.1.- Aluminio.	8
2.1.1.- Antecedentes Históricos.	8
2.1.2.- Obtención.	8

2.1.3.- Propiedades.	9
2.1.4.- Usos y Aplicaciones.	11
2.2.- Zinco.	11
2.2.1.- Antecedentes Históricos.	11
2.2.2.- Características Generales.	12
2.2.3.- Propiedades.	14
2.2.4.- Uso y Aplicaciones.	15
2.3.- Acero AISI 1018.	15
2.3.1.- Definición de Acero.	15
2.3.2.- Clasificación de los Aceros.	15
2.3.3.- Aceros al Carbono.	16
2.3.4.- Composición Química de Aceros de Bajo Contenido de Carbono.	17
2.3.5.- Propiedades Físicas del Acero AISI 1018.	17
2.3.6.- Usos y Aplicaciones.	18
<u>CAPÍTULO III PROCESO DE LAMINACIÓN.</u>	19
3.1.- Antecedentes Históricos.	19
3.2.- Definición del Proceso.	19
3.3.- Clasificación General.	20
3.4.- Principales Tipos de Laminadores.	22
3.5.- Rodillos de Laminación.	23
3.6.- Tipo de Arreglos.	23
3.7.- Técnicas de Laminación.	25
3.7.1.- Laminación en Caliente.	25

3.7.2.- Laminación en Frío.	26
3.8.- Laminado Plano y su Análisis.	26
3.9.- Ventajas y Desventajas del Laminado en Caliente y en Frío.	31
<u>CAPÍTULO IV TRATAMIENTOS TÉRMICOS.</u>	33
4.1.- Introducción.	33
4.2.- Principales Tratamientos Térmicos.	33
4.2.1.- Recocido.	34
4.2.2.- Normalizado.	36
4.2.3.- Temple.	36
4.2.4.- Revenido.	37
4.2.5.- Tratamientos Isotérmicos.	37
4.2.6.- Tratamientos de Endurecimiento Superficial.	38
<u>CAPÍTULO V EXPERIMENTACIÓN.</u>	41
5.1.- Introducción.	41
5.2.- Material Empleado.	41
5.3.- Reactivos Usados.	41
5.4.- Equipo Empleado.	42
5.4.1.- Equipos Auxiliares.	43
5.5.- Preparación de la Probeta del Metal Base.	43
5.6.- Limpieza de las Probetas del Metal Base.	43
5.7.- Obtención de los recubrimientos.	44
5.8.- Pruebas Efectuadas a las Probetas recubiertas.	45
5.8.1.- Prueba de Recocido.	46

5.8.2.- Prueba de Laminación.	46
5.8.3.- Prueba de Laminación y Recocido.	47
5.8.4.- Resumen de las pruebas realizadas.	47
5.9.- Preparación de la Muestra Para su Observación en el Microscopio Electrónico de Barrido.	48
5.9.1.- Fundamentos de la Técnica de Utilización del Microscopio Electrónico de Barrido.	50
5.10.- Ensayo de Microdureza Vickers.	51
5.10.1.- Tablas de Resumen de la Dureza Vickers Obtenidas en las Diferentes muestras analizadas.	52
<u>CAPÍTULO VI PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.</u>	54
6.1.- Introducción.	54
6.2.- Presentación de Resultados.	54
6.2.1.- Microscopia electrónica de barrido.	54
6.2.1.1.- Probetas de Zinalco.	55
6.2.1.2.- Probetas de Aluminio.	66
6.2.2.- Gráficas de la Variación de la Microdureza.	76
6.2.3.- Gráficas de la Variación de los Espesores en los Recubrimientos.	78
6.3.- Análisis de Resultados.	80
6.3.1.- Observaciones Generales de las Probetas de Zinalco.	80
6.3.2.- Observaciones Generales de las Probetas de Aluminio.	83
6.4.- Análisis Cualitativo de Ambos Recubrimientos.	86
6.5.- Identificación de las Fases en los Recubrimientos.	86
6.5.1.- Fases Presentes en el Aluminizado.	87
6.5.2.- Fases presentes en el Zinalquizado.	88

6.6.- Análisis Comparativo.	89
6.6.1.- Análisis Comparativo Aluminizado.	91
6.6.2.- Análisis Comparativo Zinalquizado.	92
6.7.- Ventajas de cada Recubrimiento.	93
<u>CAPÍTULO VII CONCLUSIONES.</u>	95
7.1.- Conclusiones Generales.	95
7.2.- Conclusiones del Zinalquizado.	96
7.3.- Conclusiones del Aluminizado.	97
7.4.- Aplicaciones Potenciales.	97
7.5.- Recomendaciones a Futuros Trabajos con estos Recubrimientos.	98
<u>BIBLIOGRAFÍA.</u>	99
<u>ANEXOS DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO Al-Fe, Al-Zn.</u>	101
Diagrama de fase Fe-Al	102
Diagrama de fase Al-Zn	104

OBJETIVO

Determinar, a partir del estudio de las variaciones microestructurales y las fases que se presentan en estos recubrimientos al ser laminados y recocidos bajo diferentes condiciones, los efectos en sus propiedades, particularmente en sus características mecánicas y evaluar las ventajas y desventajas de su aplicación.

INTRODUCCIÓN

El uso de recubrimientos es una de las varias estrategias empleadas con el fin de reducir el deterioro que pueden sufrir los materiales metálicos tales como el desgaste, la corrosión o la fatiga.

El deterioro, básicamente por oxidación, de los aceros al carbono especialmente a temperaturas elevadas, es un serio problema que se intenta resolver mediante el uso de aceros aleados de muy alto costo. Una alternativa es el empleo de aceros al carbono recubiertos con una capa resistente a la acción oxidante.

La inmersión de un acero al carbono en un metal fundido es una de las posibilidades empleadas desde hace mucho tiempo para conseguir proteger el acero contra la corrosión, particularmente atmosférica, y el ejemplo mas conocido es el galvanizado en caliente de diversos aceros. Junto a la serie de ventajas que se pueden conseguir con el galvanizado, una de sus restricciones es su limitada resistencia en presencia de un ambiente marino. Otro es el aluminizado de aceros mediante inmersión en metal fundido, tema sobre el cual existe literatura más limitada, pero que se puede consultar en textos como el de Molera¹.

En un trabajo previo se han determinado las condiciones que nos permiten obtener un recubrimiento mediante la inmersión de un acero al carbono, adecuadamente preparado, en una aleación Zinc-Aluminio-Cobre fundida. La aleación ha sido desarrollada en la UNAM y ha recibido la denominación de Zinalco.

En el presente trabajo se realiza una revisión de los diversos procesos de recocido, laminación y una combinación de ambos procesos (laminación y recocido) sobre muestras de acero AISI 1018 aluminizadas y zinalquizadas por inmersión en metal caliente. Las principales evaluaciones que se pretenden estudiar son la modificación en la adherencia del recubrimiento, los cambios conseguidos en la distribución de las fases en los revestimientos y las consecuencias que de ellos derivan en aspectos tales como la ductilidad y la microdureza.

¹ Molera Solá Pere, Recubrimientos de los Metales. Productica. 1ª ed., España, Marcombo, 1989.

CAPÍTULO I

1.- ANTECEDENTES TEÓRICOS.

1.1.- Recubrimientos Metálicos por Inmersión en Metal Fundido.

El proceso de inmersión en caliente (hot-dipping) es uno de los métodos industriales más antiguos para la aplicación de recubrimientos metálicos a otros metales. Este procedimiento tiene la denominación genérica de "difusión por inmersión en metal fundido" y posteriormente recibe un nombre específico que hace referencia al metal con que se realiza el recubrimiento. Con el zinc se habla de galvanización en caliente, con el estaño de estañado; con aluminio de aluminizado, etc. Este tipo de recubrimiento se aplica principalmente con metales y aleaciones de bajo punto de fusión.

1.1.1.- Fundamentos.

Esencialmente el proceso consiste en efectuar la inmersión en el metal fundido de la pieza que se desea recubrir, dando lugar a una reacción sólido-líquido de interdifusión de ambos metales.

Para obtener un recubrimiento apropiado de un metal sobre otro mediante la inmersión en un baño de metal fundido, es necesario que ambos sean susceptibles de alearse al menos en cierta medida. Con esto se consigue que exista una humectación completa inicial de la superficie del metal base, lo cual asegura una distribución uniforme del metal fundido sobre la superficie, y minimiza la tendencia a separarse de la base.

La dificultad de lograr un adecuado recubrimiento entre dos metales que carecen de la propiedad de alearse entre sí se debe principalmente a la tendencia del recubrimiento a formar glóbulos durante el proceso de solidificación, lo que impide la continuidad de la superficie del recubrimiento.

En la mayoría de los casos comerciales el recubrimiento se adhiere fácilmente con el metal base, y para el caso de que el metal de recubrimiento y el metal base no se adhiera directamente, se acostumbra utilizar cierta cantidad de un tercer metal susceptible de adherirse con cada uno de éstos. Esto se efectúa comúnmente mediante una adición adecuada al baño del metal fundido o depositando una película superficial sobre el metal base antes de proceder a la inmersión de éste en el metal fundido.

1.1.2.- Mecanismo de la Difusión.

La difusión atómica es un fenómeno donde se produce un transporte de masa como consecuencia de la búsqueda de equilibrio. Cuando están en contacto materiales diferentes, existe difusión si la movilidad de los elementos que los componen guardan ciertas condiciones de afinidad imprescindibles. En los sólidos, el movimiento de los átomos está restringido debido a la unión de estos en posiciones de equilibrio, sin embargo se da lugar a vibraciones térmicas que permiten que algunos átomos se muevan.

Hay dos mecanismos principales de difusión de los átomos en una red cristalina: difusión por vacantes o sustitucional y difusión intersticial.

En el primer caso, los átomos pueden moverse en las redes cristalinas desde unas posiciones atómicas a otras si hay suficiente energía de activación procedente de vibraciones térmicas de los átomos y hay vacantes u otros defectos cristalinos en la red para que los átomos puedan desplazarse a otras posiciones. Las vacantes en los metales y aleaciones son defectos de equilibrio, algunas siempre están presentes posibilitando la difusión sustitucional de los átomos. Según va aumentando la temperatura del metal se producirán más vacantes y habrá más energía térmica disponible, por tanto, el grado de difusión es mayor a temperaturas más altas.

La difusión intersticial tiene lugar cuando los átomos van desde una posición intersticial a otra vecina desocupada sin desplazar permanentemente a ninguno de los átomos de la red cristalina matriz.

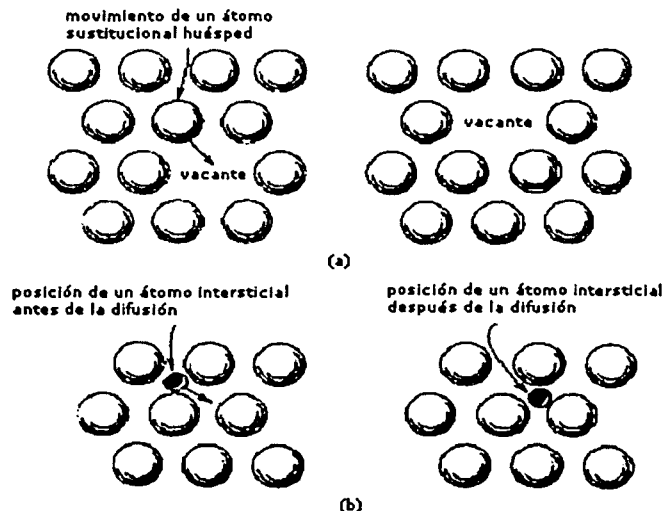


Figura 1.1 Representaciones esquemáticas de: (a) Difusión por vacantes y (b) Difusión Intersticial

1.2.- Recubrimientos de Aluminio por Inmersión en Caliente.

El aluminio es el metal de punto de fusión más elevado entre los habituales que se utilizan en los procesos de difusión metálica, con la ventaja de que el aluminio se adhiere sin problemas con el hierro, con lo cual se cumple cabalmente la condición fundamental para obtener un adecuado recubrimiento por inmersión en caliente.

El proceso de aluminizado por inmersión en caliente se utiliza para obtener recubrimientos de aluminio sobre hierro y sus aleaciones, sumergiendo el metal base a una temperatura comprendida entre 700 y 900 [°C] durante algunos minutos. Con esto se logra que el material férreo adquiera propiedades superficiales equivalentes a las del aluminio, con lo cual se logra reunir una buena resistencia frente a determinados medios corrosivos con las buenas características mecánicas del metal base.

Los principales parámetros de operación durante el proceso de difusión por inmersión en metal fundido son:

1. Temperatura del metal líquido.
2. Composición del metal líquido.
3. Composición del metal base.
4. Tiempo de permanencia del sustrato en el metal líquido.
5. Velocidades de inmersión y de extracción.
6. Velocidad de enfriamiento.

La regulación cuidadosa de los parámetros anteriores definirá las características finales de las capas de recubrimiento y su espesor relativo.

1.3.- Aspectos Principales del Proceso de Inmersión en Caliente.

Pese a la sencillez teórica aparente del proceso de inmersión en caliente, en la práctica se requiere el mayor control posible de los factores mencionados que inciden para obtener un recubrimiento del espesor y adherencia deseados, y con las propiedades mecánicas requeridas.

La mayor dificultad que se tiene en el proceso de aluminizado se debe a la película de óxido de aluminio que se forma fácilmente y que se dirige a la interfase hierro-aluminio durante la inmersión. Debido a esto, los principales problemas relacionados con la obtención de los recubrimientos residen en dos aspectos:

- 1.- La preparación de las superficies a recubrir, de manera que se mantengan lo más limpias posibles antes de proceder a la deposición y,

2.- La reducción de la cantidad de agentes contaminantes en el baño.

Otro problema que se presenta es la gran cantidad del compuesto hierro-aluminio (FeAl_3) que se forma. Este compuesto es frágil¹ y su espesor no debe ser mayor a 0,01 milímetros, ya que si es mayor, esto va en detrimento de las características mecánicas finales. Se sabe que el espesor de esta capa crece con mayor rapidez principalmente en función del aumento de temperatura del baño.

1.4.- Preparación de la Superficie para la Aplicación del Recubrimiento.

La preparación de la superficie que se va a recubrir tiene por objeto obtener una superficie con la limpieza adecuada para la aplicación de los recubrimientos.

Ésta preparación consta de dos pasos principales, cuyos objetivos son la separación de sustancias orgánicas, tales como grasas y aceites; y de materiales inorgánicos, como por ejemplo, óxidos metálicos, productos de la corrosión y materia mineral.

La naturaleza química y física de una superficie metálica ejerce un efecto muy marcado sobre la calidad de cualquier tipo de recubrimiento que pueda emplearse para protegerla.

La presencia de grasa, aceite, productos de la corrosión, suciedad o de otros cuerpos extraños tiene una influencia determinada sobre la adherencia, continuidad y duración de los recubrimientos. En general se afirma que el carácter de un recubrimiento no es mejor que el de la superficie a la que se aplica, y por tanto, es un hecho reconocido que la obtención de recubrimientos protectores de alta calidad depende de que exista una adecuada preparación de la superficie del metal base.

1.4.1.- Desengrasado.

Para el desengrasado se emplean agentes de limpieza que contengan álcalis fuertes que separen las grasas animales y vegetales, y jabones o sustitutos de éstos que emulsionen los aceites minerales.

Con objeto de que el agente de limpieza actúe eficazmente en la eliminación de toda la gama de líquidos y sólidos grasos que pueden estar depositados en las superficies de las piezas metálicas que se van a recubrir, suele ser costumbre emplear mezclas en las que entran a formar parte diversas proporciones de distintos compuestos alcalinos. Algunos de

¹ Molera Sóna Pere, Recubrimientos de los Metales. Productica.1ª ed., España, Marcombo, 1989, pagina 53

los compuestos más utilizados para el desengrasado son: sosa cáustica, carbonato sódico, fosfatos, silicatos alcalinos y jabones o detergentes sintéticos, y actualmente también se ha generalizado el uso de disolventes basados en hidrocarburos.

1.4.2.- Decapado.

Para desprender los óxidos metálicos y los productos de la corrosión se puede emplear el decapado químico o el desbaste mecánico de la superficie.

El decapado químico se basa en la inmersión del metal en ácido diluido en agua hasta que los óxidos metálicos se hayan desprendido o disueltos. Un método comúnmente utilizado es la utilización de ácido sulfúrico de 5 a 10 por ciento de concentración a una temperatura de alrededor de 70 [°C]. En este caso se emplea un inhibidor catódico como la quinolina o la tiourea, para reducir el ataque del metal y la fragilización del acero por el hidrógeno.

El tiempo requerido para el decapado suele oscilar entre 5 y 20 minutos, dependiendo del tipo de óxidos metálicos.

Para aumentar la velocidad del decapado, puede utilizarse un decapado electrofítico, ya sea catódico o anódico, con características generales muy semejantes al decapado químico. Otro método de uso menos común es el decapado con sales fundidas, ya sea de manera electrofítica, o sin empleo de corriente.

El método más común para la separación del óxido y de los óxidos metálicos mediante el desbaste mecánico es el tratamiento con chorro de arena, granalla de acero o perdigones, ya que con él se logran obtener superficies a las que los recubrimientos se adhieren satisfactoriamente. Con este sistema se intenta conseguir una proyección uniforme sobre la superficie de la pieza a tratar.

Otras formas comunes de proceder al desbaste mecánico es mediante el frotamiento con cepillos de alambre y el pulimento.

Para superficies extensas puede aplicarse la limpieza a la flama, que consiste en la aplicación de una llama de calor muy intenso a las superficies que se desean limpiar de los óxidos metálicos, logrando con esto que los óxidos metálicos se desprenda debido a su mayor coeficiente de dilatación térmica. Los trozos que permanecen adheridos pueden eliminarse con cepillo de alambre, mientras que las trazas de óxidos que se puedan generar se eliminan con un tratamiento posterior al decapado (activación de la superficie).

En el método de calentamiento por inducción se emplea una frecuencia de 10.000 [Hz] y una potencia de 65 a 75 kilovatios para lograr un calentamiento rápido en periodos cortos. Éste sistema se utiliza para piezas continuas como alambres y tuberías, las cuales atraviesan la unidad de calentamiento por inducción a una velocidad de 270 [m/hora] y una temperatura de aproximadamente 170 [°C].

1.4.3.- Activación de la Superficie.

La preparación superficial convencional puede completarse con la activación de la superficie que consiste con el tratamiento con fundentes; en un baño de sales fundidas las cuales pueden ser cloruros o fluoruros dobles o una mezcla de ambos, cuyo objeto es separar las trazas de óxidos o de sales de hierro y evitar la reoxidación de la superficie del acero.

En este sistema se sumerge la pieza decapada en el baño de sales fundidas durante, aproximadamente cuatro minutos a una temperatura de 700 a 760 [°C].

Después de sacar las piezas del baño de de sales fundidas se introduce en el baño de aluminio líquido. Durante el periodo de inmersión que es aproximadamente entre treinta y setenta segundos, las piezas se suben y bajan dentro del metal fundido, algunas veces para eliminar el aire que haya podido quedar atrapado y para asegurarse que el aluminio líquido entre en contacto con la totalidad de la superficie de la pieza. Después, la pieza se devuelve al baño de sales fundidas, donde, se escurrirá el metal en exceso.

1.5.- Propiedades de los Recubrimientos de Aluminio.

La capa externa del recubrimiento, tiende a formar una película delgada de Al_2O_3 que le proporciona a la superficie de la pieza recubierta una particular resistencia a la corrosión en ambientes oxidantes, tanto a temperatura ambiente como a temperatura elevada.

La capa de transición se caracteriza por su fragilidad que ocasiona una considerable limitación en la capacidad de conformación en frío, debido a su tendencia a desgarrarse. Sin embargo, presenta una buena resistencia a la corrosión frente a disoluciones de ácidos.

Para controlar la formación de ésta aleación se pueden añadir elementos como antimonio, cromo, manganeso, molibdeno, etc., que dificultan el crecimiento de la capa externa.

Añadiendo silicio al baño en una proporción de aproximadamente 10 %, se consigue un reparto muy uniforme y fino de la fase Fe_2Al_5 directamente sobre al acero, apareciendo

sobre ella una capa de Fe-Al-Si ternaria; la capa externa consta de silicio de solidificación primaria con Al y Fe-Al-Si flotante.

Se ha encontrado que cuando la temperatura del baño es de 700 [°C], la inmersión de piezas de acero durante quince segundos en ausencia de silicio, forma una capa de aleación de 0.033 mm; añadiendo 2 % de silicio reduce el espesor a 0.012 mm, y cuando la proporción es del 6 % el espesor resulta de 0.006 milímetros. Las mejores características de ductilidad se obtienen cuando dicho espesor no excede los 0.005 mm; esto resulta con el añadido aproximado de un 10 % de silicio. También se ha encontrado que, a mayor temperatura del proceso aumenta el espesor de la capa de intermetálico y disminuye el de la capa externa de aluminio.

Nota: sobre el tema de recubrimientos de aceros por inmersión en metal fundido con zinalco, no se habla en este capítulo por existir poca bibliografía.

CAPÍTULO II

2.- PROPIEDADES DEL ALUMINIO, DEL ZINCALCO Y DEL ACERO AISI 1018.

2.1.- ALUMINIO.

2.1.1.- Antecedentes Históricos.

El aluminio constituye el metal más abundante en la corteza terrestre en forma de óxidos y silicatos en la que conforma el 7.51% mientras el hierro, que es el que le sigue, forma sólo el 4.7%. Debido a su gran afinidad para el oxígeno, el aluminio no se presenta nativo sino en forma de combinaciones, de las que las más importantes son las micas, arcillas y bauxitas. Actualmente sólo se utilizan las bauxitas para la obtención del aluminio.

2.1.2.- Obtención.

El proceso de obtención del aluminio a partir de la bauxita se divide en dos partes: obtención de alúmina y obtención de aluminio.

La primera etapa del proceso extractivo es la separación de la alúmina de los óxidos que constituyen la impureza, ésta primera parte se puede resumir en cuatro pasos:

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

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

3.- Precipitación. Se usa para la mezcla de aluminato de sodio a los precipitadores y se agregan cristales de alúmina hidratada que acelera la separación de cristal del aluminio, con lo que se forman cristales pesados que se precipitan, después se selecciona y se lavan para eliminar impurezas.

4.- Calcinación. En un horno rotativo se calientan los cristales a 1000 [°C] para secarlos y deshidratarlos.

La segunda etapa del proceso es la obtención del aluminio a partir de la alúmina.

Se disuelve la alúmina en criolita (cloruro de aluminio y fluoruro de sodio), ésta juega un papel importante en el proceso electrolítico, debido a su bajo punto de fusión y a su aptitud para disolver la alúmina, la operación tiene lugar dentro de una cuba de acero recubierta con carbono (grafito) a 950 [°C]; para ello, se insertan ánodos de carbono (grafito) y se hace circular corriente eléctrica; el carbono forma CO₂ con el oxígeno y el aluminio fundido se deposita en el fondo por ser más denso que la criolita. Cuando se acumula suficiente aluminio, se succiona éste a un horno, donde se decantan las impurezas y después de un reposo se vacía en las lingoteras. El aluminio así obtenido tiene una pureza de 99.80%.

2.1.3.- Propiedades.

Las propiedades en las que estriba la importancia industrial del aluminio son su conformabilidad, poco peso, buena conductividad eléctrica y térmica, y su resistencia a la corrosión excelente debido a la formación de una película superficial dura y delgada de óxido. La densidad del aluminio es de 2.7 [gr/cm³], mientras que la del acero es de 7.85 [gr/cm³]. El aluminio es, pues, excelente para aquellas aplicaciones en las que debe combinarse una resistencia a la corrosión relativamente alta con un peso reducido.

Uno de los inconvenientes del aluminio, visto desde un punto tecnológico, es que tiene un módulo de elasticidad relativamente bajo que es más o menos un tercio del módulo del acero (esto es que bajo la misma carga, el aluminio se deforma el triple que el acero). Este factor, unido a su elevado costo, hace necesario emplear secciones en las que el material se distribuya adecuadamente para conseguir una rigidez máxima con un mínimo de material.

El aluminio no suele emplearse en estado puro, ya que en estas condiciones, es muy blando, dúctil y no es muy resistente. El aluminio en forma cristalina tiene una resistencia a la tracción de 61.803 [MPa] (9000 [psi]), mientras que cuando está endurecido su resistencia a la tracción es de 164.808 [MPa] (24 000 [psi]). El aluminio es empleado en las líneas de transmisión, ya que su conductividad eléctrica es aproximadamente un 60% de la del cobre, y 3.5 veces la del hierro, habitualmente es reforzado con un alma de acero para conseguir la resistencia a la tracción adecuada para soportar los esfuerzos existentes.

Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de deformación; se puede fundir mediante cualquier método conocido, laminar a cualquier espesor deseado, estampar, estirar, forjar y extruir a casi cualquier forma imaginable, además el aluminio no es tóxico, ni magnético y no produce chispa.

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

$$\text{Relación resistencia - peso} = \frac{\text{Resistencia a la Tracción}}{\text{Densidad}}$$

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

En la mayoría de sus demás aplicaciones se alea con cobre, manganeso, o silicio para aumentar su resistencia y dureza. La dureza del aluminio varía desde 25 Brinell cuando está recocido, a 40 Brinell si está endurecido.

Casi siempre el aluminio reemplaza al acero o la fundición de hierro, cuando la necesidad es reducir peso, resistencia a la corrosión, gastos de mantenimiento reducidos o cuando las conductividades eléctricas o térmicas compensan el costo adicional. El aluminio juega un papel de primer orden en la reducción del peso y tamaño de los motores.

El sistema de especificaciones para el aluminio es un número de códigos de cuatro dígitos. El sistema consta de dos partes, uno para aluminios forjados y otra para fundiciones de aluminio. La diferencia entre estos es que para fundiciones de aluminio se usa un punto decimal después del tercer dígito (XXX.X), mientras que para aluminios forjados no lo lleva (XXXX). Las designaciones se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Especificaciones de aleaciones de aluminio forjadas y en fundición.

Grupo de aleación	Código para forjado	Código para fundición
Aluminio 99% o mayor pureza	1 XXX	1 XX.X
Aleaciones de aluminio por elemento(s) mayor(es):		
Cobre	2 XXX	2 XX.X
Manganeso	3 XXX	3 XX.X
Silicio y cobre y/o magnesio		
Silicio	4 XXX	4 XX.X
Magnesio	5 XXX	5 XX.X
Magnesio y silicio	6 XXX	6 XX.X
Zinc	7 XXX	7 XX.X
Estaño		
Otros	8 XXX	8 XX.X

2.1.4.- Usos y Aplicaciones.

Debido a su bajo peso específico, propiedades mecánicas, su resistencia a la corrosión y a la facilidad con que forma aleaciones, el aluminio y sus aleaciones han llegado a ser muy utilizadas, por ejemplo, en la construcción de automóviles y aviones, como parte de edificios, como envases industriales, para objetos de adorno y utensilios para cocina.

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

El aluminio comercialmente puro, aleado 1100, es adecuado para aplicaciones en las que se requiere buena formabilidad o gran resistencia a la corrosión, y en las cuales no se necesita alta resistencia (componentes arquitectónicos, utensilios de cocina, almacenamiento de alimentos, así como en ensamblajes soldados). Mientras que el aluminio ultra puro es utilizado en reflectores fotográficos con el fin de aprovechar sus características de alta reflectividad a la luz y de no-decoloración superficial.

2.2.- ZINALCO.

2.2.1.- Antecedentes Históricos.

A mediados de la década de los 70 dio inicio un programa en el Instituto de Investigaciones de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), para estudiar las propiedades del zinc y sus aleaciones, su propósito fue desarrollar nuevos

campos de aplicaciones para este metal del cual México es principal productor y así evitar su desplazamiento por plásticos y aluminio.

Los resultados de las investigaciones condujeron al desarrollo del zinalco, el cual además de tener aplicaciones en la fundición, también puede ser utilizado dentro de los campos de extrusión, forja y laminación.

2.2.2.- Características Generales.

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

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

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

El zinalco ocupa un lugar entre los dos materiales con más aplicaciones industriales: el hierro y el aluminio. La densidad del zinalco es de 5.4 [gr/cm³] lo cual lo hace 31% más ligero que el acero (7.85 [gr/cm³]); y aunque pesa el doble que el aluminio (2.7 [gr/cm³]) su resistencia mecánica, semejante a la de un acero bajo en carbono, permite diseñar piezas tan ligeras como las del aluminio. Por otra parte, su resistencia a la corrosión es intermedia entre el aluminio y el zinc, lo cual lo coloca entre los materiales con buena resistencia a la corrosión. Un metal con estas propiedades puede incursionar en algunos de los campos de aplicaciones del acero, latón, bronce, zamak[†] y aún en los del aluminio.

