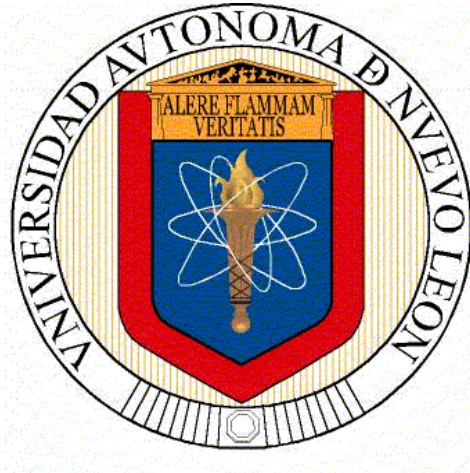


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**TESIS**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA LÍNEA DE FORMADO EN FRÍO  
DE LÁMINA DE ACERO**

**POR**

**GUADALUPE MARIBEL HERNÁNDEZ MUÑOZ**

**PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE  
MATERIALES**

**JULIO 2013**

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



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA LÍNEA DE FORMADO EN FRÍO DE  
LÁMINA DE ACERO

POR  
GUADALUPE MARIBEL HERNÁNDEZ MUÑOZ

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE  
MATERIALES

San Nicolás de los Garza, Ciudad Universitaria, Julio de 2013

# 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  
**“Diseño y Simulación de una línea de formado en frío de lámina de acero”**,  
realizada por la alumna Guadalupe Maribel Hernández Muñoz, matrícula 1016795,  
sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de  
Materiales.

El comité de Tesis

---

Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo  
Asesor

---

Dr. Moisés Hinojosa Rivera  
Revisor

---

Dr. Octavio Covarrubias Alvarado  
Revisor

---

Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés  
Revisor

---

Dr. Rogelio Pérez Santiago  
Revisor

---

Vo. Bo.  
Dr. Moisés Hinojosa Rivera  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, Ciudad Universitaria, Julio de 2013

## **Dedicatoria**

A mi esposo por su amor, paciencia, y apoyo durante todos estos años...y sobre todo por motivarme día a día.

**Eloy Castillo Sandoval**

A mi hijo que quiero tanto y que me impulso a iniciar y terminar este proyecto

**Eloy Castillo Hernández**

A mis padres por darme la vida

**Alejandro Hernández Domínguez y Alicia Muñoz López**

Y especialmente a mi madre por todo el apoyo recibido, sin ella no lo hubiera logrado.

A mis hermanos que siempre me tuvieron paciencia

**Sara, Alejandro y Adrián**

A mis padres políticos por todo el apoyo y comprensión

**Angélica Sandoval Torres y Eloy Castillo Tovar**

A mis hermanos Políticos

**Eulisent, Alaint y Ulises**

A toda mi familia que me entendió cuando no los visitaba, especialmente a mi tío Ing. Jorge Muñoz por ser el ejemplo y apoyo en mi vida profesional, a mis padrinos Irasema y Gerardo por brindarme una niñez feliz.

A mis asesores por sus conocimientos, sabiduría y su tiempo.

**Dra. Paty, Dr. Moisés, Dr. Arturo, Dr. Octavio y Dr. Rogelio**

A mis maestros por compartir sus conocimientos y experiencias

**M.C. Francisco Delgado, M.C. Fernando Montemayor, M.C. María de Jesús, Dr. José Luis Cavazos, M.C. Juan A. Franco, M.C. Esteban Báez V., Dr. Rafael Colás, Dra. Martha Guerrero.**

A mis amigos y amigas por motivarme en cada momento difícil y brindarme su apoyo

**Ariana, Paty Z., Brenda, Lupita Mata, Flor, Marisela, Johana, Karla, Alex, Ricardo Calvo, Fernando, Jorge Aldaco, Ángel Rivas.**

A mis compañeros por apoyarme y compartir buenos y malos momentos

**Luis Reyes, Omar Botello, Mónica, Daniel, Laura Ortiz, Pablo Tapia, Karina...**

Y a todos aquellos que estuvieron cerca de mí para apoyarme durante todo este tiempo

Y especialmente a DIOS.



## **Dedicatoria**

En memoria de

Mis tías que las extraño mucho

**Amalia y Mary**

De mi abuelita

**Pifas**

Y de todas aquellas personas que compartieron momentos de su vida conmigo y que se adelantaron en el camino de la nueva vida.

**Delia y Mireya**

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado, así mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero otorgado para la realización de esta investigación.

Al Programa para el Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por el apoyo de recursos brindado en la escritura de tesis y la estancia en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales SA de CV (COMIMSA), Saltillo.

A la Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo, como una gran mentora durante todo este tiempo de mi vida profesional.

A la Dra. Martha Guerrero Mata, al Dr. Rafael Colás y al M.C. Fernando Montemayor Ibarra por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Octavio Covarrubias Alvarado por el apoyo recibido durante todos estos años.

Al Dr. Rogelio Pérez Santiago por su tiempo en la revisión de este trabajo y sus consejos.

Al Dr. Arturo Reyes por la oportunidad del intercambio de conocimientos durante la estancia en COMIMSA y su tiempo para la revisión de este trabajo.

A la empresa Metalsa por el material proporcionado para la realización de esta investigación y haber permitido el uso de sus instalaciones, así como a todo el personal que labora en el departamento de roloformado e innovación, principalmente al M.C. Rodrigo Berlanga, Ing. José Luis Cavazos, Dr. Rogelio Pérez Santiago y sobre todo al Ing. Carlos Sarmiento Macareno por el apoyo recibido para la culminación de este proyecto.

Al M.C. Esteban Báez Villarreal, al Dr. Moisés Hinojosa Rivera y al Ing. Rogelio Garza por su apoyo académico y administrativo.

Al Ing. José Luis, German y Marco por facilitarme las instalaciones y sus consejos técnicos.

A todos los maestros y compañeros del PDIM.

A mis compañeros de Simulación, Pruebas Mecánicas, Prototipado y COMIMSA.

A TODOS mis amigos y a TODAS amigas.

*“Imaginé una caja negra de cálculo que fuera increíblemente poderosa y que se pudiera alimentar de descripciones matemáticas de lo que el diseñador imaginó para una determinada forma de chapa metálica. Entonces, al pulsar el botón, que la computadora escupiera: la forma del molde, la configuración del desarrollo de la pieza necesitada, la orientación y configuración de los punzones. Y si no es posible su fabricación, que también nos lo diga.”*

*Sueño de Budiansky (Harvard)*

*“I imagined a black box – a black computation box that was incredibly powerful and into which we could feed a mathematical description of what the stylists envisioned for a certain sheet metal shape. Then push a button and the computer spits out the die shape, the blank configuration needed, the draw beads and their orientation and configuration. If it’s not possible, it tells us that too.”*

*Budiansky’s dream (Harvard)*

## Índice general

	<b>Página</b>
<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2 Conformado de metales.....</b>	<b>6</b>
2.1 Introducción.....	6
2.2 Clasificación general de los procesos de conformado.....	7
2.3 Parámetros que influyen en los procesos de conformado.....	11
2.4.1 Plasticidad.....	17
2.4.2 Ecuaciones esfuerzo-deformación.....	18
2.4.3 Criterios de cedencia.....	23
<b>Capítulo 3 Proceso de laminación no plana.....</b>	<b>27</b>
3.1 Introducción.....	27
3.2 Materiales utilizados en el proceso de laminación no plana.....	29
3.2.1 Aplicaciones de los productos de la laminación no plana.....	30
3.2.2 Clasificaciones y propiedades de aceros para aplicaciones automotrices.....	32
3.2.3 Aceros HSLA en el proceso de laminación no plana.....	34
3.3 Clasificación de los procesos de laminación no plana.....	38
3.3.1 Equipos del proceso de laminación no plana.....	39
3.4.1 Parámetros del proceso de la laminación no plana.....	42
3.4.2 Defectos en los productos por laminación no plana.....	47
3.5 Métodos para el diseño de la flor.....	51
3.5.1 Parámetros del doblado y la relación con el diseño del diagrama flor.....	53
3.6 Limitaciones del proceso y desarrollos futuros.....	65
<b>Capítulo 4 Método de elemento finito en los procesos de conformado.....</b>	<b>67</b>
4.1 Introducción.....	67
4.2 Historia del método de elemento finito.....	70
4.3 Formulación matemática del MEF.....	72
4.3.1 Método directo.....	72
4.3.2 Método variacional.....	75
4.3.3 Método de residuos ponderados.....	77
4.3.4 Formulaciones explícitas e implícitas.....	78
4.3.4.1 Métodos explícitos.....	79
4.3.4.2 Métodos implícitos.....	81
4.3.5 Técnicas iterativas.....	82

4.3.5.1 Método Newton-Raphson.....	83
4.3.5.2 Método Newton-Raphson modificado .....	84
4.3.5.2 Método incremental-secante de cuasi Newton .....	85
<b>Capítulo 5 Experimentación.....</b>	<b>86</b>
5.1 Introducción.....	86
5.2 Caracterización del material.....	86
5.2.1 Análisis químico.....	87
5.2.2 Caracterización mecánica.....	88
5.2.2.1 Preparación de probetas.....	89
5.2.2.2 Ensayo de tensión y análisis realizados.....	90
5.2.2.3 Ensayos de dureza.....	92
5.2.3 Caracterización metalúrgica.....	94
5.2.3.1 Pruebas metalográficas.....	95
5.3 Ingeniería inversa y modelado.....	96
5.4 Desarrollo del modelo numérico.....	100
5.4.1 Etapa a simular.....	102
5.4.2 Parámetros y simplificaciones del proceso de la laminación no plana.....	104
5.4.2.1 Diseño de experimentación.....	105
5.4.3 Etapas del desarrollo del modelo mediante ABAQUSMR.....	109
5.4.4 Pruebas para validación geométrica del modelo.....	121
<b>Capítulo 6 Resultados y discusión.....</b>	<b>122</b>
6.1 Introducción.....	122
6.2 Caracterización del material.....	122
6.3 Pruebas mecánicas a tracción.....	123
6.4 Dureza.....	127
6.5 Análisis microestructural.....	128
6.6 Diagrama flor por ingeniería inversa y medición.....	131
6.7 Resultados numéricos y discusión.....	132
6.7.1 Esfuerzo-Deformación, fricción y velocidades.....	138
6.7.2 Esfuerzo máximo-deformación máxima.....	144
6.7.3 Obtención del diagrama de formación (flor).....	168
<b>Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>172</b>
7.1 Conclusiones.....	172

7.2 Recomendaciones.....	173
7.3 Contribución científica y tecnológica.....	173
<b>ANEXOS.....</b>	<b>174</b>
Anexo 7.1 A Valores aplicados a las Ec. 3.10 y 3.11 [32].....	174
Anexo 7.2 B Especificaciones del digitalizador Range 7 Konica Minolta [92].....	176
Anexo 7.3 C Datos obtenidos de las pruebas de tensión de la zona plástica para el acero HSLA50. ....	177
Anexo 7.4 D Micrografías del acero HSLA 50.....	178
Anexo 7.5 E Mediciones obtenidas del FARO <sup>MR</sup> .....	180
Anexo 7.6 F Cálculos del número de estaciones.....	181
Anexo 7.7 G Ángulo de formado.....	183
Anexo 7.8 Hanchura desarrollada.....	184
Anexo 7.9 I Cálculos para el ángulo y anchura desarrollada.....	185
Anexo 7.10 J ARCHIVO *.INP.....	186
Referencias.....	192
Divulgación científica.....	201
Resumen autobiográfico.....	22

## Índice de figuras

	Página
Figura 2.1 Elementos del sistema en los procesos de flexión, prensado y laminación [13].....	7
Figura 2.2 Clasificación de los procesos de conformado propuesto por Boulger [15].....	9
Figura 2.3 Clasificación y subdivisión de Kienzle [16], basado en el sistema de esfuerzos de Von Mises desarrollados durante los procesos de conformado.....	10
Figura 2.4 Clasificaciones del procesos de laminación no plana (roloformado).....	11
Figura 2.5 FLD de Keeler y Goodwin para la formabilidad de una chapa metálica [25].....	14
Figura 2.6 FLD construido por diferentes pruebas de laboratorio [25].....	15
Figura 2.7 Curva esfuerzo deformación.....	20
Figura 2.8 Diagrama de esfuerzo-deformación (a) Modelo Rígido Plástico, (b) Modelo Plástico lineal, (c) Modelo elástico plástico y (d) Modelo de endurecimiento parabólico.....	22
Figura 3.1 Aplicación de partes obtenidas mediante el proceso de laminación no plana en la estructura del automóvil. (Cortesía de Metalsa).....	27
Figura 3.2 Esquema del proceso de laminación no plana [34].....	28
Figura 3.3 Materiales utilizados en el proceso de laminación no plana para componentes automotrices.....	29
Figura 3.4 Aplicaciones de productos por industria obtenidos por el proceso de laminación no plana.....	30
Figura 3.5 Aplicaciones de perfiles estructurales de acero de alta resistencia en casas tipo “Casa Buna” en Rumania [37].....	31
Figura 3.6 Esquema de aceros de alta resistencia comparado con aceros de baja aleación y de ultra alta resistencia [38].....	32
Figura 3.7 Microestructura de un acero HSLA 340. Composición química 0.080%C, 0.50Mn, 0.04Si [41].....	37
Figura 3.8 Proceso pos-corte [5].....	38
Figura 3.9 Tipos de equipos del proceso de laminación no plana. (a) Máquina tipo exterior, (b) Máquina tipo interior [5].....	39
Figura 3.10 Movimientos principales del proceso de laminación no plana.....	41
Figura 3.11 La menor cantidad de pases forma un producto de menor calidad y una mayor cantidad de pases aumenta el costo del proceso.....	44
Figura 3.12 Metodología de optimización de una línea de laminación no plana propuesta por Paralikas, 2010 [47].....	46
Figura 3.13 Influencia insignificante de la fricción en la formación del perfil estructural obtenida por Bui y Phontot, 2008 [48].....	47
Figura 3.14 Defectos presentados en perfiles estructurales (Halmos, 2005).....	48
Figura 3.15 (a) Distribución de esfuerzos de Von y deformaciones de una sección flexionada y (b) en un perfil tubular estructural.....	49



Figura 3.16	Distorsión de agujeros en perfil curvado y deformación de perforación rectangular en conformado de tres etapas y seis etapas (Cupra <sup>TM</sup> ).....	50
Figura 3.17	Sección transversal de un perfil estructural con agrietamiento, obtenido por laminación no plana [52].....	50
Figura 3.18	Sección transversal de un perfil estructural con agrietamiento, obtenido por laminación no plana [52].....	51
Figura 3.19	Flor patrón que muestra las deformación en cada pase.....	52
Figura 3.20	(a) Representación de una chapa doblada ideal y (b) representación de doblados no ideales; caso 1: curvatura no constante, caso 2 distinto ángulo de doblado en cara exterior e interior y caso 3: pérdida de tangencia en las líneas de doblado [31].....	54
Figura 3.21	Datos experimentales mostrando la relación entre el radio de doblado y la razón del espesor de la chapa y la reducción de área para varias chapas metálicas [5].....	56
Figura 3.22	Efectos de orientación en el doblado de chapa metálica [5].....	56
Figura 3.23	Método del ángulo de formado [58].....	57
Figura 3.24	Sección transversal del perfil estructural.....	60
Figura 3.25	Sección transversal del perfil estructural [59].....	61
Figura 3.26	“Línea Recta”, enfoque para el cálculo del número de pases.....	62
Figura 3.27	Esquema del Método de borde límite de esfuerzo, enfoque para el cálculo del número de pases de un perfil simple [60].....	64
Figura 4.1	Representación del proceso MEF.....	68
Figura 4.2	Consola bajo carga uniforme. (a) Consola, (b) Esquematización de modelo matemático para tensión no plana, en el que el equilibrio es infinitesimal en cada punto y (c) Discretiza en elementos [65].....	69
Figura 4.3	Árbol genealógico del Método de Elementos Finitos [74].....	72
Figura 4.4	Resorte lineal con un sistema fijo y una fuerza aplicada en su extremo libre.....	73
Figura 4.5	Resorte lineal típico en un sistema de resortes.....	74
Figura 4.6	Representación gráfica del método de Newton-Raphson [78].....	84
Figura 5.1	Microscopio Electronico de Barrido.....	87
Figura 5.2	Unidad de detección EDAX-EDS.....	88
Figura 5.3	Dimensiones en mm de la probeta de ensayos para tensión.....	90
Figura 5.4	Máquina por chorro de agua utilizada para corte de probetas de tensión.....	90
Figura 5.5	Máquina SHIMADZU Autograph AG-X de pruebas mecánicas.....	91
Figura 5.6	Probetas de acero HSLA grado 50 utilizadas en el ensayo de tensión y obtención de muestras para análisis microestructural.....	92
Figura 5.7	Microdureza Vickers.....	93
Figura 5.8	Corte de secciones de las muestras de medición de dureza.....	93
Figura 5.9	Ubicación de las muestras para estudio en diferentes zonas del perfil rectangular conformado mediante laminación no plana.....	94
Figura 5.10	Cortadora y pulidora utilizados para la preparación de las muestras.....	95
Figura 5.11	Muestras metalográficas.....	95
Figura 5.12	Microscopio Óptico Nikon.....	96
Figura 5.13	Metodología para la digitalización [94].....	97

Figura 5.14	Línea de laminación no plana.....	98
Figura 5.15	Digitalizador Konica Minolta Range 7 y configuración del sistema a utilizar (Tomada de <a href="http://www.konicaminolta.com.mx">www.konicaminolta.com.mx</a> ).....	99
Figura 5.16	Desensamble realizado en planta.....	100
Figura 5.17	Módulos ABAQUS <sup>MR</sup> [100].....	101
Figura 5.18	Esquema del proceso de laminación no plana para el conformado del perfil tubular rectangular.....	103
Figura 5.19	Geometría inicial y final.....	104
Figura 5.20	Perfil tubular rectangular obtenido del proceso de laminación no plana.....	104
Figura 5.21	Simplificación del sistema de laminación no plana.....	105
Figura 5.24	Creación de la lámina como solido deformable en ABAQUS <sup>MR</sup> .....	112
Figura 5.25	Propiedades del material.....	113
Figura 5.26	Módulo Step.....	114
Figura 5.27	Módulo Assembly.....	115
Figura 5.28	Superficies de contacto general generadas entre rodillos y la lámina.....	116
Figura 5.29	Condición de simetría en la lámina y restricción de desplazamiento en rodillos.....	117
Figura 5.30	Malla de la placa.....	118
Figura 5.31	Proceso de análisis del modelo.....	119
Figura 5.32	Monitoreo del proceso de corrida de simulación.....	120
Figura 5.33	Medidas de puntos en la lámina entre la estación de rolado 1 y 2.....	121
Figura 6.1	Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril del acero HSLA grado 50.....	124
Figura 6.2	Gráfica esfuerzo-deformación verdadera del acero HSLA grado 50.....	124
Figura 6.3	Gráfica exponente de endurecimiento por deformación-deformación del acero HSLA grado 50.....	126
Figura 6.4	Perfil de durezas en distintas áreas del perfil tubular de acero HSLA50.....	128
Figura 6.5	Micrografías Acero HSLA 50 a) longitudinal y c) transversal (microscopia óptica a 100x y 500x, reactivo químico Nital al 3%).....	129
Figura 6.6	Caracterización microestructural del perfil tubular obtenido del proceso de laminación no plana (microscopia óptica a 100x, reactivo químico Nital al 2%).....	130
Figura 6.7	a) Secciones superpuestas de rodillos y b) flor del perfil tubular estructural de sección rectangular.....	131
Figura 6.8	Resultado del diagrama flor obtenida mediante medición por FARO <sup>MR</sup> .....	132
Figura 6.9	Diagrama calibrado esfuerzo-deformación del acero HSLA 50.....	134
Figura 6.10	Imagen de la (a) geometría inicial y la (b) geometría final de la pieza de trabajo.....	137
Figura 6.11	Comparación de la energía cinética e interna.....	138
Figura 6.12	Proceso de LNP (a) Estación 1 y (b) entre las últimas tres estaciones 20, 21 y 22.....	139
Figura 6.13	Tipo de elemento utilizado en el modelo de LNP.....	140
Figura 6.14	Imagen de la distribución de esfuerzos de Von en diferentes etapas del proceso de LNP, para una malla de 12x70 element.....	141

Figura 6.15	Geometría obtenida de la malla de 12x70 elementos.....	141
Figura 6.16	Mallado refinado en zonas de flexión.....	142
Figura 6.17	Placa Alargada y refinada, mostrando la geometría final.....	142
Figura 6.18	Defecto de ondulamiento en la geometría final.....	142
Figura 6.19	esfuerzos de Von máximos obtenidos en cada estación del modelo de malla de 12x70 elementos.....	144
Figura 6.20	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 1.....	145
Figura 6.21	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 2.....	146
Figura 6.22	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 3.....	147
Figura 6.23	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 4.....	148
Figura 6.24	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 5.....	149
Figura 6.25	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 6.....	150
Figura 6.26	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 7.....	151
Figura 6.27	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 8.....	152
Figura 6.28	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 9.....	155
Figura 6.29	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 10.....	156
Figura 6.30	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 11.....	157
Figura 6.31	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 12.....	158
Figura 6.32	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 13.....	159
Figura 6.33	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 14.....	160
Figura 6.34	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 15.....	161
Figura 6.35	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 16.....	162
Figura 6.36	Distribución de esfuerzos de Von Mises de la estación 17 y deformación plástica equivalente en la estación 17 y 18.....	163
Figura 6.37	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 19.....	164
Figura 6.38	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 20.....	165
Figura 6.39	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 21.....	166
Figura 6.40	Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 22.....	167
Figura 6.41	esfuerzos de Von máximos obtenidos en cada estación del modelo de malla fina.....	168
Figura 6.42	Diagrama de formación con una malla de 12x70	

	elementos.....	169
Figura 6.43	Diagrama de formación obtenida de ingeniería inversa por medio de CAD.....	169
Figura 6.44	Diagrama de formación con una malla refinada (6963 elementos) en la zonas de flexión.....	170
Figura 6.45	Espesores después del proceso de LNP.....	171
Figura 6.46	Espesores en la pieza final después del proceso de LNP.....	171

## Índice de Tablas

	<b>Página</b>
Tabla 2.1 Parámetros que influyen en la formabilidad de chapas [25]. .....	12
Tabla 2.2 Parámetros de los procesos de chapa [21]. .....	13
Tabla 3.1 Clasificación de aceros utilizados en la industria automotriz [39]. .....	33
Tabla 3.2 Efectos principales de elementos utilizados en los aceros HSLA [39,40] .....	36
Tabla 5.1 Características del material a conformarse .....	102
Tabla 5.2 Variables de interés en el proceso en función de la magnitud. ....	106
Tabla 5.3 Estructura del trabajo experimental .....	107
Tabla 5.4 Factores y sus respectivos valores. ....	108
Tabla 5.5 Condiciones experimentales. ....	108
Tabla 5.6 Características de la máquina de laminación no plana.....	109
Tabla 5.7 Factores y valores fijos del proceso de laminación no plana .....	109
Tabla 5.8. Sistema de unidades utilizada en el modelo de la laminación no plana.....	111
Tabla 6.1 Composición química del acero HSLA grado 50 (% peso). ....	122
Tabla 6.2 Propiedades mecánicas del HSLA grado obtenidas del ensayo de tensión.....	126
Tabla 6.4. Datos calibrados del material Acero HSLA50.....	134
Tabla 6.5 Velocidades de rodillos utilizados en el modelo de simulación. ....	143

## Resumen

El proceso de laminación no plana (LNP) o de formado por rodillos también conocido técnicamente como roloformado, es uno de los procesos de manufactura más utilizados para la fabricación de perfiles estructurales tubulares de diferentes secciones geométricas. Este proceso se trabaja a temperatura ambiente. Los productos que se obtienen por este proceso tienen una gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas industriales, como son la industria de la construcción, en la automotriz, en la aeronáutica, entre otras.

