

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SIMULACION POR ELEMENTO FINITO DEL PROCESO  
DE FORMADO DE CONEXIONES "T" SIN COSTURA  
EN CALIENTE**

**POR:**

**M.C. CARLOS LAZARO NARANJO**

**TESIS**

**CON OPCION AL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. ENERO DE 2004**





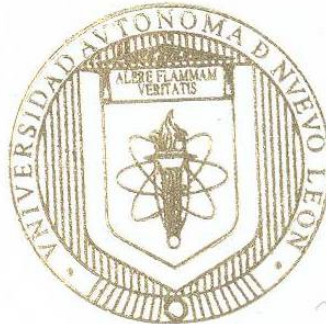


1020150691

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



SIMULACION POR ELEMENTO FINITO DEL PROCESO  
DE FORMADO DE CONEXIONES "T" SIN COSTURA  
EN CALIENTE

POR:

M.C. CARLOS LAZARO NARANJO

TESIS

CON OPCION AL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. ENERO DE 2004

9 57

TD  
255  
.M

20  
, L69

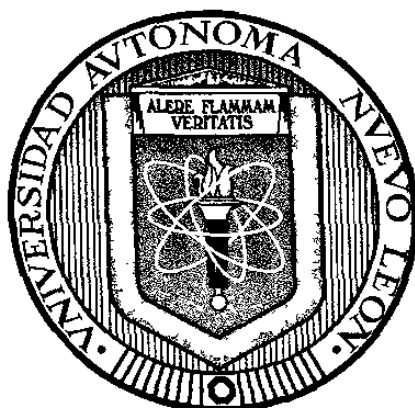


FO O  
1 SIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO DEL PROCESO  
DE FORMADO DE CONEXIONES "T" SIN COSTURA EN  
CALIENTE**

**POR**

**MC CARLOS LÁZARO NARANJO**

**TESIS**

**CON OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA  
DE MATERIALES**

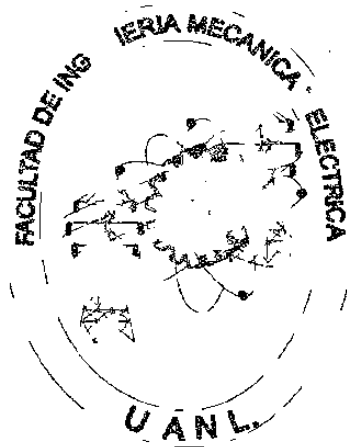
**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.**

**ENERO DE 2004**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO DEL PROCESO DE  
FORMADO DE CONEXIONES "T" SIN COSTURA EN CALIENTE**

**POR**

**MC CARLOS LAZARO NARANJO**

**TESIS**

**CON OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE  
MATERIALES**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.**

**ENERO DE 2004**

---

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

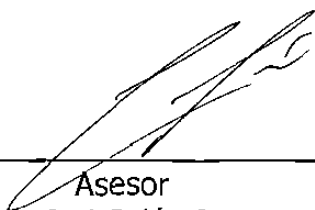
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Simulación por elemento finito del proceso de formado de conexiones T sin costura en caliente”, realizada por el MC Carlos Lázaro Naranjo, sea aceptada para su defensa con opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Tesis



Asesor

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata



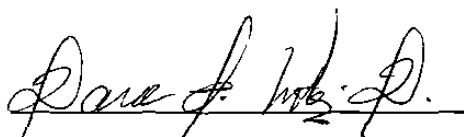
Asesor

Dr. Rafael Colás Ortiz



Revisor

Dr. José Luis Cavazos García



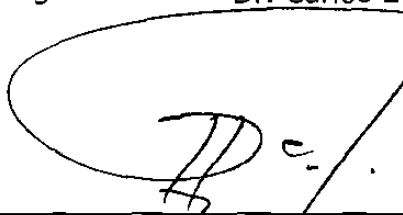
Revisor

Dra. Dora María Martínez Delgado



Revisor

Dr. Carlos Evaristo Esparza Garcés



Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Enero 2004

---



# Dedicatorias

**A mi Esposa**

**A mi Hija *Claudia, Karlita y Jhony***

**A mis familiares**

**A mis Maestros**

# Agradecimientos

Al Programa de mejoramiento del profesorado (PROMEP) y a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el apoyo económico brindado.

A la Empresa Tenaris-Riga y en especial al Ing. José Martínez Macias por todo el apoyo y la paciencia brindada como parte esencial de este proyecto.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata y Al Dr. Rafael Colás Ortiz por el valioso apoyo incondicional en el asesoramiento para la elaboración de la tesis.

Al Dr. José Luis Cavazos García, A la Dra. Dora María Martínez Delgado y al Dr. Carlos Evaristo Esparza Garcés que con su gran apoyo y acertados comentarios en la revisión enriquecieron este trabajo.