[†] Materiales de Zinc

campos de aplicaciones para este metal del cual México es principal productor y así evitar su desplazamiento por plásticos y aluminio.

Los resultados de las investigaciones condujeron al desarrollo del zinalco, el cual además de tener aplicaciones en la fundición, también puede ser utilizado dentro de los campos de extrusión, forja y laminación.

2.2.2.- Características Generales.

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

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

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

El zinalco ocupa un lugar entre los dos materiales con más aplicaciones industriales: el hierro y el aluminio. La densidad del zinalco es de 5.4 [gr/cm³] lo cual lo hace 31% más ligero que el acero (7.85 [gr/cm³]); y aunque pesa el doble que el aluminio (2.7 [gr/cm³]) su resistencia mecánica, semejante a la de un acero bajo en carbono, permite diseñar piezas tan ligeras como las del aluminio. Por otra parte, su resistencia a la corrosión es intermedia entre el aluminio y el zinc, lo cual lo coloca entre los materiales con buena resistencia a la corrosión. Un metal con estas propiedades puede incursionar en algunos de los campos de aplicaciones del acero, latón, bronce, zamak[†] y aún en los del aluminio.

[†] Materiales de Zinc

Aleaciones de aluminio y zinc han atraído la atención de un sinnúmero de investigadores en las últimas décadas; como resultado, muchas variaciones de estas aleaciones binarias han sido producidas y estudiadas registrándose sus características.

Actualmente, en México se cuenta con dos líneas de investigación complementarias, "Termofluencia de la aleación zinalco" y "Tenacidad de la aleación zinalco obtenida por colada continua y tratada termomecánicamente". Con ellas se pretende cubrir la parte faltante de los estudios realizados por el Instituto de Investigación de Materiales en lo que respecta a la Termofluencia y a la firmeza para poder elaborar productos con este material que resulten resistentes y ligeros.

Por medio de la primera investigación se pretende determinar la resistencia mecánica de la aleación zinalco obtenida por colada continua cuando es sometida a cargas constantes en medios con temperaturas superiores a la ambiental.

La técnica de colada continua consiste de un molde refrigerado a través del cual se vacía el material fundido por su boca superior extrayéndose el material solidificado por su salida inferior de manera ininterrumpida. La estructura granular así como la talla de los granos dependerá de la rapidez de solidificación que induzca el refrigerante utilizado, mientras mayor sea la rapidez de solidificación menor será el tamaño de grano y mayor la resistencia mecánica.

La aleación zinalco solidificada rápidamente mediante la técnica de colada continua amplía su gama de aplicaciones dado el grado de metaestabilidad que alcanza al enfriarse bruscamente desde el estado líquido.

Con tratamientos térmicos y mecánicos posteriores se pueden modificar aún más las cualidades de este material, por lo que es necesario diseñar un proceso termomecánico específico para alcanzar ciertos valores deseables en esta aleación.

La segunda investigación tiene por objeto estudiar la transformación de fase del zinalco en estado sólido, inducida por trabajo mecánico o mediante tratamiento térmico.

Ya que la transformación de fase en un material conduce invariablemente a cambios en las propiedades (entre las que podemos considerar las de tipo mecánico) cuando esta aleación es preparada mediante la técnica de colada continua, su estructura cristalina y granular se encuentra en estado metaestable. Si además éste sólido es extruído y trefilado, se incrementará aún más su grado de metaestabilidad.

2.2.3.- Propiedades.

Las propiedades en las que estriba la importancia industrial del zinalco son su conformabilidad, buena conductividad eléctrica y térmica, y su resistencia a la corrosión que es mejor que la que presenta el galvanizado. La densidad del zinalco es de $5.4 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$, mientras que la del acero es de $7.85 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$. Su módulo elástico esta entre $110 - 130 \text{ [GPa]}$, y su coeficiente de expansión térmica es de $25 \text{ [micrómetros/mmK]}$. Su temperatura de fusión esta entre $421 \text{ y } 481 \text{ [}^\circ\text{C]}$.

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

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

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

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

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

2.2.4.- Usos y Aplicaciones.

Por sus propiedades, el zinalco es usado en la manufactura de una gran variedad de artículos, ocupando parte de los lugares donde estaba el aluminio (como son los casos de cancelería en la industria de la construcción), el latón, el bronce (para artículos ornamentales y partes industriales), así como en la producción de mobiliario para oficinas donde se utilizaban algunos aceros y aleaciones de aluminio.

Por sus características, puede ser trabajado mediante los mismos procesos utilizados para producir formas geométricas de acero y de aluminio, es decir, el conformado del material. Algunas aplicaciones propuestas son:

- Estructural: engranes, carburadores, bombas, partes para transmisión, rines.
- Cerrajería: llaves extruídas e inyectadas.
- Construcción: láminas para techos, intersecciones estructurales, pisos falsos.
- Control de fluidos: válvulas, filtros, reguladores.
- Instalaciones eléctricas: conductores, cajas soportería de cable, gabinetes
- Transporte colectivo: bielas, portazapatas

2.3.- ACERO AISI 1018.

2.3.1.- Definición de Acero.

El acero es una aleación de hierro que contiene entre 0.02 y 2.1 % de carbono en peso. Frecuentemente se incluyen otros elementos aleantes como: manganeso, cromo, níquel y molibdeno, pero el contenido de carbono es el que convierte al hierro en acero.

2.3.2.- Clasificación de los Aceros.

Existen cientos de composiciones disponibles en el mercado. Se pueden agrupar aquí con fines de clasificación en las siguientes categorías:

- 1) Aceros al carbono,
- 2) Aceros de baja aleación,
- 3) Aceros inoxidable y
- 4) Aceros para herramienta.

2.3.3.- Acero al Carbono.

Los aceros al carbono contienen carbono como principal elemento de aleación y pequeñas cantidades de silicio, manganeso, fósforo, azufre y cobre. Hay otros elementos presentes en el acero al carbono pero sólo en cantidades residuales. Los aceros al carbono se pueden clasificar según la cantidad de desoxidación que se efectuó durante la producción del acero. La resistencia de los aceros al carbono se incrementa con el contenido de carbono. En la figura 2.1 se ilustra una gráfica típica de esta relación.

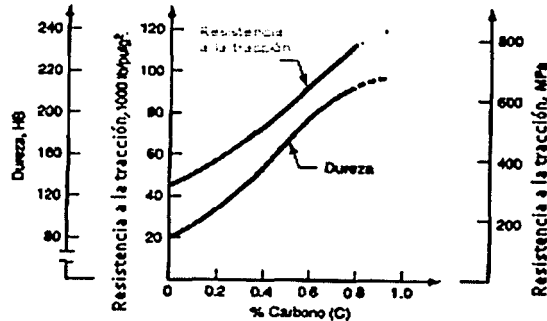


Figura 2.1 Resistencia a la tracción y dureza como una función de contenido de carbono en los aceros al carbono (Laminados en caliente)

Los aceros al carbono se pueden clasificar de acuerdo a la cantidad de carbono presente en el acero terminado. Las principales clasificaciones son:

Aceros al bajo carbono, con menos de 0.30% de carbono, son los aceros más ampliamente usados. Sus aplicaciones típicas son: partes de lámina metálica para automóviles, plancha de acero para la fabricación y rieles de ferrocarril. Estos aceros son relativamente fáciles de formar, de ahí su popularidad donde no se requiere una alta resistencia. Las fundiciones de acero caen usualmente dentro de esta categoría de bajo carbono.

Los aceros al medio carbono fluctúan en contenido de carbono entre el 0.30 y 0.50% y se especifican para aplicaciones que requieren resistencias mayores que las de los aceros al bajo carbono. Sus aplicaciones incluyen componentes de maquinaria y partes de motores, como cigüeñales y acoplamientos.

Los aceros al alto carbono en cantidades mayores al 0.50%. Se especifican aun para aplicaciones de alta resistencia y donde se necesita rigidez y dureza. Algunos ejemplos son los resortes, las herramientas de corte y las cuchillas, así como las partes resistentes al desgaste.

2.3.4.- Composición Química de los Aceros de Bajo Contenido de Carbono.

En esta clasificación el contenido aproximado de los elementos de aleaciones más importantes viene indicado por medio de un sistema numérico. Este método de clasificación es el más difundido de todos ellos.

Las especificaciones estadounidenses del acero son el resultado de los esfuerzos conjuntos realizados por el American Iron and Steel Institute (**AISI**) y la Society of Automotive Engineers (**SAE**) de acuerdo con un programa preestablecido, tendentes a lograr una mayor eficacia en la búsqueda de los tipos de acero requerido por la industria.

En las normas *AISI*, los números van precedidos de una letra que indica el método de fabricación utilizado en la obtención del acero (B = acero al carbono obtenido en convertidor Bessemer ácido; C = acero al carbono obtenido en horno Martín Siemens Básico). Las normas *SAE* utilizan actualmente el mismo sistema de designación a base de cuatro dígitos que las normas *AISI*, aunque no utilizan ningún prefijo literal

Tabla 2.2 Especificaciones de algunos de los aceros de bajo contenido de carbono más representativo

AISI No.	% C	% Mn	% P max	% S max	SAE No.
C1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.05	1010
C1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.04	0.05	1015
C1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.04	0.05	1018
C1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04	0.05	1020
C1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.04	0.05	1025
C1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.04	0.05	1030

Donde C: Carbono; Mn. Manganeso; P. Fósforo y S: Azufre

2.3.5.- Propiedades Físicas del Acero AISI 1018.

Tabla 2.3 Coeficiente de expansión térmica lineal para lámina de acero AISI 1018.

GRADO SAE-AISI	TRATAMIENTO O CONDICIÓN	COEFICIENTE PROMEDIO DE EXPANSIÓN $\mu .m/m.K$, en °C						
		20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700
1018	RECOCIDO	12.0	....	....	13.5	....	14.4	....

Tabla 2.4 Conductividades térmicas de la lámina de acero al carbono AISI 1018

GRADO SAE-AISI	TRATAMIENTO O CONDICIÓN	CONDUCTIVIDAD, W /mK, en °C										
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200
1018	RECOCIDO	51.9	50.8	48.9	....	....	....	....	....	....	....	....

Tabla 2.5 Calor específico de la lámina de acero AISI 1018

GRADO SAE-AISI	TRATAMIENTO O CONDICIÓN	CALOR ESPECÍFICO, J/Kg K, EN °C											
		50- 100	150- 200	200- 250	250- 300	300- 350	350- 400	450- 500	500- 550	550- 600	650- 700	750- 800	800- 850
1018	RECOCIDO	486	519	....	....	....	599	....	....	....	....	....	....

Tabla 2.6 Resistividades eléctricas de la lámina de acero AISI 1018

GRADO SAE-AISI	TRATAMIENTO O CONDICIÓN	CALOR ESPECÍFICO, J/Kg K, EN °C											
		20	100	200	400	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
1018	RECOCIDO	0.159	0.219	0.293	....	....	....	....	....	....	....	....	....

2.3.6.- Usos y Aplicaciones.

La variedad de aplicaciones del acero para fines de ingeniería se debe al amplio intervalo de propiedades físicas que se puede obtener por cambios en el contenido de carbono y en el tratamiento térmico. A continuación se mencionan algunas aplicaciones más comunes del acero AISI 1018.

1. Lámina de acero decapada:

- En la industria automotriz para partes no expuestas.
- Flejes de alta resistencia.
- Para piezas con embutido severo en el uso industrial.

2. Lámina rolada en caliente sin decapar.

- Elaboración de tanques y contenedores.
- Tubería para diversos usos, alta y mediana resistencia.
- Acero de calidad estructural para aplicación automotriz, construcción, soportes ferroviarios, etc.

3. Lámina rolada en frío.

- Partes expuestas y no expuestas para artículos de línea blanca.
- Perfiles y tubería.
- Tambores y envases.
- Insumos para mercados de galvanizadores.
- En la industria automotriz para partes expuestas y no expuestas.

CAPÍTULO III

3.- PROCESO DE LAMINACIÓN.

3.1.- Antecedentes Históricos.

Alrededor del año 1600 se practicaba el laminado del plomo y del estaño en molinos manuales. Para el año 1700, el hierro ya se laminaba en caliente en Alemania, Bélgica, Francia, Inglaterra y Suecia. Estos molinos se usaron para hacer láminas a partir de barras de hierro.

La práctica moderna del laminado data del año 1783, cuando se expidió en Inglaterra una patente para un proceso que producía barras de hierro usando rodillos acanalados. La revolución Industrial creó una gran demanda de productos de hierro y acero, estimulando el desarrollo de la laminación.

El laminado es un proceso que requiere una fuente muy grande de potencia. Hasta el siglo XVIII se usaron las ruedas accionadas por agua para mover los molinos de laminación. Hasta poco después de 1900, los motores eléctricos reemplazaron al vapor.

3.2.- Definición del Proceso.

La laminación suele ser la primera etapa del proceso de transformación de materiales fundidos en materiales acabados. Ahora bien, hay muchos productos acabados, tales como los perfiles estructurales laminados en caliente, que se obtienen exclusivamente por laminación en caliente.

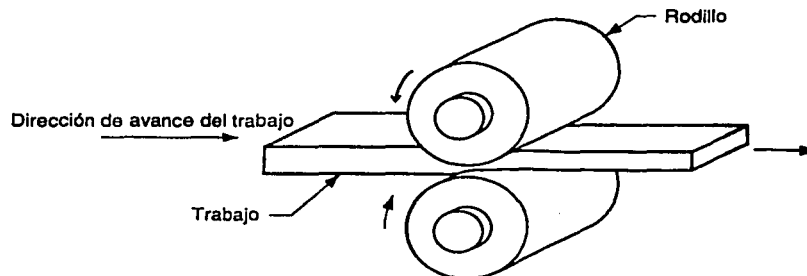


Figura 3.1 Proceso de laminación, específicamente laminado plano

La laminación consiste en la reducción de la sección transversal de un material, al hacerlo pasar entre dos rodillos cilíndricos girando en sentido opuesto ver Figura 3.1. Dichos

rodillos producen la deformación plástica del material por medio de esfuerzos compresivos y cortantes. Los compresivos se deben a que según el material se introduce entre los rodillos, el espesor libre entre ellos va siendo menor; los esfuerzos cortantes son debidos a que las fibras externas del material están sujetas a la fuerza de fricción de los rodillos.

3.3.- Clasificación General.

Un desbaste pesado (bloom) es el primer producto de la laminación en caliente del lingote; suele ser de sección cuadrada o rectangular, pero el ancho suele ser inferior al doble del espesor y el área no suele pasar de 230 [cm²]. Si se hace una reducción mayor en la laminación en caliente se obtiene la palanquilla (En metalurgia de los metales no ferrosos se llama palanquilla a cualquier lingote que ha sufrido trabajo en caliente por laminación, forja o extrusión) cuya área transversal mínima suele ser de 15 [cm²]. Un desbaste plano (slab) es un producto de la laminación del lingote con una sección transversal no mayor de 100 [cm²] y un ancho superior al doble del espesor. Los desbastes pesados, palanquillas y planos, se conocen con el nombre genérico de productos semiacabados o semiproductos, porque se emplean como materia prima para obtener otros productos de laminación.

Otro tipo de laminación es la de polvos, en la que se introducen entre los rodillos polvos metálicos que se comprimen entre ellos para formar un "fleje verde", que luego se sinteriza para darle mayor densidad. La ventaja que se asigna a este procedimiento es la eliminación de trabajo en caliente, con lo cual se consigue una menor contaminación.

Laminado de perfiles. En el laminado de perfiles el material de trabajo se deforma para generar un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles para construcción como lo son vigas en I, en L y canales en U; varillas, rieles para vías de ferrocarril, etc. En este proceso, el material de trabajo pasa por los rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada.

Laminado de anillos. El laminado de anillos consiste en laminar las paredes gruesas para obtener anillos de paredes más delgadas, pero de un diámetro mayor (ver figura 3.2). El laminado de anillos en procesos de trabajo en caliente se aplica para anillos grandes, mientras que para anillos pequeños se usa un proceso de trabajo en frío.

Algunas de las aplicaciones que tiene el proceso de laminación de anillos son: collares para rodamientos de bolas y rodillos, llantas de acero para ruedas de ferrocarril y cinchos para tubos, recipientes a presión y máquinas rotatorias.

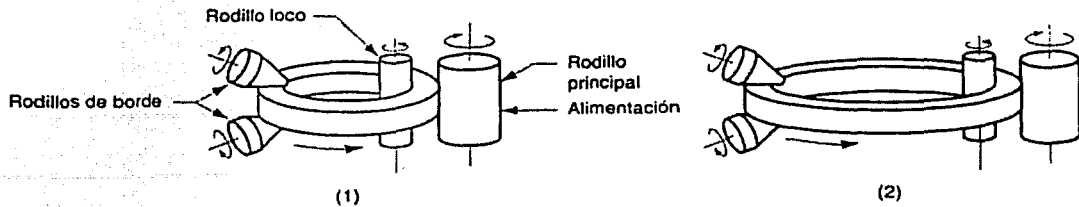


Figura 3.2 Laminación de anillos que se usa para reducir el espesor e incrementar su diámetro: (1) Inicio y (2) proceso terminado

Laminación de cuerdas. El laminado de cuerdas, es un proceso de laminación en caliente que se usa para hacer cuerdas en partes cilíndricas mediante su laminación entre dos dados. Es un proceso importante para la producción masiva de componentes con cuerdas externas como lo son pernos y tornillos, este proceso puede competir con el proceso de maquinado de cuerdas, este tipo de procesos se hacen con máquinas que están equipadas con dados especiales que determinan el tamaño y la forma de la cuerda. En la figura 3.3 se ilustra el principio de funcionamiento.

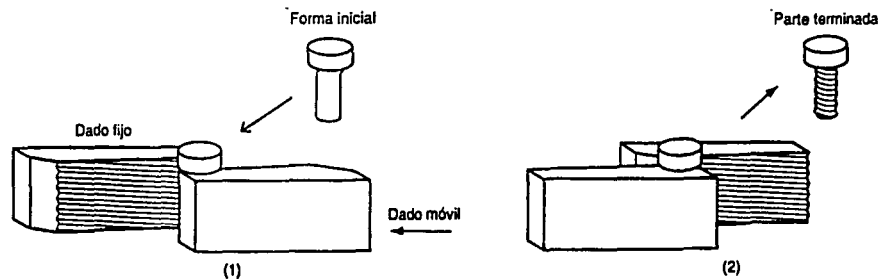


Figura 3.3 Laminado de cuerdas con dados planos: 1) Inicio del ciclo y 2) fin del ciclo.

Algunas de sus ventajas son mejor aprovechamiento del material, cuerdas mas fuertes debido al endurecimiento por trabajo, superficies mas lisas y mejor resistencia a la fatiga debido a los esfuerzos por compresión que se introducen durante el laminado.

Laminación de engranes. Este es un proceso de formado en frío que solo produce ciertos engranes. La instalación que se requiere para este proceso es similar al laminado de cuerdas, excepto que las características de deformación de los rodillos o discos se orientan paralelamente a su eje (o a un ángulo en caso de engranes helicoidales), en lugar de la espira del laminador de cuerdas. Algunas de sus ventajas son: altas velocidades de producción, mejor resistencia a la fatiga y menor desperdicio de material.

En el diagrama de la figura 3.4 se muestra un diagrama típico de los talleres de laminación de acero y también se aplica a la mayoría de los talleres de laminación de metales no ferrosos.

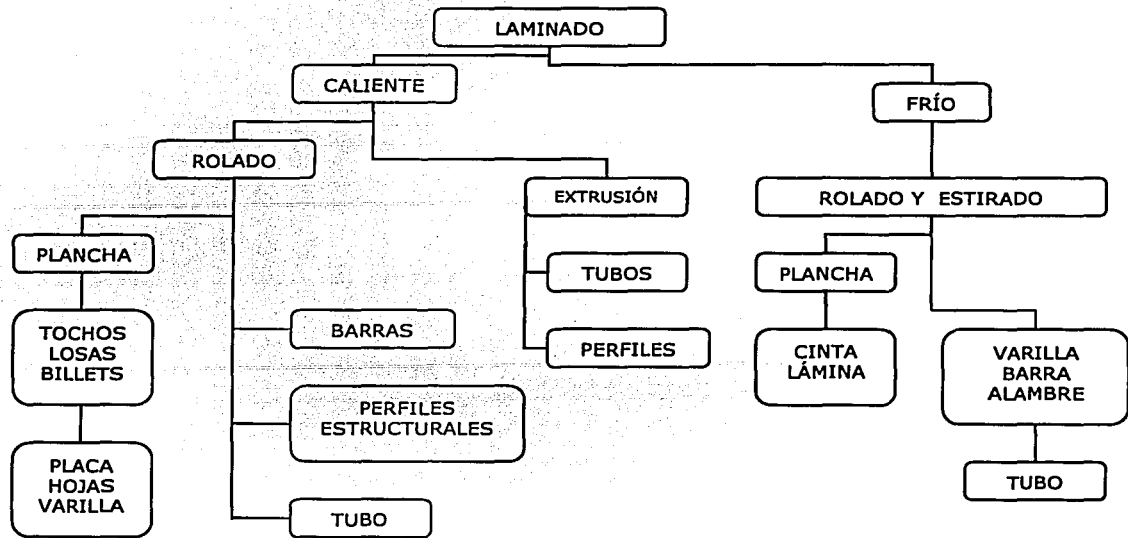


Figura 3.4 Diagrama típico de taller de laminación

3.4.- Principales Tipos de Laminadores.

Laminadores primarios. Su principal función es transformar los lingotes de acero en productos semielaborados.

Los principales tipo de laminadores primarios son: blooming (de desbaste), que son los más corrientes y los slabbing (de desbaste plano), que son laminadores primarios para lingotes de acero pequeños que pesan de 0.5 a 1.5 [Ton].

Los laminadores blooming son los más potentes y de mayor producción entre los laminadores primarios. Su función específica consiste en reducir lingotes de acero con peso mayor que 1[Ton] a desbaste de sección transversal desde 125 X 125 a 450 X 450 [mm].

Los laminadores slabbing son muy potentes, de elevada producción, proyectados específicamente para reducir lingotes de acero, que pesan más de 7 [Ton], a desbastes planos de 75 a 200 [mm] de grueso y de 700 a 1600 [mm] de ancho y aún mayores.

Laminadores intermedios. Los laminadores intermedios son para laminar productos semi-terminados, que constituyen el material para la fabricación de productos de metal laminado completamente terminados.

Laminadores de productos planos. Los laminadores de productos planos sirven para laminar en caliente productos planos de acero y metales no ferrosos. Su principal característica es que los cilindros son cilíndricos o ligeramente bombeados.

La disposición de los laminadores de productos planos varía en función del material, las dimensiones del producto acabado y la producción requerida.

3.5.- Rodillos de Laminación.

Los rodillos de laminación se componen de tres partes principales:

1. El cuerpo o tabla, que puede ser lisa o acanalada.
2. Los cuellos, uno a cada lado de la tabla.
3. Los muñones o trefles de acoplamiento, también en número de dos por cada rodillo.

Los principales materiales que se usan en la construcción de los rodillos de laminación son de fundición ordinaria con una dureza de 240 [HB] para rodillos preparadores, que deben resistir fuertes presiones y conviene en ellos algo de elasticidad, mientras que los de fundición de 420 [HB] se usan para rodillos acanalados para laminación de chapas, redondos, etc.

Para rodillos desbastadores se usa acero forjado de 0.40% de C y 0.60% de Mn, en tanto que para los cilindros de laminación de perfiles se hacen de acero aleado de 0.85% de C, 0.30% de Ni, 0.10% de Cr y 0.50% de Mo.

3.6.- Tipo de Arreglos.

La unidad con que se lleva a cabo el proceso de laminación esta constituida por: chumaceras, bastidor, medios de accionamiento, y sistemas de ajuste de temperatura de los rodillos, así como también de otros elementos auxiliares tales como las guías de entrada y salida.

Estos arreglos se clasifican de acuerdo al número y disposición de los rodillos.

Arreglo dúo reversible: Este es el dispositivo más sencillo (Figura 3.5a). Consiste en un par de rodillos que giran en sentido opuesto, el metal pasa entre ellos, desde un lado hacia el otro; se reduce el espacio entre los rodillos y se invierte su dirección de giro, y de nuevo pasa el metal entre los rodillos en movimiento. Se repite este ciclo hasta que el metal haya adquirido el grueso requerido.

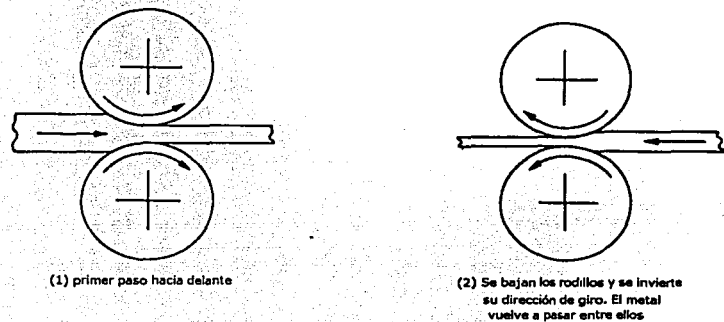
Arreglo trío: Consiste de tres rodillos de igual diámetro, con eje de rotación horizontal, los ejes de los tres se encuentran contenidos en un mismo plano vertical (Figura 3.5b). Los rodillos giran continuamente en la dirección indicada. Las bancadas suben y bajan

para hacer pasar al metal en primer lugar entre los dos rodillos bajos, y a continuación entre los dos rodillos altos. El ciclo se repite hasta que el metal haya adquirido el grueso requerido.

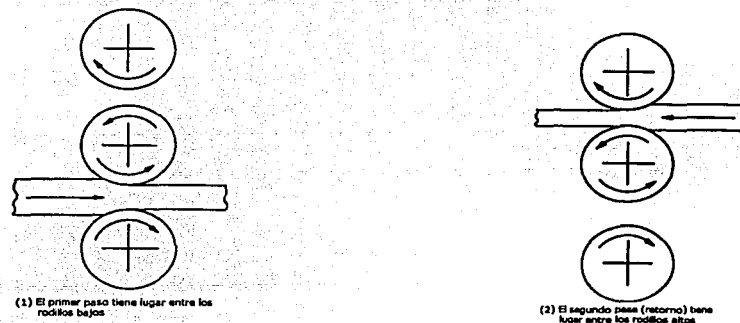
Laminador cuarto: Está compuesto de cuatro rodillos, dos de trabajo y dos de apoyo (Figura 3.5c), los cuales permitiéndoles aplicar una presión mayor al metal que está siendo laminado sin que se produzcan desvíos. En algunas ocasiones estos arreglos se aplican para desbaste de aleaciones muy tenaces.

Laminadores Sendzimir: Es un dispositivo que tienen del orden de 18 rodillos de apoyo, se dice que es una refinación del arreglo de racimo (Figura 3.5d). Operan de la misma forma que el laminador dúo reversible, y se les utiliza ampliamente para obtener tiras acabadas laminadas en frío y brillantes.

Laminador de racimo: Es un arreglo de dos rodillos de pequeño diámetro que efectúan el trabajo, con cuatro rodillos de apoyo contenidos en varios planos verticales (figura 3.6). Generalmente este tipo de arreglos se usa para el acabado de hoja metálica de alta resistencia a pequeño espesor.



(a) Laminador dúo reversible



(b) Arreglo trío

Figura 3.5 Varias configuraciones de molinos de laminación.

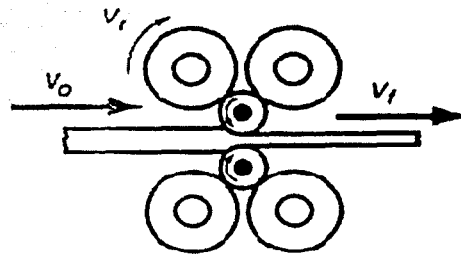
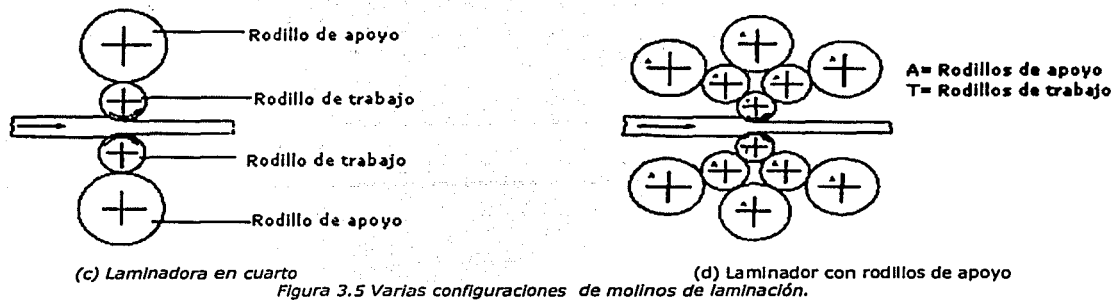


Figura 3.6 Laminador de racimo

3.7.- Técnicas de Laminación.

