



INSTITUTO DE
TECNOLOGIA

PROF. JORGE A. SABATO

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN

COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA

MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES

PROPIEDADES DE INTERFASE EN SOLDADURAS POR FRICCION

Rivalino Guzmán Ale

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
"Prof. Jorge A. Sabato"

PROPIEDADES DE INTERFASE EN SOLDADURAS POR FRICCION

Por Ing. Rivalino Guzmán Ale

Director
Dr. Emilio Matatagui

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA CENTRO DE INFORMACION C.A.C.
--

Tesis para optar el título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina
1998

DEDICATORIA

**A mi esposa Natalia,
a mis hijos, Relvi, Karen y Rel**

**A la memoria de mi madre, Apolonia,
que con su dulce y profunda mirada
ilumina mi camino a seguir .**

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Emilio Matatagui, por la dirección y el apoyo brindado durante el desarrollo del presente.

Al Sr. Alfonso Pepe, quien acondicionó el equipo y preparó las soldaduras; al Lic. Marcelo Miller, al Lic. Gustavo Santa Cruz, a la Mcs. Silvia Thorp por el apoyo en la redacción técnica; al Ing. Jose Luis Regueiro por sus buenos consejos.

Al Dr. David Banchik, y al Ing. Daniel Bianchi, por el apoyo en el desarrollo y valiosas sugerencias.

A la Dra. Delia Arias, y a la Dra. Fanny Dymont, por su valiosa crítica; al Ing. Guillermo Anteri, a la Lic. Silvia Balart, y al Ing. Francisco Iorio por la valiosa colaboración en la estrategia a seguir; al Dr. Francisco Póvolo, y a la Dra. Elida Hermida por el apoyo en los ensayos mecánicos; a los Sres. Ricardo Montero, Ramon Castillo, Adriana Dominguez, y Sara Novas, por el apoyo en los ensayos de Microscopía.

Al Ing. Alfredo Hey, por la revisión general del presente y por sus sabias sugerencias

A la Sra. Alicia Semino, por la revisión de la redacción final.

Al personal del Instituto de Tecnología "Prof. Jorge A. Sabato" en la persona de la Dra. Alicia Sarce, al Dr. Manuel Iribarren y al personal administrativo, por la orientación y apoyo brindados durante mi estadía.

A las autoridades de la Comisión Nacional de Energía Atómica

A mis compañeros de estudio, por compartir dos años de vida.

Finalmente, deseo expresar mi especial deuda de gratitud para con la Subsecretaría de Programación y Evaluación Universitaria y la Dirección Nacional de Cooperación Internacional "Programa de Becas MUTIS" y la Secretaria del Programa de Recursos Humanos de Alto Nivel del Ministerio de Cultura y Educación, por haberme concedido una beca para realizar la maestría en ciencia de los materiales, a la Lic. Dolly Moruja, y a la Srta. Natalia Repetto, por la orientación recibida.

A todos y cada uno de ellos. mi reconocimiento y eterna gratitud.

Rivalino

RESUMEN

El presente esta dirigido a la fabricación de juntas de acero/aluminio mediante el proceso de soldadura por fricción y a la caracterización de las mismas. Como materiales de partida se utilizaron electrodos de acero y aluminio ANSI 1060, y una vez establecidos los ajustes de los parámetros principales, se procedió a soldar las muestras utilizando un torno debidamente acondicionado.

Para su evaluación, las uniones soldadas se dividieron en muestras sin y con tratamiento posterior, que luego fueron caracterizadas por microscopía y por ensayos mecánicos, lo que permitió identificar la interfase, la zona afectada por el calor, la presencia de compuestos intermetálicos, la interdifusión de ambos materiales y la resistencia de la junta. Se ha considerado como base la evaluación de la resistencia para sistematizar la influencia de la presentación de las superficies a unir y la presencia de compuestos intermetálicos en la interfase.

El trabajo comprende las siguientes partes:

Capítulo I, se da a conocer algunos principios sobre la soldadura por fricción.

Capítulo II, contiene los antecedentes del trabajo desarrollado.

Capítulo III, corresponde a la parte experimental, incluyendo los parámetros empleados en el proceso de soldadura, condiciones de los materiales de partida y los ensayos realizados.

Capítulo IV, indica los resultados de la caracterización de la junta, utilizando varias fotos, fotomicrografías y gráficos que ilustran la interfase, la zona afectada por el calor en el aluminio y el comportamiento de la unión durante y después del proceso.

Capítulo V, contiene las conclusiones generales y recomendaciones

Apéndice I, presenta la descripción de la tecnología de la soldadura por fricción.

Apéndice II: Contiene una recopilación de la literatura tecnológica acerca de los parámetros utilizados en la soldadura por fricción para materiales similares y disímiles.

ABSTRACT

Aluminium - Steel joints were made by friction welding. A lathe was used for the welding process, in which the steel electrode was joined to the aluminium.

For their evaluation, the joints were divided into with and without post-treatment welding, analytical microscopy and mechanical testing characterized, to identify the Fe-Al interface, the heat affected zone, the intermetallic compounds, the interdiffusion and the tensile strength. The joint resistance was measured as base systematize to influence contamination surface to weld and the presence of intermetallic compounds into interface in the satisfactory bonding.

The following points are considered

Chapter 1 : Friction welding principles

Chapter 2 : Background

Chapter 3 : Welding and characterization techniques

Chapter 4 : Experimental results and discussion

Chapter 5 : General conclusions

Recommendations

Appendix 1 : Friction welding technology

Appendix 2 : Friction welding parameters

OBJETIVOS

- 1.- Determinación de los parámetros principales de juntas de acero/aluminio unidas mediante el proceso de soldadura por fricción.
- 2.- Caracterizar las juntas soldadas por fricción en muestras sin tratamiento y con tratamiento posterior, identificar los compuestos intermetálicos y evaluar la calidad de la soldadura.
- 3.- Evaluar la influencia de la forma de presentación de las superficies a unir y la presencia de compuestos intermetálicos en la interfase sobre la calidad de la junta.

INTRODUCCION

La idea de soldar por fricción no es nueva, probablemente sea tan antiguo como el origen de la metalurgia (3500 AC), y generalmente fue considerado como una técnica curiosa. Algunas aplicaciones y patentes datan desde principios de siglo XX; sin embargo, los estudios científicos empezaron en 1956 cuando el investigador Chudikov demostró la posibilidad de soldar por fricción materiales de acero. Posteriormente Vill y otros investigadores rusos, trataron de explicar el proceso desde diferentes puntos de vista. El proceso de soldadura por fricción fue introducido en los Estados Unidos en 1960, el cual fue desarrollado por la American Machine and Foundry Co. y por Caterpillar Tractor Co., quienes estudiaron y desarrollaron la soldadura por inercia.

Actualmente la soldadura por fricción es ampliamente utilizada por las ventajas que ofrece frente a otros procesos, entre ellas cabe mencionar.

- .- No se necesita material de aporte
- .- No requiere fundente ni protección de gases
- .- El proceso ofrece ambiente limpio de trabajo
- .- Reducida zona afectada por el calor
- .- El proceso es rápido
- .- Es aplicable para soldar materiales disímiles

La producción de piezas soldadas por fricción se emplea en la industria Aeroespacial, Agricultura, Automotriz, Marina, Nuclear, Petrolera, Eléctrica, etc.

Los antecedentes para el desarrollo del presente trabajo están basados en la literatura de otros autores, y en las experiencias de soldaduras por fricción de materiales disímiles realizadas en el sector Instrumentación y Control de la Unidad de Actividad de Reactores y Centrales Nucleares. Para el cumplimiento de los objetivos señalados, se ha considerado la junta acero/aluminio fabricada por el método de soldadura por fricción, ya que son materiales disímiles y forman compuestos intermetálicos en la interfase.

INDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
OBJETIVOS.....	III
INTRODUCCION.....	IV

CAPITULO I : INTRODUCCION TEORICA

I.1.-	Introducción.....	1
I.2.-	Fundamentos de la soldadura por fricción.....	2
I.2.1.-	Generalidades.....	2
I.2.2.-	Contacto entre superficies adyacentes.....	2
I.2.3.-	La fuerza de fricción y su naturaleza.....	4
I.2.4.-	Variación del coeficiente de fricción.....	6
I.2.4.1.-	Influencia de la velocidad relativa sobre el coeficiente de fricción..	7
I.2.4.2.-	Influencia de la temperatura sobre el coeficiente de fricción.....	9
I.2.4.3.-	Influencia del acabado de las superficies de fricción y el grado de su contaminación sobre el coeficiente de fricción.....	10
I.2.5.-	Calor liberado durante la soldadura por fricción.....	10
I.2.6.-	Fenómenos en las superficies de fricción durante el proceso.....	12
I.2.7.-	Dependencia de la intensidad de calor liberado sobre los parámetros del proceso de soldadura.....	14
I.2.7.1.-	Influencia de la velocidad de rotación.....	14
I.2.7.2.-	Influencia de la presión unitaria.....	16
I.3.-	Deformación en la zona de soldadura.....	17
I.4.-	Unión de metales al estado sólido.....	21
I.4.1.-	Mecanismos de unión.....	21
I.4.2.-	Limitaciones de la acción de la unión	22
I.4.3.-	La naturaleza de la interfase de la unión.....	23
	Referencias.....	24

CAPITULO II : ANTECEDENTES

II.1.-	Introducción.....	25
II.2.-	Mecanismos de unión de materiales disímiles.....	25
II.3.-	Soldadura por fricción del aluminio acero.....	25
II.3.1.-	Aspectos metalúrgicos en la soldadura por fricción convencional..	27
II.3.1.1.-	Efecto de los parámetros.....	27
II.3.1.2.-	Condición de la superficie.....	30
II.3.1.3.-	Análisis de la capa de intermetálicos.....	31
II.3.1.4.-	Efecto de elementos aleantes.....	33
II.3.1.5.-	Uso de interlayers.....	33
II.3.2.-	Aspectos metalúrgicos en soldadura de fricción por inercia.....	34
II.3.2.1.-	Efecto de los parámetros de soldadura.....	34
II.3.2.2.-	Interdifusión.....	35
II.3.2.3.-	Geometría de la superficie de soldadura del acero.....	36
	Referencias.....	38
	Referencias.....	39

CAPITULO III : PARTE EXPERIMENTAL

III.1.-	Materiales.....	40
III.2.-	Equipo utilizado y su acondicionamiento.....	41
III.3.-	Monitoreo del proceso.....	42
III.4.-	Recocido de las muestras.....	45
III.5.-	Preparación de muestras para metalografía.....	46
III.6.-	Caracterización.....	47
III.6.1.-	Microscopía.....	48
III.6.2.-	Microanálisis.....	48
III.6.3.-	Microdurómetro.....	48
III.6.4.-	Ensayo a la tracción.....	48
	Referencias.....	50

CAPITULO III: RESULTADOS

IV.1.-	Exámen metalográfico.....	51
IV.1.1.-	Materiales de partida.....	51
IV.1.2.-	Estructura de la junta acero/aluminio.....	53
IV.1.3.-	Muestras recocidas.....	54
IV.1.4.-	Identificación de compuestos intermetálicos.....	61
IV.1.4.1.-	Muestras sin recocido.....	61

IV.1.4.2.-	Muestras con recocido.....	62
IV.2.-	Microdureza.....	64
IV.2.1.-	Muestras sin recocido.....	64
IV.2.2.-	Muestras con recocido.....	68
IV.3.-	Microanálisis.....	69
IV.3.1.-	Muestras sin recocido.....	69
IV.3.2.-	Muestras recocidas.....	74
IV.4.-	Ensayos mecánicos.....	78
IV.4.1.-	Muestras sin recocido.....	78
IV.4.2.-	Muestras recocidas.....	82
IV.5.-	Apariencia de la fractura.....	83
	Referencias.....	89

CAPITULO V : CONCLUSIONES GENERALES

V.1.-	Coclusiones generales.....	90
V.2.'	Recomendaciones	91

APENDICE I

Información general acerca de la soldadura por fricción

APENDICE II

Recopilación de base de datos sobre parámetros de soldadura por fricción para materiales similares y disímiles.

CAPITULO I : INTRODUCCION TEORICA

I.1.- INTRODUCCION

Las soldaduras bimetálicas disímiles en fase sólida se usan cada vez más frecuentemente. Dichas juntas son empleadas en muy variadas aplicaciones [1]. Son fabricadas por procesos de soldadura por presión, soldadura ultrasónica, unión por difusión, soldadura por fricción y unión por explosión. Estos procesos de soldadura previenen o limitan la fusión en la interfase de la junta y por lo tanto minimizan la formación de fases intermetálicas. Sin embargo, en uniones fabricadas sin tomar las precauciones correspondientes o usadas bajo condiciones adversas de servicio, podría ocurrir interdifusión en la interfase de ambos materiales, causando la formación de compuestos intermetálicos con el consecuente deterioro de la calidad de la soldadura. Tal es el caso de la junta acero/aluminio, que se ha tomado como ejemplo para el desarrollo de este trabajo.

La soldadura por fricción es un proceso de soldadura en estado sólido por medio del cual se realiza la unión de materiales disímiles o similares. Consiste en que una de las piezas sea puesta en rotación mientras que la otra se mantiene estacionaria. Bajo una fuerza axial los dos componentes son puestos en contacto, generando calor por fricción en las intercaras de ambos materiales, provocando deformación plástica e iniciándose la formación del upset*. Inmediatamente se frena la pieza en rotación y se mantiene o se incrementa la fuerza axial por un corto período, hasta que la soldadura adquiera la rigidez suficiente.

* Upset: Es la disminución de la longitud del material que se produce durante el proceso de la soldadura por fricción. Cuando los materiales a unir son disímiles dicha disminución se produce en el material más blando o en el más dúctil.

Según el modo de alimentación de energía, se consideran dos métodos de soldadura por fricción: Convencional y por Inercia, la descripción de dichos procesos se detalla en el **Apéndice I**. Por otro lado se ha recopilado literatura bibliográfica de utilidad tecnológica sobre los parámetros utilizados en la soldadura por fricción para materiales similares y disímiles, detallados en el **Apéndice II**.

I.2.- FUNDAMENTOS DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN

1.2.1.-GENERALIDADES

Aunque la soldadura por fricción aparenta ser un proceso simple [2], es un proceso complejo, interrelacionado con:

- La generación de calor, disipación y abrasión de superficies comunes generadas por fricción.
- Deformación plástica, trabajado en frío y recristalización del metal calentado a temperaturas elevadas.
- Interdifusión de materiales y penetración macroscópica de fragmentos de metal desde una superficie a la otra y viceversa.
- La continua formación y destrucción de conexiones entre las superficies de fricción.

Los principios de la fricción siempre han sido orientados a la necesidad de mejorar los mecanismos y ensambles de máquinas, reduciendo la fricción entre ellos. La resolución de dichos problemas busca reducir el calor generado en las conexiones que están sujetas a fricción, a la eliminación de causas que afecten la interferencia entre las superficies de fricción, etc. Como puede verse, todos estos problemas son opuestos a los de la soldadura por fricción. Sin embargo, los fundamentos de la soldadura por fricción podrían ser desarrollados sobre la base de los principios de la fricción.

I.2.2.-CONTACTO ENTRE SUPERFICIES ADYACENTES

La superficie de un cuerpo sólido tiene irregularidades microscópicas en forma de proyecciones desiguales y ásperas. Aun en superficies de pulido óptico, la altura de estas proyecciones excede los $100\text{\AA}$ es decir, el contacto entre dos superficies no es continua sino intermitente. Una manera de representar dos superficies de contacto podría ser como se muestra en la figura 1.1, en la cual se distinguen las siguientes superficies :

(a). Superficie nominal (S_n), es una superficie ideal, perfectamente plana y totalmente libre de contaminantes. Representa la superficie geométrica del material

$$S_n = a \times b$$

(b). Superficie de contacto curvada, S_k , representa la superficie total de las crestas y valles del material: $S_k = \text{Superficie de crestas} + \text{Superficie de valles}$

(c). Superficie de contacto físico, S_f , representa el área total de las superficies físicas de contacto: $S_f = \sum_{i=1} s_f$

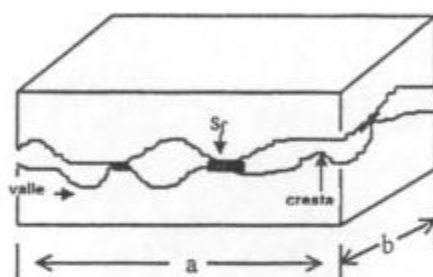


Fig.1.1.-Modelo de una superficie rugosa.
La línea gruesa representa las superficies de contacto físico.

La superficie de contacto físico (S_f) depende del grado de pulido de la superficie del material. El contacto entre dos superficies constituye solamente una fracción del área total de contacto. Un cambio de la carga implica una variación de la superficie física de contacto (S_f) desde $1/100,000 S_n$ a $1/100 S_n$. Esta variación es debida a la rotura de las proyecciones de la superficie, en la cual se incrementa el área individual de contacto. Al producirse un deslizamiento de ambos cuerpos posteriormente interactúan nuevas proyecciones, y así sucesivamente, hasta incrementar el S_f y desarrollar las microsoldaduras. La deformación entre estas superficies tiene un carácter elástico-plástico.

En el proceso de la soldadura por fricción acontecen repetidos y prolongados movimientos relativos de las superficies de fricción [3], algunas de las proyecciones son destruidas y la carga es distribuida entre las asperezas remanentes, algunas de ellas también estarán sujetas a la deformación plástica y a la destrucción. De manera que cuando las superficies son forzadas a tomar contacto entre sí a una presión relativamente alta, las asperezas de una superficie penetran en la otra, y si una superficie es movida lateralmente con respecto a la otra, algunas de estas asperezas se cortarán y las superficies limpias de metal que se generan de esta forma, se unen entre sí.

El incremento de la temperatura ablanda las superficies de fricción, por lo tanto se incrementa la superficie de contacto físico (S_f). El carácter elástico-

plástico se presenta cuando se aplica una carga suficientemente alta (P) a dos superficies en contacto. Luego, el área de contacto físico total (S_f) podría expresarse por la fórmula.

$$S_f = A + BP \quad (1)$$

donde,

A = Coeficiente que depende del acabado de la superficie

B = Caracteriza la habilidad del material para resistir la deformación plástica.

1.2.3.-LA FUERZA DE FRICCIÓN Y SU NATURALEZA

La fricción es la resistencia generada entre dos superficies adyacentes bajo la aplicación de una fuerza normal durante el movimiento relativo de una de las superficies en el plano de contacto. La fuerza de resistencia (que actúa en dirección opuesta a la fuerza tangencial) se denomina "fuerza de fricción". La relación de la fuerza de fricción a la fuerza normal entre dos cuerpos se llama "coeficiente de fricción". Según la referencia [4], al poner en contacto dos superficies nominales (ideales), se cumpliría la hipótesis molecular de Tomlinson y Bowden. Y cuando se ponen en contacto dos superficies rugosas, se cumpliría la hipótesis de Coulomb. Los enunciados de ambas teorías son:

(1).-Hipótesis Molecular

Según esta teoría, la causa de la fricción se explica por el hecho de que, cuando dos superficies se ponen en contacto hasta conseguir distancias del orden del parámetro reticular, actúan fuerzas de cohesión que provocan la soldadura de las microsuperficies, si éstas están en condiciones adecuadas. Por lo tanto, la fuerza de fricción es la fuerza tangencial que debe provocar la rotura de las uniones formadas ($S_f \cong S_n$).

(2).-Hipótesis mecánica

Se basa en la interpretación de las asperezas de las superficies de contacto, o sea la energía degradada por la fricción es la histéresis del ciclo tensión-deformación, que se disipa cuando la cresta de una superficie recorre la rugosidad de otra superficie ($S_f \ll S_n$).

I. V. Kragel'skiy desarrolló una teoría unificada de fricción mecánico-molecular. La fricción tiene naturaleza dual y resulta de la interacción mecánico-

molecular entre dos superficies en contacto. Según Amontons, la fuerza de fricción es una función de la fuerza normal de compresión, y el coeficiente de fricción es una constante.

$$F = \mu p \quad (2)$$

donde,

F = Fuerza de fricción

μ = Coeficiente de fricción de deslizamiento

p = Fuerza normal de compresión

Sin embargo, Coulomb estableció que el coeficiente de fricción disminuye con un incremento de la fuerza normal de compresión y depende de la velocidad de deslizamiento. Sobre la base de la teoría de fricción unificada, se ha establecido una relación, la cual es llamada ley general de la fricción seca y marginal.

$$F = S_f \alpha + \beta p \quad (3)$$

donde,

F = Fuerza de fricción

S_f = Suma de las áreas elementales de contactos físicos

α, β = Coeficientes que caracterizan al material de las superficies de fricción

p = Fuerza normal de compresión

Determinando el coeficiente de fricción (μ) como la relación de la fuerza de fricción (F) a la fuerza normal de compresión (p), y reemplazando en la ecuación (3), el coeficiente de fricción resulta:

$$\mu = \frac{F}{p} = \alpha \frac{S_f}{p} + \beta \quad (4)$$

Según la ecuación (4) para un caso general en un par de materiales, el coeficiente de fricción no es constante, pero depende de la fuerza normal de compresión. El primer término de la parte derecha de la ecuación superior es una corrección de la ley de Amontons. Existen casos en los cuales μ no depende de la fuerza normal de compresión (p), tal como:

(a). En el contacto plástico puro, al aumentar la fuerza de presión normal, la superficie física de contacto también aumenta, de manera que la relación de p/S_f es una constante.

$$\frac{p}{S_f} = \delta_T = \text{const.}$$

donde δ_T es el punto de fluencia, entonces reemplazando en (4) se tiene

$$\mu = \frac{\alpha}{\delta_T} + \beta = \text{const.} \quad (5)$$

donde, el coeficiente de fricción es una constante.

(b). Para grandes presiones

cuando $\frac{p}{S_f}$, es grande, entonces $\frac{S_f}{p}$ es pequeño

reemplazando en la ecuación (4), para propósitos prácticos se podría considerar la relación:

$$\mu = \alpha \frac{S_f}{p} + \beta \approx \beta = \text{const.}$$

1.2.4.-VARIACION DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Investigaciones modernas han demostrado que el coeficiente de fricción no es constante, varía no solamente con el cambio de la fuerza normal de compresión, sino también en función de otros factores [2]. I. V. Kragel'skiy e I. E. Vinogradova indican que existen al menos nueve factores que tienen influencia en el coeficiente de fricción:

- (1). La naturaleza del material y la presencia de películas sobre las superficies de fricción (lubricación, oxidación, contaminación).
- (2). La duración de contacto sin movimiento.
- (3). La velocidad de aplicación de la carga.
- (4). La rigidez y la elasticidad de las superficies de fricción.

- (5).La velocidad relativa de movimiento de las superficies de fricción.
- (6).La temperatura de las superficies de fricción.
- (7).La magnitud de la fuerza normal de compresión.
- (8).El carácter de la superficie de contacto entre los materiales y el área de la superficie de contacto.
- (9).El acabado de las superficies y la rugosidad.

De los factores señalados, los siguientes parecen ser aplicables a la soldadura por fricción:

- (1).La velocidad relativa del movimiento de las superficies de fricción.
- (2).La temperatura de las superficies de fricción.
- (3).La naturaleza del material y la presencia de películas superficiales.
- (4).La magnitud de la fuerza normal de compresión.
- (5).La rigidez y elasticidad de las superficies de fricción.

I.2.4.1.-INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD RELATIVA SOBRE EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Una ecuación general para la determinación del coeficiente de fricción en función de la velocidad, sería:

$$\mu = (a + bv)e^{-cv} + d \quad (6)$$

derivando μ con relación a v , se tiene

$$\frac{d\mu}{dv} = (a + b)e^{-cv} - c(a + bv)e^{-cv}$$

$$\frac{d\mu}{dv} = [(a + b) - ca - cbv]e^{-cv}$$

$$\frac{d\mu}{dv} = [a + b - ca - cbv]e^{-cv}$$

$$\frac{d\mu}{dv} = [a(1 - c) + b(1 - cv)]e^{-cv}$$

el valor es máximo, cuando $\frac{d\mu}{dv} = 0$, entonces

$$a(1 - c) + b(1 - cv) = 0$$

$a(c - 1) = b - bcv$, por lo tanto, la velocidad es:

$$v = \frac{a(1 - c) + b}{bc}$$

Según este análisis, al aumentar la velocidad (v), el coeficiente de fricción puede incrementar o disminuir constantemente, pasar a un máximo, o finalmente permanecer constante, según el valor numérico de los coeficientes a , b , c , y d dados en esta ecuación. Los valores de estos coeficientes dependen de las propiedades de los materiales, de la presión unitaria, la dureza, y de otros factores, los cuales deben ser determinados bajo condiciones de trabajo. La representación aproximada de esta ecuación se observa en la figura 1.2.

Una de las limitaciones de la ecuación (6), es que el coeficiente de fricción está determinado solamente como una función de la velocidad, sin considerar otros parámetros del proceso de fricción, tal como la presión, entre otros factores.

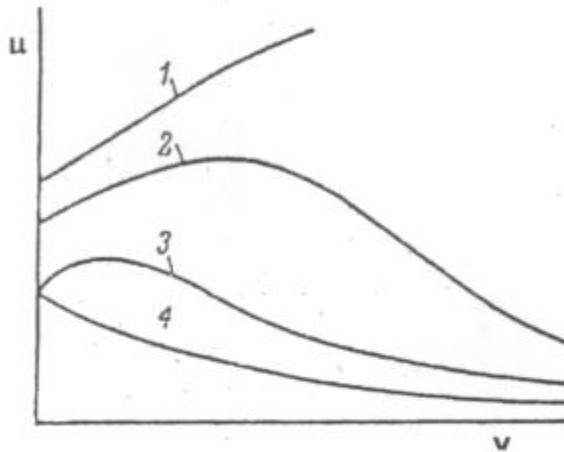


Fig.1.2.-Coeficiente de fricción vs. velocidad, para varias presiones unitarias

1 - presión unitaria pequeña

$$\frac{d\mu}{dv} > 0$$

2, 3-presiones unitarias medias

$$\frac{d\mu}{dv} = 0, \text{ puntos máximos}$$

4 -alta presión unitaria

$$\frac{d\mu}{dv} < 0$$

I.2.4.2.-INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

La temperatura en la interfase de la junta está determinada por las condiciones de la soldadura por fricción y las propiedades físicas del material. La temperatura en la interfase de la soldadura ejerce una gran influencia en las propiedades mecánicas de las juntas y el obtener dicha temperatura por análisis analítico resulta muy complejo. Por ello se evalúa experimentalmente la determinación de la temperatura de la interfase.

Durante el proceso de soldadura por fricción, la temperatura adyacente a las superficies de contacto no permanece constante, debido a que la energía utilizada para superar la fuerza de fricción (interacción mecánico-molecular de las superficies) causa la generación de calor sobre las superficies elementales de contacto físico. En estos puntos calientes, podrían aparecer picos de temperatura de corta duración, causando un repentino incremento de la temperatura en las microproyecciones, para luego disminuir rápidamente, debido a la disipación de calor por parte del material.

El incremento de la temperatura en la interfase produce diversos cambios en el proceso. A temperaturas de 200 á 300°C, los lubricantes cambian sus propiedades, modificandose por lo tanto la fricción, por ejemplo de fricción marginal a fricción seca. Si la temperatura de la interfase es mayor que la temperatura de recristalización del material, las características físicas del material estarán sujetas a cambio.

El incremento de la temperatura de la interfase puede provocar la formación de compuestos intermetálicos, descomponer los aceites, producir cambios en la microestructura del material, facilitar la deformación y el forjado durante el proceso, etc.

1.2.4.3.-INFLUENCIA DEL ACABADO DE LAS SUPERFICIES DE FRICCIÓN Y EL GRADO DE SU CONTAMINACIÓN SOBRE EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

El coeficiente de fricción para un mismo par de materiales varía según el grado de acabado de las superficies. Se observa un incremento en el coeficiente de fricción en superficies rugosas, debido a que a mayores microproyecciones se generan fuertes atascamientos entre las superficies, y consecuentemente, resulta una mayor fuerza de fricción. En superficies muy pulidas también se produce un incremento en el coeficiente de fricción, debido al incremento de la fuerza de la interacción molecular entre las superficies de contacto.

El grado de contaminación de las superficies adyacentes tiene una considerable influencia sobre el proceso de fricción. Películas de varios lubricantes adsorbidos por estas superficies contribuyen a la disminución del coeficiente de fricción y al decaimiento de la intensidad de la generación de calor durante la fricción. La presencia de películas de óxidos y su espesor también influyen en el coeficiente de fricción. Así se tiene que:

- Finas películas de óxidos duros, disminuyen el coeficiente de fricción.
- Gruesas películas de óxidos blandos, incrementan el coeficiente de fricción.

1.2.5.-CALOR LIBERADO DURANTE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN

Según Vill [2], el calor liberado durante la soldadura por fricción determina los fenómenos que se desarrollan sobre las superficies de fricción, la eficiencia del proceso, la resistencia de la junta y los parámetros de soldadura. La temperatura desarrollada durante la soldadura por fricción depende de la intensidad del calor liberado (energía).

Una expresión analítica de la energía de calor, aplicable a la soldadura por fricción, podría ser obtenida a partir del calor liberado de una superficie de área elemental durante el proceso, unida por el radio: ρ y $\rho + d\rho$ (ver figura 1.3). La fuerza de fricción elemental que actúa sobre esta área pequeña es: $dS = 2\pi\rho d\rho$, conociendo además que: $F = \mu P = PS\mu$, reemplazando:

$$dF = \mu dS = 2\pi\mu\rho d\rho \quad (7)$$

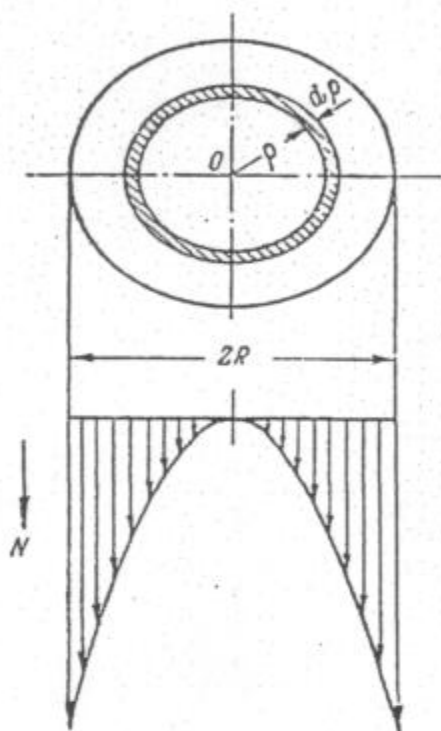


Fig.1.3.-Diagrama de liberación de calor para una soldadura por fricción.

Referencia: Vill [2]

$$dF = P\mu dS = 2\pi P\mu\rho d\rho \quad (7)$$

El momento de esta fuerza alrededor del eje de rotación (punto cero) es

$$dM = \rho dF = 2\pi P\mu\rho^2 d\rho \quad (8)$$

La energía térmica en el área elemental de fricción es encontrada a partir de la expresión:

$$dN = 1.02Mn \cdot 10^{-6} = 2.04\pi P\mu n\rho^2 d\rho \cdot 10^{-6} \quad (9)$$

donde,

F = Fuerza de fricción en kg

M = Momento de las fuerzas en kg mm

N = Potencia en Kw

P = Presión unitaria en kg/mm²

n = Velocidad de rotación en rpm

μ = Coeficiente de fricción

A partir de la ecuación (9), el diagrama de liberación de calor en relación al radio es una parábola cuadrática (figura 1.3). Asumiendo $\mu = \text{constante}$, por integración se obtiene la primera aproximación:

(a). Para el momento de fuerzas que actúan sobre la superficie total de fricción con un radio R.

$$M = \frac{2}{3} \pi P \mu R^3 \quad \text{kg mm} \quad (10)$$

(b). La potencia correspondiente

$$N \approx \frac{2}{3} \pi P \mu n R^3 \cdot 10^{-6} \quad \text{kw} \quad (11)$$

(c). La potencia unitaria promedio en relación al área de fricción nominal unitaria

$$N_{\text{unit}} = \frac{2}{3} P \mu n R \cdot 10^{-3} \quad \text{W / mm}^2 \quad (12)$$

Sobre la base de las expresiones indicadas, se podría concluir que para un par de superficies dadas, la energía térmica desarrollada durante la soldadura por fricción es determinada por la velocidad de rotación, la presión unitaria, la sección transversal y el coeficiente de fricción. La velocidad de rotación, y la presión unitaria varían para diferentes secciones. El producto de momento de fuerzas y la velocidad de rotación tienen dimensiones de potencia.

$$N = 1.02 \cdot 10^{-6} \cdot M \cdot n \quad (13)$$

Por lo tanto, para una velocidad de rotación constante, los momentos representan los valores de la potencia mecánica (y su equivalente de energía térmica) a una escala diferente.

1.2.6.- FENOMENOS EN LAS SUPERFICIES DE FRICCIÓN DURANTE EL PROCESO

La descripción es realizada según la figura 5 del **Apéndice I**. La fase inicial del proceso se desarrolla a bajas temperaturas y está caracterizada por una

fricción seca o fricción marginal (ejemplo en la soldadura de aceros). Durante el período inicial la temperatura promedio es de $100 - 120^{\circ}\text{C}$, lo que provoca la elevación de la temperatura en los puntos individuales de contacto. Debido a este fenómeno, y como resultado de las áreas expuestas de metal puro sobre ambas superficies de fricción, se producen las microsoldaduras. La energía usada para deformar los materiales es liberada en forma de calor y es lo que incrementa la temperatura. El proceso de la formación de microsoldaduras se incrementa con el tiempo, hasta un límite determinado.

La existencia del pico de torque puede ser explicado por la influencia simultánea de dos factores opuestos. Uno de estos factores podría ser el incremento rápido de unidades de microsoldaduras, los fenómenos producidos en las superficies de fricción, producto del cambio de temperatura, podría ser el otro factor.

Una reducción del momento producido por las fuerzas con un incremento simultáneo en la temperatura es solamente posible por dos razones:

(1).-Reducción de la resistencia del metal y, consecuentemente, una reducción del momento y la potencia requerida para la destrucción de las microsoldaduras.

(2).-Aparición de metal líquido sobre las superficies de fricción actuando como lubricante.

La presencia de dos factores actuando uno en contra del otro debe inevitablemente conducir a una autorregulación del proceso. El fenómeno de la autorregulación es confirmado por la convergencia del momento de la curva (y consecuentemente la potencia) para ciertos valores estacionarios.

Descripción de las fases del proceso:

Primera fase, caracterizada por el predominio de la fricción exterior (seca o marginal), se produce intenso calentamiento de las superficies de fricción.

Segunda fase, calentamiento de una delgada capa de material y la aparición de microsoldaduras, se caracteriza por un vigoroso incremento en el número de microsoldaduras.

Tercera fase, caracterizada por la presencia de altas temperaturas, ampliación de la zona de microsoldaduras sobre la superficie de fricción acompañada por la deformación plástica de material (upset), posiblemente sea en esta fase donde se produce la unión.

Cuarta fase, fijación de la soldadura por el mantenimiento o incremento de la fuerza axial, hay enfriamiento del material y cese de movimiento de rotación.

Podría decirse que en la primera y segunda fase del proceso de soldadura, el calor liberado es insignificante. En forma particular, el reparto sería el siguiente:

primera fase	1%
segunda fase	12%
tercera fase	87%

I.2.7.-DEPENDENCIA DE LA INTENSIDAD DE CALOR LIBERADO SOBRE LOS PARAMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA.

1.2.7.1.-INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ROTACION

Según Vill [2], generalmente se asume que el grado de intensidad de calor liberado en la soldadura por fricción aumenta y que el ciclo de soldadura disminuye como resultado de un incremento en la velocidad de rotación, si todas las otras condiciones son iguales. Sin embargo, el ciclo de soldadura depende de la velocidad de rotación (figura 1.4). Para velocidades de rotación menores a 800 rpm existe una relación inversa entre el ciclo de soldadura y la velocidad de rotación, y para velocidades mayores de 800 rpm (800-3000) existe una relación directa entre el ciclo de soldadura y la velocidad de rotación.

La relación entre la energía de calor liberado vs. la velocidad de rotación (ver figura 1.5) confirma lo dicho anteriormente. Así podría decirse que la reducción del tiempo de calentamiento y la disminución de la velocidad de rotación (figura 1.4) es dependiente del incremento de la potencia unitaria.

Una variación de la energía de calor liberada con relación a la velocidad de rotación sólo es posible bajo una considerable influencia de la velocidad de rotación sobre el coeficiente de fricción. Un análisis de la dependencia mostrada en las figuras 1.4 y 1.5 es solamente posible bajo la siguiente condición:

t Soldadura (seg)

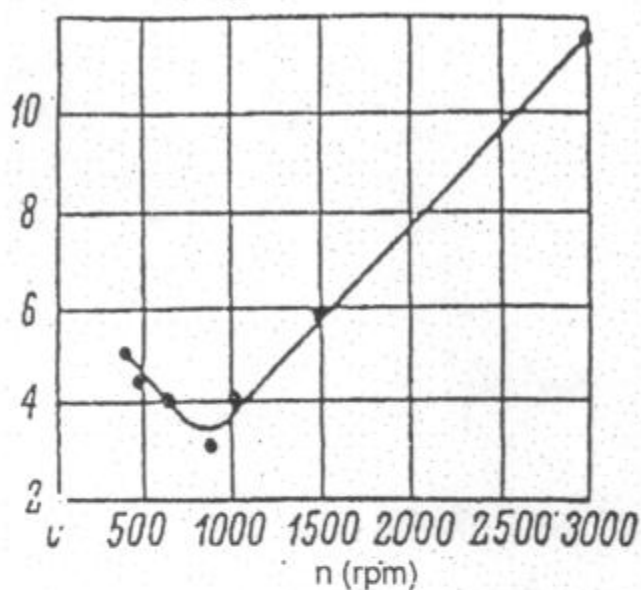


Fig.1.4.-Dependencia del ciclo de soldadura sobre la velocidad de rotación.
Material: acero St.3
 $P = 5 \text{ kg/mm}^2$
upset = 5 mm.

