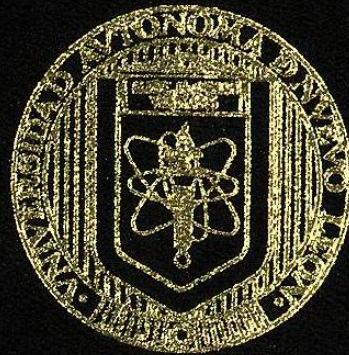


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



SIMULACION DEL PROCESO DE FORJA DE CODOS SIN  
COSTURA Y EVALUACION DE LA HERRAMIENTA DE FORMADO  
POR EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

POR:

EZEQUIEL SALAS ZAMARRIPA

TESIS

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

CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE 2003

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2003  
.S24

SECRET  
PROCESSED BY THE  
OFFICE OF THE  
DIRECTOR OF THE  
CENTRAL INTELLIGENCE  
AGENCY  
IN ACCORDANCE WITH  
E.O. 13526  
DATE 08-01-2003  
BY 60322  
REASON FOR EXTENSION  
DATE 08-01-2003  
BY 60322

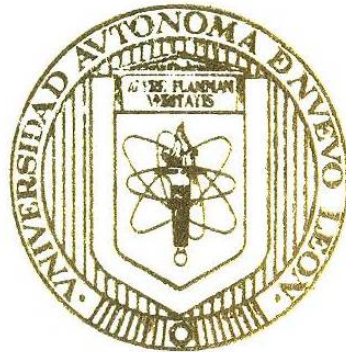


1020149270

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



SIMULACION DEL PROCESO DE FORJA DE CODOS SIN  
COSTURA Y EVALUACION DE LA HERRAMIENTA DE FORMADO  
POR EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

POR:

EZEQUIEL SALAS ZAMARRIPA

TESIS

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

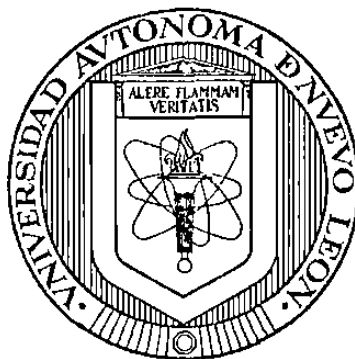
CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE 2003

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FORJA DE CODOS SIN COSTURA Y  
EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE FORMADO POR EL  
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**POR**

**EZEQUIEL SALAS ZAMARRIPA**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**SEPTIEMBRE DEL 2003**

581810

TH

Z5853

.M2

FIME

2003

.S24

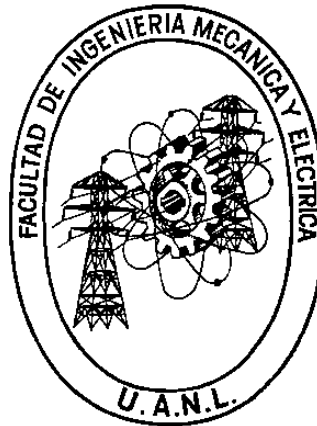


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FORJA DE CODOS SIN COSTURA Y  
EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE FORMADO POR EL  
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**POR**

**EZEQUIEL SALAS ZAMARRIPA**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

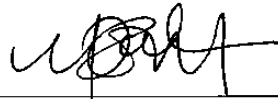
**SEPTIEMBRE DEL 2003**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

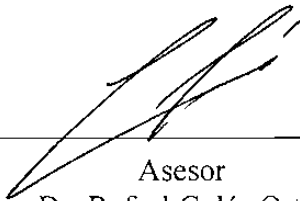
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Simulación del proceso de forja de codos sin costura y evaluación de la herramienta de formado por el método de elementos finitos”, realizada por el alumno Ezequiel Salas Zamarripa, matrícula 0898389, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



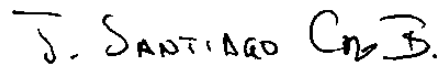
Asesor

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata



Asesor

Dr. Rafael Colás Ortiz



Coasesor

Dr. José Santiago Cruz Bañuelos



Vº Bº.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N. L. Septiembre del 2003.



A mamá y papá, hermanos y hermanas,  
mini, velli, Kari

# AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado.

Se agradece el apoyo económico brindado por el CONACYT y SIREYES para realizar el presente trabajo. También se agradece el apoyo del PAICYT (UANL) para la terminación de este trabajo.

A la Dra. Martha Guerrero por el entusiasmo, paciencia y apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Rafael Colás, por sus valiosos comentarios y por la atención prestada a este trabajo.

Al Dr. Santiago Cruz, por su apoyo en la recta final de este proyecto.

A todos los Profesores del PDIM.

A todos mis compañeros del PDIM, por todos los momentos hilarantes.