El proceso en resumen consiste en obtener la geometría deseada mediante un doblado continuo a través de rodillos en un determinado número de etapas, los materiales que se conforman por este proceso actualmente son aceros inoxidables, aluminios, aceros de bajo contenido de carbono o cualquier material que cumpla con un grado de formabilidad, ya que se pueden presentar defectos como recuperación elástica, esfuerzos residuales que provocan pandeo, torsión, fractura, entre otros defectos.

El objetivo principal de este proyecto fue desarrollar un modelo de simulación del proceso de LNP para determinar las condiciones de formado de estructuras tubulares de acero de alta resistencia y baja aleación (aceros HSLA) para la industria automotriz mediante elemento finito, utilizando el software ABAQUS™, con el propósito de analizar y predecir la variación de esfuerzos a los que está sometido el material al ser conformado y establecer el diagrama de la flor para obtener la geometría requerida.

Como resultado se obtuvo un modelo tridimensional de la línea de formado en frío de lámina de acero compuesta de 22 estaciones de trabajo, además se desarrolló una metodología de simulación para obtener el diagrama de la flor, que podrá ser utilizado en el estudio de la optimización geométrica del proceso, análisis de deformaciones involucradas y la predicción de recuperación elástica del material.

## **Capítulo 1**

### **Introducción**

La manufactura es una actividad importante desde el punto de vista tecnológico, económico e histórico. Se puede definir a la tecnología como una aplicación de la ciencia que proporciona a la sociedad y a sus miembros aquellos bienes que son necesarios y deseados.

Económicamente la manufactura es un instrumento importante que permite a una nación crear riqueza material. Así mismo la optimización de los procesos de manufactura es vital para cualquier nación que pretenda destacar en el mundo globalizado.

En la actualidad existen diversos procesos de manufactura o conformado de metales, por ejemplo el proceso de embutido, de forja, extrusión, entre otros. Las cualidades principales que requiere un material para ser conformado son la ductilidad y la baja resistencia a la fluencia, de manera que el nivel de esfuerzo que se requiera para deformarlo no sea excesivo.

La temperatura influye notablemente en la respuesta mecánica de los metales, ya que cuanto mayor sea la temperatura de proceso, menor será el esfuerzo de fluencia y mayor será la ductilidad, ya que disminuye el valor del coeficiente de endurecimiento por deformación [1].

El conformado en frío o en caliente se distingue, en función de su temperatura de operación, dependiendo de que la temperatura de trabajo sea inferior o superior a la temperatura de recrystalización, respectivamente, considerándose que un metal ésta se encuentra próxima al 60% de su temperatura de fusión y que depende de factores externos, por ejemplo, el grado de trabajo en frío [2].

Los procesos de conformado en frío han tomado importancia industrialmente, ya que son empleados mundialmente para fabricar productos diversos, por ejemplo: clavos, bisagras, tubos, utensilios de cocina, entre otros. El concepto del conformado en frío comprende todos los métodos de fabricación que permiten deformar plásticamente a temperatura ambiente y ejerciendo una presión elevada, metales o aleaciones tales como acero, cobre, aluminio o latón, pero sin modificar el volumen, el peso o las propiedades esenciales del material [3].

Durante el conformado en frío la materia prima recibe su nueva forma mediante un proceso que consta de diferentes etapas de deformación (pases). De tal manera que se evita que se exceda la capacidad de deformación del material y por lo tanto su rotura; además que proporciona buen acabado superficial [2,4].

El proceso de conformado en frío que se estudia en este trabajo de tesis, es el de laminación o deformación no plana, el cual se describe como un proceso de



conformado mediante rodillos y también es conocido técnicamente como roloformado o doblado de perfiles; es uno de los procesos de manufactura más utilizados en las industrias metalmecánicas para producir una variedad de perfiles anchos y estrechos [5,6].

La industria automotriz en particular ha hecho extensivo el uso del proceso de laminación no plana para producir perfiles estructurales que conforman el cuerpo del automóvil, teniendo como limitantes que es un proceso que no se aplica a todo tipo de materiales y espesores.

El proceso de laminación no plana se considera inflexible debido a que el diseño de la maquinaria se establece dependiendo del material a trabajar y la mayor parte de la información que se utiliza para los cálculos de diseño son empíricos [7,8,9], por lo que se carece de una metodología de diseño de este proceso, aunado a la presencia de defectos geométricos del producto final, como recuperación elástica, esfuerzos residuales que provocan pandeo, torsión y hasta fractura [10,11,12].

Centrando la problemática descrita, el objetivo principal de este trabajo de tesis es el modelado y simulación mediante el método de elemento finito, del proceso de laminación no plana para la fabricación de perfiles tubulares de acero HSLA grado 50, utilizado en la industria automotriz. Se analizan las tensiones desarrolladas durante el proceso y la obtención del patrón de deformación o flor del perfil estructural a conformar en cada pase, con la finalidad de aportar conocimiento útil y estrategias que contribuyan a establecer una metodología de este proceso para su posterior utilización como herramienta de análisis y diseño. Para ello se ha planteado una metodología tanto experimental como numérica.

Los factores analizados para este estudio son: el número de estaciones de la línea y la distancia entre cada estación.

Del objetivo propuesto se establecieron las siguientes tareas:

- Ingeniería inversa para obtener las geometrías del sistema de laminación no plana.
- Ensamble del sistema de laminación no plana.
- Llevar a cabo evaluación microestructural para determinar las principales características microestructurales de los materiales que componen el sistema y el material a conformar.
- Ensayos de tensión para obtener las propiedades del material y las ecuaciones constitutivas, previo al proceso y como producto final.
- Medición de la geometría del conformado de chapa en las estaciones de laminación no plana.
- Desarrollo del modelo numérico para la simulación del proceso de laminación no plana y validación mediante los resultados geométricos experimentales obtenidos.
- Obtención del patrón de deformación o flor
- Análisis de la influencia de la variación de los parámetros del proceso de formado: la distancia entre cada estación y el número de pasos.

La estructura de este trabajo se desarrolla en 8 Capítulos. En su primera parte (Capítulo 2), se basa en los fundamentos teóricos del conformado de metales por deformación plástica ubicando el objeto de estudio en las clasificaciones que se presentan en este apartado, así mismo se describen las propiedades mecánicas de aceros HSLA utilizados en el proceso de laminación no plana, haciendo énfasis en la

utilización de estos aceros en la industria metal-mecánica, específicamente en la automotriz.

En el Capítulo 3 se presenta el estado del arte del proceso de laminación no plana, detallando los parámetros que tienen mayor importancia en el diseño, así mismo los métodos analíticos del desarrollo del diagrama flor, que muestra en forma secuencial el conformado del perfil estructural hasta llegar a la forma deseada, culminando con las limitaciones del proceso y la aportación de este trabajo.

En el Capítulo 4 se describen los métodos numéricos, haciendo hincapié en el método de elemento finito (MEF) en los procesos de conformado, así mismo el análisis de esfuerzos mediante ingeniería asistida por computadora conocido como CAE.

En el Capítulo 5 se detalla el procedimiento experimental, presentando como base el diseño de experimentos de este trabajo, continuando con el detalle de la caracterización el material tanto mecánica como microestructuralmente, terminando con la descripción del desarrollo del modelo numérico y las variables de optimización. Finalmente, en los Capítulo 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos y la discusión de los mismos.

Concluye el cuerpo de la tesis en el Capítulo 8 presentando las conclusiones que se ha llegado en este trabajo y recomendando posibles líneas de investigación para consumarlo. El cuerpo expositivo de la tesis se complementa con la relación de las referencias utilizadas y los anexos que se hacen alusión a los Capítulos descritos, así como también los trabajos publicados.

## **Capítulo 2**

### **Conformado de metales**

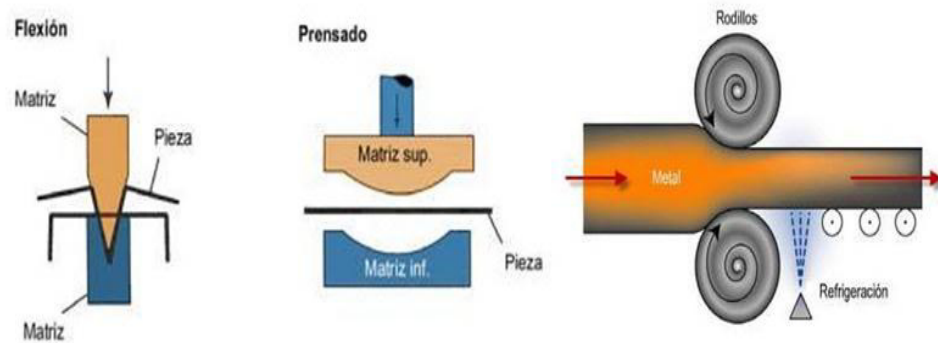
#### **2.1 Introducción.**

Para utilizar los metales es necesario darles una geometría que se adapte al uso que va a tener la pieza por lo que es necesario someterlos a uno o varios procesos de conformado.

Los procesos de conformado son técnicas utilizadas para dar a los objetos una forma o contorno sin añadir o separar materiales. Estos procesos se pueden realizar en caliente o en frío, según sea el espesor del metal y la temperatura adecuada de trabajo.

Los procesos de conformado de metales, en forma simplificada, consisten en la transformación de una parte geométrica simple en una compleja, partiendo de una pieza como lo es una barra o una preforma de hoja, que es plásticamente deformada entre herramientas o dados que ejercen presión sobre el material para obtener la configuración final deseada.

Entre las operaciones de conformado más comunes se encuentran los procesos de flexión, de forja o estampado, prensado, trefilado, extrusión, laminado, troquelado y embutido. En la figura 2.1 se muestra el proceso de flexión, prensado y laminado con los elementos del sistema, las cuales son básicamente los herramientales y la pieza a conformar.



**Figura 2.1 Elementos del sistema en los procesos de flexión, prensado y laminación [13].**

En los procesos de conformado es complicado expresar con relaciones cuantitativas el fenómeno físico, debido a que los parámetros y condiciones del proceso son difíciles de predecir. Frecuentemente se requiere de una secuencia de procesos de conformado para transformar el material sin causar que este falle o se degraden sus propiedades. Un método de análisis en el diseño de secuencia de conformado consiste en establecer las relaciones cinemáticas entre la parte deformada y la no deformada, prediciendo el flujo del metal y estableciendo los límites de conformabilidad [13,14].

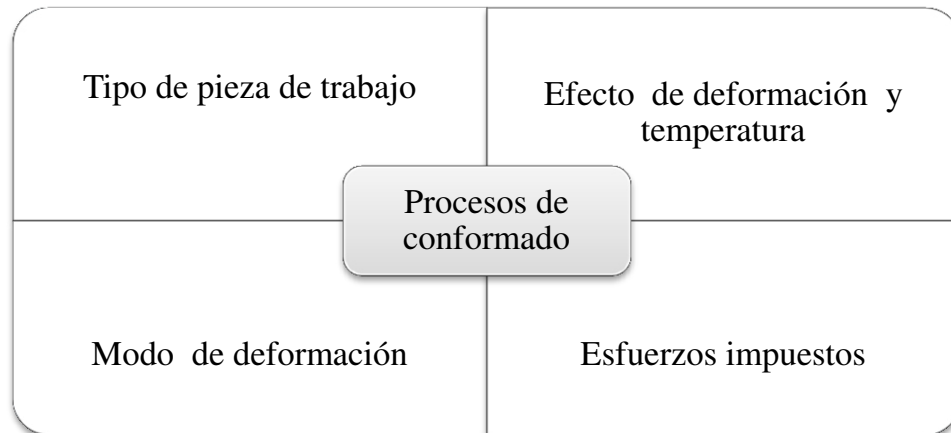
## **2.2 Clasificación general de los procesos de conformado.**

Los procesos de conformado son operaciones en las que el cambio de forma de la pieza de trabajo se realiza sin remoción de material. Existen varios criterios o mecanismos que se han propuesto para clasificar los procesos de conformado de

metales tales como: el endurecimiento por deformación, trabajo en frío o en caliente, procesamiento continuo o alternativo, tipos de esfuerzos involucrados durante el proceso de conformado, cambio del espesor de la pieza, forma de la pieza, tipo de pieza, zona de deformación, entre muchas otras.

A continuación se detallan las principales propuestas de clasificación de los procesos de conformado dadas por autores presentes en la literatura, con la finalidad de ubicar el objeto de estudio, el cual es el proceso de laminación no plana:

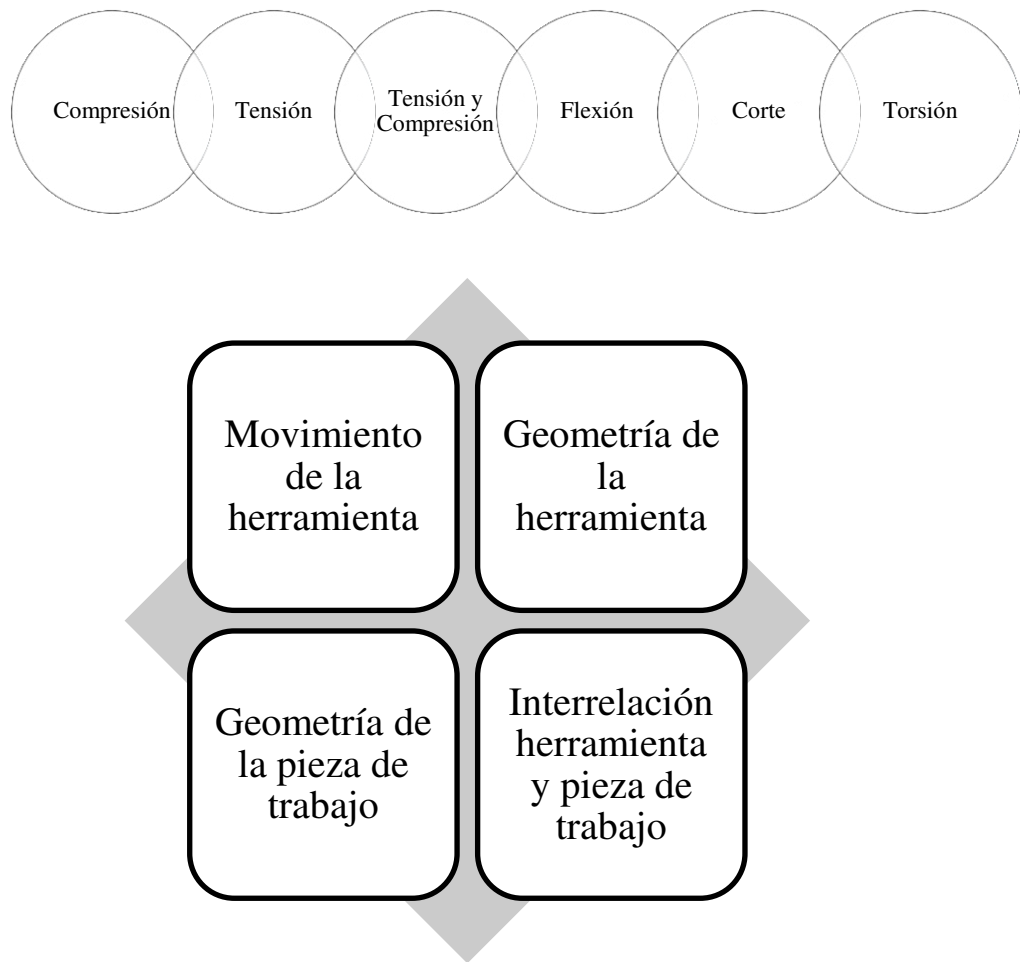
Boulger [15] clasifica los procesos de conformado de la siguiente manera, tomando algunos criterios mencionados anteriormente, (1) de acuerdo con el tipo de pieza de trabajo: procesos de conformado de bloques y procesos de conformado de láminas; (2) por el efecto de deformación y temperatura que influyen en las propiedades mecánicas: trabajo mecánico en frío, trabajo a temperatura intermedia, y trabajo en caliente; (3) por el modo de deformación: estado permanente o conformación continua, estado no permanente o conformación por ciclos y mixta o transitoria; (4) por esfuerzos impuestos durante el proceso de conformado: compresión, tensión, tensión combinada con compresión, flexión, corte y torcido. La clasificación de este autor se muestra en forma resumida en la figura 2.2.



**Figura 2.2 Clasificación de los procesos de conformado propuesto por Boulger [15].**

Por otra parte, Kienzle [16] clasificó los procesos de deformación plástica, basado en el sistema de esfuerzo desarrollados durante el proceso de conformado (figura 2.3) y catalogó seis tipos de esfuerzos diferentes: Compresión, tensión, tensión y compresión, flexión, corte y torsión, además presenta subdivisiones de acuerdo con (1) el movimiento de la herramienta relativa a la pieza de trabajo, (2) la geometría de la herramienta, (3) la geometría de la pieza de trabajo, (4) la interrelación entre herramienta y geometría de la pieza de trabajo.

Otro autor fue Dieter [17], quien propuso clasificar los procesos de deformación de metal en dos categorías: (1) procesos por deformación plástica en donde el volumen y masa del metal son conservados y desplazados de una zona a otra y (2) los procesos de maquinado o de remoción de metal en cual el material es removido con la finalidad de dar la forma final requerida.



**Figura 2.3 Clasificación y subdivisión de Kienzle [16], basado en el sistema de esfuerzos desarrollados durante los procesos de conformado.**

Tomando de base las clasificaciones propuestas por Boulger, Kienzle y Dieter, se resume que los procesos de deformación se clasifican por:

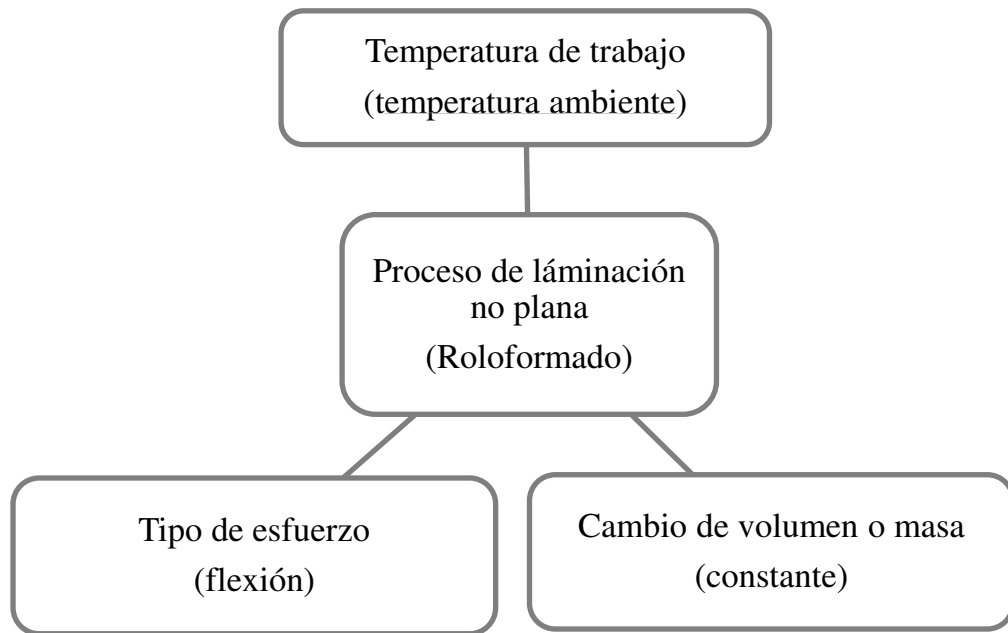
La temperatura de trabajo (que involucre o no un cambio microestructural y de propiedades)

Por el volumen y la masa (permanecen constantes o caso contrario, ya sea por medio de algún tipo de esfuerzo inducido por una herramienta de corte o de formado).

En este trabajo, el proceso de laminación no plana (roloformado) se clasifica por su temperatura de trabajo, por su masa o volumen y por su tipo de esfuerzo, en la figura



2.4 se muestra esta clasificación, en el cual la pieza a conformarse por medio del roloformado, no cambian su volumen o masa durante el proceso, es decir permanece constante. Con respecto a su temperatura, se trabaja a temperatura ambiente y por su tipo de esfuerzo la pieza a conformar está sometida a un doblado continuo o flexión por medio de rodillos contorneadores.



**Figura 2.4 Clasificaciones del procesos de laminación no plana (roloformado).**

### **2.3 Parámetros que influyen en los procesos de conformado.**

Existe una cantidad de parámetros que influyen en los procesos de conformado en frío, siendo principalmente las propiedades de conformabilidad del material, que se define como la capacidad de un material de mantener su integridad conforme se le da forma [18] y se describe en términos de dos deformaciones: una deformación principal, que siempre es positiva y una deformación menor, que podría ser positiva o negativa. La deformación es positiva si el cambio de longitud consiste en alargamiento, y negativa si se trata de acortamiento.

Otro concepto importante es la formabilidad de los metales, que se define como la capacidad para deformarse por un proceso específico de conformado, desde su forma original hasta la pieza final, sin que presente falla en el metal, ya sea por fractura o estricción, así mismo sin presentar defectos tales como grietas, acabados superficiales ásperos, arrugas, entre otros [19,20,25].

Los parámetros que influyen en la formabilidad de una pieza, descritos en el trabajo de Campos [25], se desprenden de diversos factores que interactúan simultáneamente como son: el material, el proceso de conformado, la forma y acabado final deseado.

En la Tabla 2.1 se resumen los parámetros que influyen en la formabilidad de chapas, como son: las propiedades mecánicas, metalúrgicas y químicas, con lo que respecta al material; los parámetros del proceso, en los cuales están principalmente el estado de esfuerzos y deformaciones; y por último el factor de forma, como son el acabado superficial y la localización de las deformaciones.

