UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

COMPORTAMIENTO MECANICO Y MICROESTRUCTURAL DE ACEROS DOBLE FASE

POR

CARLOS JAVIER LIZCANO ZULAICA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA MAYO 2001

C.J.L.Z.

COMPORTAMIENTO MECANICO Y
MICROESTRUCTURAL DE ACEROS DOBLE FASE

TD
Z5853
.M2
FIME
2001
.L5

1020149862

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

COMPORTAMIENTO MECANICO Y MICROESTRUCTURAL DE ACEROS DOBLE FASE

POR

CARLOS JAVIER LIZCANO ZULAICA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA MAYO 2001

981470

TD
Z5853
.M2
FIME
2001
.L5

FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y MICROESTRUCTURAL DE ACEROS DOBLE FASE

POR

CARLOS JAVIER LIZCANO ZULAICA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA DE MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA MAYO 2001

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y MICROESTRUCTURAL DE ACEROS DOBLE FASE

POR

CARLOS JAVIER LIZCANO ZULAICA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA DE MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA MAYO 2001

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Comportamiento mecánico y microestructural de aceros doble fase" realizada por el M.C. Carlos Javier Lizcano Zulaica sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El comité de Tesis

Asesor
Dr. Rafael Colás Ortiz

Asesor
Dr. Alberto Pérez Unzueta

Coasesor
Dra. Patricia Rodríguez López

Coasesor
Dr. Juan Oscar Molina Solís

Coasesor
Dr. Ignacio Salvador Alvarez Elcoro

Vo. Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza; Nuevo León. Mayo de 2001

DEDICATORIA

A Dios.

A mi esposa, Laura Elena, y mis hijos, Carlos Javier II e Israel, por sus palabras de aliento, confianza y paciencia.

A la memoria de mi padre, Luis Lizcano Cavazos, y de mi madre, Andrea Zulaica de Lizcano.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la U.A.N.L., en especial al programa de Doctorado en Ingeniería de los Materiales.

A la División de Tecnología de Hylsa, por las facilidades proporcionadas para el desarrollo de este trabajo y por su autorización para publicarlo.

A Galvak, S.A. de C.V., por el apoyo que me brindó para el desarrollo de este estudio.

Al Ing. Juan Celada III, por ser todo un visionario en la importancia del desarrollo de estos nuevos aceros y fomentar su realización.

Al Dr. Ignacio Alvarez Elcoro, por compartir su amistad, experiencia y madurez profesional en la realización de este trabajo.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por sus palabras motivadoras siempre de aliento y entusiasmo para que se iniciara y concluyera este trabajo.

Al Dr. Alberto Pérez Unzueta, por sus valiosos comentarios durante la supervisión del presente estudio.

A los Doctores Patricia Rodríguez López y Juan Oscar Molina Solís por su valiosa participación en la revisión de este trabajo.

Al Ing. Omar Cerda Rodríguez, por que sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

ÍNDICE

		Página
Prólogo		vii
Síntesis		x
Capítulo 1.	**Introducción**	1
	1.1. Objetivo	3
	1.2. Hipótesis	3
	Lista de figuras	8
	Referencias	8
Capítulo 2.	**Análisis matemático**	13
	2.1. Análisis de Hollomon	14
	2.2. Análisis de Crussard-Jaoul (CJ)	15
	2.3. Análisis modificado CJ	16
	Lista de figuras	22
	Referencias	22
Capítulo 3.	**Fabricación de acero**	23
	3.1. Fusión.	23
	3.2. Laminación.	29
	Lista de figuras.	33
	Lista de tablas.	33

Página

Capítulo 4.	**Experimentación**	34
	4.1. Materiales	34
	4.2. Tratamientos térmicos.	35
	4.3. Ensayos mecánicos.	37
	Lista de figuras	39
	Lista de tablas.	39
	Referencias	39
Capítulo 5.	**Análisis de pruebas mecánicas**	40
	5.1. Aceros al silicio	41
	5.2. Aceros al manganeso	48
	Lista de figuras	56
	Lista de tablas.	57
	Referencias	57
Capítulo 6.	**Análisis metalográfico**	58
	6.1. Aceros al silicio	58
	6.2. Aceros al manganeso	71
	Lista de figuras	83
	Lista de tablas.	83
	Referencias	84