3.7.1.- Laminación en Caliente.

La mayor parte del laminado industrial se realiza en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida. Los materiales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas.

El laminado en caliente se utiliza siempre para el laminado inicial de los lingotes de fundición. No solamente resulta más fácil dar el tamaño adecuado al lingote cuando éste se encuentra caliente y plástico, sino que el proceso de laminado en caliente cierra cualquier discontinuidad de la fundición, y suelda a forja sus superficies entre sí. Esto evita la presencia de fallas, que podrían dar lugar a que la pieza fuera sometida, con dichas fallas presentes, a posteriores operaciones de laminado.

En la laminación en caliente, al igual que en todo el trabajo en caliente, es muy importante que toda la masa del metal se caliente uniformemente hasta la temperatura conveniente antes de sufrir la operación. Ello suele hacer necesario un calentamiento prolongado a la temperatura deseada (por arriba de la temperatura de recristalización), procedimiento conocido como recalentado. Si la temperatura no es uniforme, tampoco lo será, por tanto, la deformación y el exterior, más caliente, fluirá mejor que el interior, el

cual, al estar más frío, será así más resistente. Con ello, pueden aparecer problemas de agrietamiento, rotura y otros relacionados con éstos.

Actualmente, una gran parte de la laminación en caliente se lleva a cabo en instalaciones integradas, en las que la elaboración de la materia prima, sea ésta lingote o metal de colada continua, se organiza para obtener determinados productos específicos. Los lingotes, tan pronto se solidifican y desmoldan, se introducen en hornos de resudar caldeados por gas o aceite pesado. Estos lingotes retienen parte del calor de la colada, con el propósito de que consuman menos energía para alcanzar la temperatura uniforme de 1200 [°C] que suele necesitarse para la laminación de aceros al carbono. El metal obtenido por colada continua suele dirigirse directamente a los trenes de laminación sin necesidad de calentarlo adicionalmente.

La laminación en caliente concluye habitualmente a unos 50 ó 100 [°C] por encima de la temperatura de recristalización. Manteniendo esa temperatura final se garantiza un tamaño de grano uniforme y se imposibilita que aparezca un endurecimiento por acritud indeseable.

3.7.2.- Laminación en Frío.

El principal uso del laminado en frío es para dar un mejor acabado a los metales que fueron laminados en caliente; consigue que la superficie sea lisa y brillante, asegura la exactitud de dimensiones, y aumenta apreciablemente la resistencia a la tracción del producto acabado. El laminado en frío se usa generalmente para la fabricación de planchas, flejes, barras y varillas, con el propósito de obtener productos de superficies pulidas y dimensiones exactas. La mayor parte del laminado se realiza en laminadores de cuatro rodillos, de racimo o de planetario.

La superficie del material en frío está libre de incrustaciones o capas de óxido y es generalmente preferible a los correspondientes productos laminados en caliente.

3.8.- Laminado Plano y su Análisis.²

El laminado plano se ilustra en las figuras 3.7 y 3.8. Involucra el laminado de planchas, tiras, láminas y placas, partes de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mayor que el espesor. En el laminado plano, se presiona el trabajo entre dos rodillos de manera que su espesor se reduce a una cantidad llamada deformación máxima:

²Mikell P. Groover. Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas. 1ª ed., México, Prentice Hall, página 450.

$$d = t_0 - t_f \quad 3.1$$

donde d = a la deformación máxima, [mm] (Pulg.); t_0 = espesor inicial, [mm] (pulg.); t_f = espesor final, [mm] (pulg.). La deformación máxima se expresa algunas veces como una fracción del espesor del material inicial llamada *reducción*:

$$r = \frac{d}{t_0} \quad 3.2$$

donde r = reducción. Cuando se usa una serie de operaciones de laminado, la reducción se toma como la suma de los adelgazamientos dividida entre el espesor original.

Además de reducir el espesor, el laminado incrementa usualmente el ancho del material de trabajo. Esto se llama *esparcido* (*spreading*), y tiende a ser más pronunciado con bajas relaciones entre ancho y espesor, así como con bajos coeficientes de fricción. Existe la conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen que entra (constante de volumen):

$$t_0 w_0 L_0 = t_f w_f L_f \quad 3.3$$

donde w_0 y w_f son los anchos del trabajo antes y después, [mm] (pulg.), y L_0 y L_f son las longitudes antes y después [mm] (pulg.). De igual forma la velocidad volumétrica del material antes y después debe ser la misma, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después de la siguiente manera:

$$t_0 w_0 v_0 = t_f w_f v_f \quad 3.4$$

donde v_0 y v_f son las velocidades de entrada y salida del material de trabajo.

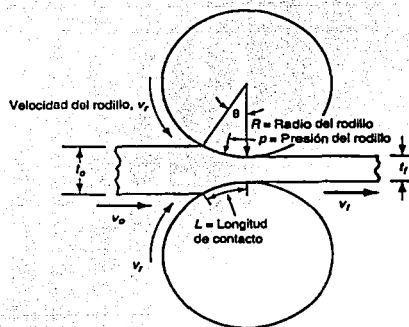


Figura 3.7 Vista lateral del laminado plano indicando el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características.

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo θ . Cada rodillo tiene un radio R y su velocidad de rotación tiene una velocidad superficial v_r . Esta velocidad es mayor que la velocidad de trabajo v_o , y menor que la velocidad de salida v_z . Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos. Sin embargo, existe un punto, a lo largo del arco donde la velocidad del trabajo iguala a la velocidad del rodillo. Este punto se llama *punto de no deslizamiento*, también conocido como *punto neutro*. A cualquier lado de este punto, ocurren deslizamientos y fricción entre el rodillo y el material de trabajo. La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse por medio del *deslizamiento hacia adelante (forward slip)*, este término se usa en laminado y se define como:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad 3.5$$

donde s = deslizamiento hacia adelante, v_z = velocidad final del trabajo (salida), [m/seg] (pie/seg); y, v_r = velocidad del rodillo = [m/seg] (pie/seg).

El esfuerzo real experimentado por el trabajo laminado se basa en el espesor del material antes y después del laminado. En forma de ecuación,

$$\epsilon = \ln \frac{t_o}{t_f} \quad 3.6$$

Se puede usar la deformación real para determinar el esfuerzo de fluencia promedio Y_f aplicado al material de trabajo en el laminado plano. Recordando de la ecuación

$$Y_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n} \quad 3.7$$

donde Y_f = esfuerzo de fluencia promedio, [MPa] (lb/pulg²); ϵ es el máximo valor de deformación durante el proceso de deformación, K = coeficiente de resistencia, [MPa] (lb/pulg²); n es el exponente de endurecimiento por deformación.

El esfuerzo de fluencia promedio será útil para calcular las estimaciones de fuerza y potencia en laminado.

La fricción se presenta en el laminado con un cierto coeficiente de fricción, la fuerza de compresión de los rodillos, (multiplicada por este coeficiente de fricción) da por resultado una fuerza de fricción entre los rodillos y el trabajo. En el lado de la entrada del punto

neutro la fuerza de fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene la dirección opuesta. Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. La fuerza de fricción es mayor en la entrada, de manera que la fuerza neta jala el trabajo a través de los rodillos. El laminado no sería posible sin estas diferencias. Hay un límite para la deformación máxima posible que puede alcanzar el laminado plano con un coeficiente de fricción, dado por

$$d_{\text{máx}} = \mu^2 R \quad 3.8$$

donde $d_{\text{máx}}$ = deformación máxima posible, [mm] (pulg.); μ = coeficiente de fricción y R = radio del rodillo, [mm] (pulg.). La ecuación indica que si la fricción fuera cero, el adelgazamiento podría ser cero y esto haría imposible la operación de laminado.

El coeficiente de fricción en el laminado depende de varios factores como lubricación, material de trabajo y temperatura de trabajo. En el laminado en frío el valor es alrededor de 0.1; en el trabajo en tibio, un valor típico es alrededor de 0.2; y en el laminado en caliente μ es alrededor de 0.4. El laminado en caliente se caracteriza frecuentemente por una condición llamada *adherencia* en la cual la superficie caliente del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. Esta condición ocurre frecuentemente en el laminado de aceros y aleaciones para alta temperatura. Cuando ocurre la adherencia, el coeficiente de fricción puede ser tan alto como 0.7. La consecuencia de la adherencia es que las capas superficiales del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo v_r ; y debajo de la superficie la deformación es más severa a fin de permitir el paso de la pieza a través de la abertura entre los rodillos.

Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza F requerida para mantener la separación entre los dos rodillos se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado (mostrada como P en la figura 3.7), sobre el área de contacto rodillo-trabajo. Esto se puede expresar como sigue:

$$F = w \int_0^L p dL \quad 3.9$$

donde F = fuerza de laminado [N] (lb); w = ancho del material de trabajo que se está laminando, [mm] (pulg.), p = presión de laminado, [MPa] (lb/pulg.²); y L = longitud de contacto entre el rodillo y el trabajo, [mm] (pulg.). La integración requiere dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro. Las variaciones en la presión del rodillo a lo largo de la longitud de contacto son significativas. La figura 3.8 da una idea de esta variación. La presión alcanza un máximo en el punto neutro y se desvanece a cada lado de los puntos de entrada y salida. Al aumentar la fricción, la presión se incrementa al máximo

relativo entre los valores de entrada y salida. Al disminuir la fricción el punto neutro se corre hacia la salida a fin de mantener una fuerza neta que jale el material en la dirección del laminado. De otra forma, con una baja fricción, el material de trabajo podría deslizarse en lugar de pasar entre los rodillos.

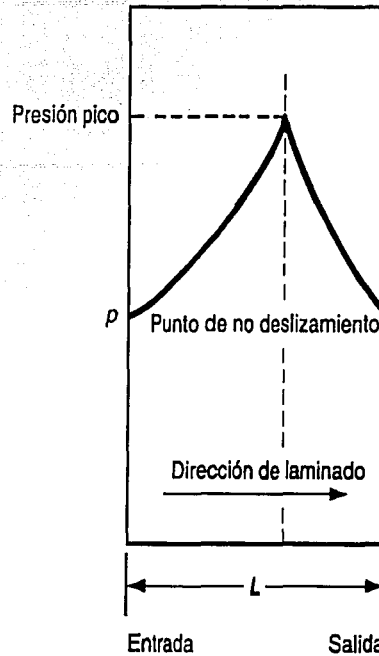


Figura 3.8 Variaciones típicas de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la Integración de la ecuación 3.9, es la fuerza de laminación F .

Se puede calcular una aproximación de los resultados obtenidos por la ecuación 3.9 con base en el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el material de trabajo en la brecha entre los rodillos. Esto es,

$$F = \bar{Y}_f \omega L \quad 3.10$$

donde Y_f = esfuerzo de fluencia promedio de la ecuación 3.7, en [MPa] (lb/pulg.²); el producto ωL es el área de contacto rodillo-trabajo, [mm²] (pulg²). La longitud de contacto se puede aproximar mediante:

$$L = \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad 3.11$$

El momento de torsión en laminado se puede estimar suponiendo que la fuerza ejercida por los rodillos se centra en la pieza, conforme pasa entre ellos y actúa con un brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto L . Entonces, el momento de torsión para cada rodillo es:

$$T = 0.5FL \quad 3.12$$

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. La velocidad angular es $2\pi N$, donde N = velocidad de rotación del rodillo. Así, la potencia para cada rodillo es $2\pi NT$. Al sustituir la ecuación 3.12 por el momento de torsión en esta expresión para la potencia, y al duplicar el valor, dado que un molino de laminado posee dos rodillos, obtenemos la siguiente expresión.

$$P = 2\pi NFL \quad 3.13$$

donde P = potencia [J/s] (pulg.-lb/min); N = velocidad de rotación [1/seg] (rev/min); F = fuerza de laminado, [N] (lb); L = longitud de contacto, [m] (pulg.).

3.9.- Ventajas y Desventajas del Laminado en Caliente y en Frío.

Laminación en caliente

Ventajas

- 1.- Las discontinuidades del lingote quedan eliminadas con el laminado a presión, resultando un material más homogéneo, químicamente hablando.
- 2.- Con cada paso entre los rodillos se logran grandes reducciones en tamaño, por ser relativamente plástico el metal a temperaturas elevadas.

Desventajas

- 1.- Precisión en las dimensiones relativamente baja.
- 2.- Precisión geométrica relativamente baja.
- 3.- Ausencia de "rectitud."
- 4.- Mal acabado (muy escamoso por la presencia de capas de óxido).
- 5.- Estructura granular burda, debida al enfriamiento lento a partir de temperaturas elevadas.

Laminación en frío

Ventajas

- 1.- Elevada precisión en las dimensiones.
- 2.- Elevada precisión geométrica.
- 3.- Buen acabado superficial.
- 4.- Buenas cualidades para el mecanizado y resistencia en aumento debido al grano fino.

Desventajas

- 1.- Sólo son posibles pequeñas reducciones, por ser muy elevadas las fuerzas de laminado.
- 2.- Los rodillos deben ser rectificadas con frecuencia, para mantener el acabado en ellos y la pieza.
- 3.- Proceso únicamente de acabado.
- 4.- Más costo en planta y en energía que el laminado en caliente.

CAPÍTULO IV

4.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

4.1.- Introducción.

La función de los tratamientos térmicos consiste en mejorar las propiedades de los aceros sometiéndolo en estado sólido a uno o varios ciclos de calentamiento y enfriamiento. De ésta manera se modifica su estructura microscópica, efectuándose transformaciones físicas e incluso a veces cambios en la composición del metal.

El tiempo y la temperatura son los factores primordiales que hay que fijar de antemano, de acuerdo con la composición del acero, la forma, el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener.

4.2.- Principales Tratamientos Térmicos.

Los tratamientos térmicos más utilizados son: El recocido, temple, revenido, normalizado, tratamientos isotérmicos y tratamientos de endurecimiento superficial. En la figura 4.1 se presentan gráficamente los más importantes.

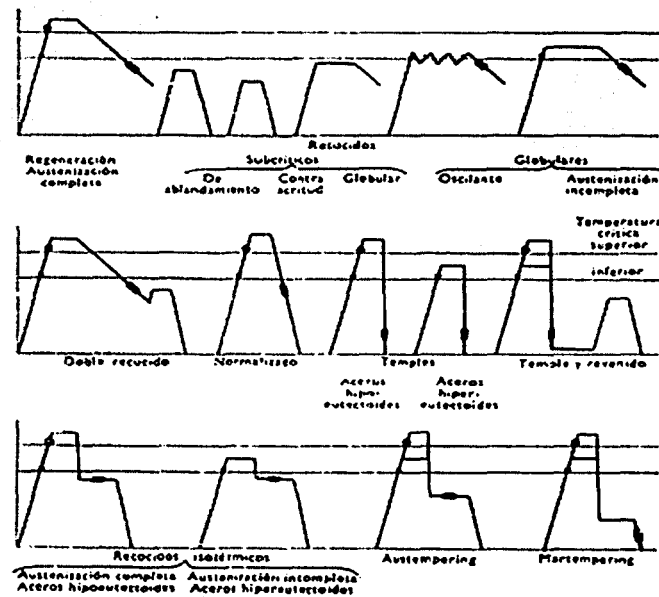


Figura 4.1 Esquema de los tratamientos térmicos más empleados y el desplazamiento de las zonas de transformación

4.2.1.- Recocido.

El proceso de recocido se refiere a varios tratamientos con algunas características en común. Consiste básicamente en calentamientos a temperaturas determinadas (figura 4.2), generalmente seguidos de enfriamientos lentos. Pueden ser varios los fines que se persiguen con el recocido, su objetivo principal es ablandar el acero, otras veces se busca afinar el grano (figura 4.3), regenerar su estructura o eliminar tensiones internas, en ocasiones se requiere mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas, y en algunos caso aumentar la maquinabilidad.

Las distintas clases de recocidos empleados en la industria se pueden clasificar en tres grupos: recocidos con austenización completa, recocidos subcríticos y recocidos con austenización incompleta.

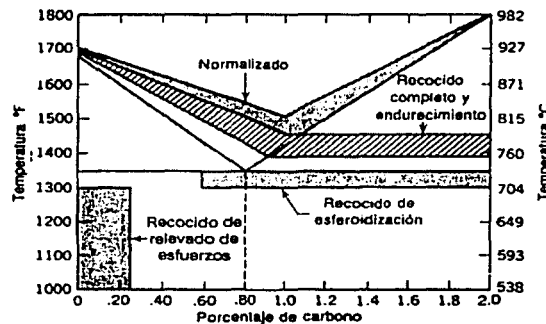


Figura 4.2 Rango de temperaturas utilizados para el tratamiento térmico del acero al carbono.

1.- Recocido con austenización completa o de regeneración. Con éste nombre se conoce un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego se enfría muy lentamente por lo general hasta la temperatura ambiente. Sirve para ablandar el acero y regenerar su estructura.

2.- Recocido subcrítico. Éste proceso, conocido también como recocido de alivio de tensiones, tiene por objeto eliminar las tensiones internas que aparecen en el material y aumentar su ductilidad después de haber sufrido un fuerte mecanizado o cualquier otro proceso de deformación en frío. El calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior (de 538 a 648 [°C]), no teniendo tanta importancia como en el caso anterior la velocidad de enfriamiento.

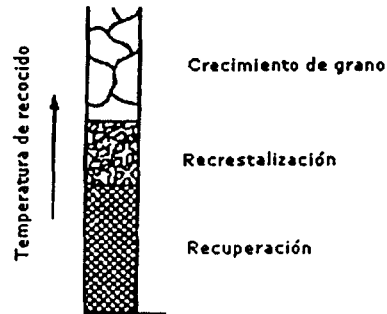


Figura 4.3 Cambios en la estructura del metal que ocurren durante los procesos de recocido

Se distinguen tres clases de recocidos subcríticos: de ablandamiento, contra acritud y globular.

El recocido de ablandamiento tiene como objetivo primordial ablandar el acero mediante un procedimiento rápido y económico. El proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura que estando por debajo de la crítica inferior, sea lo más elevada posible, y enfriar luego al aire. Con este tratamiento no se suelen obtener las mejores durezas, pero en muchos casos las que se consiguen son suficientes para mecanizar adecuadamente el material.

El recocido contra acritud tiene por objeto aumentar la ductilidad de los aceros con poco contenido de carbono (menos de 0,40%) estirados en frío. Este tratamiento se utiliza en las industrias que trabajan en chapa y alambre, y se realiza calentando el acero a temperaturas por debajo de las críticas inferiores (de 538 a 650 [°C]). Durante el calentamiento el acero se ablanda debido a que se destruye la cristalización alargada de la ferrita, apareciendo nuevos cristales poliédricos más dúctiles que los originales, lo que le permite sufrir una nueva deformación. El tratamiento es muy similar al recocido de alivio de tensiones.

El recocido globular se utiliza para obtener en los aceros al carbono y de baja aleación una estructura globular de muy baja dureza, sometiendo al material a un calentamiento a temperaturas por debajo, pero muy próximas a la crítica inferior, debiendo luego enfriarse el acero lentamente en el horno. Mediante éste tratamiento el carburo de hierro (cementita) adopta una forma esférica o globular en vez de láminas como en la perlita. Ésta estructura proporciona no solo una buena maquinabilidad sino también una ductilidad elevada.

Las formas más frecuentes para realizar éste tratamiento son:

- a) Permanencia prolongada a una temperatura inmediatamente por debajo de la crítica inferior.
- b) Un ciclo oscilante de calentamientos y enfriamientos a temperaturas que son a veces inmediatamente superiores y otras inmediatamente inferiores a las correspondientes a la línea crítica inferior.

3.- Recocido con austenización incompleta. Éste tipo de tratamiento se acostumbra utilizar con aceros al carbono o aleados, con un contenido mayor de 0, 50% de carbono. Su propósito es obtener la menor dureza posible y mejorar su maquinabilidad.

El procedimiento de aplicación consiste en efectuar calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior y la inferior, seguido siempre de un enfriamiento lento. En ocasiones se emplea un ciclo oscilante de temperaturas que son unas veces superiores y otras inferiores a la crítica inferior (recocido globular oscilante). Otras veces se emplean temperaturas ligeramente superiores a la crítica inferior (recocido globular de austenización incompleta).

4.2.2.- Normalizado.

Por medio de éste tratamiento se consigue en el acero una mayor dureza y resistencia que en el recocido de regeneración, se afina el tamaño de grano, se homogeniza la estructura y se mejora la maquinabilidad, particularmente en los aceros bajos en carbono. El proceso consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior (aproximadamente 55 [°C]) seguido de un enfriamiento en aire tranquilo a la temperatura ambiente. Se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente, trabajos en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos, y también sirve para destruir los efectos de un tratamiento anterior defectuoso.

4.2.3.- Temple.

Es un tratamiento que tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente mas elevada que la crítica superior y se enfría luego, mas o menos rápidamente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente , agua, aceite, etc., en la figura 4.4 se muestra la curva de enfriamiento de un temple.

Con el temple se pretende conseguir una estructura totalmente martensítica, y una velocidad mínima de enfriamiento, comúnmente llamada velocidad crítica de temple, en [$^{\circ}\text{C}/\text{seg}$], que impida la formación de productos de transformación mas blandos.

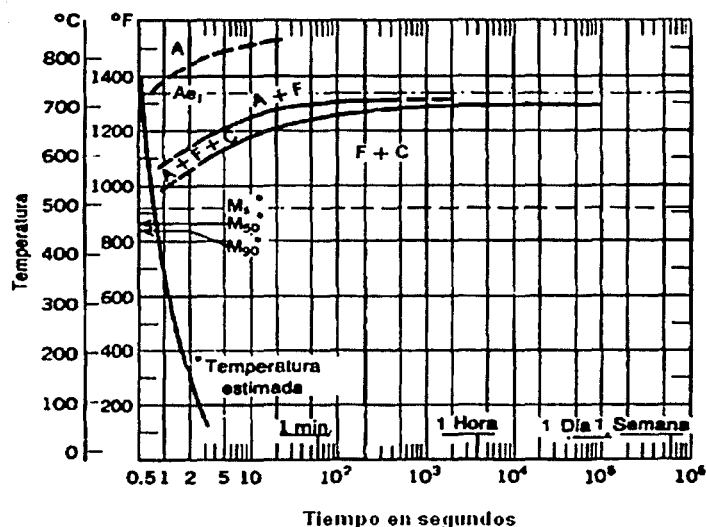


Figura 4.4 La curva de enfriamiento para el temple en salmuera del acero al carbono SAE 1008

4.2.4.- Revenido.

Este tratamiento se da a las piezas de acero que han sido previamente templadas.

Debido a que la formación de la martensita da lugar a considerables tensiones, los aceros después del temple suelen quedar demasiado frágiles para la mayoría de los usos a que van a ser destinados. El revenido consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior, con objeto de eliminar las tensiones internas y aumentar la tenacidad y ductilidad del acero, aunque éste aumento de ductilidad se logra normalmente a costa de una disminución de la dureza y de la resistencia.

4.2.5.- Tratamientos Isotérmicos.

Son aquellos en los que el enfriamiento de las piezas no se hace de una forma regular y progresiva sino que se interrumpe o modifica a diversas temperaturas durante ciertos intervalos, en los que permanece el material a temperatura constante durante un tiempo que depende de la composición del acero, de la masa de las piezas y de los resultados que se quieren obtener. A continuación se detallan algunos de los tratamientos isotérmicos más utilizados:

1.- Austempering. Consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente mas elevada que la crítica superior y luego enfriarlo rápidamente en plomo o sales fundidas, a temperaturas comprendidas entre 250 y 600 [°C], permaneciendo el acero en el baño a ésta temperatura durante el tiempo suficiente para que se lleve a cabo la transformación completa de la austenita en otros constituyentes a temperatura constante.

Mediante éste procedimiento se logra que el acero pase directamente del estado austenítico a la estructura particular que se desee, comúnmente bainita, sin que en ningún instante adopte la estructura martensítica correspondiente al temple total.

2.- Martempering. Es un temple escalonado en el que el material caliente, a una temperatura ligeramente mas elevada que la crítica superior, se enfría en un baño de sales a temperaturas comprendidas entre 200 y 400 [°C], permaneciendo en él las piezas durante un tiempo que debe controlarse cuidadosamente y que debe ser suficiente para que iguale la temperatura en toda la masa, antes de que en ninguna parte de ella se inicie la transformación de la austenita, y luego se enfría al aire. De ésta forma se consigue que la transformación de toda la masa del acero se verifique casi al mismo tiempo evitándose las desiguales y peligrosas dilataciones que ocurren en los temples ordinarios, en los que las transformaciones de las distintas zonas del material ocurren en momentos diferentes.

3.- Recocidos isotérmicos. Son tratamientos de ablandamiento que consisten en calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior o inferior según los casos (generalmente de 740 a 880 [°C]) y luego enfriar hasta una temperatura de 600-700 [°C], que se mantiene constante durante varias horas para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita, y finalmente se enfría al aire.

4.2.6.- Tratamientos de Endurecimiento Superficial.

En varias aplicaciones industriales es necesario que algunas piezas tengan la superficie muy dura y resistente al desgaste, y la parte central, llamada corazón, muy tenaz y relativamente blanda. Los procedimientos más utilizados para conseguir éstas características son los siguientes: cementación, nitruración, cianuración o carbonitruración, endurecimiento superficial por llama y endurecimiento superficial por corrientes de inducción.

1.- Cementación. Mediante éste tratamiento se modifica la composición de las piezas de aceros aumentando el contenido en carbono de la zona periférica, obteniéndose después por medio de temples y revenidos, una gran dureza superficial. En términos generales el procedimiento consiste en colocar las piezas, normalmente de aceros bajos en carbono, en

presencia de una atmósfera que contiene una gran cantidad de óxido de carbono. La temperatura normal de cementación es de 925[°C].

2.- Nitruración. Es un tratamiento de endurecimiento superficial a baja temperatura, en el que las piezas de acero templadas y revenidas, al ser calentadas a 500 [°C] en contacto con una corriente de amoniaco, absorben nitrógeno debido a la previa disociación de este amoniaco, formándose en la capa periférica nitruros de gran dureza, quedando las piezas muy duras sin necesidad de ningún otro tratamiento posterior.

3.- Cianuración. Es un procedimiento utilizado para endurecer superficialmente los aceros aleados y al carbono mediante la formación de una capa de poco espesor, de elevada dureza y buena resistencia al desgaste. Éste tratamiento se efectúa por inmersión del acero en un baño fundido con un contenido de cianuro sódico de aproximadamente el 30% y a temperaturas comprendidas entre 787 y 870 [°C], seguida normalmente por un temple en agua. La cianuración se diferencia de la cementación en baño de sales en la composición y carácter de la capa dura, pues mientras que en la cianuración ésta tiene un elevado contenido de nitrógeno y bajo de carbono, en el caso de la cementación ocurre justamente lo contrario. La cianuración es muy empleada en el endurecimiento superficial de piezas pequeñas.

En la carbonitruración, llamada también cianuración gaseosa, se logran los mismos efectos que en la cianuración, utilizando una mezcla formada por amoniaco (NH_3) y por hidrocarburos en estado gaseoso. Éste procedimiento se utiliza principalmente como sustituto de la cianuración por su bajo costo.

4.- Endurecimiento superficial por llama. Este procedimiento consiste en templar determinadas zonas de las piezas, fabricadas con aceros de contenidos en carbono alto o medio, calentándolas rápidamente y enfriándolas inmediatamente en agua o en un chorro de aire. Las piezas se pueden calentar bien con un soplete oxiacetilénico, bien en instalaciones más complejas, en las que automáticamente se verifica el calentamiento, temple y movimiento de la llama. Como se calienta solo una pequeña parte de las piezas, prácticamente no se producen deformaciones. Las piezas a tratar se suelen templar y revenir antes con el fin de que el núcleo adquiriera las propiedades deseadas.

5.- Endurecimiento superficial por corrientes de inducción. Éste procedimiento es similar al anterior, caracterizándose ambos por ser procedimientos de temple superficial que se realizan sin que varíe la composición química del acero. Éste procedimiento se aplica principalmente a los aceros con un contenido de carbono medio. La pieza que se va a endurecer superficialmente constituye el secundario de una instalación de calentamiento por

corrientes de alta frecuencia, en la que el primario está constituido por varias espiras de tubo de cobre, por cuyo interior circula agua de refrigeración durante la operación. Cuando a través de las espiras del primario pasa una corriente alterna de alta frecuencia se crea un campo magnético alternativo, el cual da lugar al nacimiento en el acero de corrientes de Foucault y ciclos de histéresis. La resistencia que opone el material al paso de éstas corrientes origina la transformación de la energía en calor, produciéndose el calentamiento de la pieza.