**Tabla 2.1 Parámetros que influyen en la formabilidad de chapas [25].**

Factor	Parámetro
Material	Propiedades mecánicas Propiedades metalúrgicas Propiedades químicas
Proceso	Estado de esfuerzo Estado de deformación Temperatura Lubricación
Forma y Acabado	Desgarramiento Localización de la deformación Arrugamiento Acabado superficial Recuperación elástica

Por otro lado, Tekkaya [19] menciona de los parámetros generales que se consideran específicamente en los procesos de doblado de chapa, estas parámetros se muestran en la Tabla 2.2. Se observan con mayor exactitud los parámetros involucrados en los procesos de doblado tomando como factores: la geometría de la pieza de trabajo, las características del proceso, el comportamiento del material y la cinemática de deformación.

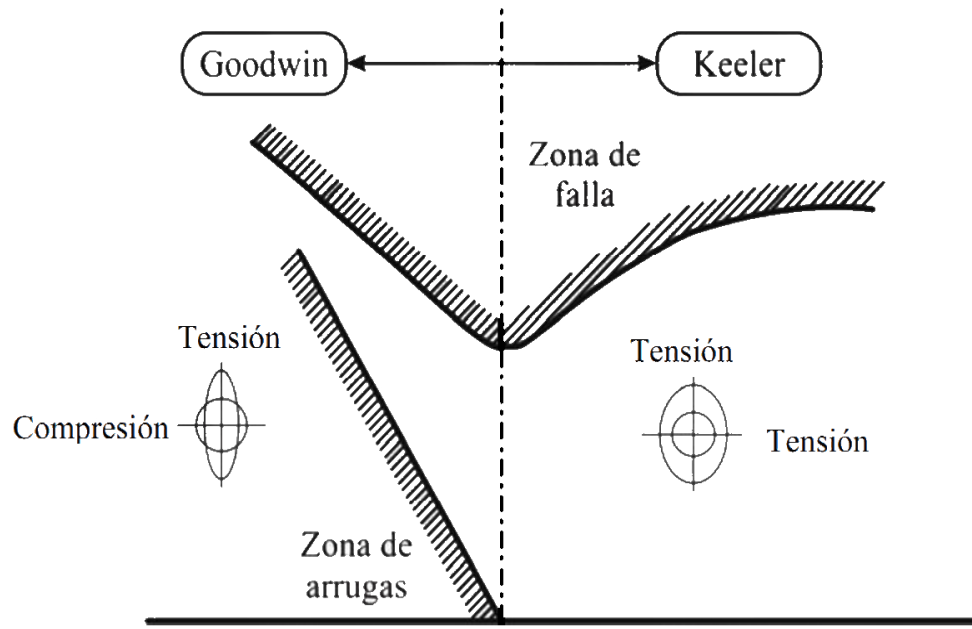
**Tabla 2.2 Parámetros de los procesos de chapa [21].**

Factor	Parámetros
Geometría de la pieza de trabajo	Estructura plana.
Características del proceso	En frío. Fallo de la pieza de trabajo. Recuperación Crítica. Tensiones residuales críticas.
Comportamiento del material	Anisotropía (planar) normal.
Cinemática de deformación	Desplazamientos grandes deformaciones pero moderadas. Inestabilidades (pandeo, arrugas).

Una de las herramientas que involucran estos parámetros mencionados son los diagramas de límite de conformabilidad, conocidos como diagramas FLD (Forming Limit Diagram) y se utilizan para ilustrar las regiones en las que se puede procesar el material, sin poner en peligro su integridad mecánica [23,24]. Estos diagramas constituyen un mapa de deformaciones que muestran el inicio de la estricción localizada para diferentes caminos de deformación. Los diagramas FLD, representan de manera confiable, los límites entre las deformaciones unitarias combinadas que producen inestabilidad y/o fractura.

En la figura 2.5 se muestra los diagramas de límite de conformabilidad que describen la formabilidad de una chapa metálica obtenidos por Keeler y Goodwin, en

el FLD se observa que ambas deformaciones unitarias principales son positivas para el trabajo de Keeler y partiendo de esto Goodwin presenta situaciones donde la mayor deformación unitaria principal en la superficie es positiva o negativa [22,23].



**Figura 2.5 FLD de Keeler y Goodwin para la formabilidad de una chapa metálica [25].**

Los FLD se utilizan en la simulación por elementos finitos del conformado de componentes estructurales para efectos comparativos de calidad de diferentes aceros, así como su utilización como criterio de falla tomando el nombre de diagrama límite de falla.

El cálculo de los índices de formabilidad depende del tipo de simulación de prueba, tomando en cuenta el tipo de criterio de deformación unitaria limitante que se esté utilizando [25]. Por lo que estos límites dependen de los parámetros mecánicos del material, el cual se puede expresar como:

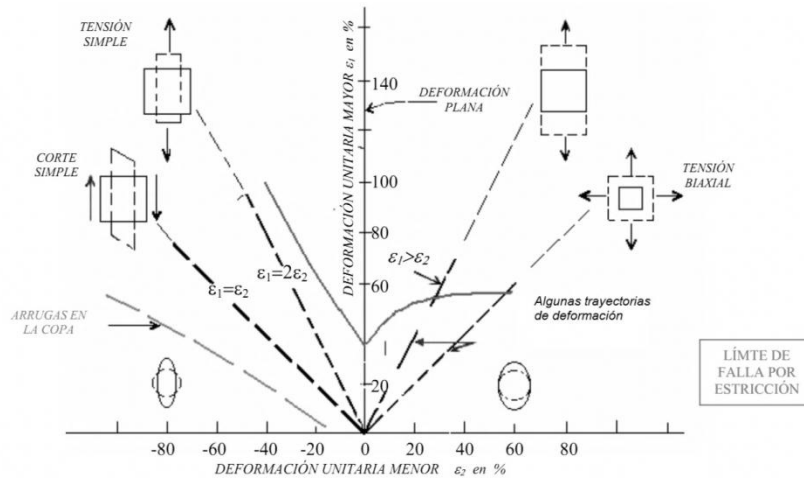
$$F_{kl} = F(n, m, r, \varepsilon_u, f) \quad (2.1)$$

Donde  $n$  es el coeficiente de endurecimiento por deformación,  $m$  es la razón de sensibilidad a la deformación unitaria ( $\varepsilon_u$ ),  $r$  es el coeficiente anisótropo y  $f$  es un coeficiente de no homogeneidad.

El incremento del índice de formabilidad está dado por derivadas que pueden determinarse teórica o experimentalmente para cada uno de los procesos de chapa y se expresa como:

$$dF = \frac{dF}{\partial n} dn + \frac{dF}{\partial m} dm + \frac{dF}{\partial r} dr + \frac{dF}{\partial \varepsilon_u} d\varepsilon_u + \frac{dF}{\partial f} df \quad (2.2)$$

En la figura 2.6 se muestra un FLD con varias trayectorias de deformación unitaria, indicando los límites de fractura y estados de deformación unitaria, así como el límite de aparición de arrugas.



**Figura 2.6 FLD construido por diferentes pruebas de laboratorio [25].**

Los principales factores que influyen en el FLD determinados por Banabic [26] tomando los valores que se determinan en la fractura de las deformaciones unitarias  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$ , la malla deformada, las propiedades del material y el proceso de conformado son:

- Trayectoria de deformación.
- Espesor de la chapa.
- Propiedades mecánicas
- Razón de deformación.
- Tamaño de malla.
- Presión hidrostática.
- Microestructura del material.
- Curvatura del penetrador
- Vibraciones.
- Temperatura.

Tomando en cuenta estos factores, se tiene un grado de confiabilidad para utilizar los FLD para proseguir con los diseños, en el caso de que existan puntos que superen los límites de las curvas se deberán hacer modificaciones de las condiciones de trabajo como son la lubricación, el número de fases, con respecto al diseño de la parte en los filetes, ángulos y radios, por último en el material como es la calidad, el espesor y la dureza.

En el Capítulo 3 se detallan los parámetros que influyen en el proceso de laminación no plana, los cuales están relacionados con los descritos en este Capítulo y con los que se trabajará en la etapa de simulación.

## **2.4 Conformado mecánico por deformación plástica.**

Los procesos de conformado mecánico por deformación plástica son procesos de manufactura utilizados actualmente por la industria, debido a que se consideran la mejor opción para elaborar piezas de distintos tamaños y formas. Además de haber registrado una evolución en el número de procedimientos para conformar los metales con base en el conocimiento del mismo material y del proceso, así mismo ha transcurrido para una variedad de procesos de conformado, involucrando materiales que se pueden trabajar en frío presentando ventajas como son la mejora de las propiedades mecánicas del material a conformar y una buena calidad estética.

### **2.4.1 Plasticidad.**

El fundamento para el análisis del proceso de conformado mecánico es la teoría de la plasticidad, se basa en las observaciones experimentales del comportamiento macroscópico de un sólido plástico, el cual está sometido a esfuerzos combinados [27], es decir que la teoría de la plasticidad es el estudio matemático de esfuerzos y deformaciones unitarias en sólidos deformados plásticamente. Para esto existen varias herramientas tales como la teoría elemental de plasticidad y la teoría técnica de la plasticidad., entre otras.

Mediante la teoría elemental de plasticidad supone que las secciones transversales permanecen planas durante el ciclo de deformación, esto es que la deformación es homogénea. En los procesos de conformado no sucede esto, tendiendo a ser un problema no homogéneo, ya que en diferentes puntos de la pieza tienen diferentes direcciones en el eje del esfuerzo y deformación, por lo que subsecuentemente se

formula una ecuación de modo independiente a la orientación de sistema de coordenadas.

En la teoría técnica de la plasticidad se pueden obtener soluciones aproximadas por medio de varios métodos, como son: el método de los límites superior e inferior, método de viscoplasticidad, método de las cargas residuales y el método de elemento finito.

El método que se utilizará en este trabajo será el método de elemento finito que se detalla en el Capítulo 4, dado que los procesos de conformado pueden ser descritos por medio de ecuaciones diferenciales, cuyas soluciones analíticas son difíciles de obtener, por lo que se opta por hacer suposiciones simplificadas en el estado de esfuerzos y deformaciones que ocurre en el procesos de conformado, esto para evitar estas dificultades matemáticas y poder obtener una solución aproximada con respecto a lo real.

#### **2.4.2 Ecuaciones esfuerzo-deformación.**

Los materiales experimentan cambios dimensionales en respuesta a las fuerzas mecánicas que se generan sobre ellos, estos se denominan deformaciones. Las deformaciones que puede presentar el material son elásticas o plásticas.

Cuando un material es sometido a cargas en el régimen elástico, la estructura atómica no se ve afectada, por lo que al cesar la carga el material vuelve a su estado inicial, esto debido a que no se presenta una disipación de energía interna. En el caso contrario donde el esfuerzo sobre el material rebasa un valor crítico, llamado límite



elástico, la deformación que sufre el material se vuelve permanente, es decir que el material llega a un nivel de carga tal que la estructura atómica empieza a reestructurarse, es decir presenta dislocaciones a una escala atómica, por lo que hay una disipación de energía y por ende el proceso se vuelve irreversible [28].

Los conceptos de esfuerzo y deformación ingenieril, parten de una barra cilíndrica con una área transversal inicial ( $A_o$ ) y una longitud inicial ( $l_o$ ), esta barra es sometida a una fuerza uniaxial hasta alargarse a una longitud denominada  $l$ . Por lo tanto, el esfuerzo ingenieril ( $\sigma$ ) y la deformación unitaria ingenieril ( $\varepsilon$ ) se definen de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (2.3)$$

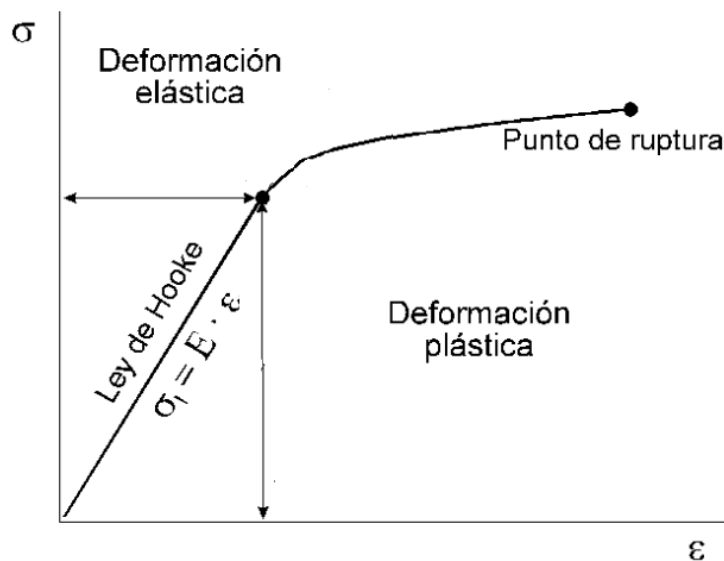
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{l - l_o}{l_o} \quad (2.4)$$

Cuando las elongaciones son pequeñas se encuentra que el esfuerzo es proporcional a la deformación a la relación de esfuerzo entre deformación se le denomina módulo de Young o módulo de elasticidad ( $E$ ), así mismo presenta una relación lineal que se representa por la ley de Hooke mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.5)$$

Cuando el comportamiento del esfuerzo y la deformación unitaria ya no se apega a la ley de Hooke el comportamiento pasa de elástico a plástico, es decir que al cesar la fuerza o carga de la muestra sobrepasa el límite elástico, por lo que el material ya no regresa a su longitud inicial.

El comportamiento elástico y plástico está representado mediante la curva esfuerzo-deformación que se muestra en la figura 2.7.



**Figura 2.7 Curva esfuerzo deformación.**

El esfuerzo y la deformación ingenieril que se describieron mediante las ecuaciones (2.3) y (2.4) no toman en cuenta que el área transversal de la muestra está cambiando durante la prueba, por lo que al tomar el área en cada instante ( $A_i$ ) en la que se le aplica cada carga, se puede representar mediante las siguientes ecuaciones, que se renombran como esfuerzo real ( $\sigma_r$ ) y deformación real ( $\epsilon_r$ ), respectivamente.

$$\sigma_r = \frac{F}{A_i} \quad (2.6)$$

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \left( \frac{l}{l_0} \right) \quad (2.7)$$

Es deformación de la ecuación (2.4) también se puede representar de la siguiente forma:

$$\epsilon = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (2.8)$$

Por lo tanto se puede decir:

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.9)$$

Igualmente para el esfuerzo,

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{1 + \varepsilon} \quad (2.10)$$

Para muchos metales, la relación entre el esfuerzo y la deformación plástica se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

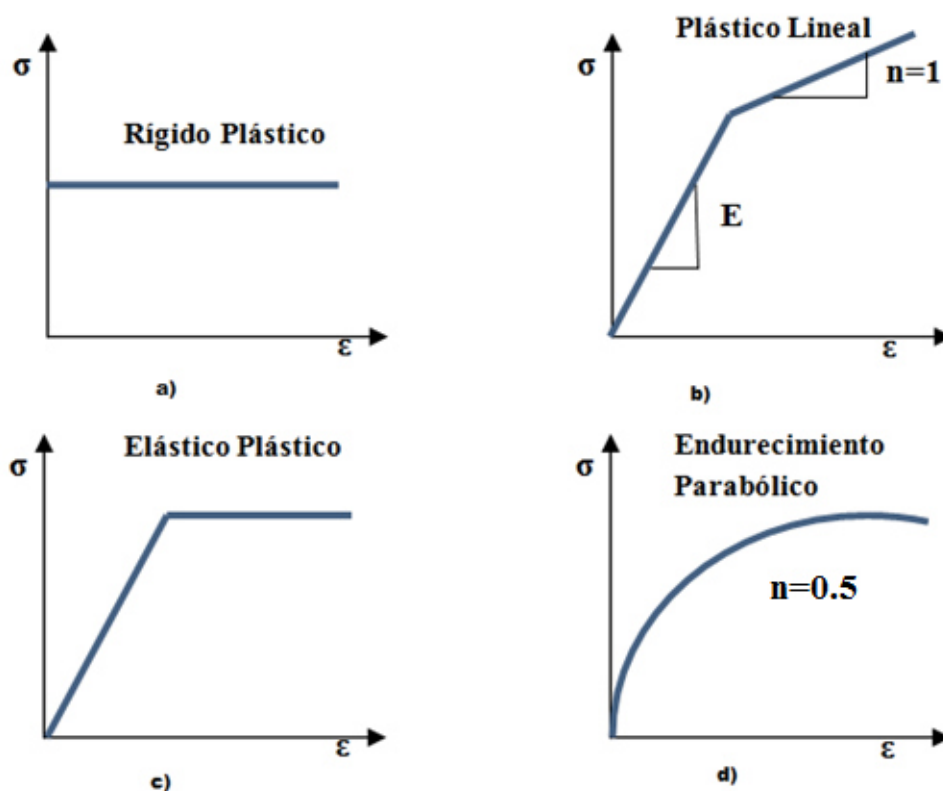
$$\sigma_r = K \varepsilon_r^n \quad (2.11)$$

En la que  $K$  representa el esfuerzo para una deformación natural igual a uno y se le denomina coeficiente de resistencia,  $n$  es conocido como coeficiente de endurecimiento por deformación y es numéricamente igual a la deformación uniforme. La ecuación 2.11 tiene aplicaciones en la evaluación de la formabilidad, a través del coeficiente de endurecimiento por deformación, a esta expresión se conoce la ecuación de Hollomon y es una de las expresiones más utilizadas para predecir el comportamiento plástico de metales dúctiles [29].

El coeficiente de endurecimiento por deformación es el que determina el comportamiento después de la cedencia. Cuando  $n$  es igual a cero se dice que se tiene un material plástico ideal, porque no endurece por deformación. Los valores de  $n=0.1$  y  $0.5$  definen un tipo de comportamiento llamado flujo ideal [30].

Las curvas de flujo ideales más comunes se muestran en la figura 2.8; en la figura 2.8.a se muestra el modelo rígido-plástico, en el cual no existe un endurecimiento por

deformación, ni región elástica, este tipo de modelo se puede utilizar como referencia para describir los efectos de una región elástica. En la figura 2.8.b se muestra un modelo que presenta endurecimiento por deformación lineal, mientras que en la figura 2.8.c se muestra un modelo elástico-plástico, que representa un material sin endurecimiento por deformación, este modelo puede usarse para estimaciones bastas de la recuperación, pero con una región elástica, por último en la figura 2.8.d representa un modelo de endurecimiento parabólico, el cual representa el comportamiento de un material sin una región elástica pero con un endurecimiento por deformación, este modelo es útil cuando los efectos elásticos carecen de importancia, un caso sería en la predicción de fuerzas del proceso[31].



**Figura 2.8 Diagrama de esfuerzo-deformación (a) Modelo Rígido Plástico, (b) Modelo Plástico lineal, (c) Modelo Elástico Plástico y (d) Modelo de Endurecimiento Parabólico.**

### 2.4.3 Criterios de cedencia.

Los criterios de cedencia son de gran importancia práctica, ya que permiten estimar cuándo un material comienza a deformarse plásticamente, y es la manera de calcular si existe cedencia bajo un estado combinado de esfuerzos. Existen dos criterios de cedencia principales: el criterio de Tresca y el criterio de Von Mises [30].

El criterio de Tresca, establece que la deformación plástica iniciará cuando el máximo esfuerzo cortante rebase un valor crítico ( $k$ ). Para un estado cualquiera de esfuerzos, el esfuerzo cortante máximo está dado por la diferencia entre el esfuerzo principal máximo y el mínimo, y está dado por:

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = k \quad (2.12)$$

Para encontrar el valor de  $k$  se aplica el criterio para el caso de tensión uniaxial, en el que el esfuerzo máximo es:

$$\sigma_1 = \sigma_0 \quad (2.13)$$

Los otros esfuerzos principales valen

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.14)$$

Entonces:

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_0}{2} = k \quad (2.15)$$

Por lo tanto el criterio de Tresca es:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (2.16)$$

Por otro lado el criterio de Von Mises establece que la cedencia inicia cuando el valor del esfuerzo efectivo sea mayor que un valor critico dado por  $k^2$ . El esfuerzo efectivo es el segundo invariante del esfuerzo del tensor de esfuerzos y está dado por:

$$\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.17)$$

De nuevo  $k$  es evaluada a partir del caso de tensión uniaxial, donde los esfuerzos principales son:

$$\sigma_1 = \sigma_0 \quad (2.18)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.19)$$

$$\sigma_0 = (3)^{1/2} k \quad (2.20)$$

Lo que hace que el criterio de Von Mises sea:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.21)$$

El criterio de Tresca es el más utilizado para el análisis y diseño de estructuras por ser más sencillo y por predecir que los esfuerzos que producen cedencia son menores, lo que da margen de seguridad adicional. El criterio de Von Mises, es más

exacto y tiene la ventaja de que no requiere el cálculo de esfuerzos principales, se usa la ecuación general.

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (2.22)$$

La interpretación física de los criterios de cedencia es que experimentalmente se ha demostrado que la deformación plástica es resultado de los esfuerzos cortantes, por lo tanto la cedencia iniciará en aquellas orientaciones donde el esfuerzo cortante sea el más alto y alcance el valor crítico para iniciar la deformación. Esto justifica el criterio de Tresca. Hencky, por otra parte, calculó la energía de distorsión en un material deformado y encontró que es proporcional al valor del esfuerzo efectivo, por lo que el criterio de Von Mises es válido si se considera que para iniciar la deformación plástica se debe suministrar un valor crítico de energía [30].

El criterio de Von Mises es más exacto que el criterio de Tresca, pero resulta más complicado, por otro lado la ventaja del criterio de Tresca es que predice que la cedencia ocurrirá antes de lo que realmente ocurre y esto da un margen de seguridad.

Los criterios de cedencia son de gran importancia práctica ya que permiten determinar cuando un material comienza a deformarse plásticamente, a partir de un dato que es  $\sigma_0$ , o bien determinar el valor de  $\sigma_0$  para que exista cedencia. Básicamente se tienen dos casos:

En el diseño para determinar los esfuerzos máximos permisibles y seleccionar el material para que no exista deformación plástica y así evitar que la pieza se distorsione y funcione de manera incorrecta, provocando incluso la falla.

En los procesos de conformado, tales como laminación o forja, extrusión, troquelado, etc., los criterios de cedencia se aplican para determinar las cargas de conformado y seleccionar las combinaciones más eficaces de esfuerzos.

