

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



MECANISMOS DE NUCLEACION Y CRECIMIENTO DE  
FERRITA EN FRONTERAS DE GRANO AUSTENTICO Y SU  
APLICACION EN EL CALCULO DEL TAMAÑO DE GRANO  
RESULTANTE EN ACEROS DE BAJO CARBONO  
LAMINADOS EN CALIENTE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA MECANICA CON  
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA  
JULIO CESAR MORALES CHAVELA

MONTERRY, N. L.

SEPTIEMBRE DE 1995

TD

Z5853

.M2

FIME

1995

M6



1020112514

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN**  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



MECANISMOS DE NUCLEACION Y CRECIMIENTO DE FERRITA  
EN FRONTERAS DE GRANO AUSTENITICO Y SU APLICACION  
EN EL CALCULO DEL TAMAÑO DE GRANO RESULTANTE EN  
ACEROS DE BAJO CARBONO LAMINADOS EN CALIENTE.

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DR. EN INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:  
JULIO CESAR MORALES CHAVELA

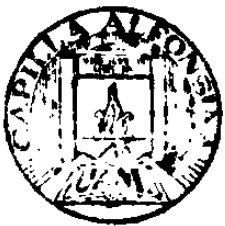


MONTERREY, N. L.

SEPTIEMBRE DE 1995

TD  
Z5853  
.M2  
FINE  
1995  
M6

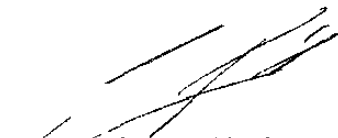
0117-12660




**FONDO TESIS**

**MECANISMOS DE NUCLEACION Y CRECIMIENTO DE FERRITA EN FRONTERAS DE GRANO AUSTENITICO Y SU APLICACION EN EL CALCULO DEL TAMAÑO DE GRANO RESULTANTE EN ACEROS DE BAJO CARBONO LAMINADOS EN CALIENTE.**


Aprobación de la Tesis:




Dr. Rafael Colás Ortiz.  
Asesor.




Dr Luis A. Leduc Lezama.  
~~Asesor.~~



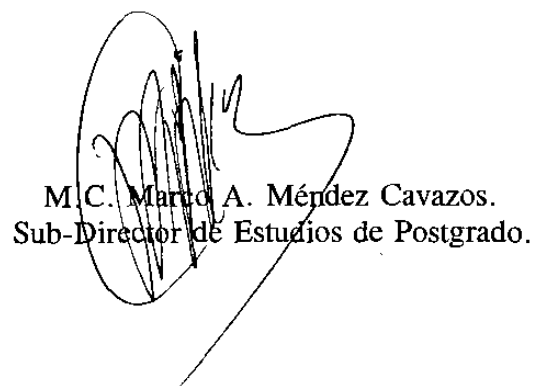
Dr. Salvador Valtierra Gallardo.  
Revisor.



Dr. Ubaldo Ortiz Méndez.  
Revisor.



Dr. Eduardo Valdés Covarrubias.  
Revisor.



M.C. Marco A. Méndez Cavazos.  
Sub-Director de Estudios de Postgrado.

# **DEDICATORIA**

Este trabajo esta dedicado a todas las personas que de alguna manera me apoyaron y convivieron conmigo a lo largo del tiempo que duró la realización de la tesis.

**A mi familia, profesores del Doctorado,  
compañeros y amigos.**

**A Luisafernanda por todo el amor, cariño y comprensión  
brindados, sin los cuales el esfuerzo realizado no  
hubiese sido el suficiente para terminar.**

# **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación no hubiera sido hecha posible sin la colaboración de instituciones y personas a las cuales les presento mis más sinceros agradecimientos.

**Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.**

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.**

**Ing. Jesús Moreno.**

**Hojalata y Lámina, S.A de C.V.**

**Ing. Julio Muñoz**

**Ing. Ricardo Montemayor**

**Sr. Erasmo Espinosa**

**Lic. Roberto Rebolledo.**

**Dr. Salvador Valtierra, Dr. Ubaldo Ortiz y Dr. Eduardo Valdés** por los valiosos comentarios y cuestionamientos que enriquecieron el presente trabajo.

