



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Evolución microestructural durante el procesamiento
termomecánico de aceros de tercera generación automotriz con
cromo: un enfoque asistido por simulación computacional y
experimentación**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Metalurgia e Ingeniería de Materiales

Presenta:

Ing. Salvador Gallegos Quintero

Asesor:

Dr. José Luis Hernández Rivera

Co-asesor:

Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“Evolución microestructural durante el procesamiento termomecánico de aceros de tercera generación automotriz con cromo: un enfoque asistido por simulación computacional y experimentación”

se realizó en el periodo enero de 2024 a agosto de 2025 bajo la dirección del Dr. José Luis Hernández Rivera y del Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA VIRTUAL
Zona Universitaria s/n C.P. 78290 Tel. 834 25 42 Fax 826-23-06
San Luis Potosí, S.L.P. México



El que suscribe Salvador Gallegos Quintero,
con domicilio en Altos Hornos #274
Colonia / fraccionamiento Las mercedes
C.P. 78397 Tel. 4442833443 Ciudad Villa de Pozos
y en mi carácter de autor y titular de la tesis que
lleva como nombre: Evolución microestructural durante el procesamiento termomecánico de aceros de tercera generación automotriz con
como: un enfoque asistido por simulación computacional y experimentación, en lo sucesivo "LA OBRA" y por
ende, cedo y autorizo a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para que
lleve a cabo la divulgación, publicación, reproducción, así como la digitalización
de la obra, en formato electrónico y sin fines de lucro.

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se compromete a respetar
en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente.

San Luis Potosí, S.L.P., a 26 de agosto de 2025.

Atentamente,

Reporte de similitudes

Salvador Gallegos Quintero

Tesis_Gallegos Quintero

 Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trnoid::3117487567543

Fecha de entrega

27 ago 2025, 11:38 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

27 ago 2025, 11:43 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Tesis_Gallegos Quintero CAST FINAL SIN FORMATOS.pdf

Tamaño del archivo

4.5 MB

89 páginas

22.735 palabras

121.594 caracteres

1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el Informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)
- Methods and Materials

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de Integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
20 caracteres

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	ciep.ing.uaslp.mx	<1%
2	Internet	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
3	Internet	sappi.ipn.mx	<1%
4	Publicación	Hızlı, Burak. "The Constitutive and Damage Models of Additively Manufactured Ti...	<1%
5	Publicación	Sabokpa, O.. "Artificial neural network modeling to predict the high temperature ...	<1%
6			

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de mi asesor el **Dr. José Luis Hernández Rivera** y a mi coasesor el **Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia**, quienes durante mi estudio me brindaron orientación y asesoría invaluable, así como un alto nivel de confianza y libertad.

También me gustaría agradecer especialmente a la **SECIHTI** por el apoyo económico para el desarrollo del presente trabajo de tesis con la beca número **1318049**.

Igualmente quiero agradecer al **Instituto de Metalurgia** de la **UASLP** por las facilidades prestadas, así como a su personal administrativo: C.P. Nalleli Madai Martínez Sánchez y María J.C. Guadalupe Moya Zertuche. A los técnicos: M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar por apoyarme en la caracterización vía difracción de rayos X. M.M.I.M. Claudia Elías Hernández por su apoyo en ensayos de extracción electrolítica. M.M.I.M. Lorena Hernández Hernández por su apoyo en la preparación de reactivos y en la preparación metalografía de muestras. A Juan Zaragoza y Jesús Flores Sandoval por el apoyo en el corte y maquinado de muestras. A mis amigos Olga Elizabeth Pantoja Alvizo, Jesús Israel Loredó Pintor, Alondra Ramírez Rodríguez, Frida Marcela Villegas López, Luis y Ahtzyri Damayanti Delgado Gutierrez quienes hicieron de mi estancia en el programa de maestría una experiencia inolvidable.

Asimismo, quiero reconocer a la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**, al **Instituto Tecnológico de Morelia** y al **Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) unidad Chihuahua** por facilitar el uso de sus instalaciones para el desarrollo experimental, en especial al Dr. Arnoldo Bedolla Jacuinde y al Dr. Pedro Garnica González. Así mismo, me gustaría agradecer a Alondra Jaqueline Boc

Abstract

The automotive industry has become increasingly demanding regarding the materials used, seeking to improve their properties and economize their use. Therefore, third-generation steels have recently begun to be investigated as a proposal to address these property demands. With this in mind, this work developed a new composition of medium-manganese steel alloyed with chromium to promote additional hardening mechanisms, seeking to define the feasibility of processing it on a larger industrial scale. To this end, two ingots with a weight composition of 0.9% C - 6.5% Mn - 1.7% Si - 1.5% Al - 0.02% Ni were cast. One of them was alloyed with chromium and the other without it, with the objective of evaluating the influence of this element during solidification and thermomechanical processing. The influence of chromium variations on the microstructure was previously simulated using Thermo-Calc software, finding that cementite was suppressed and, instead, the formation of chromium carbides of types $M_{23}C_6$ and M_7C_3 was promoted. Both alloys were melted in a vacuum induction furnace from which samples were obtained that were metallographically prepared and subsequently characterized by optical microscopy, microhardness tests, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and X-ray diffraction. It was observed that the steel presented a microstructure composed mainly of martensite with zones of remaining δ ferrite, and an austenite content of less than 2.5% by weight. However, the presence of carbides was not observed via transmission electron microscopy. Additionally, hot compression tests were carried out at temperatures of 900, 950, and 1000 °C and strain rates of 0.017, 0.055, and 0.092 s⁻¹, obtaining stress-strain curves. The analysis of these curves allowed the establishment of an Arrhenius-type material model for simulating hot rolling processes. This allowed the simulation of the process parameters necessary for the experimental hot rolling processes, obtaining a maximum load of 10.8 tons, a maximum cooling of 51 °C, and a total engineering deformation of 4.8 mm/mm. In the manufactured sheets, it was found that, during this processing, the steels did not present the formation of carbides, which is favorable for facilitating their production.