N_{unit} W/mm²

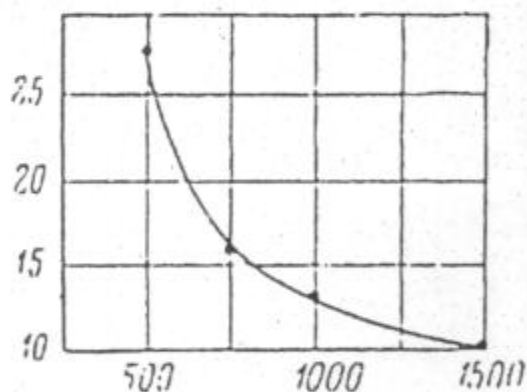


Fig.1.5.-Energía del calor liberado como una función de la velocidad de rotación.
material = acero St.3
diámetro = 20 mm.
 $P = 6 \text{ kg/mm}^2$
upset = 5 mm.

$$\mu = \frac{k}{(n\rho)^2} \quad (14)$$

reemplazando en las ecuaciones (8) y (9) conducen a:

$$M = 2\pi P \frac{k}{n^2} R \text{ kg mm} \quad (15)$$

$$N \approx 2\pi P \frac{k}{n} R \cdot 10^{-6} \text{ Kw} \quad (16)$$

$$N_{\text{unit}} = 2P \frac{k}{nR} 10^{-3} \text{ W / mm}^2 \quad (7)$$

k, es un coeficiente igual al cuadrado de la velocidad lineal (mm^2/min^2). El valor numérico depende de las propiedades del material, por ejemplo para un acero al carbono, $k = 8 \cdot 10^7 \text{ mm}^2/\text{min}^2$. Las ecuaciones obtenidas describen aproximadamente las relaciones experimentales y podrían aplicarse en el proceso de soldadura por fricción para aceros.

1.2.7.2.-INFLUENCIA DE LA PRESION UNITARIA

Según Vill [2], la potencia varía aproximadamente en proporción a la presión unitaria y, consecuentemente, el coeficiente de fricción es prácticamente independiente de la presión. La presión unitaria es de gran importancia en el proceso de calentamiento y en la fase final del proceso de soldadura. En general, la presión unitaria para el calentamiento y la formación del upset pueden ser diferentes. El incremento de la presión axial debe coincidir con el instante de frenado de la pieza en rotación. La presión axial puede ser aplicada al proceso mediante tres formas:

- por simple aplicación
- por etapas
- por un incremento constante de la carga

La aplicación de la presión por etapas tiene ventajas tecnológicas: ya que incrementa la resistencia de la junta y permite conducir el proceso de calentamiento a baja presión en comparación con el ciclo de presión constante.

I.3.- DEFORMACION EN LA ZONA DE SOLDADURA

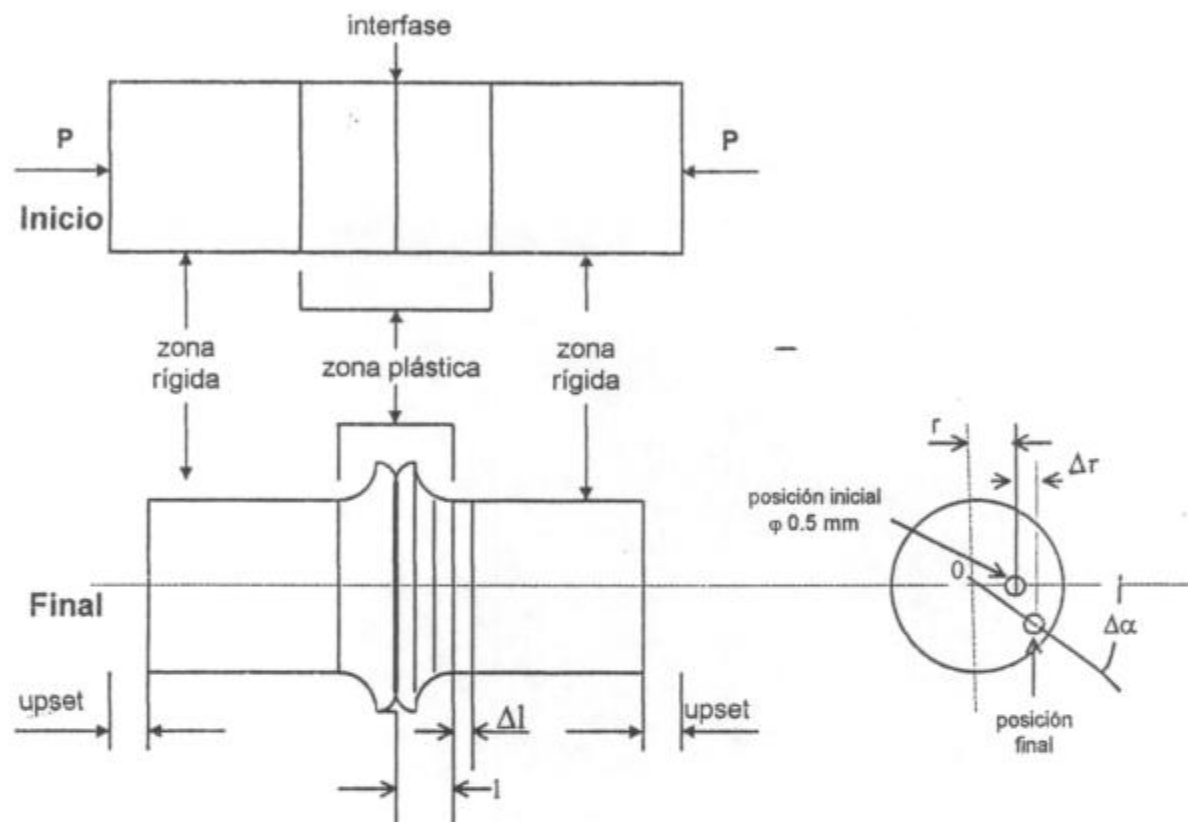


Fig.1.6.-Representación de la muestra antes y después del proceso, indicando los cortes correspondientes y las coordenadas del alambre después de la deformación.

La deformación de los materiales durante la soldadura por fricción ha sido estudiada por Seregin [5] y Seregin and Sabantsev [6]. Para la determinación del grado de deformación se contaron con huecos de diámetros de 0.5 mm taladrados en las piezas a soldar (normalmente a la superficie de contacto) a diferentes distancias del eje de rotación. Alambres delgados de un metal diferente fueron sellados en estos huecos. Después del proceso de soldadura los alambres sufrieron un desplazamiento radial y tangencial. Las muestras fueron cortadas por capas para la determinación del incremento del radio y del ángulo de desplazamiento (ver figura 1.6). Para el desarrollo de dicho trabajo se emplearon dos juntas:

- acero / acero ($n=800$ rpm., $P = 3.2$ kg/mm²)
- acero / cobre ($n= 2000$ rpm., $P = 2$ kg/mm²)

Leyenda:

Δl = Desplazamiento del alambre sobre la longitud "l"

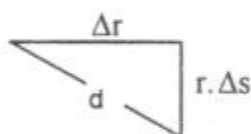
Δs = Incremento del sector de arco en la dirección tangencial

Δr = Incremento del radio en la dirección radial

$\Delta \alpha$ = Incremento del ángulo α sobre la longitud de Δl

El desplazamiento del alambre en la longitud Δl fue fijado en la dirección radial por el incremento del radio Δr , y en la dirección tangencial por el incremento del arco, donde: $\Delta s = r \cdot \Delta \alpha$

El desplazamiento relativo en cada sección es determinado a partir de la figura,



$$d = \sqrt{\Delta r^2 + \Delta s^2}, \text{ pero } \gamma = \frac{d}{\Delta l}, \text{ luego}$$

$$\gamma = \tan \beta = \frac{\sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta s)^2}}{\Delta l} \quad (17)$$

Comparando el grado de deformación plástica en la soldadura por fricción con el grado de deformación plástica en tensión, el valor del desplazamiento relativo se expresa en términos de elongación relativa específica. Dicho valor ha sido determinado usando la relación de varias deformaciones características [7].

$$\varepsilon = \left(\gamma + \sqrt{1 + \gamma^2} \right)^{\frac{1}{1-k}} - 1 \quad (18)$$

donde,

ε = Alargamiento relativo específico

γ = Desplazamiento relativo, igual a la tangente del desplazamiento del ángulo β

k = Coeficiente para la deformación por corte

El grado de deformación se encuentra para cada capa Δl , la velocidad de deformación $u = \Delta \varepsilon / t$, donde u es la velocidad de deformación, $\Delta \varepsilon$ es el incremento de la velocidad relativa sobre la longitud Δl ; t es el tiempo empleado en la formación del upset de la muestra para una cantidad Δl ($t = \Delta l / i$, donde "i" es la velocidad de la formación del upset de la muestra).

La proporción del desplazamiento tangencial al desplazamiento radial en relación a la distancia desde la interfase de la junta se muestra en la figura 1.7. Se puede observar que el desplazamiento en la dirección tangencial es mayor que el desplazamiento radial. La magnitud del desplazamiento tangencial Δs al desplazamiento radial es mayor al aproximarse a la interfase de la junta y mientras sea menor la distancia a partir del eje de rotación. La zona afectada por la deformación plástica para el acero es de 2.5 mm y para el cobre de 4 mm.

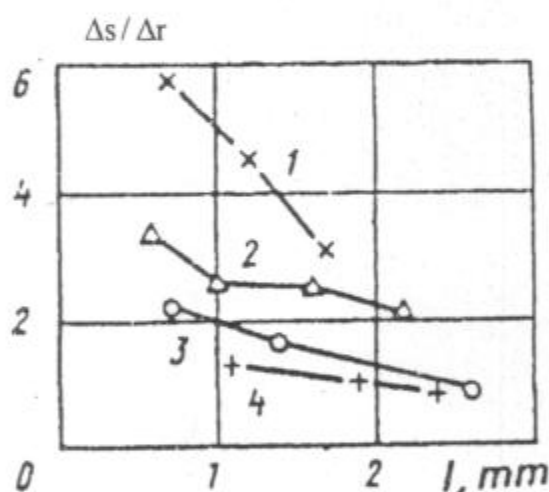


fig.1.7.-Relación del desplazamiento total tangencial al desplazamiento radial para puntos originalmente a distancias de 5, 7mm (1), 8mm (2), 6, 8mm (3), y 9mm (4), a partir del eje de rotación.

(1 y 2 : Acero 40; 3 y 4 cobre)

La velocidad de deformación se incrementa en la zona adyacente a la junta (ver figura 1.8). Si se asume que en la región de la zona de contacto (que no fue investigada) la velocidad de deformación se incrementa linealmente (líneas punteadas), la velocidad de deformación en dicha zona sería mayor en algunos órdenes de magnitud, por ejemplo en un ensayo a la tracción.

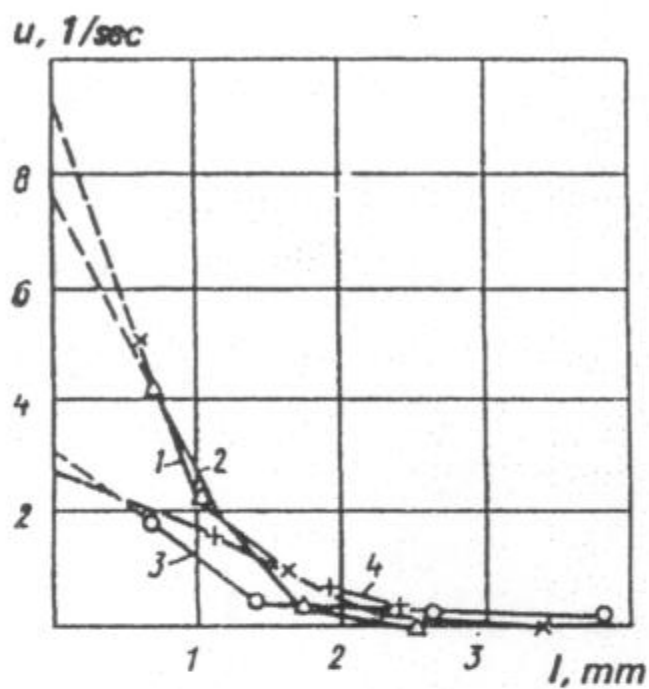


Fig. 1.8.-Velocidad de deformación del metal para puntos originalmente de 5 y 7 mm (1), 8 mm (2), 6 y 8 mm (3), y 9 mm (4), a partir del eje de rotación.
1 y 2 : acero 40
3 y 4 : cobre

Los resultados indican que durante el proceso de soldadura por fricción la deformación se desarrolla preponderantemente en la dirección circunferencial y que se alcanzan valores muy altos de deformación y de velocidad de deformación.

I.4.- UNION DE METALES AL ESTADO SOLIDO

1.4.1.-MECANISMOS DE UNION

La unión puede obtenerse cuando dos metales son puestos en íntimo contacto (distancias del orden del parámetro de red) y estén libres de contaminación en el instante de la unión [8]y [9]. En la figura 1.9 se muestra una representación esquemática de la fuerza de atracción-repulsión con relación a la distancia de separación entre dos átomos.

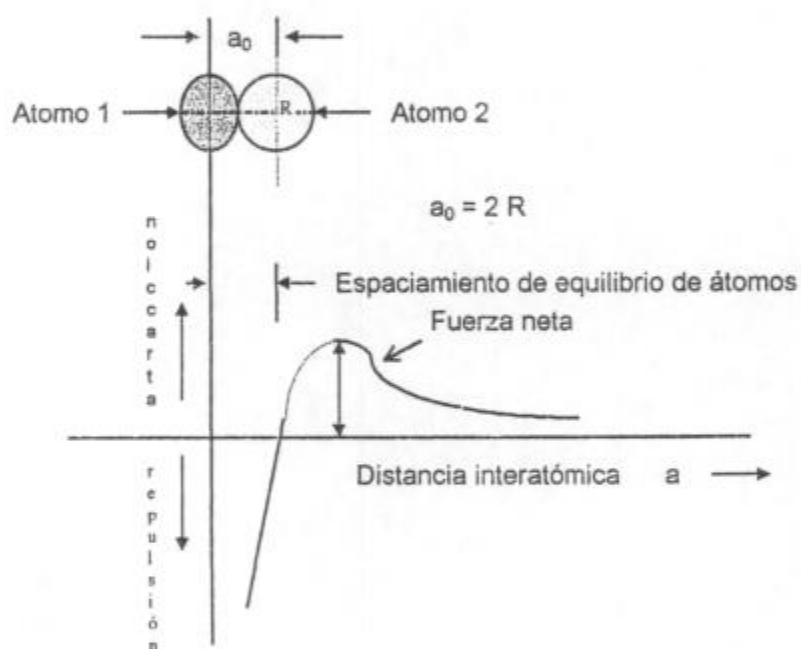


Fig.1.9.-Fuerza frente a la distancia de separación para un par de átomos. La distancia interatómica de equilibrio a_0 se alcanza cuando la fuerza entre los átomos es nula

Sabiendo que:

$(F) = \text{Fuerza de atracción } (F_a) + \text{Fuerza de repulsión } (F_r)$

$a_0 = \text{Distancia de equilibrio, punto en el cual se equilibran las fuerzas de atracción y repulsión:}$

$$F_a + F_r = 0$$

La fuerza de atracción predomina cuando los valores de "a" son grandes, mientras que la fuerza de repulsión predomina para valores pequeños de "a".

Cuando se trata de acercar dos átomos con carga de igual signo, se producirá una fuerza de repulsión electrostática, además del término F_r . Las posiciones estables de los átomos corresponden a una energía mínima. La forma de suministrar energía a este sistema puede darse por compresión para acercar los átomos entre sí (a menores distancias que a_0). Igualmente se necesita una fuerza de tracción para retirar los átomos.

El enlace metálico se caracteriza porque sus electrones de valencia se extienden entre los átomos en forma de una nube electrónica de carga de baja densidad. Dichos electrones están débilmente enlazados a los núcleos de los átomos positivos y pueden moverse fácilmente en el metal cristalino.

Si se da una diferencia significativa de electronegatividad entre los elementos que forman un compuesto intermetálico, puede ser que exista una cantidad significativa de transferencia electrónica en el compuesto. Para la unión Fe-Al las diferencias de electronegatividades son menores.

1.4.2.-LIMITACIONES DE LA ACCION DE LA UNION

Hay otras fuerzas que pueden afectar notablemente el comportamiento de la soldadura. Estas son las fuerzas de Van der Waals, que actúan entre las moléculas sin tener en cuenta sus especies químicas [10]. La magnitud de estas fuerzas a escala reducida no se conoce con exactitud, pero las mediciones efectuadas entre las superficies separadas por unos pocos micrones prueban que para placas planas de metal se mantiene la siguiente relación:

$$\sigma \approx \frac{1}{y^4} \times 10^{-3} \text{ N m}^{-2} \quad (20)$$

donde,

y = Distancia de separación entre las superficies (en micrones). Las fuerzas de Van der Waals disminuyen fuertemente con el incremento de la distancia.

Las películas de agua, aceite o grasa son perjudiciales, al ser fluidas tienen un buen contacto con las superficies de metal, estando fuertemente unidas allí, pero como no tienen resistencia, la resistencia de cualquier unión contaminada de esta forma se reduce considerablemente.

Las películas de óxido obstaculizan, pero no evitan, la soldadura por presión. Se considera que durante la deformación de una superficie, la película de óxido se fractura y se exponen, zonas de metal limpio que se unen a la superficie contraria siempre que dos zonas limpias se pongan en contacto. A temperaturas elevadas, el óxido se dispersa en parte mecánicamente y en parte por la solución en el metal.

1.4.3.-LA NATURALEZA DE LA INTERFASE DE LA UNION

La calidad de la unión depende de la naturaleza de la interfase de la unión, el tipo y las propiedades de las aleaciones formadas durante la soldadura. Debido a que los metales a ser unidos son generalmente calentados durante el proceso de la soldadura, los diagramas de fase son muy útiles como indicadores de la composición de las fases en la junta. La interpretación de dichos diagramas es generalmente complicada tal es el caso de las aleaciones, donde la unión es usualmente hecha por algún componente de la aleación, el cual podría tener mayor afinidad por el metal par que otro, formándose entonces una película en la superficie.

En la unión de metales disímiles, generalmente tiende a formarse compuestos intermetálicos en la junta, los que disminuyen la calidad de la soldadura. Una forma de representar la interfase de materiales disímiles sería según se observa en la figura 1.10.

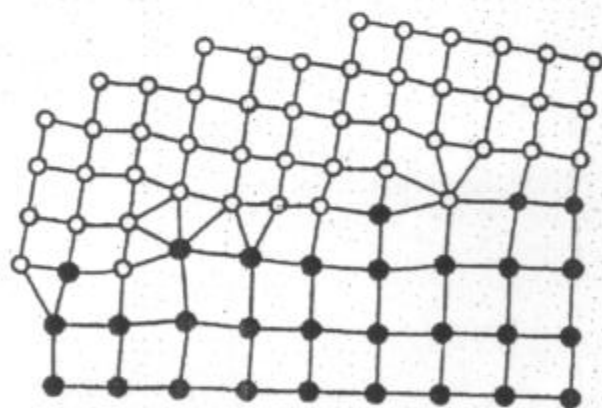


Fig.1.10.-Representación de la interfase en dos direcciones de coherencia y la unión entre fases disímiles adyacentes. Algunas dislocaciones atómicas deben ocurrir en la unión para permitir diferentes redes o redes orientadas diferencialmente por el ajuste de ambas.

REFERENCIAS

- [1].- D. E. Spindler. *"What industry needs to know about friction welding"*, Welding Journal, March 1994, pag. 37 - 42.
- [2].- Vill, V. Y., *"Friction welding of metals"*, translated and published by the American Welding Society, 1962, pag. 1- 38.
- [3].- J. F. Lancaster. *"Metallurgy of welding"*, 1965, pág. 107
- [4].- C. Ferrer. *"Desarrollo de un modelo de los fenómenos metalúrgicos que definen la fricción intermetálica"*, Rev. Metal, Madrid, 21 (1) 1985, pág. 26 - 28.
- [5].- S.A. Seregin, et al, the S. Ordzhonikidze Siberian Metallurgical Institute. *"The degree of plastic strain in the friction welding of metals"*, Welding Production, 1976, 8, pag. 42-44.
- [6].- S.A. Seregin, A.S.Seregin and V.P. Sabantsev, the Sibirsk Metallurgical Institute. *"The effect of the speed of rotation on the degree and rate of plastic deformation in the friction welding of metals"* Welding Production 1979, 11, pag.30-32.
- [7].-Osipov, V. G. *"Problems in metallurgy"* . A symposium dedicated to the 70th birthday of I. P. Bardin. Moscow. izd-vo AN SSSR, 1953, p. 427 - 364.
- [8].- M.S. Burton. *"Metallurgical Principles of Metal Bonding"*, The Welding Journal, (33), 11, Nov. pag.1051-1054.
- [9].- James F. Shackelford. *"Ciencia de los materiales para Ingenieros"* Tercera Edición. pág. 32-59.
- [10].- J. F. Lancaster. *" Metallurgy of Welding"*, fifth edition, 1994, pag. 5.

CAPITULO II : ANTECEDENTES

II.1.- INTRODUCCION

La soldadura por fricción es un proceso utilizado para la unión de metales disímiles. Sin embargo la información disponible es escasa y dispersa. La metalurgia de la soldadura de acero/aluminio es descrita en las referencias Jessop and Nicholas [1], Yashan and Doughy [2], y Elliot and Wallach [3].

II.2.- MECANISMOS DE UNION DE MATERIALES DISIMILES

El proceso de soldadura por fricción se describe por etapas (ver Apéndice I). Según los mecanismos propuestos por Sada y Bahrani [4], para la soldadura por fricción de materiales disímiles que posean propiedades mecánicas muy diferentes (por ejemplo acero/aluminio), la superficie fresca del metal duro es completamente cubierta con un revestimiento de metal blando durante las primeras etapas del proceso. Esto se debe al desprendimiento de fragmentos de material blando que posteriormente se adhieren a la superficie del metal duro. Este recubrimiento forma luego una capa inactiva, haciendo que el plano de fricción se mueva longitudinalmente en el seno del material blando.

Eliot y Wallach [3], han propuesto que posteriormente la unión metálica en la interfase entre la capa inactiva del material blando y la superficie del material duro se proceda de manera similar a la unión por difusión. El resultado final es la formación de una interfase de soldadura disímil entre el metal duro y la capa inactiva, y de una interfase de soldadura similar entre la capa inactiva y el blanco del metal blando.

II.3.- SOLDADURA POR FRICCION DEL ALUMINIO ACERO

En la unión del acero/aluminio, el mayor problema es la formación de compuestos intermetálicos, tal como se muestra en la figura 2.1 (diagrama Fe - Al). En general, no es deseable la formación de fases intermetálicas; sin embargo Haslett [5] dice que su presencia es inevitable, y que los compuestos intermetálicos podrían ayudar a eliminar las discontinuidades y cavidades. Este efecto positivo resulta poco probable en vista de que tales fases son frágiles.

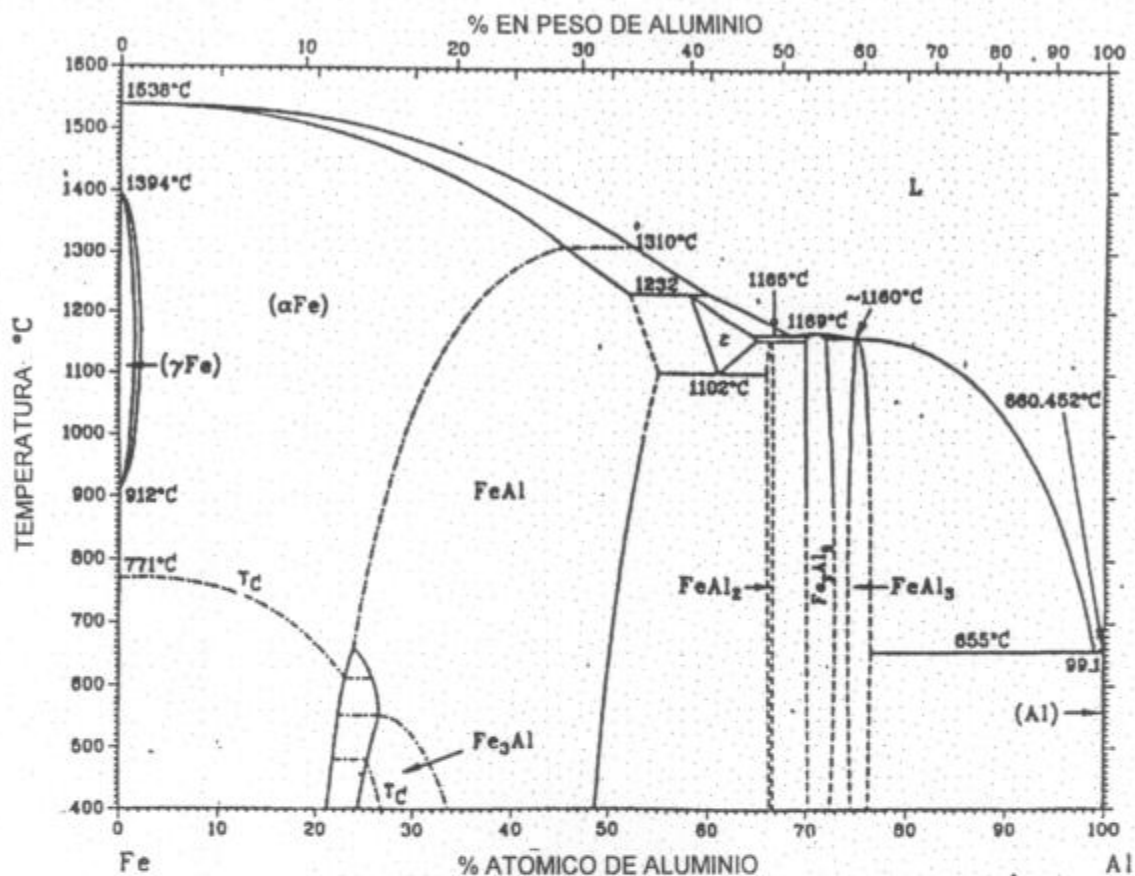


Fig. 2.1.-Diagrama de fase hierro - aluminio

Trutnev et al [6] estudiaron la relación entre las propiedades de las juntas de materiales disímiles que forman compuestos intermetálicos y el tiempo de formación de dichos compuestos. Por lo tanto, las soldaduras podrían ser satisfactorias si el periodo de incubación de las fases intermetálicas fuera mayor que el ciclo de soldadura. Sin embargo, la existencia de un periodo de incubación en la formación de fases intermetálicas es cuestionable [7], ya que el control estaría basado en la limitación del espesor de la capa de intermetálicos y no en el periodo de incubación.

II.3.1.- ASPECTOS METALURGICOS EN LA SOLDADURA POR FRICCIÓN CONVENCIONAL

La caracterización por ensayos mecánicos de la unión de metales disímiles no está normalizada. Para evaluar la calidad de la junta, Jessop and Nicholas [1] desarrollaron un ensayo de corte normalizado para probetas de 25 mm de diámetro. Este ensayo fue usado sistemáticamente para estudiar el efecto de la variación de los parámetros del proceso, el acabado, así como la contaminación de las partes a ser unidas. La aplicación de esta técnica obliga a que la muestra se fracture en la interfase de la junta. Los resultados de la evaluación de la junta acero/aluminio puro se observan en la figura 2.2. El área bajo la curva es determinada por integración.



Fig.2.2.-Típico diagrama corte vs. desplazamiento en mm para una junta aluminio/acero inoxidable.

II.3.1.1.-EFECTO DE LOS PARAMETROS

(1). VELOCIDAD ROTACIONAL

Según Jessop y Nicholas [1], hay una relación entre la energía de resistencia al corte de la junta y la velocidad de rotación, la cual se ilustra en la figura 2.3. En la junta aluminio puro/acero inoxidable, la velocidad de rotación estaría en el rango de 750 – 1800 rpm, en cambio la junta de acero inoxidable/aleación de aluminio podría ser mantenida normalmente a 975 rpm, con una tolerancia de $\pm 10\%$.

Estudios metalúrgicos de ambas combinaciones muestran que a velocidades mayores de 975 rpm se formarían compuestos intermetálicos, y a bajas velocidades (500 rpm) hay ausencia de compuestos intermetálicos. El deterioro de la resistencia de la junta se presenta a elevadas velocidades de rotación, probablemente esto pueda ser explicado por el incremento de la temperatura de la interfase.

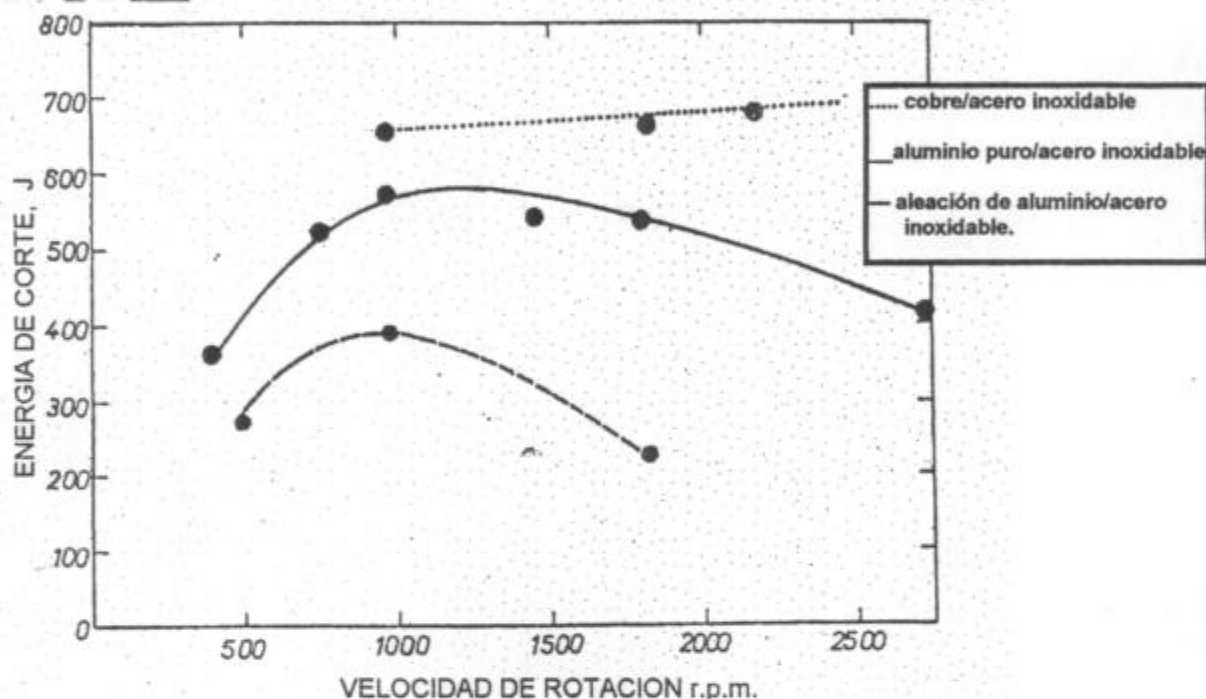


Fig.2.3.-Efecto de la velocidad de rotación sobre la resistencia al corte de la junta.

La diferencia de los niveles óptimos de la resistencia al corte entre el aluminio puro y la aleación de aluminio (580 y 400 J respectivamente) puede ser explicada por las condiciones termomecánicas que se dan durante el proceso de soldadura. El aluminio puro se endurece por trabajado en la zona adyacente a la interfase, por lo tanto se incrementa la resistencia, pero la aleación de aluminio sufre ablandamiento en la zona adyacente a la interfase de la junta, perdiendo resistencia.

(2).APLICACION DE LA FUERZA

Según la tabla 2.1, cuando la fuerza de fricción al igual que la fuerza de forjado varían, juntas o independientemente, tienen muy poco efecto sobre la resistencia de la junta en las tres soldaduras. Solamente en el aluminio puro, cuando la fuerza de forja es disminuida alrededor del 90% bajo lo óptimo hay una significativa reducción de la calidad de soldadura.

TABLA 2.1.-Tolerancia de la resistencia de la junta para variaciones de condiciones de soldadura.

variable	material unido al acero inoxidable	aluminio puro	cobre	aleación de aluminio
velocidad		± 40%	± 33%	± 10%
fuerza de fricción		± 40 - 20%	± 33%	± 25%
fuerza de forjado		± 75% - 60%		
upset		± 75 % - 60%	± 25%	± 25%
superficie rugosa del acero inox. (corte con arco de sierra)		intolerante (43%)*	intolerante (40%)	intolerante (75%)
superficie rugosa del otro metal (corte con arco de sierra)		intolerante (17%)	tolerante (0%)	intolerante (42%)
superficie contaminada (aceite o grasa)		intolerante (36 %)	tolerante (4 %)	intolerante (60 %)
* disminución de la resistencia				

(3).TIEMPO DE DESACELERACION

La disminución del tiempo de desaceleración a partir del valor nominal de 0.45 a 0.15 segundos, por el aumento de la presión de freno desde cero a 34.5 bar, no afecta la resistencia de la junta aluminio puro/acero inoxidable, sin embargo reduce la energía de corte en 16% para la junta aleación de aluminio/acero inoxidable.

II.3.1.2.- CONDICION DE LA SUPERFICIE

Para Jessop y Nicholas [1], el efecto de la rugosidad y la presencia de contaminación orgánica sobre la superficie a soldar con relación a la resistencia de la junta se muestra en la figura 2.4. El corte del acero inoxidable realizado con arco de sierra disminuye drásticamente la energía de corte en un 78%, 45%, y 40% desde valores óptimos de las juntas de aleación de aluminio, aluminio puro, y cobre/acero inoxidable respectivamente. Esto se debe a que el acero inoxidable no sufre deformación durante el proceso de soldadura, además la superficie física de contacto sería mucho menor que la superficie nominal. Si la soldadura fuera de materiales similares, aun teniendo superficies ásperas, ambos materiales se deformarían durante el proceso y aumentaría la superficie de contacto. Por lo tanto, el acabado de las piezas es crítico cuando se unen materiales disímiles. El incorporar pequeñas cantidades de contaminantes (grasas, lubricantes, etc) tiene marcado efecto en los materiales de aluminio. Este problema no se presenta en la junta cobre/acero inoxidable, debido a las altas temperaturas generadas durante el proceso (aproximadamente 1000°C para el cobre contra aproximadamente 600°C para el material de aluminio). Es evidente que el efecto de los contaminantes disminuye con el incremento de la temperatura.

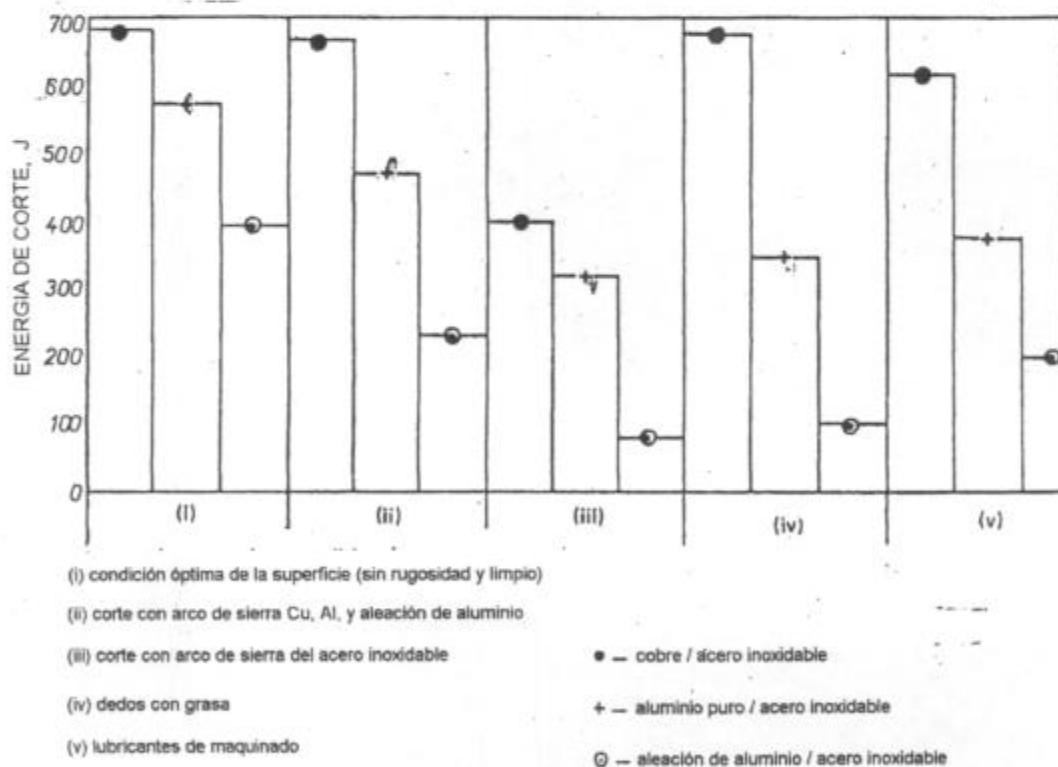


fig.2.4.-Efecto de la condición de la superficie sobre la resistencia al corte para las juntas aluminio puro, aleación de aluminio y cobre / acero inoxidable.

