

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA TERMOMOLDEADOS
PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

TESIS

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

PRESENTA

SALVADOR MEZA VAZQUEZ.

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DEL 2004

JUNY
TM
Z5853
.M2
FIME
2004
.M49

SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA TERMOGALVANIZADOS
PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

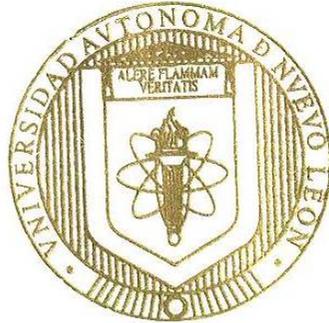
S.M.V.



1020150049

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA TERMOGALVANIZADOS
PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

TESIS

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

PRESENTA

SALVADOR MEZA VAZQUEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DEL 2004

950089

TH
ZS853
.M2
11ML
2004
.M49

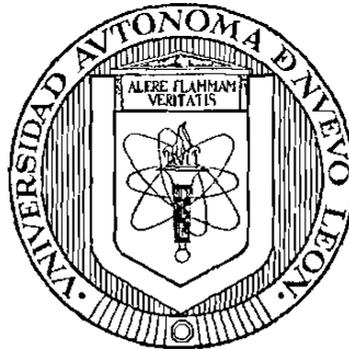


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA
TERMOGALVANIZADOS PARA
APLICACIONES AUTOMOTRICES**

TESIS

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

PRESENTA

SALVADOR MEZA VAZQUEZ

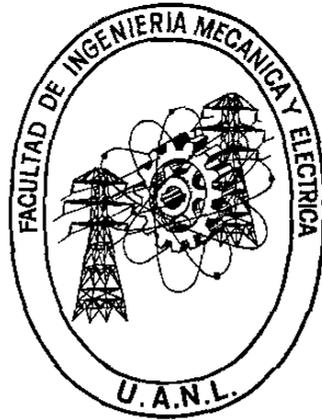
CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DEL 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**SOLDABILIDAD DE ACEROS HSLA
TERMOGALVANIZADOS PARA
APLICACIONES AUTOMOTRICES**

TESIS

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

PRESENTA

SALVADOR MEZA VAZQUEZ

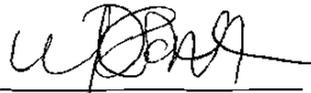
CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DEL 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

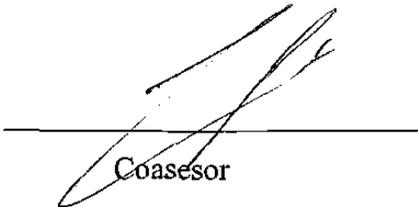
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Soldabilidad de Aceros HSLA Termogalvanizados para Aplicaciones Automotrices” realizada por el Ing. Salvador Meza Vázquez, matrícula 899280, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



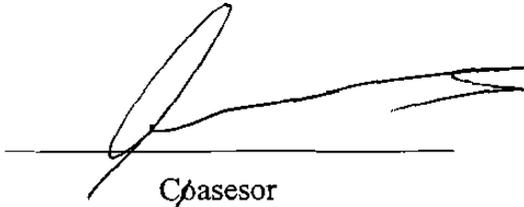
Asesora

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata



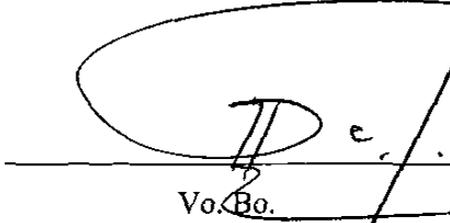
Coasesor

Dr. Rafael Colás Ortiz



Coasesor

Dr. Eduardo Valdés Covarrubias



Vo.Bo.

Dr. Gpe. Alan Castillo Rodríguez

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza; Nuevo León, Junio del 2004.

A DIOS

A MIS PADRES

**A MIS
HERMANOS**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León así como a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por permitirme formar parte de su alumnado de licenciatura y postgrado por todos estos años.

Se agradece el apoyo económico brindado por parte del CONACYT para solventar mis estudios de postgrado y poder culminarlos con el presente trabajo.

A la empresa GALVAK por el material donado y el equipo prestado para la realización de esta investigación, principalmente al Ing. Rene Garza.

Al personal del laboratorio de investigación y desarrollo de GALVAK, Dr. Antonio Maní Medrano, Ing. Antonio Sánchez, Ing. Abel González, Ing. Nelly Cárdenas, Ing. Carmen Guerrero y Sugeheidi Carranza, por su ayuda en pruebas, ensayos y análisis concernientes a este trabajo.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata por todo el entusiasmo, paciencia y apoyo, así como sus comentarios, pero principalmente por su excelente calidad como persona que permitió que la realización de este trabajo se diera de la mejor manera.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz por sus valiosos comentarios y su accesibilidad en todo momento, además de sus éticas enseñanzas.