CAPÍTULO V

5.- EXPERIMENTACIÓN.

5.1- Introducción.

La finalidad general de éste trabajo es analizar las variaciones microestructurales y las fases que se presentan en los recubrimientos de aluminio y zinalco, obtenidos por inmersión en metal fundido sobre acero AISI 1018, al ser posteriormente laminados y recocidos, con el fin de predecir su comportamiento mecánico.

5.2.- Material Empleado.

Acero AISI 1018. En la experimentación del presente trabajo, se empleó chapa de acero tipo AISI 1018 con calidad comercial producida por AHMSA, con la siguiente composición química:

C	-	0.18 %
Si	-	0.25 %
Mn	-	0.75 %

también se pueden encontrar Fósforo y Azufre en cantidades residuales.

La cual fue proporcionada por el fabricante y es certificado que cumple con las normas vigentes.

Zinalco. El zinalco que se empleó tiene la siguiente composición química:

Zn	-	75 %
Al	-	22 %
Cu	-	3 %

Aluminio. El aluminio utilizado presenta la composición química siguiente:

Al 1100 con una pureza del 99 %.

5.3.- Reactivos Utilizados.

- Ácido Clorhídrico al 10 % (HCl)
- Tiourea (H_2NCSNH_2)
- Cloruro de Zinc (ZnCl_2)

- Cloruro de Amonio (NH_4Cl)
- Agua Destilada
- Ácido Fluorhídrico al 48% (HF)
- Ácido Clorhídrico Concentrado (HCl)
- Ácido Nítrico Concentrado (HNO_3)
- Ácido Crómico

5.4.- Equipo Empleado.

Para fundir el zinalco y el aluminio se utilizó un horno eléctrico, marca CONSTRUCTORA DE APARATOS INDUSTRIALES, Modelo 12BMPCH que utiliza un voltaje de 220 voltios y es de una fase, cuenta con un control de temperatura, realizando el calentamiento a base de resistencias eléctricas y alcanza una temperatura de hasta 1350 [°C].

Para realizar el recocido y precalentamiento de las piezas antes de introducirlas al laminado, se utilizó un horno eléctrico marca LINDBERG modelo 439DL tipo 41SE8156 que alcanza una temperatura máxima de 1371 [°C] por medio de resistencias eléctricas y cuenta con un control de temperatura, de 220 voltios, trifásico y un sistema de atmósfera controlada a base de Argón.

El laminador empleado fue un laminador dúo con posibilidades de arreglarse como cuarto, marca HILLE, con capacidad de carga de 25 toneladas, en el cual se puede controlar la velocidad de laminación y el porcentaje de deformación.

Microscopio electrónico de barrido Philips XL Series modelo XL20. Este equipo fue empleado para observar las diferentes fases de la unión del recubrimiento y el material base a diferentes aumentos y en diferentes secciones de las probetas.

Las características del microscopio son las siguientes:

- Voltaje de aceleración 0 – 30 [KV].
- Detector de electrones secundarios y retrodispersados.
- Posibilidad de almacenamiento de información.
- Cámara fotográfica de 35 mm.
- Disco duro del sistema de cómputo
- Unidad de discos flexibles de 3.5 mm.
- Equipo de microanálisis por dispersión de energía.

5.4.1.- Equipos Auxiliares.

Pulidora mecánica, montadora, Microdurómetro Vickers marca Leitz modelo 301-352-001, cortadora buehler, esmeril circular, desbastadora, lijas de carburo de silicio (medidas 180, 220, 360, 400, 500 y 600), arco con segueta, pistola de aire caliente, prensa, porta probetas, balanza, así como varios materiales de laboratorio: vasos de precipitado, matraces, pipetas de seguridad, probetas, etc.

5.5.- Preparación de la Probeta del Metal Base.

El material base es una solera de acero AISI 1018 la cual fue cortada con las dimensiones apropiadas para su mejor manejo al introducirlas en el metal fundido (zinalco ó aluminio). Las dimensiones a las que fueron cortadas cada una de las probetas utilizadas para éste experimento fueron de 50 X 35 [mm].

5.6.- Limpieza de las Probetas del Metal Base.

Una vez obtenida cada probeta del material base con las dimensiones adecuadas se efectuaron los procedimientos de limpieza mecánica, decapado y activación de la superficie, para que la superficie quede libre de cualquier impureza que intervenga en el proceso de adherencia del recubrimiento (zinalco ó aluminio), y esto ocasione que no se adhiera adecuadamente el zinalco ó el aluminio en el material base.

La limpieza mecánica; se lleva a cabo con ayuda del esmeril para dejar la superficie de la probeta rugosa y tenga así una mejor adherencia entre los materiales a unir.

Limpieza en ácidos (decapado); consiste en preparar una solución de ácido clorhídrico diluido en agua al 10% con Tiourea al 10% en volumen, que funciona como inhibidor (con objeto de que las probetas no se oxiden rápidamente después de ser extraídas del decapado y expuestas al medio ambiente). Las probetas son sumergidas durante un tiempo de 5 minutos a una temperatura de 60 [°C].

Activación de la superficie; consiste en una solución volumétrica de cloruro de zinc al 15% en agua destilada, y otra solución de cloruro de amonio al 15% en agua destilada, las cuales se mezclan en una proporción del 10% de cada solución en un vaso de precipitado que contiene la misma proporción de agua destilada, teniendo una solución final de 30 ml. Las probetas se sumergen durante un periodo de 5 minutos a temperatura ambiente, al ser retiradas de la solución son secadas con una pistola de aire con objeto de que no se oxiden.

5.7.- Obtención de los Recubrimientos.

El objetivo principal de esta etapa fue obtener los mejores recubrimientos de zincalco y aluminio, variando las condiciones fundamentales que inciden en la calidad del recubrimiento, por lo que se realizaron las siguientes pruebas:

- Variar la temperatura de fundición del metal que se usó para recubrir.
- Variar el tiempo de inmersión de las probetas del metal base en el metal fundido.

A continuación se muestran las tablas indicativas de los tratamientos efectuados a cada pieza, y las características observadas.

Tabla 5.1 Tabla de Resultados de la Experimentación Previa del Zinalco.

Tabla 5.1.1

Probeta No.	Limpieza mecánica	Decapado	Act. de la Sup.	Tiempo de Inmersión	Temperatura de Inmersión	Observaciones
101	SI	SI	SI	5 [min.]	500 [°C]	El metal fundido no se encuentra completamente líquido y presenta mucha escoria
102	SI	SI	SI	5 [min.]	550 [°C]	El metal fundido se adhiere con muchos grumos al metal base
103	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	El metal base se adhiere bien y ya no presenta grumos en su superficie, su apariencia es uniforme
104	SI	SI	SI	5 [min.]	650 [°C]	características semejantes a la probeta 103

De la tabla anterior se deduce la mejor temperatura de inmersión que se utilizará a continuación para obtener el tiempo de inmersión que proporciona las mejores características de recubrimiento.

Tabla 5.1.2

Probeta No.	Limpieza mecánica	Decapado	Act. de la Sup.	Tiempo de Inmersión	Temperatura de Inmersión	Observaciones
105	SI	SI	SI	2 [min.]	600 [°C]	El metal fundido no se adhiere adecuadamente al metal base presentando descarapelamientos
106	SI	SI	SI	10 [min.]	600 [°C]	El metal fundido se adhiere al metal base de manera semejante al de la probeta 103.
107	SI	SI	SI	15 [min.]	600 [°C]	El metal fundido se adhiere con un espesor notablemente mayor y de apariencia desigual al metal base

Tabla 5.2 Tabla de Resultados de la Experimentación Previa del Aluminio.

Tabla 5.2.1

Probeta No.	Limpieza mecánica	Decapado	Act. de la Sup.	Tiempo de Inmersión	Temperatura de Inmersión	Observaciones
1	SI	SI	SI	5 [min.]	650 [°C]	El metal fundido no se adhiere al metal base adecuadamente, presenta descrapelamientos
2	SI	SI	SI	5 [min.]	700 [°C]	El metal fundido se adhiere con mucha escoria al metal base
3	SI	SI	SI	5 [min.]	750 [°C]	Todavía se tiene un poco de escoria adherida al metal base
4	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	El recubrimiento es homogéneo y en la superficie ya no hay escoria
5	SI	SI	SI	5 [min.]	850 [°C]	No se observan cambios significativos con respecto a la probeta anterior

De igual forma que en el caso anterior, hemos obtenido la mejor temperatura que se utilizará a continuación para obtener el tiempo de inmersión que proporciona las mejores características de recubrimiento.

Tabla 5.2.1

Probeta No.	Limpieza mecánica	Decapado	Act. de la Sup.	Tiempo de Inmersión	Temperatura de Inmersión	Observaciones
6	SI	SI	SI	2 [min.]	800 [°C]	El metal fundido no se adhiere homogéneamente al metal base
7	SI	SI	SI	10 [min.]	800 [°C]	El espesor del recubrimiento en el metal base es notablemente más grueso

De acuerdo a los resultados de las pruebas realizadas, se concluyen los tiempos de inmersión, así como las temperaturas más adecuados para recubrir las probetas.

Para el aluminio se obtiene que la inmersión más adecuada es por un periodo de 5 minutos a una temperatura de 800 [°C], mientras que para el zinalco el periodo de inmersión es de 5 minutos a una temperatura de 600 [°C.]

Después de obtener los tiempos de inmersión y las temperaturas adecuadas, se recubren las probetas de acero con zinalco y aluminio, que se utilizarán en los diferentes procesos que se van a analizar.

5.8.- Pruebas Efectuadas a las Probetas Recubiertas.

Las pruebas que se realizaron a las probetas recubiertas con zinalco y aluminio fueron las siguientes.

1.- Recocido. Variación del tiempo de recocido desde 1 hasta 5 horas manteniendo la temperatura constante.

En este caso el periodo de tiempo fue aplicado hasta 5 horas porque se ha estudiado que el zinalco presenta cambios microestructurales solo cuando está expuesto a períodos prolongados de permanencia a temperaturas de recocido.

2.- Laminación con reducciones de 20% y 40%. La finalidad en éste caso es lograr un mejor acabado superficial al laminar las piezas, por lo cual se aplicaron niveles bajos de deformación.

3.- Laminación y recocido. En algunas probetas se aplicó una combinación de laminación al 20 y 40% de reducción, y posteriormente un recocido a la temperatura predeterminada, con la finalidad de determinar si el recocido posterior a la laminación elimina los efectos de la deformación, como son grietas y fisuras, a la vez de homogeneizar la microestructura.

4.- Dureza. La última prueba consistió en obtener las microdurezas de las distintas probetas en sus diferentes zonas, con objeto de relacionarlas con las microestructuras presentes y obtener una caracterización final.

5.8.1.- Prueba de Recocido.

Consistió en efectuar un recocido a las temperaturas correspondientes de acuerdo al diagrama de equilibrio en cada caso, siendo ésta de 550 [°C] para las probetas de aluminio y de 350 [°C] para las de zinalco, durante los siguientes periodos:

- 1 hora
- 2 horas
- 3 horas
- 4 horas
- 5 horas

5.8.2.- Prueba de Laminación.

Consistió en laminar las probetas con un precalentamiento de 550 y 350 [°C] respectivamente, durante un periodo de 5 minutos (ésto con objeto de disminuir el riesgo de fracturas).

Los porcentajes de reducción son:

- 20% de Reducción
- 40% de Reducción

5.8.3.- Prueba de Laminación y Recocido.

Ésta prueba consistió en usar diversos tiempos de recocido de las probetas de la primera prueba (es decir, aquellos con los que se obtienen la mejores características de recubrimiento) para recocer las probetas que se laminaron en la segunda prueba y observar lo que sucede.

5.8.4.- Resumen de las Pruebas Realizadas.

A continuación se muestran las tablas que resumen los ensayos realizados.

Tabla 5.3 Resumen de Actividades Realizadas a las Probetas de Zinalquizado.

Probeta No.	Limpieza mecánica	Decapado	Act. de la Sup.	Tiempo de Inmersión	Temperatura de Inmersión	Temperatura de recocido	Porcentaje de laminación	Tiempo de recocido
127	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	****	****	****
127A	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	350 [°C]	****	1 HORA
127B	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	350 [°C]	****	2 HORAS
127C	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	350 [°C]	****	3 HORAS
127D	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	350 [°C]	****	4 HORAS
127E	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	350 [°C]	****	5 HORAS
111A	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	****	20%	****
111B	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	****	40%	****
111A1	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	350 [°C]	20%	2 HORAS
111B1	SI	SI	SI	5 [min.]	600 [°C]	350 [°C]	40%	2 HORAS

Tabla 5.4 Resumen de Actividades Realizadas a las Probetas Aluminizadas.

Probeta No.	Limpieza mecánica	Decapado	Act. de la Sup.	Tiempo de Inmersión	Temperatura de Inmersión	Temperatura de recocido	Porcentaje de laminación	Tiempo de recocido
31	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	****	****	****
37A	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	550 [°C]	****	1 HORA
37B	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	550 [°C]	****	2 HORAS
37C	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	550 [°C]	****	3 HORAS
37D	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	550 [°C]	****	4 HORAS
37E	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	550 [°C]	****	5 HORAS
46A	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	****	20%	****
46B	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	****	40%	****
46A1	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	550 [°C]	20%	2 HORAS
46B1	SI	SI	SI	5 [min.]	800 [°C]	550 [°C]	40%	2 HORAS

5.9.- Preparación de las Muestras para su Observación en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Corte: cada una de las probetas son cortadas de tal manera que no sea deformada la superficie de corte y no se eleve demasiado la temperatura de la muestra, ya que se tendría el riesgo de modificar su microestructura. El corte puede realizarse de forma manual o con disco abrasivo.

Montaje: el montaje consiste en envolver la muestra en algún material que pueda moldearse y luego endurecerse, de tal manera que resulte una forma y tamaño apropiados para una buena sujeción y un manejo adecuado. El material para el montaje de la muestra es en éste caso una resina que debe ser conductora para que facilite la observación en el microscopio electrónico de barrido.

Desbaste: el desbaste se hace con el propósito de preparar la superficie de la muestra a analizar, dejándola libre de rugosidad, incluyendo un rayado fino y uniforme que facilite la operación de pulido.

El procedimiento consiste en desbastar con la lija 180 hasta que desaparecen las rayas del esmeril, se enjuaga y cambia la lija a la de 220, girando la muestra 90 grados antes de comenzar a lijar. Se efectúa el mismo procedimiento con las lijas 360, 400, 500 y 600 respectivamente, a manera de ir afinando la superficie.

Pulido: el objeto del pulido es obtener una superficie lisa y un acabado de espejo libre de rayas, para asegurar una observación óptima en el microscopio de la microestructura de la muestra. El pulido se realiza con polvos de alúmina hasta obtener una superficie lisa y reflejante como la de un espejo.

Ataque químico: el ataque se realiza para que en la muestra se hagan visibles sus características estructurales.

Cuando se observa al microscopio una muestra metálica que haya sido pulida y atacada, se revelan el tamaño y tipo de inclusiones no metálicas, la cantidad y tamaño de micro-poros y micro-grietas, y (si las hay) las fases existentes, formas y distribución de las mismas, tamaño de grano, etc.

Las piezas recubiertas con aluminio fueron atacadas con los siguientes reactivos para obtener la mejor calidad de ataque.³

³ Howard. E Boyer, Timothy L. Gall. Metal Handbook, Metallographic Technique for Nonferrous Metals and Special-Purpose Alloys, Desk Edition 7ª ed., American Society For Metals, USA 1992, Pagina 35-51

Primer Reactivo

Composición química

- 2 ml Ácido Fluorhídrico al 48% (HF)
- 3 ml Ácido Clorhídrico Concentrado (HCl)
- 20 ml Ácido Nítrico Concentrado (HNO₃)
- 175 ml agua

Se mezcla estas soluciones y una vez obtenido el reactivo, se colocan unas gotas en la superficie del metal que se va observar, durante un periodo de entre 10 y 60 segundos, se enjuaga con agua fría y se limpia con un paño seco, no se permite el calentamiento de la superficie. si es necesario se repite la operación por otro periodo de tiempo.

Segundo Reactivo (consta de 2 reactivos)

Composición química del Reactivo A

- 1 parte de Ácido Fluorhídrico al 48% (HF)
- 12 partes de Ácido Clorhídrico Concentrado (HCl)
- 6 partes de Ácido Nítrico Concentrado (HNO₃)
- 1 parte de agua

Composición química del reactivo B

- 25 ml Ácido Nítrico Concentrado (HNO₃)
- 40 ml de la solución compuesta por
 - ✓ 3 g de Ácido Crómico
 - ✓ 10 ml agua

Se prepara el reactivo A en un vaso de precipitado con dichas soluciones, de tal forma que se obtengan 50 ml del mismo, para preparar el reactivo B; se coloca en otro vaso de precipitado 25 ml de ácido nítrico concentrado, mientras que en un tercer vaso de precipitado se hace la mezcla del ácido crómico con agua, con las proporciones arriba mencionadas, de tal forma que se obtengan una solución final de 40 ml, dicha solución se mezcla con los 25 ml de ácido nítrico para obtener el reactivo B. Una vez obtenido reactivo B y el reactivo A se mezclan ambos para obtener el reactivo final.

Una vez obtenido el reactivo final se ponen unas gotas sobre la superficie que se desea observar durante un periodo de 1 a 4 minutos, se lava y se limpia con un paño seco, obsérvese al microscopio. Repítase la operación de ser necesario.

El reactivo que se utilizó finalmente para observar las muestras fue el primero, el cual nos dio una buena claridad de las tres fases existentes (metal base, intermetálico y el

recubrimiento), mientras que el segundo reactivo ocasionó un ataque concentrado provocando que el material se cubriera de porosidades.

Para el zinalco se utilizó una solución de nital al 2%

Composición química

- 2 ml de ácido nítrico
- 98 ml de alcohol

En éste caso se sumerge la superficie en el reactivo aproximadamente 5 segundos, después se enjuaga con agua y se seca con ayuda de una pistola de aire.

Una vez atacadas las muestras se procedió a observarlas en el microscopio electrónico de barrido y se tomaron fotos de las fases que se encuentran presentes, así como de las posibles imperfecciones que existen en el recubrimiento. Además con ayuda del microscopio se efectuaron análisis químicos para determinar el comportamiento de los elementos que se encuentran en los diferentes recubrimientos.

5.9.1.- Fundamentos de la Técnica de Utilización del Microscopio Electrónico de Barrido.

Un microscopio electrónico de barrido acoplado a un analizador de rayos X por dispersión de energías es un sistema analítico diseñado para la visualización y análisis de muestras microscópicas o de características microscópicas de las muestras. No obstante, los aumentos mínimos del microscopio, en torno a 10X, permiten una visualización y análisis que podríamos denominar macroscópicos ya que en este caso se trata de una zona de la superficie de la muestra de varios mm².

La preparación de la muestra es, en general, sencilla. Los requisitos indispensables que deben cumplir son ausencia de líquidos, es decir, la muestra tiene que estar seca y además debe ser conductora de la corriente eléctrica. Este requisito se cumple en los metales pero no así en otro tipo de materiales, por lo que para hacer a la muestra conductora se recubre de una capa de algún material conductor tal como oro o grafito. Este recubrimiento ha de ser suficientemente grueso como para que circule la corriente eléctrica que se deposita en la muestra y suficientemente delgado para que no enmascare o tape las características superficiales de interés.

La técnica consiste esencialmente en hacer incidir en la muestra un haz de electrones. Éste bombardeo de electrones provoca la aparición de diferentes señales que

captadas con detectores adecuados, nos proporcionan información acerca de la naturaleza de la muestra.

Vemos en la figura 5.1 algunas de las señales que se utilizan en diferentes técnicas. No suele ser habitual que un mismo microscopio esté equipado con los detectores necesarios para utilizar todas estas señales. En nuestro caso, el equipo dispone de los tres detectores más comunes, que son el de electrones secundarios, el de retrodispersados y el de Rayos X.

La señal de electrones secundarios proporciona una imagen de la morfología superficial de la muestra. La señal de retrodispersados una imagen cualitativa de zonas con distinto número atómico medio, y la señal de rayos X espectros e imágenes acerca de la composición de los elementos químicos en la muestra.

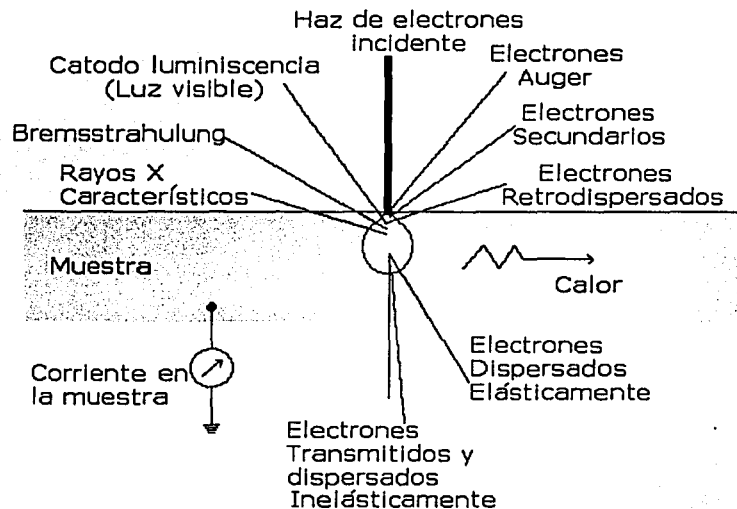


Figura 5.1 Algunas señales que se utilizan en diferentes técnicas en microscopio electrónico de barrido

5.10.- Ensayo de Microdureza Vickers.

Es una prueba que se realiza con ayuda de un microscopio el cual consta de un sistema que trabaja aplicando una carga determinada. En una platina se coloca la muestra, la cual se somete a una indentación por medio de una punta de diamante. La huella alojada sobre la muestra tiene la forma de un rombo. Una vez que la huella se ha impreso se procede a medir la longitud de las diagonales que se observan a través del microscopio integrado en el equipo, donde los oculares están provistos de una retícula para su medición.

Conforme a la escala indicada en μm y de acuerdo la carga utilizada, los valores se convierten a dureza Vickers.

5.10.1.- Tablas de Resumen de la Dureza Vickers Obtenidas en las Diferentes Muestras Analizadas.

A continuación se tomaron durezas de las diferentes zonas observadas en cada una de las probetas, con la siguiente metodología:

Se realizaron 5 lecturas aplicando una carga de 100 [gf] en cada una de las zonas presentes en cada muestra, de las cuales se elimina la mayor y la menor y se obtiene un promedio de las tres restantes. Los resultados se indican en las siguientes tablas:

Tabla 5.5 Microdureza Vickers de las Muestras con Recubrimiento de Zinalco.

Probeta No.	Zona	DUREZA					
		Lectura1	Lectura2	Lectura3	Lectura4	Lectura5	Promedio
127	Metal base	228	237	238	245	217	234.33
	Intermetálico	464	186	319	357	322	332.66
	Recubrimiento exterior	137	206	142	140	173	151.66
127A	Metal base	221	182	179	213	193	294.00
	Intermetálico	116	139	143	105	107	120.66
	Recubrimiento exterior	150	172	167	163	145	160.00
127B	Metal base	203	217	189	194	212	203.00
	Intermetálico	450	213	380	336	357	357.66
	Recubrimiento exterior	151	119	149	130	117	132.66
127C	Metal base	274	193	221	245	224	230.00
	Intermetálico	237	254	264	240	270	252.66
	Recubrimiento exterior	176	181	160	162	151	166.00
127D	Metal base	219	245	240	215	228	229.00
	Intermetálico	179	302	464	309	319	310.00
	Recubrimiento exterior	174	187	228	135	238	196.33
127E	Metal base	156	222	181	216	153	184.33
	Intermetálico	363	304	336	297	351	330.33
	Recubrimiento exterior	146	192	144	146	195	161.33
111A	Metal base	182	237	206	188	240	210.33
	Intermetálico	237	101	105	116	112	111.00
	Recubrimiento exterior	87.6	97.1	110	85.8	112	98.23
111B	Metal base	189	193	251	206	256	216.66
	Intermetálico	193	186	139	165	194	181.33
	Recubrimiento exterior	100	110	97.1	111	104	104.66
111A1	Metal base	193	192	215	228	237	212.00
	Intermetálico	116	113	120	138	145	124.66
	Recubrimiento exterior	167	137	128	126	131	132.00
111B1	Metal base	203	206	188	209	201	203.33
	Intermetálico	124	116	142	133	140	132.33
	Recubrimiento exterior	110	121	132	133	140	128.66

Tabla 5.5 Microdureza Vickers de las Muestras con Recubrimiento de Aluminio.

Probeta No.	Zona	DUREZA					Promedio
		Lectura1	Lectura2	Lectura3	Lectura4	Lectura5	
31	Metal base	207	237	186	219	222	216.00
	Intermetálico	230	272	203	168	181	204.66
	Recubrimiento exterior	51.1	41.7	48.4	45.7	50.2	48.10
37A	Metal base	206	198	187	185	189	191.33
	Intermetálico	169	283	380	272	283	279.33
	Recubrimiento exterior	51.5	46.6	46.0	48.4	56.9	48.83
37B	Metal base	183	186	181	180	199	183.33
	Intermetálico	322	209	256	336	464	304.66
	Recubrimiento exterior	71.3	64.1	58.5	75.7	46.0	64.63
37C	Metal base	116	133	138	143	123	131.33
	Intermetálico	212	274	228	266	322	256.00
	Recubrimiento exterior	40.9	46.4	51.5	36.7	34.6	41.33
37D	Metal base	254	172	180	173	215	189.33
	Intermetálico	221	309	254	287	325	283.33
	Recubrimiento exterior	67.8	93.2	84.7	45.1	100	81.90
37E	Metal base	151	161	168	160	155	158.66
	Intermetálico	227	221	454	342	322	297.00
	Recubrimiento exterior	33.9	32.4	36.8	35.4	41.2	35.36
46A	Metal base	186	198	173	170	169	176.33
	Intermetálico	397	238	330	348	274	317.33
	Recubrimiento exterior	47.5	47.0	47.5	58.1	48.7	47.83
46B	Metal base	207	242	168	254	209	219.33
	Intermetálico	464	266	319	304	270	297.66
	Recubrimiento exterior	48.2	51.5	67.3	55.5	54.7	53.90
46A1	Metal base	151	180	213	140	169	166.66
	Intermetálico	363	370	311	401	216	348.00
	Recubrimiento exterior	29.0	31.4	28.2	29.0	28.3	28.76
46B1	Metal base	155	206	268	157	176	179.66
	Intermetálico	297	272	325	336	383	319.33
	Recubrimiento exterior	29.9	35.4	32.8	35.8	30.4	32.86

En el siguiente capítulo se realiza el análisis de cada una de las pruebas que en éste capítulo se mencionaron, para evaluar el comportamiento mecánico de las probetas revestidas.

CAPÍTULO VI

6.- PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1.- Introducción.

A continuación se presentan los resultados y el análisis correspondiente de las pruebas realizadas a las probetas recubiertas con zinalco y aluminio, con objeto de determinar las variaciones microestructurales y las fases que presentan estos recubrimientos al ser laminados y recocidos a fin de evaluar su comportamiento mecánico.

El análisis se realizará con ayuda de las fotografías y los análisis químicos obtenidos con el microscopio electrónico de barrido, así como de las lecturas de microdureza Vickers que se realizaron a las probetas en diferentes zonas.

6.2.- Presentación de Resultados.

6.2.1.- Microscopia Electrónica de Barrido.

Las probetas recubiertas se seccionaron tanto en dirección longitudinal como transversal, para obtener algunas muestras, las cuales se montaron en baquelita. Para obtener la calidad adecuada para ser vistas en el microscopio electrónico se efectuó a cada una de ellas un pulido mecánico progresivo con lijas de carburo de silicio desde el número 180 hasta el 600 y finalmente se les realizó un pulimento de acabado final con alúmina. Posteriormente fueron observadas y fotografiadas con el microscopio electrónico de barrido, con el fin de precisar sus características y evaluar la unión de los metales.

Cada una de las probetas ha sido tratada por medio de los siguientes procedimientos generales: Limpieza mecánica (esmerilado), decapado, activación de la superficie, tiempo de inmersión 5 [min] en el metal fundido, temperatura de inmersión 600 [°C] para las de zinalco y 800 [°C] para las de aluminio, y enfriamiento al medio ambiente.

Las fotografías obtenidas de los diferentes recubrimientos se muestran a continuación

6.2.1.1.- Probetas de Zinalco.

Probeta 127 Característica adicional ninguna.