II.3.1.3.-ANÁLISIS DE LA CAPA DE INTERMETÁLICOS

La investigación metalúrgica de una capa de intermetálicos formada en la interfase de soldadura de acero inoxidable/aluminio fue realizada por Scott y Squires [8]. Ellos estudiaron el efecto de recocido de esta capa encontrando un apreciable crecimiento después de 4 horas a 500°C , el cual fue acompañado por una pérdida de resistencia en la junta. Un análisis cuantitativo por microanálisis de la interfase reveló la presencia de Al, Fe, Cr y Ni. Después de un prolongado recocido, la distribución de elementos en la capa de intermetálicos fue irregular. La estructura de la capa de intermetálicos corresponde a la fase FeAl_3 con algo de la fase Fe_2Al_5 .

Jessop y Nicholas [1], encontraron capas de intermetálicos en la interfase de las juntas de acero inoxidable/aluminio puro y acero inoxidable/aleación de aluminio soldadas por fricción, lo que indica que habría existido por interdifusión de elementos. Se midió el espesor de dichas capas en intervalos de 1 mm de longitud a través de la interfase de la junta acero/aluminio (ver figura 2.5).

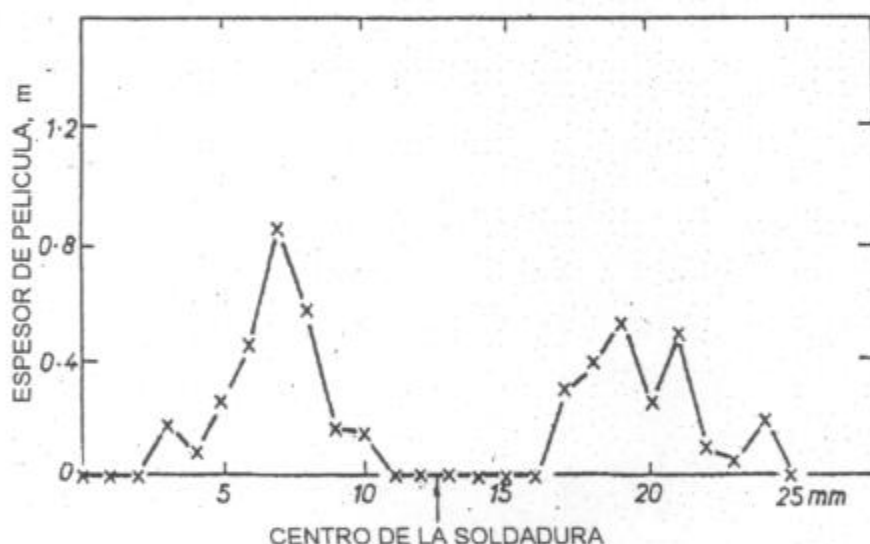


Fig.2.5.-Distribución de la película interfacial en la sección de la junta acero inoxidable / aluminio puro, unida por fricción bajo condiciones normales.

Esta muestra es típica, ya que en todas las secciones soldadas se presentó un mayor espesor de película de intermetálicos a mitad de radio y una región central desprovista de compuestos intermetálicos. El promedio del espesor de la película fue de $0.2 \mu\text{m}$. Esto indicaría que las áreas calientes estarían a mitad de radio, a pesar de que en la periferia la velocidad relativa es mayor y por lo tanto debería ser mas caliente.

Los cambios en el espesor de la capa de intermetálicos con relación a las condiciones de soldadura fueron consistentes con la teoría de la difusión, o sea que a elevadas temperaturas se forman capas más gruesas. El espesor promedio de la película de intermetálicos con relación a la resistencia promedio de la junta de aluminio puro/acero inoxidable se muestra en la figura 2.6. Alguna correlación indica que cuando el espesor de la capa de intermetálicos supera $1\mu\text{m}$ la resistencia de la junta disminuye, el rango aceptable sería de $0.2 - 1\mu\text{m}$. Estos valores también fueron encontrados por Mcewan y Milner [9]

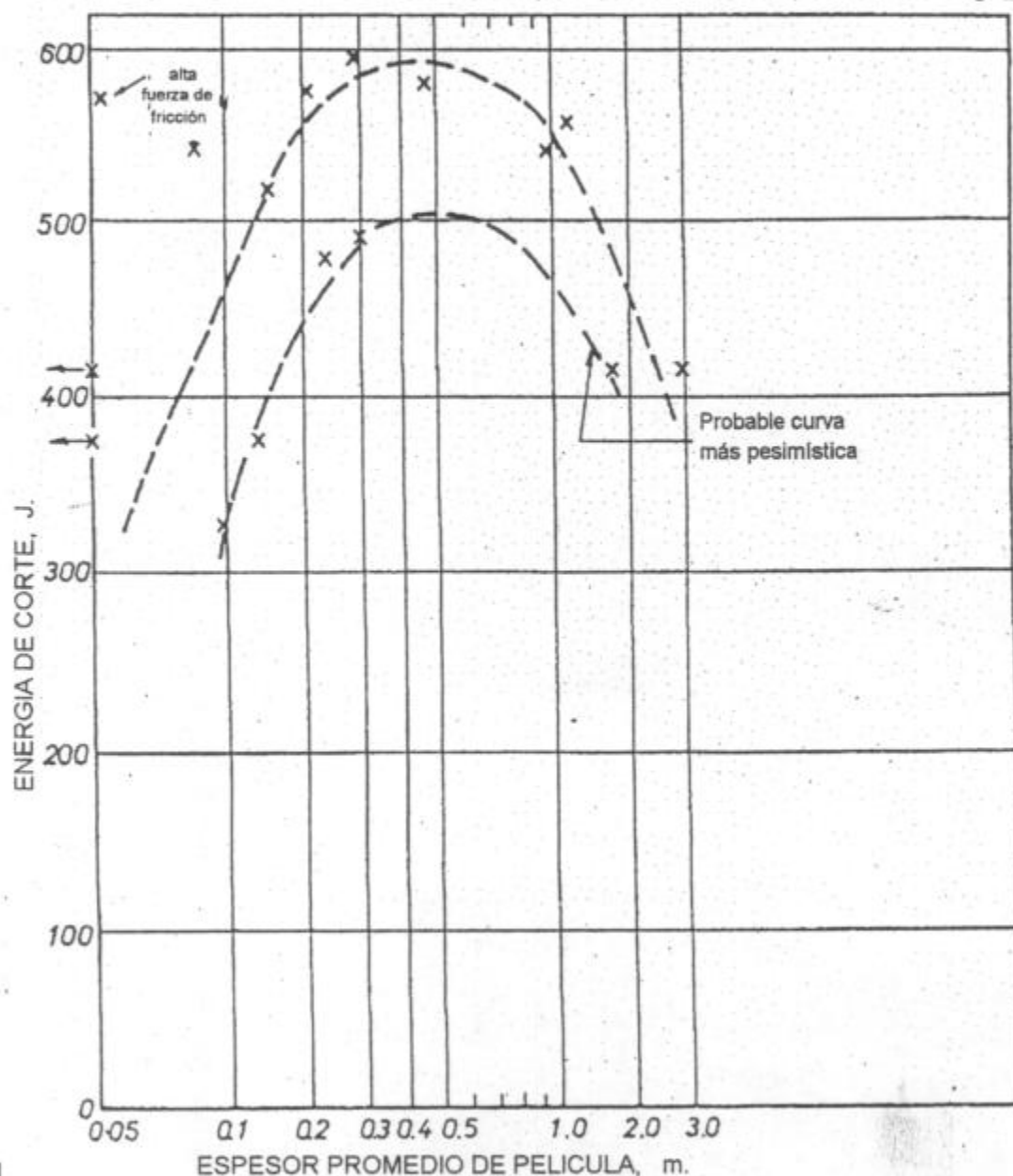


Fig.2.6.-Energía de corte vs. espesor promedio de película de intermetálicos para la junta aluminio puro / acero inoxidable

II.3.1.4.-EFECTO DE ELEMENTOS ALEANTES

Según Eliot y Wallach [3], la información de los efectos de elementos aleantes en la soldadura por fricción de acero/aluminio es muy escasa comparada con la existente sobre el proceso de unión por difusión. En la junta de un acero dulce con una aleación de aluminio conteniendo Mg, Si, Zn ó Cu, el efecto es más complejo en comparación con una junta de acero/aluminio puro. No está aún claro cual de estos elementos afecta la calidad de la soldadura. Sin embargo, se especula que el cobre podría evitar el crecimiento de la película de intermetálicos.

II.3.1.5.-USO DE INTERLAYERS

Según Eliot y Wallach [3], la junta por fricción de acero inoxidable/aluminio puro inoxidable parece ser un proceso controlable, mientras que en aleaciones de aluminio es común insertar un interlayer de aluminio puro para facilitar la unión. Hartwig and Kouptsidis [10] obtuvieron soldaduras sanas de aluminio/acero inoxidable en tubos con diámetro de 60 mm con un electroplateado de plata de 50 μm de espesor sobre el acero inoxidable. La película de plata permanece virtualmente intacta y aparentemente sin intermetálicos. Estas juntas mostraron buena resistencia y soportaron resistencia térmica de hasta 250⁰ C.

El acero electroplateado con cromo es particularmente recomendable en las aleaciones de aluminio con contenido de magnesio o silicio, a efectos de prevenir el crecimiento de capas de intermetálicos después y durante su uso a altas temperaturas (alrededor de 360⁰C). Sassani and Neelam [11], dan datos tecnológicos se muestran en la tabla 2.2, además en el Apéndice II se mencionan referencias.

TABLA 2.2.- Materiales disímiles y el uso de posibles interlayers

unión de materiales	tipo de soldadura	posible interlayer
aleación de aluminio / aleación de magnesio	no soldable	aluminio
latón / cobre	no soldable	aluminio
bronce / acero dulce	no soldable	aluminio, bronce
aleaciones de magnesio/aleaciones de magnesio	no soldable	aluminio
aleaciones de magnesio/acero inoxidable	no soldable	aluminio
níquel / titanio	no soldable	aluminio
niobio / acero inoxidable	no soldable	aluminio
acero inoxidable / titanio	soldadura frágil	aluminio
acero inoxidable / aleaciones de zirconio	soldadura frágil	aluminio

II.3.2.- ASPECTOS METALURGICOS EN SOLDADURA DE FRICCION POR INERCIA.

II.3.2.1.-EFECTO DE LOS PARAMETROS DE SOLDADURA

Las fases de la soldadura de fricción por inercia se describen en el Apéndice I. Yashan y Doughty [2] realizaron experiencias en la soldadura aluminio 1100/acero inoxidable 316. La figura 2.7 muestra que, para todas las presiones de calentamiento y la variación del momento de inercia, la resistencia de la junta se incrementa con el incremento de la energía específica, hasta un valor máximo, y luego disminuye la resistencia para valores altos de energía específica. A energías específicas bajas, se forma una soldadura de pobre calidad, probablemente debido al insuficiente calentamiento de las superficies de fricción. Incrementando la energía específica, se provee suficiente calor a la interfase produciéndose soldaduras sanas.

Cuando la energía específica es posteriormente incrementada, se produce un calentamiento adicional en la interfase y, por lo tanto, una disminución en la resistencia de la junta, debido a la formación de compuestos intermetálicos. La forma de las curvas es similar para ambos tamaños de volante. La máxima resistencia ocurre aproximadamente a la misma energía específica, esto indica que la resistencia de la junta es más una función de la energía específica que de la velocidad de rotación.

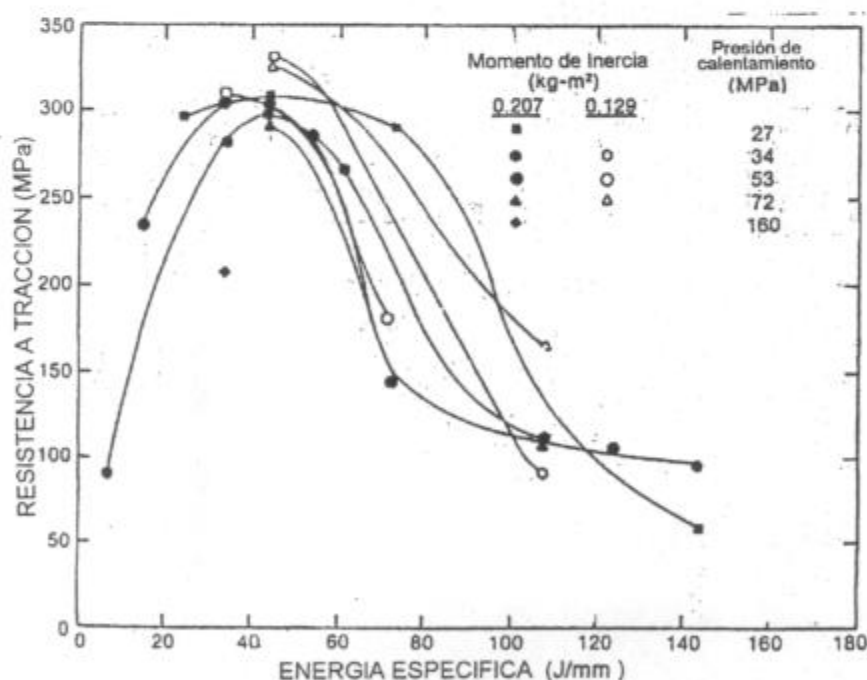


Fig.2.7.-Relación entre resistencia a la tensión y energía específica a varias presiones de calentamiento.

II.3.2.2.-INTERDIFUSION

Yashan y Doughty [2] determinaron la profundidad de penetración del hierro, cromo y níquel a partir del acero inoxidable en el aluminio (ver figura 2.8). Esto fue también determinado por Perkins [12], quien atribuyó la profundidad de penetración (alrededor de $4\text{ }\mu\text{m}$) a la transferencia de material a ambos lados de la interfase por efecto termomecánico. Kreye y Wittkamp [13] rechazan los mecanismos de mezcla mecánica y proponen que el exceso de defectos puntuales generados por deformación plástica acelera la difusión. Además Eliot y Wallach [3] también señalan la importancia del aumento de la velocidad de difusión que resulta de una deformación concentrada en la interfase de la soldadura.

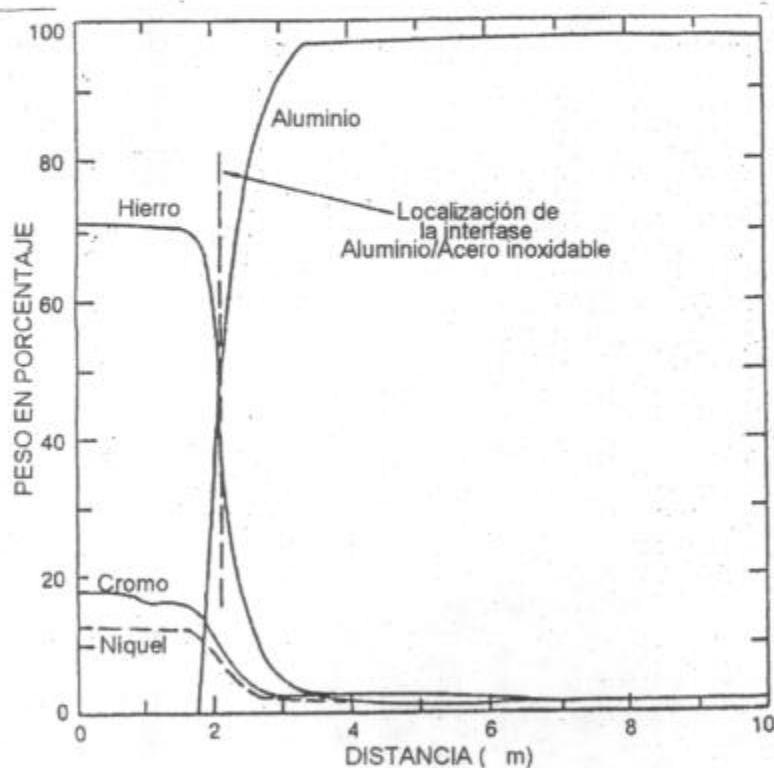


Fig.2.8.-Curvas de penetración de cuatro elementos medidos a mitad de radio.

Presión de calentamiento : 43 Mpa.

Energía específica : 39 J / mm^2

En experimentos de difusión empleando la técnica de trazadores radioactivos, Larikov, et al. [14], encontraron un rápido incremento en la autodifusión del hierro y en la difusión en volumen de cromo, níquel, cobalto y niobio en el hierro Armco, a elevadas velocidades de deformación ($1-100 \text{ s}^{-1}$). Trabajos experimentales realizados por Seregin [15], han indicado que la velocidad de deformación en la interfase de acero en la soldadura por fricción es aproximadamente tres órdenes de magnitud más altos que durante los ensayos estáticos de compresión.

II.3.2.3.-GEOMETRIA DE LA SUPERFICIE DE SOLDADURA DEL ACERO

Yashan y Doughty [2] realizaron estudios en soldaduras de aluminio 1100/acero inoxidable 316, los resultados se resumen a continuación:

JUNTA	RESISTENCIA DE LA JUNTA Mpa	
	superficie del acero plana	superficie del acero ángulo de cono 172°
Aluminio: 25.4 mm. de diámetro Acero inoxidable: 15.9 mm de diámetro	322	342

Los resultados obtenidos por Bell y Adolphson [16], en soldaduras de cobre OFHC/acero inoxidable 304L, se resumen así:

JUNTA	ANGULO DE LA SUPERFICIE DEL ACERO
Cobre: 28.6 mm. de diámetro Acero: 12.7 mm. de diámetro	174°

La diferencia de diámetros de materiales disímiles es en parte debida a la gran diferencia en la resistencia a la tracción. El diámetro del material blando se incrementa para proveer mayor restricción de material compensando de esta manera la gran diferencia de la resistencia a la fluencia.

El ángulo cónico de la superficie del acero promueve el flujo de metal blando desde el centro de la soldadura hacia la periferia, específicamente al comienzo del proceso de soldadura. Además parece mejorar la calidad de la junta, según referencia [2].

CONCLUSIONES

- El acabado y la contaminación de las superficies a soldar influyen en la calidad de la soldadura. El efecto de los contaminantes disminuye con el incremento de la temperatura.
- Existe una correlación entre el espesor de la película de intermetálicos y la resistencia de la junta aluminio puro/acero inoxidable. Normalmente se presentan altas resistencias cuando el espesor de la capa de intermetálicos está en el rango de 0.2 a 1.0 μm .
- Mediante el ensayo de corte se logra que la fractura se produzca en la interfase de la junta, lo que permite determinar la resistencia de la junta.
- La energía específica (energía cinética por área soldada) tiene efecto sobre la resistencia de la junta. Valores bajos no proveen suficiente calor y valores excesivos causan crecimiento de la capa de intermetálicos.
- Altas velocidades de deformación en las zonas de contacto del proceso de soldadura, podrían generar exceso de defectos puntuales y acelerar la velocidad de difusión.

REFERENCIAS

- [1].- T. J. Jessop. BSc(Eng), ACGI, Mweldl, E. D. Nicholas, Bsc, MIM, MWeldl, and W.O. Dinsdale. "*Friction welding dissimilar metals*", Advances in welding processes (Proceeding of the conference), 14-16 abril 70, The Welding Institute-Abington hall, Cambridge 71, 49.
- [2].- D. Yashan, S. Tsang, W. I. Johns and M. W. Doughty. "*Inertia friction welding of 1100 aluminum to type 316 stainless steel*", Welding Journal, August 1987, pag.27 - 37.
- [3].- S. Elliot and E. R. Wallach. "*Joining aluminium to steel part 2 - friction welding*", Metal construction, **13** (4), 1981, pag. 221 - 225.
- [4].- N. B., Sada, and A.S., Bahrani, 1981. "*Friction welding of metals: the role of the forge stage*". Proc. Spring Conf.Joining of Metals: practice and performance 2: 38 - 46. Coventry, England.
- [5].- T. H. Hazlett. "*Properties of friction welds between dissimilar metals*". Weld. Journal 1962, **41** (10), 450-s - 458-s.
- [6].- V.V., Trutnev et alt. "*The friction welding of steel 35 to aluminium alloy VAD-1*". Svar Proiz **20** (3) 18 - 19.
- [7].- Wallach E. R. "*Intermetallics in bi-metal solid-phase welds*", PhD. Thesis, 1975, Cambridge University.
- [8].- M. H., Scott, I. F., Squires "*Metallurgical examination of aluminium - stainless steel friction welds*". British Welding Journal 1966, March.
- [9].- K. J., McEwan and D. R., Milner. "*Pressure welding of dissimilar metals*". Brit. Welding J. , **9** (7), 1962.
- [10].- H. Hartwig and J. S. Kouptsidis. "*Two novel techniques for ultrahigh vacuum joints between aluminium and stainless steel*". Proc 7th Inter Vac Congr and 3rd Inter Conf Solid Surfaces, Viena, 1977, 259.
- [11].- F. Sassani and J. R. Neelam. "*Friction welding of incompatible materials*". Welding research suplement, November 1988, p. 264-s - 270-s.
- [12].- M. A., Perkins. 1979. "*Inertia and friction welding of aluminum alloy 1100 to type 316 stainless steel*". Y-2565, Oak Ridge Y-12 Plant, Oak Ridge, Tenn.
- [13].- H., Kreye, and Wittkamp, I. 1977. "*Gefügeänderungen und bindemechanismus beim reibschweißen*". Zeitschrift für metallkunde **68** (4): 253-259.

[14].- Larikov, L. N., Fal'chenko, V. M. Mazanko, V. F., Gurevich, S. M., Krharchenko, G. K., and Ignatenko, A. I. 1975. "*Anomalous acceleration of diffusion during the pulsed loading of metals*", Soviet Physics. technical Physics 20 (4): 287-288.

[15].- Seregin, S. A., Seregin, A. A., and Sabantsev, V. P. 1976. "*The degree of plastic strain in the friction welding of metals*". Welding production 23 (8): 42 - 44.

[16].- R. A. Bell, J. C. Lippold , and D. R. Adolphson. *An evaluation of copper - stainless steel inertia friction welds*. Welding Research Supplement , November 1984, p. 325-s - 332-s.

CAPITULO III : PARTE EXPERIMENTAL

III.1.- MATERIALES

En la tabla 3.1 se muestran los materiales de partida empleados en el proceso de soldadura por fricción.

Tabla 3.1.- Análisis de los materiales de partida, % peso

MATERIAL	CONDICION INICIAL	COMPOSICIÓN NOMINAL %							
		C	Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Al
Electrodo de Acero	Estirado en frío	0.08	0.40	0.30	-	-	-	-	-
Aleación Aluminio ANSI 1060	Extruido (recocido)	-	0.03	0.25	0.35	0.05	0.03	0.05	99.6

Referencia:Catálogo de CONARCO y Norma ASTM B221

Las dimensiones y la forma del maquinado de las superficies de contacto de ambas piezas se indican en la tabla 3.2. La variación geométrica de la superficie de contacto es recomendable para soldaduras de materiales similares, según referencias Yashan y Doughty [1], Bell y Adolphson [2], y Welding Handbook [3].

Tabla 3.2.- Dimensiones de los materiales de partida

MATERIAL	DIÁMETRO mm.	LONGITUD mm.	MAQUINADO
Electrodo	2.40	18.0	Extremo torneado, ángulo $160^{\circ} \pm 5$
Aluminio	9.20	19.20	Extremo torneado de cara plana

III.2.- EQUIPO UTILIZADO Y SU ACONDICIONAMIENTO

Se ha empleado un torno con un acondicionamiento adecuado, tal como se muestra en la figura 3.1. Las características del equipo utilizado son:

-Modelo	Turri T-160
-Distancia máxima entre puntas	750 mm.
-Diámetro máximo de pasaje sobre bancada	335 mm.
-Gama de velocidades	50 - 2500 r.p.m.
-Potencia	4.5 HP.
-Momento torsor	140 Kgm.

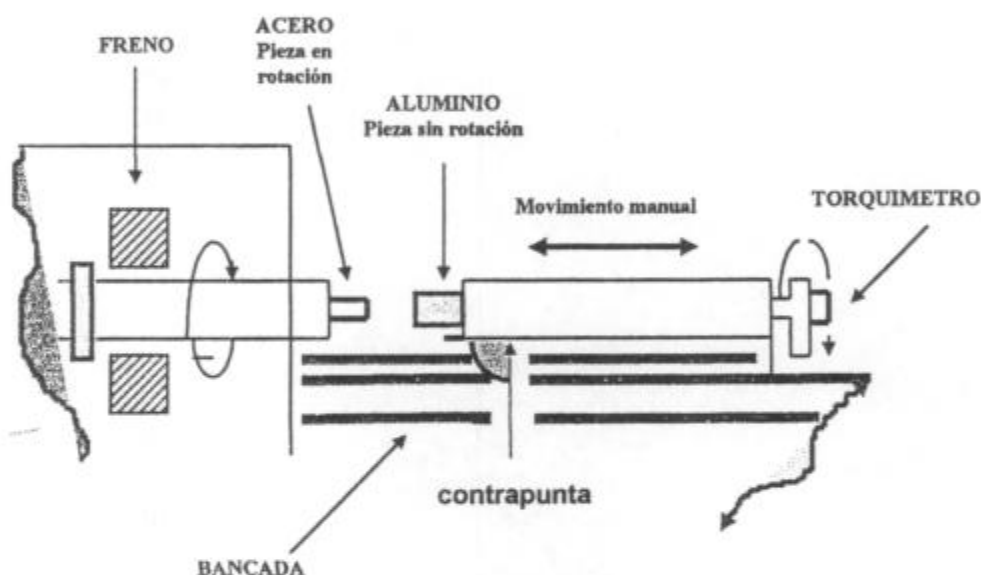


Fig.3.1- Esquema principal del equipo utilizado en la unión del acero/aluminio mediante la soldadura por fricción.

Para determinar el torque se utilizó un torquímetro, y para determinar la fuerza la axial se dispuso de un dinamómetro.

Además se emplearon herramientas auxiliares, como mordazas y anillos de soporte, para la fijación de las piezas a soldar.

III.3.- MONITOREO DEL PROCESO

Las superficies a soldar de los materiales de partida tuvieron maquinado fresco previo a la soldadura. Además se fabricó un pequeño lote con materiales de partida de maquinado de más de 24 horas con adherencia de grasa y aceite sobre las superficies a soldar, los cuales fueron consideradas para evaluar sólo la influencia de la contaminación de las superficies de contacto en la resistencia de la junta. Para la unión de las piezas con y sin maquinado fresco se utilizaron los mismos parámetros de soldadura. Las principales operaciones del proceso de soldadura se muestran en la figura 3.2.

Los parámetros fijados fueron:

Velocidad de rotación	: 1800- 2000 r.p.m. (0.226 - .265 m/seg)
Presión axial	: 70 - 200 N/mm ² (32 - 92 kg) ó (0.3 - 0.9 KN)
Penetración (upset)	: 2.6 - 2.8 mm.
Ciclo de soldadura	: 5 - 6 segundos

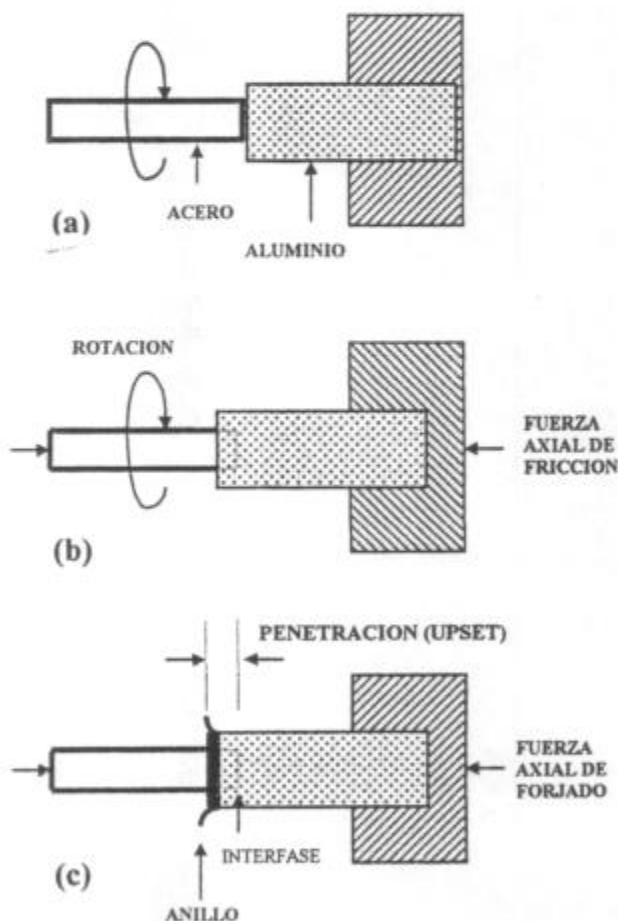


Fig.3.2 .- Proceso de soldadura por fricción convencional.

(a). La pieza de acero es colocada en el eje de rotación y la pieza de aluminio se fija en la contrapunta del tomo.

(b). Etapa de fricción
Bajo una carga axial ambas piezas son puestas en contacto, y mediante la fricción se genera suficiente calor, hasta que el aluminio empieza a fluir y a extrudarse, según el upset fijado.

(c). Etapa de forjado
La pieza en rotación es frenada y de inmediato se incrementa la fuerza axial, hasta que la soldadura adquiera rigidez.

Principales operaciones

(1). Fijación de las piezas

La pieza de acero es colocada en el eje de rotación y la de aluminio en el eje de la contrapunta, ambas piezas deben mantener el alineamiento axial.

(2). Se fija la velocidad de rotación en 1800 rpm y se pone en marcha el equipo

(3). Etapa de fricción

Ambas piezas son puestas en contacto bajo una presión axial de 70 N/mm^2 y de esta forma se inicia la fricción generando el calentamiento de la intercara de ambos materiales. Como resultado de la menor resistencia de fluencia del aluminio con relación al acero, el aluminio comienza a deformarse y a formarse el upset (penetración del acero en el aluminio, similar a una extrusión inversa), después de 4 segundos. la pieza en rotación es frenada y al instante se suelta el seguro de la contrapunta. Es muy importante que la desaceleración se realice en el tiempo más corto posible (décimos de seg.).

(4). Etapa de forjado

Después de soltar el seguro de la contrapunta se mantiene o se incrementa la presión axial por un periodo muy corto hasta fijar la soldadura. De esta manera finaliza el ciclo de soldadura obteniéndose la junta acero/aluminio, tal como se muestra en la figura 3.3.



Fig.3.3.- Probeta soldada

TOMA DE MUESTRAS

Se fabricaron alrededor de 300 juntas de acero/aluminio, de las cuales se seleccionaron aleatoriamente 10 grupos de 30 muestras, finalmente se tomaron 9 de cada una de los grupos haciendo un total de 90 muestras, las cuales se distribuyeron de la siguiente manera:

-Para microscopía, sin recocer	: 42
-Para microscopía, recocidas	: 10
-Para el ensayo a la tracción, sin recocer	: 25
-Para el ensayo a la tracción, recocidas	: 13
Total	90

Además se fabricaron 10 juntas de acero/aluminio con superficies de contacto de maquinado de más de 24 horas y adheridos de grasa y aceite, de las cuales se seleccionaron 3 muestras para el ensayo a la tracción. En la tabla 3.3 se muestra el resumen de la denominación de las muestras que se utilizaron.

Tabla 3.3.- Denominación de las muestras

A.- Muestras normales

TIPO DE ENSAYO	DENOMINACION	Nro. DE MUESTRAS
microscopía, sin recocer	$m_1, m_2, m_3, \dots$	42
microscopía ,recocidas	$mR_1, mR_2, mR_3, \dots$	10
ensayo a la tracción, sin recocer	$t_1, t_2, t_3, \dots$	25
ensayo a la tracción, recocidas	$Rt_1, Rt_2, Rt_3, \dots$	13
TOTAL DE MUESTRAS		90

m = muestra

R = recocido

t = tracción

B.- Superficies a soldar contaminadas

TIPO DE ENSAYO	DENOMINACION	Nro. DE MUESTRAS
ensayo a la tracción	$Ct_1, Ct_2, Ct_3, \dots$	3
TOTAL DE MUESTRAS		3

C = contaminada

t = tracción

PARTES CRÍTICAS EN EL MONITOREO DEL EQUIPO

(1)-Control del freno del eje de rotación.

(2)-Fijación del upset se controló de la siguiente manera: sólo el avance de la contrapunta mediante la manivela de mano (1 vuelta completa equivale a 4mm de avance), según la experiencia, se recomendó girar $\frac{3}{4}$ de vuelta la manivela.

(3)-Desactivación del seguro de la contrapunta, el cual fue realizado al instante de desactivar la pieza en rotación, con el fin de amortiguar la inercia del movimiento de rotación.

III.4.-RECOCIDO DE LAS MUESTRAS

Para el recocido de las muestras se utilizaron tubos de cuarzo transparente. Una vez preparado el tubo, las muestras fueron puestas en su interior y se extrajo el aire sometiéndose a un vacío de alrededor de 10^{-5} mm de Hg. Finalmente se inyectó gas argón con una presión ligeramente mayor a la atmosférica y, bajo estas condiciones, el tubo fue sellado, tal como se muestra en la figura 3.4. Las muestras fueron recocidas isotérmicamente a una temperatura de 550°C a tiempos variables. El horno utilizado fue de tipo tubular, cuyas características son:

Tipo de horno : Termoquar, tubular a resistencia eléctrica
 Temperatura máxima : 1200°C
 Zona de trabajo útil : 5 cm de longitud

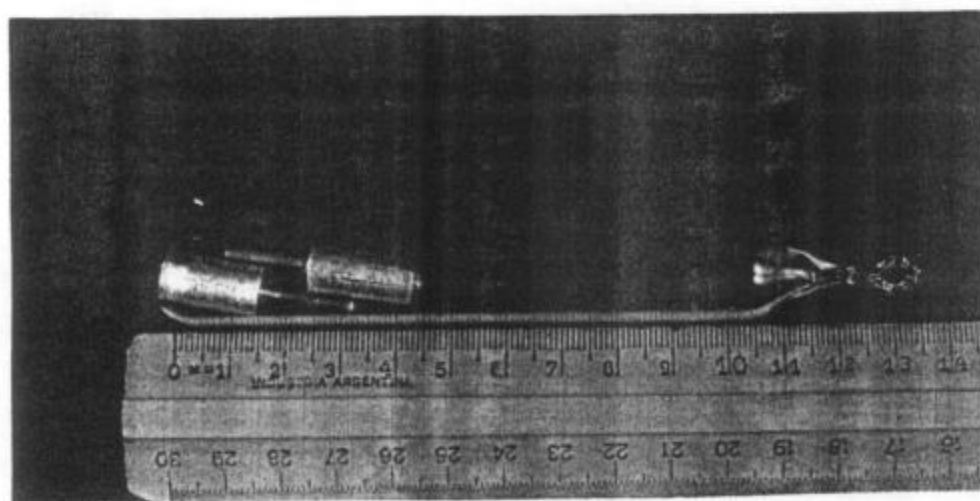


Fig.3.4.- Tubo de cuarzo conteniendo las muestras en atmósfera de argón.

El cronograma de muestras recocidas se resumen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4.- Cronograma de muestras con tratamiento posterior

Nro. de Muestras	24 h	100 h	138 h	144 h	300 h	360 h	604 h	690 h	1000 h
1.- Metalografía									
(2)	mR ₁	-	mR ₂	-	mR ₃	-	-	mR ₄	mR ₅
2.- Tracción									
(2)	Rt ₁	Rt ₂	-	-	Rt ₄	-	Rt ₆	-	-
(1)	-	-	-	Rt ₃	-	-	-	-	-
(4)	-	-	-	-	-	Rt ₅	-	-	-

III.5.- PREPARACION DE MUESTRAS PARA METALOGRAFIA

Las muestras fueron seccionadas axialmente mediante fresado, montadas posteriormente en resina termoplástica transparente. Para el desbaste se emplearon papeles de carburo de silicio 140, 320, 400 y 600 usando agua como lubricación. Las probetas fueron limpiadas ultrasónicamente en alcohol antes de pasar a las etapas siguientes.

En cada una de las etapas, tanto en el desbaste como en el pulido, se tuvo sumo cuidado en las preparaciones de las muestras, con el fin de evitar la formación del escalón en la interfase acero/aluminio, el cual dificulta la evaluación metalográfica [4]. Las etapas de pulido y los reactivos utilizados en el ataque de las muestras se resumen en la tabla 3.5. Se prepararon 52 muestras para microscopía, de las cuales la tercera parte fue desechada por presentar escalón en la interfase.

