

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



EFFECTOS MICROESTRUCTURALES EN UN ACERO  
SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TÉRMICO TRIP

TESIS

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

PRESENTA

OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 2002

O.C.A.  
O.C.A.

EFFECTOS MICROESTRUCTURALES EN UN ACERO  
SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TERMICO TRIP

TD  
Z5853  
.M2  
FIME  
2002  
.C6



1020150647

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



EFFECTOS MICROESTRUCTURALES EN UN ACERO  
SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TÉRMICO TRIP

TESIS

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

PRESENTA

OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 2002

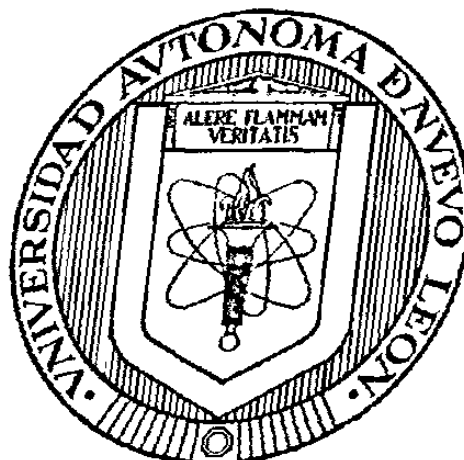
585714

TD  
Z 5853  
.M2  
TIME  
2002  
.76



FONDO  
TESIS

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



**EFFECTOS MICROESTRUCTURALES EN UN ACERO  
SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TÉRMICO TRIP**

**TESIS**

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

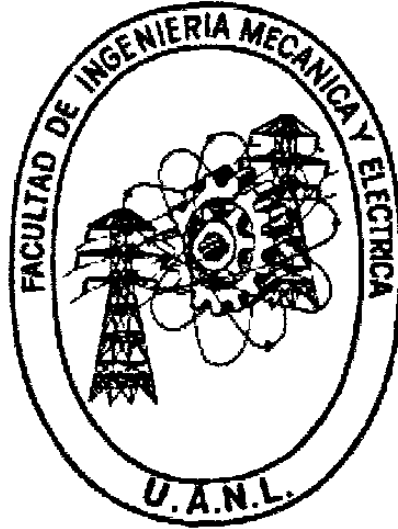
**PRESENTA**

**OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**NOVIEMBRE 2002**

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



**EFFECTOS MICROESTRUCTURALES EN UN ACERO  
SOMETIDO A UN TRATAMIENTO TÉRMICO TRIP**

**TESIS**

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

**PRESENTA**

**OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO**


**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**NOVIEMBRE 2002**

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

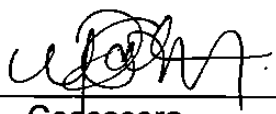
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Efectos Microestructurales de un Acero Sometido a un Tratamiento Térmico TRIP" realizada por el M. C. Octavio Covarrubias Alvarado sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería de Materiales.

El comité de tesis



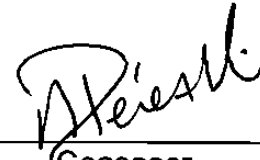
---

Asesor  
Dr. Rafael Colás Ortiz



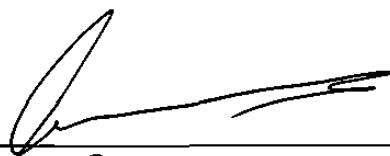
---

Coasesora  
Dra. Martha P. Guerrero Mata




---

Coasesor  
Dr. Alberto Pérez Unzueta



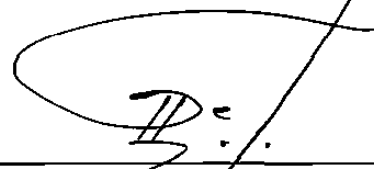
---

Coasesor  
Dr. Eduardo Valdés Covarrubias



---

Coasesor  
Dr. Ignacio S. Álvarez Elcoro



---

Vb. Bc.  
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Noviembre de 2002



# AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas las bendiciones, bondades y dones que me ha prodigado.

A mis padres, Octavio Covarrubias García y Adela Alvarado Muñoz, por su apoyo y amor incondicionales en la realización de este capítulo de mi vida.

A mis hermanos, Elizabeth y Rafael, por su cariño, apoyo y paciencia.

A mi novia, Lucero Cavazos Salazar, por su amor, apoyo, paciencia y todos los consejos que me dio.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por todas las enseñanzas y apoyos que he recibido.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo durante todos mis estudios de Postgrado.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por su paciencia y apoyo, y por depositar en mí su confianza.

A la Dra. Martha Guerrero Mata, por su apoyo total en mis actividades académicas.