Índice de contenido

Reporte de similitudes	IV
Agradecimientos	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tablas.....	XVII
1. Estado del arte del desarrollo computacional y experimental de láminas de aceros de tercera generación de medio manganeso.....	1
1.1 Evolución de las láminas de aceros automotrices a lo largo del tiempo.....	1
1.1.1 Primera generación.....	2
1.1.2 Segunda generación	2
1.1.3 Tercera generación	2
1.2 Aceros de medio manganeso.....	4
1.3 Simulación computacional.....	5
1.4 Segregación durante la solidificación	6
1.5 Trabajo en caliente y mecanismos microestructurales asociados	9
1.6 Laminación en caliente.....	13
2. Técnicas experimentales y desarrollo computacional de láminas de aceros medio manganeso con aleación de cromo	17
2.1 Evaluación del efecto del Cromo en diagramas pseudobinarios.....	17
2.2 Vaciado de muestras de acero con y sin cromo	17
2.3 Caracterización microestructural de las aleaciones vaciadas.	18
2.4 Extracción electroquímica.	20
2.5 Ensayos de compresión en caliente.....	21

2.6	Caracterización microestructural de las muestras de ensayos de compresión en caliente.....	22
2.7	Cuantificación de fases en estado de colada.	23
2.7.1	Ferrita δ	23
2.7.2	Austenita	23
2.7.3	Martensita	23
2.8	Análisis de macrosegregación en las muestras obtenidas por colada	24
2.9	Análisis de muestras de colada por TEM	24
2.10	Análisis de ensayos de compresión en caliente para muestras obtenidas por colada	25
2.11	Simulación de laminación en caliente para muestras de aceros medio manganeso con y sin contenido de cromo	26
2.12	Laminación en caliente para muestras obtenidas por colada.....	27
3.	Análisis y discusión de resultados obtenidos a partir de los aceros desarrollados.....	29
3.1	Simulación termodinámica de diagramas pseudobinarios	29
3.2	Cálculo de la temperatura de inicio de transformación martensítica (MS) teórica	33
3.3	Cálculo estequiométrico de carburos de cromo	34
3.4	Caracterización microestructural en estado de colada para los aceros producidos.	34
3.4.1	Evaluación microestructural obtenida por medio de microscop	

3.6	Cuantificación de fases en estado de colada de aceros producidos	43
3.6.1	Ferrita δ	43
3.6.2	Austenita	43
3.6.3	Martensita	44
3.7	Análisis de macrosegregación de Al, Si, Mn y Cr en aceros producidos por colada	44
3.8	Análisis por TEM de los aceros evaluados en estado de colada	46
3.8.1	Muestras con 1 % de cromo.....	47
3.8.2	Muestra sin contenido de cromo.	49
3.9	Ensayos de compresión en caliente de aceros medio manganeso evaluados	54
3.10	Caracterización de las muestras de los ensayos de compresión en caliente.....	57
3.11	Determinación de ecuación de Arrhenius para deformación en caliente	60
3.12	Análisis de la simulación de laminación en caliente	63
3.13	Laminación en caliente de aceros medio manganeso evaluados	65
3.14	Caracterización microestructural de las muestras laminadas	67
Conclusiones		71
Referencias		73
Anexos		77
Anexo 1. Cálculo de fracción en volumen para los carburos $\text{Cr}_{23}\$		

Figura 41. a) Difractograma de rayos X del acero aleado con 1 % de cromo laminada con una reducción de 6 mm. b) ampliación de los ángulos 43 – 46°68

Figura 42. Imágenes de microscopía óptica de los aceros en condición de laminación a 50X atacadas con Nital al 2 %. A)1 % cromo, 1 mm de reducción (11.1 %), B) 1 % cromo, 6 mm de reducción (66.6 %), C) sin cromo, 1 mm de reducción (11.1 %), D) sin cromo, 6 mm de reducción (66.6 %).70

dichos elementos en escala micrométrica (microsegregación) y a escala macroscópica (macrosegregación). La microsegregación se puede explicar como sigue: el líquido rechaza solutos durante el enfriamiento debido a los coeficientes de solubilidad de los elementos [14]. De esta manera, al estar en contacto la fase líquida con la fase sólida, ocurrirá la partición de soluto, la cual puede determinarse con la ecuación (1) [14]:

$$\frac{C_S}{C_L} = K_e \quad (1)$$

Donde C_S y C_L son las concentraciones de un soluto en específico en el sólido y el líquido respectivamente, y K_e es el coeficiente de partición en equilibrio, cuyo valor es menor que 1. A su vez, el coeficiente de partición en equilibrio puede ser determinado con las actividades químicas del soluto al determinar la transferencia de masa y concentración por unidad de volumen, resultando en la ecuación (2) [14]:

$$K_e = \frac{a_S}{a_L} \quad (2)$$

Donde a_S y a_L son las actividades químicas para el soluto en la fase sólida y líquida, respectivamente. Estos coeficientes de partición están en función de la temperatura, pero ésta puede ser ignorada sin considerar un error considerable para casos de baja concentración.

Ghosh [14] determinó los valores de K_e para los elementos presentes en las fases de ferrita δ y austenita en aceros obtenidos por colada, siendo los de interés para este trabajo el Al, Si, Mn y Cr, cuyos valores se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1 Valores de K_e para solidificación en aleaciones binarias de hierro.