Tabla 3.5.- Pulido metalográfico y ataque de muestras soldadas Al-Fe

PULIDO	REACTIVOS UTILIZADOS EN EL ATAQUE
Media: Pasta de diamante de 5 μm , sobre un volante rotatorio cubierto de un paño.	1.- Nital al 2% : Revela la estructura del acero 2.- HF(48%)0.5ml, H ₂ O 99.5ml. : Revela estructura del aluminio
Fino : Pasta de diamante de 1 μm .	3.-Keller's, HF(48%) 0.5ml : Revela estructura del aluminio HCl 1.5ml, HNO ₃ 2.5ml, H ₂ O 95.0ml.
Final : Pasta de diamante de ¼ μm .	4.- H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , H ₃ PO ₄ , H ₂ O, en % Vol. : Revela la interfase

El proceso de ataque a las muestras se llevó a cabo bajo las siguientes modalidades:

- Ataque en dos etapas

.Para revelar la estructura del aluminio se usó el reactivo 2 o el reactivo 3

.Para revelar la estructura del acero se empleó el reactivo 1.

- Ataque en una etapa:

.Para revelar la interfase de la junta acero/aluminio se usó el reactivo 4.

III.6.- CARACTERIZACION

Para realizar la caracterización de las juntas soldadas, se repartieron en dos grupos de muestras, sin tratamiento posterior y con tratamiento posterior, los ensayos correspondientes se resumen en la tabla 3.6. A continuación se describen los equipos empleados.

Tabla 3.6.- Resumen de la caracterización de las juntas

TIPO DE ANÁLISIS	MUESTRAS SIN RECOCIDO	MUESTRAS CON RECOCIDO
Microestructura de materiales de partida	x	-
Análisis cualitativo SEM	x	x
Análisis Cualitativo Microanálisis	x	x
Análisis Cuantitativo SEM	x	x
Análisis Cuantitativo Microanálisis	x	x
Microdureza	x	x
Ensayo a la tracción	x	x
Fractografía SEM	x	x

III.6.1.MICROSCOPIA

(a). Banco de Microscopios Opticos Reichert-Mev, con iluminador adecuado para trabajar con luz polarizada, fuente de mercurio y toma de fotomicrografías. Se empleó para determinar la estructura bimetalica, crecimiento de la banda de compuestos intermetálicos en muestras con tratamiento posterior.

(b). Microscopio Electrónico de Barrido Phillips (PSEM-500), con aumentos de $12\times$ a $80000\times$; las muestras fueron recubiertas con una película de oro para mejorar la resolución. El barrido fue transversal a la línea de unión bimetalica y ayudó a identificar y determinar la presencia de compuestos intermetálicos en la interfase Al-Fe, tanto para muestras sin y con tratamiento posterior; también se analizó la fractografía de muestras fracturadas en el ensayo de tracción. Finalmente se completó con el análisis cualitativo de la interfase.

III.6.2.-MICROANALISIS

Microanálisis cualitativo y cuantitativo, equipo CAMECA-SX50, operando a una tensión de aceleración de 20 Kv y con una corriente de haz de 10 a 20 nA. Se realizaron barridos cuantitativos transversalmente a la línea de la junta para determinar el porcentaje atómico del aluminio y el hierro. El tamaño efectivo del volumen excitado en el análisis de un punto fue del orden de $1\mu\text{m}$, las lecturas realizadas fueron en escalones de $1\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, y $5\mu\text{m}$.

III.6.3.- MICRODUROMETRO

Microdurómetro Shimadzu, medición 400X, se empleó la escala Knoop con cargas de 25g para muestras que no fueron sometidas a tratamiento posterior y de 50g para muestras tratadas posteriormente, a un tiempo de 15 segundos. El barrido se realizó en la sección transversal de la unión, las mediciones se hicieron en escalones de 10 y $20\mu\text{m}$ tanto a la mitad de la unión como a mitad del radio de la línea de unión. Dichas mediciones ayudaron a determinar la zona afectada por el calor en el aluminio.

III.6.4.-ENSAYO A LA TRACCION

Para el ensayo de tracción se usó la máquina de ensayo Instron 1122, con celda de carga de 500 kg. Para evaluar la resistencia de la junta se emplearon tres tipos de probetas (ver figura 3.5).

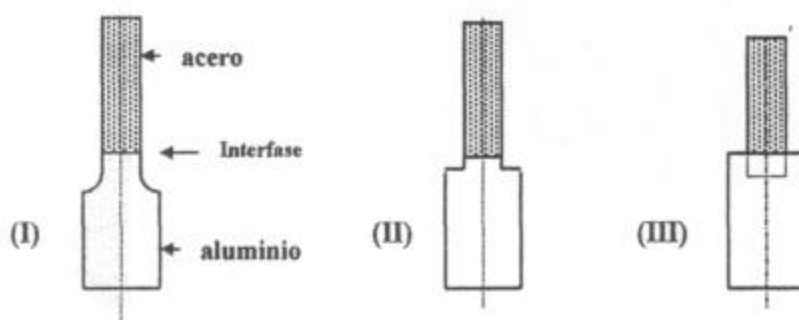


Fig. 3.5.- Tipo de probetas para el ensayo a la tracción.

Las tres probetas no están estandarizadas; sin embargo, a fines de investigación, resultaron útiles para evaluar y comparar la calidad de la junta. Todas las pruebas de tensión se llevaron a cabo a una velocidad de máquina de 1mm/min. Posteriormente, algunas muestras fueron seleccionadas para el análisis de la fractura de la junta.

En la evaluación de la resistencia de la junta no se han considerado las tensiones internas formadas durante el proceso de soldadura, asimismo se ha asumido que la unión es del 100%.

REFERENCIAS

- [1].- D. Yashan, S. Tsang, W. L. Johns and M. W. Doughty. "*Inertia friction welding of 1100 aluminum to type 316 stainless steel*", Welding Journal August, 1987, p. 27-37.
- [2].- Bell, R. A., Lippold, J. C., and Adolphson, D. R. 1984. *An evaluation of copper-stainless steel inertia friction welds*". Welding Journal 63 (1), pag. 325-s - 332-s.
- [3].- Welding Handbook. 1980. A. L. Philip, (3) , pag. 239-261. American Welding Society, Miami, Fla.
- [4].- T. J. Jessop, Bsc (Eng), ACGI, MWell, E. D. Nicholas, Bsc, MIM, MWeldI, and W.O. Dinsdale, W. O. 1978. "*Friction welding dissimilar metals*", Proc. 4th Conf. Advances in Welding Processes, 49 , pag. 48.

CAPITULO IV : RESULTADOS

IV.1.- EXAMEN METALOGRAFICO

IV.1.1.-MATERIALES DE PARTIDA

En la figura 4.1 se muestra la estructura metalográfica de un electrodo de acero.

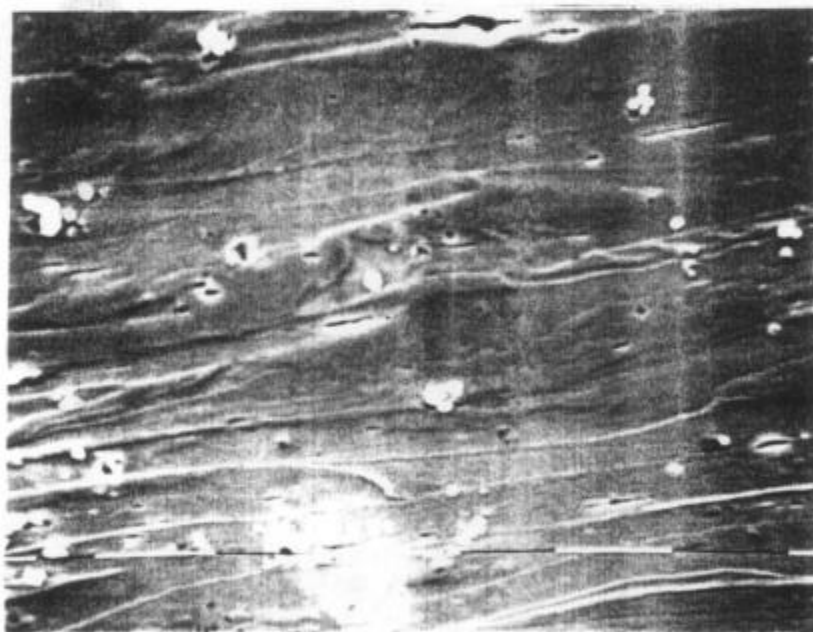


Fig.4.1- Fotomicrografia de la estructura de un electrodo de acero.

Granos elongados de ferrita y carburos en dirección del eje principal, atacado en nital al 2%, SEM, 1800x

En la figura 4.2 se muestra la estructura metalográfica del aluminio

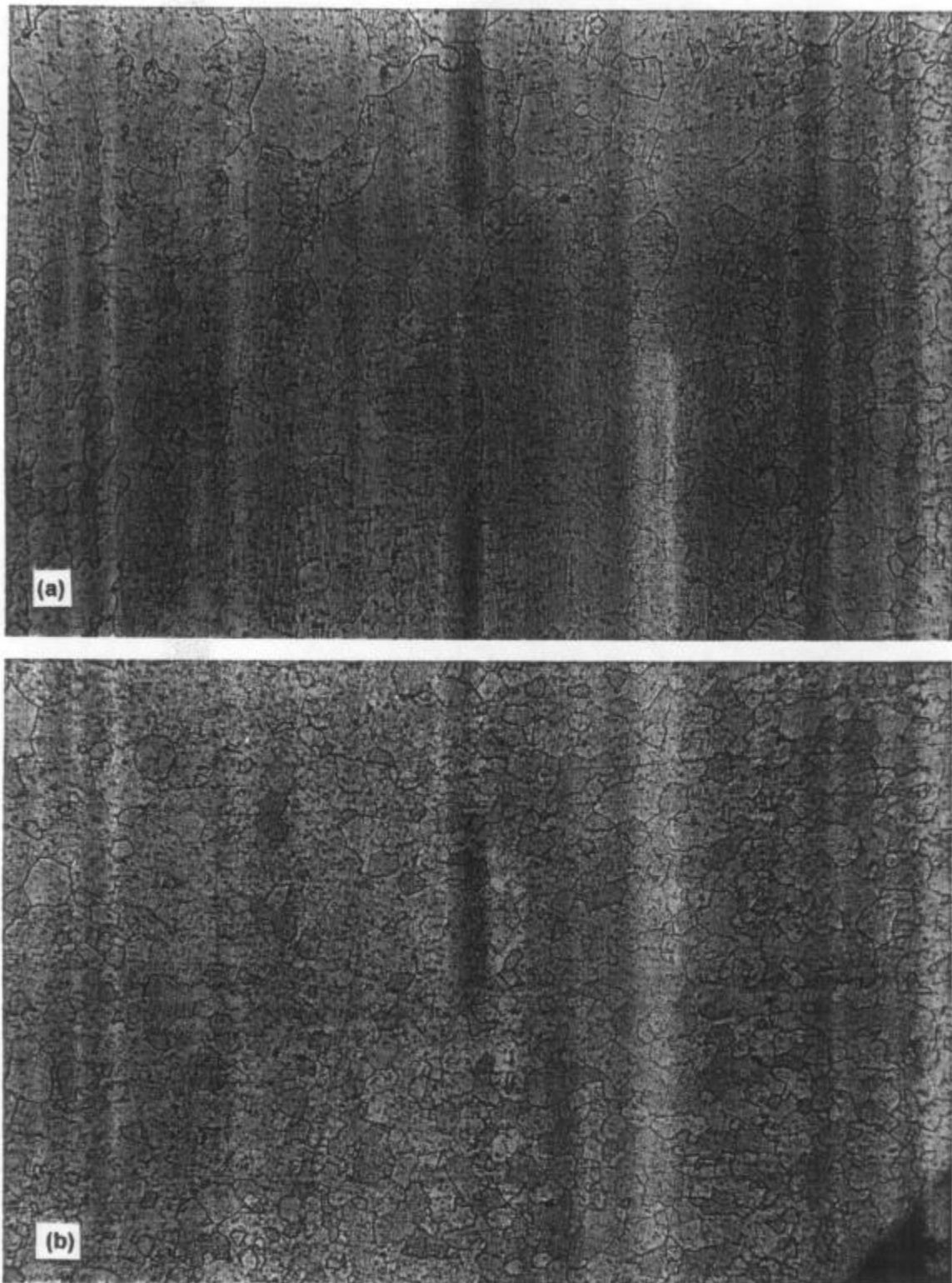


Fig.4.2.-Microfotografía de la Estructura del Aluminio
(a).Estructura con granos no deformados, ataque con reactivo keller's, 100x.
(b).La misma muestra de corte transversal al eje principal, ataque con reactivo Keller's, 100x.

IV.1.2.- ESTRUCTURA DE LA JUNTA ACERO/ALUMINIO

En la figura 4.3 se muestra la junta de la muestra m_{1a} con ataque en dos etapas. Asimismo se indica la interfase de la muestra m_{1b} con un ataque en una etapa.

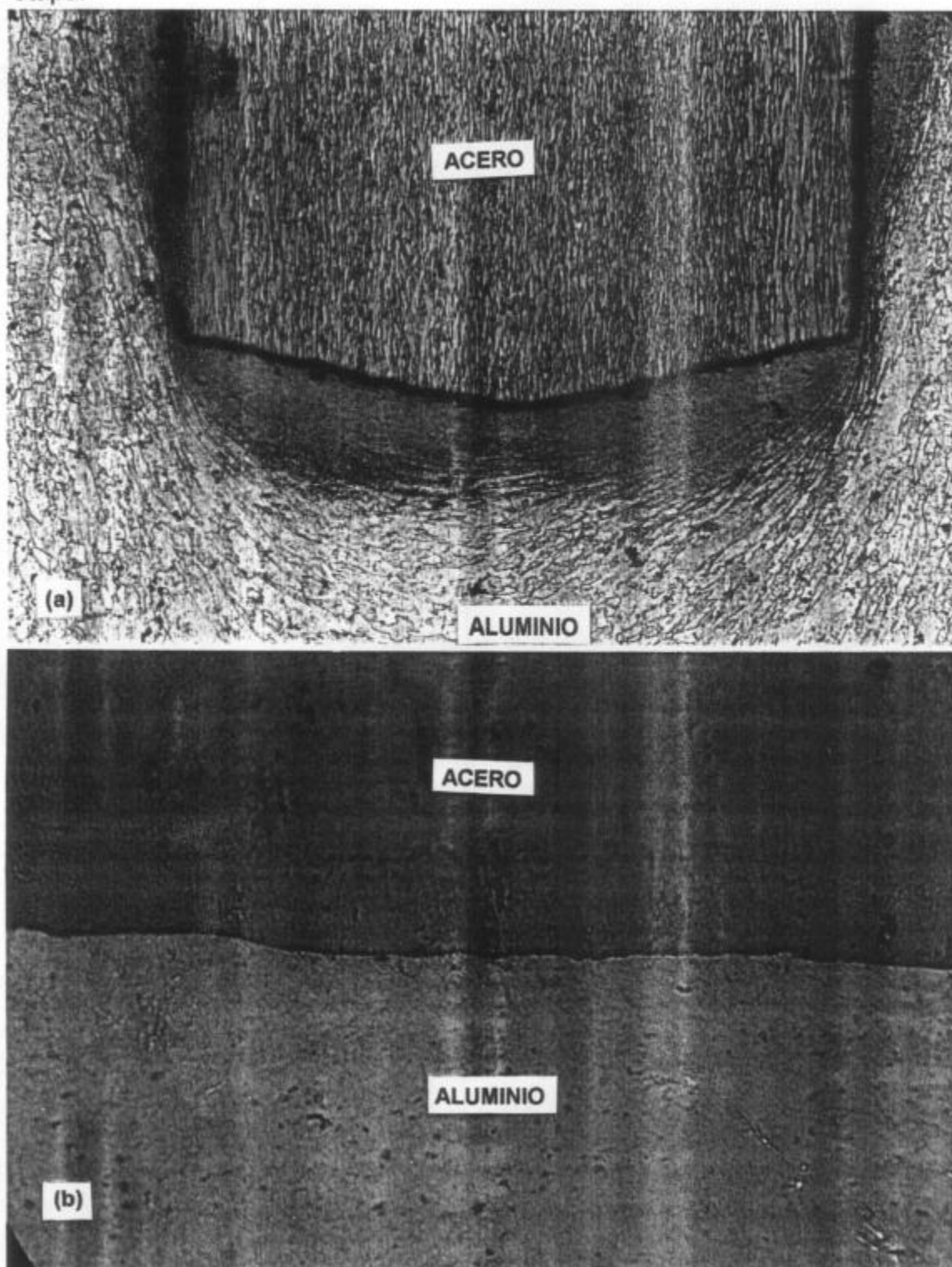


Fig.4.3-Fotomicrografia de la interfase de la junta.
(a). Ataque en dos etapas, muestra m_{1a} , 50x
(b).Ataque en una sola etapa, muestra m_{1b} , 1000x

DISCUSION

La microestructura del electrodo de acero es mostrado en la figura 4.1. Presenta granos elongados en dirección longitudinal a la línea del eje de deformación, lo cual podría afirmar que dicho electrodo fue trabajado en frío y no tuvo recocido posterior. La microestructura del aluminio se muestra en la figura 4.2, presenta granos normales, indicando que después de haber sido trabajado en frío el aluminio tuvo recocido.

La microestructura de la junta acero/aluminio de la muestra m_{1a} según la figura 4.3(a) se observa que el aluminio en la zona adyacente de la interfase ha sufrido fuerte deformación, presentando una mezcla de granos finos y granos elongados en dirección paralela a la línea de la junta. En cambio, la estructura del electrodo de acero en la zona adyacente a la interfase no ha sufrido ningún cambio de estructura; esto se explicaría por la gran diferencia de propiedades mecánicas entre el acero y el aluminio y porque la temperatura generada durante el proceso estaría por debajo de la temperatura crítica inferior (A_1) del diagrama Fe-C. La micrografía de la interfase se muestra en la figura 4.3(b) de la muestra m_{1b} en donde aparentemente no se observa la presencia de una película de intermetálicos, a mayores aumentos es posible observar la presencia de dicha capa, según referencia Jessop and Nicholas [1].

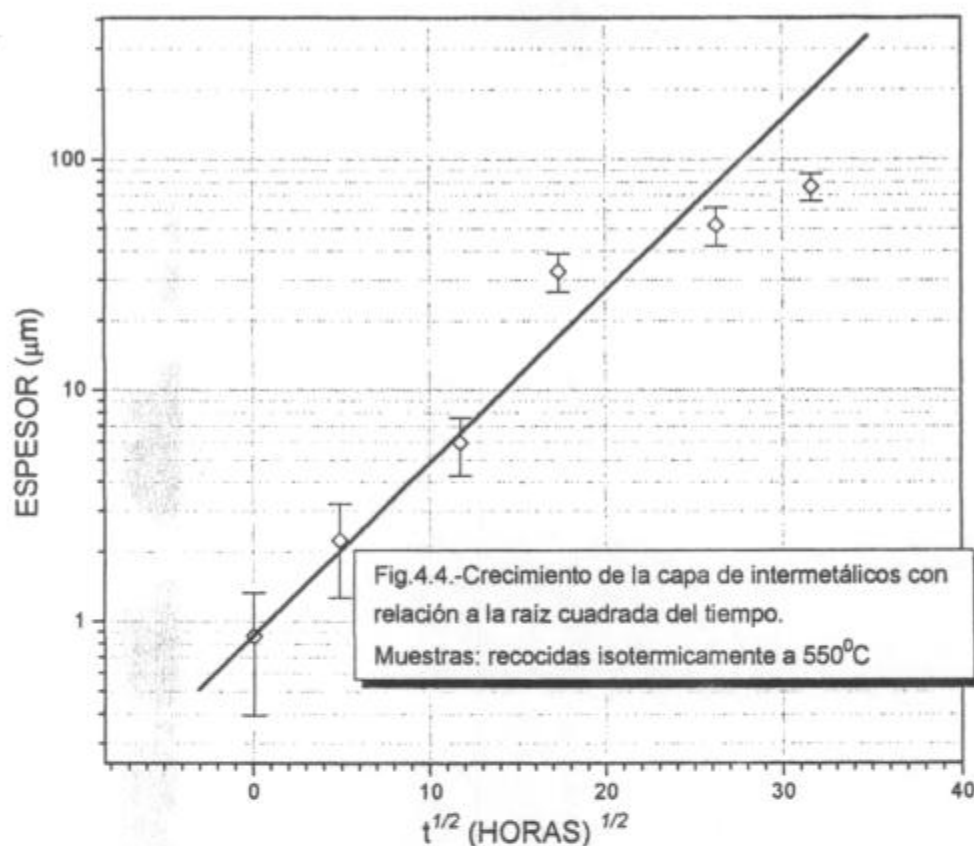
IV.1.3.- MUESTRAS RECOCIDAS

Las mediciones del crecimiento de la capa de intermetálicos para tiempos variables se resumen en la tabla 4.1. Los datos fueron tomados a partir de fotomicrografías de las figuras 4.5, 4.6, 4.7, y 4.13 con un error de medición aproximado de $\pm 5\%$, a partir de estos datos se ha graficado la figura 4.4.

Tabla 4.1.-Datos del crecimiento de la capa de intermetálicos de muestras recocidas isotérmicamente a 550°C para tiempos variables.

Muestra	Tiempo horas	t %	Espesor de la capa de intermetálicos (m μ)	Prom.	Err $\pm$
m_{1b} *	0.00138	0.03715	0.83, 0.75, 1, 0.6, 2.1, 0.4, 0.65, 0.75, 0.9, 0.63	0.861	0.4666
mR_{1a}	24	4.89898	2.8, 2.9, 3.4, 0.6, 2.7, 1.8, 2.5, 3.2, 1.7, 0.8	2.24	0.9743
mR_{2b}	138	11.7473	4.2, 6.4, 7.3, 5.2, 4.5, 5.8, 7.9, 6.4, 3.2, 8.3	5.92	1.6618
mR_{3b}	300	17.3205	37.2, 22.5, 38.4, 36.5, 28.6, 37.2, 30, 36, 22.9, 38	32.73	6.2412
mR_{4b}	690	26.2678	38, 46.5, 56, 60.5, 40.5, 64, 66, 56, 45, 45.6	51.81	9.9574
mR_5	1000	31.6227	60.2, 70.4, 68.2, 86, 88.5, 80.3, 72.5, 77.5, 66.9, 90.8	76.13	10.1803

* : Muestra sin recocido



DISCUSION

Según la figura 4.4, se observa que hay una relación directa entre el crecimiento de la capa de intermetálicos y la raíz cuadrada del tiempo [2], esto se explicaría por hecho de que se esta frente a un proceso térmicamente activado, ya que una variación de la temperatura modificaría la cinética de difusión. La distancia de difusión, δ (espesor de la capa de intermetálicos), es la distancia media que recorre un átomo durante el proceso de difusión y viene expresada por:

$$\delta = K\sqrt{Dt} \quad (4.1)$$

de donde,

δ = distancia de difusión

D = coeficiente de difusión

t = tiempo

K = constante

Por lo tanto, los procesos de difusión son función de $t^{1/2}$, mientras que su dependencia de la temperatura es de $\exp(-1/T)$.

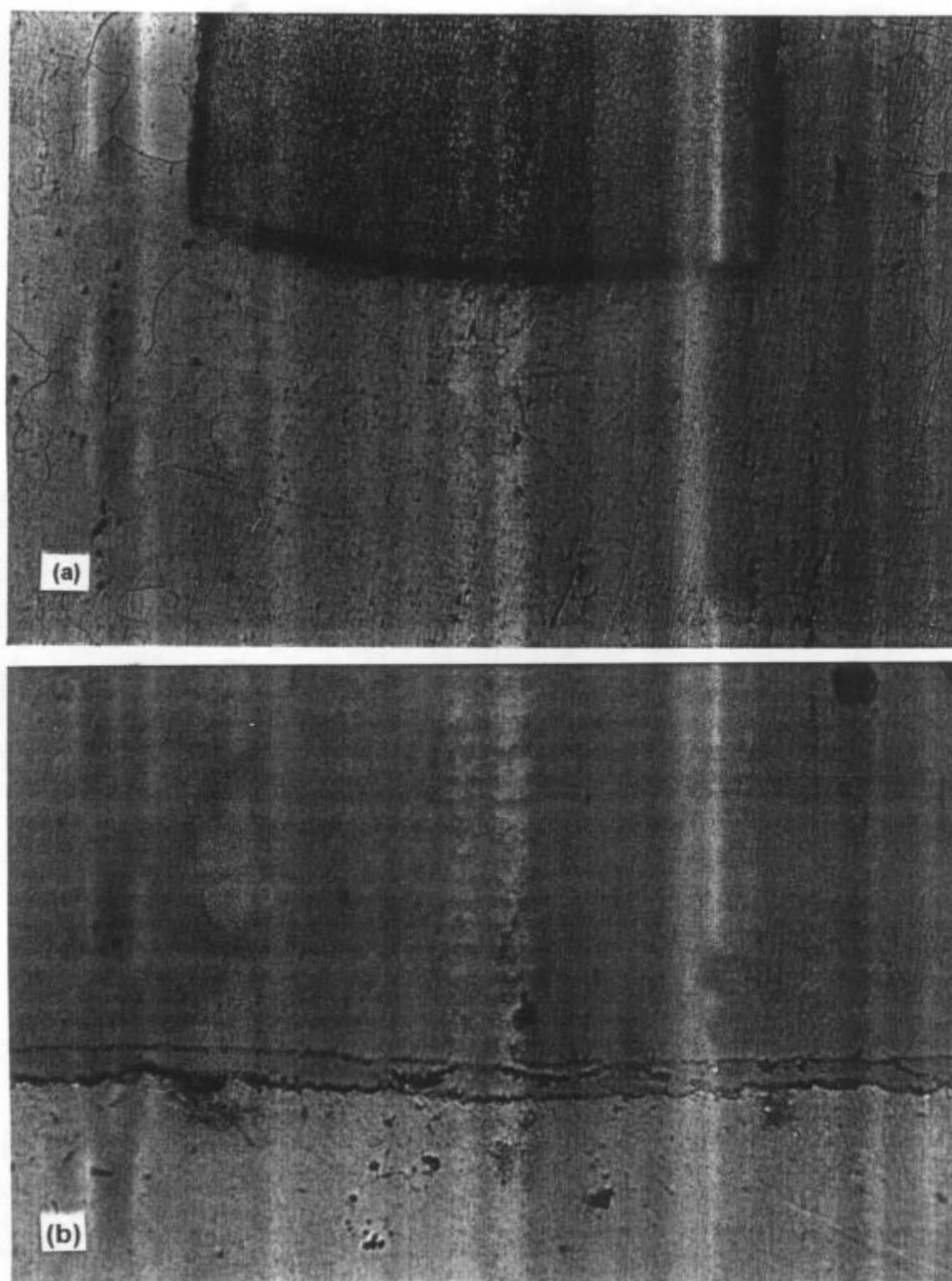


Fig.4.5-Microfotografía de la sección de la junta 138h, 550°C.

(a).Ataque en dos etapas, muestra mR_{2a} , 25x

(b). Interfase de la unión, ataque en una etapa, muestra mR_{2b} , 1000x

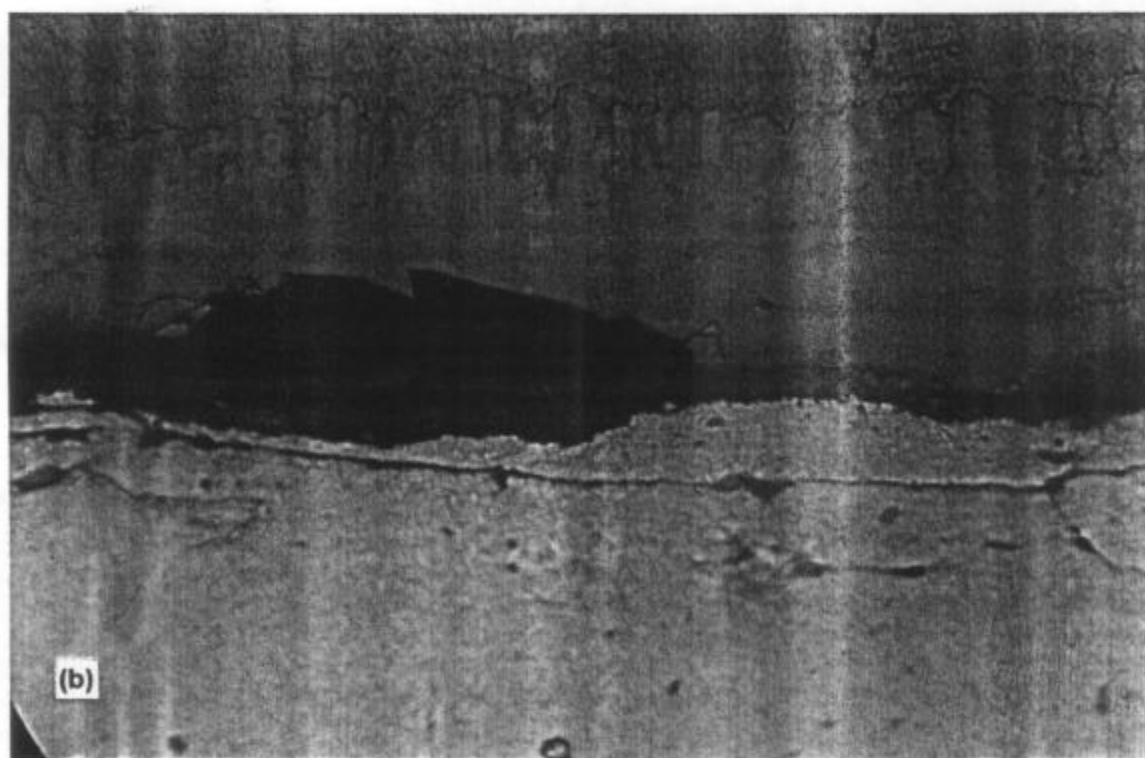
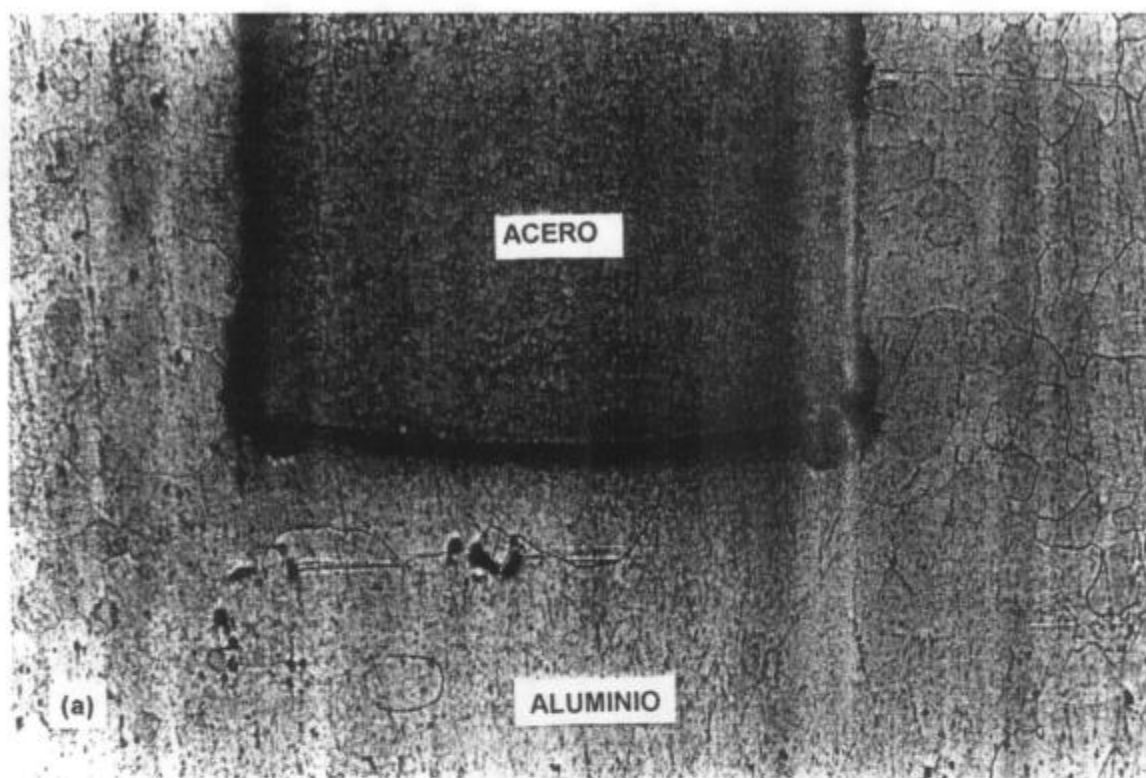


Fig.4.6.-Fotomicrografía de la sección de la junta, 300h á 550°C.
(a).Ataque en dos etapas, muestra mR_{3a} , 25x
(b).Interfase de la junta, ataque en una etapa, mR_{3b} , 1000x

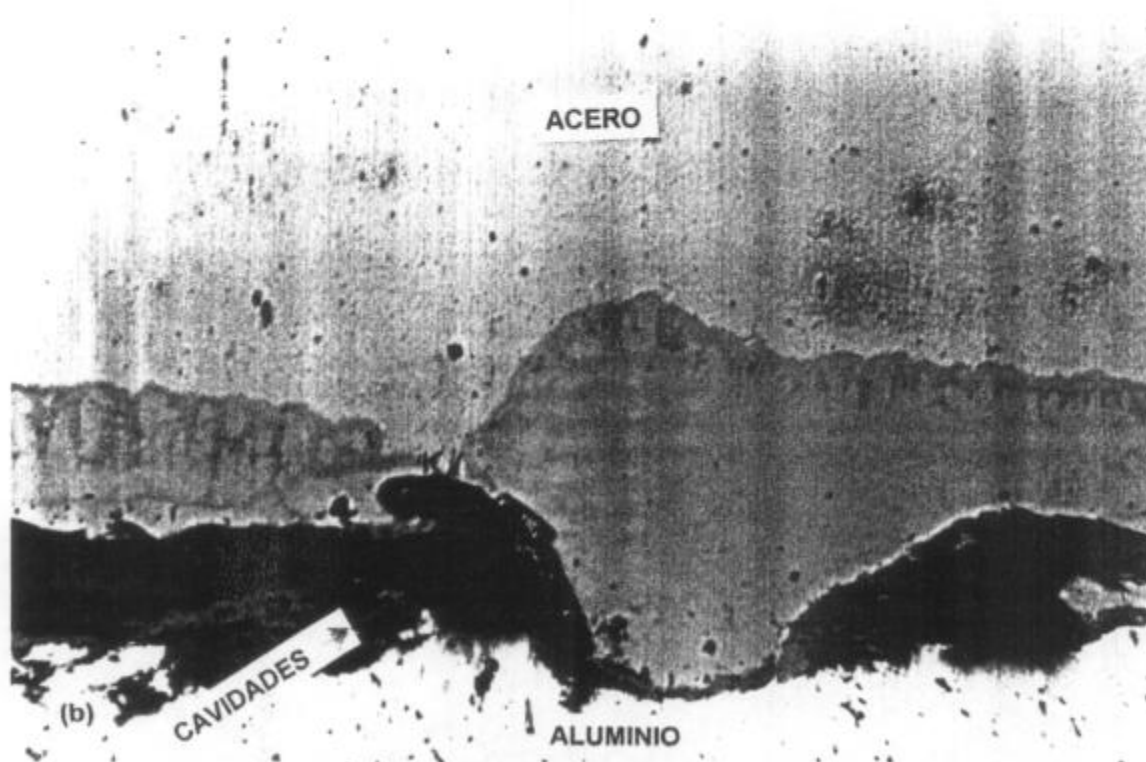
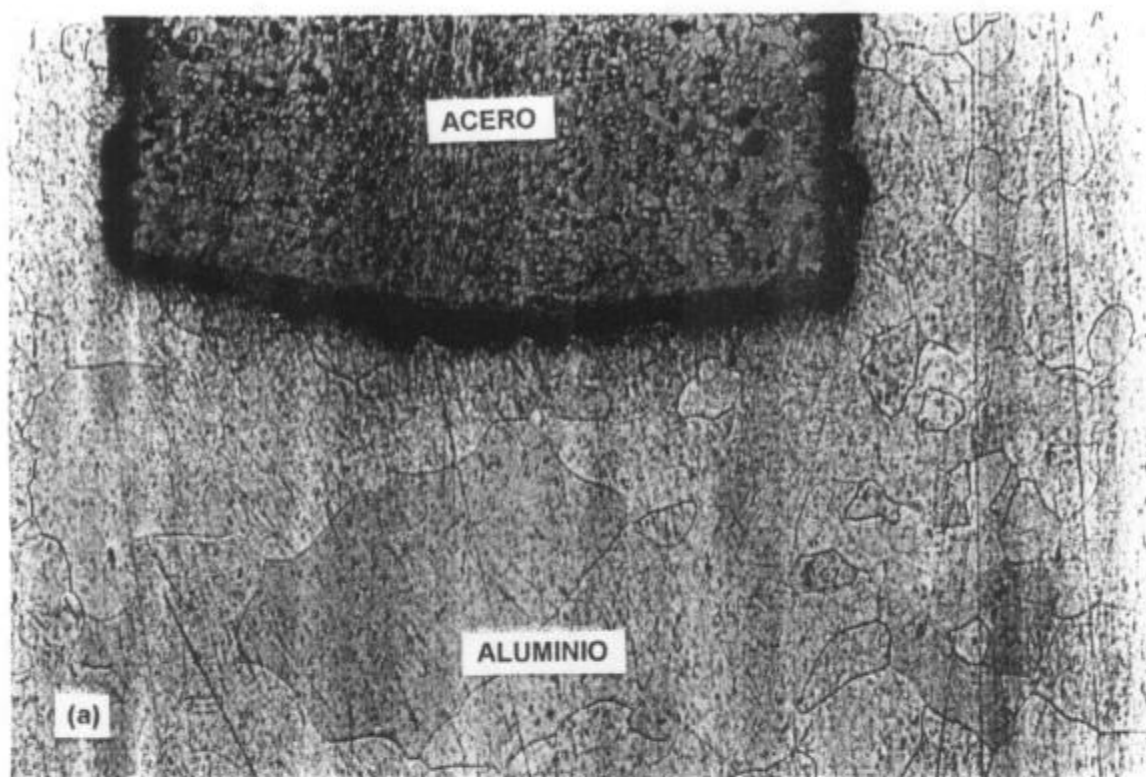


Fig.4.7.-Fotomicrografía de la sección de la junta, 690h, 550°C.
(a).Ataque en dos etapas, muestra mR_{4a} , 25x
(b).Interfase de la junta, ataque en una etapa, muestra mR_{4b} , 500x

DISCUSIÓN

En las fotomicrografías de las figuras 4.5, 4.6, y 4.7, se observa un crecimiento de la película de intermetálicos proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, la cual es acompañada por una pérdida de la resistencia de la junta. Simultáneamente aparecen cavidades entre el aluminio y la interfase y aumentan de tamaño conforme aumenta el tiempo de recocido. El crecimiento de la capa de intermetálicos y de las cavidades es muy irregular en periodos grandes de recocido. Asimismo se ha observado en muestras con recocidos largos, el aluminio se desprende de la interfase.