FIGURA 6.1 VISTA GENERAL DE LA PROBETA SOLO INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO

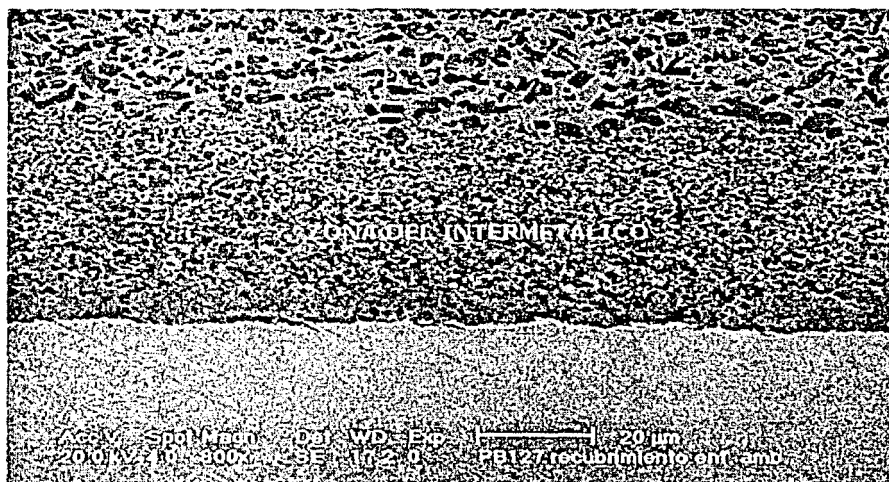


FIGURA 6.2 VISTA DEL INTERMETALICO Y DEL RECUBRIMIENTO DE LA PROBETA SOLO INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO

6.2.1.1.- Probetas de Zinalco.

Probeta 127 Característica adicional ninguna.



FIGURA 6.1 VISTA GENERAL DE LA PROBETA SOLO INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO

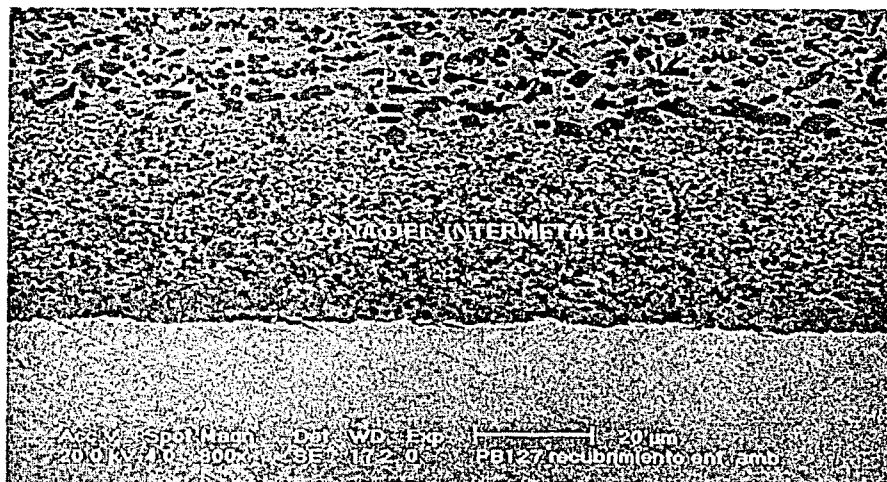


FIGURA 6.2 VISTA DEL INTERMETÁLICO Y DEL RECUBRIMIENTO DE LA PROBETA SOLO INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO

Probeta 127A Característica adicional recocida 1 hora

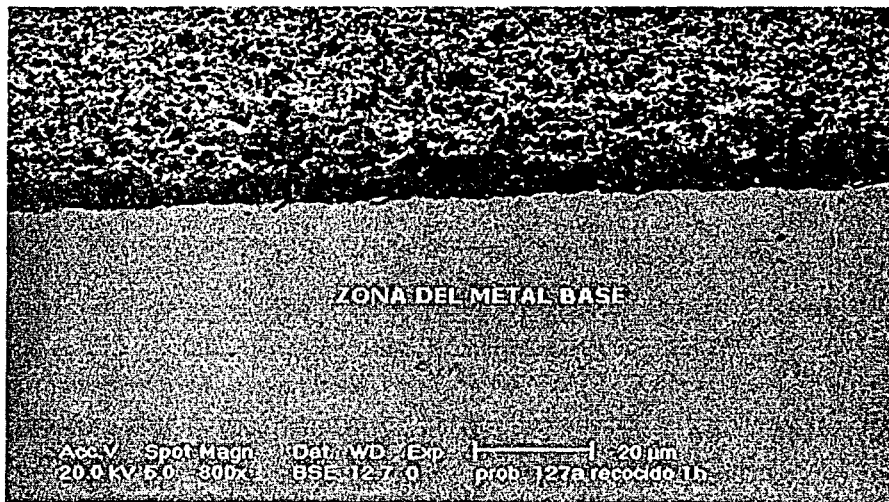


FIGURA 6.3 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA UNA HORA

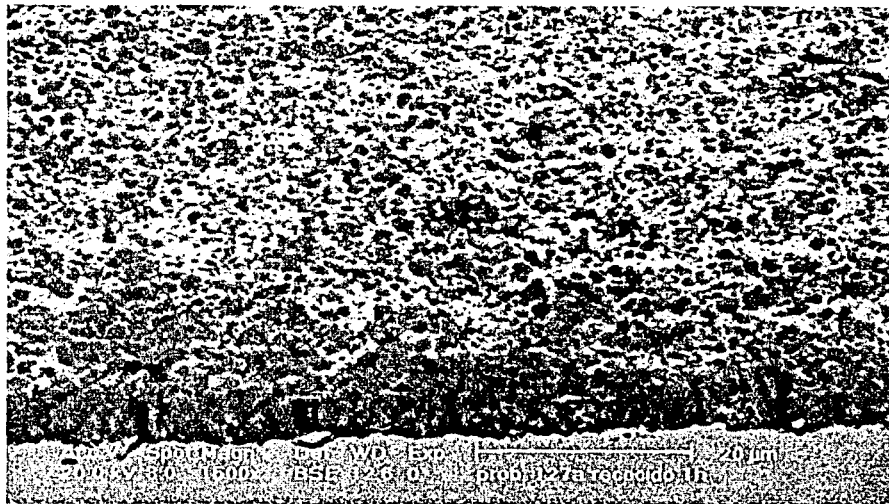


FIGURA 6.4 ACERCAMIENTO DE LAS ZONAS DE LA PROBETA RECOCIDA UNA HORA

Probeta 127B Característica adicional recocida 2 horas

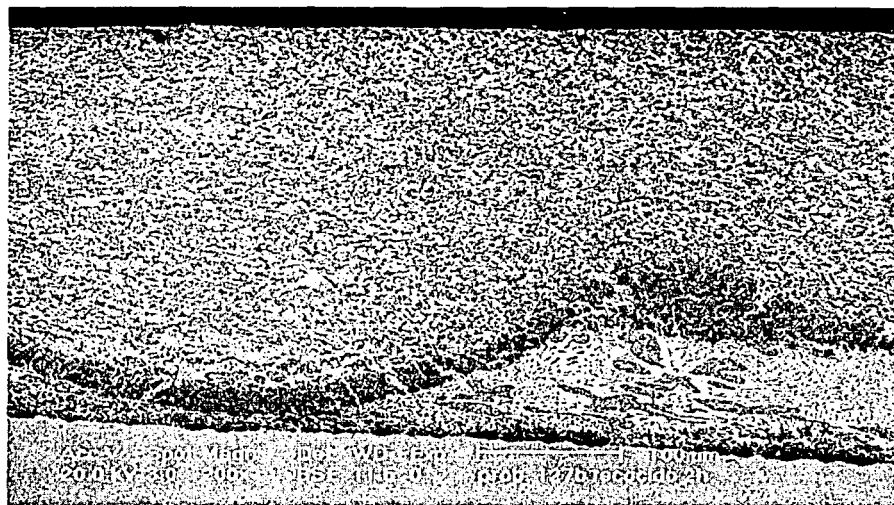


FIGURA 6.5 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA DOS HORAS

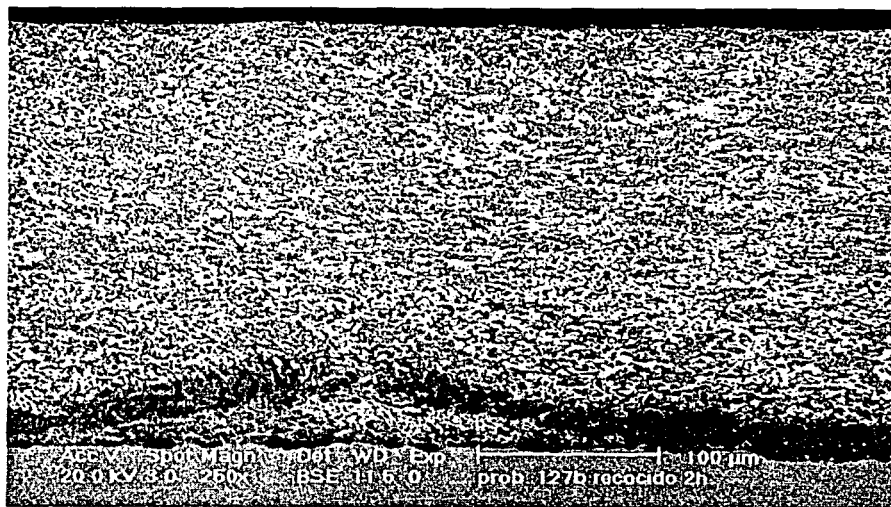


FIGURA 6.6 ACERCAMIENTO DEL INTERMETÁLICO EN LA PROBETA RECOCIDA DOS HORAS



FIGURA 6.7 VISTA DEL RECUBRIMIENTO EXTERIOR DE LA PROBETA RECOCIDA DOS HORAS

Label A: zona 2

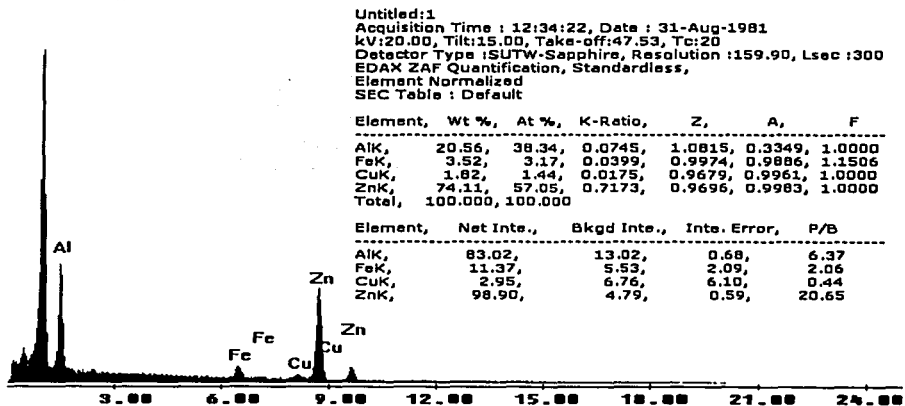


FIGURA 6.8 ANÁLISIS DE LA ZONA DEL RECUBRIMIENTO EXTERIOR DE LA PROBETA RECOCIDA DOS HORAS

Probeta 127C Característica adicional recocida 3 horas

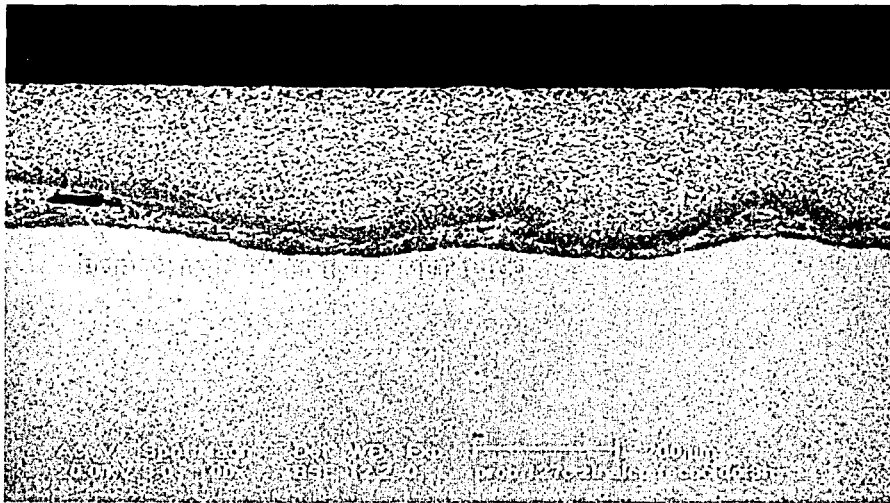


FIGURA 6.9 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA TRES HORAS

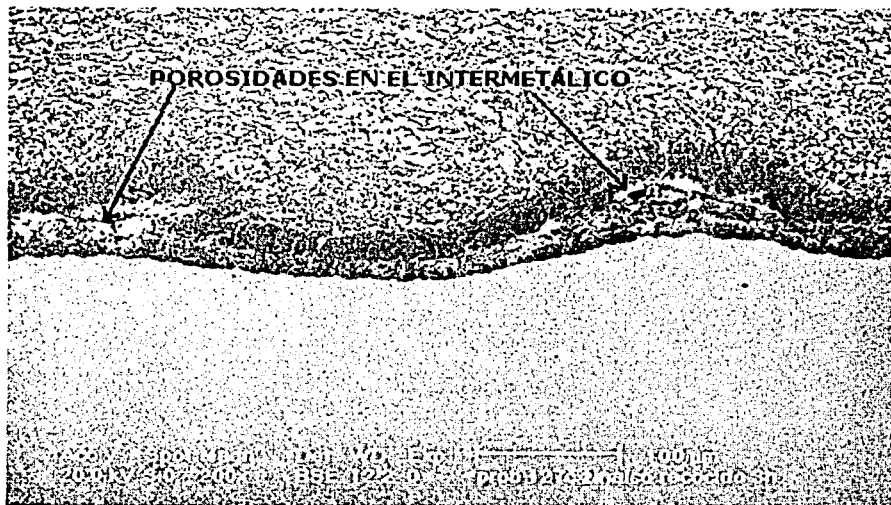


FIGURA 6.10 ACERCAMIENTO DE LAS POROSIDADES EXISTENTES EN EL INTERMETÁLICO DE LA PROBETA RECOCIDA TRES HORAS

Probeta 127D Característica adicional recocida 4 horas

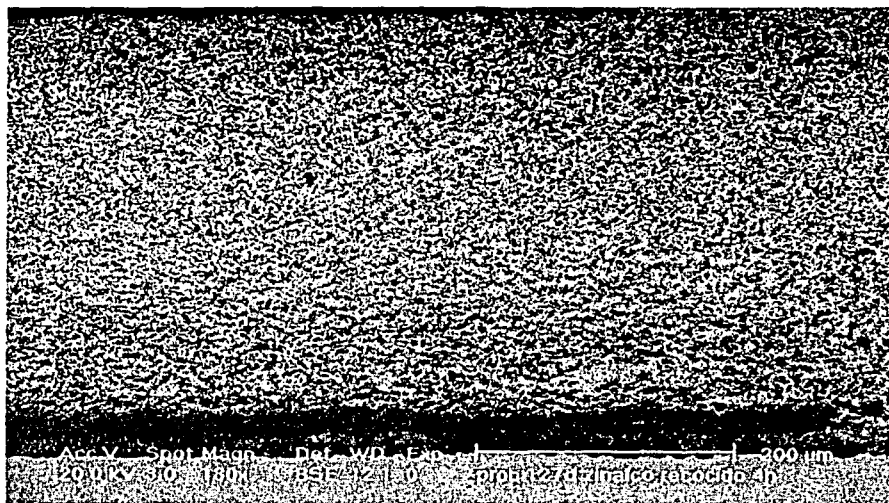


FIGURA 6.11 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA CUATRO HORAS

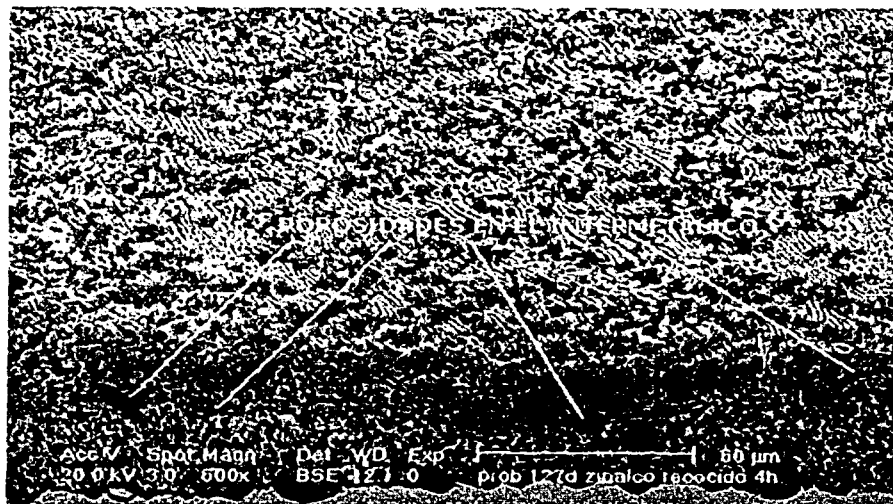


FIGURA 6.12 ACERCAMIENTO DE LAS POROSIDADES EN LAS DIFERENTES ZONAS DE LA PROBETA RECOCIDA CUATRO HORAS

Probeta 127E Característica adicional recocida 5 horas

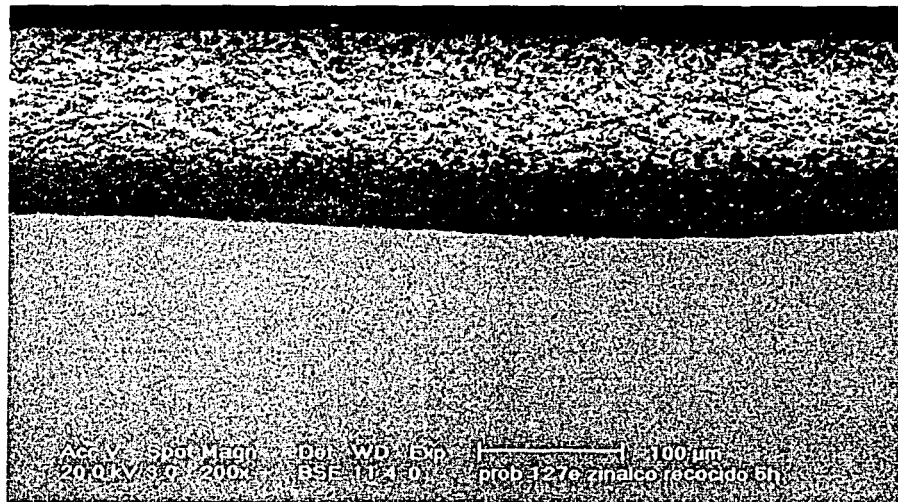


FIGURA 6.13 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA CINCO HORAS

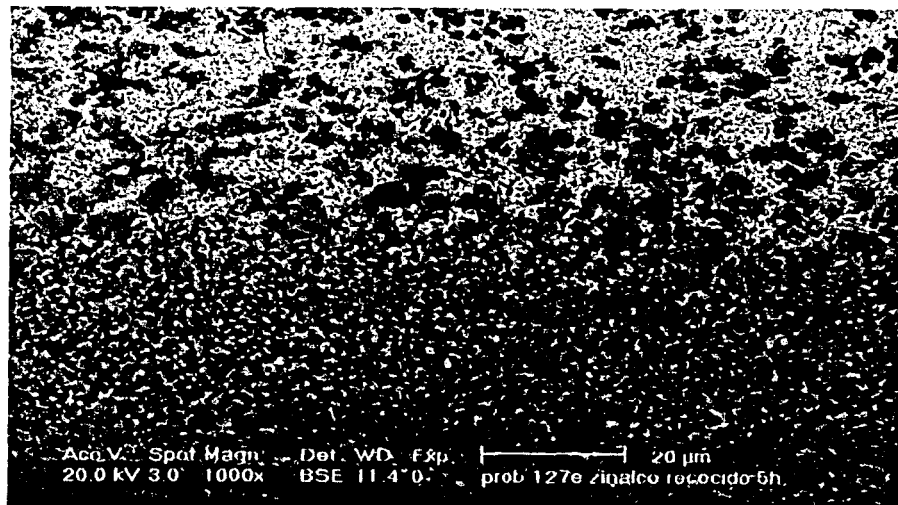


FIGURA 6.14 ACERCAMIENTO DEL INTERMETÁLICO DE LA PROBETA RECOCIDA CINCO HORAS

Probeta 111A Característica adicional laminada 20%

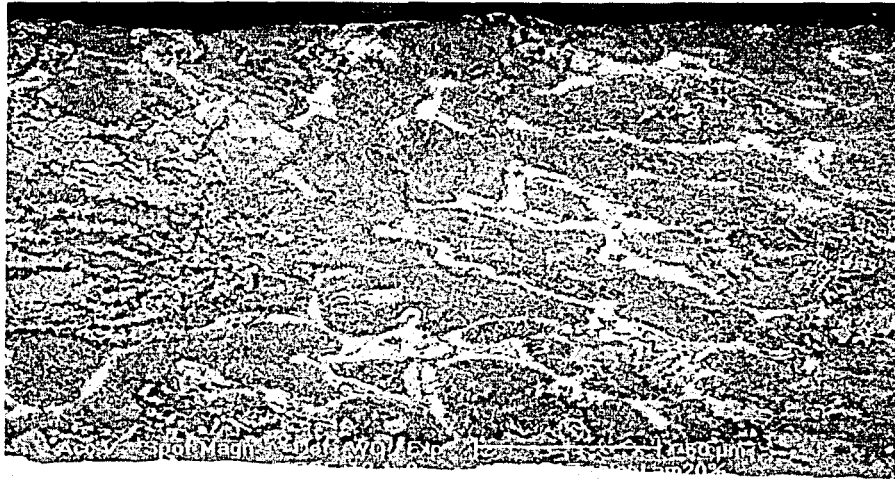


FIGURA 6.15 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 20%

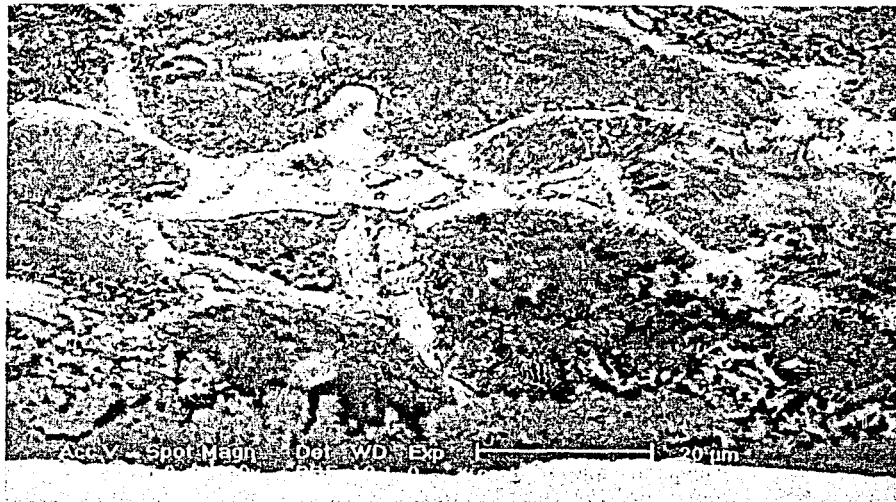


FIGURA 6.16 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 20%

Probeta 111B Característica adicional laminada 40%

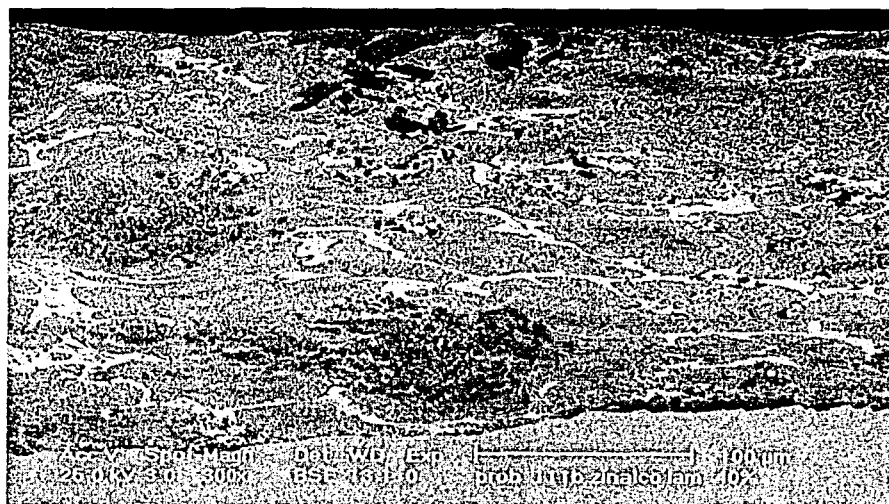


FIGURA 6.17 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 40%



FIGURA 6.18 ACERCAMIENTO DEL INTERMETALICO DE LA PROBETA LAMINADA 40%

Probeta 111A1 Característica adicional laminada 20% y recocida 2 horas

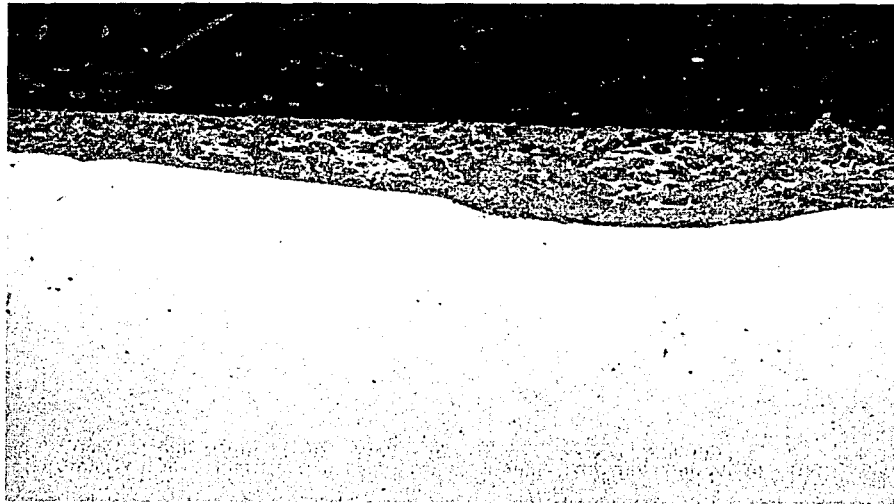


FIGURA 6.19 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 20% Y RECOCIDA 2 HORAS

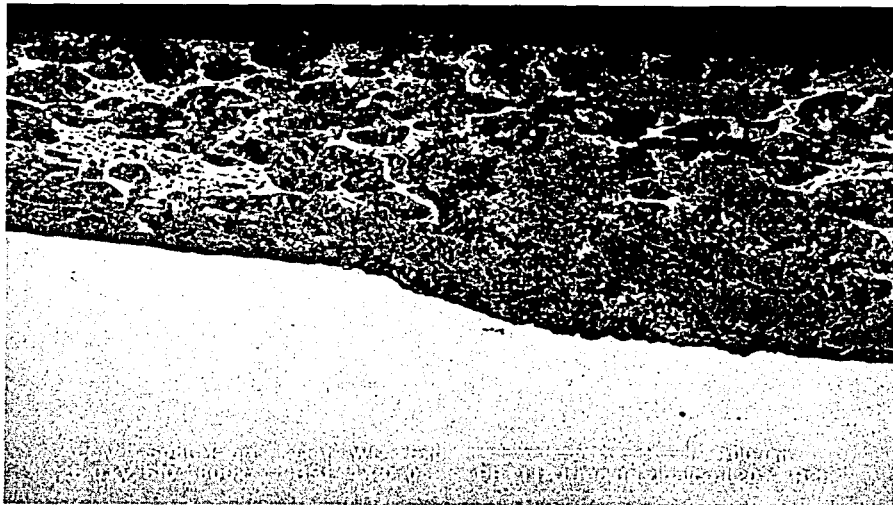


FIGURA 6.20 ACERCAMIENTO DEL INTERMETALICO DE LA PROBETA LAMINADA 20% Y RECOCIDA 2 HORAS

Probeta 111B1 Característica adicional laminada 40% y recocida 2 horas

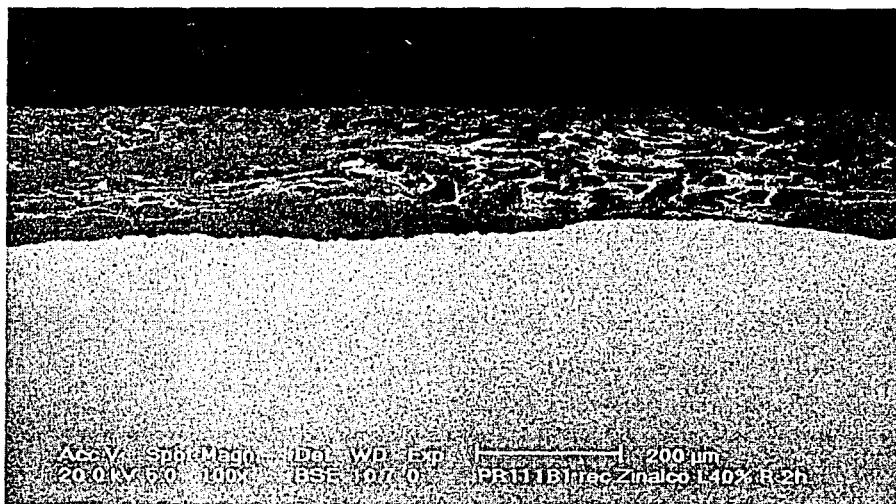


FIGURA 6.21 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 40% Y RECOCIDA 2 HORAS

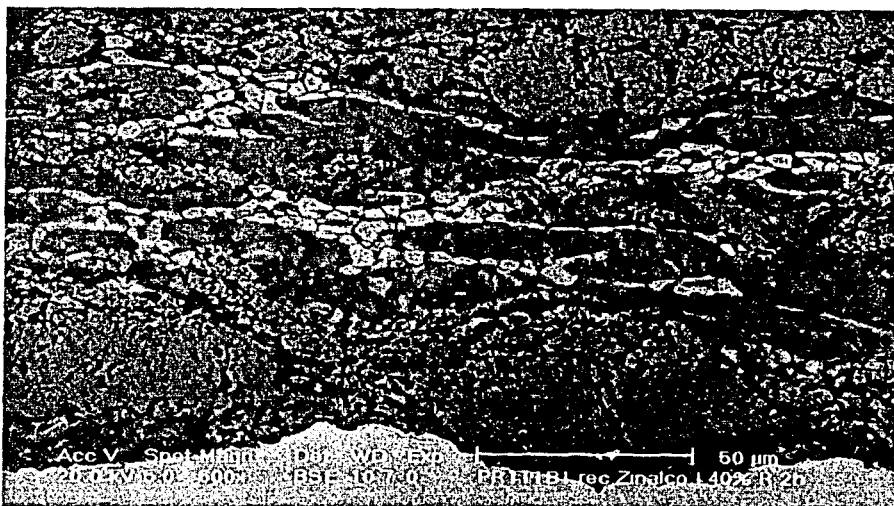


FIGURA 6.22 ACERCAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO E INTERMETALICO DE LA PROBETA LAMINADA 40% Y RECOCIDA 2 HORAS

6.2.1.2.- Probetas de Aluminio.

