

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**ANALISIS TERMICO Y PROPIEDADES MECANICAS
EN UNA ALEACION TIPO A319**

POR

RUBEN TORRES GONZALEZ

T E S I S

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 2000

R. T. G.

ANALISIS TERMICO Y PROPIEDADES MECANICAS
EN UNA ALLEACION TIPO A319

TM
Z5853
.M2
FIME
2000
T6
2000



1020129198

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS TERMICO Y PROPIEDADES MECANICAS
EN UNA ALEACION TIPO A319

POR

RUBEN TORRES GONZALEZ

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 2000

0133-41760

TM
ZS853
.M2
FINE
2000
T6



**FONDO
TESIS**


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "**Análisis Térmico y Propiedades Mecánicas en una Aleación tipo A319**" realizada por el Ing. Rubén Torres González 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
Dr. Rafael Colás Ortiz



Coasesor
Dr. Salvador Valtierra Gallardo



Coasesor
Dr. Eulogio Velasco Santes



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

San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Febrero del 2000

DEDICATORIA

**A mis padres, Braulio Torres y Josefina González
por haberme forjado de la manera que soy**

**A mis hermanos: José Luis, Guadalupe, Martín, Benjamín y
Estela por su apoyo incondicional**

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico para la realización de esta investigación y por promoverla a nivel nacional e internacional como parte integral del desarrollo de nuestro país.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por permitirme, a través del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales (DIMAT), perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), realizar mis estudios de postgrado a nivel de maestría y poder llevar a cabo una investigación con un enfoque aplicado a la industria.

A la empresa NEMAK S.A. de C.V. por proporcionarme todas las facilidades para llevar a buen término esta investigación, por facilitar sus instalaciones para la realización de la experimentación a nivel planta y parte de la experimentación a nivel laboratorio y, sobretodo, por el apoyo personal recibido hasta finalizar la investigación y obtener el grado de maestro en ciencias.

Al Dr. Rafael Colás por el apoyo brindado en el período que duró la investigación, por sus consejos y sugerencias tan acertadas.

A la Dra. Martha Guerrero por su colaboración en la realización de la experimentación a nivel laboratorio.

Al próximo Maestro en Ciencias en Ingeniería de Materiales: Andrés Rodríguez, con el cual estuve trabajando directamente durante la investigación, por su ayuda y colaboración.

A las próximas doctoras en Ingeniería de Materiales: la M.C. Dora Irma Martínez y la M.C. Ana María Gúzman por su amistad y por la objetividad de sus críticas para con esta investigación.

A los Drs. Eulogio Velasco y Salvador Valtierra por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo y por sus observaciones.

Al M.C. Guillermo Ruíz y al Lic. Rey David Rodríguez por el apoyo incondicional brindado durante mi estancia en Monterrey.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Alfonso Pamanes, quién pertenece al área de investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL) en Torreón Coah., por ser la persona que me motivó a realizar estudios de postgrado.

Mi más sincero agradecimiento a todos los antes mencionados.

INDICE

Resumen

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Mecanismos de Solidificación	6
2.1 Introducción	6
2.2 Nucleación	7
2.2.1 Nucleación y fragmentación primaria	7
2.2.2 Nucleación y fragmentación secundaria	8
2.3 Crecimiento	9
2.3.1 Crecimiento con restricciones	10
2.3.2 Crecimiento sin restricciones	11
2.4 Solidificación sin refinamiento de grano	12
2.5 Solidificación con refinamiento de grano	13
2.6 La reacción peritética	14
2.7 El efecto del boro	15
2.8 Homogenización y tratamiento térmico	17
2.9 Aleaciones aluminio silicio	19
2.9.1 El sistema Al-Fe-Mn-Si	20
2.9.1.1 Composición y morfología de las reacciones Al_5FeSi y $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$	20
2.9.2 El efecto de la cinética	21
2.9.3 La reacción eutéctica principal	21
2.9.4 Reacciones posteriores al eutéctico principal Al-Si	23
Capítulo 3. Análisis Térmico	39
3.1 Introducción	39
3.2 Análisis térmico	40
3.2.1 Principios de análisis térmico	40
3.2.2 Control del refinamiento de grano	43
3.2.3 Control de la modificación eutéctica	44
3.2.4 Efecto de la velocidad de enfriamiento	46
3.2.5 Limitaciones de la técnica	47