Al Dr. George F. Vander Voort por su sencillez al recibirme en su laboratorio de BUEHLER y por toda su ayuda en la preparación y ataque de muestras metalográficas.

Al Dr. Eduardo Valdés por la revisión de este trabajo.

A los profesores del PDIM, principalmente al Dr. Alberto Pérez y al Dr. Rafael Mercado.

A mis compañeros y amigos del PDIM, Adela con sus nanotubos, a Alvaro más que poquito, Gemma con su súper bocho, Dione dual phase, Teresita y sus maletas, Diana y la sábila, Nelson (clámate paquito!), Lalo Rdz. y la televisión, Julián (ya no choques), Mayra, Efrén, Rodrigo, Moya y sus glorias de linares, Erendira, Jaime, los de la cueva: Niño, Nieto, Queque, Castor, Brad, Rambo, Leo, Marco; a Lili, la pequeñita Yuri, Juanito y los hielos, Fernando, Chicho, Castulo, Angelina, Maritrini, Mónica, Angélica, Fabiola, Román, Chuy, Aldaco, Claudia, a las cabañas. A Isabel. Además a Blas, Shawn, Toño Ibarra, Meme, Nice y George.

INDICE

Capítulo	Página
I. ACEROS HSLA MICROALEADOS	
1.1 Introducción	1
1.2 Clasificación de aceros HSLA	2
1.3 Designación de los aceros HSLA	3
1.4 Control de propiedades	4
1.4.1 Mecanismos de endurecimiento de ferrita	4
1.4.1.1 Refinamiento de grano	5
1.4.1.2 Endurecimiento por precipitación	5
1.4.2 Elementos de aleación	6
1.4.2.1 Titanio, vanadio y niobio como microaleantes en aceros HSLA	9
1.4.2.1.1 Productos de solubilidad	10
1.4.2.1.2 Efecto de retardo por anclaje del soluto	13
1.4.2.1.3 Carbonitruros	14
1.4.3 Control de laminación	15
1.4.3.1 Laminación controlada convencional	16
1.4.3.2 Laminación controlada por recristalización	17
1.4.3.3 Laminación controlada por recristalización dinámica	17
II. PROCESO DE GALVANIZADO	
2.1 Introducción	19
2.2 Proceso continuo de galvanizado por inmersión en caliente	20
2.2.1 Alimentación de acero	21

2.2.2	Procesos de pre-limpieza y acondicionamiento de la lámina	21
2.2.3	Proceso de limpieza	22
2.2.3.1	Etapa de oxidación	23
2.2.3.2	Etapa de reducción	23
2.2.3.3	Método de limpieza por fundentes	24
2.2.4	Sección de recocido	25
2.2.5	Recubrimiento por inmersión	25
2.2.5.1	Adición de aleantes al baño	25
2.2.5.2	Influencia de aleantes en las características de los granos de zinc	26
2.2.5.3	Formación de escoria	27
2.2.6	Control del espesor del recubrimiento	29
2.2.7	Tratamientos posteriores	31
2.2.7.1	Fosfatizado	33
2.3	Sistema binario de aleación Fe-Zn	33
2.4	Microestructura y morfología de fases Fe-Zn	36
2.5	Función del aluminio en el galvanizado	38
2.5.1	Reacciones interfaciales	38
2.5.2	Adiciones de aluminio	39
2.5.3	Inhibición de las reacciones Fe-Zn	40
2.5.4	Morfología de las reacciones interfaciales	43
2.5.5	Contenido de aluminio en el recubrimiento	44
2.6	Granos de zinc	45
2.6.1	Formación de los granos de zinc durante solidificación	45
2.6.2	Crecimiento dendrítico	48
2.6.3	Recubrimientos sin granos dendríticos	49
2.6.4	Textura del recubrimiento de zinc	50
2.6.5	Relación entre la textura del recubrimiento y su comportamiento frente a la corrosión	50

2.7	Termogalvanizado	51
2.7.1	Cinética de formación de fases	54
2.7.2	Parámetros de proceso del termogalvanizado	56
2.7.3	Integridad del recubrimiento	59