Probeta 31 característica adicional ninguna.



FIGURA 6.23 VISTA GENERAL DE LA PROBETA SOLO INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO



FIGURA 6.24 ACERCAMIENTO DEL INTERMETÁLICO DE LA PROBETA SOLO INMERSIÓN EN METAL FUNDIDO

Probeta 37A Característica adicional recocida 1 hora



FIGURA 6.25 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA UNA HORA

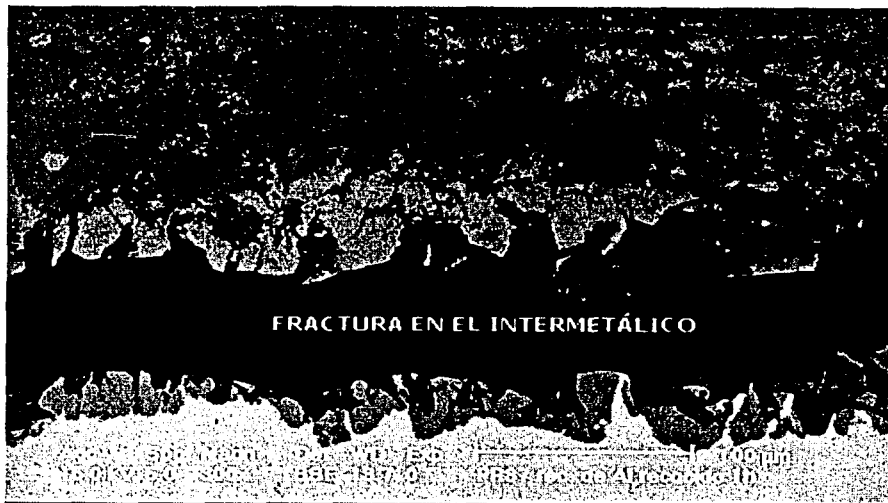


FIGURA 6.26 ACERCAMIENTO DE LA FRACTURA EN EL INTERMETÁLICO DEBIDO AL CORTE DE LA PROBETA RECOCIDA UNA HORA

Probeta 37B Característica adicional recocida 2 horas

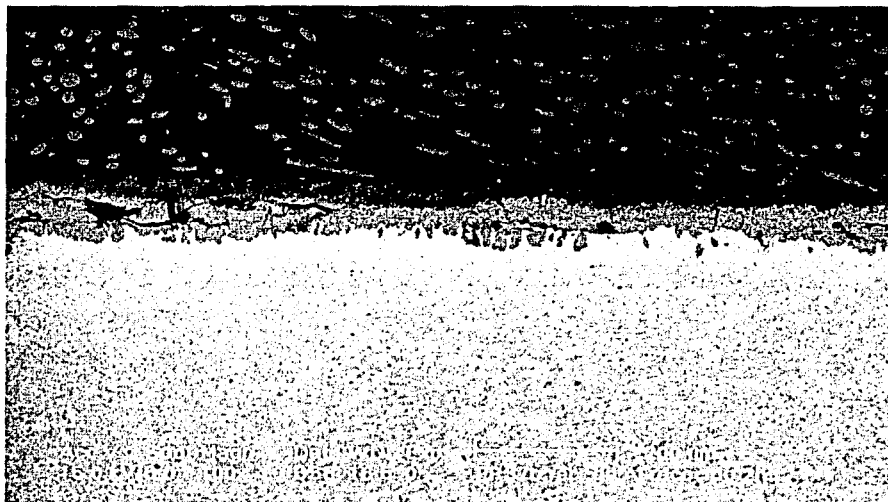


FIGURA 6.27 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA DOS HORAS

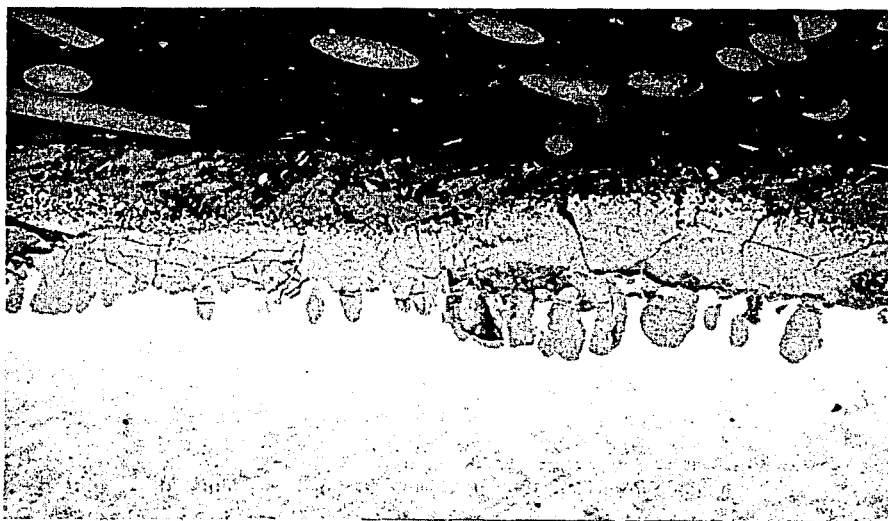


FIGURA 6.28 ACERCAMIENTO DEL INTERMETÁLICO DE LA PROBETA RECOCIDA DOS HORAS

Probeta 37C Característica adicional recocida 3 horas

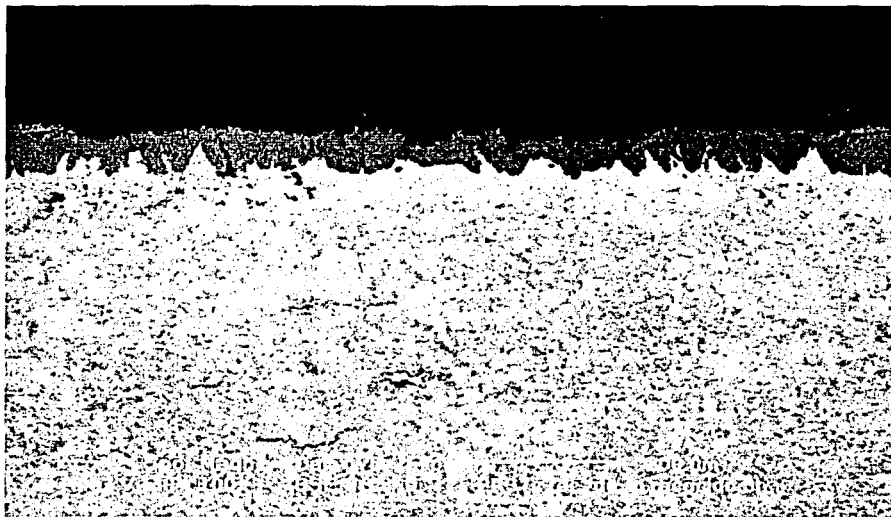


FIGURA 6.29 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA TRES HORAS



FIGURA 6.30 ACERCAMIENTO A LAS ESTRUCTURAS COLUMNARES DE LA PROBETA RECOCIDA TRES HORAS

Probeta 37D Característica adicional recocida 4 horas



FIGURA 6.31 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA CUATRO HORAS

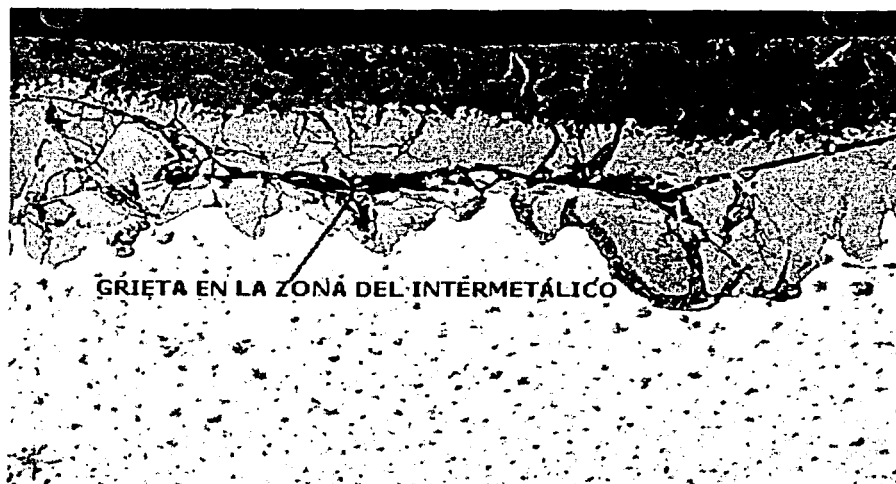


FIGURA 6.32 ACERCAMIENTO DE LAS GRIETAS EXISTENTES EN EL INTERMETÁLICO DE LA PROBETA RECOCIDA CUATRO HORAS

Probeta 37E Característica adicional recocida 5 horas



FIGURA 6.33 VISTA GENERAL DE LA PROBETA RECOCIDA CINCO HORAS



FIGURA 6.34 ACERCAMIENTO DE LAS GRIETAS EN EL INTERMETÁLICO DE LA PROBETA RECOCIDA CINCO HORAS

Probeta 46A Característica adicional laminada 20%

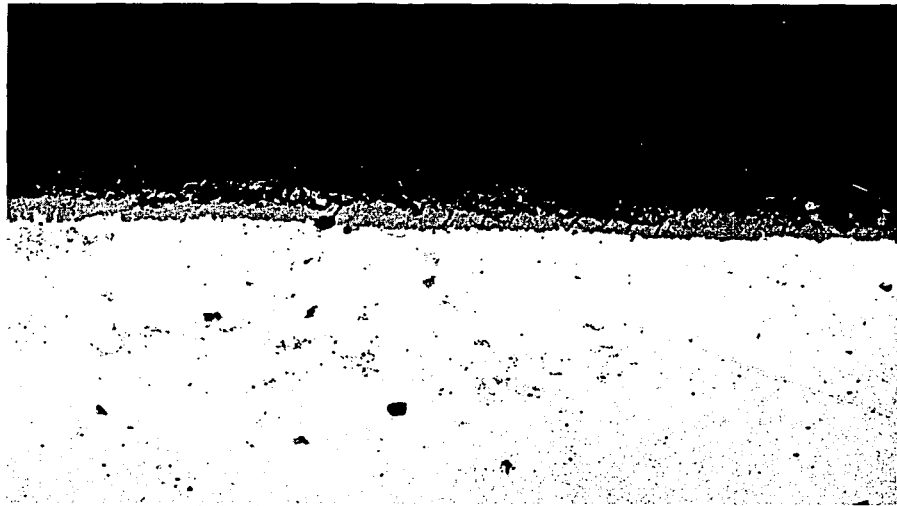


FIGURA 6.35 VISTE GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 20%



FIGURA 6.36 OBSERVACIÓN DE LAS GRIETAS EN EL RECUBRIMIENTO DE LA PROBETA LAMINADA 20%

Probeta 46B Característica adicional laminada 40%



FIGURA 6.37 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 40%



FIGURA 6.38 ACERCAMIENTO DE LAS GRIETAS DE LA PROBETA LAMINADA 40%

Probeta 46A1 Característica adicional laminada 20% y recocida 2 horas

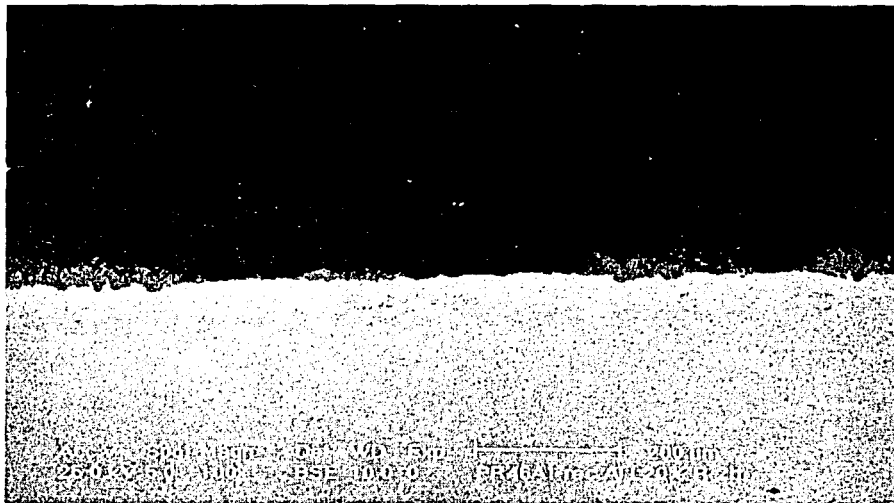


FIGURA 6.39 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 20% Y RECOCIDA 2 HORAS



FIGURA 6.40 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 20% Y RECOCIDA 2 HORAS

Probeta 46B1 Característica adicional laminada 40% y recocida 2 horas

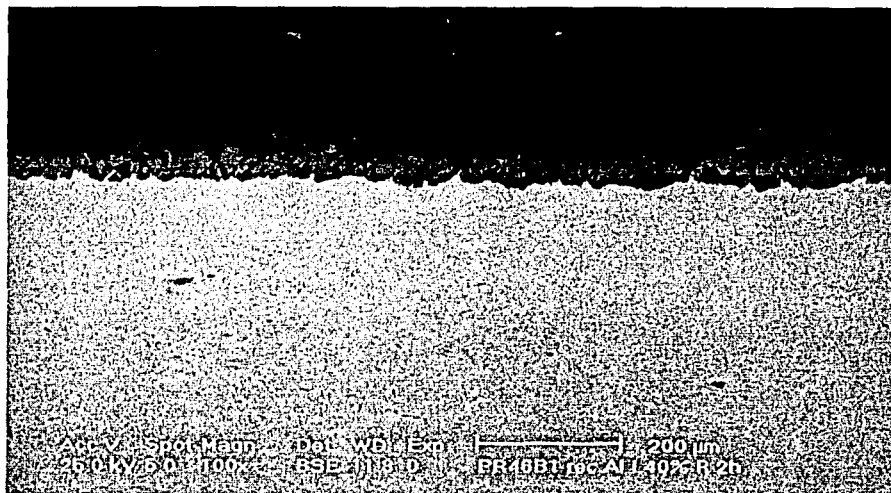


FIGURA 6.41 VISTA GENERAL DE LA PROBETA LAMINADA 40% Y RECOCIDA 2 HORAS

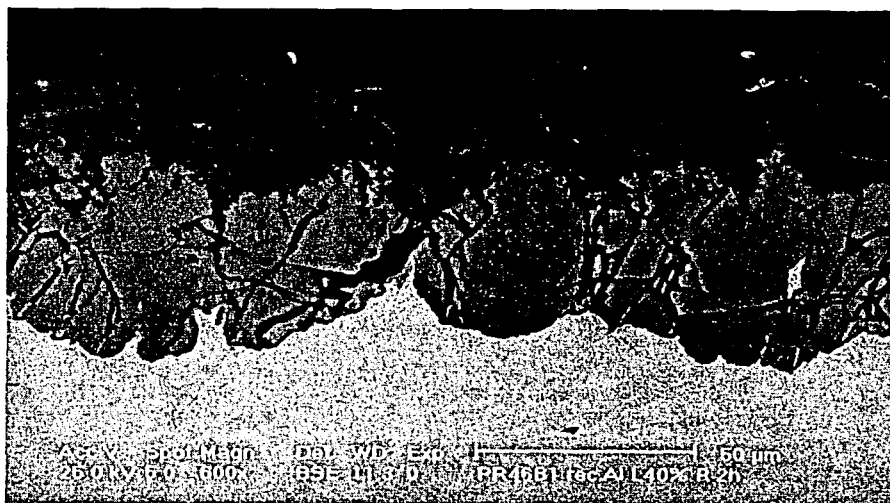
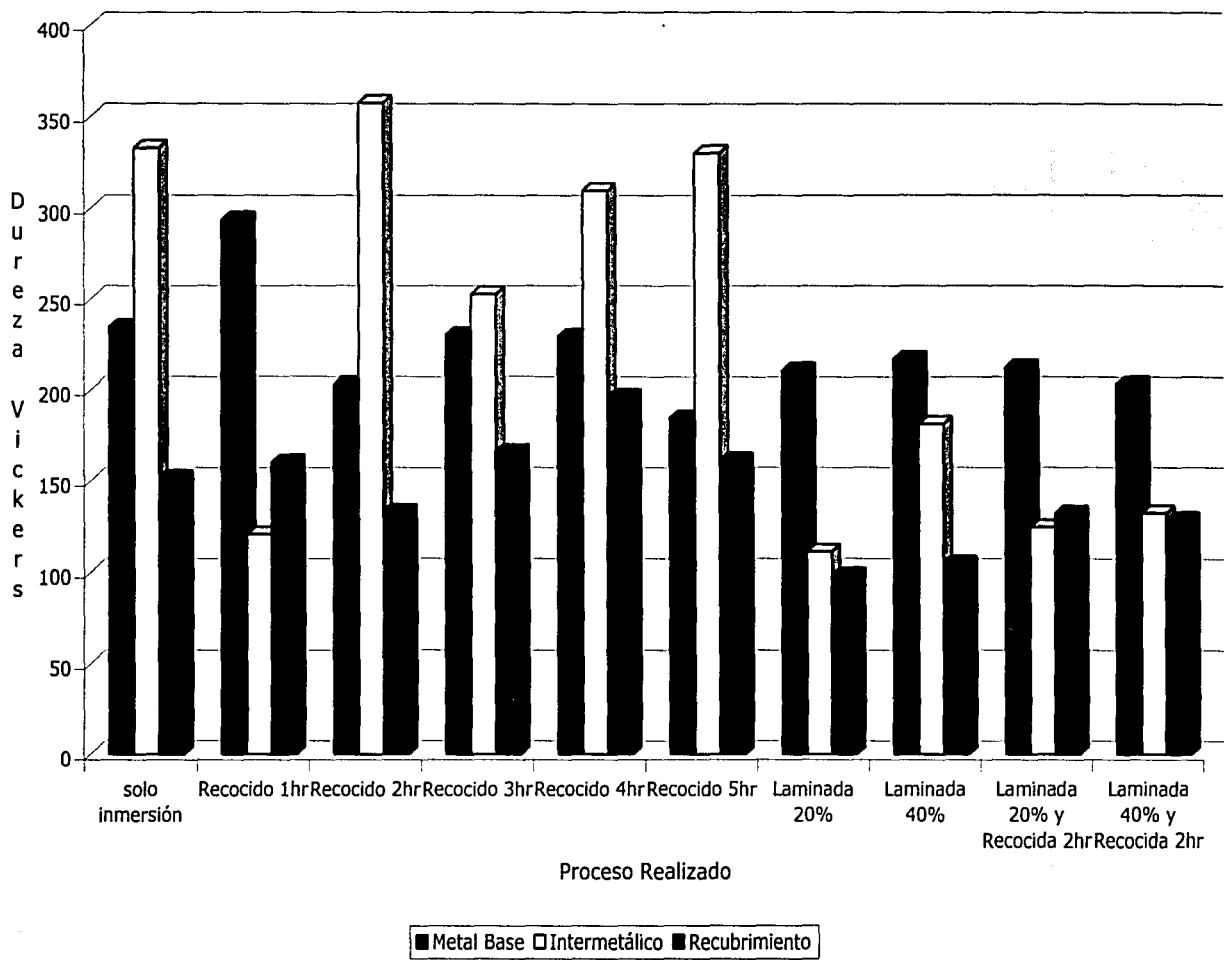


FIGURA 6.42 OBSERVACIÓN DE LOS AGRIETAMIENTOS DE LA PROBETA LAMINADA 40% Y RECOCIDA 2 HORAS

6.2.2.- Gráficas de la Variación de la Microdureza.

GRÁFICO 6.1 MUESTRA LA COMPARACIÓN DE LA MICRODUREZA EN LAS PROBETAS DE ZINALCO EN SUS DIFERENTES ZONAS



6.2.3.- Gráficas de la Variación de los Espesores en los Recubrimientos.