Un agradecimiento especial al **Dr. Rafael Colás** y **Dr. Luis Leduc** por haber compartido conmigo sus conocimientos, pero sobre todo su experiencia como personas e investigadores.



**"El conocimiento del fenómeno así como el de las maneras en que se ha tratado de explicar estimula a la imaginación a encontrar una relación que describa su comportamiento lo más cercano posible a la verdad."**

**Julio C. Morales**

## RESUMEN

En la presente investigación se realiza una revisión bibliográfica sobre los mecanismos de nucleación y crecimiento que controlan la cinética de transformación de fase. Se revisan los modelos que predicen la cinética y el tamaño de grano resultante de la transformación de austenita a ferrita bajo condiciones isotérmicas y de enfriamiento continuo; así como algunas regresiones presentadas por algunos investigadores.

Se encuentra que las velocidades de nucleación y crecimiento clásicas no predicen satisfactoriamente los datos experimentales en tanto que las predicciones de los modelos basados en estas relaciones tampoco concuerdan con las observaciones relacionadas con la cinética de transformación y el tamaño de grano ferrítico. En este trabajo se propone un mecanismo para los procesos de nucleación y crecimiento que acontecen durante la transformación de austenita a ferrita y, a partir del cual, se obtienen relaciones que concuerdan con las mediciones experimentales y al mismo tiempo, son congruentes con todos los parámetros físicos que involucran. Se concluye que el carbono expulsado por la ferrita inhibe como sitio posible de nucleación a la frontera de grano austenítico adyacente a los embriones.

La cinética de transformación de austenita a ferrita se modela en base a las velocidades de nucleación y crecimiento obtenidas, la inhibición de la superficie de grano austenítico por el carbono expulsado y a las consideraciones geométricas de los campos de difusión, calculándose el tamaño de grano ferrítico a enfriamiento continuo. Se realizan experimentos en laboratorio para medir cuantitativamente algunos datos utilizados en la modelación y también se realizan pruebas en una industria de la localidad para detectar las variables del proceso que afectan la microestructura final del acero laminado en caliente.

Se comparan los resultados del modelo y los experimentales encontrándose buena concordancia entre ellos, se discute ampliamente el papel que diversos parámetros ejercen sobre la transformación, como son la energía de activación de los procesos, la interfase austenita ferrita, la forma, tamaño y tensiones interfaciales del núcleo crítico, el crecimiento lateral por escalones de la ferrita y la manera en que se cuantifica la partición de elementos sustitucionales en la interfase.

Finalmente, se concluye que: La energía de activación en los procesos de nucleación y crecimiento es la resistencia al cambio que presenta el carbono al pasar de una menor a una mayor concentración y es sólo función de la temperatura, el mecanismo de crecimiento lateral por escalones es

la manera en que la ferrita puede crecer debido a la interacción de campos de distorsión generados por los átomos que son expulsados, es posible modelar la cinética de transformación de austenita a ferrita y calcular el tamaño de grano ferrítico final con los mecanismos propuestos y las consideraciones geométricas de los campos de difusión del carbono; recomendándose las temperaturas de acabado y enrollado de la lámina de acero durante su proceso de manufactura a nivel industrial.

# INDICE

AGRADECIMIENTOS.	ii
RESUMEN.	iv
CAPITULO 1. INTRODUCCION.	
1.1.- TRANSFORMACIONES DE FASE.	1
1.2.- MODELACION DE LA EVOLUCION MICROESTRUCTURAL EN EL PROCESO DE MANUFACTURA DE LAMINA DE ACERO.	3
CAPITULO 2. NUCLEACION EN LA CINETICA DE LAS TRANSFORMACIONES DE FASE.	
2.1.- INTRODUCCION.	5
2.2.- EQUILIBRIO TERMODINAMICO.	5
2.3.- CAMBIO DE ENERGIA LIBRE POR UNIDAD DE VOLUMEN DURANTE LA TRANSFORMACION.	7
2.4.- VELOCIDAD DE NUCLEACION.	8
2.5.- ESTRUCTURAS Y ENERGIAS INTERFASIALES.	12
2.5.1.- INTERFASES COHERENTES, SEMICOHERENTES E INCOHERENTES.	13
2.5.2.- INTERFASES SEMICOHERENTES COMPLEJAS.	14
2.5.3.- PRECIPITADOS SOBRE LA FRONTERA DE GRANO.	15
2.6.- ENERGIA DE DEFORMACION.	15
2.7.- PERDIDA DE COHERENCIA.	17
2.8.- FORMA DE EQUILIBRIO DE LOS NUCLEOS.	18
2.8.1.- CONSTRUCCIONES DE WULFF.	19
2.8.2.- FORMA CRITICA DE LOS NUCLEOS DURANTE LA NUCLEACION HETEROGENEA.	20
2.8.3.- NUCLEACION EN DISLOCACIONES.	21
2.9.- COMPARACION DE LA TEORIA DE NUCLEACION CON OBSERVACIONES EXPERIMENTALES.	22