Página

Capítulo 7. Discusión 85

7.1. Análisis de propiedades mecánicas 86

7.1.1. Aceros al silicio 86

7.1.2. Aceros al manganeso 97

7.2. Análisis metalográfico 106

7.3. Discusión matemática 108

7.3.1. Introducción 108

7.3.2. Análisis de aceros al silicio 114

7.3.3. Análisis de aceros al manganeso 121

7.3.4. Análisis de ambos aceros 129

Lista de figuras 131

Lista de tablas. 132

Referencias 133

Capítulo 8. Conclusiones, recomendaciones y limitaciones 138

8.1. Conclusiones 138

8.2. Recomendaciones 139

8.3. Limitaciones 140

Apéndice A 141

Apéndice B 146

Apéndice C 154

Página

Apéndice D 164

Apéndice E 173

Apéndice F 184

Apéndice G 187

Apéndice H 190

Curriculum vitae 201

PRÓLOGO

El inicio del siglo XXI ha estado acompañado de grandes avances científicos y tecnológicos. Quizá el área que más se maneja en los medios de comunicación ha sido el avance en el uso de la computadora personal como una herramienta de trabajo diaria para millones de personas y en particular el uso de redes de información como Internet. Otra área que ha sido ampliamente difundida es el avance en ingeniería genética y en la posibilidad actual de clonar seres vivos. En el área de ciencia e Ingeniería de Materiales, hemos visto la introducción de nuevos y mejores materiales en varias aplicaciones.

A pesar de todos estos avances, el metal que sigue siendo el principal material para un sin fin de aplicaciones es el acero. Esta relativamente sencilla aleación de fierro y carbono, ha sido la base del desarrollo industrial. Actualmente existen más de 1,000 diferentes tipos de aceros y parecería que para cada requerimiento de la vida moderna, existe un acero para satisfacer esta demanda

De ahí que, día a día se continúe con las investigaciones científicas y tecnológicas para encontrar aceros que satisfagan las cada vez más rigurosas condiciones de trabajo de la industria moderna.

Este es el caso del presente trabajo donde se han desarrollado dos nuevas familias de aceros. Partiendo de la idea de diseñar una aleación en base a un control microestructural, se buscó formar estos aceros con diferentes proporciones de fases, siendo estas, granos de martensita en una matriz de ferrita. De aquí el nombre genérico de aceros fer-mar.

La consolidación de estos aceros, su transformación mecánica, sus cambios microestructurales por medio de tratamientos térmicos y finalmente las propiedades mecánicas obtenidas han sido claramente explicadas por el autor. Es precisamente, la relación que existe entre las propiedades mecánicas y la microestructura del acero, el trabajo principal de la presente tesis. El autor propone y comprueba una serie de relaciones cualitativas y cuantitativas, todas ellas de gran utilidad para el productor, usuario y consumidor de este importante material, el acero.

La tesis concluye que la ley de las mezclas es adecuada para el propósito de predecir las propiedades mecánicas.

Uno por su parte puede concluir que es una gran satisfacción observar, una vez más, el gran esfuerzo, dedicación y buenos resultados que se obtienen cuando la industria y la universidad trabajen en forma conjunta para el avance científico y tecnológico, no sólo de nuestro país sino de toda la humanidad.

Ing. Ricardo Viramontes Brown.
Dr. Alberto Pérez Unzueta.

San Nicolás de los Garza N.L. Mayo 2001.

RESUMEN

Dos familias de 5 aceros al Si-Mn fueron producidas, una de 0 a 2% de Si y otra de 0 a 2 % de Mn. La fusión del acero se llevo a cabo en un horno de inducción de 1.2 ton y la laminación de los lingotes a barras redondas de 20 mm de diámetro en un tren de laminación compuesto de un molino de desbaste trío y un molino cross country.

Se maquinaron probetas redondas según el estándar ASTM E-8 de 12.7 mm de diámetro para ensayos de tensión y fueron sometidas a tratamiento térmico de templado intercrítico en agua; en cuatro niveles de temperatura, distribuidos en forma proporcional entre A_{c1} y A_{c3}.

Análisis metalográfico cuantitativo se llevó acabo con ataques de Nital para medir el tamaño de grano ferrítico y con LePera para medir las fases presentes.

Una revisión de análisis de endurecimiento por deformación de las curvas σ-ε muestra que el análisis de Crussard-Jaoul modificado se ajusta a las diferentes etapas de endurecimiento de estos aceros.

Es posible explicar las variables mecánicas, como σ y ε, a través de la aplicación de la ley de las mezclas de fases metalográficas.

Un análisis de correlación de la microestructura con los resultados de los ensayos de tensión combinados de ambas familias comprueba que σ_u y $\sigma_{0.2}$ dependen principalmente de la cantidad de fases metalográficas y del tamaño de grano ferrítico.