Estudios de la interfase de la junta aluminio/acero inoxidable fueron realizados por Scott y Squires [3], cuyos resultados parecen ser similares. La formación de los compuestos intermetálicos en la junta aluminio/acero es muy compleja. La referencia Bedford y Boustead [4], presenta un desarrollo teórico de la formación de compuestos intermetálicos aluminio-hierro (ver figura 4.8).

Para la medición del espesor de la capa de intermetálicos se ha empleado fotomicrografías con un aumento de 1000x, se tomaron 10 lecturas a lo largo de la interfase de la junta con un error de $\pm 5\%$ aproximadamente.

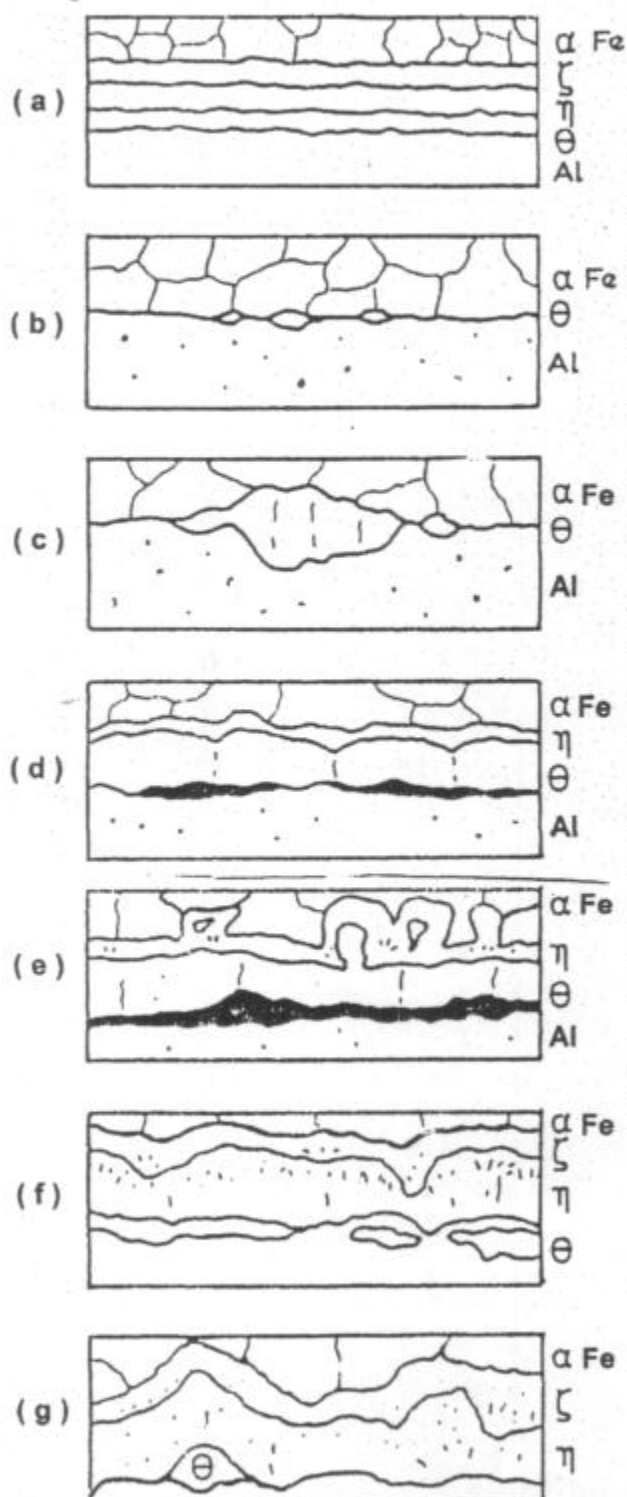


Fig.4.8.- Desarrollo ideal de las fases intermedias, según el diagrama Fe / Al.



Referencia : Berdorf y Boustead [4]

(a).Desarrollo idealizado

(b).Nucleación y crecimiento de la fase θ .

(c).Aumento de la Nucleación y crecimiento de la fase θ .

(d). Desarrollo de la capa η , aparición de cavidades en la interface Aluminio/ θ .

(e).Nucleación de nódulos y crecimiento delante de la interface, precipitación de agujas en la fase η .

(f).Desprendimiento del Aluminio, presencia de la fase ζ , y fase η en forma de agujas.

(g).La fase θ es consumida, excepto pequeñas partículas, la fase η contiene una profusión de finos precipitados.

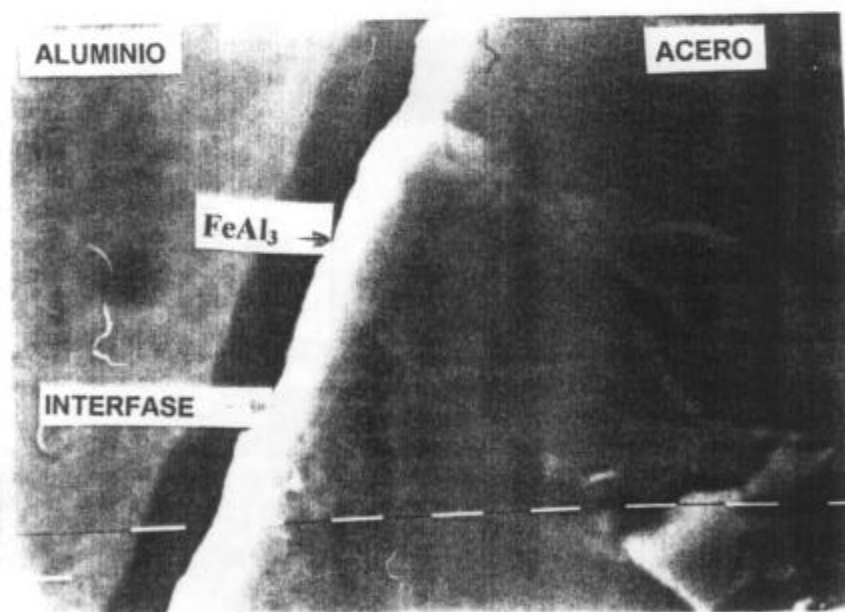
IV.1.4.- IDENTIFICACION DE COMPUESTOS INTERMETALICOS

IV.1.4.1.-MUESTRAS SIN RECOCIDO

El análisis cuantitativo se realizó en el SEM. Los resultados experimentales y la composición teórica de la fase se resumen en la tabla 4.2. En la figura 4.9 se muestra una fotomicrografía de la junta aluminio/acero, y se indica aproximadamente la presencia de FeAl_3 .

Tabla 4.2.- Datos sobre el análisis experimental comparado con el rango de valores teóricos de la fase intermedia.

FASE	FeAl_3		Fe_3Al	
	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico
Al : % Atómico	75.11 77.00	74.5 - 76.6	22.58	23 - 34
Fe : %Atómico	24.889 22.700	25 - 23.40	77.42	77 - 66



**Fig.4.9.-Fotomicrografía de la junta acero/aluminio la muestra no fue atacada , SEM, 6400x.
Muestra: m₅**

IV.1.4.2.-MUESTRAS CON RECOCIDO

El análisis cuantitativo de la junta se realizó en el SEM. Los resultados y los valores teóricos de la composición de las fases se resumen en la tabla 4.3. En la figura 4.10 se presenta la fotomicrografía de la interfase y se indica la presencia del compuesto intermetálico Fe_2Al_5 .

Tabla 4.3.-Datos sobre el análisis experimental comparado con los valores teóricos de la fase intermedia. Muestra recocida 300h, 550°C.

Fase	Fe_2Al_5		FeAl_2	
	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico
Al : % atómico	70.73 69.90 69.15	70 - 73	66.26 66.13 68.00	66 - 66.90
Fe : % atómico	29.26 30.08 30.85	30 - 27	33.73 33.80 31.75	34 - 33.10

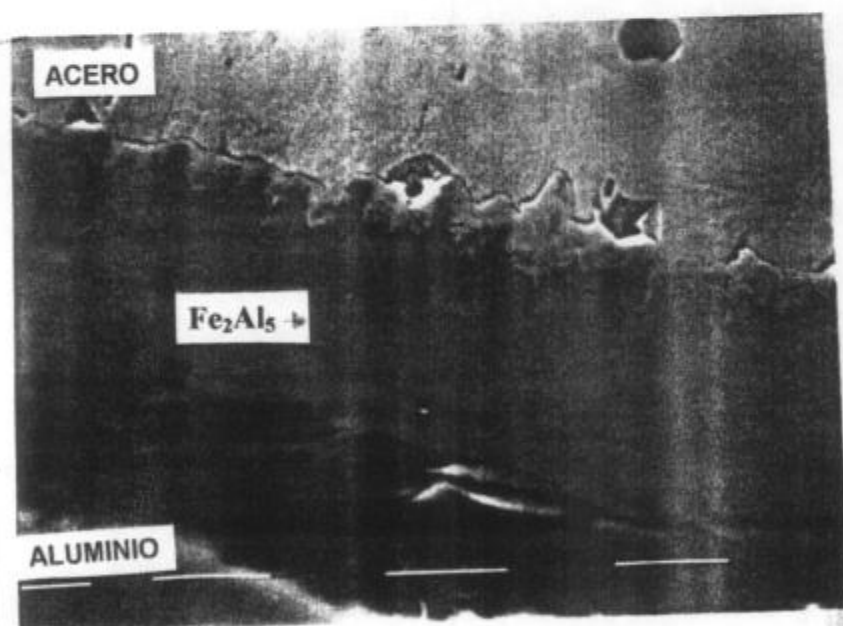


Fig.4.10.-Fotomicrografía de la interfase de la junta acero/aluminio, muestra recocida a 550°C por 300h. Muestra: mR_{3b}, SEM, 1600x.

DISCUSION

La identificación de compuestos intermetálicos, en el presente trabajo, sólo se ha realizado mediante el análisis cuali y cuantitativo. El tamaño de muestra considerado resultó ser de poco volumen para la identificación de los compuestos intermetálicos mediante la técnica de la difracción de rayos X.

En muestras que no han sido recocidas según el análisis cuantitativo barrido por el SEM parece estar presente la fase FeAl_3 adyacente a la interfase de la junta. En muestras recocidas predomina la presencia de la fase Fe_2Al_5 , se observa también dicha fase por microscopía óptica.

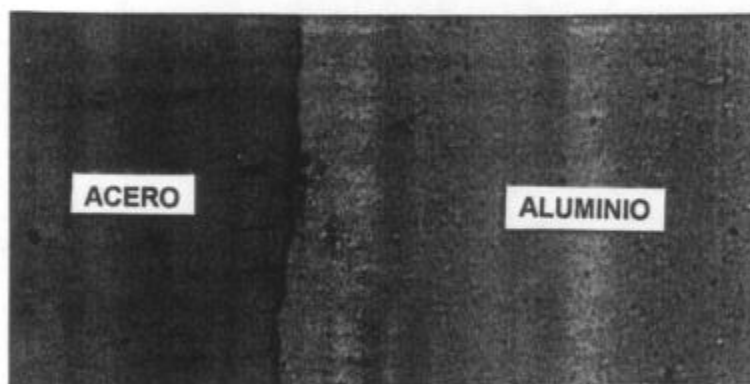
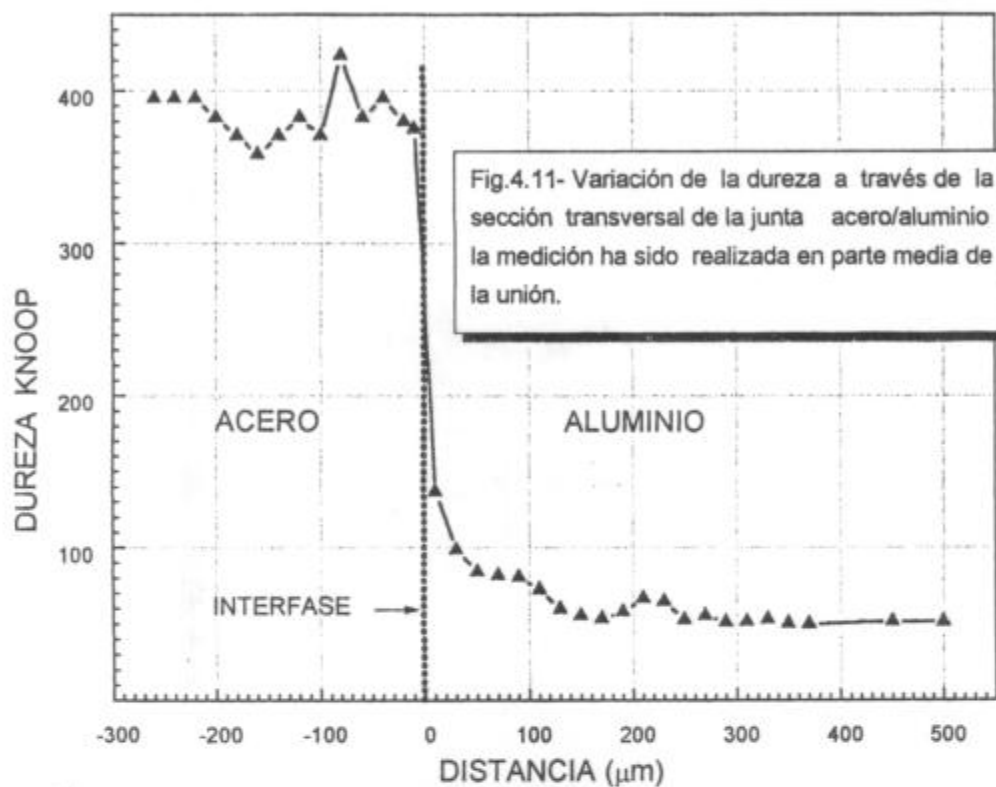
IV.2.- MICRODUREZA

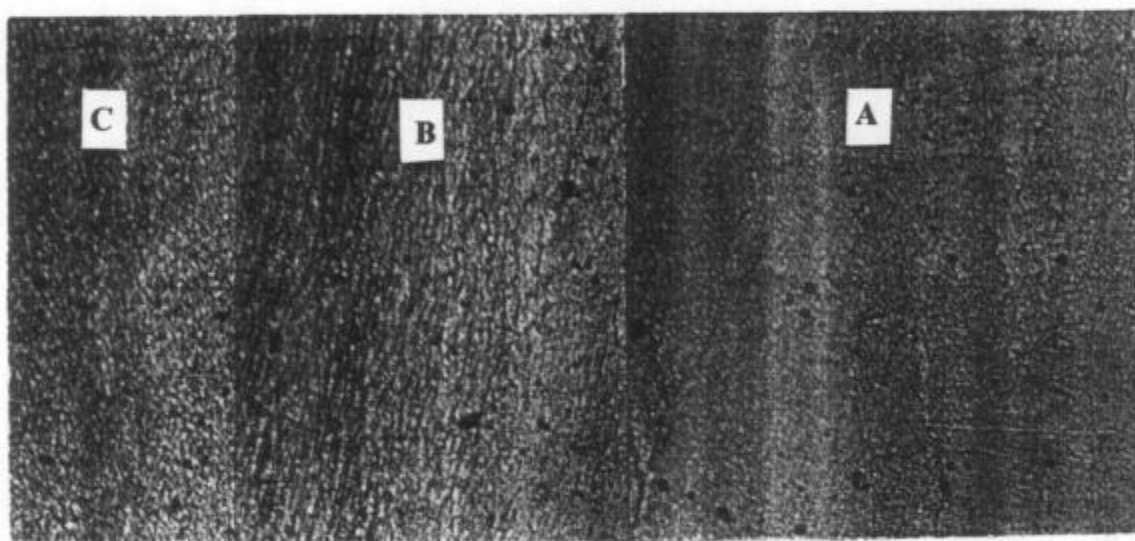
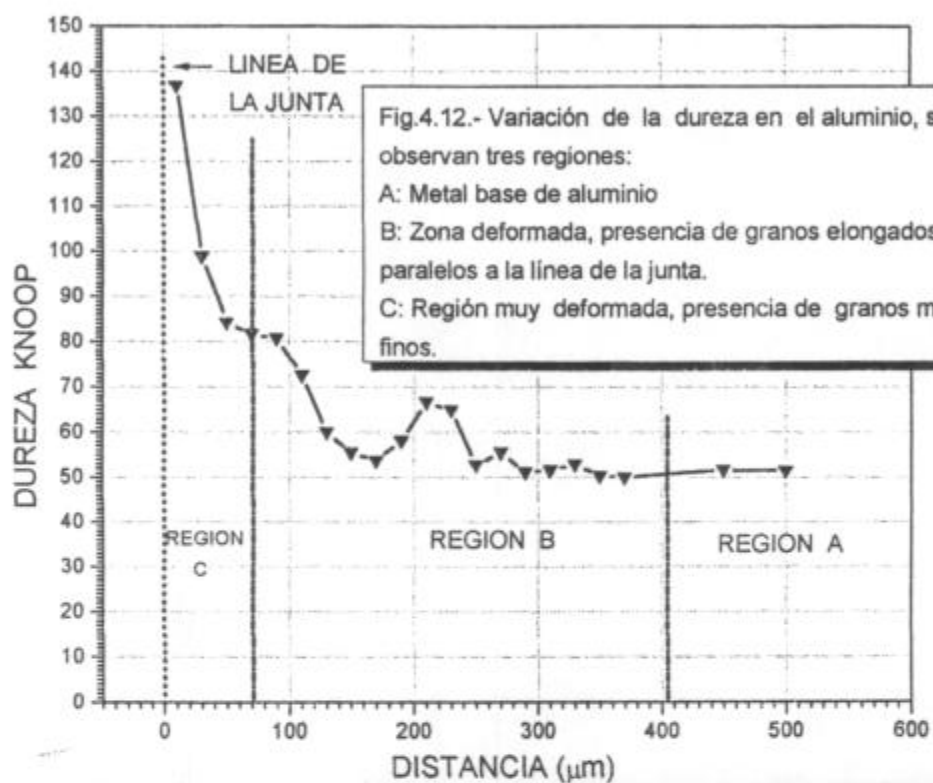
IV.2.1.-MUESTRAS SIN RECOCIDO

Los resultados de microdureza de la sección de la junta acero/aluminio se resumen en la tabla 4.4. En la figura 4.11, se grafica la dureza con relación a la distancia. En la figura 4.12 se grafica dureza en el metal de aluminio con relación a la distancia de la interfase.

Tabla 4.4.- Microdureza a través de la sección transversal de la junta

Lectura	Distancia (μm)	Muestra sin recocido	Muestra recocida, 300h.	
			distancia (μm)	microdureza Knoop
1	-260	395.2	-100	42.51
2	-240	395.2	-80	42.88
3	-220	395.2	-60	41.09
4	-200	382.4	-40	41.8
5	-180	370.2	-20	42.33
6	-160	358.5	20	412.1
7	-140	370.2	50	423.3
8	-120	382.4	80	5.444
9	-100	370.2	100	6.439
10	-80	423	120	8.825
11	-60	382.4	140	9.854
12	-40	395.2	160	8.74
13	-20	379.9	180	9.854
14	-10	375	200	9.854
15	10	136.8	220	8.740
16	30	98.81	250	9.089
17	50	84.2	280	9.460
18	70	81.66	310	7.649
19	90	80.68		
20	110	72.60		
21	130	60		
22	150	55.58		
23	170	53.69		
24	190	58.17		
25	210	66.75		
26	230	64.96		
27	250	52.77		
28	270	55.58		
29	290	51.2		
30	310	51.64		
31	330	52.9		
32	350	50.41		
33	370	50.06		
34	450	51.64		
35	500	51.51		





DISCUSION

En materiales disímiles el calor fluye preferencialmente en el material con mayor conductividad térmica. El aluminio es mejor conductor del calor que el acero (aproximadamente 4 veces mayor), por lo tanto, la mayoría de calor generado durante el proceso es disipado por el aluminio.

Según Okita y Aritoshi referencia [5], la temperatura de la interfase de soldadura por fricción estaría por debajo del punto de fusión. Considerando la referencia anterior, la temperatura de la interfase de la junta acero/aluminio estaría por debajo del punto de fusión del aluminio. La temperatura de la interfase es superior a la temperatura de recristalización del aluminio, lo que genera cambios metalúrgicos en el aluminio. Con relación al acero, dicha temperatura estaría por debajo del punto crítico (A_1), razón por la cual no se producen cambios metalúrgicos en el acero. La zona afectada por el calor (ZAC) sólo se presenta en el aluminio, tal como se muestra en la figura 4.12. Para una explicación de la zona afectada por el calor se ha visto conveniente indicar tres zonas.

- **La región (A)** representa la estructura del metal base del aluminio, la forma de los granos es similar al material de partida (ver figura 4.2). La zona afectada por el calor corresponde a la región (B) y (C).

- **La región (B)** es una zona intermedia entre la zona adyacente a la línea de unión y el metal base, se observa que ha ocurrido recristalización parcial (ver figura 4.12). Esta región está compuesta por una mezcla de granos finos y granos elongados en dirección paralela a la línea de la junta. Los cambios microestructurales de dicha región serían el resultado de un proceso térmicamente activado.

- **La región (C)** es la zona adyacente a la línea de la junta que experimenta temperaturas cercanas al punto de fusión del aluminio y como consecuencia se presenta una deformación altamente significativa durante el proceso, produciendo un flujo de material de aluminio que es reyectado desde el centro de la junta hacia la periferia. La combinación de una alta deformación y a una elevada temperatura genera una recristalización dinámica y produce una microestructura de granos extremadamente finos adyacentes a la línea de la soldadura.

IV.2.2.- MUESTRAS CON RECOCIDO

En la figura 4.13 se muestran las improntas de dureza sobre la sección de la junta realizadas con un microdurómetro en la escala knoop con carga de 50 gramos bajo un tiempo de 15 seg. Las mediciones de dureza se indican en la tabla 4.4. En la figura 4.14 se ha graficado la dureza vs. distancia.

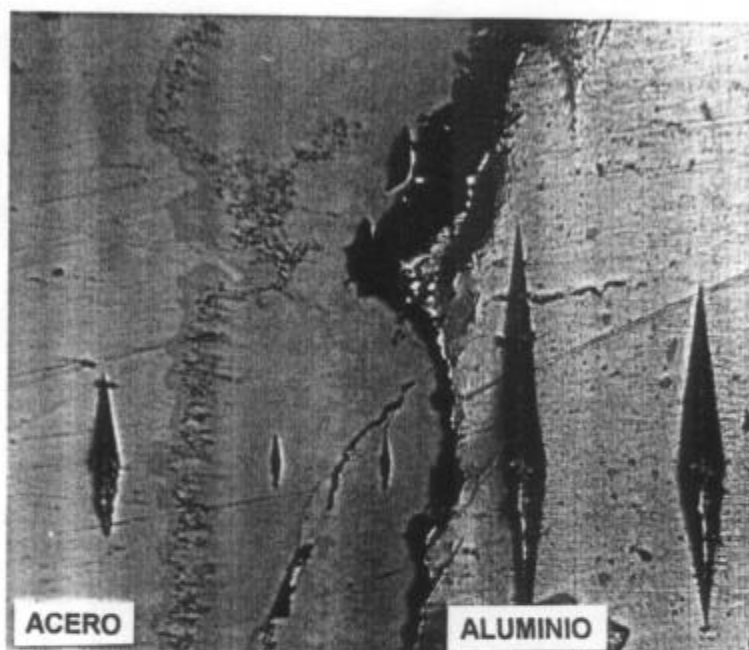
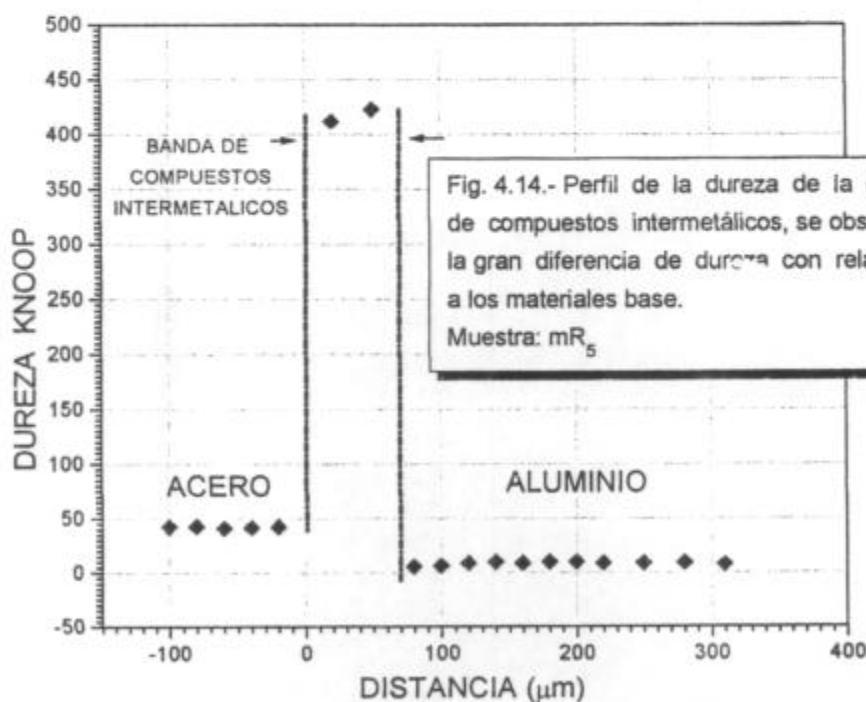


Fig.4.13.-Improntas de dureza sobre la banda de compuestos intermetálicos. Muestra mR₅, micrografía 500x.



IV.3.- MICROANÁLISIS

IV.3.1.-MUESTRAS SIN RECOCIDO

En la figura 4.15 se muestran trazos de análisis de dispersión del aluminio y el hierro realizado por microsonda a lo largo de la línea A-A'. Dicha figura corresponde a la muestra m_6 .

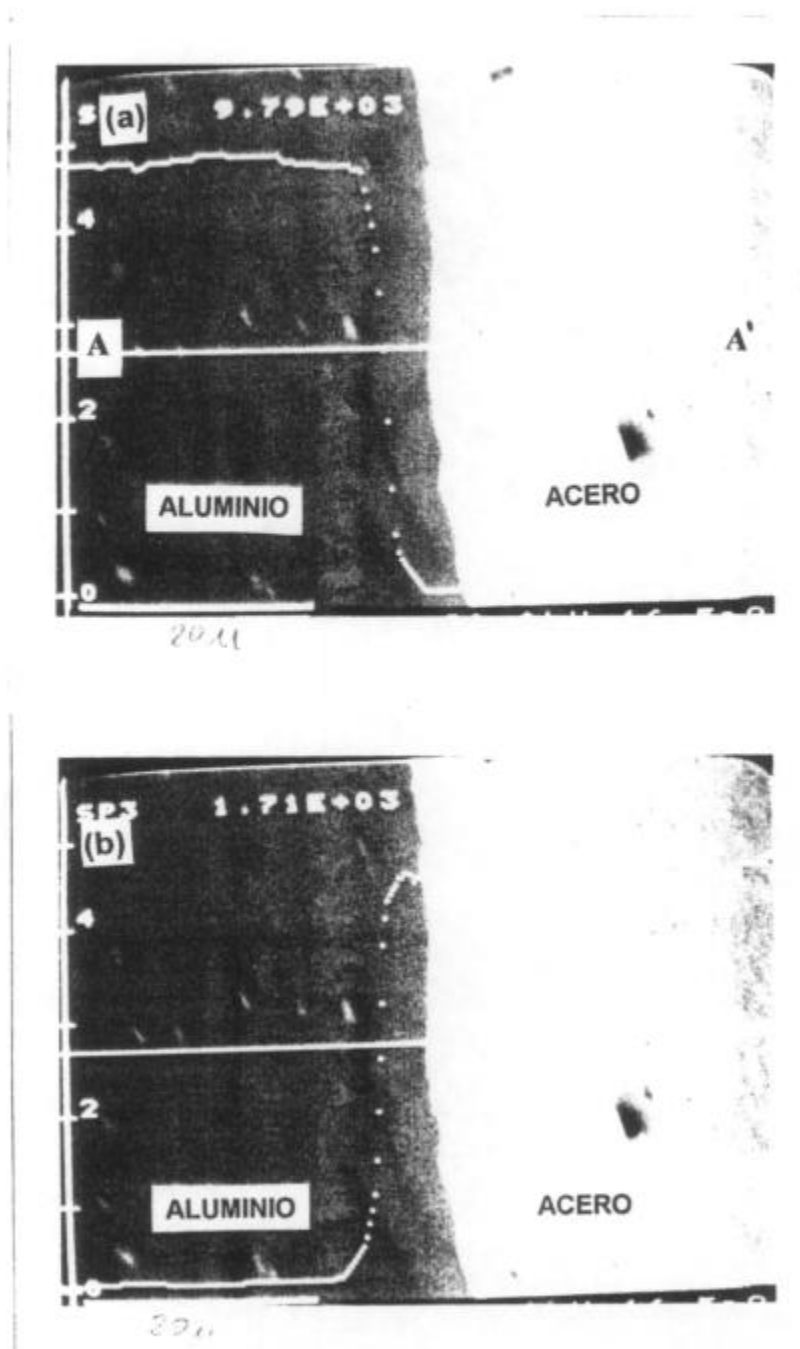


Fig.4.15.-Análisis de dispersión del Al y el Fe por microsonda a través de la interfase.

(a).curva de distribución del aluminio
(b).curva de distribución del hierro

En la figura 4.16 se muestra el mapeo de dispersión del Al y el Fe adyacente a la unión realizado por SEM. Dicha figura corresponde a la muestra m_6 .

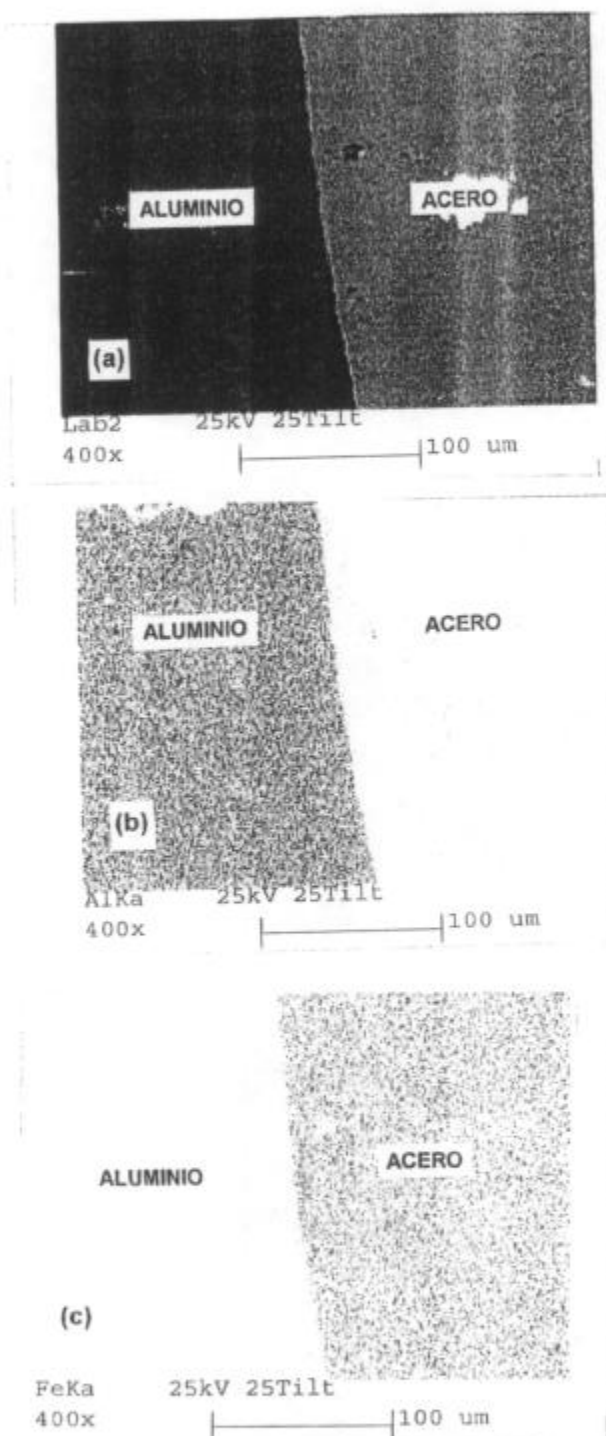


Fig.4.16.-Mapeo de dispersión del Al y Fe a través de la interfase, SEM, 400x.

(a).sección de la muestra

(b).aluminio

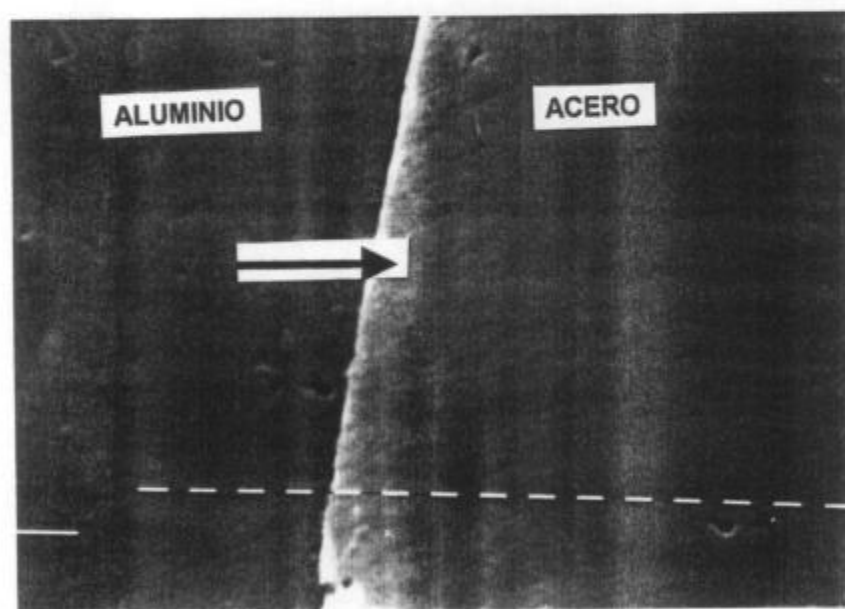
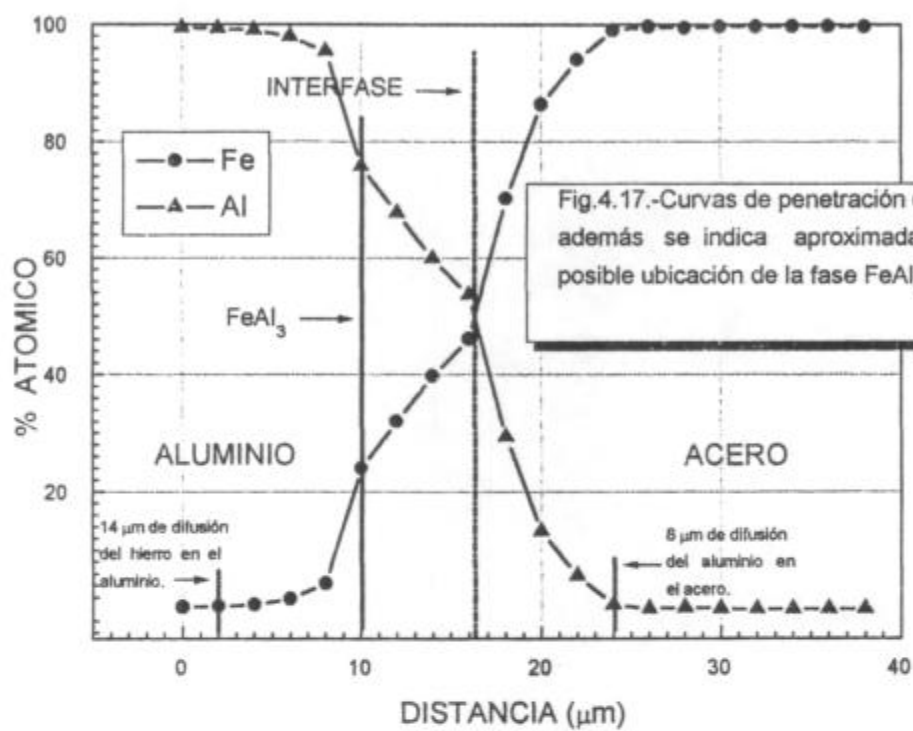
(c).hierro

La tabla 4.5 contiene datos del análisis cuantitativo a través de la interfase realizado por microsonda tanto en la parte media como a $\frac{1}{2}$ de radio de la línea de unión. La toma de datos corresponde a la muestra m_5 .