III. SOLDADURA POR RESISTENCIA

3.1	Introducción	61
3.2	Principios del proceso de soldadura por puntos	62
3.3	Ciclos de soldadura	67
3.4	Medición de parámetros de soldadura	68
3.5	Curvas de soldabilidad	70
3.6	Estándares y procedimientos de calificación de soldadura por puntos	71
3.6.1	Práctica recomendada	72
3.6.2	Estándares de calificación	72
3.6.3	Estándares de proceso	73
3.7	Parámetros involucrados en la soldadura por puntos y su influencia en la soldabilidad	74
3.7.1	Efecto de la corriente de soldadura	74
3.7.2	Efecto del tiempo de soldadura	75
3.7.3	Efecto de la fuerza de soldadura	77
3.7.4	Efecto del electrodo	78
3.7.4.1	Efecto del material del electrodo	79
3.7.4.2	Efecto del diseño del electrodo	80
3.7.5	Efecto del tiempo de sostenimiento	82
3.7.6	Efecto de la secuencia de soldadura y desvíos de corriente	83
3.7.7	Efecto de los tratamientos posteriores	85
3.7.8	Efecto del espesor de la lámina	85
3.7.9	Efecto de la condición superficial	86

3.7.10	Efecto de la limpieza del acero	86
3.7.11	Efecto de la composición química del acero	87
3.7.11.1	Influencia del carbono equivalente en la soldabilidad	88
3.7.12	Efecto del espesor del recubrimiento	89
3.7.13	Efecto de la composición química y microestructura del recubrimiento	90
3.7.14	Efecto de la integridad y dureza del recubrimiento	90
3.8	Propiedades mecánicas de los puntos de soldadura	90

IV. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1	Introducción	92
4.2	Determinación de parámetros de proceso	92
4.3	Caracterización de la lámina termogalvanizada	94
4.3.1	Preparación de muestras	94
4.3.2	Análisis del metal base	96
4.3.2.1	Ensayo de tensión	96
4.3.2.2	Análisis químico	97
4.3.2.3	Ensayo de dureza	98
4.3.2.4	Análisis óptico	99
4.3.3	Análisis del recubrimiento	99
4.3.3.1	Medición de rugosidad	99
4.3.3.2	Análisis químico	100
4.3.3.3	Análisis óptico	101
4.3.3.4	Peso del recubrimiento	101
4.3.3.5	Integridad del recubrimiento	102
4.4	Prueba Chrysler de calidad de soldaduras	103
4.4.1	Limitantes y consideraciones de aplicación del estándar	104
4.4.2	Preparación de muestras	104

4.4.3	Preparación de máquina	107
4.4.4	Procedimiento de ajuste de corriente de prueba	108
4.4.5	Pruebas de soldabilidad	111
4.4.6	Técnicas de evaluación de aceptabilidad de las soldaduras	112
4.4.6.1	Inspección visual de los puntos de soldadura	113
4.4.6.2	Análisis microestructural	113
4.4.6.3	Análisis dimensional del botón de soldadura	113
4.4.6.4	Ensayo de corte a tensión	115
4.4.6.5	Registro del diámetro del botón	116
4.4.6.6	Ensayo de microdureza	116
4.4.7	Criterios de evaluación de soldaduras	116
4.5	Análisis del electrodo	117

V. RESULTADOS

5.1	Introducción	118
5.2	Determinación de parámetros de proceso	118
5.3	Caracterización de la lámina termogalvanizada	120
5.3.1	Análisis del metal base	120
5.3.1.1	Análisis químico	120
5.3.1.2	Ensayo de tensión	120
5.3.1.3	Ensayo de dureza	121
5.3.1.4	Análisis óptico	122
5.3.2	Análisis del recubrimiento	124
5.3.2.1	Medición de rugosidad	124
5.3.2.2	Análisis óptico	124
5.3.2.3	Análisis químico	127
5.3.2.4	Peso del recubrimiento	130
5.3.2.5	Integridad del recubrimiento	130
5.4	Prueba de soldabilidad	131

5.4.1	Inspección visual de los puntos de soldadura	132
5.4.2	Análisis microestructural	133
5.4.3	Corriente de soldadura	135
5.4.4	Diámetro del botón	138
5.4.5	Resistencia a la tensión	141
5.4.6	Análisis dimensional del botón de soldadura	147
5.4.7	Ensayo de microdureza	155
5.4.8	Defectos de soldadura	156
4.5	Análisis del electrodo	157
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS		
6.1	Introducción	160
6.2	Procesamiento	160
6.3	Material	161
6.3.1	Acero	161
6.3.2	Recubrimiento	162
6.4	Soldabilidad	164
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
7.1	Conclusiones	172
7.2	Recomendaciones	174
REFERENCIAS		175
ANEXO I: TABLAS DE MICRODUREZA		179
ANEXO II: GRAFICAS DEL COMPORTAMIENTO DEL BOTON		188
LISTADO DE FIGURAS		192
LISTADO DE TABLAS		200