Al Dr. Alberto Pérez Unzueta, por sus consejos en la revisión de la tesis, su amistad y confianza.

Al Dr. Eduardo Valdéz Covarrubias y al Dr. Ignacio Álvarez Elcoro, cuyos comentarios y sugerencias enriquecieron esta tesis.

Al Profesor Yvan Houbaert y al Dr. Roumen Petrov, por su paciencia y recomendaciones durante mi estancia en Bélgica para el desarrollo de la experimentación efectuada.

Al Ing. Sergio Caballero, por sus amables sugerencias y comentarios sobre el trabajo metalográfico efectuado.

Al Ing. Gastón Olvera y al Ing. Omar Garza, por sus sugerencias e inapreciable ayuda.

A los catedráticos por compartir sus conocimientos.

A todos mis amigos, compañeros y colegas que de algún modo enriquecieron este trabajo o me motivaron a continuar hasta concluirlo.

*A mi familia, por su apoyo y confianza*

A todos los mexicanos responsables que pagaron sus impuestos para que yo pudiese efectuar estos estudios de postgrado.

# PRÓLOGO

Desde los inicios de la Edad de Hierro, el ser humano ha buscado la manera de obtener las mayores y mejores ventajas que las aleaciones ferrosas puedan proporcionarle para satisfacer necesidades específicas. Sin embargo, es a partir de los inicios del siglo XX, que de una manera sistemática y con bases en diferentes ciencias, se ha sido capaz de comprender la metalurgia del hierro y sus interacciones con otros elementos de aleación.

El trabajo que se expone en este documento, es una contribución al esfuerzo que se realiza en diferentes centros de investigación en todo el mundo, a fin de encontrar aplicaciones prácticas a diferentes tipos de aceros que permitan obtener microestructuras y propiedades mecánicas deseadas. Así mismo, sirve como una guía o camino a seguir en la evaluación de otro tipo de aleaciones con fines similares.

El trabajo desarrollado es además un ejemplo de los muchos beneficios que ofrecen un esquema de cooperación que vincule las necesidades de la industria con el potencial de la academia ofrece, aprovechando al máximo el potencial humano involucrado.

**Rafael Colás Ortiz.**

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>Síntesis</b>	ix
 <b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</b>	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Plasticidad Inducida por Transformación (el efecto TRIP)	3
1.3 El Tratamiento Térmico TRIP	
1.3.1 Consideraciones Generales	5
1.3.2 Velocidad de Calentamiento $V_0$	7
1.3.3 Temperatura de Etapa Intercrítica $T_1$	7
1.3.4 Tiempo de Mantenimiento de Etapa Intercrítica $t_1$	8
1.3.5 Velocidad de Enfriamiento Intermedia $V_1$	9
1.3.6 Temperatura de Etapa Isotérmica $T_2$	10
1.3.7 Tiempo de Mantenimiento de Etapa Isotérmica $t_2$	11
1.3.8 Velocidad de Enfriamiento Final $V_2$	13
1.4 Comentarios	13
1.5 Referencias Bibliográficas	14

## **CAPÍTULO 2: TRANSFORMACIONES DE FASE EN ACEROS TRIP ASISTIDOS**

<b>2.1 Transformación Austenítica: La Etapa Intercrítica</b>	
2.1.1 Antecedentes	17
2.1.2 Formación de Zonas de Austenita en Aceros Hipoeutectoides en la Etapa Intercrítica de un Tratamiento Térmico TRIP	19
2.1.2.1 Transformación de las Colonias de Perlita	21
2.1.2.2 Crecimiento de la Austenita en la Ferrita Circundante	23
<b>2.2 La Austenita y su Transformación en los Aceros Hipoeutectoides durante el Enfriamiento.</b>	
2.2.1 Reacciones de Descomposición de la Austenita	26
2.2.2 Transformaciones Reconstructivas	28
2.2.3 Productos de Transformación de las Reacciones Reconstructivas	29
2.2.4 Transformaciones Adifusionales	30
2.2.5 Productos de Transformación de las Reacciones Adifusionales	31
<b>2.3 Transformaciones Bainíticas: La Etapa Isotérmica</b>	
2.3.1 Generalidades	33
2.3.2 Bainita Superior	34
2.3.3 Bainita Inferior	36
2.3.4 Carbono en la Bainita	38
2.3.5 Cinética de Transformación	41
2.3.6 Transición de Bainita Superior a Bainita Inferior	43
2.3.7 Ferrita Acicular	
2.3.7.1 Características de la Ferrita Acicular	45
2.3.7.2 La Ferrita Epitaxial	47
<b>2.4 Transformaciones Martensíticas: El Efecto TRIP</b>	
2.4.1 Antecedentes	49