Tabla 4.5.- Análisis cuantitativo a través de la Interfase

Lectura	Distancia (μm)	Medio, % Atómico				$\frac{1}{2}$ Radio, % Atómico			
		Fe	Al	Si	Mn	Fe	Al	Si	Mn
1	0	0.400	99.476	0.116	0.008	0.631	99.235	0.115	0.019
2	2	0.521	99.310	0.169	0.000	0.921	98.884	0.195	0.000
3	4	0.835	98.988	0.162	0.014	1.202	98.447	0.351	0.000
4	6	1.806	97.989	0.192	0.013	1.355	97.981	0.644	0.019
5	8	4.379	95.434	0.184	0.002	1.084	98.697	0.214	0.005
6	10	24.016	75.749	0.177	0.059	15.845	83.961	0.136	0.059
7	12	32.046	67.723	0.142	0.089	29.753	70.036	0.126	0.085
8	14	39.776	59.971	0.140	0.113	41.067	58.73	0.103	0.100
9	16	46.120	53.621	0.145	0.114	63.187	36.542	0.098	0.173
10	18	70.298	29.348	0.144	0.210	89.867	9.761	0.082	0.290
11	20	86.428	13.315	0.134	0.123	93.605	5.774	0.153	0.468
12	22	94.050	5.675	0.125	0.150	98.084	1.312	0.121	0.483
13	24	99.017	0.772	0.051	0.160	98.963	0.451	0.051	0.535
14	26	99.68	0.107	0.022	0.191	98.937	0.477	0.047	0.538
15	28	99.501	0.253	0.026	0.220	98.965	0.432	0.031	0.572
16	30	99.654	0.117	0.044	0.185	99.107	0.320	0.013	0.559
17	32	99.688	0.060	0.007	0.244	99.141	0.297	0.084	0.498
18	34	99.714	0.000	0.055	0.232	99.422	0.196	0.035	0.348
19	36	99.704	0.051	0.021	0.061	99.476	0.223	0.000	0.301
20	38	99.657	0.038	0.061	0.244	99.436	0.245	0.037	0.282

En la figura 4.17 se muestran las curvas de penetración del aluminio y del hierro a través de la interfase.



DISCUSION

En la literatura técnica disponible la interdifusión durante el proceso de soldadura por fricción no está muy claramente explicada. Sin embargo según Wang y Lin [6], la penetración de los elementos es producto de una transferencia mecánica de materiales. Otros autores, como Kreye y Wittkamp [7] y Eliot y Wallach [8], sostienen que hay interdifusión.

La figura 4.17 representa el porcentaje atómico vs. la distancia perpendicular a la interfase de la junta. A manera de especulación podría afirmarse, según la figura 4.17, que ha ocurrido interdifusión. La penetración del aluminio en el acero es aproximadamente $8\text{ }\mu\text{m}$ y la penetración del hierro en el aluminio es de aproximadamente $14\text{ }\mu\text{m}$.

Los resultados de los barridos en la parte media del eje de la muestra, como a $\frac{1}{2}$ de radio, son similares; esto es debido a que se está frente a una muestra de diámetro muy pequeño (2.4 mm). Según Bell y Adolphson [9], quienes realizaron barridos en uniones de cobre/acero inoxidable de mayor diámetro (12.7 mm) encontraron que la penetración de elementos es mayor cerca de la periferia, con relación al centro. Lo que confirma la referencia de Jessop y Nicholas [1], los cuales realizaron uniones de aluminio/acero inoxidable (diámetro de 25 mm) y encontraron que la película de intermetálicos sólo se encuentra cerca de la periferia del eje de la junta con ausencia de dicha película en el centro.

Los resultados del análisis cuantitativo de 6 muestras fueron similares en todas las zonas. En la figura 4.17 se presentan lecturas de datos tomados en el centro del eje de la soldadura con relación a la distancia. Cálculos realizados con los datos disponibles aplicando las ecuaciones básicas de la difusión muestran serias discrepancias con los valores experimentales, debido a que dichas ecuaciones básicas están hechas para procesos en equilibrio y no para procesos dinámicos, tal como es el proceso de soldadura por fricción.

IV.3.2-MUESTRAS RECOCIDAS

En la figura 4.18 se muestran los trazos de dispersión del aluminio y el hierro sobre la línea B-B' de la junta. Dicha figura corresponde a la muestra mR_{2b}, recocida isotérmicamente a 550°C por 138 horas.

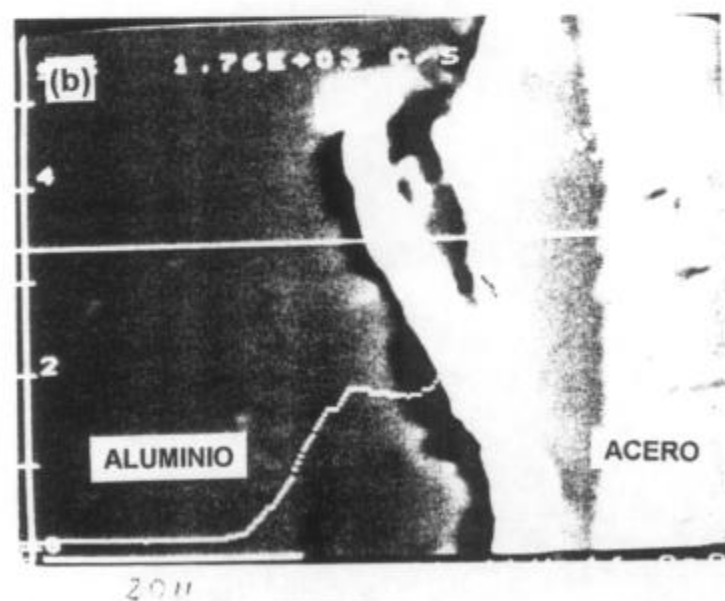
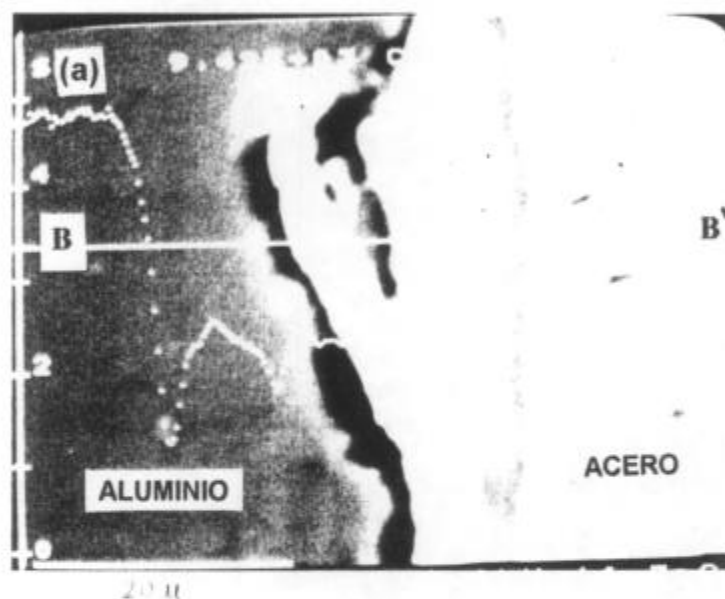


Fig.4.18.-Curva de dispersión del Al y el Fe a través de la película de intermetálicos.

(a).aluminio

(b).hierro

En la figura 4.19 se muestra el mapa de dispersión del aluminio y hierro sobre la interfase de la junta. La figura representa a la muestra 'mR_{4b}', recocida isotérmicamente a 550°C por 690 horas.

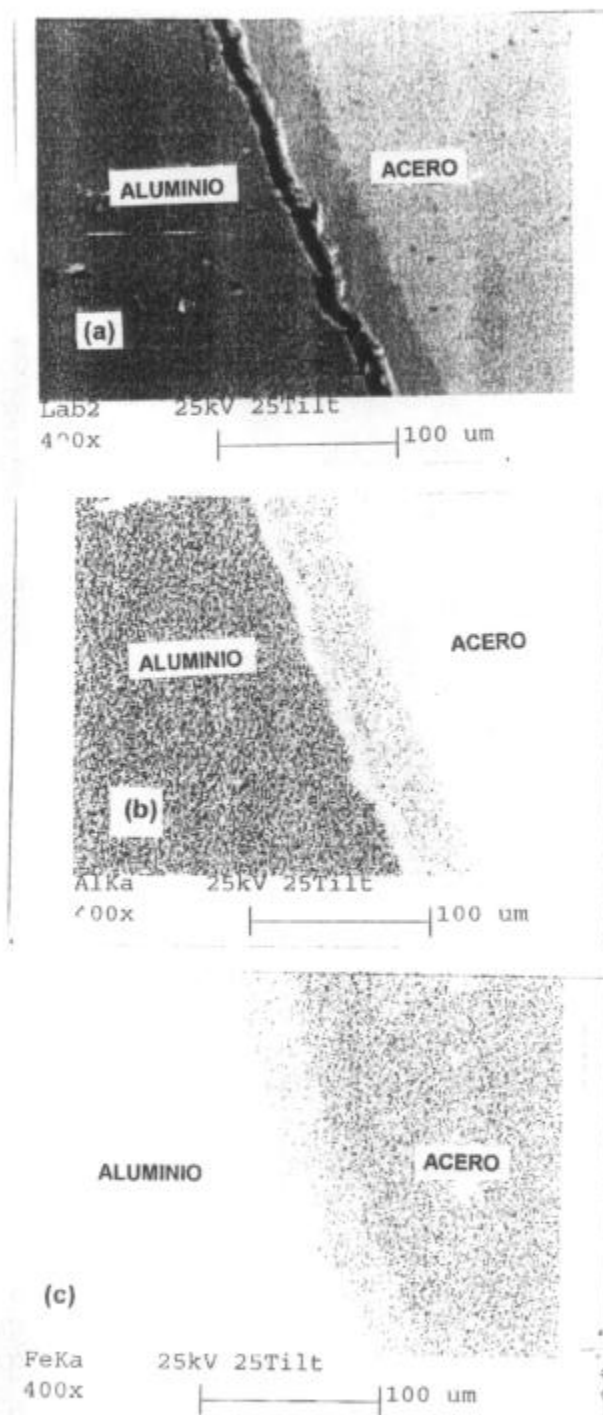


Fig.4.19.-Mapeo de dispersión de la concentración cualitativa del Al y el Fe a través de interfase.

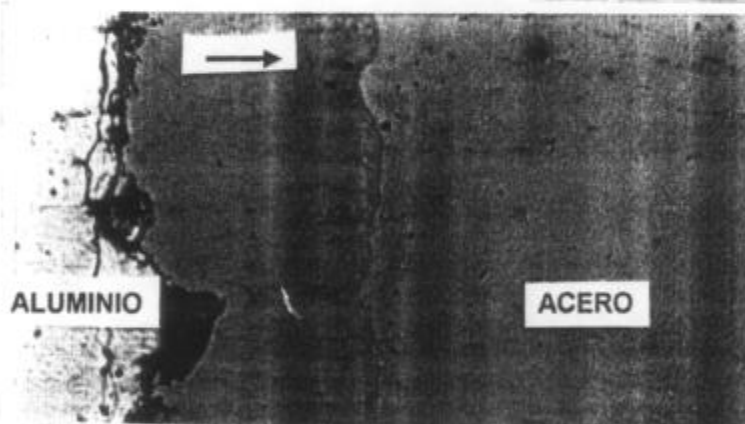
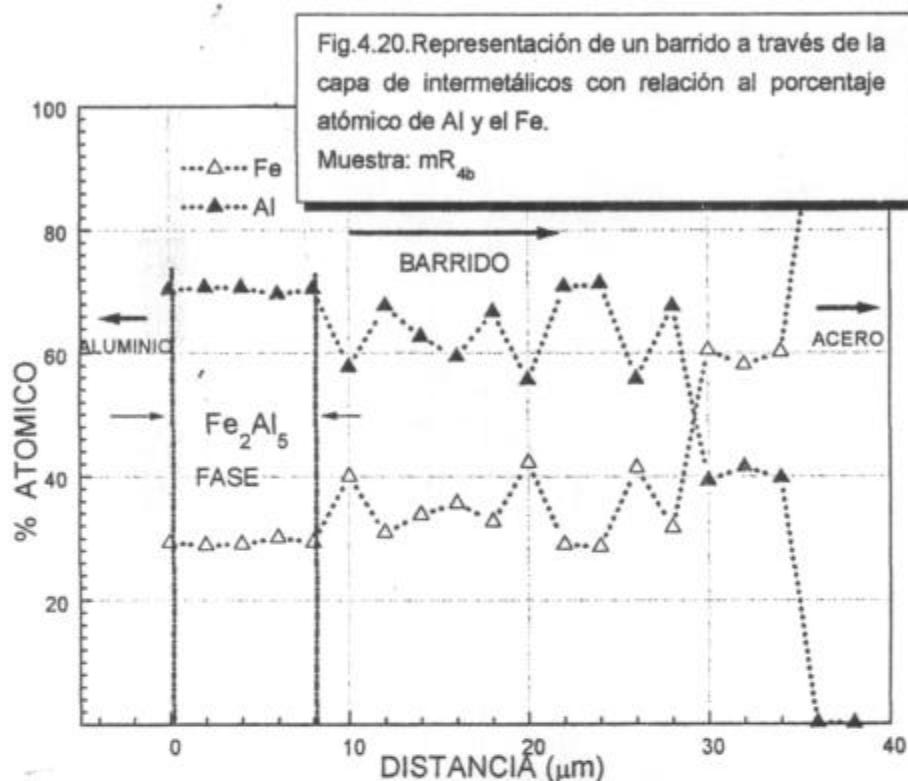
- (a).sección de la junta
- (b).dispersión del aluminio
- (c).dispersión del hierro

En la tabla 4.6 se da a conocer el análisis cuantitativo de las muestras mR_{2b} y mR_{4b} recocidas isotérmicamente a 550⁰C realizado por microsonda sobre la interfase de la junta.

Tabla 4.6.- Análisis cuantitativo a través de la capa de intermetálicos

Lectura	Distancia (μm)	Muestra mR _{2b} , % Atómico				Muestra mR _{4b} , % Atómico			
		Fe	Al	Si	Mn	Fe	Al	Si	Mn
1	0	26.772	72.158	1.008	0.062	29.310	70.273	0.312	0.105
2	2	23.898	74.903	1.157	0.042	28.863	70.712	0.376	0.050
3	4	25.564	73.327	1.062	0.047	29.092	70.585	0.263	0.060
4	6	25.562	73.304	1.077	0.057	30.121	69.562	0.251	0.065
5	8	29.052	69.806	1.056	0.087	29.377	70.380	0.175	0.068
6	10	25.369	73.483	1.042	0.105	39.966	57.684	2.131	0.219
7	12	25.899	73.009	1.039	0.054	30.909	67.639	1.373	0.079
8	14	30.740	68.176	0.980	0.105	33.804	62.635	3.440	0.120
9	16	88.040	11.306	0.456	0.197	35.624	59.384	4.875	0.116
10	18	26.346	72.597	0.981	0.076	32.655	66.681	0.581	0.083
11	20	56.838	42.282	0.690	0.191	42.183	55.599	2.021	0.198
12	22	99.375	0.260	0.019	0.346	28.975	70.824	0.140	0.061
13	24	99.605	0.184	0.000	0.215	28.619	71.283	0.047	0.051
14	26	99.610	0.173	0.000	0.217	41.405	55.790	2.615	0.190
15	28					31.722	67.634	0.541	0.103
16	30					60.423	39.312	0.086	0.179
17	32					58.103	41.514	0.205	0.179
18	34					60.143	39.645	0.078	0.134
19	36					99.621	0.132	0.034	0.213
20	38					99.651	0.060	0.050	0.239

En la figura 4.20 se representa un barrido por microsonda del porcentaje atómico vs. espesor de la capa de intermetálicos de la muestra mR_{4b} a través de la interfase de la junta.



DISCUSION

En la figura 4.20 se observa que parte de la capa de intermetálicos está formada por la fase bifásica (compuesto intermetálico) Fe₂Al₅, sobre todo hacia el lado del aluminio, aunque también hay un pequeño segmento hacia el lado del acero. Además parece estar presente además la fase FeAl₂ de una manera dispersa hacia el lado del acero. No se ha encontrado la fase FeAl₃. En la fotomicrografía adjunta se observan dos capas, la primera es una región muy amplia comprendida entre las cavidades y en la segunda se observan finos precipitados de la fase intermetálica sobre la matriz de Fe α . Esta capa, es una película muy fina y está comprendida entre la primera capa y el acero; dicha película crece en forma celular hacia el acero.

IV.4.- ENSAYOS MECANICOS

IV.4.1.-MUESTRAS SIN RECOCIDO

Los resultados del ensayo a la tracción se resumen en la tabla 4.7 y los del ensayo a la tracción de muestras con superficies a soldar contaminado en la tabla 4.8. Dichos resultados están referidos a la resistencia a la rotura de la soldadura, asumiéndose que se tiene una superficie de 100% de unión y sin considerar las tensiones residuales originadas durante el proceso y después del maquinado de las probetas (I, II). Las geometría de dichas probetas están indicadas en la figura 3.5.

Tabla 4.7.- Resultados del ensayo a la tracción de muestras normales

Denominación	Muestras t_1	Muestras t_2	Muestras t_3
Muestras	Probeta (I) Mapa	Probeta (II) Mpa	Probeta (III) Mpa
a	87	130	255
b	84.6	216	313
c	94.4	120	290
d	90	140	280
PROMEDIO	89	151.5	284.5

Tabla 4.8.- Resultados del ensayo a la tracción

Muestra	Probeta (II) MPa
Ct ₁	59
Ct ₂	41
Ct ₃	79
PROMEDIO	60

En la figura 4.21 se muestra una probeta maquinada característica del tipo (I). La fractura se lleva a cabo en el lado del aluminio, con la formación de la estricción correspondiente.

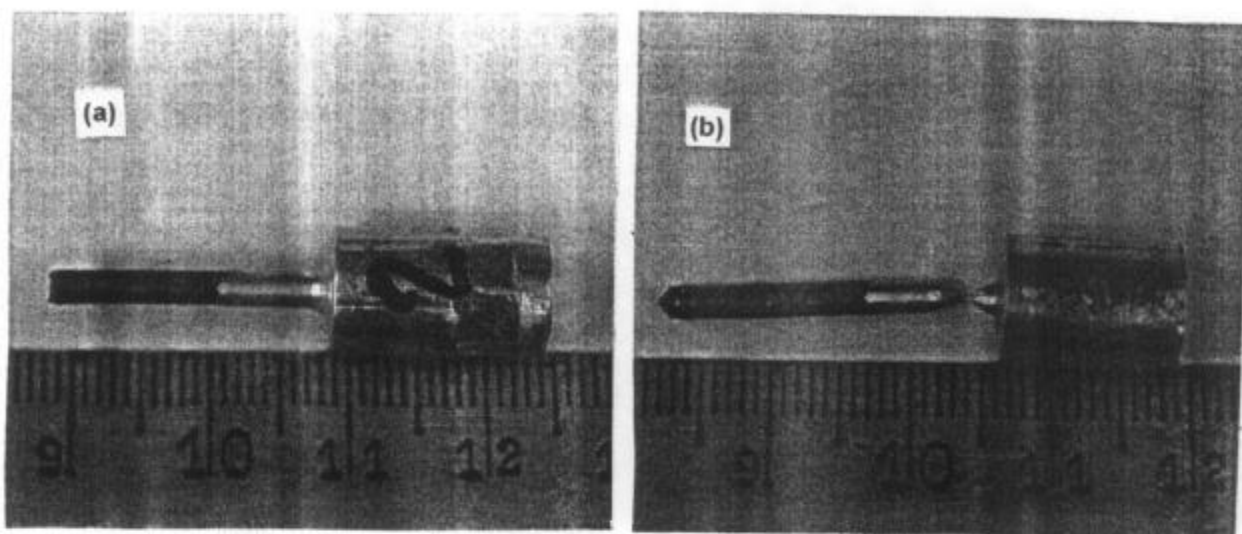


Fig.4.21.-Tipo de probeta (I)

(a).antes del ensayo, muestra t_{1a}

(b).después del ensayo, muestra t_{1c}

En la figura 4.22 se muestra una probeta maquinada del tipo (II), se nota claramente que se ha reducido el volumen de material de aluminio para evitar la formación de la estricción en el aluminio, de manera que pueda provocarse la rotura en la interfase de la junta durante el ensayo de tracción.

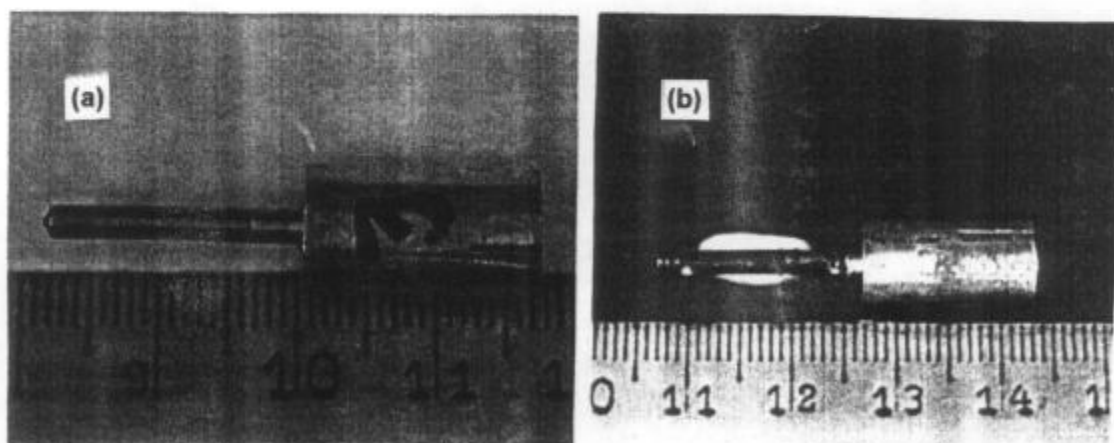


Fig.4.22.- Tipo de probeta (II)

(a).antes del ensayo, muestra t_{2b}

(b).después del ensayo, muestra t_{2d}

En la figura 4.23 se muestra una probeta de tipo (III). Dicha probeta no está maquinada. La fractura se presenta en la interfase mediante el ensayo a la tracción.

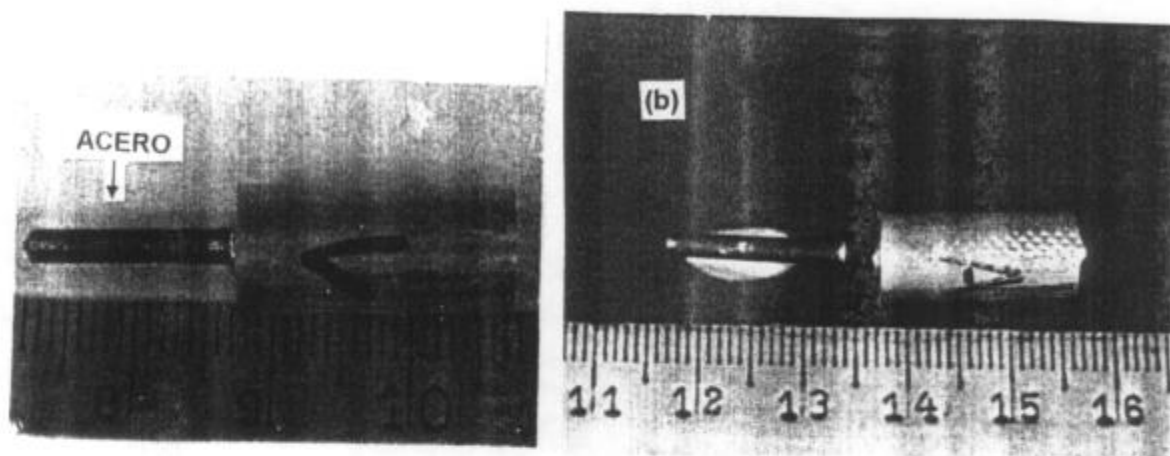


Fig.4.23.-Tipo de probeta (III)
(a).antes del ensayo, muestra t_{3c}
(b).después del ensayo, muestra t_{3b}

DISCUSION

Los resultados promedios de la resistencia son los siguientes:

- probeta (I) : 89 MPa
- probeta (II) : 151.5 MPa
- probeta (III) : 284.5 MPa

La probeta tipo (I) se fractura en el material de aluminio. Por lo tanto, dicha probeta no sería la adecuada para determinar la resistencia de la junta. Este resultado sólo indicaría que la resistencia de la junta es mayor que la del material base de aluminio.

La probeta tipo (II) se fractura muy cerca de la interfase de la junta. Por lo tanto dicha probeta sería más representativa que la probeta (I) para determinar la resistencia de la junta.

La probeta tipo (III) se fractura también muy cerca de la interfase de la junta. Por lo tanto dicha probeta es la más representativa para determinar la resistencia a la rotura para el presente caso.

La resistencia promedio para probetas contaminadas fue de 60 Mpa. Dicha magnitud indicaría que, el efecto de la contaminación de las superficies a soldar influye fuertemente en la calidad de la soldadura. En la tabla 4.9 se muestra la resistencia de diferentes soldaduras en comparación con el resultado obtenido.

Tabla 4.9.- Algunos datos comparativos de resistencia de juntas

A.- Probetas en condiciones normales

Unión acero /aluminio			Unión acero inoxidable/aluminio Ref.[11]	
Probeta (I)	Probeta (II)	Probeta (III)	contacto plano	contacto en ángulo cónico
Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
89	151.5	284.5	322	342

B.- Probetas en otras condiciones

En el resultado obtenido (junta acero/aluminio) la resistencia disminuye alrededor del 78% con relación al valor promedio de la probeta (III).

Para Jessop y Nicholas [10] (Junta acero inoxidable/aluminio) la resistencia disminuye en 36 % del valor óptimo

Para Bell y Adolphson [9] (junta acero inoxidable/cobre)

- aceite + grasa : mala calidad de soldadura
- ambos materiales son expuestos al medio ambiente por 4 - 5 semanas: mala calidad de soldadura.
- sólo el acero inoxidable es expuesto al medio ambiente por 4 - 5 semanas: mala calidad de soldadura.

Conclusión

La probeta III es la más adecuada para determinar la resistencia a la rotura de la junta.

La limpieza y la preparación de las superficies son muy importantes en la unión de materiales disímiles. Esto se debe a que toda la deformación macroscópica se presenta en el metal más blando. Lo cual significa que la deformación no puede remediar las discontinuidades, romper óxidos, o eliminar contaminantes en el material más duro. En el caso de muestras similares es posible cumplir con todos estos detalles durante el proceso.

Jessop y Nicholas [1] determinaron un método para encontrar la resistencia de la junta mediante el ensayo por corte empleando probetas de 25 mm de diámetro, el cual no pudo aplicarse ya que se disponía de una probeta de sólo 2.4 mm de diámetro, siendo otra limitación el equipo empleado para realizar la soldadura.

IV.4.2.- MUESTRAS RECOCIDAS

En la tabla 4.10 se dan los resultados del ensayo a la tracción de muestras recocidas isotérmicamente a 550°C y a tiempos variables. Todas las muestras han sido producidas en condiciones normales.

Tabla 4.10.- Resultados de la resistencia de muestras recocidas

Denominación	Rt ₁	Rt ₂	Rt ₃	Rt ₄	Rt ₅	Rt ₆
Muestra	24h Mpa	100h Mpa	144h Mpa	300h Mpa	360h Mpa	604h Mpa
a	62.9	rota	12	3.2	1.2	rota
b	65	36	rota	8	4.4	rota
c	-	-	-	-	rota	-
d	-	-	-	-	4	-
PROMEDIO	64	36	12	5.6	3.2	

DISCUSION

Según los resultados obtenidos de la resistencia a la rotura de muestras recocidas se nota claramente que existe una relación inversa entre la resistencia de la junta y el crecimiento de la capa de intermetálicos. Asimismo se observa en muestras recocidas por períodos largos, que el aluminio se desprende de la capa de intermetálicos, posiblemente por la presencia de una gran cantidad de cavidades y por la diferencia del coeficiente de dilatación. En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se observa la presencia de las cavidades y el aumento del espesor de la película de intermetálicos durante el tiempo de recocido.

IV.5.- APARIENCIA DE LA FRACTURA

En la figura 4.24 se muestra la fractografía de la fractura de la muestra t_{1c} . Dicha muestra ha sido fabricada en condiciones normales y el ensayo a la tracción se ha realizado según la probeta (I).

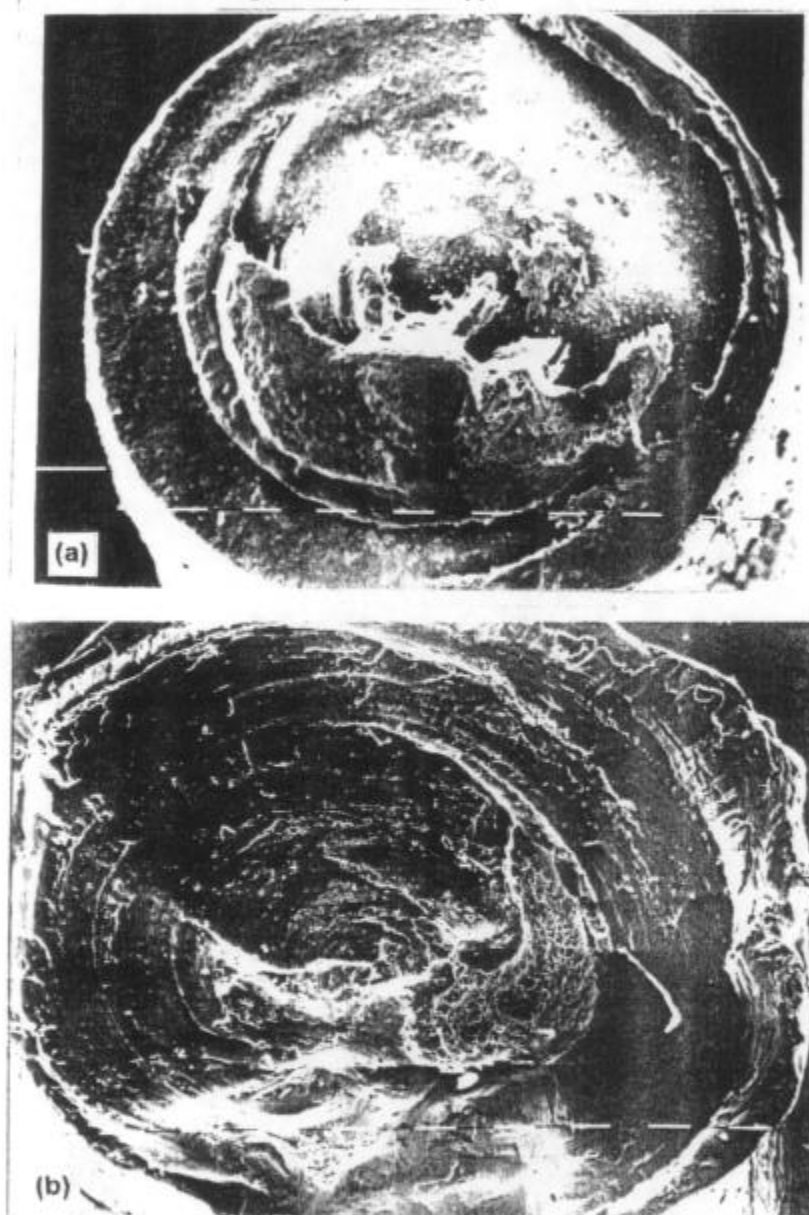


Fig.4.24.-Fractografía de superficies fracturadas
(a). superficie de acero, y (b). superficie de aluminio
Muestra: t_{1c} , probeta (I).

DISCUSION

La superficie del acero está totalmente cubierto por una capa gruesa de aluminio, del que indicaría que la rotura ha ocurrido en el metal base del aluminio. La resistencia a la rotura de esta probeta fue de 94.4 Mpa; mientras que la resistencia del aluminio es de alrededor de 96 Mpa. De manera que dicho resultado se asemeja a la resistencia del aluminio, siendo, por lo tanto, una probeta no adecuada para determinar la resistencia de la junta.

En la figura 4.25 se muestra la fractografía de la fractura de la muestra t_{2b} . Dicha muestra fue fabricada bajo condiciones normales y el ensayo a la tracción realizado según la probeta (II).

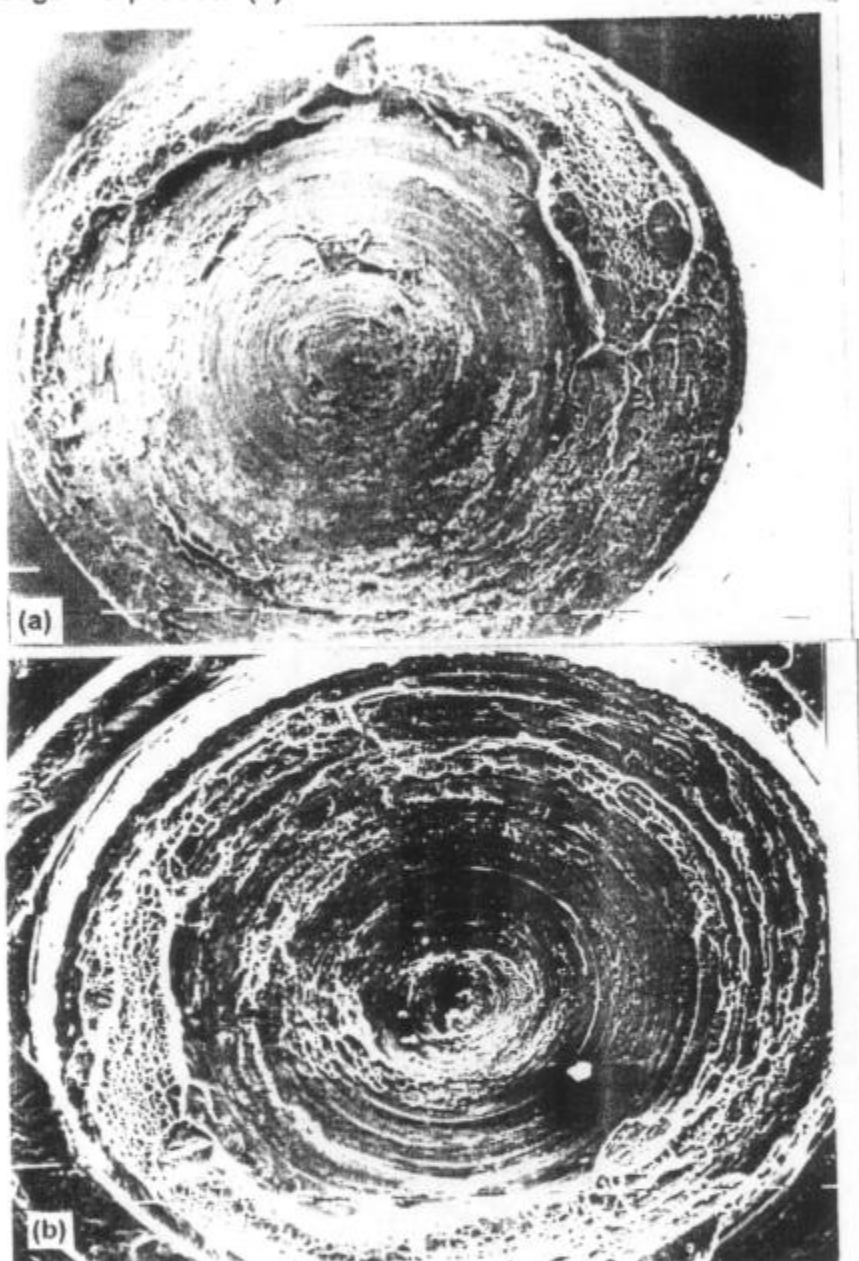


Fig.4.25.-Fractografía de las superficies fracturadas por tensión. Muestra t_{2b} , probeta (II)
(a).superficie del acero, (b).superficie del aluminio

DISCUSION

La superficie del centro del acero presenta una capa muy delgada de aluminio, en cambio en la periferia (forma de anillo) presenta una capa de mayor espesor. La resistencia de dicha muestra es de 216 Mpa, siendo este valor mayor que la resistencia del aluminio. Por lo tanto, este tipo de probeta es adecuado para encontrar la resistencia de la junta. En ambas superficies se nota una fractura dúctil.

En la figura 4.26 se muestra la fractografía de la fractura de la muestra t_{3b} . Dicha muestra fue fabricada bajo condiciones normales y el ensayo a la tracción se realizó según la probeta (III).