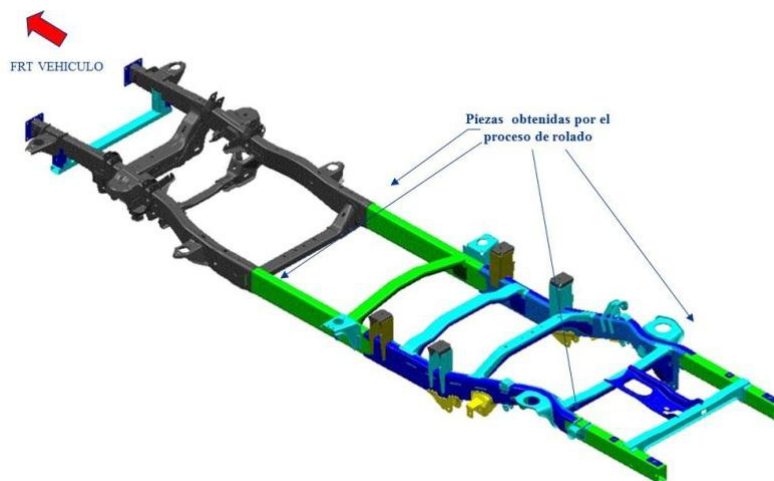


## Capítulo 3

### Proceso de laminación no plana

#### 3.1 Introducción.

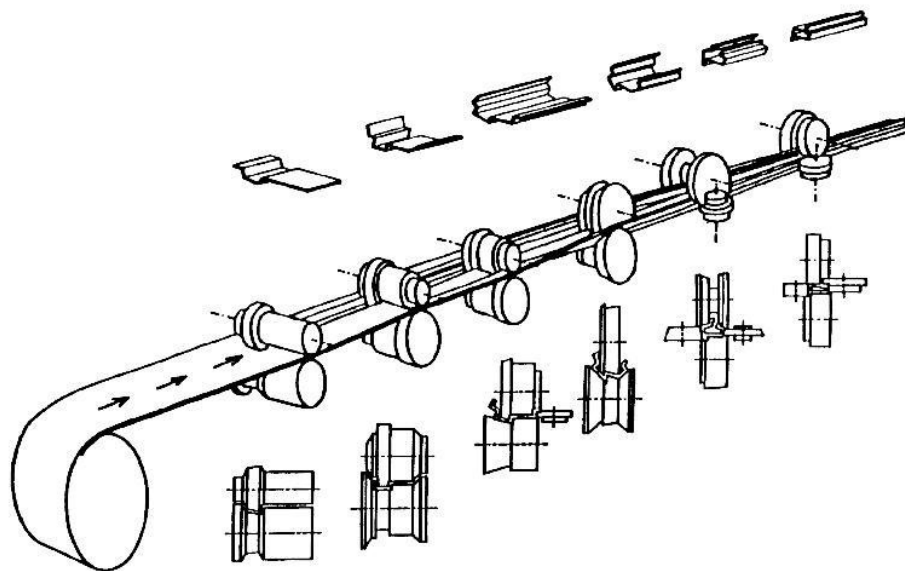
En este Capítulo se detalla el proceso de laminación no plana, la clasificación de las máquinas que componen este sistema, así como también los parámetros involucrados. Este proceso es utilizado actualmente para producir estructuras o perfiles tubulares, una de las áreas de aplicación de este proceso es en la manufactura de partes automotrices, en el que se centra este estudio. En la figura 3.1 se ilustran partes del cuerpo del automóvil que se fabrican mediante el proceso de laminación no plana, la mayoría de estas partes están fabricadas con aceros de baja aleación y alta resistencia o también conocidos como aceros HSLA.



**Figura 3.1** Aplicación de partes obtenidas mediante el proceso de laminación no plana en la estructura del automóvil. (Cortesía de Metalsa)

El proceso de laminación no plana se define como una operación de dobleces continuos en los cuales una lámina larga de metal es pasada a lo largo de un conjunto de rodillos consecutivos; cada uno realizando una parte incremental del doblez total, esto hasta obtener el perfil deseado [32,33]. Este proceso es conocido en las industrias de conformado de metales como un proceso de roloformado<sup>1</sup>, ya que cuenta con estaciones equipadas con rodillos de formado o contorneado; este proceso es una variante del proceso de laminación plana.

En la figura 3.2 se ilustra el esquema del proceso, donde se observa la dirección de la lámina y la forma que adquiere en cada estación hasta obtener el perfil estructural.



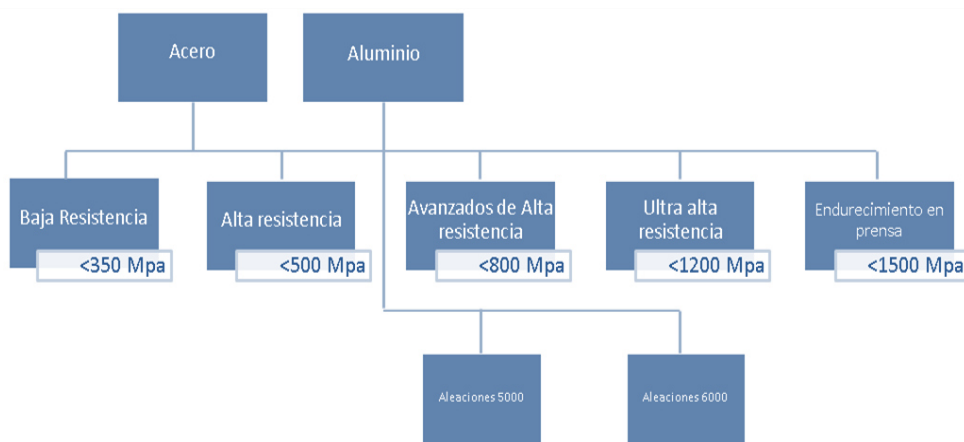
**Figura 3.2 Esquema del proceso de laminación no plana [34].**

<sup>1</sup> Existe una gran variedad de traducciones del inglés al español para este proceso, partiendo del concepto *Roll forming*, ya que en la literatura en español se puede encontrar como proceso de formado por rodillos, proceso de formas estructurales, de perfilado, laminación de perfiles estructurales y en la industria se concreta a un proceso de roloformado. En este trabajo al realizar una clasificación de los procesos de conformado se concluye que es una variante del proceso de laminación plana a diferencia a que no se obtiene un cambio de espesor, ni de longitudes, sino de forma; por lo que se denominó como un proceso de laminación no plana.

### 3.2 Materiales utilizados en el proceso de laminación no plana.

Los materiales que se pueden trabajar mediante el proceso de laminación no plana son aquellos que resistan la flexión hasta obtener el radio deseado; cualquier material ferroso y no ferroso, aleaciones e inclusive hojas metálicas de acero, acero inoxidable, cobre, entre otros tipos de materiales se pueden trabajar mediante el proceso de laminación no plana a temperatura ambiente. Algunos materiales como aleaciones de titanio, tienen pobres propiedades de formabilidad a temperatura ambiente, sin embargo estos tipos de materiales podrían calentarse y entonces conformarse en máquinas roladoras o laminadores diseñadas especialmente para este tipo de materiales [35].

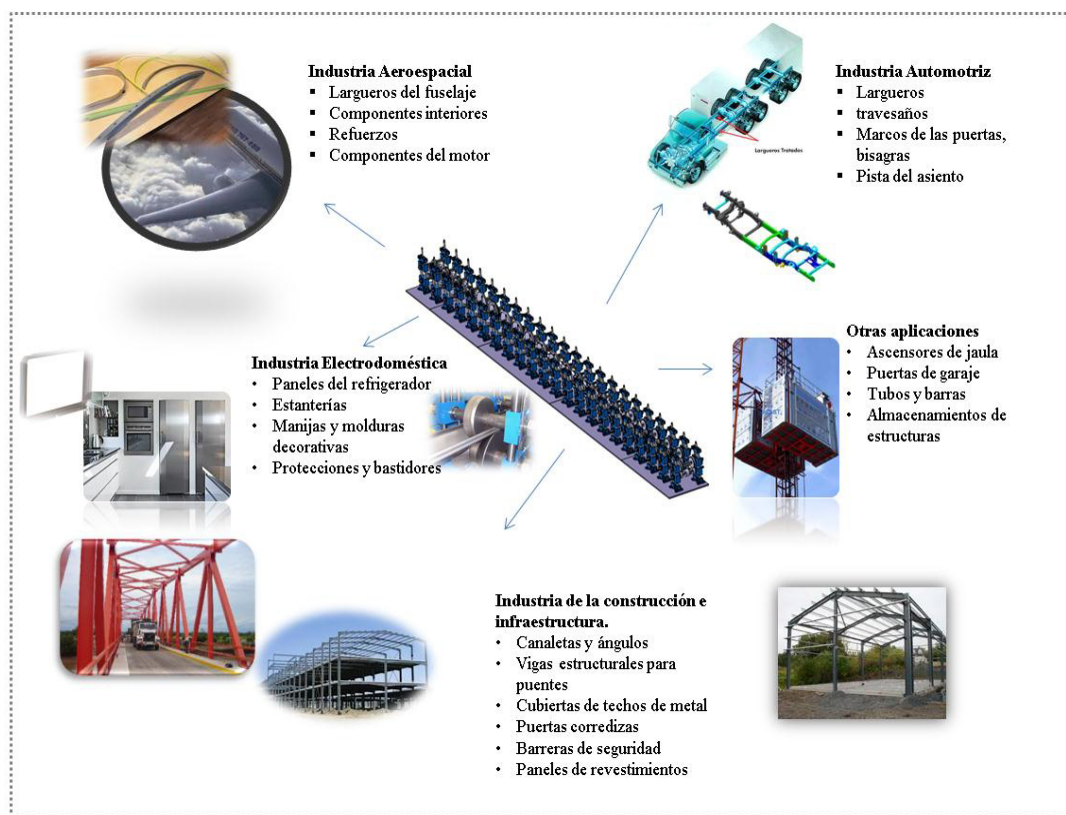
En la figura 3.3 se muestra los tipos de materiales utilizados en el proceso de laminación no plana en la actualidad. Como se observa, el aluminio y el acero son los materiales más utilizados en mismo, ya que este tipo de materiales son utilizados ampliamente en industrias metal-mecánicas para la fabricación de perfiles estructurales.



**Figura 3.3 Materiales utilizados en el proceso de laminación no plana para componentes automotrices.**

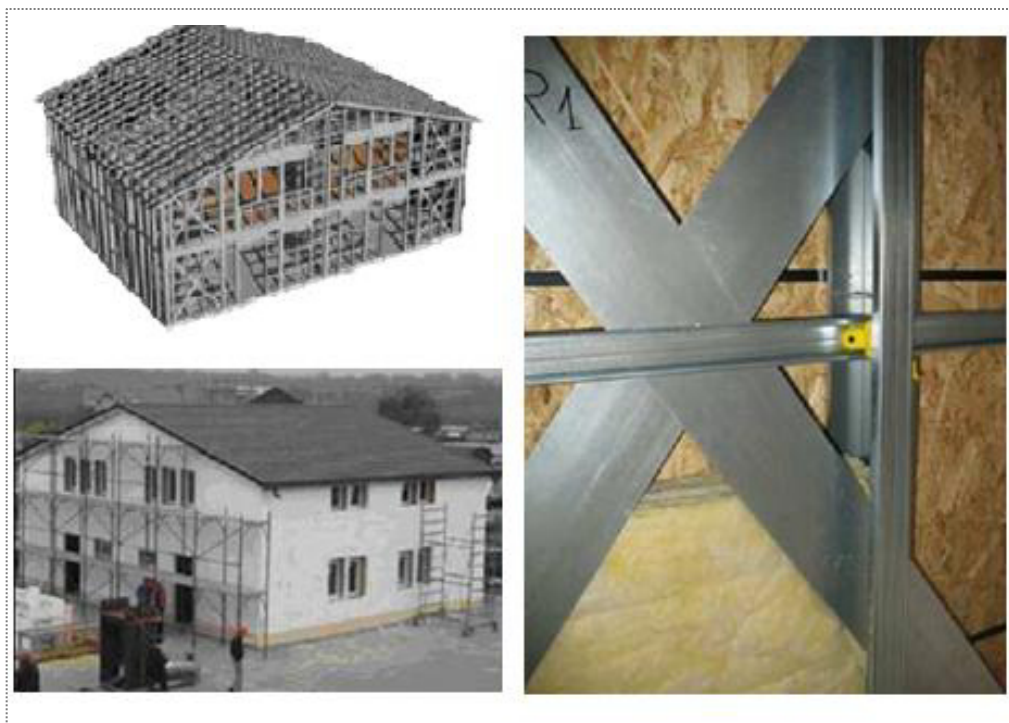
### 3.2.1 Aplicaciones de los productos de la laminación no plana.

La laminación no plana es un proceso de conformado o de fabricación, el cual es usado en diversas industrias, ya que produce una variedad de formas y productos, así mismo añade tanto fuerza y rigidez a los materiales ligeros. Las industrias que utilizan productos rolados a temperatura ambiente son: la aeroespacial, automotriz, construcción, electrodomésticos, infraestructura, entre otras [36]. Las aplicaciones de los productos obtenidos del proceso de laminación no plana se ejemplifican en la figura 3.4.



**Figura 3.4** Aplicaciones de productos por industria obtenidos por el proceso de laminación no plana.

En la figura 3.5 se muestra una aplicación en la industria de la construcción de productos de aceros de alta y ultra resistencia obtenidos mediante la laminación no plana. Actualmente se construyen casas llamadas “Casa Buna” en Rumania, su estructura se compone de elementos prefabricados de perfiles estructurales de acero ligero, lo que garantiza la construcción fácil, rápida. Además, la Casa Buna es extremadamente eficiente de energía y cumple con los estándares para los edificios de bajo consumo.



**Figura 3.5 Aplicaciones de perfiles estructurales de acero de alta resistencia en casas tipo “Casa Buna” en Rumania [37].**

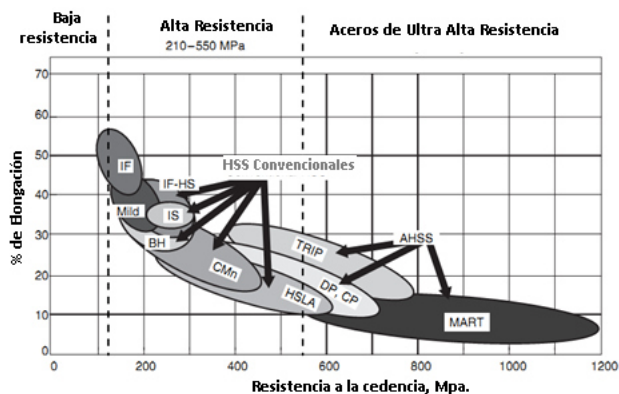
Con lo que respecta a las industrias más importante económicamente de nuestro país, se encuentra la industria automotriz, la cual está centrada en producir componentes automotrices mediante diferentes procesos de manufactura, incorporando nuevos materiales, los cuales deben cumplir con propiedades como resistencia al impacto y a la fatiga, ya que se utilizan en la fabricación de partes automotrices como largueros, travesaños, refuerzos, brazos de suspensión, entre otros. Estos componentes

son partes importantes del cuerpo del automóvil debido a que contribuyen a la seguridad de los pasajeros en el caso de colisión. Por lo que este trabajo se enfoca a esta industria y como objeto de estudio es un perfil estructural tubular que se utiliza como larguero central del cuerpo del automóvil ilustrado en la figura 3.1

### 3.2.2 Clasificaciones y propiedades de aceros para aplicaciones automotrices.

La SAE (Society of Automotive Engineers) y la AISI (American Iron and Steel Institute) y los representantes de la industria automotriz establecieron una clasificación para los aceros en base a las propiedades mecánicas, principalmente está basado en los niveles de resistencia que son requeridos en la industria automotriz, es decir donde se requiere aceros con resistencia a la cedencia y tensión mayores que los aceros al carbono.

En función a su resistencia a la tracción se clasifican en: aceros de baja resistencia, aceros de alta resistencia y aceros de ultra alta resistencia, como se puede ver en el esquema presentado en la figura 3.6. En la Tabla 3.1 se proporcionan los tipos de acero que forman cada uno de los grupos de esta clasificación.



**Figura 3.6 Esquema de aceros de alta resistencia comparado con aceros de baja aleación y de ultra alta resistencia [38].**

Tabla 3.1 Clasificación de aceros utilizados en la industria automotriz [39].

Clasificación	Sub clasificación	Tipo de Acero	Acero	Límite Elástico (MPa)
Baja resistencia		Aceros convencionales de conformación en frío		<230
		Aceros convencionales laminados en caliente y decapados		<250
Alta resistencia	Convencionales	Aceros de alta resistencia HSS (High Strength Steel)	Endurecibles por hornado. (Bake Hardening - BH)	160-300
			Refosforado (RP)	>220
		Aceros de alta resistencia y baja aleación HSLA (High Strength Low Alloy)	Aceros (IF)	>220
			Microaleado (HSLA)	>350
	Avanzados	Aceros avanzados de alta resistencia AHSS (Advanced High Strength Steel)	Doble Fase (Dual Phase DP)	500-600
		Aceros de muy alta resistencia VHSS (Very High Strength Steel)	Plasticidad inducida por transformación (Transformation Induced Plasticity TRIP)	600-8100
		Aceros de extra alta resistencia EHSS (Extra High Strength steel)	Fase compleja (CP)	800-1000
Ultra alta resistencia		Aceros de ultra alta resistencia UHSS-THLE (Ultra High Strength Steel)	Martensítico (MS)	1000-1300
		Aceros Ultraresistentes de baja aleación UHSLA (Ultra High Strength Low Alloy)	Acero al boro (Bor) (USIBOR)	>1250

Actualmente existe la tendencia de utilizar aceros que proporcionen mayor rigidez a las estructuras y mayor resistencia a las deformaciones, principalmente a los componentes exteriores del automóvil. Este tipo de aceros son los de alto límite elástico o alta resistencia. Por otro lado están los aceros de alta resistencia y baja aleación, que resultan económicos respecto a los aceros aleados convencionalmente al contener cantidades menores de los costosos elementos de aleación. La principal diferencia entre un acero al carbono convencional y un acero de alta resistencia es el límite elástico y la resistencia a la tracción.

Los aceros convencionales tienen una resistencia a la tracción de hasta 210 MPa, mientras que los aceros de alta resistencia están entre el intervalo de 210 a 550 MPa y los aceros que superan los 550 MPa se les denomina aceros de ultra alta resistencia.

En el presente trabajo de tesis sólo se hará énfasis en los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA).

### **3.2.3 Aceros HSLA en el proceso de laminación no plana.**

Los aceros HSLA (High Strength Low Alloy), conocidos comúnmente como aceros de alto límite elástico o alta resistencia se utilizan en todos los sectores industriales y en muchas partes del mundo. Desde la década de los años 60 los aceros HSLA se han utilizado en tuberías de gran diámetro para gas y petróleo y se expandió su aplicación en industrias de la construcción y transporte por ser requisito la alta resistencia en comparación con un acero al carbono tratado térmicamente, combinada con la buena tenacidad y soldabilidad.



Los aceros HSLA son excelentes para la conformación en frío, así como su resistencia a la rotura por fragilidad a bajas temperatura, han permitido encontrar soluciones económicas para numerosas piezas automotrices, que requieren una reducción de peso, espesor y volumen. Estos aceros poseen elementos aleantes como cromo, níquel, molibdeno y en algunos casos se añade vanadio, que proporcionan resistencia a la abrasión, al desgaste, a la corrosión y oxidación, también se adicionan cantidades de niobio y titanio para obtener elevados límites elásticos. En la Tabla 3.2 se muestran los principales efectos de los elementos en los aceros HSLA.

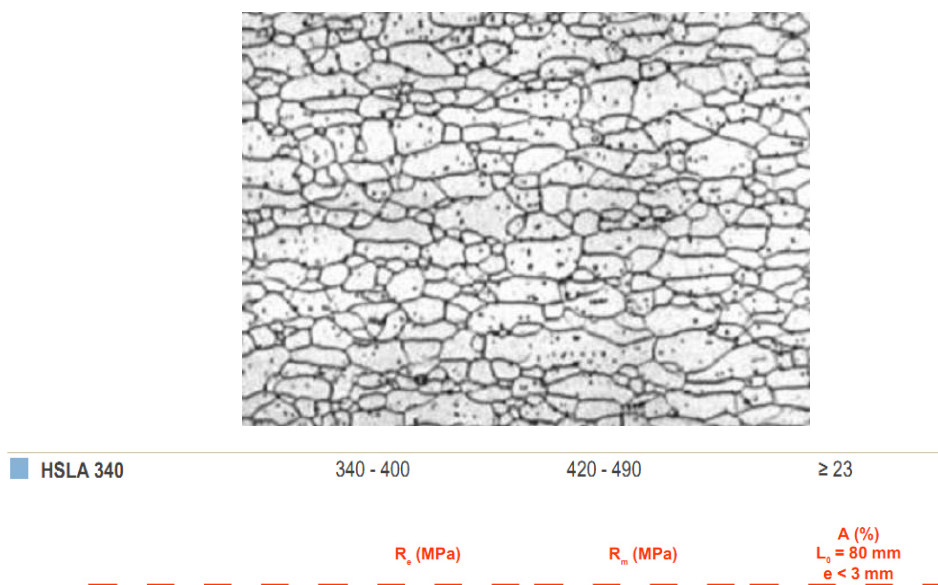
Los aceros HSLA que comúnmente son usados son los microaleados ferrítico-perlítico con pequeñas adiciones de elementos formadores de carburos o carbonitruros como niobio, vanadio, o titanio para endurecimiento por precipitación y refinamiento de grano. Los aceros de ferrita acicular, son aceros de bajo carbono, con excelente soldabilidad, formabilidad, tenacidad y esfuerzo de cedencia cercano a 690 MPa. También se encuentran los aceros perlíticos en su condición de laminado, aceros doble fase que tienen una estructura martensítica dispersa en una matriz de ferrita proporcionando ductilidad y alta resistencia a la tensión, aceros con inclusiones de forma controlada y aceros resistentes a agrietamiento inducido por hidrogeno.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación no se consideran aceros de aleación en el sentido normal, ya que están diseñados para cumplir con determinadas propiedades mecánicas en lugar de una composición química. La resistencia de este tipo de aceros se logra mediante la composición química y procesamiento especial, particularmente un tratamiento termomecánico.

**Tabla 3.2 Efectos principales de elementos utilizados en los  
aceros HSLA [39, 40]**

<b>Elemento</b>	<b>Efecto</b>
<b>Cromo</b>	Mejora la resistencia, dureza, resistencia al desgaste y dureza en caliente. Mejora significativamente las propiedades de resistencia a la corrosión. Incrementa la templabilidad.
<b>Níquel</b>	Mejora la resistencia y tenacidad, incrementa la templabilidad, pero no tanto como los otros elementos de aleación en el acero. En cantidades significantes mejora la resistencia a la corrosión.
<b>Molibdeno</b>	Aumenta la tenacidad, la dureza en caliente y la resistencia a la termofluencia. También mejora la templabilidad y forma carburos para resistencia al desgaste.
<b>Vanadio</b>	Presenta mayor solubilidad a las temperaturas de tratamiento termomecánico. Precipita en forma de carburos, nitruros o carbonitruros. En los aceros HSLA estabiliza los granos de austenita, proporciona ferrita en tamaño de grano fino, estabilización de ferrita y formación de ferrita intergranular.
<b>Niobio</b>	Es capaz de formar carbonitruros que endurecen por precipitación en el acero. Proporciona un incremento en la dureza, estabilización de granos en la fase austenita, ferrita con tamaño de grano fino, precipitación austenita y ferrita.
<b>Titanio</b>	Este elemento puede formar óxidos, sulfuros, nitruros y carburos. Proporciona precipitación de austenita y estabilización de granos y precipitación de ferrita, obteniendo grano fino.
<b>Aluminio</b>	Se emplea en pequeñas cantidades, actúa como desoxidante para el acero fundido y produce acero de grano fino. Precipita en forma de nitruros y controla el grano austenítico.