2.9.1.- COMPARACION CUANTITATIVA.	22
2.9.1.1.- NUCLEACION HOMOGENEA.	22
2.9.1.2.- NUCLEACION EN FRONTERAS DE GRANO.	23
2.9.2.- COMPARACION CUALITATIVA.	25
2.9.2.1.- RELACIONES DE ORIENTACION REPRODUCIBLES.	25
2.9.2.2.- DEMOSTRACION DE LA COHERENCIA PARCIAL DE INTERFASES IRRACIONALMENTE ORIENTADAS DE ALOTROMORFISMOS SOBRE LA FRONTERA DE GRANO.	25
2.9.2.3.- LA ESTRUCTURA INTERFASIAL DE CRISTALES FORMADOS DURANTE LA TRANSFORMACION MASIVA.	26
<b>CAPITULO 3. CRECIMIENTO EN LA CINETICA DE LAS TRANSFORMACIONES DE             FASE.</b>	
3.1.- INTRODUCCION.	27
3.2.- EFECTO DE LA FUERZA MOTRIZ EN LA CINETICA DE CRECIMIENTO.	27
3.3.- MODELOS DE CRECIMIENTO DIFUSIONAL.	29
3.3.1.- CRECIMIENTO CONTROLADO POR DIFUSION.	32
3.3.1.1.- VELOCIDAD DE CRECIMIENTO NORMAL A LA FRONTERA DE GRANO.	32
3.3.1.2.- VELOCIDAD DE CRECIMIENTO A LO LARGO DE LA FRONTERA DE GRANO.	33
3.3.2.- CRECIMIENTO CONTROLADO POR LA INTERFASE.	33
3.4.- IMPORTANCIA DE LA INTERFASE EN EL PROCESO DE CRECIMIENTO.	34
3.5.- MECANISMO DE CRECIMIENTO POR ESCALONES.	36
3.6.- CONTRIBUCION DE LOS DEFECTOS INTERFASIALES AL CRECIMIENTO.	
3.6.1.- ESCALONES ESTRUCTURALES.	38
3.6.2.- DISLOCACIONES PRODUCIDAS PARA COMPENSAR LA DEFORMACION.	38
3.6.3.- ESCALONES PARA EL CRECIMIENTO.	39
3.7.- CINETICA DE CRECIMIENTO.	40
3.8.- CRECIMIENTO DE INTERFASES ESCALONADAS.	40
3.9.- OBSERVACIONES EXPERIMENTALES CUANTITATIVAS DE LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO.	43

3.9.1.- VELOCIDADES DE CRECIMIENTO CONTROLADAS POR LA INTERFASE, SIN CAMBIO EN LA COMPOSICION.	43
3.9.2.- REACCIONES QUE INVOLUCRAN DIFUSION DEL SOLUTO DE LARGO ALCANCE.	44
3.9.2.1.- MEDICIONES EXPERIMENTALES DE LA RAZON LARGO A ANCHO EN ACEROS AL CARBONO.	46
3.10.- CINETICA DE CRECIMIENTO EN ACEROS CON ELEMENTOS SUSTITUCIONALES.	46

