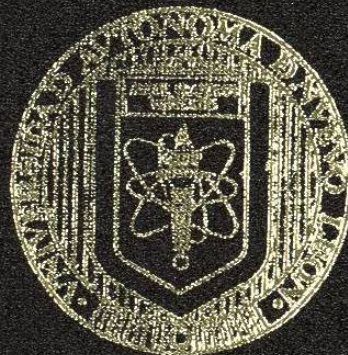


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA  
TERMOGALVANIZADOS

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:  
JOSE ALBERTO NIETO MARTINEZ

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003



SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA  
TERMOGALVANIZADOS

I.A.N.M.

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2003  
.N53

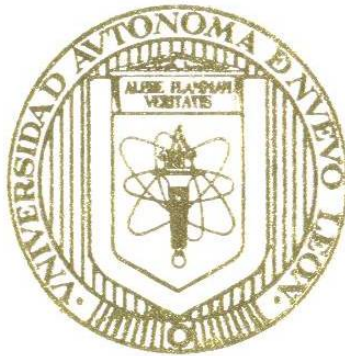


1020149043

# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA  
TERMOGALVANIZADOS

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:

JOSE ALBERTO NIETO MARTINEZ

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DEL 2003

988287

TM  
Z 5853  
.M2  
FIME  
2003  
.N53

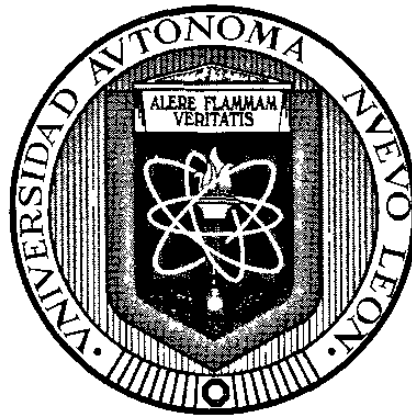


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA  
TERMOGALVANIZADOS**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**PRESENTA**

**JOSÉ ALBERTO NIETO MARTÍNEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**JULIO DEL 2003**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SOLDABILIDAD DE ACEROS  
HSLA TERMOGALVANIZADOS**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES**

**PRESENTA**

**JOSÉ ALBERTO NIETO MARTÍNEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

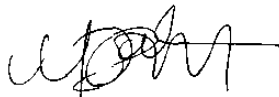
**JULIO DEL 2003**

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO


Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Soldabilidad de Aceros HSLA Termogalvanizados”, realizada por el alumno José Alberto Nieto Martínez, matrícula 0799194, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



Asesor

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata.



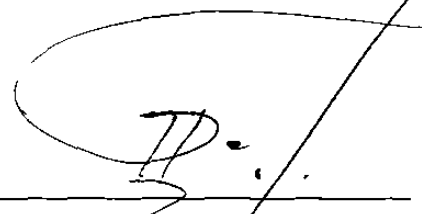
Coasesor

Dr. Rafael Colás Ortiz.



Coasesor

Dr. Sergio Haro Rodríguez.



Vo.Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez.  
División de Estudios de Post-grado.

San Nicolás de los Garza, N.L. Julio 2003

---



---

A Dios

por permitirme vivir este momento

A mi madre y hermanos,  
por todo el apoyo brindado

A mi novia Liliana Garza  
por su apoyo y comprensión

---

---

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado a si mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Se agradece los apoyos económicos brindados por el CONACYT y SIREYES para realizar el presente trabajo. También se agradece el apoyo del PAICYT (UANL) para la terminación de este trabajo.

A la empresa Galvak S. A. de C. V. por el material donado para la realización de esta investigación así como a todo el personal que labora en esta empresa, principalmente al Ing. Rene Garza y al Ing. Antonio Maní Medrano.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero por el entusiasmo, paciencia y apoyo recibido durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por sus valiosos comentarios y por la atención prestada a este trabajo.

Al Dr. Sergio Haro Rodríguez por la revisión de este trabajo.

A los Profesores del PDIM.

Al personal del departamento de investigación y desarrollo de la empresa Galvak S. A. de C. V. (Ing. Antonio Sánchez, Ing. Nelly Cárdenas, Ing. Carmen Guerrero y Abel Gonzalez):

A todos mis compañeros del PDIM.

---

---

# PRÓLOGO

En el presente trabajo de investigación se reportan los resultados obtenidos del estudio de los parámetros que controlan el proceso de soldadura de resistencia por puntos de lámina termogalvanizada. La complejidad del proceso de soldadura por puntos sobre productos de acero recubiertos hace necesario el estudio de cada uno de los parámetros de soldadura y de las características del sustrato de acero y del recubrimiento. El conocimiento del efecto de las variables del proceso de soldadura sobre la integridad de la unión, permite el uso de las condiciones óptimas operativas para generar las mejores propiedades en las zonas de unión.