Capítulo 4. Procedimiento Experimental	55
4.1 Introducción	55
4.2 Metodología experimental	56
4.2.1 Obtención del material	56
4.2.2 Monitoreo térmico del proceso de solidificación	56
4.2.3 Preparación de material y realización de tratamientos térmicos	57
4.2.4 Preparación de material y realización de ensayos de tensión	57
4.2.5 Preparación de material y realización de ensayos de dureza	59
Capítulo 5. Resultados y Discusión	66
5.1 Introducción	66
5.2 Análisis térmico	66
5.2.1 La reacción peritética Al ₃ Ti	67
5.2.1.1 Efecto de la temperatura de vaciado	67
5.2.1.2 Efecto de la concentración de Fe	68
5.2.1.3 Efecto de la concentración de Ti	68
5.2.1.4 Efecto de la concentración de Sr	69
5.2.2 Solidificación de la fase aluminio primario (Al _α)	69
5.2.2.1 Efecto de la temperatura de vaciado	69
5.2.2.2 Efecto de la concentración de Fe	71
5.2.2.3 Efecto de la concentración de Ti	71
5.2.2.4 Efecto de la concentración de Sr	72
5.2.3 Solidificación del eutéctico Al-Si	72
5.2.3.1 Efecto de la temperatura de vaciado	72
5.2.3.2 Efecto de la concentración de Fe	73
5.2.3.3 Efecto de la concentración de Ti	74
5.2.3.4 Efecto de la concentración de Sr	75
5.2.4 Solidificación del eutéctico complejo Al-Si-Cu-Mg	76
5.2.4.1 Efecto de la temperatura de vaciado	76
5.2.4.2 Efecto de la concentración de Fe	76
5.2.4.3 Efecto de la concentración de Ti	77
5.2.4.4 Efecto de la concentración de Sr	77
5.3 Propiedades mecánicas	78
5.3.1 Efecto de la concentración de Fe	78
5.3.2 Efecto de la concentración de Sr	79
5.3.3 Efecto de la concentración de Ti	80
5.3.4 Respuesta de las propiedades mecánicas en el metal blanco	82
5.3.4.1 Efecto de las condiciones de vaciado	82
5.3.4.2 Efecto de los tratamientos térmicos	82

5.3.5	Respuesta de las propiedades mecánicas en aleaciones refinadas	83
5.3.5.1	Efecto de las condiciones de vaciado	83
5.3.5.2	Efecto de los tratamientos térmicos	83
5.3.6	Respuesta de las propiedades mecánicas en aleaciones modificadas	84
5.3.6.1	Efecto de las condiciones de vaciado	84
5.3.6.2	Efecto de los tratamientos térmicos	84
5.3.7	Respuesta de las propiedades mecánicas en aleaciones refinadas y modificadas	85
5.3.7.1	Efecto de las condiciones de vaciado	85
5.3.7.2	Efecto de los tratamientos térmicos	85
5.4	Efecto de las interacciones entre los elementos aleantes principales	85
Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones		152
Lista de símbolos		155
Lista de Figuras		157
Lista de Tablas		161
Referencias		162
Apéndice A		
Curvas de Enfriamiento a Velocidades Bajas		
Apéndice B		
Curvas de Enfriamiento a Velocidades Altas		
Apéndice C		
Magnitud de los Parámetros obtenidos por Análisis Térmico		
Apéndice D		
Magnitud de las Propiedades Mecánicas		
Apéndice E		
Curvas de Esfuerzo-Deformación Reales		

RESUMEN

La presente investigación se realizó con el objetivo de identificar y cuantificar los diferentes parámetros de solidificación asociados con cada una de las fases que se presentan a bajas y altas velocidades de enfriamiento en aleaciones con diferentes niveles de concentración de Fe, Ti y Sr, para, posteriormente, correlacionar la composición química de estos elementos con la variación de dichos parámetros y con las propiedades mecánicas en las condiciones de vaciado y de tratamiento térmico de solubilización por 6 hrs a temperaturas de 460, 480 y 500°C seguidas de un sobrenvejecimiento de 3 hrs a una temperatura de 240°C.

Se realizó un monitoreo térmico del proceso de solidificación a altas y bajas velocidades de enfriamiento, así como una serie de ensayos mecánicos y de dureza para las diferentes condiciones. El registro térmico se obtuvo a través de un programa diseñado para el caso que recibe las señales de temperatura, en el transcurso del tiempo, por medio de un termopar de crómel-alúmel de 1.6 mm de diámetro embebido en la aleación durante el proceso de solidificación, de tal manera que la caracterización térmica se realizó por medio de la interpretación de la curva de enfriamiento resultante y sus derivadas. Asimismo, la experimentación comprendió la realización de ensayos de tensión a una velocidad de desplazamiento de los cabezales de 5 mm/min en un sistema Instron, caracterizando mecánicamente a cada una de las condiciones de vaciado y de tratamiento térmico a través de la interpretación de las curvas de flujo. Los ensayos de dureza Brinell se realizaron con una carga de 500 kg sostenida por un tiempo de 10 segundos con un indentador de balín de 10 mm de diámetro en un equipo automático Willson (Instron) para posteriormente, por

medio de un analizador de imágenes, obtener el diámetro promedio y la dureza resultante.

Se concluye que la técnica de análisis térmico es una herramienta eficaz para la determinación de las condiciones de solidificación, ya que permite cuantificar la duración y la temperatura a la que se presentan las diferentes reacciones que se suscitan durante el enfriamiento. Se determinaron las propiedades mecánicas y se encontró una fuerte degradación de las mismas conforme de incrementa el contenido de Fe. Esta observación es válida tanto para las piezas ensayadas en su condición de vaciado como de tratamiento térmico T7. Entre las posibles causas de este deterioro se pueden atribuir la presencia de fases nocivas ricas en hierro.

Actualmente se está llevando a cabo un trabajo paralelo al presente con el objetivo primordial de cuantificar la microestructura de las piezas vaciadas y que complementará los resultados y conclusiones obtenidos.