Los aceros HSLA pueden presentar fenómenos de zona de meseta de transición entre el rango elástico y el rango plástico, la mayoría de las industrias acereras toman en cuenta exclusivamente el nivel inferior de las variaciones de la resistencia elástica en la zona de la meseta. En la figura 3.7 se muestra la microestructura de un acero HSLA laminado en caliente y las propiedades mecánicas de una chapa de acero HSLA sin revestir laminada en frío. Para el acero HSLA 340 se toma en cuenta para su designación el nivel inferior del límite de resistencia elástico.



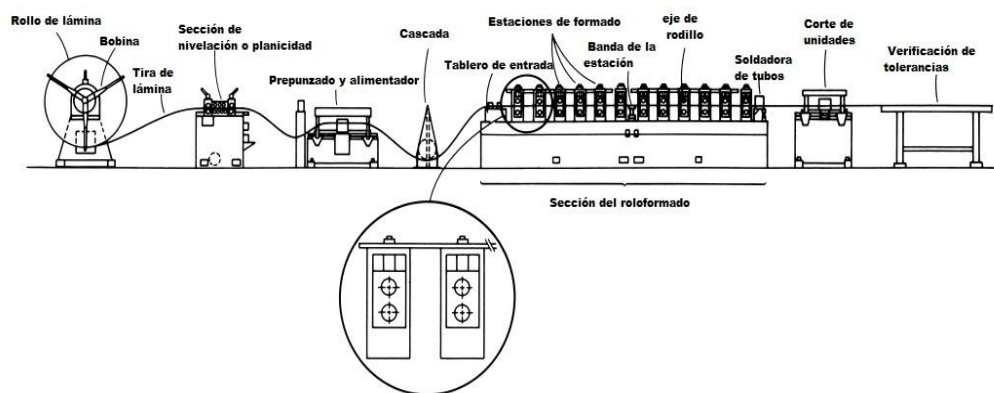
**Figura 3.7 Microestructura de un acero HSLA 340. Composición Química 0.080 % C, 0.50Mn, 0.04Si [41].**

El acero HSLA se utiliza actualmente en el proceso de laminación no plana ya que provee mejores propiedades mecánicas que los aceros ordinarios, propiedades de conformabilidad y soldabilidad, además de que se reduce peso sin perder resistencia. En el Capítulo 5 se detalla el procedimiento experimental que se siguió para caracterizar mecánica y metalúrgicamente el acero HSLA50 de este trabajo, con el objetivo de obtener los datos con los que se alimenta el modelo computacional y entender el comportamiento del material en el proceso de laminación no plana.

### 3.3 Clasificación de los procesos de laminación no plana.

El proceso de laminación no plana se clasifica en dos categorías: pre-corte y pos-corte; en el primero se utilizan longitudes pre-cortadas de la lámina a conformar, así como también un sistema de apilamiento y de alimentación para mover los espacios entre cada lámina hasta la máquina, en este proceso se utiliza una velocidad fija de los rodillos aproximadamente de 15 a 75 m/min, al final de la línea se encuentra un transportador de salida y un sistema de almacenamiento, esto hace que el proceso sea relativamente económico.

Por otra parte, en el proceso de pos-corte que se ilustra en la figura 3.8, es un proceso en el cual el corte de las piezas se realiza después del formado, la ventaja de este proceso es que se incorporan otros procesos, como de unión o perforado, lo cual resulta en la producción de un producto final en menor tiempo de espera, es decir es un proceso continuo y por ende una reducción de costos.



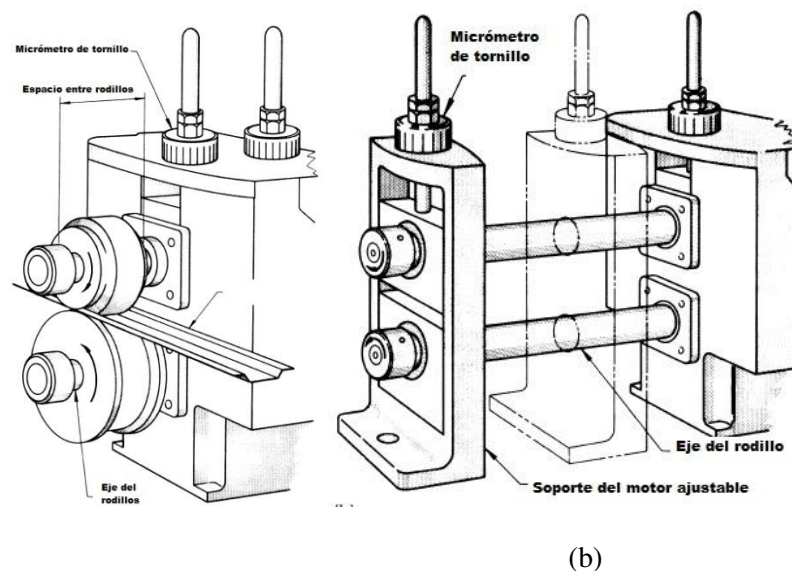
**Figura 3.8 Proceso pos-corte [5].**

Este trabajo se enfocará al estudio del proceso de laminación no plana pos-corte que se detalla en los siguientes Capítulos.

### 3.3.1 Equipos del proceso de laminación no plana.

Los equipos del proceso de laminación no plana se constituyen principalmente de un conjunto de rodillos, a este conjunto se le llama casete, que tiene un doble eje que permite el giro de los rodillos. La clasificación se asigna de acuerdo al eje de apoyo, a la configuración de la estación y al sistema de transmisión.

Un caso son los equipos apoyados en el eje y se clasifican de acuerdo al método por el que los ejes son colocados en la unidad. Los equipos tipo interior como se muestran en la figura 3.9.b, tienen ejes apoyado de 25 a 38 mm de diámetro y hasta 102 mm de longitud colocados en cada uno de los extremos de los rodillos, mientras que las máquinas tipo exterior tienen carcasas de apoyo en los dos extremos de los ejes como se ilustra en la figura 3.9.a. La carcasa exterior permite ajustar el largo de los ejes, acortando la distancia entre los apoyos para dar cabida al formado de partes pequeñas del material.



**Figura 3.9 Tipos de equipos del proceso de laminación no plana. (a) Máquina tipo exterior, (b) Máquina tipo interior [5].**

Para la configuración de las estaciones se tiene el tipo sencillo o de un solo funcionamiento el cual está diseñado para hacer un solo tipo de modelo de perfil y los rodillos no están impuestos a cambio. Esta configuración de estaciones se utiliza generalmente para una larga producción y su costo es bajo en comparación con otros equipos. Otra configuración es la convencional, en ella los soportes laterales se pueden quitar fácilmente, esto facilita el cambio de rodillos, por lo que son convenientes para una variedad de producción, así mismo se combina con la clasificación del tipo de eje.

La línea del proceso de laminación no plana puede estar compuesta por otro equipo auxiliar como son las bobinas, el equipo de soldadura, guías de entra y salida entre las estaciones de rolado, equipos de enderezamiento, equipo de corte, entre otros por lo que lo hace un proceso competitivo.

### **3.4 Elementos del proceso de laminación no plana.**

El proceso de laminación no plana constituye uno de los procesos más importantes en la industria metal-mecánica debido a que atribuye una rentabilidad económica a bajo costo, esto es a la producción masiva que se obtiene con este proceso.

Los atributos relevantes del proceso de laminación no plana son los siguientes:

- La flexión se lleva a cabo en el rodillo que va formando la pieza; el espesor del material no se modifica excepto por un ligero adelgazamiento en el radio de curvatura.
- El proceso es adecuado para la producción en grandes cantidades y longitudes.
- Implica una manipulación mínima del material

- Se combinan otros procesos fácilmente, tal como ranurado, estampado y métodos de unión, como soldadura.

El principal elemento del proceso de laminación no plana son los rodillos de trabajo los cuales tienen un movimiento giratorio y llevan a cabo el movimiento de avance de la lámina como se ilustra en la figura 3.10.

Sin embargo, existen variables del proceso que se deben tomar en cuenta para profundizar en el conocimiento del proceso y del comportamiento de los elementos involucrados, como son la lámina y los rodillos de trabajo; esto contribuirá a establecer bases científicas y tecnológicas, ya que como lo señalan Bui [43] y Abad [44], el diseño del proceso es basado en reglas empíricas y heurísticas, las cuales no son aceptadas universalmente, ya que el proceso de diseño es subjetivo, debido a que en la práctica se utiliza el método de prueba y error lo cual requiere una inversión de tiempo y material.



**Figura 3.10 Movimientos principales del proceso de laminación no plana.**

Bajo tales circunstancias, la simulación numérica es una alternativa que permite reducir tiempo en el diseño del proceso para el desarrollo de nuevos productos.

#### **3.4.1 Parámetros del proceso de la laminación no plana.**

Los parámetros del proceso de formado tienen un rol fundamental en la calidad del producto final que se obtiene mediante este proceso. Una configuración óptima de estos parámetros en el proceso de la laminación no plana, tendrá como resultado un producto con dimensiones exactas y sin presentar defecto alguno.

Los principales parámetros del proceso de laminación no plana son: la potencia requerida la velocidad de formado, la lubricación, el diseño de los rodillos y la distancia entre ellos.

Con respecto a la potencia requerida, depende de la pérdida de torsión a través de la unidad de engranaje y la fricción entre el material y los rodillos, ya que el material se está formando. Generalmente los rangos son de 10-50 hp o entre 50 a 125 hp, dependiendo del tamaño de la máquina. Otro parámetro importante es la velocidad de formado, que está en un rango de 0.5 a 245 m/min, el rango de velocidad utilizada en la industria está entre 20 y 70 m/min [45].

Otro factor importante es la lubricación la cual evita la captación de metales por los rodillos, el sobrecalentamiento de estos y del metal de trabajo. Los lubricantes que se utilizan para el proceso de rolado son los aceites solubles, al utilizar lubricante ayuda al incremento de la eficiencia del proceso, previniendo el desgaste de los herramientas.



Con respecto al diseño de los rodillos, es un parámetro importante ya que establecen el número de pases requeridos para producir la forma sin especificar tolerancias. Además de anticipar el flujo de material a través de los herramentales. Al diseñar los rodillos se deben tomar en cuenta diversos factores como son: la sección final, la orientación de la sección, el material, otras operaciones involucradas y el equipo.

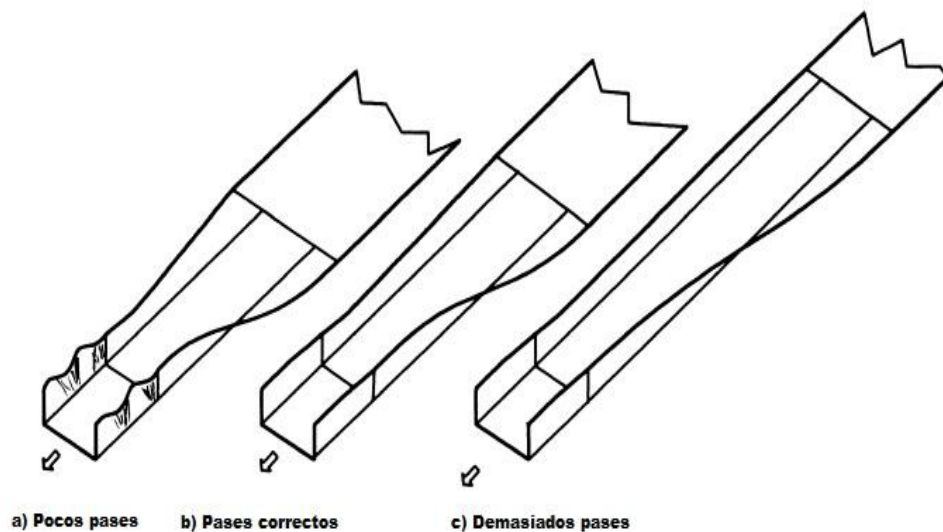
En este trabajo se toman los factores de la sección final del perfil, el material y el equipo, Esto es debido a la premisa a que contribuye al cálculo del número de pases y con esto poder establecer una metodología de diseño. A continuación se explican estos factores y su relación con el número de pases:

Sección final del perfil: La cantidad de cambios de la forma debe ser restringido a fin de que las curvas necesarias se puedan formar sin alargar el material. La complejidad de la forma es determinada de acuerdo al número de curvas y el total de grados a la que debe formarse la pieza, esto se traduce con el número de pases requeridos para obtener la sección final del perfil.

Material: Mínimos y máximos espesores, desviación en propiedades mecánicas y composición afectan el número de pases para obtener los resultados deseados en forma.

Equipo: La posición de los herramentales, es decir la distancia entre cada estación de rodillos, el espacio entre el rodillo superior, inferior o laterales y la lubricación, tienen una relación con respecto al número de pases y la calidad del producto final.

El objetivo de la optimización del proceso de laminación no plana es formar la sección del perfil requerida repetidamente dentro de las tolerancias especificadas, con la menor cantidad de pases incrementales, Halmos [46] señala que esta disminución de pases trae como consecuencia distorsiones y pérdida de tolerancias; para demasiados pases aumentaría el costo del proceso, los defectos por la cantidad de pases se muestra en la figura 3.11. Así mismo, industrialmente las compañías toman la decisión de invertir en líneas con mayor número de pases para evitar problemas con el producto final, basándose en la poca literatura técnica y científica disponible, aunado a que todo el equipo de laminación no plana es extranjero, por lo cual se presentan otros costos relacionados con mantenimientos o introducción de un nuevo material o de un producto.



**Figura 3.11 La menor cantidad de pases forma un producto de menor calidad y una mayor cantidad de pases aumenta el costo del proceso.**

Paralikas et al. [47], Proponen una metodología de optimización estadística mediante un análisis de valores medios (ANOM) que se muestra en la figura 3.12, con el objetivo de encontrar valores óptimos del proceso de laminación no plana para producir productos de calidad, en el cual los factores que involucrados son: la

velocidad de la línea, la distancia entre estaciones de rolado, la distancia entre rodillos (superior e inferior) y el diámetro de los rodillos.

Los valores obtenidos fueron calculados por deformaciones elásticas longitudinales mínimas y deformaciones cortantes en el borde de la lámina, determinando una reducción entre rangos del 20 al 35% con respecto a las deformaciones elásticas longitudinales y de un 30 a 50% de reducción en deformaciones cortantes ocurridas en cada estación de rolado con mayores ángulos de plegado. Se muestra que el factor que tiene un impacto en el proceso es la distancia entre cada estación, cabe señalar que los resultados obtenidos fueron por cada estación de rolado por separado.

Por otro lado Bui y Phonthot [48] realizaron una simulación numérica mediante elemento finito en 3D del proceso de laminación no plana, mostrando resultados de las deformaciones longitudinales y las trayectorias de los desplazamientos los cuales compararon con resultados experimentales validados por Damm[49] y modelado numéricamente por Heislitz et al.[50] y Hong et al.[51], tomando en cuenta las propiedades elasto-plásticas del material a conformar, la distancia horizontal entre estaciones, la fricción entre rodillo-lámina y la velocidad de rotación de rodillos.

Como resultado, muestran que la velocidad de formado y la fricción entre la interfase del rodillo y la lámina no son factores que impacten en el proceso, como se muestra en la figura 3.13 con respecto a la influencia de la fricción en la formación del perfil estructural.

En este mismo trabajo, determinaron que un factor de impacto en la calidad del producto son las propiedades del material, principalmente lo determina el límite elástico y el coeficiente de endurecimiento.

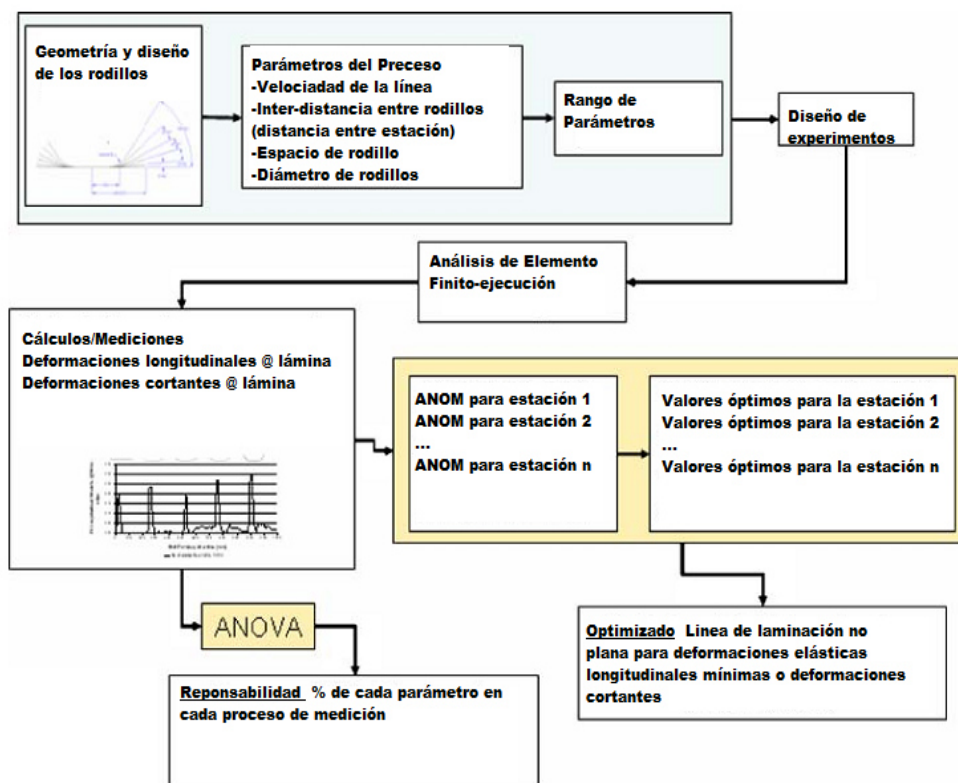
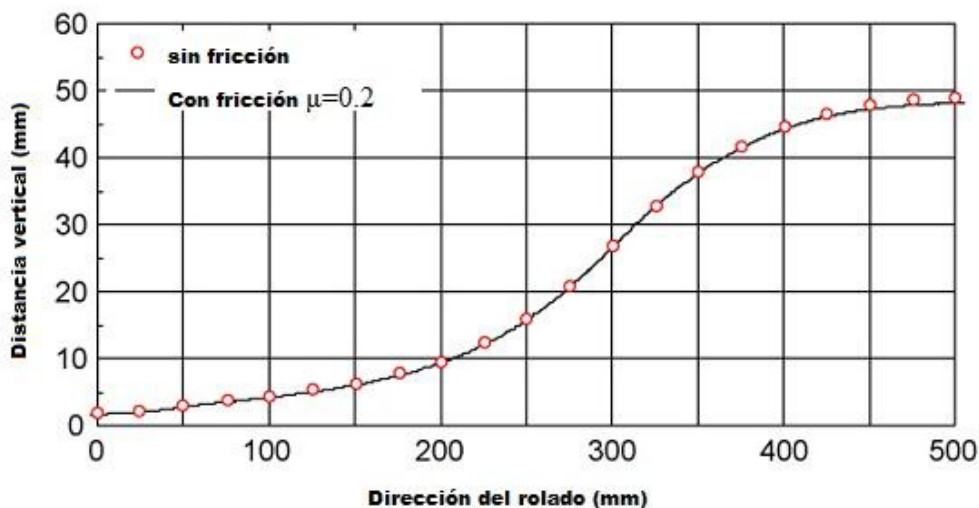


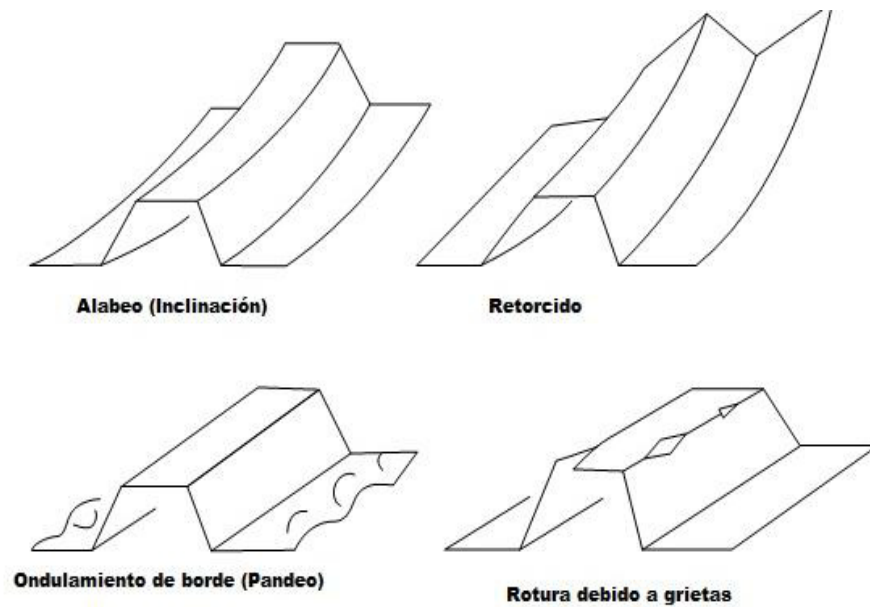
Figura 3.12 Metodología de optimización de una línea de laminación no plana propuesta por Paralikas, 2010 [47].



**Figura 3.13 Influencia insignificante de la fricción en la formación del perfil estructural obtenida por Bui y Phontot, 2008 [48].**

### 3.4.2 Defectos en los productos por laminación no plana.

Existen diferentes defectos que se pueden presentar en el perfil estructural conformado mediante el proceso de laminación no plana, como se ilustra en la figura 3.14, uno de ellos es el defecto de ondulación en el perfil estructural, el cual está asociado a la deformación plástica que ocurre en los bordes del perfil; como una solución a este problema se propone el uso de un material con bajo endurecimiento por trabajo, que ha acumulado menos deformaciones plásticas y se caracteriza por un valor más grande de coeficiente de endurecimiento, y que contribuye a reducir esta desviación de ondulamiento, mientras que el límite elástico del material permanece sin cambios. Esto se consigue mediante la reducción de deformaciones plásticas en la zona de bordes sobre todo en las últimas estaciones del rolado.