Este trabajo sirve como antecedente para el desarrollo de proyectos de investigación particulares en los que es posible estudiar la operación de soldadura de grados especiales de aceros recubiertos de alto requerimiento y alto valor agregado para aplicaciones automotrices. El recubrimiento Termogalvanizado existente sobre el acero hace aún más complejo el proceso de soldadura de estos materiales y representa un reto metalúrgico adicional al simple proceso de soldadura de acero, por lo que es necesario entender y controlar el efecto del recubrimiento sobre la soldabilidad.

La principal contribución de este trabajo de investigación es la generación de resultados que permiten el entendimiento de las variables que controlan el proceso de soldadura de productos recubiertos y, en consecuencia, el impulso que se genera para el desarrollo de proyectos que favorezcan el fortalecimiento tecnológico, el diseño y la fabricación de nuevos productos de alto valor tecnológico y estratégico.

**M. C. Antonio Maní Medrano**

---

---

# ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

Capítulo	Página
<b>I. ACEROS DE ALTA RESISTENCIA BAJA ALEACIÓN (HSLA).</b>	
1.1 Introducción a los aceros HSLA.	1
1.2 Efecto de los elementos aleantes en los aceros HSLA.	2
1.2.1 Elementos microaleantes.	2
1.2.2 Elementos sustitutos de aleación.	4
1.2.3 Elementos de impurezas.	5
1.3 Procesamiento termomecánico de los aceros HSLA.	7
1.4 Características de los aceros HSLA.	9
<b>II. GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE.</b>	
2.1 Introducción.	10
2.2 Procesos de galvanizado continuo.	10
2.2.1 Formación de compuestos intermetálicos.	14
2.2.1.1 Formación de compuestos Fe-Al.	15
2.2.1.2 Generación de los cristales $\zeta$ y $\delta$ sobre la superficie de los granos de ferrita.	16
2.2.1.3 Reacción de explosión.	18



2.2.2	Equilibrio de las fases y cinética.	20
2.2.2.1	Diagrama de fase Fe-Zn.	20
2.2.2.2	Reacciones cinéticas Fe-Zn.	23
2.2.2.3	Equilibrio Fe-Zn-Al.	25
2.3	Preparación de la superficie del acero.	30
2.3.1	Desengrase alcalino.	30
2.3.2	Decapado.	30
2.3.3	Limpieza abrasiva.	30
2.3.4	Fundentes.	31
2.4	Efecto de los elementos de aleación.	31
2.5	Efecto del tratamiento térmico.	31
2.6	Factores que afectan el espesor del recubrimiento y su estructura.	32
2.6.1	Composición química del acero.	32
2.6.2	Temperatura en el baño de Zn.	33
2.6.3	Condiciones superficiales en el acero.	33
2.6.4	Composición química en el baño de Zn.	33
2.6.4.1	Capa de inhibición Fe-Al.	34
2.6.5	Grado de secado, sacudido o centrifugado.	36
2.6.6	Velocidad de enfriamiento de la lámina.	36
2.7	Propiedades mecánicas del recubrimiento y acero.	37
2.8	Proceso de termogalvanizado.	37
2.8.1	Crecimiento de los compuestos intermetálicos.	39
2.9	Variables del proceso de termogalvanizado.	41

### III. SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA.

3.1	Introducción.	44
3.2	Procesos de soldadura por resistencia eléctrica.	45
3.3	Fundamentos del proceso de soldadura por resistencia.	47
3.4	Soldadura por resistencia eléctrica por puntos.	57

3.4.1	Fundamentos del proceso de soldadura por resistencia eléctrica por puntos.	57
3.5	Influencia individual de parámetros en el proceso de soldadura por resistencia eléctrica por puntos.	59
3.5.1	Influencia de la corriente.	59
3.5.2	Influencia del tiempo de flujo de corriente.	59
3.5.3	Influencia de la fuerza del electrodo.	60
3.6	Desgaste en los electrodos.	61
3.6.1	Formación de latón en la cara del electrodo.	62
3.7	Curva dinámica de resistencia.	62
3.8	Soldabilidad de los aceros recubiertos.	63
3.9	Fallas en soldaduras.	64
3.10	Esfuerzos residuales en la soldadura.	66

#### **IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.**

4.1	Introducción.	67
4.2	Condiciones de procesamiento de la lámina.	67
4.2.1	Caracterización de la lámina.	68
4.2.1.1	Medición de rugosidad.	68
4.2.1.2	Ensayos de tensión.	69
4.2.2	Inspección del metal base.	70
4.2.2.1	Análisis químico.	70
4.2.2.2	Análisis óptico.	72
4.2.2.3	Ensayos de microdureza.	72
4.2.2.4	Preparación de las muestras.	73
4.2.3	Inspección del recubrimiento.	74
4.2.3.1	Análisis químico.	74
4.2.3.2	Análisis óptico.	75
4.2.3.3	Peso del recubrimiento.	76