# CONTENIDO

RESUMEN .....	iv
<b>CAPÍTULO 1. PROCESOS DE FORMADO DE METALES .....</b>	<b>1</b>
1.1    Introducción .....	1
1.2    Perspectiva histórica.....	2
1.3    Clasificación de los procesos de formado de metales .....	3
1.4    Variables en los procesos de formado.....	5
1.4.1    Variables del material .....	5
1.4.2    Equipo y herramientas.....	6
1.4.3    Fricción .....	6
1.4.4    Mecánica de deformación.....	6
1.4.5    Propiedades del producto .....	6
1.5    Métodos de análisis .....	7
1.5.1    Método de bloque.....	8
1.5.2    Método de campo de líneas de deslizamiento.....	9
1.5.3    Método de límite superior e inferior .....	9
1.6    Modelos físicos .....	10
1.6.1    Materiales para modelado .....	11
1.6.2    Método de visioplasticidad .....	11
1.7    Descripción del proceso de producción de codos sin costura.....	12
1.8    Problemática y objetivo.....	15
<b>CAPÍTULO 2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>17</b>
2.1    Introducción .....	17
2.2    Historia del método.....	17
2.3    Metodología básica .....	18
2.4    Método de aproximación directa.....	20
2.5    Método variacional.....	28
2.6    Método de residuos ponderados.....	29

2.7	Formulaciones explícitas e implícitas .....	30
2.8	Análisis explícito.....	31
2.8.1	Estabilidad e incremento de tiempo estable .....	32
2.8.2	Aumento de la velocidad del proceso real .....	33
2.8.3	Escalamiento de masa .....	34
2.9	Análisis cuasi-estático y problemas de formado de metales.....	34
2.10	No linealidades del material .....	36
2.11	No linealidades geométricas .....	37
2.12	Formulaciones generales de los elementos .....	39
 CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....		 42
3.1	Introducción .....	42
3.2	Evolución térmica durante la forja en caliente.....	42
3.3	Ensayos de compresión uniaxial .....	43
3.4	Metodología para el desarrollo del método de visioplasticidad.....	44
3.5	Diseño de la herramienta de formado .....	47
 CAPÍTULO 4. DESARROLLO NUMÉRICO .....		 49
4.1	Introducción .....	49
4.2	Equipo de cómputo .....	49
4.3	Simplificaciones del modelo .....	50
4.4	Elaboración del modelo mediante Abaqus/CAE.....	52
4.4.1	Módulo <i>Part</i> .....	52
4.4.2	Módulo <i>Property</i> .....	53
4.4.3	Módulo <i>Assembly</i> .....	54
4.4.4	Módulo <i>Step</i> .....	54
4.4.5	Módulo <i>Interaction</i> .....	56
4.4.6	Módulo <i>Load</i> .....	57
4.4.7	Módulo <i>Mesh</i> .....	59
4.4.8	Módulo <i>Job</i> .....	60
4.4.9	Módulo <i>Visualization</i> .....	61

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
5.1    Introducción .....	62
5.2    Obtención de la curva de fluencia.....	62
5.3    Distribución de deformación por el método de visioplasticidad.....	63
5.4    Validación del modelo numérico .....	65
5.5    Evaluación de la geometría del mandril.....	73
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	80
6.1    Conclusiones .....	80
6.2    Recomendaciones.....	82
REFERENCIAS .....	83
ÍNDICE DE TABLAS .....	85
ANEXO I	
Curvas esfuerzo-deformación .....	87
ANEXO II	
Identificación de celdas y mediciones.....	89
ANEXO III	
Distribución de deformación obtenida por el método de visioplasticidad.....	93
ANEXO IV	
Geometría básica y diseños de prueba del mandril.....	98
ANEXO V	
Distribución de deformación obtenida por el método de elementos finitos.....	101

# RESUMEN

Las conexiones soldables sin costura son comúnmente usadas en redes de tuberías a alta presión. Asegurar la calidad del producto es de vital importancia ya que es necesario obtener propiedades mecánicas y físicas dentro de tolerancias muy estrechas.

La fabricación de codos comienza con el corte de tubería recta sin costura en dimensiones específicas según el producto final. La operación de forja en caliente se efectúa por medio de una prensa hidráulica horizontal que hace pasar los segmentos de tubería recta a través de un eje, en cuyo extremo se encuentra la herramienta de formado o mandril. La etapa de deformación tiene lugar dentro de un horno, donde las preformas alcanzan una temperatura propicia para facilitar el flujo del material. La práctica ha mostrado que las propiedades mecánicas y características geométricas del producto final dependen en parte de la forma del mandril. Otras variables presentes en el proceso son la temperatura, la velocidad de alimentación, longitud de la preforma, etc.

El presente trabajo tiene como primer objetivo la validación de un modelo numérico del proceso de forja en caliente de codos sin costura utilizando el paquete computacional Abaqus<sup>MR</sup>, que utiliza el método de elementos finitos. La validación se llevó a cabo comparando los resultados de deformación equivalente del modelo numérico con los obtenidos por medio de un análisis visioplástico. Por medio de este análisis es posible determinar la distribución de deformación que adquieren las preformas al ser deformadas durante el proceso. Otra referencia para llevar a cabo la validación fueron las dimensiones finales del codo.

Una vez que la validación fue exitosa, se procedió a evaluar distintos diseños de la herramienta de formado, tomando como base el diseño original, con el fin de comparar las características finales de los codos al ser formados con los distintos mandriles. De esta manera, fue posible observar el efecto de los cambios en la geometría de los mandriles modelados sobre la distribución de deformación y las dimensiones del codo.