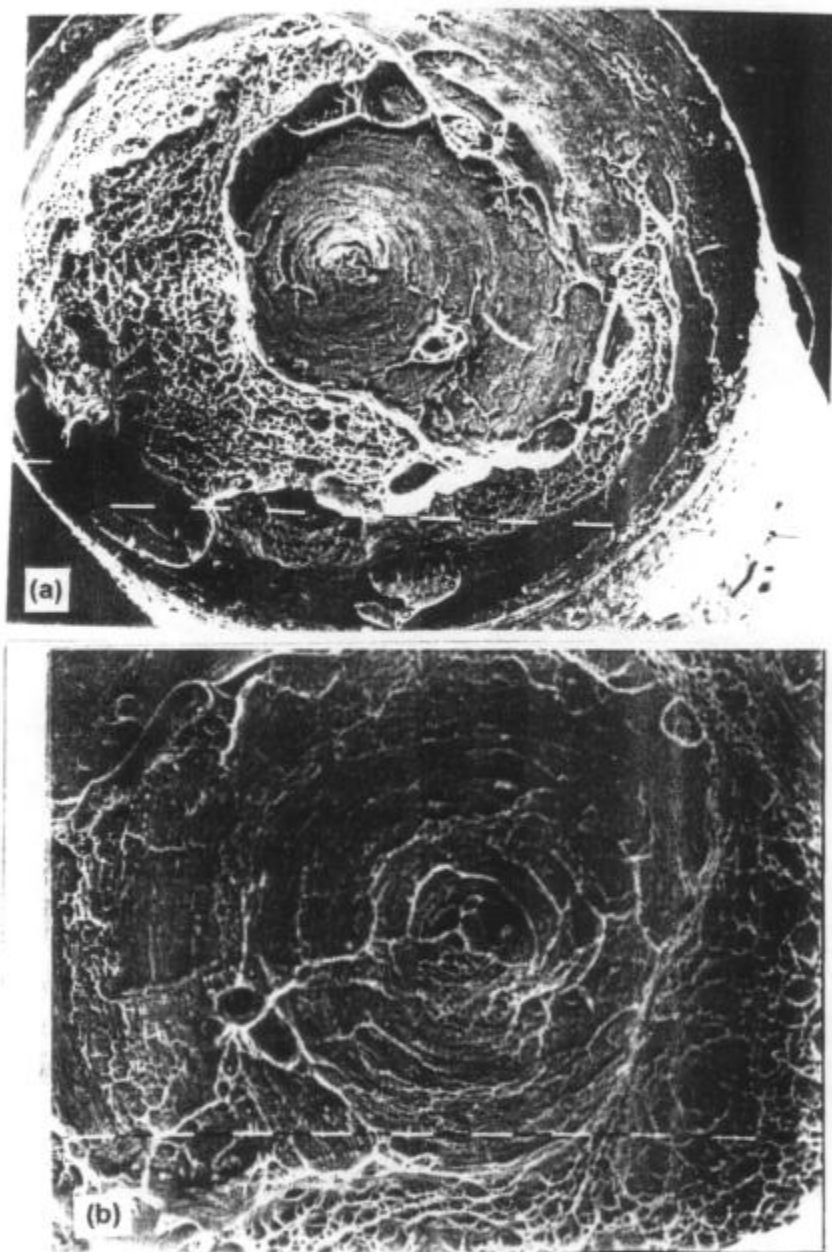


Fig.4.26.-Fractografía de las superficies rotas por tensión
Muestra: t_{3b} , probeta (III).

(a).superficie del acero, (b). superficie del aluminio

DISCUSION

El material adherido de aluminio sobre la superficie del acero es similar a la muestra anterior, con la diferencia que dicha película es más gruesa con clara presencia de fractura dúctil. La resistencia de dicha muestra es de 313 Mpa, siendo este valor superior a los resultados obtenidos con las probetas (I) y (II). Por lo tanto, este tipo de probeta es la más adecuado para determinar la resistencia a la rotura de la junta.

En la figura 4.27 se muestra la fractografía de la fractura de la muestra Ct₁. Dicha muestra fue fabricada con superficies a soldar contaminadas con adherencia de óxidos, grasa y aceite. La resistencia a la tracción se realizó según la probeta (II).

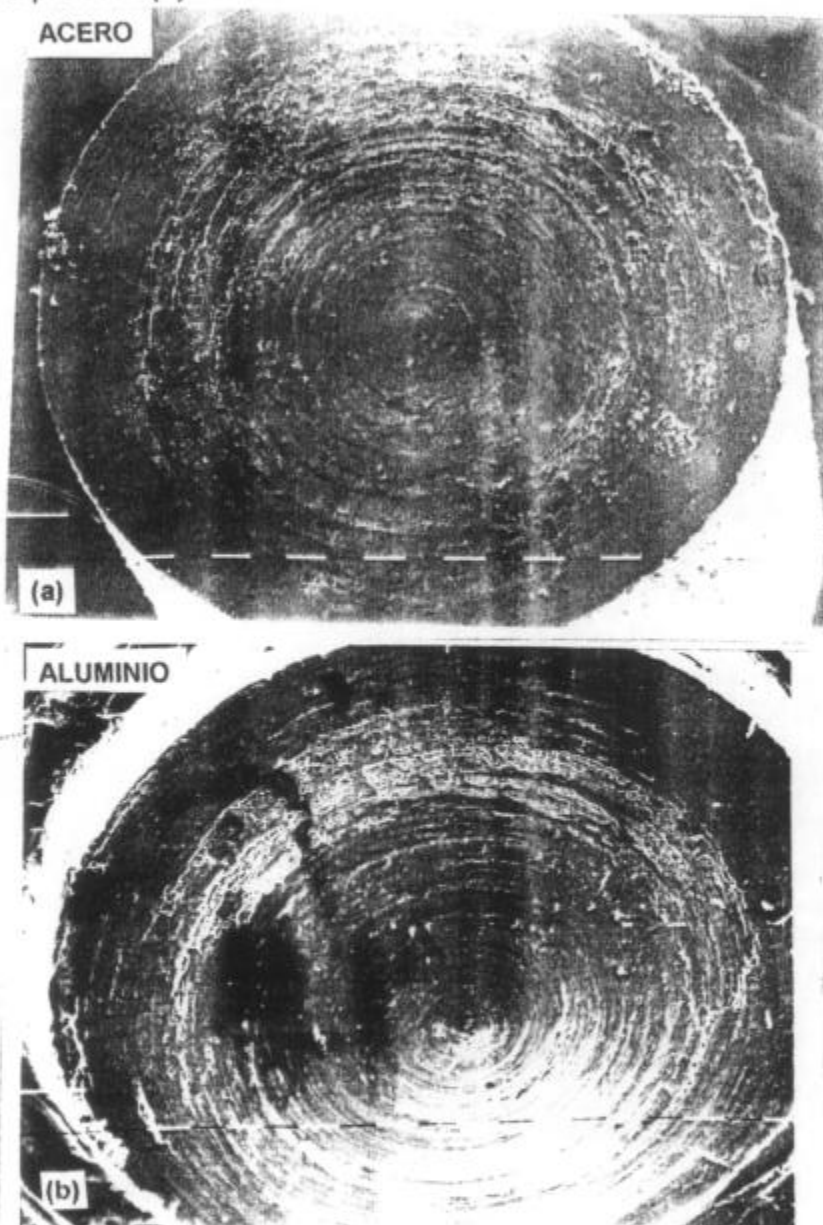


Fig.4.27.-Fractografía de superficies rotas por tensión
Muestra: Ct₁, probeta (II).
(a).superficie del acero, (b). superficie del aluminio

DISCUSION

Prácticamente no hay una película de aluminio adherida sobre la superficie del acero. En ambas superficies se nota claramente las marcas del maquinado. El valor de la resistencia de dicha muestra fue de 59 Mpa. Dicho valor está por debajo de la resistencia del aluminio. Por lo tanto, la contaminación de las superficies a soldar influyen fuertemente en la calidad de la soldadura en la unión de materiales disímiles.

En la figura 4.28 se muestra la fractografía de la fractura de la muestra Rt_{3a} rota por tensión. Dicha muestra fue soldada en condiciones normales y fue recocida isotérmicamente a 550°C por 144 horas. El ensayo a la tracción se realizó según la probeta (II).

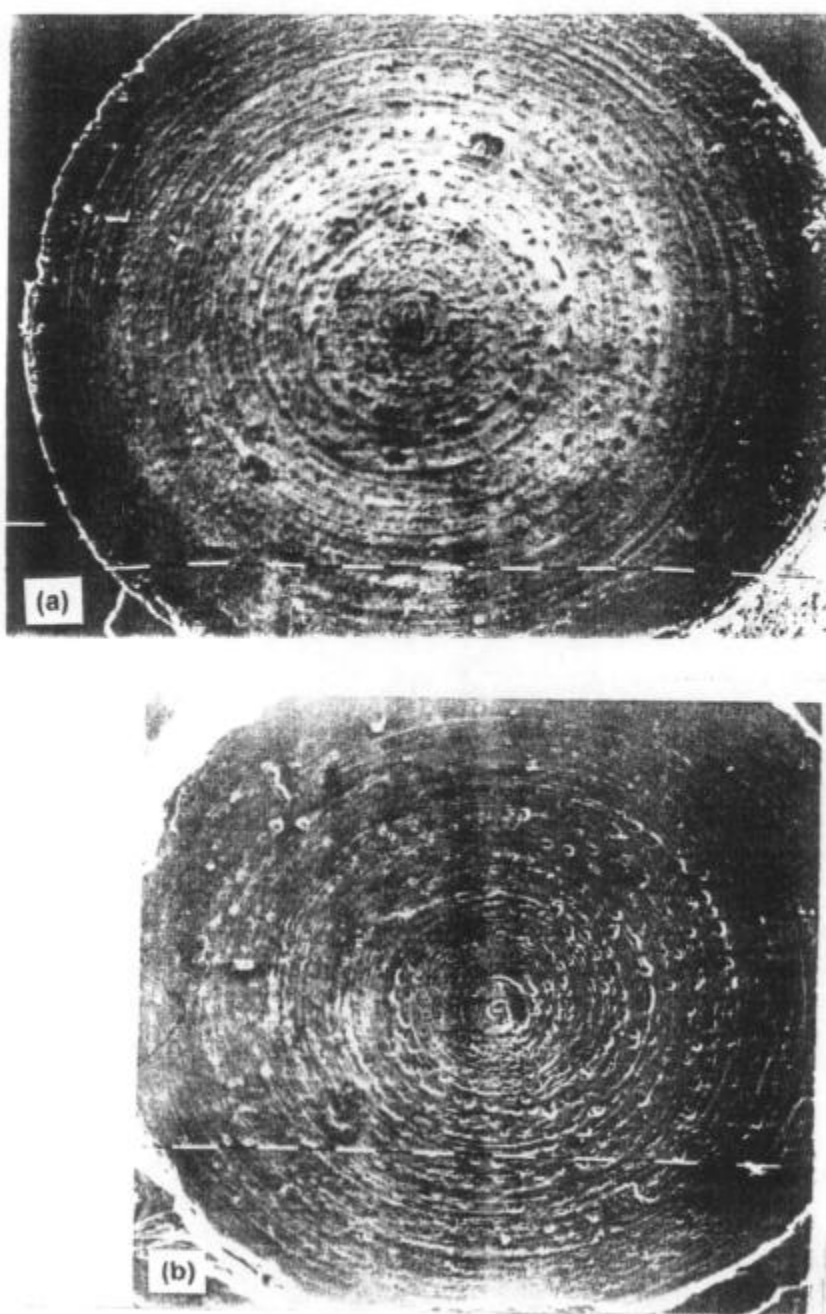


Fig.4.28.-Fractografía de superficies rotas por tensión
Muestra: Rt_{3a} , probeta (II).
(a).superficie del acero, (b).superficie del aluminio

DISCUSION

Se ha observado en muestras tratadas por largos periodos de recocido, que el aluminio se desprende de la interfase (capa de intermetálicos). Sobre la superficie del acero se notan protuberancias de diferente tamaño, en cambio sobre la superficie del aluminio se observan pequeñas cavidades de diferente tamaño, pudiendo afirmarse que ha ocurrido la penetración del acero sobre la superficie del aluminio. También se notan las marcas originales del maquinado, aunque no tan claramente. La resistencia de esta muestra ha sido de 12 Mpa, lo que indica que la presencia de la capa de intermetálicos disminuye rápidamente la calidad de la soldadura.

REFERENCIAS

- [1].- T. J. Jessop. BSc(Eng), ACGI, Mweldl, E. D. Nicholas, Bsc, MIM, MWeldl, and W.O. Dinsdale. "*Friction welding dissimilar metals*", Advances in welding processes (Proceeding of the conference), 14-16 abril 70, The Welding Institute-Abington Hall, Cambridge 71, (49).
- [2].- F. A. Calvo, A. Ureña, F. Molleda, J. M. Gómez de Salazar y A. J. Criado. "*Contribución al estudio de la soldadura por difusión*", Rev. Soldadura 16 (3), 1986, pág. 118.
- [3].- Scott M. H. and Squires I. F. "*Metallurgical examination of aluminium-stainless steel friction welds*", British Welding Journal 1966, March.
- [4].- G. M. Bedford, J. Boustead. "*Formation of intermetallic compounds in aluminium - coated steel strip produced by the Elphal Process*", Metals Technology, May 1974, p. 233 - 240.
- [5].- Koso Okita and Masatoshi Aritoshi. "*Measurement of the friction temperature under steady state by conventional driving method*", Transactions of the Japan Welding Society, 13, 2, October 1982, p.83 to 88.
- [6].- K. K., Wang and Lin , W. 1974. "*Flywheel friction welding research*" . Welding Journal 53 (6): 233-s - 241-s.
- [7].- H. Kreye, H. , and Wittkamp, I. 1977. "*Gefügeänderungen und bindemechanismus beim reichschweissen*". Zeitschrift für Metallkunde 68 (4), pp. 253 - 259-
- [8].- S., Elliot and Wallach, E. R. 1981. "*Joining aluminum to steel - part 2, friction welding*", Metal Construction 13 (4), p. 221 - 225.
- [9].- R. A. Bell, J. C. Lippold, and D.R. Adolphon. "*An evaluation of copper-stainless steel inertia friction welds*", Supplement to the Welding Journal, November 1984, p. 329-s.
- [10].- S. ,Yashan, Tsang, W. L. Johns and M. W. Doughty. "*Inertia friction welding of aluminum to type 316 stainless steel*", Welding Journal, August 1987, p. 27 - 37.

CAPITULO V : CONCLUSIONES GENERALES

- 1.- La condición de las superficies a soldar influye en la calidad de la soldadura. Superficies con maquinado fresco inmediatamente antes de realizar la soldadura permiten obtener uniones de alta resistencia, mayores que la resistencia del material base de aluminio. En cambio, en muestras sin maquinado fresco la resistencia disminuye alrededor del 78% del valor aparentemente óptimo.
- 2.- En la zona adyacente a la interfase en el lado del aluminio se observan cambios metalúrgicos, presentándose una gran deformación macroscópica acompañada de granos muy finos adyacentes a la línea de unión e, inmediatamente después, granos elongados paralelos a la junta, donde se aprecia una recristalización parcial, que en conjunto conforma la zona afectada por el calor con un espesor aproximado de 600 - 1000 μm . En el lado del acero, prácticamente no se observa dicho cambio.
- 3.- El crecimiento de la capa de compuestos intermetálicos va acompañado de una disminución de la resistencia de la junta en forma acelerada. Por otro lado, en muestras tratadas por largos periodos, se observa el desprendimiento del aluminio de la interfase, limitando en consecuencia el uso de dichas uniones a elevadas temperaturas.
- 4.- En muestras no recocidas, es probable que en la interfase se tenga la presencia de la fase FeAl_3 en cantidades muy pequeñas. En cambio, en muestras recocidas a 550°C a periodos largos, se observa claramente la presencia de la fase Fe_2Al_5 .
- 5.- De acuerdo a los resultados obtenidos, los parámetros de operación elegidos son apropiados para la obtención de uniones acero/aluminio. Otras combinaciones de materiales y de otras conformaciones geométricas requerirán, obviamente, diferentes condiciones de soldadura.

RECOMENDACIONES

1.-Automatizar el equipo, cambiando la contrapunta por un pistón hidráulico. Asimismo implementar una instrumentación adecuada que permita evaluar los parámetros durante el proceso de soldadura.

2.-Realizar un estudio sobre la temperatura de nucleación y formación de los compuestos intermetálicos, para determinar el umbral de temperatura de aplicación de dichas juntas, empleando diferentes tiempos y diferentes secciones de las uniones.

APENDICE I

INFORMACION GENERAL ACERCA DE LA SOLDADURA POR FRICCION

1.1.- INTRODUCCION

La idea de la utilización del calor generado por fricción para la soldadura de metales no es nueva. En la industria del trabajado de metales se ha encontrado diversas herramientas de corte y algunas piezas soldadas por fricción, raspado, o una combinación entre fricción y forjado. También hubo intentos de soldar barras de metal por tope haciendo uso del torno. A estos eventos se los ha considerado solamente como técnicas curiosas.

Algunas aplicaciones y patentes datan de principios del siglo XX. Sin embargo, los estudios científicos empezaron en 1956, según referencia [1]. El investigador Chudikov revivió el viejo concepto de fricción y con éxito demostró la posibilidad de realizar soldaduras a tope entre barras de acero. Vill [2] y otros investigadores de la USSR trataron de explicar el proceso de soldadura por fricción desde distintos puntos de vista. Dicho proceso fue introducido en Estados Unidos en 1960, el cual fue desarrollado por la American Machine and Foundry Co. y Hollander y Cheng, quienes realizaron trabajos sobre el análisis de parámetros y aspectos térmicos que se producen durante la soldadura por fricción.

En 1962, Caterpillar Tractor Company desarrolló la "soldadura por inercia", la cual viene a ser una modificación de la soldadura por fricción convencional. Desde entonces, la soldadura por fricción convencional o de transmisión continua ha sido empleada por los rusos; mientras que la soldadura de fricción por inercia o por volante ha sido empleada por los norteamericanos.

En general, hay tres formas para unir los materiales [3] (ver figura 1), las cuales son:

- (1).-Unión por sujeción mecánica, como roblonado y abulonado
- (2).-Unión adhesiva
- (3).-Por soldadura, cuyos procesos son:
 - Soldadura por fusión
 - Soldadura al estado sólido
 - Soldadura por brazing y soldering

La clasificación de las soldaduras se basa en la forma de interacción de los materiales a soldar.

Proceso de soldadura

Soldadura por fusión
 Soldadura al estado sólido
 Brazing y Soldering

Tipo de Interacción

Líquido / Líquido
 Sólido / Sólido
 Sólido / Líquido

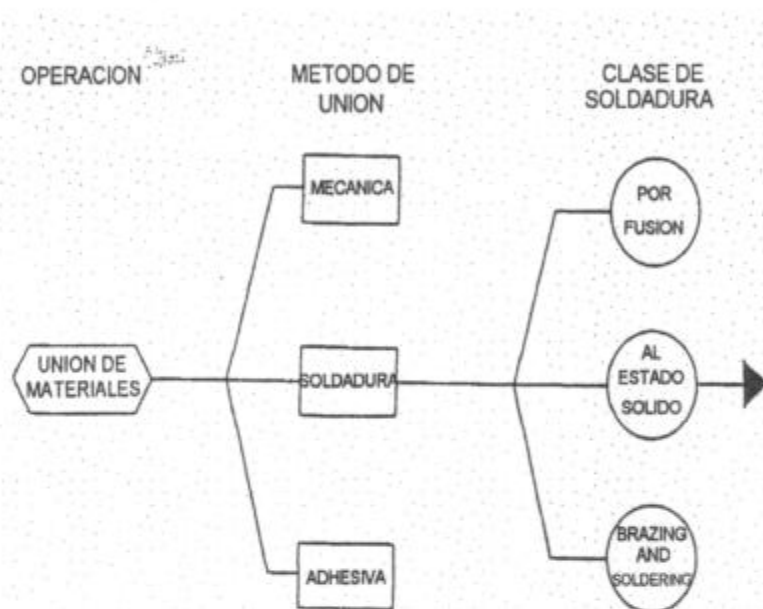


Fig.1.-Unión de los materiales, aceptado por la AWS

Existen más de 40 procesos de soldadura a disposición de los fabricantes de estructuras soldadas. Cada proceso ha sido desarrollado para resolver un problema específico o una necesidad especial. La figura 2 muestra la clasificación del proceso de soldadura al "Estado Sólido", el cual está basado en:

- 1.- Una fuente de energía
- 2.- Alimentación térmica
- 3.- Alimentación mecánica (presión / deformación)
- 4.- Protección (mecanismos de protección)

Dentro de la soldadura al estado sólido o soldadura en fase sólida, se encuentra la soldadura por fricción, que es una variación del método de soldadura por presión.

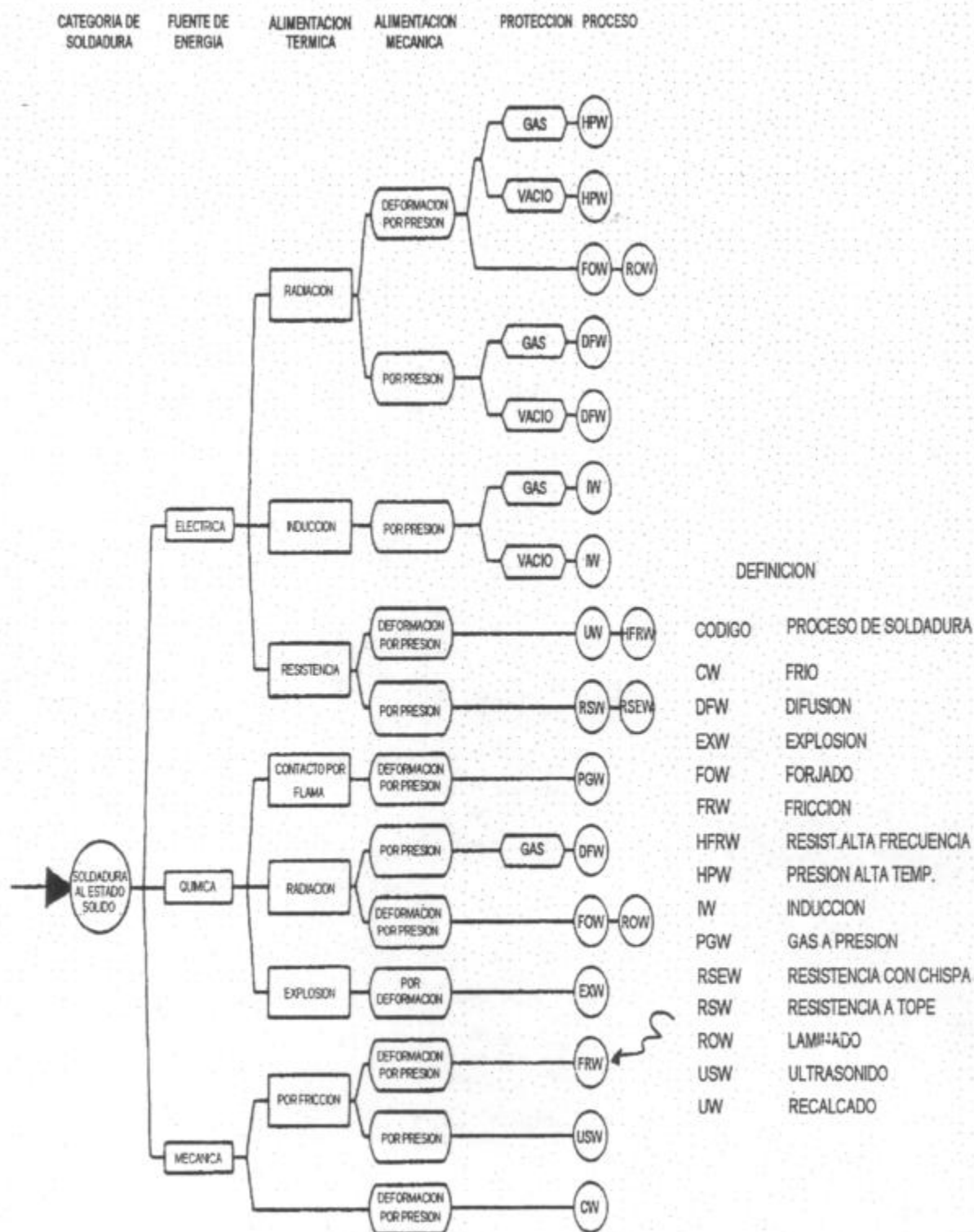


Fig.2.-Clasificación del proceso de soldadura al estado sólido, aceptado por la AWS.

1.2.- MATERIALES SOLDABLES Y SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA

La soldadura por fricción puede ser usada para unir un amplio rango de materiales similares y disímiles [4], entre ellos metales ferrosos y no ferrosos, cerámicos, composites y plásticos. La figura 3 muestra datos ilustrativos que podrían ser tomados como referencia para realizar soldaduras por fricción.

1.3.- MODOS DE ALIMENTACION DE ENERGIA MECANICA

Existen dos métodos principales para suplir energía a la soldadura por fricción:

(1).-Soldadura por fricción convencional, algunas veces también llamada soldadura por fricción de transmisión directa, usa una continua alimentación de energía.

(2).-Soldadura de fricción por inercia, algunas veces también llamada soldadura de fricción por volante, usa la energía almacenada de un volante.

Existen otras variaciones de las soldaduras por fricción:

(a).Radial, puede ser usada para unir secciones circulares. También se emplea para soldar bridas a ejes y tubos. La brida es rotada y comprimida sobre el eje conforme es calentada. Para unir una brida a un tubo se usa un mandril, a efectos de evitar la penetración de material recalcado.

(b).Orbital, una parte rota alrededor de la otra, ninguna parte rota alrededor de su eje. Consecuentemente, las partes a ser unidas no necesitan tener sección circular o tubular. Se emplea este tipo de soldadura para unir partes en orientación angular.

(c).Superficial, una de las partes es rotada, pero al mismo tiempo se adiciona un movimiento relativo en la dirección prependicular al eje de rotación. Este proceso se emplea para depositar material en estado sólido sobre placas planas a partir de configuraciones cilíndricas.

(d).Recíprocamente angular, se emplea principalmente para unir plásticos.

(e).Recíprocamente lineal, una ventaja de esta variación es que no es necesaria la simetría rotacional de las partes a ser unidas.

1.3.1.-PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCION CONVENCIONAL

Las operaciones principales del proceso de soldadura por fricción convencional, que se esquematizan en la figura 4, consiste en que una de las piezas es fijada estacionariamente y la otra en el eje de rotación. Se fija la velocidad de rotación y se pone en marcha el equipo. Se ponen en contacto ambas piezas bajo una presión axial, generando calentamiento en la intercara de ambos materiales, lo que provoca la deformación de dichos materiales y al mismo tiempo la formación del upset. Posteriormente se frena la pieza en rotación e instantáneamente se mantiene o se incrementa la presión axial hasta completar la formación del upset y hacer que la junta adquiera rigidez.

El tiempo necesario para la etapa de fricción puede controlarse de dos formas:

- Desactivación del eje de rotación, de acuerdo al tiempo pre-establecido.
- Desactivación del eje de rotación después de alcanzar la disminución axial del material previamente fijado.

Los principios básicos de la soldadura por fricción convencional y de la soldadura de fricción por inercia son los mismos. La mayor diferencia radica en que la velocidad de rotación de la primera se mantiene constante durante el ciclo de soldadura; mientras que la velocidad de rotación de la segunda disminuye continuamente durante el ciclo de soldadura.

1.3.1.1.-CARACTERIZACION DEL PROCESO

El ciclo de soldadura puede ser dividido en dos etapas: la etapa de fricción y la etapa de forja o la formación del upset. El calentamiento de la soldadura es desarrollado durante la primera etapa, y el consolidado y enfriamiento de la soldadura se manifiesta durante la segunda etapa.

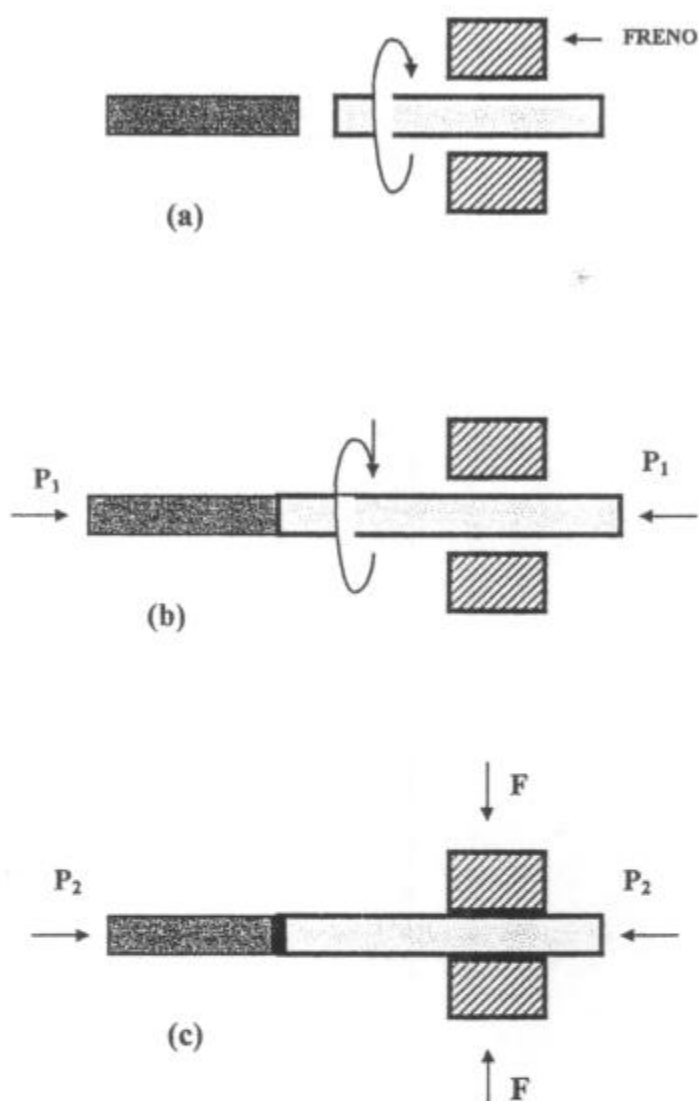


Fig.4.- Operaciones básicas de la soldadura por fricción convencional.

(a). Inicio

(b). Etapa de fricción, bajo una presión axial " P_1 " se pone en contacto las superficies adyacentes y se inicia el calentamiento de la intercara de ambos materiales, al mismo tiempo comienza a formarse el upset.

(c). Etapa de forjado, una vez frenado el eje de rotación, simultáneamente se mantiene o se incrementa la presión axial hasta terminar de formar el upset y fijar la soldadura.

La figura 5 muestra las etapas principales y los parámetros del proceso de soldadura por fricción durante el ciclo de operación.

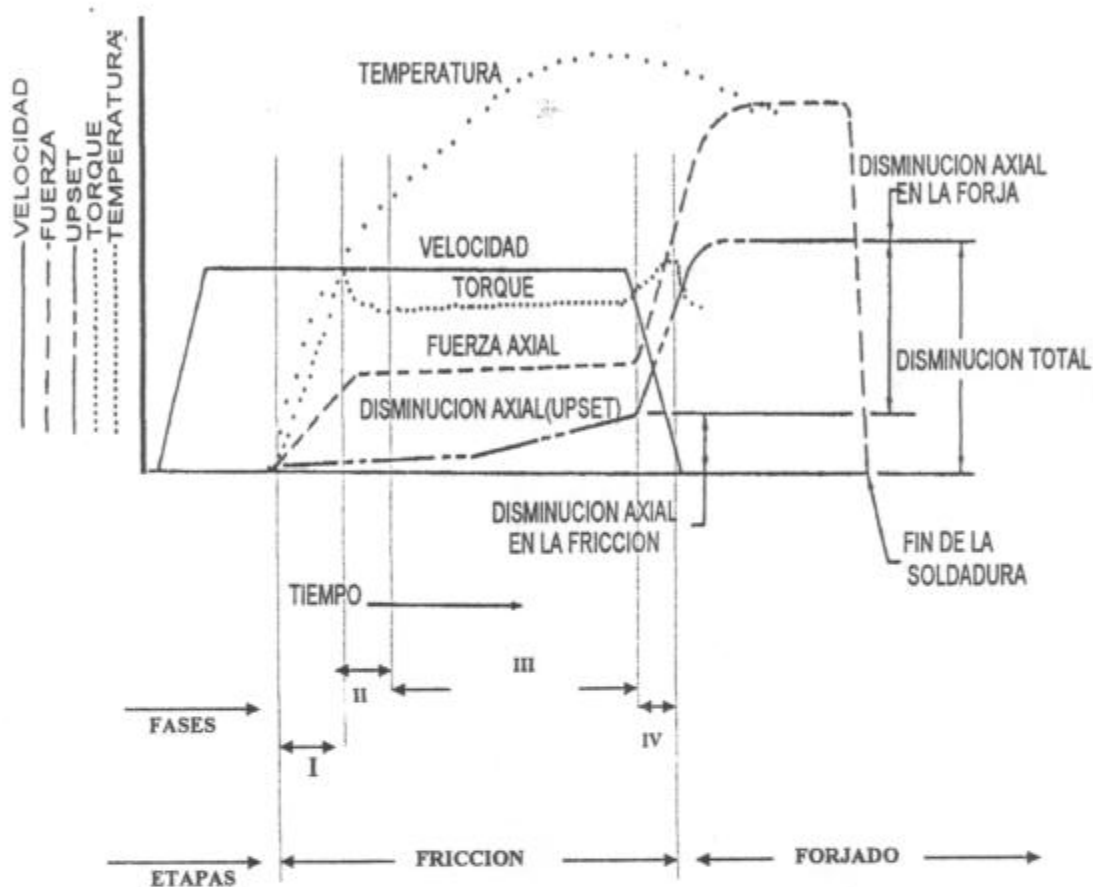


Fig.5.-Principales etapas y parámetros característicos representados cualitativamente en el proceso de soldadura por fricción convencional.

(A).- ETAPA DE FRICCION

El mecanismo de unión ocurre en etapas. Cuando las piezas hacen contacto, toma lugar la fricción entre las superficies adyacentes, generándose una fuerte adhesión en diferentes puntos de la superficie de contacto. Mediante el corte, el metal es transferido desde una superficie a la otra. El tamaño de fragmentos transferidos crece hasta que llega a convertirse en una capa continua de metal plástico. Al inicio aparece un pico de torque que luego decae a un valor constante, simultáneamente el metal es calentado y forzado a salir desde la interfase a la periferia de la junta, dando lugar a la disminución axial.

La etapa de fricción se divide a su vez en cuatro fases:

Fase I

La fase inicial comienza cuando los dos componentes son puestos en contacto bajo una presión axial friccionando ambos materiales y finaliza cuando se ha alcanzado el pico inicial del torque. En esta fase todavía no ocurre la disminución axial.

Fase II

Es la fase de transición que comienza cuando se ha conseguido el pico inicial del torque y finaliza cuando empieza el equilibrio del torque. En esta fase se inicia la disminución axial de los materiales.

Fase III

Es la fase de equilibrio, durante la cual la resistencia del torque permanece substancialmente constante. La velocidad de la disminución axial durante esta fase es también constante.

Fase IV

Es la fase de desaceleración, dicha fase comienza cuando es aplicado el freno y la velocidad de rotación empieza a disminuir y termina cuando cesa el movimiento. Durante esta fase el torque aumenta, termina en un pico y luego decae a cero. La velocidad de la formación del upset en esta fase es mayor que la fase de equilibrio.

La duración de cada una de las fases mencionadas depende de los materiales a ser soldados, la velocidad de rotación, la fuerza axial y la cantidad de disminución axial.

(B).- ETAPA DE FORJADO

Al final del proceso de calentamiento, se aplica la presión de forjado. Al disminuir la velocidad se genera un segundo pico de torque. Cuando se desarrolla la unión de la junta y disminuye la temperatura, el torque disminuye rápidamente, mientras que la velocidad de rotación decae a cero. El mecanismo de unión de metales disímiles es muy complejo. Las propiedades físicas y mecánicas, energía superficial, estructura del cristal, solubilidad mutua y compuestos intermetálicos juegan un rol en los mecanismos de la unión.

RELACIÓN DE VARIABLES

A.- Velocidad

Desde el punto de vista de la calidad de la soldadura, la velocidad no es generalmente una variable crítica, dicha velocidad puede variar dentro de una banda de tolerancia pudiendose obtener soldaduras sanas. Elevadas velocidades de rotación provocan baja alimentación de calor (ver figura 6). Prolongado tiempo de calentamiento permite controlar la velocidad de enfriamiento del material y evitar la fisuración por temple. Para ciertas uniones de metales disímiles, la baja velocidad podría minimizar la formación de compuestos intermetálicos. En la práctica, el tiempo de calentamiento durante el proceso es usualmente controlado por medio de la presión.