---

4.2.3.4	Pruebas de doblez.	76
4.3	Diseño de experimentos para las muestras soldadas.	78
4.3.1	Realización experimental.	80
4.3.2	Medición en las soldaduras.	82
4.3.2.1	Ensayos de tensión de soldaduras.	82
4.3.2.2	Ensayos de microdureza.	82
4.3.2.3	Análisis microestructural.	85
4.3.2.4	Medición de parámetros del botón de soldadura.	85
4.4	Análisis del electrodo.	88
4.4.1	Rugosidad.	88
4.4.2	Diámetro de la cara.	88
4.4.3	Composición química.	89
4.4.4	Microestructura.	89
4.4.5	Microdureza.	90
4.4.6	Geometría.	90

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1	Introducción.	91
5.2.	Condiciones de procesamiento de la lámina.	91
5.3	Material.	93
5.3.1	Pruebas de tensión.	93
5.3.2	Rugosidad.	94
5.3.3	Inspección del metal base.	95
5.3.3.1	Análisis microestructural.	95
5.3.3.2	Análisis químico.	96
5.3.3.3	Microdureza.	96
5.3.4	Inspección del recubrimiento.	97
5.3.4.1	Análisis óptico.	97
5.3.4.2	Análisis químico.	98

---

5.3.4.3	Peso del recubrimiento.	99
5.3.4.4	Pruebas de integridad.	100
5.4	Ensayos preliminares de soldadura.	100
5.5	Inspección de las soldaduras.	101
5.5.1	Ensayos de tensión.	101
5.5.2	Inspección visual de la superficie de las soldaduras.	103
5.5.3	Inspección visual del botón de soldadura.	113
5.5.4	Mediciones en el botón de soldadura.	122
5.5.5	Microdureza a través del botón de soldadura.	127
5.5.6	Análisis microestructural en el centro del botón de soldadura.	131

## **VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

6.1	Conclusiones.	132
6.2	Recomendaciones.	135
	<b>Referencias Bibliograficas.</b>	<b>137</b>
	<b>Anexo 1</b>	<b>141</b>
	<b>Anexo 2</b>	<b>142</b>
	<b>Anexo 3</b>	<b>143</b>
	<b>Anexo 4</b>	<b>152</b>
	<b>Anexo 5</b>	<b>157</b>



---

---

# RESUMEN

El objetivo fundamental de este trabajo fue analizar el efecto de algunas variables operativas del proceso de soldadura por resistencia eléctrica por puntos, sobre las características físicas y propiedades mecánicas del botón de soldadura en un acero HSLA termogalvanizado.

Las variables del proceso de soldadura utilizadas durante el trabajo de investigación fueron las siguientes:

- Corriente.
- Tiempo de aplicación de corriente.
- Tiempo de sostenimiento.
- Pulsos de corriente.

El procedimiento experimental se realizó en un intervalo de corriente desde la formación del botón de soldadura hasta la expulsión de material líquido. Las características del botón de soldadura se evaluaron a partir de una inspección visual así como mediante análisis metalográficos, ensayos de tensión y de microdureza.

También se realizó una caracterización de la lámina y del electrodo utilizado durante la experimentación, con la finalidad de asegurarse de cumplir con un estándar de trabajo además de servir de referencia para investigaciones futuras.

---

---

---

# INTRODUCCIÓN

La soldadura por resistencia eléctrica por puntos es el proceso de unión más ampliamente utilizado para ensamblar hojas de metal y se basa en la resistencia que ofrecen los materiales al paso de la corriente y consiste básicamente de cuatro pasos que son sujeción, aplicación de corriente, sostenimiento y liberación.

En los últimos años, los diseñadores de la industria automotriz han tratado de tener un buen control del proceso de soldadura por resistencia eléctrica por puntos, con la finalidad de mejorar la soldabilidad de aceros recubiertos. Lamentablemente la soldabilidad de los aceros recubiertos presenta más problemas que los materiales sin recubrimiento debido a las características físicas y químicas de los intermetálicos formados durante el procesamiento del recubrimiento.

La variación de los parámetros del proceso de soldadura por resistencia eléctrica por puntos, afecta la soldabilidad del material. Debido a que la soldabilidad de los aceros termogalvanizados utilizados en la industria automotriz debe cumplir con los estándares establecidos por las compañías ensambladoras de partes, por tal motivo se decidió realizar un diseño experimental variando algunos de los parámetros del proceso con la finalidad de determinar los parámetros que generaran las mejores propiedades mecánicas del botón de soldadura, además de determinar el comportamiento de los parámetros variados durante la experimentación.

---