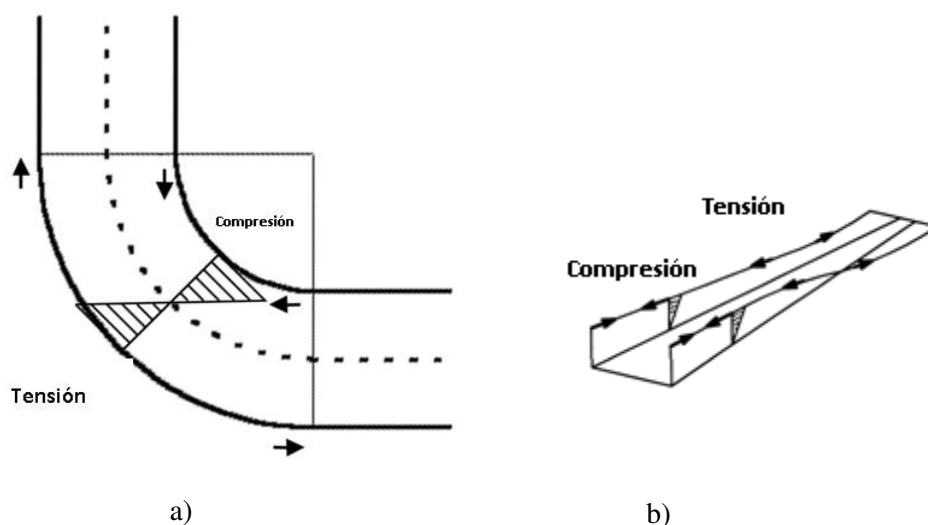
**Figura 3.14 Defectos presentados en perfiles estructurales (Halmos, 2005).**

Estos tipos de defectos y características de calidad presentes en los perfiles tubulares obtenidos mediante el proceso de laminación no plana son principalmente afectados por varios tipos de deformaciones que son elongaciones transversales y flexiones, elongaciones longitudinales y flexiones, así como cizalla en el plano de la tira y en la dirección del espesor.

No solo existen deformaciones indeseables por el doblado del perfil en la sección transversal, otras son caracterizadas por deformaciones redundantes y son responsables de la existencia de los defectos durante un proceso de laminación no plana.

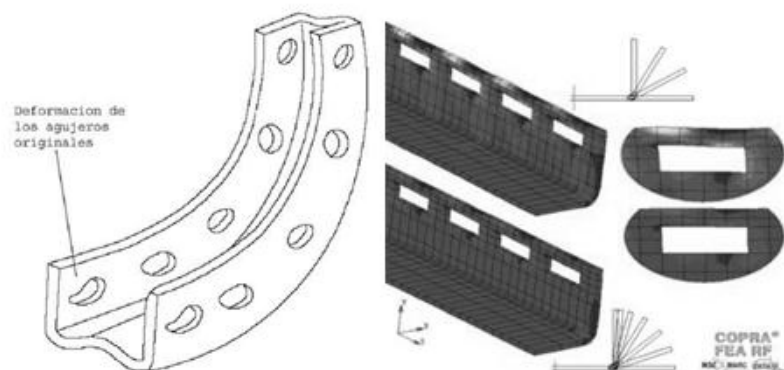
Esto es debido a que el proceso de laminación no plana está basada en deformaciones permanentes a las líneas de doblado del perfil estructural, es decir, fuera de las líneas de doblado están tensionadas y dentro se comprimen como se ilustra en la figura 3.15.

Si el material no está sobre tensionado por el límite elástico, podría presentarse una recuperación elástica. Por lo tanto, se presentan problemas en el doblado de radios mayores al espesor de la lámina, ya que no puede ser alcanzada una deformación permanente. Esto se debe a que el límite elástico de los materiales no es el mismo a tracción que a compresión, los materiales tienen mayor límite elástico a compresión que a tracción, provocando una deformación plástica mayor al lado de fuera que tenga tracción que el de adentro, el cual sufre compresión, provocando recuperación elástica.



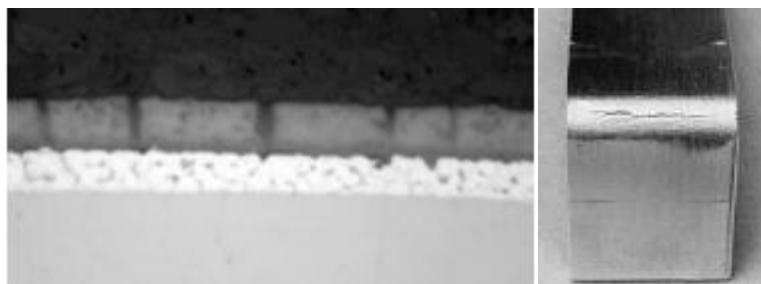
**Figura 3.15 (a) Distribución de esfuerzos y deformaciones de una sección flexionada y (b) en un perfil tubular estructural.**

Otros defectos son provocados por procesos de manufactura previos como son ranurados o perforaciones, provocando distorsiones en los radios de curvaturas en los perfiles estructurales como se ilustra en la figura 3.16, esto es debido a la magnitud y no uniformidad de distribuciones transversales de las deformaciones longitudinales, responsables de que se presenten estas deformaciones redundantes y por ende la aparición de distorsiones en el perfil estructural.



**Figura 3.16 Distorsión de agujeros en perfil curvado y deformación de perforación rectangular en conformado de tres etapas y seis etapas. (Cupra <sup>TM</sup>)**

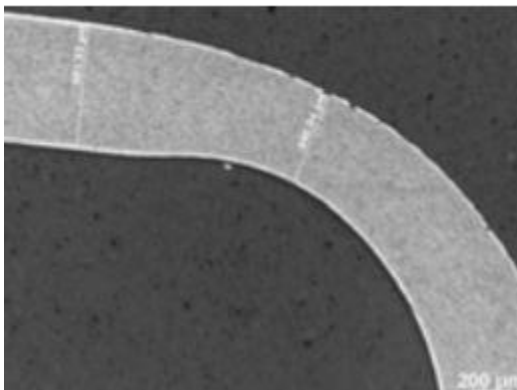
También se llegan a presentar grietas como se muestra en la figura 3.17, derivadas al radio de doblado y la relación superior o inferior con el espesor esto debido a que se presenta una elongación transversal de tensión en las esquinas y deformaciones en la dirección del espesor.



**Figura 3.17 Sección transversal de un perfil estructural con agrietamiento, obtenido por laminación no plana [52].**

Así mismo en la figura 3.18 se presentan defectos geométricos, como la disminución del espesor en los radios de doblado y que deriva en otros defectos como el agrietamiento y posteriormente fractura.



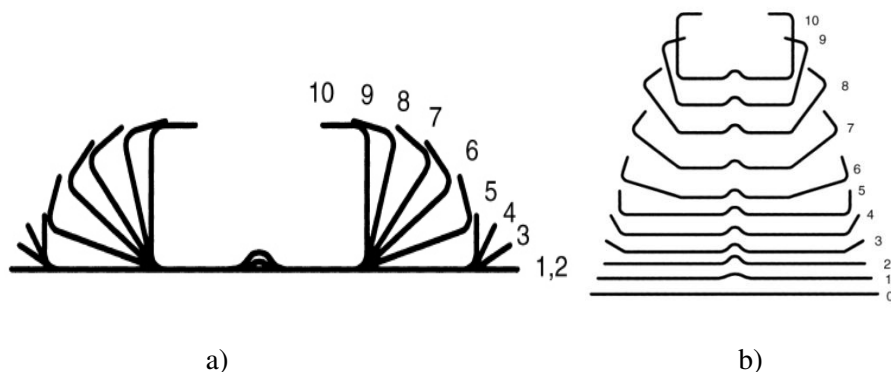


**Figura 3.18 Sección transversal de un perfil estructural con agrietamiento, obtenido por laminación no plana [52].**

Estos defectos se pueden minimizar o eliminar especificando el número apropiado de pases de formación, así mismo la posición de los rodillos y el diseño del perfil que se discuten en este trabajo.

### **3.5 Métodos para el diseño de la flor.**

El diagrama de formación o *flor*, es una herramienta importante para visualizar y proveer el flujo del material a través de los rodillos de trabajo. Este diagrama es el dibujo de la secuencia de dobleces que se superponen el uno al otro, en la figura 3.19 se muestra un diagrama flor de un perfil tipo C, donde se muestra en la figura 3.19a la línea del pase uno, separado para cada línea de pase subsecuente hasta obtener la forma final y en la figura 3.19b muestra las líneas de pase real o agrupado de los pases para una mejor visualización. La generación del diagrama flor es la base para el diseño del juego de rodillos y es el paso donde la planeación del proceso es completado.



**Figura 3.19 Flor patrón que muestra las deformación en cada pase del proceso [53].**

El diseño del diagrama flor parte del perfil estructural que se desea obtener mediante el proceso de laminación no plana, es por la razón que no existe una metodología para el diseño de la flor para establecer un número estándar en cuestión a los pasos de formado, debido a que depende de varios parámetros, principalmente las propiedades mecánicas del material y el espesor.

Lange et al. [54] señalan otros parámetros importantes que se consideran en un proceso de doblado como son la calidad superficial, la precisión geométrica después del doblado, la recuperación y la deformación de aristas, ya que el diagrama flor del proceso de laminación no plana representa cómo se va dando el doblado o flexión de la chapa en cada paso del proceso, es por eso que se deben estudiar las teorías de doblado para poder adaptarlo a este proceso y poder establecer la metodología de diseño.

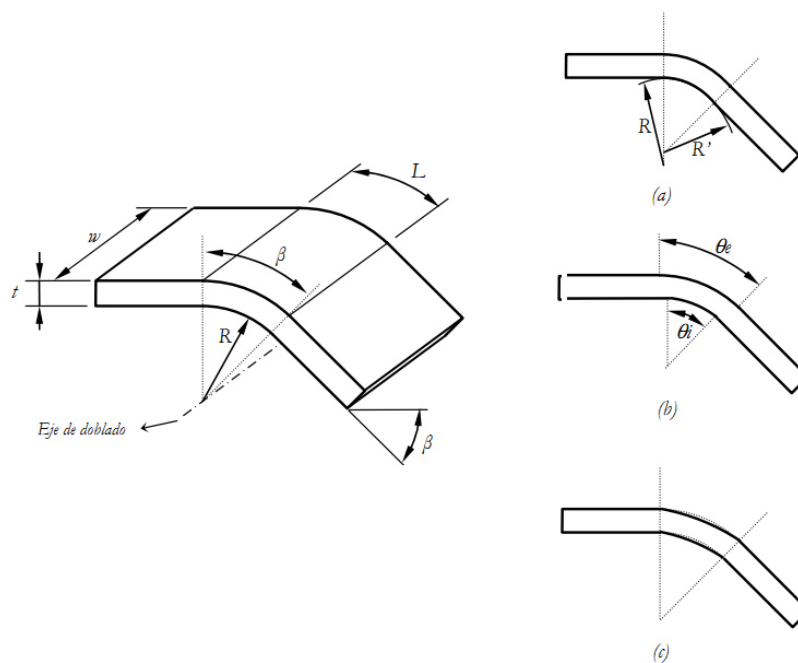
Kalpajian[55] y Beddoes[56] coinciden en tres parámetros con respecto al doblado de una chapa, estos parámetros son: el radio de doblado mínimo, el ángulo de recuperación y la fuerza de doblado. Estos parámetros son importantes para el diseño de la flor como medio de establecer la cantidad de pasos que se requieren hasta obtener

la forma geométrica deseada del perfil a conformar mediante el proceso de laminación no plana.

### **3.5.1 Parámetros del doblado y la relación con el diseño del diagrama flor.**

Como se mencionó en el punto anterior, el diagrama flor es una representación gráfica de dobleces de la placa o chapa a conformar, esto está relacionado con las teorías de doblado ya que el objetivo de esta operación es crear una superficie curvada o cilíndrica conectada a dos superficies planas, como se muestra en la figura 3.20a, la cual representa una geometría idealizada obtenida mediante un proceso de doblado. En esta representación los parámetros considerados son: el espesor ( $t$ ), el ancho de la chapa ( $w$ ), la longitud del arco doblado ( $L$ ), radio de doblado en la cara interior ( $R$ ), y ángulo de doblado final ( $\beta$ ).

Cabe mencionar que pueden existir doblados no ideales, es decir, la zona de flexión o de doblado puede tener una curvatura no constante u obtener diferentes ángulos de doblado tanto en las caras interiores o exteriores de la chapa, así como también se puede generar una pérdida de tangencia en las línea de doblado como se puede observar en la figura 3.20b.



**Figura 3.20 (a) Representación de una chapa doblada ideal y (b) representación de doblados no ideales; caso 1: curvatura no constante, caso 2 distinto ángulo de doblado en cara exterior e interior y caso 3: pérdida de tangencia en las líneas de doblado [31].**

### 3.5.1.1 Radio de doblado mínimo y ratio $R/t$ mínimo.

Se han llevado a cabo estudios para establecer una relación entre el radio mínimo  $R$  y el espesor del material  $t$ , esto dado que durante el proceso de doblado la chapa se somete a un momento flexor hasta que se produce deformaciones plásticas en el metal, es decir que cuando la chapa está sometida a flexión las caras exteriores del material están en tracción, mientras que las caras interiores están en compresión, como se comentó en el punto 3.4.2 esto puede llegar a traer defectos, esto debido a que si la chapa con un radio de flexión mucho más alto en relación con el espesor, presentará una tendencia considerable a volver a su posición original, esto debido a que cuanto más alto sea la relación de  $R/t$ , más alta será la proporción de esfuerzo residual elástico.

El radio de doblado mínimo es aquel radio en el cual una grieta aparece en la superficie exterior de doblado, este se puede determinar de manera experimental y está disponible en manuales en forma de Tabla como características de chapa, o en su caso en la misma ficha técnica de la chapa. El radio de doblado mínimo puede estar expresado en función a su grosor o espesor ( $t$ ), como por ejemplo  $2t$ ,  $3t$ ,  $4t$ ..., por otro lado, la recuperación elástica depende de la relación  $R/t$ , y ésta se ve influenciada por la dureza y la microestructura del material, pero no por el periodo de carga; otros parámetros influyen en el fenómeno, principalmente el ángulo de doblado. Rossi et al. [57] señalan que cuando aumenta el ángulo de recuperación elástica, aumenta la fuerza de rendimiento del material y la relación  $R/t$ , así mismo observó en 5 casos de estudios que al aumentar el límite elástico del material, aumentaba la recuperación elásticas, así como también llegaron a la conclusión que no aplica para materiales anisótropos.

La razón mínima  $R/t$  está relacionada con la reducción de área (RA), la cual es obtenida mediante un ensayo de tensión en dirección de del doblado, esta relación es:

$$\frac{R}{t}_{\min imo} = \left( \frac{50}{RA} \right) - 1 \quad (3.1)$$

La ecuación se deriva de la ecuación de la deformación verdadera, en la figura 3.21 se muestra una curva ajustada modificando el numerador de la ecuación 3.1 de 50 a 60, la cual indica que la lámina tiene una reducción de área de 60% y puede ser doblada sin presentar grietas o fractura como se muestra en la figura 3.22

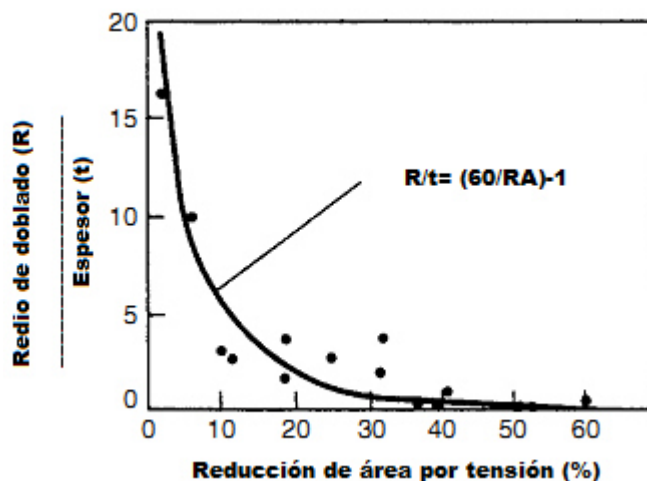


Figura 3.21 Datos experimentales mostrando la relación entre el radio de doblado y la razón del espesor de la chapa y la reducción de área para varias chapas metálicas [5].

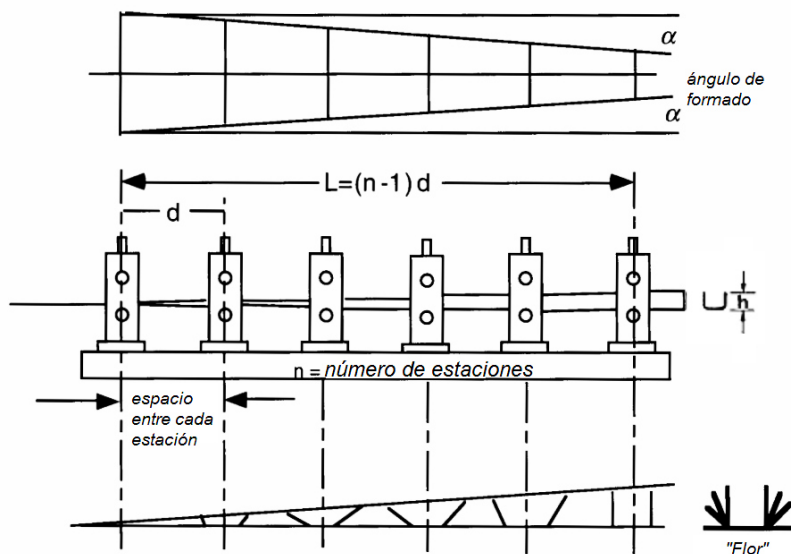


Figura 3.22 Efectos de orientación en el doblado de chapa metálica [5]

### 3.5.2 Estudios empíricos y teóricos para el cálculo del número de estaciones.

Los primeros trabajos que exponen ecuaciones empíricas acerca del proceso de LNP o roloformado fue presentada por Angel en 1949[42], en el cual propone un método del formado del ángulo, asumiendo que un punto del borde de la sección del perfil sigue una línea recta desde el primer pase de rolado hasta el último pase de formado como se muestra en la figura 3.23. Este método es usado por algunos

diseñadores para calcular el número de estaciones y la distribución de formado en cada pase.



**Figura 3.23 Método del ángulo de formado [58].**

El ángulo de formado se obtiene por:

$$\cot(\alpha) = \frac{L}{h} = \frac{(n-1)d}{h} \quad (3.2)$$

Dónde:

$\alpha$  = Ángulo de formado, grados

$L$  = Longitud de formado, pulgadas

$h$  = Altura de la sección, pulgadas

$n$  = Número de estaciones o etapas que se requieren

$d$  = Distancia entre cada estación, pulgadas

Por lo tanto;

$$\cot(\alpha) = 40.5; \alpha = 1.5^\circ \quad (3.3)$$

El ángulo de formado depende de la ductilidad del material que va a ser conformado en el proceso de roloformado. Gale [58] reporta ángulos de formado de 1° a 2°, pero también comenta que se han utilizado ángulos de formado entre 3° y 4°, sin presentar defectos en el material. En el caso de aceros de bajo carbono se declaran ángulos de formado de 1.4° como valor ideal de trabajo en el procesos de roloformado en frío.

A partir de las ecuaciones (3.2) y (3.3) podemos obtener el número de estaciones o etapas que se requieren con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{40.5 * h}{d} + 1 \quad (3.4)$$

Cabe señalar que aunque este método ayuda a obtener el número de etapas por medio de una geometría de la línea, queda claro que simplifica drásticamente el proceso de roloformado.

Otras fórmulas empíricas que se obtienen basadas en el trabajo de Angel[42], señalan que a partir de los tramos rectos en la sección transversal de la forma del perfil estructural deseado (figura 3.24), se puede obtener la distancia de la flexión que forma el radio interior, para así poder calcular el ancho total de la lámina que va a conformarse.

La distancia de la flexión del perfil se obtiene por:

$$BA = \{(0.01743 * r) + (0.0078 * e)\} * A \quad (3.5)$$



Donde,

$BA$ = Distancia de la flexión del perfil, pulgadas

$r$ = Radio interior de la curva

$e$ = Espesor del material, pulgadas

$A$ = Ángulo de flexión, grados

Observando la geometría del perfil estructural que se muestra en la figura 3.24 se puede analizar la obtención de la fórmula 3.6 para calcular el ancho total de la lámina, siendo la siguiente:

$$DW = [2(BA + f)] + w \quad (3.6)$$

Donde,

$DW$ =Ancho desarrollado, pulgadas

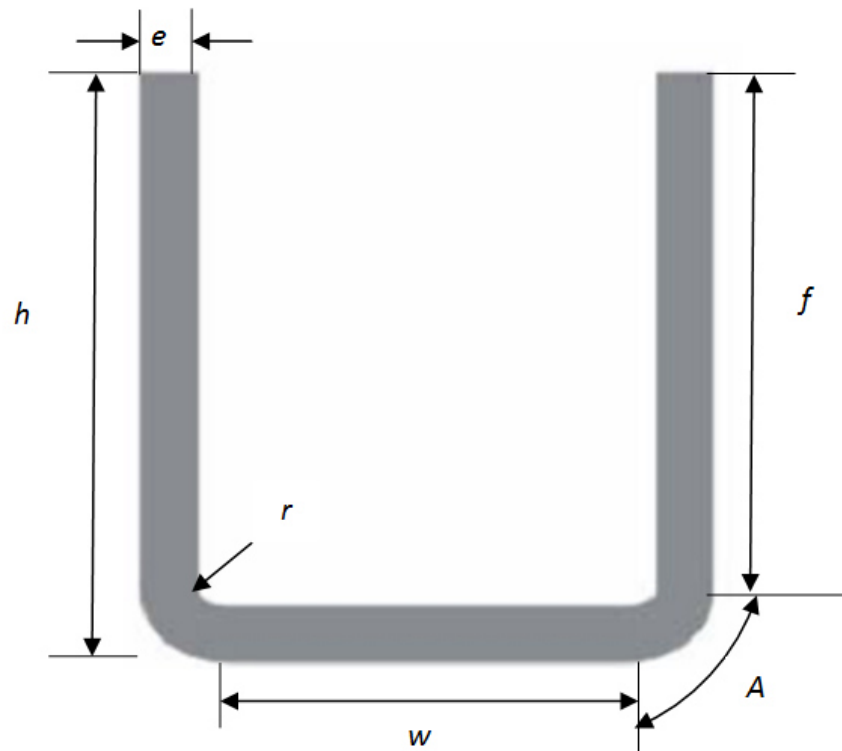
$BA$ = Distancia de la flexión del perfil, pulgadas

$f$ = Altura del perfil antes del radio interior, pulgadas

$w$ = ancho entre radios interiores del perfil, pulgadas

En el trabajo de Jimma y Ona [59], proponen otro método con un nuevo parámetro, el cual llamaron factor de forma ( $\phi$ ), definiendo dentro de la fórmula (3.6),  $F$  como la longitud de todos los elementos de sección, siendo estos un borde recto de una sección transversal sin ningún doblez. En el cálculo de la longitud, solo los elementos los sometidos a deformación son considerados. Sin embargo, la parte superior de la sección del perfil no se considera en el cálculo, auxiliándose en la figura 3.25 para ubicar el factor de forma y utilizándolo para encontrar el número de etapas, en el

diagrama del método de factor de forma presenta los resultados experimentales y exitosos para el proceso de roloformado.