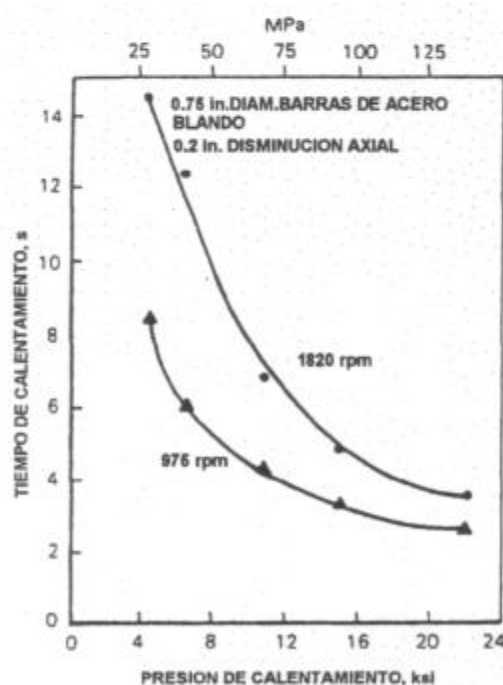


Fig. 6.- Relación entre el tiempo de calentamiento y la presión de calentamiento para acero dulce, mediante la soldadura por fricción convencional.

B.- Presión

Los rangos de presión son también amplios, tanto para la etapa de calentamiento (fricción) como para la etapa de forjado. La presión controla el gradiente de temperatura en la zona de soldadura, la potencia de transmisión requerida y la disminución axial. La presión específica depende del metal a ser unido y de la geometría de la junta. La presión puede ser usada para compensar la pérdida de calor frente a una gran masa, como por ejemplo, la soldadura tubo - placa.

La presión de calentamiento debe ser suficientemente alta para mantener las superficies adyacentes en íntimo contacto para evitar la oxidación. Para una dada velocidad de eje, bajas presiones limitan el calentamiento con poco o ninguna formación del upset. Elevada presión causa calentamiento local a temperatura elevada y formación rápida del upset. Para un acero dulce, la velocidad de formación del upset es aproximadamente proporcional a la presión de calentamiento (ver figura 7). En dicha figura se muestra que, para una dada presión durante la fase de calentamiento, la disminución axial es mayor a baja velocidad que a elevada velocidad. La calidad de la junta es mejorada en varios metales (aceros) por el incremento de la fuerza de forjado al final del período de calentamiento.

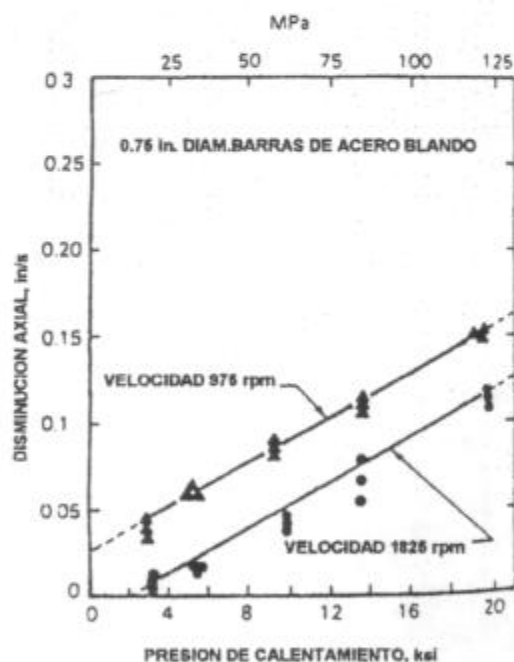


Fig.7.- Relación entre la disminución axial y presión de calentamiento para un acero dulce unido mediante la soldadura por fricción convencional.

En la soldadura de aceros, existe un amplio rango de presiones aplicables para producir soldaduras sanas. En el caso de un acero dulce, la presión en el calentamiento es de 4500 a 8700 psi (31 a 60 Mpa) y una presión de forjado de 11000 a 22000 psi (76 a 152 Mpa). Comúnmente los valores usados son 8000 a 20000 psi (55 a 138 Mpa) respectivamente. Aleaciones de

níquel, requieren altas presiones de forjado. Si se requiere disminuir la velocidad de enfriamiento, es necesario un previo precalentamiento de la pieza a una presión de alrededor de 3000 psi (21 Mpa), que podría ser aplicado por un periodo corto al inicio del ciclo de soldadura.

C.- Tiempo de calentamiento

El tiempo de calentamiento es determinado por la experiencia o por un valor fijado. Excesivo tiempo de calentamiento limita la productividad y provoca pérdida de material. Insuficiente tiempo de calentamiento podría resultar en un calentamiento irregular, generando atrapamiento de óxidos y discontinuidad en la soldadura. El calentamiento irregular es típico en la rotación de las barras, especialmente cercano al centro de la barra, la velocidad periférica podría ser tan baja como cero, dando lugar a una inadecuada fricción de calentamiento. La velocidad periférica a mitad de radio es la más representativa.

El tiempo de calentamiento puede ser controlado de dos maneras:

- 1). Fijar un tiempo de calentamiento para luego desactivar el eje de rotación. La etapa de calentamiento y de forjado puede medirse fijando un determinado tiempo.
- 2). Desactivar el eje de rotación después de alcanzar el valor de la magnitud del upset previamente fijado.

En resumen, para una dada disminución axial (acero dulce), el tiempo de calentamiento es influenciado tanto por la presión de calentamiento como por la velocidad de rotación.

1.3.2.- PROCESO DE SOLDADURA DE FRICCIÓN POR INERCIA

El proceso de soldadura de fricción por inercia, consiste en que una de las piezas es fijada en el volante y la otra pieza es mantenida estacionariamente. El volante es acelerado a una velocidad rotacional predeterminada almacenando la energía necesaria. La rotación del eje del volante es desconectada del eje del motor y bajo una fuerza axial las piezas son puestas en contacto. La energía cinética almacenada en el volante es disipada en forma de calor, a través de la fricción entre la intercara de ambos materiales. Previo a la detención del movimiento de rotación del volante, se aumenta la fuerza axial manteniéndose durante la etapa de forjado hasta después que la rotación haya cesado y la soldadura adquiera suficiente rigidez. En la figura 8 se muestran las operaciones principales del proceso de soldadura por inercia.

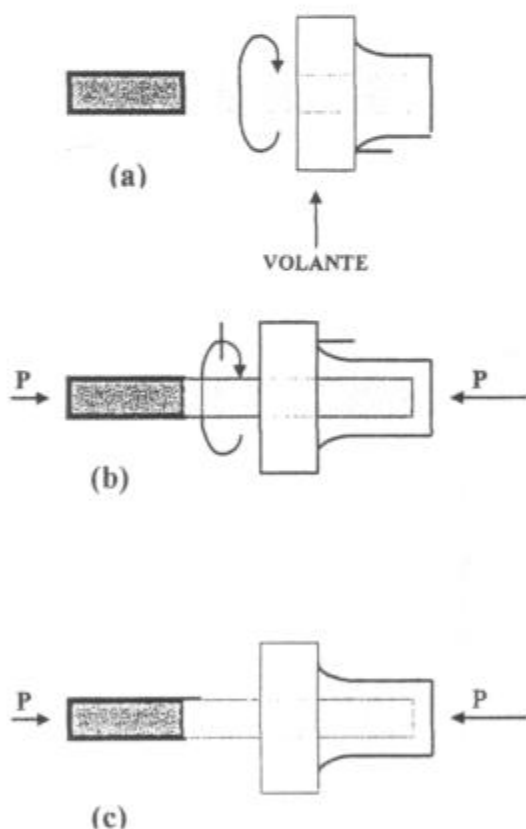


Fig. 8.- Operaciones en la soldadura por inercia.

(a). Producción de la energía cinética

(b). Etapa de fricción, mediante la aplicación de una fuerza axial las piezas son puestas en contacto, iniciándose el proceso (la velocidad comienza a decaer).

(c). Etapa de forjado, previo a que el volante pierda toda su energía cinética, se incrementa la fuerza axial manteniéndose durante el forjado hasta fijar la soldadura.

En el proceso de soldadura de fricción por inercia, la velocidad decae continuamente durante el proceso, mientras que en el proceso de soldadura por

fricción convencional la velocidad permanece constante durante el proceso (ver figuras 5 y 9).



Fig. 9.- Representación cualitativa de los parámetros durante el ciclo de soldadura por inercia.

ETAPA DE FRICCION:

Fase I: Está dominada por el fenómeno de la fricción seca y como resultado aparece la adhesión de las asperezas con un rápido incremento del pico del torque aumentando el área de contacto. Gran cantidad de energía cinética almacenada disminuye abruptamente, provocando un ablandamiento de la interfase y produciendo flujo termoplástico.

Fase II: El torque tiende a estabilizarse, el flujo plástico está esencialmente limitado a una delgada capa en la interfase sin extenderse significativamente en el bulk del material.

Fase III: El mecanismo es dominado por el forjado torsional, mientras que la velocidad y la temperatura disminuyen. Se forma un segundo pico de torque, luego decae cuando la velocidad llega a ser cero. La cantidad de upset continua incrementándose mientras el material fluye de la zona afectada por el calor a través de un camino en forma de espiral a partir del centro de la interfase. La etapa III termina cuando la velocidad llega a ser cero.

RELACIÓN ENTRE VARIABLES

Las variables principales son:

- momento de inercia del volante
- velocidad inicial del volante
- presión axial

Las dos primeras variables determinan la energía cinética total disponible para conseguir la soldadura. La cantidad de presión depende del material a ser soldado y el área de la interfase. La energía cinética del volante en algún instante durante el ciclo de soldadura está definida por la ecuación:

$$E = \frac{IS^2}{C} \quad (1.1)$$

donde,

E = Energía , en ft-lb (J)

I = Momento de inercia, lb-ft² (kg-m²)

S = Velocidad, r.p.m.

C = 5873 , cuando el momento de inercia es en lb-ft²

C = 182.4 , cuando el momento de inercia es en kg-m²

Para el cálculo de los parámetros, se utiliza la "Energía unitaria", definida por la siguiente ecuación:

$$E_u = \frac{E}{A} \quad (1.2)$$

donde,

E_u = Energía unitaria, ft-lb/pulg² (J/mm²)

E = Energía, ft-lb (J)

A = Área de la superficie adyacente, pulg² (mm²)

La energía unitaria puede usarse para calcular o extrapolar datos desde un material, tamaño o geometría a otro, lo que podría servir como una primera aproximación. Si la masa del volante es modificada, la energía cambia por lo tanto la capacidad de una máquina de soldadura por inercia puede ser modificada cambiando el volante dentro de ciertos límites.

Durante la soldadura, la energía es extraída a partir del volante, disminuyendo por lo tanto su velocidad. El tiempo total para que el volante consiga reposar depende de la velocidad promedio por la cual la energía es

disipada y convertida en calor. La forma de la zona afectada por el calor puede ser ajustada variando el momento de inercia del volante, la presión de calentamiento y la velocidad. También el calor alimentado puede ser ajustado para controlar el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) y la velocidad de enfriamiento de la soldadura. El efecto de la energía del volante, la presión de calentamiento, la velocidad periférica sobre la muestra y la formación del flash (material recalcado o extruído) de la soldadura en aceros de bajo carbono se muestran en la figura 10.

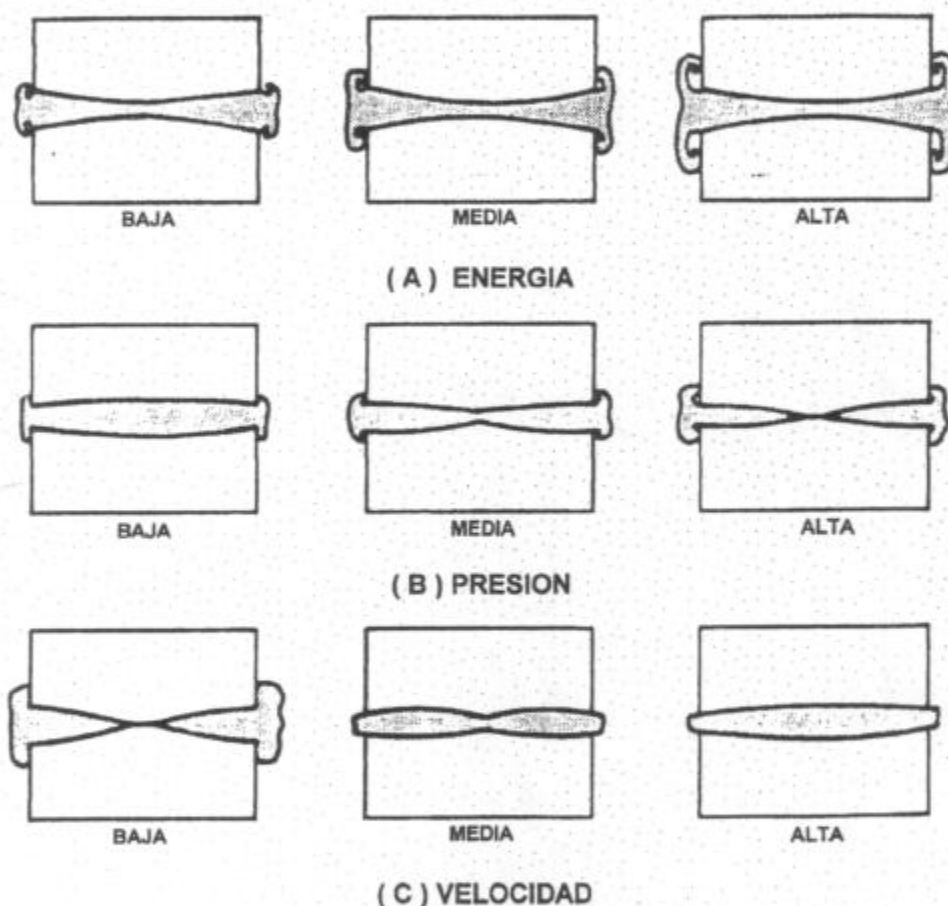


Fig. 10.- Efecto de las variables de soldadura (energía, presión y velocidad) sobre la interface de la junta en la formación de soldaduras por inercia.

EFFECTO DEL VOLANTE

El momento de inercia del volante depende del diámetro y la masa. Para una aplicación específica, la disponibilidad de energía para la soldadura puede ser incrementada cambiando el volante con un momento de inercia mayor. El producto del momento de inercia del volante y el cuadrado de su velocidad inicial varían inversamente para una dada energía disponible.

La cantidad de upset formado cerca del final del ciclo de soldadura depende de la energía remanente del volante, como también de la presión de calentamiento y la presión de forjado. Para aceros de bajo carbono, el forjado empieza usualmente a una velocidad periférica de alrededor de 200 ft/min (1 m/s). En volantes grandes la fase de forjado puede prolongarse. Si el volante es pequeño, el material extruido podría ser insuficiente para consolidar la soldadura y rechazar las impurezas desde la interfase.

Para una dada velocidad inicial y presión de calentamiento, un volante grande incrementará la energía disponible, el efecto se observa en la figura 10 (A). Como la energía disponible es incrementada, la cantidad de material plástico aumenta al igual que la formación del upset y el flujo de metal desde la interfase. El calentamiento de la muestra permanece casi uniforme, pero el exceso de energía provoca pérdida de metal en la forma de flash.

VELOCIDAD

La velocidad tangencial instantánea varía directamente con el radio y la velocidad de rotación, según la fórmula:

$$V_t = Krs \quad (1.3)$$

donde,

V_t = Velocidad tangencial, ft/min.

r = Radio, pulg (m)

s = Velocidad instantánea, r.p.m.

$K = 0.52$, cuando "r" está en pulgadas

$K = 0.10$, cuando "r" está en metros

En la rotación de una barra sólida, la velocidad varía linealmente desde cero en el centro hasta un máximo en la periferia. Esto contrasta con el comportamiento de un tubo de pared delgada, donde el cambio de la velocidad a través de la superficie adyacente es menor. Por lo tanto, la energía requerida para la soldadura de una barra y un tubo de una misma aleación e igual área de

superficie adyacente será diferente. Para cada metal, existe rangos de velocidades periféricas que producen mejores propiedades de soldadura.

En la soldadura de barras sólidas de acero, la velocidad periférica inicial recomendada para la pieza a soldar está en el rango de 500 a 1500 ft/min (2.5 a 7.5 m/s); sin embargo, las soldaduras pueden ser hechas a velocidades tan bajas como 300 ft/min (1.5 m/s). Si la velocidad es también baja, sea o no el nivel requerido de energía, el calentamiento en el centro será también bajo para producir una junta a través de la interfase y el flash será basto e irregular, tal como se ilustra en la figura 10 (C).

A una velocidad media de 300 a 800 ft/min (1.5 a 4.1 m/s), el calentamiento de la muestra de acero tiene la forma "hourglass" en el límite inferior del rango y gradualmente aplanada en el límite superior del rango. A una velocidad inicial superior a 1200 ft/min (6.1 m/s) para el acero, la soldadura toma la forma redondeada y es más gruesa en el centro que en la periferia.

PRESION DE CALENTAMIENTO

El efecto de la variación de presión de calentamiento es generalmente opuesto a la velocidad. Como se observa en la figura 10 (B), las soldaduras realizadas a baja presión de calentamiento son similares a las soldaduras hechas a elevada velocidad. Excesiva presión produce una soldadura con falta de unión en el centro y gran cantidad de soldadura de material recalcado, similar a una soldadura hecha a baja velocidad. El rango de presión efectiva de calentamiento para una barra sólida de un acero de medio carbono es de 22000 a 30000 psi (152 a 207 MPa).

1.4.- VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCION

1.4.1.-VENTAJAS

- (1). No se necesita metal de aporte o de relleno.
- (2). No se requiere fundente ni protección por gases. Los metales reactivos como el titanio, zirconio, niobio y tantalio han sido satisfactoriamente unidos al medio ambiente.
- (3). El proceso ofrece un ambiente limpio, sin arco, chispas, humos o emanación de gases.
- (4). La zona afectada por el calor es angosta.
- (5). La limpieza de la superficie no es tan significativa, comparada con otros procesos de soldadura. La soldadura por fricción tiende a romper y desplazar las películas desde el centro hacia la superficie.

- (6). La soldadura por fricción se aplica en soldaduras de materiales ingenieriles y resulta muy conveniente para la unión de metales disímiles.
- (7). En muchos casos, la resistencia de la soldadura es mayor que la resistencia del metal más débil de la junta.
- (8). No es necesario que los operadores posean habilidad manual para realizar la soldadura. Resulta apropiada para la producción en batch o para pequeñas producciones.
- (9). El proceso es fácilmente automatizado para producciones grandes.
- (10). Las soldaduras son hechas rápidamente en comparación con otros procesos de soldadura.
- (11). Los requerimientos de planta (espacio, potencia, dotaciones especiales, etc) son mínimos.
- (12). Es uno de los procesos menos sensitivos con respecto a los cambios químicos en el material.

1.4.2.- LIMITACIONES

- (1). En general, una de las piezas debe tener una sección circular o simetría capaz de ser rotada alrededor de un eje.
- (2). La preparación y alineamiento de las piezas pueden ser críticos para el desarrollo uniforme de la fricción y el calentamiento, particularmente para diámetros mayores de 2 pulgadas (50 mm).
- (3). La inversión en equipamiento y herramientas es alta.
- (4). Los materiales con lubricación seca y no forjables no pueden ser soldados.
- (5). Si ambas partes son mayores a 3 pies (1m), se requieren máquinas especiales.
- (6). Las aleaciones sin mecanizado resulta difíciles de soldar.
- (7). El mecanismo de sujeción debe ser lo suficientemente fuerte como para resistir el choque y las cargas de torque.

1.5.- TIPOS DE JUNTAS

La naturaleza de la soldadura por fricción indica que la cara de la junta de una de las piezas debe tener forma circular. La pieza a rotar debe estar adecuadamente balanceada, ya que es girada a una velocidad relativamente alta. La preparación de superficies a unir no es normalmente crítica, excepto en casos de aleaciones que difieren en propiedades mecánicas, propiedades térmicas, o ambas. Los diseños básicos de juntas pueden ser de barra-barra, tubo-barra, barra-tubo, barra-placa, tubo-placa, tubo-disco.

Cuando las barras o tubos son soldados con placas, el material extruído proviene de la barra o del tubo. Esto se debe a que existe menor masa en la pequeña sección y la penetración de calor es más profunda en ella. Este caso se aplica usualmente para juntas de metales disímiles, con propiedades mecánicas o térmicas ampliamente diferentes. El material de menor resistencia al forjado tendría una mayor área de sección transversal. Ciertas aplicaciones

requieren el uso de juntas cónicas, sin embargo la experiencia demuestra que una geometría de superficie plana es superior, dando lugar a menores tensiones y distorsiones residuales.

Cuando los metales son similares y tienen aproximadamente la misma temperatura de forjado y conductividad térmica al ser soldada por fricción, no habrían, restricciones en las relaciones de área de sección transversal. En la soldadura por fricción existen velocidades de calentamiento muy elevadas (100000°F/s), lo que permite que el ciclo de soldadura sea corto y la pérdida de calor mínima.

En la soldadura de metales disímiles con enorme diferencia entre temperatura de forjado y conductividad térmica, es necesario ajustar el área o tamaño adyacente a la superficie de contacto. Las áreas diferenciadas deben ser determinadas experimentalmente, debido a que cada metal reacciona en forma diferente durante el proceso.

1.6.- PREPARACION DE SUPERFICIES

La preparación de la superficie puede afectar la calidad de la soldadura. Dicha calidad será mejor cuando las superficies adyacentes están libres de suciedad, óxidos, grasa, aceite u otros materiales extraños; caso contrario las superficies adyacentes se unirían con pequeños gaps. En aplicaciones no críticas, puede tolerarse alguna contaminación en la superficie de contacto. Las superficies cortadas por llama, u otras, pueden ser usadas con una adecuada disminución axial, en este caso las superficies deben ser esencialmente perpendiculares al eje de rotación. Si las superficies no son perpendiculares, las juntas no resultarían. En la práctica el rango estaría dentro 0.010 pulg/pulg (0.01 mm/mm) del diámetro de la junta.

Las capas gruesas de escamas de óxidos deben ser eliminadas (en el acero) antes de la soldadura para evitar el calentamiento irregular. Una capa de óxido delgada no sería perjudicial con una adecuada disminución axial. Las proyecciones dejadas por el corte de herramientas no son perjudiciales, sin embargo, deben evitarse huecos o superficies cóncavas, ya que pueden atrapar aire o impurezas en la interfase. En las soldaduras de metales disímiles entre materiales, con grandes diferencias en el comportamiento de forjado en caliente, la limpieza de las superficies de ambas piezas es crítica, por ejemplo, en la junta de acero-aluminio, acero-cobre, cobre-aluminio.

1.7.- TRATAMIENTO TERMICO

Un tratamiento térmico previo de las piezas a la soldadura tiene poco efecto en la soldabilidad de los materiales. Sin embargo, ello puede incidir en las propiedades mecánicas de las zonas afectadas por el calor, además puede también afectar a las mordazas utilizadas. El tratamiento térmico post-soldadura es frecuentemente usado para producir propiedades deseadas en el

metal base, en la junta soldada o en ambos. El recocido post-soldadura puede emplearse para ablandar o aliviar tensiones en la junta.

En el caso de soldaduras de metales disímiles, un tratamiento térmico post-soldadura contribuiría a la formación o a la expansión de una capa intermetálica en la interfase, el cual disminuiría la ductilidad o resistencia de la junta. La calidad de la soldadura dependerá de la selección del material y de las variables de soldadura. En la unión de metales disímiles los parámetros de soldadura son más críticos.

Los ejes soldados por fricción no requieren de algún tratamiento térmico especial, debido a que la soldadura por fricción responde al tratamiento térmico de la misma manera que el metal base.

1.8.- APLICACIONES

INDUSTRIA DEL TRANSPORTE

La aplicación del proceso de soldadura en la industria del transporte ha recibido gran aceptación, ya que la soldadura por fricción simplifica y abarata los costos, razón por la cual tiene amplia aplicación, usándose en la fabricación de ejes para cajas, ejes para camiones, etc.

INDUSTRIA DEL PETROLEO Y GAS

La soldadura por fricción se ha aplicado con éxito en piezas propias de la industria del petróleo, gas y exploración minera. Ejes para bombas y control de ejes de válvulas, incluyendo juntas entre acero dulce y acero aleado resistentes a la corrosión son realizados bajo producción tipo batch y cantidad. Las partes usadas para la soldadura pueden ser ejes de motores eléctricos de acero al carbono con acero inoxidable, de aplicación requerida en medios corrosivos.

CONSTRUCCION DE PLANTAS NUCLEARES

Fabricación de juntas de aceros disímiles de abrochadores bimetalicos usados para soportar las cubiertas aisladas en la construcción de plantas nucleares. Los materiales incluidos son AISI 1009 de acero al carbono y el tipo de acero inoxidable AISI 316. Este tipo de construcción provee la resistencia a la corrosión al final de los sujetadores, mientras que el otro extremo es unido a un acero estructural.

SOLDADURA DE METALES DISIMILES

La soldadura por fricción también se aplica en la manufactura de conexiones eléctricas bimetálicas para la transmisión de potencia y en plantas de procesamiento electroquímico, por ejemplo, piezas de uniones de transición cobre/aluminio.

En el caso de electrodos especiales usados en la industria química, que incluye la unión de titanio o celdas de acero con aluminio, el proceso de soldadura permite la adhesión de una o más tachuelas de aluminio sobre placas de titanio o múltiples tachuelas de aluminio soldadas en placas grandes de acero (podría aproximarse a los 400 pies cuadrados de área) usando un equipo especial de soldadura por fricción. Se han logrado considerables ahorros en la fabricación de herramientas de mano, tales como, grifos, brocas para realizar rosca, canillas de acero, etc.

RESUMEN

La producción de partes por el método de soldadura por fricción se aplica en la industria Aeroespacial, Agricultura, Automotriz, Defensa, Marina y del Petróleo. La soldadura por fricción se emplea en la producción de componentes de motores de aviación. Las partes de automotrices fabricadas por soldadura por fricción incluyen engranajes, válvulas de motor, ejes, componentes de líneas de dirección, barras para puntales, barras para pistones hidráulicos, pistas de laminación, etc. Los equipos destinados a la agricultura son comúnmente soldados por fricción. La unión soldada por fricción aluminio/cobre es ampliamente usada en la industria eléctrica. La junta acero inoxidable/acero al carbono es empleada en sistemas de conexión en la Marina y en bombas de agua de uso doméstico e industrial, los ensambles soldados por fricción son empleados para reposición de piezas fundidas y forjadas de costo elevado.

REFERENCIAS

[1].- K. K. Wang and Wen Lin. "*Ffywheel Friction*" , Welding Journal, June 1974, Welding Research Supplement, p. 233-s - 241-s.

[2].- Subcommittee on Definitions by American Welding Society, "*Clasification of the Welding Process*", Welding Journal, April 1976, pp. 270 - 272.

[3].- Welding Handbook 1990. (2) Chapter 23, pp. 740-760, by American Welding Society.

[4].- C. R. G. Ellis, "*Recent Industrial Developments in Friction Welding*" , Welding Journal, 1975, pp. 582 - 589.

APENDICE II

RECOPILACION DE PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCION SEGUN LA FORMA DE ALIMENTACION DE CALOR Y LA NATURALEZA DE LOS MATERIALES.

TABLA 1: SOLDADURA POR FRICCION CONVENCIONAL

A.- MATERIALES DISIMILES

SOLDADURA	VELOCIDAD R.P.M.	F.FRICCION KN	F.FORJA KN	UPSET mm.	REFER:
25Ø X 100 mm long. Acero Inox.Austenítico/Aluminio Puro Acero Inox.Austenítico/Aleac.Aluminio Acero Inox.Austenítico/Cobre	1300 975 1500	4 9 10	23 25 32	3.3 4.0 9.4	[1]
Ø 20mm. para ambos materiales Titanio 99.7%/Cobre (protección con 99.98% argón)	1500 - 3000	-	25.1	4.0	[6]
Titanio, Ø12mm x 25 mm long. Acero ,Ø 12mm. x 15mm Titanio/Acero S25C	2440 - 3660	13.3 - 26.6	26.6		[9]
Previo a la soldadura, los materiales fueron tratados térmicamente. Ø15.9 mm. Acero Cr-Mo (S106)/Nimonic 90 Ø19.0 mm. Acero Cr-Mo(S106)/Acero 12%Cr(M152) Ø12.7 mm. Acero Cr-Mo(S106)/Inconel 901	1200 1825 1436	11.1 16.1 22.8	57.5 73.7 89.9	4.45 2.54 1.26	[12]
FVS1212 Y 2024-T351: Aleac. de aluminio de alta resistencia a la temperatura >375°C. Ø25 mm. FVS12/2024T351	-	30	50	4.0	[13]

B.- MATERIALES SIMILARES

SOLDADURA	VELOCIDAD D R.P.M.	F.FRICCION KN.	F.FORJA KN.	UPSET mm.	REFER.
Øext. 19mm., Øint. 12.7 mm. Acero dulce/Acero dulce	422 - 3377	2.4 -	19	-	[2]
Materiales, Ø12.7mm. Aluminio 6061/Aluminio 6061	1120	5.4	6.5	-	[11]
FVS1212: Aleac.Aluminio de alta resist.a elevada temperatura. Ø 25mm. FVS121/FVS1212	-	30	50	4	[13]
Ø 19.05mm. Estirado en frío Acero (EN3B)/Acero (EN3B)	720 - 2500	4.9	19.7	1.2 - 6.4	[14]

C.- MATERIALES DISIMILES UTILIZANDO INTERLAYER

SOLDADURA	INTERLAYER 10Ømm x 1mm espesor	VELOCIDAD R.P.M.	PRESION (MPa) Fricción Forja	TIEMPO (seg.) Fricción Forja	RESIST. Mpa	REFER.
Materiales, Ø12.7mm Titanio/Níquel	Cobre	1120	34.47 68.95	7 7	64.70-135	[11]
Al 6061/Al 6061	Aluminio	1120	43.1 68.95	4.0 10	182 - 196	
Latón/Cobre	Latón naval	1120	43.1 68.95	7.0 10	56 - 156	

TABLA 2: SOLDADURA DE FRICCION POR INERCIA
A.- MATERIALES DISIMILES

SOLDADURA	MOMENTO DE INERCIA Lb-ft ²	VELOCIDAD ROTACION R.P.M.	FUERZA AXIAL KN.	UPSET mm.	TIEMPO Seg	REF.
Ø 28.6 mm. Cobre, material estacionario Ø 12.7mm. Acero Inoxidable, en rotación Acero SAE 304L/Cobre OFHC	2.5	4500	34.25			[3]
Ø25.4mm. X 102mm. Aluminio Ø15.9mm. X 102mm. Acero Acero 316/Aluminio ANSI 1100	6.46 - 25.8	1900 - 4400	54.6			[4]
Acero 1018/Cobre	1.4	8000	22.3	3.81	1.0	[5]
Acero M2/Acero 1045	27.0	3000	178.3	2.54	3.0	
Aleación base Níquel 718/Acero1020		1500	222.9	3.81	2.5	
Acero inox. 302/Acero 1020	130.0	3000	133.8	2.54	2.5	
Acero de alto carbono Sinterizado/Acero 1018	20.0					
Aluminio 6061/Acero inox. 302	8.3	4600	133.8	2.54	2.5	
Cobre/Aluminio ANSI 1100	3.9	5500	89.2	5.08	3.0	
	11.0	2000	33.4	5.08	1.0	
barras Ø12.7mm Udimet 700/TD-Nickel	5	10200(inicio) 3000(final)	8.7 - 30.5	1.8		[8]
FVS1212 y 2024-T351: Aleac. de Aluminio de alta resist. a la temp.>375°C, Ø 22mm. FVS1212/2024-T351	3.94	7009.	83.7 - 139			[13]

B.- MATERIALES SIMILARES

SOLDADURA (el mismo material)	MOMENTO DE INERCIAS Lb - ft ²	VELOCIDAD ROTACION R.P.M.	FUERZA AXIAL KN.	UPSET TIEMPO		REFER
				mm.	seg.	
Acero 1018	6.7	4600	53.5	2.54	2.0	[5]
Acero 1045	7.8	4600	62.40	2.54	2.0	
Acero 4140	8.3	4600	66.9	2.54	2.0	
Inconel 718	130.0	1500	222.9	3.81	3.0	
Acero Maraging	20.0	3000	89.1	2.54	2.5	
Acero Inoxidable 410	20.0	3000	80.2	2.54	2.5	
Acero Inoxidable 302	14.0	3500	80.2	2.54	2.5	
Cobre comercialmente puro	1.0	8000	22.3	3.81	0.5	
Cobre aleado 260(latón 70)	1.2	7000	22.3	3.81	0.7	
Aleación Titanio, Ti-6Al-4V	1.7	6000	35.6	2.54	2.0	
Aleación Aluminio 1100	2.7	5700	26.7	3.81	1.0	
Aleación Aluminio 6061	3.0	5700	31.2	3.81	1.0	
Barras, Ø 12.7mm. Udimet 700/Udimet 700	5	3600	35.8	3.8		[8]
TD-Níquel/TD-Níquel	0.16	12000(inicio)	17.4	1.8		
FVS1212: Aleac. Aluminio de alta resist. a la temp. >375°C, Ø22mm. FVS1212/FVS1212	3.94	10000	55.8 - 83.7			[13]

TABLA 3: SOLDADURA POR FRICCION DE METALES CON MATERIALES CERAMICOS UTILIZANDO INTERLAYER .

SOLDADURA	INTERLAYER	PRESION (MPa)			VELOCIDAD FRICCION S ⁻¹	TIEMPO seg			RESISTENCIA MPa	REF.
		P ₀	P ₁	P ₂		t ₀	t ₁	t ₂		
Ni, Ø16mm. x 40mm. SiC, Ø16mm x 40 mm Niquel/ Carburo de Silicio	Nb, 25 µm espesor Zr, 20 µm espesor Al, 30-1000µm	10	20	20-70	40	1	1-20	6	130	[7]
Barras, Ø16mm. SiC y Cu. SiC/Cu ZrO ₂ / Cu	Al, 10 µm de espesor Ti, 20 µm ; Fe, 30µm Zr, 20 µm ; Ni, 20µm Nb, 25µm; Ag, 15µ	20	70		40	3	6		-	[10]
	Al, 10µm ; Ti, 20µm Zr, 20µm; Nb, 25µm Fe, 30µm; Ni, 20µm Ag, 10µm	20	70		53	6	6		-	
Muestras: Ø13mm x 40mm. Aleac. Cu-W(sinteriz.)/ Aluminio c. puro	-	20	20-160		40	1	6		-	[15]

REFERENCIAS

- [1].- T. J. Jessop, BSc(Eng), ACGI, Mweldl, E.D. Nicholas, Bsc, MIM, Mweldl, and W.O. Dinsdale. "*Friction welding dissimilar metals*", 49.
- [2].- F. D. Duffin, Msc, Ceng, MIMechE, MIProdE. Mweldl and A.S. Bhrani, Msc. PhD, Ceng, MIMechE, AIM, Fweldl. "*The mechanics of friction welding*", 34.
- [3].- R. A. Bell, J. C. Lippold, and D.R. Adolphson. "*An evaluation of copper-stainless steel snertia friction welds*". Welding Research Suplement PP. 325-s - 332-s.
- [4].- D. Yashan, S. Tsang, W. L. Johns and M. W. Doughty. "*Inertia friction welding of 1100 aluminum to type 316 stainless steel*". Welding Journal, August 1987. pp.27 - 37.
- [5].- Welding Handbook 1990. (2), Chapter 23, pp. 740 - 760, by American Welding Society.
- [6].- J. Ruge, K. Thomas, C. Eckel and S. Sundaresan. "*Joining of copper to titanium by friction welding*". Welding Journal, August 1986, pp. 28 - 31.
- [7].- Kenji Ikeuchi, Masahiro Takeda, Masatoshi Aritoshi, Maso Ushio and Fukuhisa Matsuda. "*Friction welding of silicon carbide to nickel with intermediate layer*". Transactions of JWRI is published by Welding Research Institute, (20). No. 2, 1991. pp.77 - 84.
- [8].- Thomas J. Moore. "*Friction welding, udimet 700 shows great potential becose the weld are as strong as the parent metal*". Welding Journal, April 1972 pp. 253 - 262.
- [9].- Atsushi Hasui and Yoichi Kira. "*Friction welding of titanium and carbon steel*". Transaction of the J.W.S., April 1985, (10), No.1. pp. 64 - 69.
- [10].-Kenji Ikeuchi, Masatoshi Aritoshi, Gong Shan Chen, Jozef Billy and Masao Ushio. "*Friction bonding of ceramics to metal with intermediate layer*". Trans. JWRI, (23) , 1994 , No. 1. pp.59 - 65.
- [11].- F. Sassani and J. R. Neelam. "*Friction welding of incompatible materials*". Welding research Suplement, November 1988, pp. 264-s - 270-s.
- [12].- P. Jebbings. "*Some properties of dissimilar metal joints made by friction welding*". 22.

[13].- H.H. Koo and W. A. Baeslack III. "*Friction welding of a rapidly solidified Al-Fe-V-Si alloy*". Welding Research Supplement, May 1992, pp. 147-s - 169-s.

[14].- F.D. Duffin, Msc, Ceng, MIMechE, MIProdE, MWeldI, and D. Crossland, Bsc, Msc, PhD, Dsc, Ceng. FIMechE, FIProdE. "*Friction welding with sudden release of the fixed component*", 25.

[15].- Masatoshi Aritoshi, Kozo Okita, the late Toshio Enjo, Kenji Ikeuchi and Fukuhisa Matsuda. "*Friction welding of copper-tungsten sintered alloy to pure aluminum*". Transaction of the Japan Welding Society, (24), No. 1, April 1993. PP. 50 - 55.