GRÁFICO 6.3 MUESTRA LA VARIACIÓN DE ESPESORES EN SUS DIFERENTES ZONAS DEL RECUBRIMIENTO DE ZINALCO

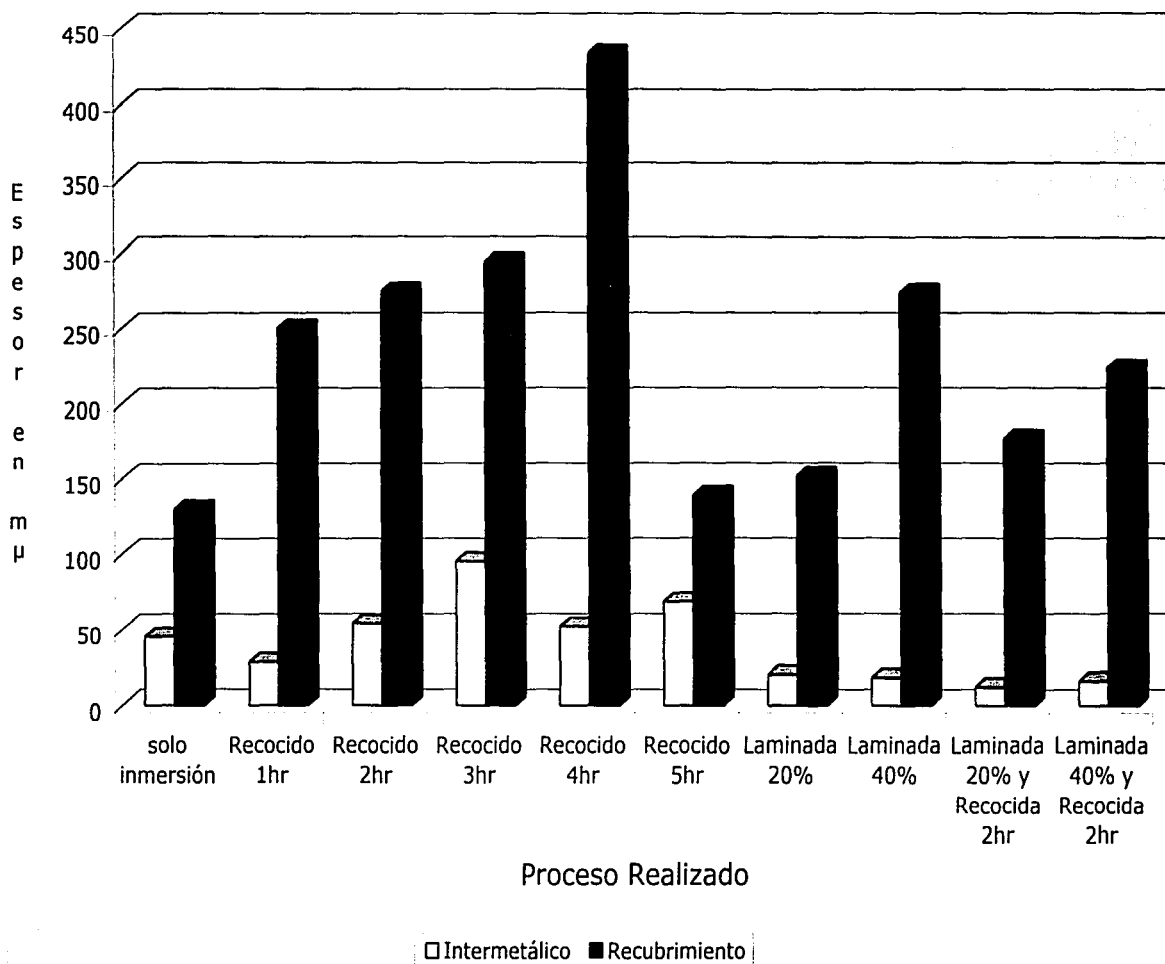


GRÁFICO 6.2 MUESTRA LA COMPARACIÓN DE LA MICRODUREZA EN LAS PROBETAS DE ALUMINIO EN SUS DIFERENTES ZONAS

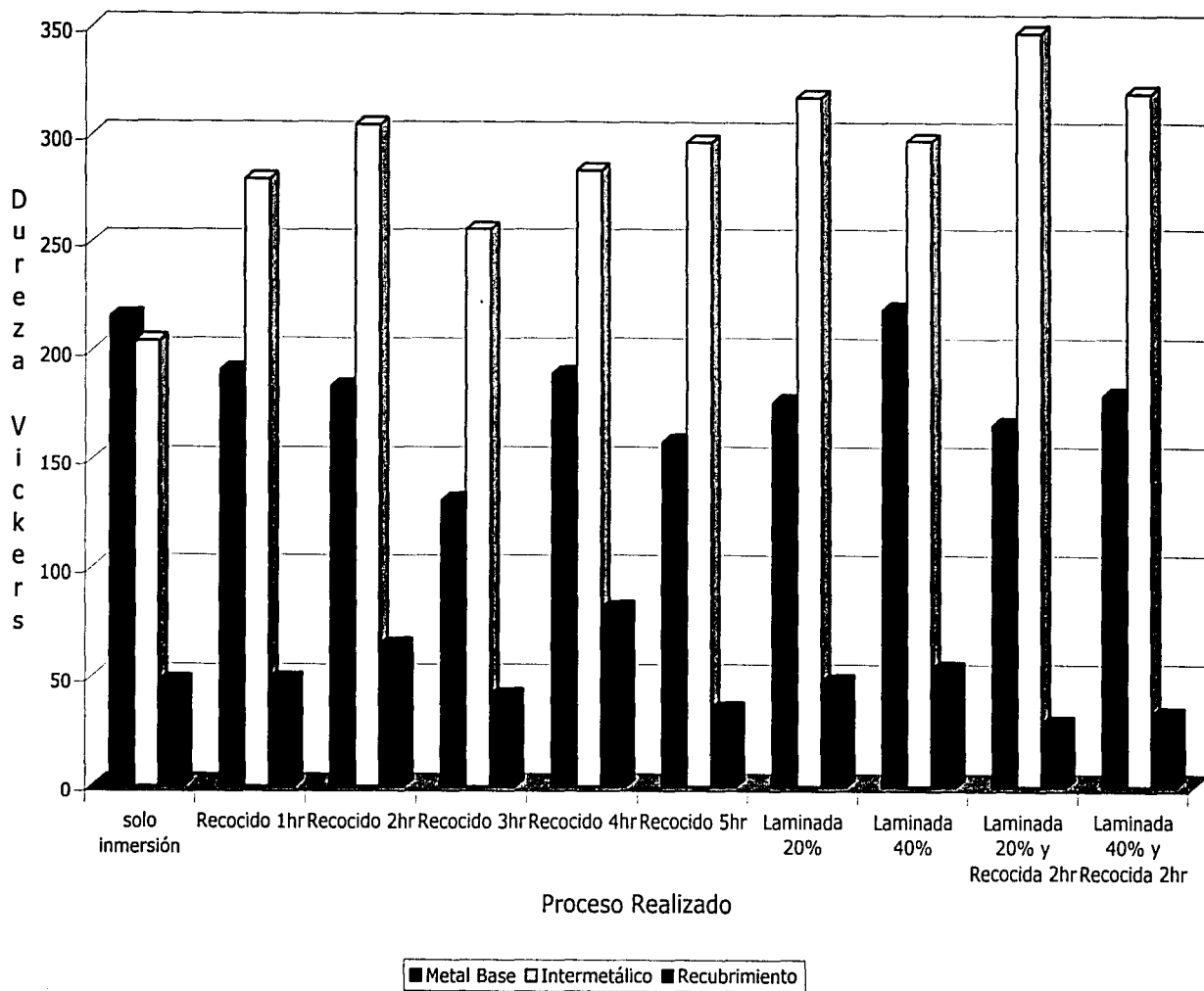
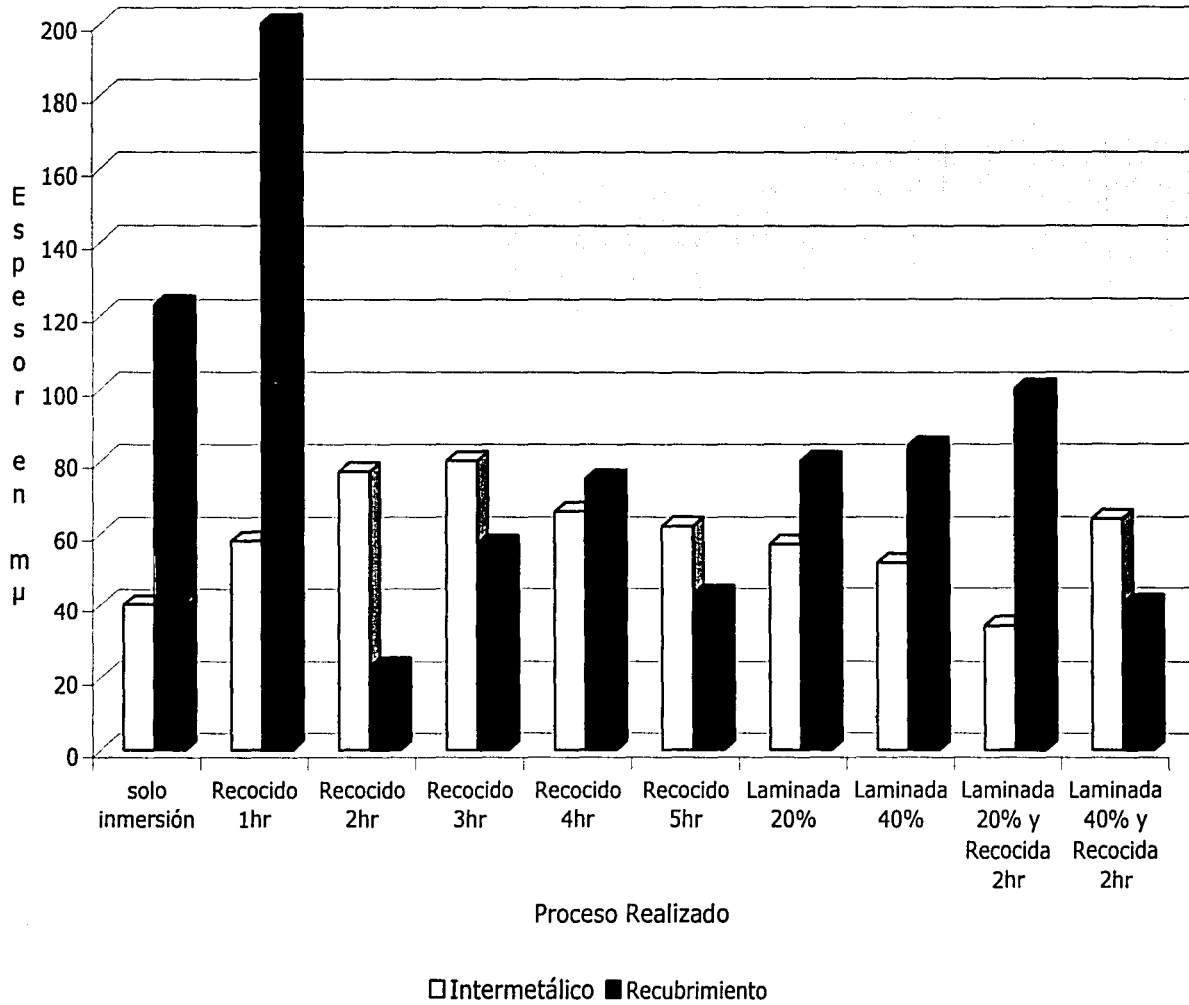


GRÁFICO 6.4 MUESTRA LA VARIACIÓN DE ESPESORES EN SUS DIFERENTES ZONAS DE LAS PROBETAS DE ALUMINIO



6.3.- Análisis de Resultados.

6.3.1.- Observaciones Generales de las Probetas de Zinalco.

Tabla 6.1 Observaciones Generales del zinalquizado.

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor en $m\mu$	Dureza Promedio Vickers	Composición Química Porcentaje de				Observaciones
					Zn	Al	Cu	Fe	
127	Inmersión en metal fundido	Metal base	----	234.33	0.37	0	---	99.63	Se aprecia la región correspondiente al acero perfectamente delimitada.
		Intermetálico	45	332.66	19.66	50.84	2.21	27.29	El espesor es homogéneo. La región se encuentra constituida por granos pequeños y compactados.
		Recubrimiento	130	151.66	81.00	10.35	---	8.65	Esta constituido por un porcentaje predominante de Zn y proporciones semejantes de Al y Fe. Los granos están bien definidos. El espesor de la zona es homogéneo.
127A	Recocido 1 hr.	Metal base	----	294.00	0.26	0.10	---	99.65	No se aprecian cambios en esta zona con respecto a la probeta anterior.
		Intermetálico	28	120.66	18.80	30.45	1.07	49.68	El espesor es menor que en el caso anterior, pero bastante homogéneo. Se presentan algunas grietas que avanzan perpendicularmente a la capa.
		Recubrimiento	250	160.00	77.75	14.54	---	7.71	Se observan granos bien consolidados, chicos y compactados se tiene gran presencia de Zn en los límites de grano.
127B	Recocido 2 hr.	Metal base	----	203.00	---	---	---	---	Semejante al metal base de la probeta 127.
		Intermetálico	64	357.66	12.57	52.80	0.15	34.47	Se nota un gran crecimiento en el intermetálico, se forman algunas formas geométricas debido a la difusión del aluminio contenido en esta zona hacia el metal base.
		Recubrimiento	275	132.66	74.11	20.56	1.82	3.52	Los granos están bien alineados y son pequeños, hay presencia de Zn en los límites de grano, se tienen algunas porosidades en el recubrimiento, su espesor es homogéneo.

Continuación de la Tabla 6.1

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor en μ	Dureza Promedio Vickers	Composición Química Porcentaje de				Observaciones
					Zn	Al	Cu	Fe	
127C	Recocido 3 hr.	Metal base	----	230.00	---	---	---	---	No se observan grandes cambios en esta zona respecto al metal base en las probetas anteriores.
		Intermetálico	95	252.66	20.96	38.66	.84	39.55	El espesor no es homogéneo. Se forman algunas ondulaciones debido a la difusión del aluminio contenido en esta zona hacia el recubrimiento, existen porosidades en esta zona y algunas cavidades.
		Recubrimiento	295	166.00	75.05	16.30	2.57	1.07	La microestructura está muy bien definida, los granos son pequeños y hay una gran presencia de Zn en sus límites, se tienen algunas pequeñas porosidades en la superficie del recubrimiento.
127D	Recocido 4 hr.	Metal base	----	229.00	---	---	---	---	Similar al metal base de las probetas anteriores.
		Intermetálico	52	310.00	---	---	---	---	El espesor es homogéneo, se concentran grandes cantidades de porosidades, cavidades y grietas.
		Recubrimiento	433	196.33	----	----	----	----	Es notable la presencia de porosidades en todo el recubrimiento.
127E	Recocido 5 hr.	Metal base	----	184.33	---	---	---	---	Similar al metal base de las probetas anteriores.
		Intermetálico	69	330.33	20.97	40.77	1.01	37.25	El espesor es muy homogéneo, hay una gran concentración de porosidades y se presentan cavidades cerca del metal base.
		Recubrimiento	139	161.33	71.42	18.73	2.8	7.05	Se puede observar granos pequeños con una gran cantidad de Zn en sus límites. Se encuentran algunas porosidades principalmente en la superficie.
111A	Laminada 20%	Metal base	----	210.33	---	---	---	---	Similar al metal base de las probetas anteriores.
		Intermetálico	20	111.00	7.68	52.60	0.74	38.98	Tiene un espesor pequeño pero homogéneo, se nota la difusión del aluminio existente en esta zona hacia el metal base, se notan algunas grietas muy pequeñas.
		Recubrimiento	152	98.23	84.84	7.78	---	7.31	Se tienen los granos muy bien definidos, grandes y alargados.

Continuación de la Tabla 6.1

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor en μ	Dureza Promedio Vickers	Composición Química Porcentaje de				Observaciones
					Zn	Al	Cu	Fe	
111B	Laminada 40%	Metal base	---	216.66	---	---	---	---	Similar al metal base de las probetas anteriores.
		Intermetálico	18	181.33	---	---	---	---	Se tiene un intermetálico muy delgado y en algunas zonas se puede observar que no hay intermetálico, se observan pocas grietas.
		Recubrimiento	274	104.66	---	---	---	---	Es notoria la deformación de los granos debido a la laminación. Se muestran granos grandes y alargados, contiene algunas pequeñas grietas principalmente en la zona más externa.
111A1	Laminada 20% Recocida 2 hr.	Metal base	---	212.00	---	---	---	---	No se observan cambios importantes en comparación con las otras muestras.
		Intermetálico	12	124.66	11.58	48.06	1.15	39.21	El intermetálico tiene un espesor muy pequeño el cual en algunos sitios desaparece, muestra algunas grietas causadas probablemente efecto de la laminación. La línea de unión con el metal base es muy irregular.
		Recubrimiento	178	132.00	55.30	41.59	2.38	0.73	Se tiene granos alargados y grandes, presenta zonas con trazas que contienen porcentajes casi iguales de Al y Zn.
111B1	Laminada 40% Recocida 2 hr.	Metal base	---	203.33	---	---	---	---	Similar al metal base de las probetas anteriores.
		Intermetálico	16	132.33	---	---	---	---	En algunas zonas ya no hay intermetálico, se encuentra un poco agrietado, hay algunas porosidades y las regiones de fases bien definidas.
		Recubrimiento	224	128.66	---	---	---	---	Hay granos alargados y grandes. Se encuentran muy bien diferenciados cada uno de los elementos, se tiene en gran parte del recubrimiento áreas constituidas principalmente por Al.

6.3.2.- Observaciones Generales de las Probetas de Aluminio.

Tabla 6.2 Observaciones Generales del Aluminizado.

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor en μ	Dureza Promedio Vickers	Composición Química Porcentaje de		Observaciones
					Al	Fe	
31	Inmersión en metal fundido	Metal base	----	216.00	0.52	99.48	Se observa la separación entre el metal base y la capa de aleación bien delimitada.
		Intermetálico	40	204.66	51.19	48.81	Se tiene un espesor homogéneo. Se muestran pequeñas grietas que van de la unión del recubrimiento con el intermetálico hacia el metal base. Los porcentajes de Al y Fe son muy semejantes.
		Recubrimiento	123	48.10	97.70	2.30	Su espesor es homogéneo. Presenta porosidades que inician en la superficie y se prolongan a la zona media del recubrimiento. Existe agrietamiento multidireccional.
37A	Recocido 1 hr.	Metal base	----	191.33	----	----	Muy semejante al metal base de la probeta anterior.
		Intermetálico	58	279.33	----	----	Se tiene un espesor homogéneo. Se muestran grietas en toda la zona y se observa una fractura probablemente ocasionada por el corte. Se muestra la difusión del aluminio hacia el metal base dando origen al comienzo de una estructura columnar.
		Recubrimiento	200	48.83	----	----	El espesor es homogéneo. Las porosidades han disminuido en cantidad respecto a la probeta anterior. Se muestra claramente como se forma el intermetálico por la difusión del Al hacia metal base.
37B	Recocido 2 hr.	Metal base	----	183.33	0.60	99.40	Se observan difusiones aisladas de aluminio hacia el metal base en forma de gruesos cristales columnares.
		Intermetálico	77	304.66	49.59	50.41	El espesor es variable. Existen áreas muy fracturadas, con grietas que van del recubrimiento hacia el metal base, se observan estructuras columnares bien definidas ocasionadas por la difusión del aluminio.
		Recubrimiento	23	64.63	95.17	4.83	Su espesor es comparativamente muy pequeño, se tienen muchas porosidades cercanas a la superficie, y se aprecian algunas grietas.

Continuación de la Tabla 6.2

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor en μ	Dureza Promedio Vickers	Composición Química Porcentaje de		Observaciones
					Al	Fe	
37C	Recocido 3 hr.	Metal base	----	131.33	0.46	99.54	Muy semejante al metal base de la probeta 31.
		Intermetálico	80	256.00	51.12	48.88	Disminuye la presencia de grietas en esta zona, las cuales van en diferentes direcciones, el espesor es homogéneo, hay algunas porosidades aisladas.
		Recubrimiento	57	41.33	96.14	3.86	Hay muchas porosidades en toda la región del recubrimiento, su espesor en general resulta homogéneo.
37D	Recocido 4 hr.	Metal base	----	189.33	----	----	Muy semejante al metal base de la probeta 31.
		Intermetálico	66	283.33	----	----	Hay grietas muy grandes a lo largo de la zona, y algunas grietas más pequeñas a lo ancho, el espesor no es homogéneo, se observan algunas regiones con porosidades.
		Recubrimiento	75	81.90	----	----	Las porosidades aumentan en tamaño y van desde la superficie hacia la zona media del recubrimiento, en algunas zonas el espesor es muy delgado.
37E	Recocido 5 hr.	Metal base	----	158.66	----	----	Muy semejante al metal base de las probeta 31.
		Intermetálico	62	297.00	58.79	41.21	Su espesor vuelve a ser homogéneo, se tiene grietas muy grandes en todas direcciones, existen agrupamientos de estructuras columnares y en algunas zonas existen porosidades.
		Recubrimiento	43	35.36	97.37	2.63	Existen grietas que van de la superficie a la parte media del recubrimiento, hay gran cantidad de porosidades, su espesor no es homogéneo.

Continuación de la Tabla 6.2

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor en μ	Dureza Promedio Vickers	Composición Química Porcentaje de		Observaciones
					Al	Fe	
46A	Laminada 20%	<i>Metal base</i>	---	176.33	---	---	Continúa siendo muy poca la difusión del aluminio hacia el acero.
		<i>Intermetálico</i>	57	317.33	52.34	47.66	Su espesor es delgado y en unas zonas tiende a desaparecer, hay grietas ocasionadas por el proceso de laminación, no hay porosidades. No se observan las estructuras columnares definidas en los casos anteriores.
		<i>Recubrimiento</i>	80	47.83	97.77	2.23	Hay grietas que surgen desde la superficie hacia el intermetálico, se tienen algunas porosidades.
46B	Laminada 40%	<i>Metal base</i>	---	219.33	---	---	Se muestran algunas zonas aisladas donde se presenta difusión del aluminio hacia el metal base.
		<i>Intermetálico</i>	52	297.66	---	---	Esta zona se encuentra muy fracturada, hay agrietamientos severos, su espesor es homogéneo, hay algunas porosidades.
		<i>Recubrimiento</i>	84	53.90	---	---	Existen grietas ocasionadas por la laminación que van desde superficie hasta el intermetálico, hay grandes porosidades sobre todo en la superficie.
46A1	Laminada 20% Recocida 2 hr.	<i>Metal base</i>	---	166.66	---	---	La difusión del aluminio es muy poca por lo que casi no hay intermetálico.
		<i>Intermetálico</i>	34	348.00	49.08	50.92	El poco intermetálico que hay se encuentra agrietado en la parte media, su espesor no es homogéneo y en algunas zonas tiende a desaparecer.
		<i>Recubrimiento</i>	100	28.76	98.82	1.18	No existen grietas en la zona del recubrimiento, hay porosidades dispersas en casi toda la superficie del recubrimiento y en la parte media. Su espesor tiende a ser homogéneo.
46B1	Laminada 40% Recocida 2 hr.	<i>Metal base</i>	---	179.66	---	---	No se observan que el metal cambie sus características iniciales por la escasa difusión del Al.
		<i>Intermetálico</i>	64	319.33	---	---	Se encuentra grietas de gran tamaño a lo largo de toda la zona, aparentemente ocasionadas por la laminación. El espesor es homogéneo, no hay porosidades en esta zona que tiende a formar estructuras columnares.
		<i>Recubrimiento</i>	40	32.86	---	---	En algunas zona el recubrimiento es muy delgado, presenta porosidades y muestra grietas en varias partes.

6.4.- Análisis Cualitativo de Ambos Recubrimientos.

Aunque los factores estéticos no son considerados primordiales en el objetivo del presente estudio, a continuación se comentarán algunas peculiaridades observadas a simple vista mientras se efectuaron los procesos de recubrimiento.

Una valoración puramente visual nos muestra que se obtiene un tono grisáceo brillante para el recubrimiento de aluminio, mientras que para el recubrimiento de zinalco se obtiene una tonalidad gris más oscura y opaca. En ambos casos se obtuvieron superficies ligeramente rugosas, pero éstas pueden ser totalmente lisas con un proceso de laminación posterior a la extracción de la probeta del metal fundido.

Después de extraer las piezas de la inmersión se aprecia un aspecto más uniforme en las probetas recubiertas con zinalco, lo que evidencia probablemente una mejor adherencia del metal base sobre el sustrato.

En términos generales se observó que el acabado superficial es un factor que depende mucho de las condiciones en que se efectúe el proceso de inmersión, así como de la extracción de las piezas, donde influyen factores tales como el control de la escoria durante el proceso, la técnica de extracción de las piezas así como su velocidad, el tipo de enfriamiento, etc.

6.5.- Identificación de las Fases en los Recubrimientos.

Para determinar las fases presentes en las diferentes zonas de cada recubrimiento se emplearon los análisis químicos correspondientes a cada muestra en conjunto con la interpretación del diagrama de equilibrio correspondiente.

En una sección transversal de muestras sometidas a aluminizado o zinalquizado por inmersión en caliente, para todos los casos analizados se presentan esencialmente tres capas de fases: una capa superficial formada por el elemento de recubrimiento prácticamente puro; una capa de transición constituida por dos o más fases cuyas composiciones están en función de la temperatura del baño, el tiempo de inmersión, la velocidad de enfriamiento y las características superficiales del metal base; y una capa interna delimitada por la zona de difusión del intermetálico, por lo que a partir de éste límite se encuentra el metal base.

6.5.1.- Fases Presentes en el Aluminizado.

Para determinar la fases presentes en las diferentes zonas de éste recubrimiento se utilizó el diagrama binario Fe-Al.

1.- Las fases que se presentan en la probeta que no tiene ningún proceso posterior a su recubrimiento son:

Intermetálico: En esta zona se puede detectar una fase ζ la cual está constituida de $FeAl_2$ y la fase η la que está constituida por Fe_2Al_5 . En general, la dureza de ésta zona es elevada debido al alto contenido de **Fe** presente en los compuestos.

Recubrimiento: Ésta región está compuesta por una fase rica en **Al**, por lo que resulta ser una zona más bien dúctil.

2.- En las probetas que tienen un proceso de recocido posterior, las fases que se encuentran dependen del período de tiempo que fueron recocidas. En éstas probetas se pueden encontrar varias combinaciones de fases, dependiendo de que tanto se difunde el aluminio hacia el metal base.

Intermetálico: Una fase ζ la cual está constituida por $FeAl_2$, otra fase η la cual está constituida por Fe_2Al_3 , y una tercera fase θ la cuál esta constituida por $FeAl_3$ con lo cual nuevamente consta de un alto porcentaje de **Fe** que hace muy dura y frágil esta zona.

Recubrimiento: nuevamente es una zona rica en aluminio con lo cual la fase de **Al**, es la que predomina en esta zona.

3.- Las probetas que fueron laminadas tienden a presentar fases muy similares a las anteriores pero en estas se dan una combinación de ambas

Intermetálico: En esta zona las fases presentes son ζ y η , las cuales se encuentran de la forma $\zeta + \eta$ con las composiciones químicas antes mencionadas.

Recubrimiento: Nuevamente se tiene un gran porcentaje de aluminio dando como resultado una fase única **Al**.

4.- Las probetas que fueron laminadas y posteriormente recocidas no presentan cambios en cuanto a las fases presentes en sus diferentes zonas con respecto a las que solo fueron laminadas. En el intermetálico se tienen fases ζ y η , mientras que en el recubrimiento se presenta la fase **Al** como en las anteriores probetas.

6.5.2.- Fases Presentes en el Zinalquizado

Para determinar la fases presentes en estos recubrimiento y para tratar de generar una primera explicación, se utilizaron los diagramas binarios Fe-Al para la zona del intermetálico y el diagrama binario de fases Al-Zn para la zona del recubrimiento.

1.- Para la probeta que cuenta únicamente con el recubrimiento se presentan varias combinaciones de fases en las distintas zonas:

Intermetálico: En esta zona se tiene una combinación del tipo $\zeta + \eta$ las cuales tienen las características antes mencionadas y por la presencia de **Fe** nuevamente resulta en una estructura muy frágil.

Recubrimiento: En esta zona se forma una combinación de fases pero ahora de otro tipo ($\alpha + \beta$), una de ellas es la fase α la cuál está constituida alrededor del 98% de aluminio y la otra fase es β que está constituida prácticamente del 99% Zinc, de acuerdo a los análisis químicos obtenidos, obteniéndose así una baja dureza.

2.- Las probetas a las que se aplicó el proceso de recocido presentan una fase o fases combinadas dependiendo de la difusión que tuvo el aluminio hacia el metal base durante el período en que se dió dicho proceso.

Intermetálico: las fases que probablemente se encuentren en esta zona dependiendo del periodo de recocido son: una fase β_2 la cual esta constituida por **FeAl**, y las fases ζ y η con las características anteriormente mencionadas, se pueden presentar en forma de combinación o solas ($\beta_2, \eta, \beta_2 + \zeta$) dependiendo del tiempo de recocido.

Recubrimiento: en esta zona nuevamente se encuentra una combinación de fases, las cuales son nuevamente una fase α y una fase β , con las características antes mencionadas.

3.- En las probetas que fueron laminadas se siguen formando fases α y β combinadas en el recubrimiento, mientras en el intermetálico solo se encontró una fase η .

En las probetas que fueron laminadas y recocidas, también se forman las fases combinadas de α y β pero en este caso la fase que se forma en el intermetálico es ζ .

Nota:

Los análisis realizados nos entregan solo una aproximación de las fases y las composiciones químicas presentes en los recubrimientos; para confirmar o desmentir la exactitud de los resultados se requeriría aplicar algunas técnicas más exhaustivas de investigación y análisis como: DCP, absorción atómica, que confirmen lo mencionado en el presente trabajo.

6.6.- Análisis Comparativo.

Tabla 6.3 Análisis comparativo de las probetas de zinalco

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor [mμ]	Dureza Promedio Vickers	Espesor	Porosidad	Agrietamiento	Fases presentes
127	inmersión en metal fundido	Metal base	----	234.33	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	45	332.66	Homogéneo	Baja	Nulo	ζ, η
		Recubrimiento	130	151.66	Homogéneo	Nula	Nulo	α, β
127A	Recocido 1hr.	Metal base	----	294	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	28	120.66	Homogéneo	Nula	Medio	β ₂
		Recubrimiento	250	160	Homogéneo	Baja	Nulo	α, β
127B	Recocido 2hr.	Metal base	----	203	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	54	357.66	No Homogéneo	Regular	Medio	η
		Recubrimiento	275	132.66	Homogéneo	Regular	Nulo	α, β
127C	Recocido 3hr.	Metal base	----	230	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	95	252.66	No Homogéneo	Regular	Baja	ζ, β ₂
		Recubrimiento	295	166	Homogéneo	Alta	Nulo	α, β
127D	Recocido 4hr.	Metal base	----	229	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	52	310	Homogéneo	Alta	Medio	----
		Recubrimiento	433	196.33	Homogéneo	Alta	Nulo	----
127E	Recocido 5hr.	Metal base	----	330.33	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	69	161.33	Homogéneo	Alta	Medio	ζ, β ₂
		Recubrimiento	139	210.33	Homogéneo	Alta	Bajo	α, β
111A	Laminada 20%	Metal base	----	210.33	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	20	111	Homogéneo	Baja	Bajo	η
		Recubrimiento	152	98.23	No Homogéneo	Baja	Nulo	α, β
111B	Laminada 40%	Metal base	----	216.66	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	18	181.33	No Homogéneo	Baja	Muy Alto	----
		Recubrimiento	274	104.66	Homogéneo	Baja	Bajo	----
111A1	Laminada 20% Recocida 2hr.	Metal base	----	212	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	12	124.66	No Homogéneo	Baja	Bajo	ζ
		Recubrimiento	178	132	No Homogéneo	Baja	Bajo	α, β
111B1	Laminada 40% Recocida 2hr.	Metal base	----	203.33	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	16	132.33	No Homogéneo	Baja	Bajo	----
		Recubrimiento	224	128.66	Homogéneo	Baja	Bajo	----

Tabla 6.3 Análisis comparativo de las probetas de aluminio

Probeta No.	Característica	Zona	Espesor [mμ]	Dureza Promedio Vickers	Espesor	Porosidad	Agrietamiento	Fases presentes
31	Inmersión en metal fundido	Metal base	----	216.00	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	40	204.66	Homogéneo	Baja	Alto	ζ, η
		Recubrimiento	123	48.10	Homogéneo	Regular	Regular	Al
37A	Recocido 1hr.	Metal base	----	191.33	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	58	279.33	Homogéneo	Nula	Alto	----
		Recubrimiento	200	48.83	Homogéneo	Baja	Regular	----
37B	Recocido 2 hr.	Metal base	----	183.33	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	77	304.66	Homogéneo	Nula	Regular	ζ, η
		Recubrimiento	23	64.63	Homogéneo	Nula	Baja	Al
37C	Recocido 3 hr.	Metal base	----	131.33	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	80	256.00	Homogéneo	Baja	Bajo	ζ, η
		Recubrimiento	57	41.33	Homogéneo	Regular	Medio	Al
37D	Recocido 4 hr.	Metal base	----	189.33	----	Baja	Nulo	----
		Intermetálico	66	283.33	No Homogéneo	Baja	Alto	----
		Recubrimiento	75	81.90	No Homogéneo	Regular	Medio	----
37E	Recocido 5 hr.	Metal base	----	158.66	----	Baja	Nulo	----
		Intermetálico	62	297.00	Homogéneo	Baja	Alto	θ
		Recubrimiento	43	35.36	No Homogéneo	Regular	Alto	Al
46A	Laminada 20%	Metal base	----	176.33	----	Baja	Nulo	----
		Intermetálico	57	317.33	No Homogéneo	Baja	Medio	ζ, η
		Recubrimiento	80	47.83	No Homogéneo	Regular	Medio	Al
46B	Laminada 40%	Metal base	----	219.33	----	Baja	Nulo	----
		Intermetálico	52	297.66	Homogéneo	Baja	Muy Alto	----
		Recubrimiento	84	53.90	Homogéneo	Regular	Alto	----
46A1	Laminada 20% Recocida 2 hr.	Metal base	----	166.66	----	Nula	Nulo	----
		Intermetálico	34	348.00	No Homogéneo	Nula	Regular	ζ, η
		Recubrimiento	100	28.76	Homogéneo	Regular	Bajo	Al
46B1	Laminada 40% Recocida 2 hr.	Metal base	----	179.66	----	Baja	Nulo	----
		Intermetálico	64	319.33	Homogéneo	Nula	Alto	----
		Recubrimiento	40	32.86	No Homogéneo	Regular	Regular	----

6.6.1.- Análisis Comparativo Aluminizado.