A mis maestros del DIMAT quienes con mucho profesionalismo compartieron sus conocimientos.

A mis compañeros y amigos de aulas que siempre los recordaré.

# INDICE

Resumen.....	1
Capítulo 1 Introducción .....	2
Capítulo 2 Métodos numéricos.....	4
2.1 Métodos existentes.....	4
2.2 Utilidad del método de elementos finitos.....	6
2.3 Resumen histórico.....	7
Capítulo 3 Método de elementos finitos.....	10
3.1 Método variacional.....	11
3.2 Método de Rayleigh-Ritz.....	13
3.3 Método de <i>residuos ponderados</i> .....	14
3.4 Método de Galerkin.....	17
Capítulo 4 Plasticidad.....	20
4.1 Deformación y esfuerzos reales.....	23
4.2 Ecuación esfuerzo-deformación plástica.....	24
4.3 Criterios de cedencia.....	25
4.4 Invariantes de los esfuerzos.....	26
4.5 Tensores isotrópicos y distorsional (deformaciones).....	27
4.6 Tensor de las deformaciones.....	28
4.7 Tensores isotrópicos y distorsional (esfuerzos).....	30
4.8 Criterio de cedencia.....	31
4.9 Teoría de la plasticidad.....	33



4.10 Método de ensayo.....	36
Capítulo 5 Fricción .....	40
5.1 Características de lubricantes usados en el formado de metal.....	41
5.2 Esfuerzos de corte friccional y lubricidad.....	42
5.3 Ensayo de compresión de anillos.....	43
Capítulo 6 Proceso de fabricación de conexiones T de acero.....	46
Capítulo 7 Simulación.....	55
7.1 Metodología de desarrollo.....	55
7.2 Selección entre los códigos implícitos y explícitos.....	59
7.3 Método de elementos finitos resuelto por Abaqus.....	59
7.3.1 Capacidad de Abaqus para modelar la forja en caliente...60	
7.3.2 Modelación de contacto con Abaqus.....	61
7.4 Simulación de la conexión T.....	62
Capítulo 8 Procedimiento experimental.....	78
8.1 Introducción . .....	78
8.2 Monitoreo de temperaturas.....	79
8.3 Pruebas mecánicas.....	81
8.4 Proceso de formado del tubo mallado.....	82
Capítulo 9 Resultados.....	85
9.1 Introducción.....	85
9.2 Resultados experimentales.....	85
9.3 Microestructura.....	88
9.4 Desarrollo del método visioplástico.....	90
9.5 Resultados de las pruebas mecánicas.....	97

9.6	Resultados de la simulación por elemento finito.....	100
9.7	Comparación de los resultados experimentales y numéricos.....	115
9.8	Resultados experimentales con óvalo rediseñado.....	124
Capítulo 10	Discusión.....	131
10.1	Evaluación de los datos temperatura-tiempo.....	131
10.2	Mediciones del método visioplástico.....	132
10.3	Ensayo de compresión a alta temperatura.....	133
10.4	Simulación.....	133
10.4.1	Recolección de datos.....	134
10.4.2	Corrección del tercer ramal de la conexión T.....	135
10.4.3	Comparación de las vistas laterales.....	137
10.4.4	Modificación de las balas.....	141
10.4.5	Mallado preferencial.....	141
Capítulo 11	Conclusiones y recomendaciones.....	143
	Referencias.....	146
	Índice de Figuras.....	149
	Índice de Tablas.....	155
Apéndice A	.....	156

## RESUMEN

Debido a la gran aceptación que ha tenido últimamente el método de elementos finitos en los termoformados, este trabajo presenta su aplicación al proceso de forja en caliente de conexiones T de acero sin costura.

Se determinó la distribución de esfuerzos y deformaciones que se presentan en la pieza durante el proceso de formado. Los datos utilizados se obtuvieron del monitoreo de temperaturas en planta y los ensayos realizados en el laboratorio.

Para el desarrollo numérico se utilizaron los paquetes comerciales de ABAQUS y ANSYS. Al final se presentan los resultados experimentales y numéricos mismo que se comparan para observar la variación de error.

Para realizar la modelación se hicieron las siguientes consideraciones:

- La temperatura en la conexión T se supone constante y homogénea
- Se considera fricción cero entre las herramientas y la conexión T
- La velocidad de deformación se supone constante
- Se emplea la formulación explícita
- Para simplificar los cálculos se suponen rígidas las herramientas

Con la realización de esta investigación se obtuvieron datos que permitirán corregir el diseño de herramientas que serán de gran importancia para mejorar el tiempo de procesamiento. Además contribuirá para el desarrollo de nuevos productos.