## CAPITULO 4. MODELOS QUE PREDICEN LA CINETICA DE TRANSFORMACION DE AUSTENITA A FERRITA.

4.1.- INTRODUCCION.	48
4.2.- FRACCION TRANSFORMADA.	48
4.2.1.- ECUACION DE JOHNSON Y MHEL.	49
4.2.2.- ECUACION DE AVRAMI.	49
4.2.3.- LEYES DE LA CINETICA DE CAHN.	50
4.2.3.1.- NUCLEACION EN SUPERFICIE DE GRANO.	50
4.2.3.2.- NUCLEACION EN BORDES DE GRANO.	51
4.2.3.3.- NUCLEACION EN ESQUINAS DE GRANO.	52
4.2.3.4.- VELOCIDAD DE LA REACCION SI MAS DE UN TIPO DE SITIO ES ACTIVO.	54
4.2.4.- MODELOS DE AVANCE DE LA INTERFASE.	54
4.3.- PRINCIPIO DE ADITIVIDAD PARA ENFRIAMIENTO CONTINUO.	55
4.3.1.- MODELO DE ADITIVIDAD PARA LA TRANSFORMACION DE FERRITA PROEUTECTOIDE.	56
4.4.- RADIO DE LA FERRITA DURANTE ENFRIAMIENTO CONTINUO.	58
4.5.- MODELOS QUE PREDICEN DIAGRAMAS TTT.	
4.5.1.- MODELO QUE PREDICE DIAGRAMAS TTT DE FERRITA PROEUTECTOIDE EN ACEROS A PARTIR DE LA TEORIA DIFUSIONAL DE CRECIMIENTO.	58
4.5.2.- MODELO QUE PREDICE DIAGRAMAS TTT DE Fe, Fe-Ni Y Fe-Cr.	59
4.6.- MODELOS QUE PREDICEN EL TAMAÑO DE GRANO FERRITICO FORMADO ISOTERMICAMENTE.	60



6.2.7.1.- CONSUMO DEL AREA DISPONIBLE PARA TRANSFORMAR.	81
6.2.8.- TEMPERATURA DEL INICIO DE LA TRANSFORMACION.	81
6.2.9.- ENFRIAMIENTO CONTINUO.	82
6.3.- METODOLOGIA DE CALCULO.	82
<b>CAPITULO 7. EXPERIMENTACION EN LABORATORIO Y PLANTA.</b>	
7.1.- INTRODUCCION.	85
7.2.- PREPARACION DEL MATERIAL DE LABORATORIO.	85
7.3.- MEDICION DE LA TEMPERATURA.	85
7.3.1.- SISTEMA DE CAPTURA.	86
7.3.2.- PROGRAMA COMPUTACIONAL DE CAPTURA DE DATOS.	86
7.3.2.1.- ANALISIS DE LA TRANSFORMACION DE FASE.	87
7.3.3.- CALIBRACION DE TEMPERATURAS.	87
7.3.4.- COMPUTADORA.	88
7.4.- MUFLAS.	88
7.5.- RECIPIENTE PARA INMERSION DE MUESTRAS.	88
7.6.- PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTACION EN EL LABORATORIO.	88
7.7.- EXPERIMENTACION EN PLANTA.	89
7.7.1.- TAMAÑO DE GRANO FERRITICO EN EL ROLLO DE LAMINA.	89
7.7.2.- VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.	89
7.7.2.1.- TEMPERATURAS DE ACABADO Y ENROLLADO.	90
7.7.2.2.- TIEMPO QUE TARDA LA LAMINA EN ATRAVESAR LA MESA DE ENFRIAMIENTO.	90
7.7.3.- MESA DE ENFRIAMIENTO.	90
7.7.4.- PRUEBAS REALIZADAS ABRIENDO Y CERRANDO VALVULAS DE AGUA.	90
7.7.5.- MUESTRAS DE LAS LAMINAS DE PRUEBA.	91
7.8.- METALOGRAFIA.	91
7.8.1.- METALOGRAFIA CUANTITATIVA.	91
<b>CAPITULO 8. RESULTADOS.</b>	
8.1.- INTRODUCCION.	92
8.2.- TEMPERATURAS DEL INICIO DE LA TRANSFORMACION.	92