En primer término hablaremos de las principales características que se muestran en las probetas que fueron recocidas.

Recubrimiento: Respecto a ésta zona, ninguno de los tratamientos de recocido parece afectar notablemente su dureza, y no se muestran variaciones considerables en relación a su espesor, que si bien presenta una forma regular en casi todos los casos, varía de tamaño en cada probeta sin presentar alguna tendencia de comportamiento definida.

Por otra parte se observó que las mejores características en cuanto a minimizar la porosidad y agrietamiento, se encuentran en el intervalo de 1 a 2 horas de recocido.

Intermetálico: La dureza de ésta capa aumenta conforme se eleva el tiempo de recocido, hasta llegar al tratamiento de 4 horas de recocido, en que el valor de la dureza comienza a disminuir.

De manera semejante, el espesor de la zona del intermetálico aumenta en relación directa al tiempo de recocido, hasta llegar a un tiempo de recocido de 4hr.

Metal base: El valor de su dureza disminuye al aumentar el tiempo de recocido, pero al igual que en el caso anterior, a partir de las 4 hr. de recocido, éste efecto parece invertirse.

Ésta zona resulta prácticamente sin porosidad ni agrietamiento para todos los procedimientos.

Probetas laminadas y recocidas: Las probetas que fueron laminadas presentan el mayor índice de dureza de todos los casos en la zona del intermetálico, siendo las laminadas con recocido posterior las que presentan la mayor dureza de todas. El metal base se ve notablemente afectado en el proceso de 40% de laminación, con el que se obtiene la dureza más alta de todos los casos en esa zona.

El espesor de éstas probetas no presenta un rango de variación importante en sus respectivas capas.

Las probetas que fueron laminadas y posteriormente recocidas presentan la dureza más baja de todas en la zona del recubrimiento.

Al igual que en el recocido, las pruebas de laminación y la laminación con recocido no afectan de manera perceptible la zona del metal base. Sin embargo, para estos procesos

resultó que a partir del 40% de laminación el agrietamiento aumenta notablemente tanto en el intermetálico como en el recubrimiento.

6.6.2.- Análisis comparativo zinalquizado.

De igual forma comenzaremos a hablar de las características de las probetas que fueron recocidas en los diferentes periodos de tiempo.

Recubrimiento: En la zona del recubrimiento se observa que el espesor aumenta conforme aumenta el tiempo de recocido, excepto en el intervalo de recocido de 5 hr. en que el espesor de ésta zona vuelve a ser muy semejante al espesor inicial sin recocido.

Al aumentar el tiempo de recocido se aprecia un aumento en la proporción de aluminio en ésta zona, mientras que los porcentaje de zinc y de hierro tienden a disminuir, excepto en el recocido de 5 hr. en que la proporción de hierro se eleva y es muy semejante al caso de recocido durante una hora. Pese a éstas tendencias, los valores de la dureza en ésta zona se encuentran dentro de un rango estrecho, poco variable por efecto del recocido o de los cambios en la proporción de los elementos.

En cuanto a la calidad del recubrimiento, es a partir de las 3 hr. de recocido que se observa un notable aumento en el número de porosidades.

Intermetálico: Para la capa de intermetálico, el tamaño de su espesor varía en cada período de recocido, sin presentar alguna tendencia evidente de comportamiento.

Para ésta zona, al igual que en la del recubrimiento se observa una clara tendencia hacia el aumento en el número de porosidades conforme se aumenta el tiempo de recocido, siendo a partir de las 3 hr de recocido en que resulta notablemente alto éste efecto.

Con respecto a la dureza del intermetálico, ésta resulta muy variable, posiblemente debido a que al efectuarse la medición de la dureza en un determinado punto, la proporción de fases que abarque esa medición, es muy probable que varíe con respecto a otro punto en que se tome la medición, aún dentro de la misma zona, ya que la estructura microscópica de ésta capa, se caracteriza por presentar varias combinaciones de fases.

Al igual que para la zona del recubrimiento, la composición química de los elementos presentes en ésta zona presenta algunas variaciones notables, sobre todo en el caso del recocido por una hora donde el aluminio disminuye aproximadamente 20 puntos de porcentaje con respecto a la probeta sin recocido, mientras que para los recocidos de entre 3 y 5 hr. la disminución es de alrededor de 10 puntos con respecto a la probeta sin recocido.

Es notorio que para los procesos de 3, 4 y 5 hr. de recocido la composición química de los elementos presentes se mantiene casi invariable, resultando los cambios más drásticos a considerar en los casos de 1 y 2 hr. de recocido.

En todos los casos, la zona del intermetálico presenta cierto grado de agrietamiento, sin embargo éste no ocurre en función del tiempo de recocido, ni parece verse afectado por él, a diferencia de la porosidad que es notoria desde las 2 hr de recocido y se vuelve muy alta a partir de las 4 hr. de recocido.

Metal base: Para la capa del sustrato, al igual que en las probetas recubiertas con aluminio, es prácticamente imperceptible, algún tipo de efecto causado por los procesos de recocido, laminado o laminado con recocido.

En todos los casos la separación entre el metal base y la capa de aleación aparece perfectamente definida.

Probetas laminadas y recocidas: Las probetas laminadas y laminadas con posterior recocido presentan mucha semejanza en cuanto a su espesor tanto en la zona del intermetálico (que no disminuye marcadamente por efecto del aumento en el porcentaje de laminación).

Al aumentar el porcentaje de laminación, en la zona del recubrimiento parece homogeneizarse en su espesor, sin embargo la zona del intermetálico se caracteriza por presentar espesores variables.

Por otra parte, la dureza en la zona de recubrimiento se eleva al aumentar el porcentaje de laminación, al igual que en las probetas laminadas y recocidas, mientras que en el intermetálico ésta propiedad se mantiene en un rango de valores poco variable.

La porosidad es independiente del porcentaje de laminación y considerando que la presencia de porosidades inicia su generación en tiempos de recocido superior a 3 horas las probetas laminadas y recocidas no presentan porosidad

Respecto al agrietamiento, éste es reducido en casi todos los casos, excepto en la probeta laminada 40% que en la zona del intermetálico presenta grandes fracturas.

6.7.- Ventajas de cada Recubrimiento.

Algunas de las ventajas encontradas para cada uno de los tipos de recubrimiento se mencionan a continuación:

Para el zinalquizado:

El proceso de fundición ocurre a menor temperatura y lo cual trae asociado un menor gasto de energía que en el caso del aluminio.

El Zinalco es mas económico en México que el Aluminio por lo que el recubrimiento también lo sera.

Se obtienen piezas recubiertas de aspecto uniforme, por lo que no requieren algún proceso posterior para mejorar su acabado.

Presenta mejor resistencia a la corrosión que el acero galvanizado en ambientes marinos.

El es pesor del recubrimiento se puede variar según se requiera.

Para el aluminizado:

Su resistencia a la corrosión es excelente en ambientes oxidantes y en procesos a altas temperaturas (debido a que la capa exterior adquiere propiedades superficiales semejantes al metal de recubrimiento).

Se logran piezas con acabado brillante, y aunque su aspecto es más rugoso que para el zinalquizado, un proceso de laminación posterior (menor al 40%), mejora su aspecto superficial.

CAPITULO VII

7.- CONCLUSIONES.

7.1.- Conclusiones Generales.

Una vez realizadas las actividades experimentales, así como el análisis de los resultados alcanzados durante la obtención de los recubrimientos y sus pruebas posteriores, se concluye:

1.- Tanto para el aluminizado como para el zinalquizado se lograron por el proceso de inmersión en metal fundido recubrimientos continuos, es decir, exentos de porosidades, grietas o irregularidades notables, y con una distribución uniforme del metal fundido sobre la superficie. Es importante subrayar que no se observó, ni en el proceso de inmersión, ni en los procedimientos posteriores, alguna tendencia de la película de recubrimiento a separarse de la base.

2.- La adherencia con el sustrato y el espesor del recubrimiento son factores que se deben controlar mediante la técnica de limpieza y preparación de las piezas previa a su inmersión, y el manejo de las variables del proceso de inmersión en sí; ya que, a su vez, éstas características determinarán otras cualidades esenciales que se obtendrán en el proceso como son las propiedades mecánicas finales del recubrimiento.

3.- En los dos tipos de recubrimientos analizados se produce una capa interna de aleación y una capa externa del metal protector o aleación, de alta pureza. La capa interna de aleación se origina por difusión del metal fundido en el metal a proteger y está formada por un compuesto intermetálico de los metales constituyentes; en consecuencia, ésta parte del recubrimiento es más dura y frágil que la exterior, constituida, casi toda ella, por el metal o aleación de recubrimiento.

4.- Para ambos recubrimientos, la transición entre las capas (intermetálico y recubrimiento) está bien delimitada, de manera que no se mezclan gradualmente entre sí, sino que cada una conserva su composición definida. Esto es de particular importancia porque implica la posibilidad de controlar individualmente el espesor de cada una de las capas y de ésta forma buscar las características específicas deseadas en el recubrimiento,

que son, en gran parte, definidas por el tamaño y las cualidades de las capas, particularmente de la zona interna de aleación constituida por un compuesto intermetálico.

5.- En ambos recubrimientos se muestra una tendencia de dureza elevada en la zona del intermetálico, más alta incluso que la del metal base, debido a que en general, los compuestos intermetálicos que se forman tanto para el aluminizado como para el zinquizado son compuestos de Fe-Al de gran dureza y fragilidad.

6.- En ninguno de los casos resulta recomendable efectuar un proceso de laminación posterior ya que ésta práctica provoca el surgimiento de grietas en la zona del intermetálico que inciden desfavorablemente en las propiedades mecánicas de las piezas. Además, el efectuar un recocido posterior al trabajo de laminación no afecta de manera concluyente en disminuir la dureza de las piezas, o mejorar de forma evidente alguna de sus características.

7.2.- Conclusiones del Zinalquinizado.

1.-El mejor tiempo de inmersión para el proceso de recubrimiento con zinco se encuentra alrededor de los 5 minutos, a una temperatura de 600°C.

2.- Un tratamiento de recocido de una hora, posterior a la inmersión mejora la calidad del recubrimiento disminuyendo la presencia de porosidades y agrietamientos. Sin embargo, el recocido a mayores periodos de tiempo no resulta conveniente debido a que incrementa el espesor del intermetálico, lo que va en detrimento de sus propiedades mecánicas finales.

3.- Después de un periodo de 2 horas de recocido, se presentan porosidades que aumentan en cuantía a razón del aumento en el tiempo de recocido. Éste fenómeno puede ser debido al efecto Kirkendall, el cual indica que la formación de vacíos microscópicos (porosidades) se produce por ser diferentes las velocidades de difusión de los elementos en cuestión. Se recomienda hacer estudios más a fondo sobre los recocidos para poder concluir a que se deben estas porosidades.

4.- Se obtuvieron variaciones de espesor y dureza en la capa de intermetálico. Una causa probable de ello es que, debido a la complejidad del compuesto intermetálico, se origina la presencia de diferentes fases del sistema Fe-Zn-Al en diversas proporciones de éstos elementos, y consecuentemente se obtienen valores de microdureza que se comportan de manera irregular. El análisis más profundo de estas variaciones será motivo de un trabajo posterior.

7.3.- Conclusiones del Aluminizado.

1.- El mejor tiempo de inmersión para el caso del aluminizado se encuentra alrededor de los 5 minutos a una temperatura de 800°C.

2.- Un tiempo de recocido de alrededor de 2 horas parece ser el ideal para obtener las mejores características generales, ya que al parecer tiende a minimizar las irregularidades de las capas microestructurales.

3.- Los compuestos de Fe-Al formados en el intermetálico, ocasionan que ésta zona presente una dureza mayor incluso a la del metal base en todos los casos.

4.- Alrededor de las 4 horas de recocido se encuentra un punto crítico en el que comienza a presentarse un efecto drástico de elevado agrietamiento en todas las zonas.

5.- Tanto el intermetálico como el metal base no presentan efectos notables de porosidad en ninguno de los casos.

6.- El espesor del intermetálico presenta un efecto de crecimiento; en forma de estructura de tipo columnar hacia el interior del metal base en tiempos de recocido superiores a 2 horas.

7.- Un porcentaje de laminación a partir de un 40% ocasiona notable agrietamiento en el intermetálico por ser muy dura y frágil debido a la gran cantidad de Fe que se encuentra en esa zona, aún después de recocer las probetas.

7.4.- Aplicaciones potenciales.

Aunque este no es el objetivo de este trabajo y con la base al estudio realizado se puede establecer lo siguiente.

Aluminio.

El recubrimiento de aluminio presenta buenas propiedades de adherencia y resistencia a la corrosión, de acuerdo a investigaciones simultáneamente a esta, lo cual nos permite sugerir las siguientes aplicaciones:

- Recubrimiento de estructura y perfiles expuestas al medio ambiente.
- Recubrimiento interior y exterior en tuberías de agua y vapor.
- Recubrimiento en intercambiadores de vapor.
- Recubrimiento de reflectores de calor.

Zinalco.

Las aplicaciones potenciales del Zinalco como recubrimientos son las siguientes:

- Recubrimiento de estructuras y perfiles expuestos al medio ambiente y ambientes marinos.
- Recubrimiento de válvulas.
- Recubrimiento de elementos mecánicos de unión como tornillos, clavos, tuercas, rondanas, remaches en aplicaciones de medios salinos.
- Recubrimiento de lámina y tubería.

7.5.- Recomendaciones a Futuros Trabajos con estos Recubrimientos.

- Determinación de los parámetros para la obtención de un intermetálico de menor espesor.
- Estudio del efecto del recocido del recubrimiento de Zinalco posterior a dos horas.
- Variación del espesor, fases y propiedades del intermetálico con el tratamiento térmico.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Molera Solá Pere, Recubrimientos de los Metales. Productica. 1ª ed., España, Marcombo, 1989, 119pp.
- 2.- Otero Huerta Enrique, Corrosión y Degradación de Materiales. 1ª ed., España, Síntesis, S.A., 1997, 366pp.
- 3.- Burns R. M. Recubrimientos Protectores de los Metales. Trad. De José María Bermúdez de Castro y Mosquera. 1ª ed., Madrid, Interciencias, 1964, 680pp.
- 4.- W. Hufnagel. Manual del Aluminio. Trad. De Pedro Coca. 2ª ed., Barcelona, Reverté, 1992, 1133pp.
- 5.- Torres Villaseñor Gabriel. Trabajos de Investigación Realizados Sobre el Zinalco en el Periodo 1979-1990. 1ª ed., México, Instituto de Investigación de Materiales U.N.A.M., 1990,
- 6.- DeGarmo E. Paul, JT Black, Ronald A.Kohser. Materials and Processes in Manufacturing. 8ª ed., New Jersey, Prentice Hall, 1997, 1259 pp.
- 7.- Serope Kalpakjia, Steven R Schmid. Manufacturing Engineering and Technology. 4ª ed., New Jersey, Prentice Hall, 2001, 1148pp.
- 8.- Mikell P. Groover. Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas. Trad. Carlos M. de la Peña Gómez. 1ª ed., México, Prentice Hall, 1997, 1062pp.
- 9.- Harry D. Moore, Donald R. Kibbey. Materiales y Procesos de Fabricación. Trad. De Julio Fournier González. 3ª ed., México, Limusa, 1987, 919pp.
- 10.- R. L. Timings. Tecnología de la Fabricación. Trad. De Juan Naves Ruiz. 1ª ed., México, Alfaomega, 1992, 385pp.
- 11.- B. H. Amstead, Phillip. Procesos de Manufactura. Trad. De Ing. Bernardo Loyola Pintor, ing. Jorge F. Ramirez Robles. 2ª impresión., México, Continental S.A. de C.V., 1982, 1257pp.

12.- Sydney H. Avner. Introducción a la Metalurgia Física. Trad. De Lic. José Luis Estrada Haen. 2ª ed., México, McGraw-Hill, 1985, 694pp.

13.- Dr. Emilio Jimeno, Dr. Ing F. R. Morral. Metalurgia Física. Extractiva, Física Mecánica y Química, Tomo 1. 1ª ed., Madrid, Interciencias, 1995, 600pp.

14.- José Apraiz B. Tratamientos Térmicos de los Aceros. 8ª ed., España, dossat, 1985, 737pp.

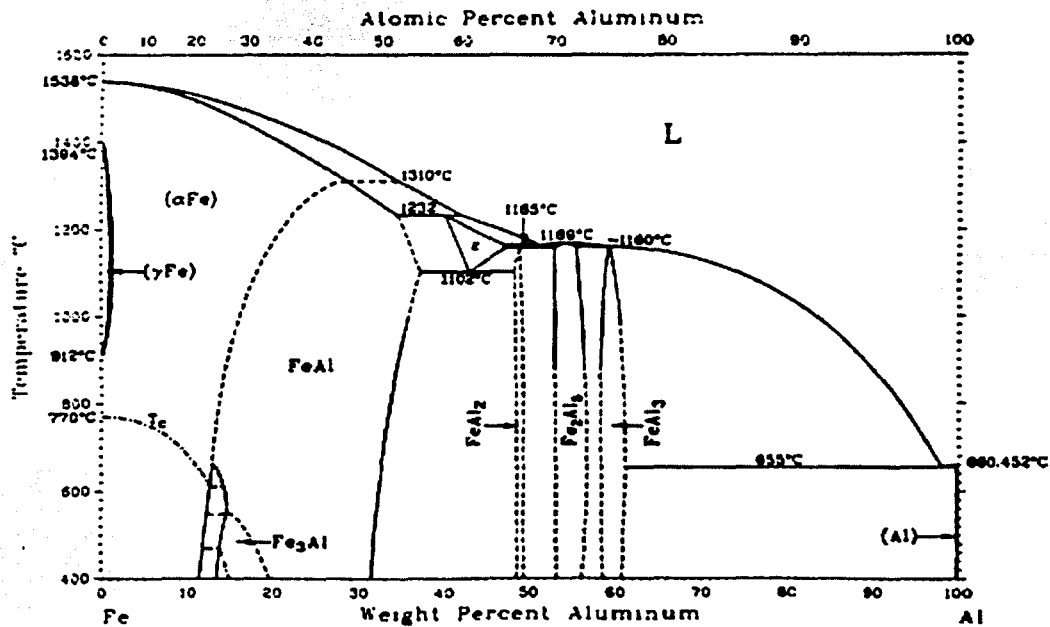
15.- William H. Clobberly, Paul M. Unterweiser. Metals Handbook Vol. 3 Properties and Selections: stainless steels, tools, materials and special-purpose metals. 9ª ed., USA, American Society for metals, 882pp.

16.- P. Villars, A. Prince & H. Okamoto. Handbook of Ternary Alloy. Vol. 3. Phases Diagrams.

17.-. Metals Handbook Vol. 8 Atlas of microstructures of industrial materials. 8ª ed., USA, American Society for metals.

ANEXOS
DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO
Al-Fe Al-Zn

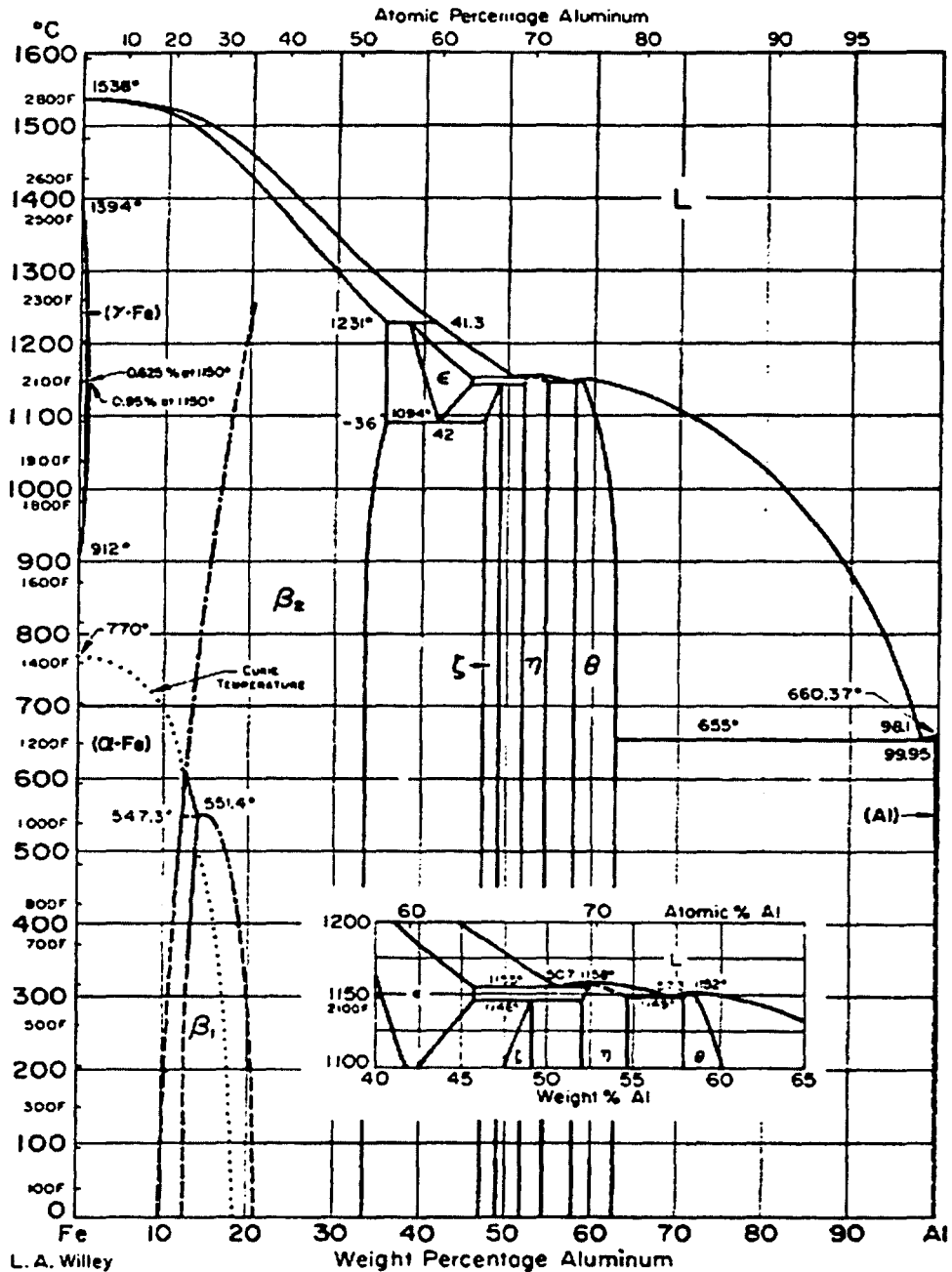
Al-Fe



U.R. Kattner and B.P. Burton, 1992

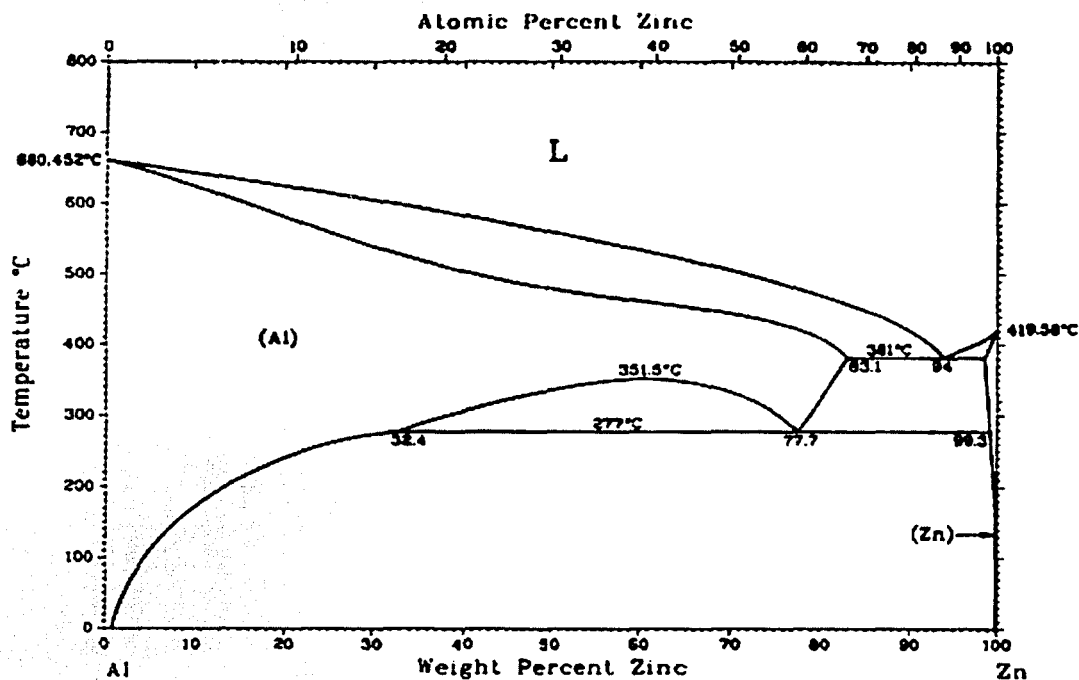
Phase	Composition, wt% Al	Pearson symbol	Space group
(αFe)	0 to ~28	<i>cf</i> 2	<i>Im</i> $\bar{3}m$
(γFe)	0 to 0.6	<i>cF</i> 4	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
FeAl	12.8 to ~37	<i>cP</i> 8	<i>Pm</i> $\bar{3}m$
Fe ₃ Al	~13 to ~20	<i>cF</i> 16	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
<i>e</i>	~40 to ~47	<i>cl</i> 16?	...
FeAl ₂	48 to 49.4	<i>aP</i> 18	<i>P</i> 1
Fe ₂ Al ₃	53 to 57	<i>oC</i> ?	<i>Cmcm</i>
FeAl ₃	58.5 to 61.3	<i>mC</i> 102	<i>C2/m</i>
(Al)	100	<i>cF</i> 4	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
Metastable phases			
Fe ₂ Al ₆	68.5	<i>mP</i> 22	<i>P2₁/c</i>
FeAl ₆	74.3	<i>oC</i> 28	<i>Cmc2₁</i>

Al-Fe Aluminum-Iron



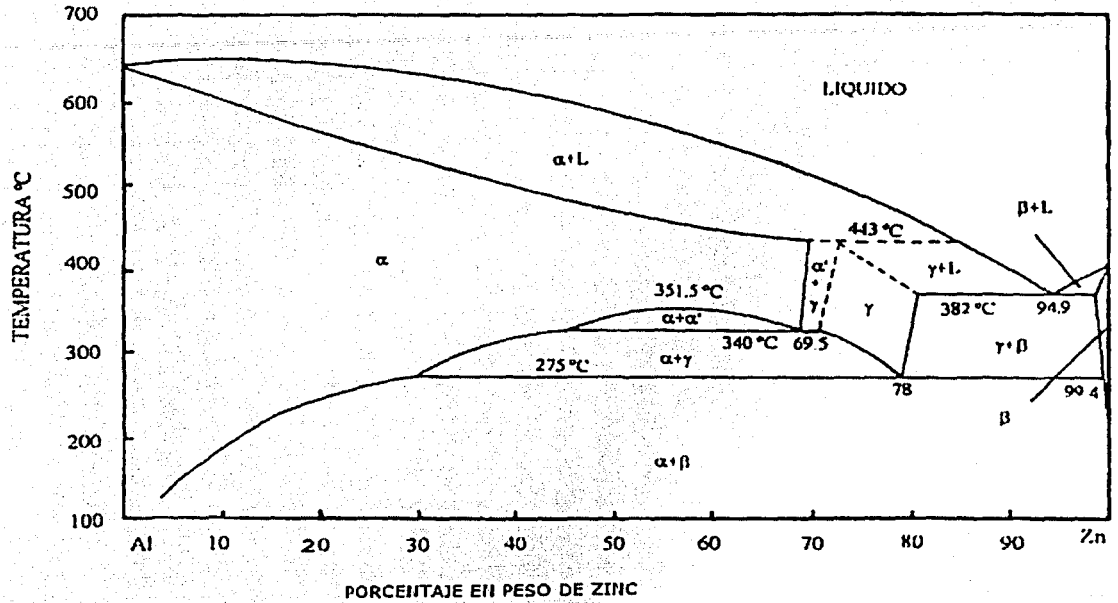
L. A. Wiley

Al-Zn



J.L. Murray, 1983

Phase	Composition, wt% Zn	Pearson symbol	Space group
(Al)	0 to 83.1	<i>cF4</i>	<i>Fm$\bar{3}m$</i>
(Zn)	98.8 to 100	<i>hP2</i>	<i>P6$_3$/mmc</i>
Metastable phases			
(α' Al) _R	78 to ~85	...	<i>R$\bar{3}m$</i>
"R"	(a)	...	...
Y	...	...	...
(a) Coherent precipitate			



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**