**Figura 3.24 Sección transversal del perfil estructural.**

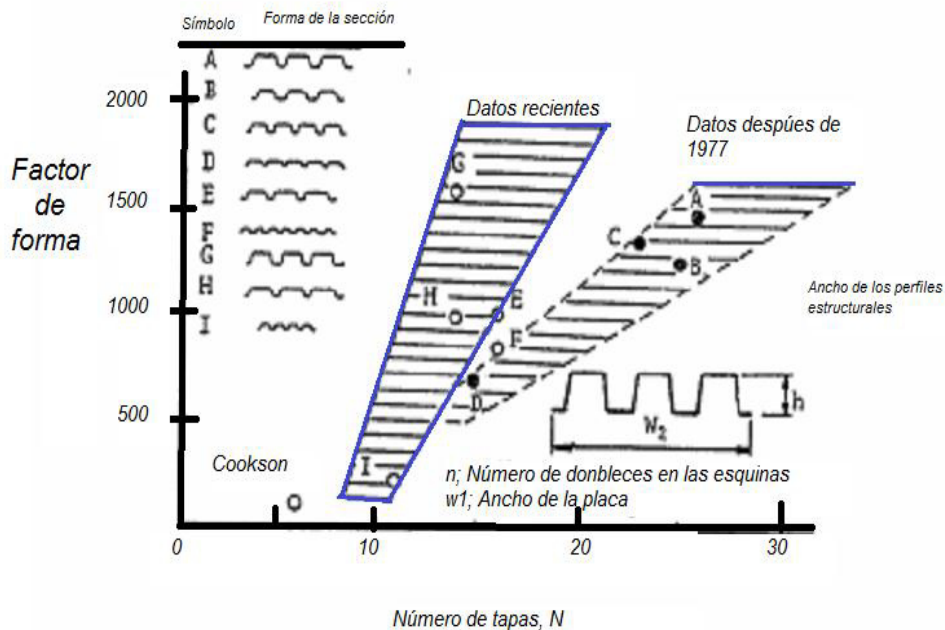
$$\phi = F * n * t \quad (3.7)$$

Donde,

$F$ = Longitud de todos los elementos de la sección, pulgadas

$n$ =número total de dobleces

$t$ = espesor del material



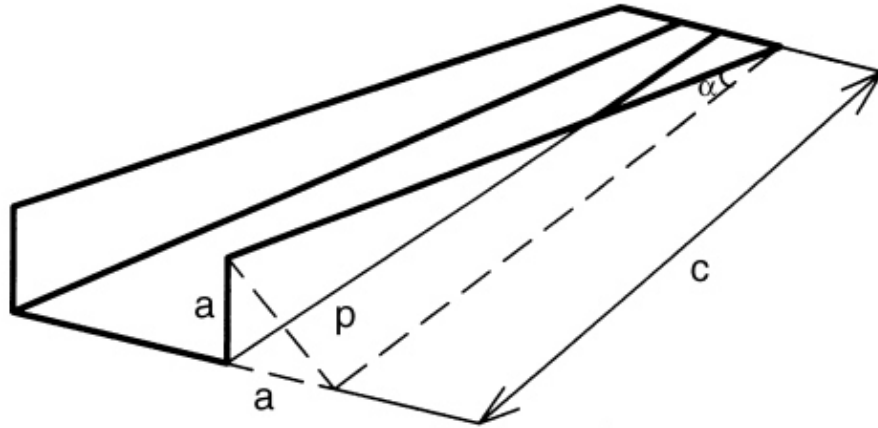
**Figura 3.25 Sección transversal del perfil estructural [59].**

Halmos [32] y Schulze [60], a bordo el cálculo del número de pases comenzando con la obtención de la distancia del perfil estructural que se desea, en este caso se ejemplifica en la figura 3.26 un perfil en forma de “U” y utilizando la ecuación 3.8, la cual es una orientación para diseñadores principiantes que trabajan en secciones simples.

Para calcular la distancia del borde de la lámina denominada  $c$ , al borde del producto simple terminado se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$p = \sqrt{2a^2} = a\sqrt{2} \quad (3.8)$$

$$\tan \alpha = \frac{p}{c} \quad c = \frac{p}{\tan \alpha} \quad (3.9)$$



**Figura 3.26 “Línea Recta”, enfoque para el cálculo del número de pases de un perfil simple [32].**

Continuando con las ecuaciones (3.10) y (3.11) para el cálculo del número de pases, estas se son ecuaciones empíricas las cual fueron propuestas por Schulze[60], debido a que los datos para resolver estas ecuaciones se encuentran en manuales de diseño de conformado de chapa que proporcionan rangos recomendados para diferentes condiciones de materiales y existen pocos datos recabados a partir de datos experimentales en la cual solo mencionan el material por su condición de material duro o blando. En el Anexo 7.1 A se muestran Tablas que proporcionan rangos de valores aplicables a estas ecuaciones.

Para el sistema imperial se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = \left[ 3.16h^{0.8} + 0.05/t^{0.87} + \alpha/90 \right] \left[ y^{2.1}/40U \right]^{0.15} s(1-0.5z) + e + f + 5zs \quad (3.10)$$

Para el sistema métrico se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = \left[ 0.237h^{0.8} + 00.834/t^{0.87} + \alpha/90 \right] \left[ y^{2.1}/00.003U \right]^{0.15} s(1-0.5z) + e + f + 5zs \quad (3.11)$$

Donde,

$n$ = Número de pases (solo en línea directriz)

$h$ = Altura máxima de la sección

$t$ = Espesor del material

$\alpha$ = Ángulo total formado en un lado del plano guía

$y$ = Resistencia a la fluencia en ksi (MPa)

$U$ = Resistencia a la tracción en ksi (MPa)

$s$ = Factor de forma

$e$ = Número de pases extras

$z$ = Agujero, perforación /ranura y factor de lámina

$f$ = Factor de tolerancia

Otro método es establecer el número de pasadas con las ecuaciones (3.10) y (3.11), preparar un diagrama de la flor, y entonces calcular las tensiones desarrolladas. Si la tensión entre los pasos está por encima del nivel permitido, entonces la formación se puede modificar. Esto se ilustra en la figura 3.27 y la ecuación (3.11).

$$\sigma = \frac{e^2 * E * (1 - \cos(\alpha))}{l^2} \quad (3.12)$$

Donde,

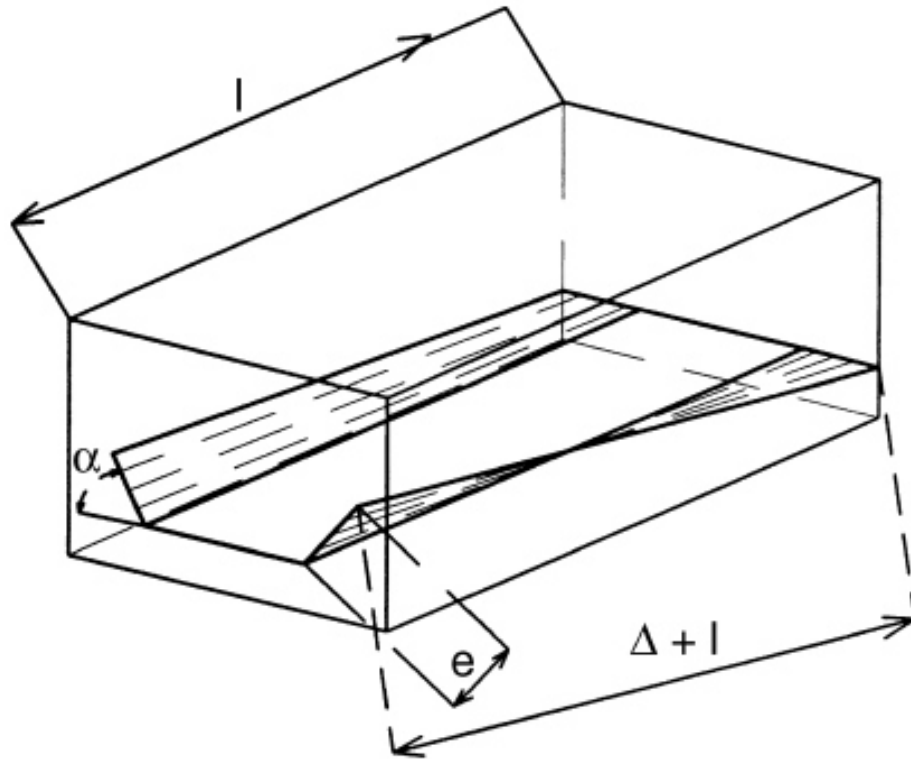
$\sigma$ =Esfuerzo

$e$ = Fase de altura

$E$ =Módulo de elasticidad

$l$ =Longitud de doblado

$\alpha$ = Ángulo de doblado



**Figura 3.27 Esquema del método de borde límite de esfuerzo, enfoque para el cálculo del número de pases de un perfil simple [60].**

### **3.6 Limitaciones del proceso y desarrollos futuros.**

Hoy en día la industria automotriz busca ser competitiva a través de la innovación de sus productos, principalmente con la introducción de nuevos materiales los cuales se encuentran sometidos a diferentes esfuerzos y condiciones, por lo que es de especial relevancia el estudio del comportamiento mecánico. Sin embargo al tener cubierta esta área la estrategia se ha enfocado a la reducción de costos a través de los procesos de manufactura para conformar estos materiales teniendo como una alternativa la simulación numérica, por medio del método de elemento finito.

Existen una variedad de procesos de manufactura o procesos de conformado, pero se ha enfocado en el área automotriz al estudio de procesos en los que se trabaja a temperatura ambiente, de tal manera que existe una reducción de costos en el mantenimiento del equipo y herramientas, además de que obtiene una calidad superficial aceptable.

Actualmente los procesos de manufactura bajo condiciones de temperatura o temperatura ambiente que están en estudio son: soldadura, extrusión, hidroformado y roloformado, resaltando este último como un proceso en el que se carece de información científica al respecto, al ser un proceso de conformado basado en experiencias, siendo este un área de desarrollo, ya que resulta ser un proceso altamente productivo.

La principal limitante del proceso es que en la actualidad no existe una metodología de diseño del proceso, ya que se diseña en base al material del que se va a conformar la pieza final, por lo que no es apto para trabajar el mismo diseño para todo tipo de materiales, principalmente para establecer el número de estaciones de conformado, debido a que es un proceso de formado progresivo.

La principal dificultad del establecer reglas se basan en el comportamiento del conformado en tres dimensiones del material que por lo regular es una placa o lámina, la cual involucra una membrana y la deformación de flexión en la dirección longitudinal, (2) deformación de membrana en la dirección transversal y (3) deformación por compresión en la dirección del espesor. Esto trae como consecuencias y como principales problemáticas reflejadas en el proceso de roloformado o laminación no plana es que se incrementan los efectos de recuperación

elástica y fracturas en los ángulos de doblado. Estos cambios se traducen en la magnificaciones de defectos como ondulamiento, pandeos o fractura [32,48, 61,62]. Aunado a la presencia de esfuerzos residuales y sin un número adecuado de estaciones de rolado, incrementando el costo de consumo de energía y trayendo como consecuencia efectos ecológicos.

En la actualidad existen softwares de diseño dedicados principalmente en el diseño de los rodillos de trabajo y la predicción de la patrón de formación del perfil estructural a conformar (flor), y recomendando líneas con 18, 20 y 22 estaciones, sin especificar la diferencias al producir el mismo producto final, solo teniendo como referencia que al aumentar el número de estaciones se reduce la recuperación elástica.

El desarrollo futuro del proceso de laminación no plana se centra principalmente en poder incorporar cualquier tipo de material y además de contar con líneas prototipo, ya que como es un proceso industrial, resulta ser difícil la obtención de datos. Principalmente elegir el diseño óptimo de la línea basados en reglas científicas y contar con modelos de simulación para la predicción de los parámetros que se requiere en el conformado, tomado en cuenta la fricción y la lubricación de los herramentales. Y como principal innovación un proceso para producción de perfiles no lineales, ya que actualmente se realiza por hidroformado y secciones cortas.



## Capítulo 4

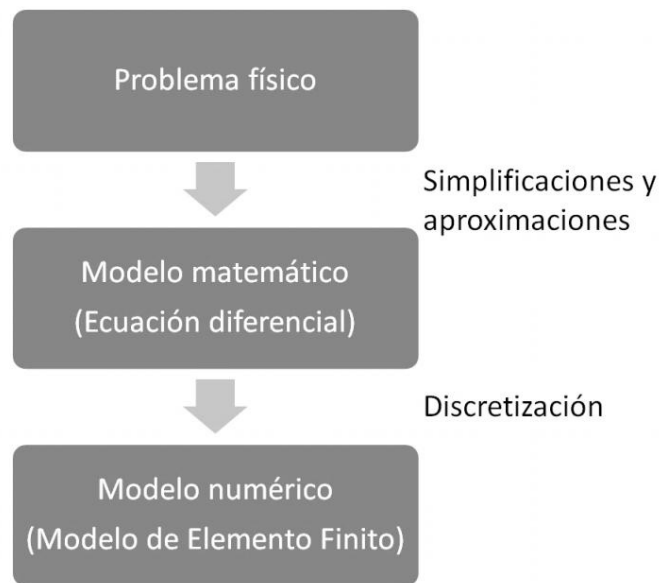
### Método de elemento finito en los procesos de conformado

#### 4.1 Introducción.

En la actualidad se ha desarrollado tecnología para el estudio y análisis de los procesos de conformado, la cual en la mayor parte de los casos emplea el método de elementos finitos para la determinación de esfuerzos y deformaciones.

El método de elemento finito (MEF), parte de la construcción de un modelo matemático aproximado con los parámetros discretos para representar el problema físico que normalmente es prácticamente imposible de resolver por métodos matemáticos analíticos. La representación básica del proceso de la obtención del modelo basado en MEF se muestra en la figura 4.1.

El empleo de métodos de discretizado espacial, temporal y la aproximación temporal para encontrar soluciones a los problemas físicos e ingenieriles, forman parte del concepto de elementos finitos, basándose principalmente en la apropiada selección del elemento básico o también llamado elemento finito, y la interconexión con la construcción del modelo que resulte un sistema convergente, es decir, que represente exactamente el problema a medida que aumente el número de elementos [63].



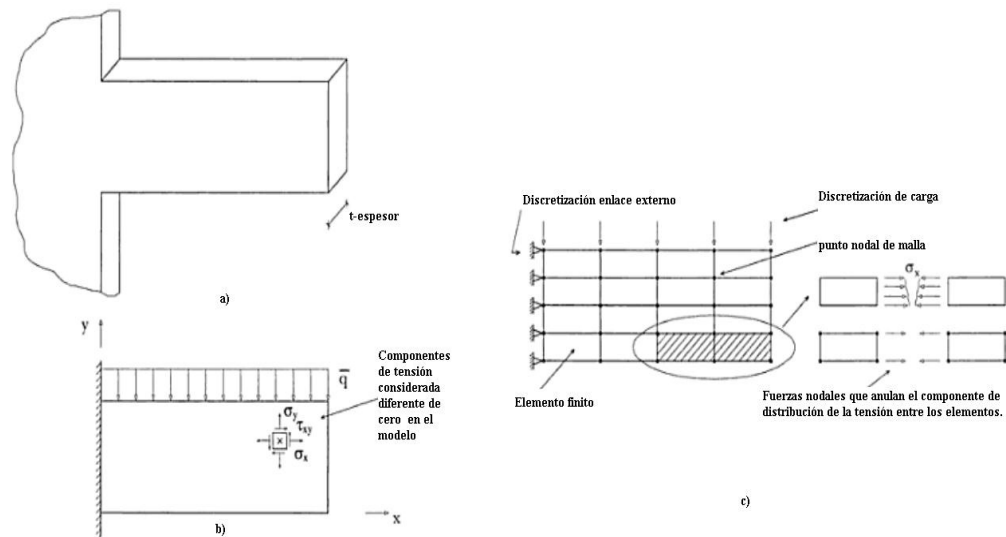
**Figura 4.1 Representación del proceso MEF.**

En muchos casos se obtienen modelos utilizando un número finito de componentes bien definidos, a estos problemas se les denominan discretos. En otros, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema sólo puede definirse haciendo uso de la ficción matemática de infinitésimo, esto conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados, denominando a estos sistemas como continuos.

Con el avance computacional los problemas discretos se resuelven generalmente sin dificultad, aun cuando el número de elementos sea elevado. Los problemas continuos solo se pueden resolver de forma exacta mediante manipulaciones matemáticas, por lo que las técnicas matemáticas disponibles suelen limitar las posibilidades a casos extremadamente simplificados.

Para esto se han ido proponiendo a través de los años diversos métodos de discretización, a su vez se hace necesario efectuar alguna aproximación a la solución continua verdadera, a medida que crezca el número de variables discretas.

El procedimiento para convertir un sistema continuo a un sistema discreto se conoce como discretización, el cual consiste en dividir el sistema continuo en elementos que se encuentren conectados por nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, así como también un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. Al conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se le denomina malla. Un ejemplo que describe lo anterior se esquematiza en la figura 4.2.



**Figura 4.2 Consola bajo carga uniforme. (a) Consola, (b) Esquematización de modelo matemático para tensión no plana, en el que el equilibrio es infinitesimal en cada punto y (c) Discretiza en elementos [65].**

En este Capítulo se profundiza acerca del método de elemento finito y las aproximaciones para formularlo, además de las técnicas iterativas que se utilizan en los programas computacionales para resolver un conjunto de ecuaciones no lineales simultáneas que rigen el estado de equilibrio; ya que con relación al proceso de laminación no plana se han realizado estudios aplicando el MEF principalmente en lo que respecta análisis mecánico [64].

#### **4.2 Historia del método de elemento finito.**

El método de elemento finito es un método numérico que surgió como tal en la década de 1960's, el MEF fue propuesto primero en 1943, pero no fue hasta 1956 que se presentaron los primeros resultados obtenidos con este método y en 1960 Clough introdujo por primera vez, el término de elemento finito [66,67].

En 1943 aparecieron trabajos de Courant, donde mostraba los primeros intentos en usar funciones continuas sobre dominios triangulares y aplicó el principio de energía potencia mínima para resolver problemas de torsión de St. Venant [68,69].

En 1959, Greenstadt presentó una aproximación el cual involucraba celdas en lugar de puntos y para cada celda la función desconocida era representada mediante una serie de funciones, cada una asociada a una celda, por lo cual redujo un problema continuo a uno discreto.

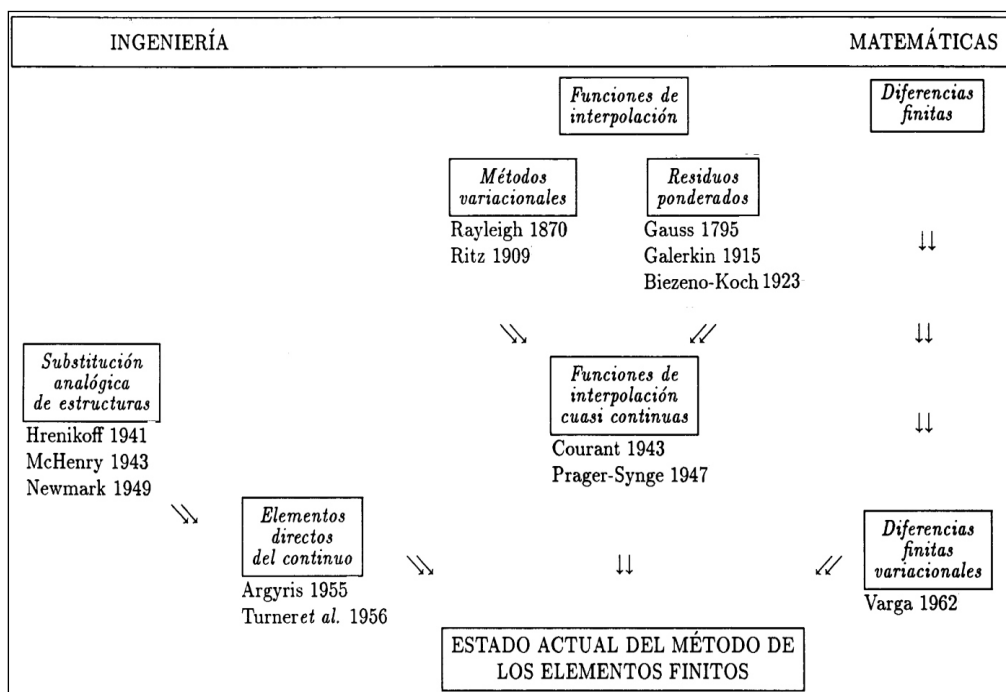
Los trabajos realizados por Prager y Synge en 1947, condujeron al desarrollo del método de hipercírculo, el cual puede ser aplicado a la solución de problemas del medio continuo de manera muy similar a las técnicas por elementos finitos [70].

En los años 40 McHenry, Hrenikoff, Newmark y Southwell, demostraron que pueden obtenerse buenas soluciones de un problema continuo sustituyendo pequeñas porciones del continuo por una distribución de barras elásticas simples. Es decir, un problema de una estructura con un número infinito de barras e interconexiones se podía considerar como una estructura con un número finito de barras interconectadas en un número finito de puntos. Bajo estas consideraciones se reducía el problema a uno que podía ser manejado por problemas convencionales [67,69,71].

En la década de 1950 y en el mismo contexto Argyris y Turner demostraron que se pueden sustituir las propiedades del continuo de un modo más directo, y no menos intuitivo, suponiendo que las pequeñas porciones del mismo, se comportan de una cierta forma simplificada.

En 1965 Zienkiewicz y Cheung utilizaron el MEF y reportaron que éste es aplicable a todo problema que se pueda abordar en forma variacional [72].

En la figura 4.3 se muestra el árbol genealógico del método de elementos finitos.



**Figura 4.3** Árbol genealógico del Método de Elementos Finitos [74].

### 4.3 Formulación matemática del MEF.

Huebner [68] describe cuatro aproximaciones diferentes para formular el método de elementos finitos, que son: el método directo, el método variacional, el método de residuos ponderados y el método del balance de energía. Estas técnicas matemáticas se describen en los siguientes puntos.

#### 4.3.1 Método directo.

El método de elemento finito se desarrolló, al inicio de la década de los años cincuenta, a partir del llamado método directo asociado al cálculo estructural, el cual fue ampliamente usado en la solución de diversos problemas estructurales relacionados con la industria aeronáutica [75].