2.4.2	Características de la Martensita	50
2.4.3	Interfase entre la Fase Previa y la Fase Producto	54
2.4.4	Deformación del Cristal debida a la Transformación Martensítica	57
2.4.5	Cristalografía de la Martensita	58
2.4.6	Cambio de Energía Libre en una Transformación Martensítica	63
2.4.7	Transformación Inducida por Deformación	65
2.5	Referencias Bibliográficas	69

### **CAPÍTULO 3: DILATOMETRÍA**

3.1	Introducción	72
3.2	Diagramas de Transformación	
3.2.1	Desarrollo de los Diagramas de Transformación	73
3.2.2	Diagramas Isotérmicos	74
3.2.3	Diagramas de Enfriamiento Continuo	75
3.3	Dilatometría y Diagramas de Enfriamiento Continuo (CCT)	
3.3.1	Generalidades	76
3.3.2	Calentamiento y Vacío	83
3.3.3	Enfriamiento	83
3.3.4	Control	84
3.4	Derivación de los Diagramas de Enfriamiento Continuo	
3.4.1	Procedimiento Experimental de Estudio	84
3.4.2	Temperaturas de Transformación	85
3.4.3	Construcción de Diagramas CCT	90
3.5	Referencias Bibliográficas	93

## **CAPÍTULO 4: DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

4.1 Antecedentes	95
4.2 Análisis de la Estructura Cristalina	96
4.3 Dispersión de Radiación en Cristales	97
4.3.1 Las Ecuaciones de Laue y la Ley de Bragg	98
4.3.2 Reflexiones Permitidas y Prohibidas	101
4.3.3 El Difractor de Rayos X	102
4.4 Técnicas para Detección y Medición de Austenita Retenida	105
4.4.1 Consideraciones Teóricas	106
4.4.2 Cálculo de los Factores Relativos de Intensidad R	111
4.5 Caracterización de Austenita Retenida en Aceros TRIP	113
4.6 Referencias Bibliográficas	115

## **CAPÍTULO 5: EXPERIMENTACIÓN**

5.1 Introducción	117
5.2 Aleación Seleccionada	117
5.3 Dilatometría	120
5.4 Temperatura para Etapa Intercrítica	122
5.5 Tratamientos Térmicos TRIP	123
5.6 Difracción de Rayos X	
5.6.1 Detección de Austenita Retenida	127
5.6.2 Contenido de Carbono en Austenita Retenida	127
5.7 Caracterización por Microscopía Óptica	
5.7.1 Procedimiento de Preparación Metalográfica	129
5.7.2 Ataques Químicos Utilizados	130
5.8 Caracterización mediante Microscopía Electrónica de Barrido	
5.8.1 Microscopía Electrónica de Barrido	132
5.8.2 Microscopía por Orientación de Imagen (OIM)	





APÉNDICE A: Condiciones de Experimentación en los Especímenes.	180
APÉNDICE B: Glosario.	207
APÉNDICE C: Ataques Químicos Utilizados.	212
APÉNDICE D: Curvas de Enfriamiento Continuo	218
APÉNDICE E: Nomenclatura.	222
Índice de Figuras	225
Índice de Tablas	233
Índice Analítico	234
Resumen autobiográfico	238

# Síntesis

El desarrollo de aleaciones ferrosas con mejores propiedades de elongación y resistencia, siempre ha sido un objetivo común para investigadores y productores de la industria del acero.

Desde hace tres décadas se inició la evaluación de aleaciones cuyo procesamiento incluye la deformación plástica para transformar austenita retenida en martensita. Este fenómeno se conoce como “TRIP”, acrónimo para *Transformation-Induced Plasticity* (Plasticidad Inducida por Transformación), cuyo resultado es un incremento en las propiedades mecánicas finales de las aleaciones que presentan dicho fenómeno.

En este trabajo se evalúa una aleación ferrosa convencional para conocer el efecto de tratamientos térmicos que promuevan un efecto TRIP. El procedimiento expuesto para realizar dicha evaluación puede servir para evaluar otras aleaciones.

Se exponen los fundamentos generales del fenómeno TRIP en las aleaciones ferrosas, aspectos de dilatometría, difracción de Rayos X, tratamientos térmicos, metalografía y microscopía electrónica de barrido, con el objetivo de presentar un panorama general de las técnicas que permiten evaluar la microestructura de una aleación ferrosa al ser sometida a un tratamiento térmico TRIP.

Este trabajo forma parte de un esfuerzo que comenzó en el Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales hace 5 años, y contribuye en la mejor comprensión de los mecanismos que se presentan cuando un acero es sujeto a un tratamiento térmico TRIP.