8.3.- CARBONO EQUIVALENTE.	93
8.4.- EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION EN LA TEMPERATURA DEL INICIO DE LA TRANSFORMACION.	93
8.5.- TAMAÑO DE GRANO AUSTENITICO.	95
8.6.- VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.	96
8.7.- TAMAÑO DE GRANO FERRITICO Y MICROESTRUCTURAS ENCONTRADAS EN LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.	96
8.8.- EXPERIMENTACION EN PLANTA.	97
8.8.1.- TAMAÑO DE GRANO FERRITICO EN PUNTA Y COLA DE UN ROLLO DE ACERO.	97
8.8.2.- VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO.	97
8.8.3.- TAMAÑO DE GRANO FERRITICO OBTENIDO EN LA EXPERIMENTACION EN LA MESA DE ENFRIAMIENTO.	98
8.9.- RESULTADOS DE LA MODELACION.	98
8.9.1.- CONCENTRACION DE CARBONO QUE INHIBE LA NUCLEACION.	98
8.9.2.- CINETICA DE TRANSFORMACION.	99
8.9.3.- TAMAÑO DE GRANO FERRITICO.	99
CAPITULO 9. DISCUSION.	
9.1.- INTRODUCCION.	101
9.2.- ENERGIA DE ACTIVACION PARA LA NUCLEACION Y CRECIMIENTO DE LA FERRITA.	101
9.3.- NUCLEO CRITICO.	102
9.3.1.- FORMA Y TAMAÑO DEL NUCLEO CRITICO.	103
9.3.2.- ENERGIAS INTERFASIALES QUE FORMAN EL NUCLEO CRITICO.	104
9.3.3.- ANGULO ENTRE TENSIONES.	104
9.4.- ESCALONES EN LA INTERFASE AUSTENITA-FERRITA	105
9.5.- VELOCIDADES DE NUCLEACION Y CRECIMIENTO.	105
9.5.1.- VELOCIDAD DE CRECIMIENTO.	106
9.5.2.- VELOCIDAD DE NUCLEACION.	106
9.6.- MODELACION.	107
9.6.1.- SITIOS POSIBLES DE NUCLEACION.	107
9.6.2.- MOVIMIENTO DE LA INTERFASE.	108

9.6.3.- GEOMETRIA UTILIZADA PARA LOS CAMPOS DE DIFUSION.	108
9.6.4.- RAZON DE ENERGIAS DE ACTIVACION.	109
9.6.5.- SATURACION DE LA SUPERFICIE DE GRANO DISPONIBLE PARA LA NUCLEACION.	109
9.7.- CINETICA DE LA TRANSFORMACION.	109
9.7.1.- FRACCION TRANSFORMADA DE AREA.	110
9.7.2.- FRACCION TRANSFORMADA DE VOLUMEN.	110
9.8.- DATOS ENCONTRADOS EN LA EXPERIMENTACION.	111
9.8.1.- EQUIVALENCIA DEL MANGANESO A CARBONO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA.	111
9.8.2.- TAMAÑO DE GRANO AUSTENITICO.	111
9.8.3.- REFINACION DEL GRANO AUSTENITICO SOLO POR TRABAJADO MECANICO.	112
9.8.4.- DESAPARICION DEL PICO DE TRANSFORMACION DE MAS BAJA TEMPERATURA.	112
9.9.- COMPARACION ENTRE PREDICCIONES DEL MODELO Y LOS DATOS EXPERIMENTALES.	113
9.9.1.- DRAGADO DE LAS PARTICULAS DE NITRURO DE ALUMINIO.	113
9.9.2.- TAMAÑO DE GRANO FERRITICO EN PLANTA.	114
9.10.- COMPARACION DEL MODELO CON REGRESIONES DE ALGUNOS INVESTIGADORES.	115
9.11.- CONTROL DE LA MICROESTRUCTURA EN EL PROCESO DE MANUFACTURA DE LAMINA DE ACERO	116
 CAPITULO 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
10.1.- INTRODUCCION.	118
10.2.- CONCLUSIONES.	118
10.3.- RECOMENDACIONES.	121
 REFERENCIAS.	
FIGURAS.	
TABLAS.	
APENDICES.	