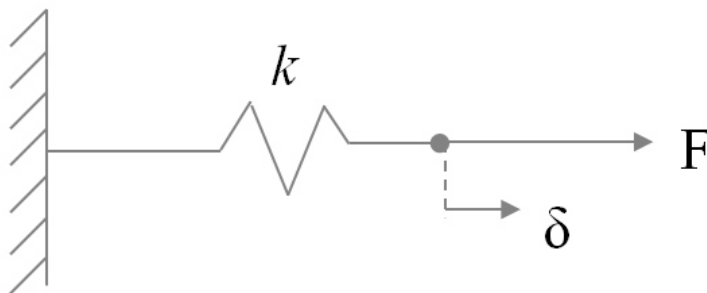
Mediante el método directo se analizaron los elementos estructurales reticulares. Las relaciones entre los desplazamientos y las fuerzas que los originan se expresaron mediante un conjunto de ecuaciones, dando origen a la matriz de rigidez de cada elemento estructural, y se desarrollaron técnicas para realizar el ensamblaje de estas matrices en una matriz global que expresa el comportamiento de toda la estructura de estudio.

Un ejemplo en los que se puede aplicar este método es el de un resorte elástico lineal, el cual obedece a la Ley de Hooke; es decir una fuerza  $F$  está aplicada en el extremo libre del resorte y produce un desplazamiento  $\delta$ , entonces existirá una relación esfuerzo-desplazamiento, la cual es lineal y está dada por:

$$F = k\delta \quad (4.1)$$

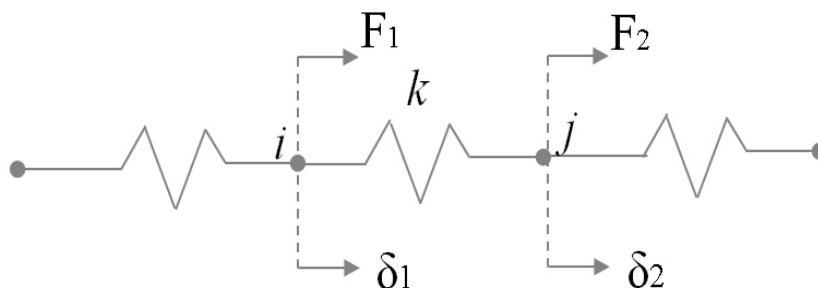
Donde  $k$ , es la rigidez del resorte.

En la figura 4.4 se puede observar que el resorte está fijo en un extremo y sólo puede tener desplazamiento en la dirección señalada.



**Figura 4.4 Resorte lineal con un sistema fijo y una fuerza aplicada en su extremo libre.**

Otra ejemplo es el que se muestra en la figura 4.5, donde se presenta un resorte elástico lineal, de extremos  $i$  y  $j$ , el cual forma parte de un sistema de resortes en equilibrio. Debido a la acción de los resortes adyacentes, actuarán las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  en los extremos de los resortes, siendo  $\delta_1$  y  $\delta_2$  los desplazamientos correspondientes. Los extremos  $i$  y  $j$  son los nodos del elemento resorte y los desplazamientos en cada nodo se denominan “grados de libertad”.



**Figura 4.5 Resorte lineal típico en un sistema de resortes.**

Para los elementos resortes la ley de Hooke es la relación constitutiva, la cual expresa cómo la cinética se vincula con la cinemática, es decir se relaciona la fuerza que actúa sobre un elemento con el alargamiento o acortamiento que éste experimenta y está dada por la ecuación (4.1).

Por lo tanto, se puede escribir la siguiente ecuación para el elemento que representa fuerzas colineales en el resorte:

$$F_1 + F_2 = 0 \text{ (Equilibrio)} \quad (4.2)$$

$$F_1 = -F_2 \quad (4.3)$$

$$F_1 = -K(\delta_2 - \delta_1) = K(\delta_1 - \delta_2) \quad (4.4)$$

$$F_1 = K(\delta_1 - \delta_2) \quad (4.5)$$



$$F_2 = K(\delta_2 - \delta_1) \quad (4.6)$$

Haciendo un arreglo matricial esto queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Llegando a un sistema matricial de la forma:

$$F = Ku \quad (4.8)$$

Esta matriz cuadrada, es conocida como matriz de rigidez del elemento, en este caso el resorte.  $K$  es la matriz de rigidez para un elemento resorte típico,  $u$  es el vector de desplazamiento nodales asociados con un elemento y  $F$  es el vector de fuerza nodal del elemento.

Prácticamente, todos los parámetros empleados en esta aproximación pueden interpretarse mediante principios físicos. Desafortunadamente, este método es difícil de aplicar en problemas bidimensionales y tridimensionales, los cuales son precisamente, los casos donde el método de elemento finito es más útil. Esta limitación es por lo tanto muy severa y reduce drásticamente su rango de aplicación.

#### 4.3.2 Método variacional.

El método variacional está relacionado con un ente matemático llamado funcional. El funcional asociado a un problema dado, puede obtenerse bien sea a partir de alguna expresión de energíal, como es el caso en los problemas de la mecánica de los sólidos,

o desde un problema de valor de contorno. Una vez obtenido el funcional asociado a un problema dado, el método variacional consiste en minimizar el valor del funcional con respecto a cada uno de los valores nodales de las variables del problema [75].

Si se considera la integral:

$$\int_0^h \frac{1}{2} \left[ D \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 - W y^2 \right] dx = \Pi \quad (4.9)$$

El valor numérico de  $\Pi$  puede obtenerse suponiendo una función específica  $y=f(x)$ . El cálculo variacional muestra que aquella función particular  $y=g(x)$  que conduzca al valor numérico más bajo será la solución de la ecuación diferencial:

$$D \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) - Q y = 0 \quad (4.10)$$

Con las condiciones de frontera:  $y(0) = y_0$      $y(h) = y_h$

El proceso puede ser invertido. Dada una ecuación diferencial, una solución aproximada puede obtenerse con la sustitución de funciones prueba diferente en la funcional aproximada. La función prueba que da el valor mínimo de  $\Pi$  es la solución aproximada.

Entre las ventajas de este método se incluye la familiaridad de las técnicas de energía y su fácil extensión a problemas bidimensionales o tridimensionales, por otra parte, las desventajas que presenta el método es la inexistencia del funcional para cierta clase de problemas, como los relacionados con el flujo de fluidos viscoelásticos y la

dificultad de determinarlo, aun cuando exista, para otros problemas. La inexistencia del funcional para algunos problemas, obliga a recurrir otros métodos.

#### 4.3.3 Método de residuos ponderados.

Este método está asociado a problemas de valor de contorno y consiste en re-escribir la ecuación diferencial que gobierna el problema, de tal modo que el lado derecho del signo de la igualdad sea igual a cero. De este modo, cuando se sustituye la solución exacta no se conoce y se debe emplear alguna solución aproximada [67,68,74,75].

Si se supone que  $y=h(x)$  es una solución aproximada para la ecuación 4.10, sustituyendo se obtiene:

$$Dd^2h(x)/dx^2 + Q = R(x) \neq 0 \quad (4.11)$$

La sustitución de esta solución aproximada en la ecuación diferencial, conduce a un error residual  $R$ , distinto de cero. Entonces  $y=h(x)$  no satisface la ecuación. El método de residuo ponderado requiere que

$$\int_0^h w_i(x) R(x) dx = 0 \quad (4.12)$$

Este error  $R$  es entonces multiplicado por una función de peso  $w_i$  y el producto es integrado sobre toda la región del dominio. El resultado es el error residual  $R$ , el cual debe hacerse igual a cero. Luego, para cada valor nodal, existe una función de peso  $w_i$

y un residuo  $R$ , ambos desconocidos, lo cual permite formular un conjunto de ecuaciones algebraicas globales. La selección de las funciones peso  $w_i$  da origen a diferentes criterios de residuos ponderados [68]:

- Método de Galerkin ( $w_i = N_i$ ).
- Método de Petrov-Galerkin ( $w_i \neq N_i$ ).
- Método de subdominio ( $w_i = 1$ )
- Método de mínimos cuadrados ( $w_i = \partial R / \partial u_i$ ).
- Método de colocación ( $w_i = \delta_i$ ).  $\delta$  es la función delta de Dirac (impulso).

A pesar que el método de los residuos ponderados es una aproximación totalmente matemática, y que muy pocas veces se le puede asociar algún significado físico a los parámetros involucrados en la solución de un problema dado, presenta la ventaja que puede aplicarse a cualquier caso del cual se conozca su respectivo problema de valor de contorno y que, una vez que se entienda la técnica, los detalles matemáticos son relativamente fáciles de realizar. En lo particular, en el área de la mecánica de fluidos, este método es usado casi en su totalidad de los procesos, ya que las ecuaciones de Navier-Stokes y algunas relaciones constitutivas, tales como las asociadas a los fluidos viscoelásticos, no admiten funcionales [74].

#### **4.3.4 Formulaciones explícitas e implícitas.**

Los métodos explícito e implícito son utilizados en el cálculo del incremento del tiempo. En ambos métodos se discretiza el tiempo, por lo que se considera la solución

para un cierto número de instantes, la diferencia entre un instante en el que se busca la solución y el siguiente se denomina paso de tiempo.

#### 4.3.4.1 Métodos explícitos.

Los métodos explícitos dan como resultado sólo una variable desconocida en la ecuación obtenida al solucionar la ecuación diferencial gobernante, lo cual permite la evaluación de la misma en términos de cantidades conocidas [75]. En los procedimientos explícitos se utiliza ya sea un proceso de integración directa o se adopta alguna forma del método de Runge-Kutta<sup>2</sup>.

En el método directo, el incremento de tiempo se conoce como  $\Delta\varepsilon$ , el cual se divide en un número determinado de intervalos y la integral se reemplaza por una ecuación sumatoria. Por otro lado, con el método Runge-Kutta proporciona un procedimiento de mayor precisión.

Para ilustrar el método explícito se considera las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\sigma = \int_0^{\Delta\varepsilon} D_{ep} d\varepsilon \quad (4.13)$$

---

<sup>2</sup> Es llamado método de Runge-Kutta, en honor a los matemáticos alemanes quienes lo desarrollaron. Carl Runge (1856-1927) y Wilhem Kutta (1867-1944), es un método muy práctico y utilizado para resolver problemas ingenieriles. La ecuación general del método es  $Y_{l+1} = Y_l + \phi(X_l, Y_l, h)h$ . Donde  $\phi$  es la función de incremento para la variable dependiente, la cual puede interpretarse como la pendiente del intervalo a calcular por la fórmula. De la manera que se define la función de incremento es donde se originan las fórmulas de los diferentes órdenes dependiendo del número de términos por los que se reemplace, es decir si  $\phi$  se define por dos términos, serán las formular de segundo orden, si son tres términos serán las fórmulas de tercer orden y así sucesivamente. Para los métodos de Runge-Kutta de segundo orden se aplican los métodos de Heun, el mejorado del polígono y el Ralston [76,77]. El método de Euler es un metodo de Runge-Kutta de primer orden.[78]

$$\Delta\sigma = D_0^{1/2} \frac{\Delta\varepsilon}{2} \quad (4.14)$$

$$\Delta\sigma = D_0^{1/2} \Delta\varepsilon \quad (4.15)$$

En las ecuaciones (4.13), (4.14) y (4.15), la tensión aplicada está representada por  $\sigma$  y  $D_{ep}$  es la matriz de propiedades elastoplásticas. El método aplica primero en incremento de  $\Delta\varepsilon/2$  en un único paso para obtener la ecuación (4.13), siendo  $D_0$  la matriz elastoplástica inicial. Este incremento de tensión se evalúa para calcular  $D^{1/2}$  y obtener finalmente la ecuación (4.13).

El método de Runge-Kutta puede dar una estimación del error en la tensión y si tal error supera una cierta norma, el tamaño del incremento puede ser modificado. Este procedimiento se recomienda para problemas de plasticidad general.

En algunos análisis los métodos explícitos representan desventajas, siendo que el algoritmo es condicionalmente estable [76], es decir, el incremento del tiempo  $\Delta t$  debe ser seleccionado de tal forma que no rebase un cierto valor crítico ( $\Delta t_{cr}$ ). El tamaño de los incrementos de tiempo depende de la dimensión de los elementos y de las propiedades del material.

Los métodos explícitos también cuentan con grandes ventajas, principalmente en análisis de tres dimensiones que presentan contacto y en problemas complejos, ya que con una malla refinada el método resulta ser más rápido debido a que el tiempo que

demora el análisis explícito es directamente proporcional al número de grados de libertad del sistema.

#### 4.3.4.2 Métodos implícitos.

La integración de la ecuación (4.13) puede ser escrita en forma implícita, obteniendo la ecuación (4.16), donde  $D_n$  es el valor de la matriz al principio del incremento y  $D_{n+1}$  es el valor al final del mismo.

$$\Delta\sigma = [(1 - \theta)D_n + \theta D_{n+1}] \Delta\epsilon \quad (4.16)$$

Esta ecuación (4.16) puede resolverse mediante cualquiera de los métodos iterativos, sin embargo, las derivadas de  $D$  son bastante complejas y, en cualquier caso, se comete un error serio en la forma aproximada de la ecuación misma.

Los métodos implícitos se apoyan en varios algoritmos que son incondicionalmente estables [77], sin embargo, bajo incrementos de tiempo demasiados grandes los algoritmos pueden inducir oscilaciones falsas en las respuestas calculadas. Con esto se puede concluir que la selección del incremento de tiempo es un aspecto importante tanto para algoritmos implícitos como explícitos. Por lo tanto, debido al algoritmo que utiliza para los incrementos de tiempo, el método implícito resulta ventajoso al analizar problemas estáticos y cuasiestáticos.

El procedimiento implícito utiliza un incremento de tiempo automático, dichos incrementos son estables y dependen del estado inicial de los incrementos.

Con los métodos implícitos se pueden obtener soluciones más rápidas que los métodos explícitos en problemas pequeños, ya que los métodos implícitos son directamente proporcionales al cuadrado del número de los grados de libertad.

#### **4.3.5 Técnicas iterativas.**

Los problemas físicos están representados por ecuaciones diferenciales, estas ecuaciones pueden conducir a soluciones numéricas por medio de varias técnicas existentes. Las ecuaciones de elemento finito pueden ser en estado estacionario o en estado transitorio, ya sea lineal o no lineal. Las ecuaciones lineales pueden resolverse por métodos directos, como son: eliminación Gaussiana y el método de Cholesky; mientras que las ecuaciones lineales pueden ser resueltas por métodos iterativos como el Newton-Raphson, Newton-Raphson modificado o el incremental-secante de cuasi Newton [79].

En otras palabras, una forma más clásica de resolver problemas de grandes dimensiones sin utilizar los métodos directos la conforman los métodos iterativos. La idea general de los métodos iterativos consiste en llegar a la solución real del problema mediante una sucesión de soluciones que converjan a aquella. Estos métodos no proporcionan, teóricamente la solución exacta, aunque sí permiten, cuando funcionan bien, acercarse a aquella tanto como se desee.

En las siguientes secciones se proporcionan una breve descripción de los métodos iterativos: método Newton-Raphson, método Newton-Raphson modificado o el método incremental-secante de cuasi Newton.



#### 4.3.5.1 Método Newton-Raphson.

El algoritmo iterativo  $x_{i+1} = x_i - f(x_i)/f'(x_i)$  (4.17) para resolver una ecuación algebraica no lineal  $f(x) = 0$  se llama generalmente el método de Newton o también se le conoce como el método de Newton-Raphson. [80,81].

Este método es probablemente el mejor para la resolución de ecuaciones algebraicas no lineales, es ampliamente conocido y fácil de implementar en computadora y rápido para llegar a las raíces de la ecuación [85]. El método se basa en expandir en serie de Taylor la función  $f(x)$  en las cercanías de las raíces de la ecuación la cual se denomina  $x_i$ .

El único inconveniente del método es que se debe evaluar la derivada de la función por lo que ésta debe ser provista para aplicaciones computacionales. Sin embargo, es posible calcularla numéricamente.

Una representación gráfica del método se presenta en la figura 4.6, en la cual se puede apreciar que para cada aproximación  $X_1$  la derivada de la función es la tangente de la curva en ese punto, la cual al prolongarse en la dirección positiva del eje X, genera la nueva aproximación al incrementar X en h unidades.

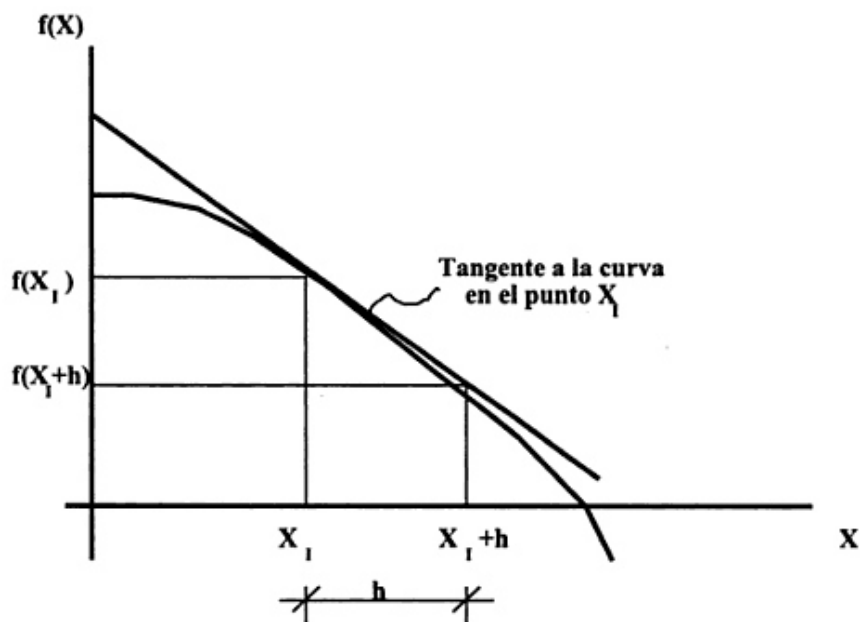


Figura 4.6.- Representación gráfica del método de Newton-Raphson [78].

#### 4.3.5.2 Método Newton-Raphson modificado.

Para el método de Newton Raphson modificado es necesario obtener de la primera la primera y segunda derivada de la función y la obtención de la aproximación de la raíz dada por:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)f'(x_i)}{[f'(x_i)]^2 - f(x_i)f''(x_i)} \quad (4.18)$$

La manera en que se realizan las iteraciones es de la misma forma que el método de Newton-Raphson. Este método convergerá de forma más lenta pero resolverá dificultades que se pudieran presentar en el proceso de Newton-Raphson como reformulaciones e inversiones matriciales.

#### 4.3.5.3 Método incremental-secante de cuasi Newton.

En este método, una vez que se ha realizado la primera iteración de la selección precedente, se puede encontrar una pendiente secante.

Una manera de aproximar  $f'(x_i)$  es utilizar los valores de  $f$  en  $x_i$  y  $x_{i-1}$ , es decir,

$$f'(x_i) \approx a_i = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad (4.19)$$

Obtenemos así el llamado método secante y que necesita de una sola evaluación de la función en cada iteración:

$$x_{i+1} = x_i - f(x_i) \frac{x_i - x_{i-1}}{f(x_i) - f(x_{i-1})} \quad (4.20)$$

El método de la secante es un caso particular de Newton modificado al aproximar las derivadas de la función mediante el cociente incremental. Este sistema puede ser casi tan rápido para converger como el proceso de Newton-Raphson [85].

Los métodos de actualización secante parecen surgir de ideas introducidas por Davidon [82] y desarrolladas posteriormente por otros. Dennis y More [83] estudian el campo de forma extensiva, mientras que Matthies y Strang [84] aparecen ser los primeros en usar los procedimientos en el contexto de elementos finitos.

La técnica que se encuentra implementada en el paquete computacional ABAQUS [86] para la simulación de procesos de formado es el de propagación de onda para un análisis dinámico explícito.

## **Capítulo 5**

### **Experimentación**

#### **5.1 Introducción.**

En este Capítulo se describe la metodología experimental que se planteó y se llevó a cabo en este trabajo sobre el proceso de laminación no plana (roloformado), el cual consistió en tres etapas. La primera tuvo como objetivo la caracterización metalúrgica y mecánica del material a conformar mediante el proceso de laminación no plana y algunos componentes del sistema como son los rodillos de trabajo, siguiendo las normas internacionales ASTM (American Society for Testing and Materials); la segunda etapa consistió en obtener por medio de ingeniería inversa las geometrías de los componente del sistema del proceso de roloformado y la última etapa fue desarrollar el modelo numérico por el método de elementos finitos mediante el paquete computacional ABAQUS<sup>MR</sup>.

#### **5.2 Caracterización del material.**

El objetivo de la caracterización metalúrgica y mecánica del material es obtener las propiedades del material, ya que son difíciles de determinar y en la mayoría de los casos los fabricantes no proporcionar la información con la precisión adecuada.

### 5.2.1 Análisis químico.

Se realizó un análisis cuantitativo por medio de la técnica de microanálisis por dispersión de energía (EDS por sus siglas en inglés), técnica que utiliza un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) marca JEOL, modelo JSM-6510LV (Figura 5.1), equipado con una unidad de detección EDAX (Figura 5.2) la cual tiene las capacidades de identificar dichas energías, y por lo tanto saber qué elementos químicos existen en la muestra y corroborar en la literatura los aportes de éstos en relación con las propiedades mecánicas que se obtuvieron y principalmente corroborar que el material obtenido en campo fuera el de interés.



**Figura 5.1 Microscopio Electronico de Barrido**



**Figura 5.2 Unidad de detección EDAX-EDS**

### **5.2.2 Caracterización mecánica.**

Como se mencionó en el Capítulo 3, existen modelos que describen la relación tensión-deformación obtenidas mediante un ensayo a tracción uniaxial y obtener información acerca de material, como es el módulo de Young, el esfuerzo de cedencia, la resistencia máxima, el endurecimiento por deformación entre otras.

La American Society for Metals (ASM) menciona que el ensayo a tracción universal es uno de los ensayos más utilizados y que miden las características básicas de los materiales [87]. Por otro lado, Banabic señala que es el ensayo más utilizado para determinar la respuesta del material de espesores delgados debido a la estandarización de la evaluación de la curvas por métodos de mínimos cuadrados [88].

En consecuencia, se ha realizado este tipo de ensayo para determinar la curva esfuerzo-deformación del material que se ha sido utilizado en el proceso de roloformado. El material ensayado es un acero HSLA grado 50 con un espesor de 3.2 mm, a partir de la obtención de la curva carga-elongación se obtuvieron el módulo de

elasticidad ( $E$ ), el esfuerzo de cedencia ( $\sigma_y$ ), el coeficiente de resistencia ( $K$ ) y el exponente de endurecimiento por deformación ( $n$ ).

Los valores  $K$  y  $n$  se obtuvieron mediante la ecuación de Hollomon:

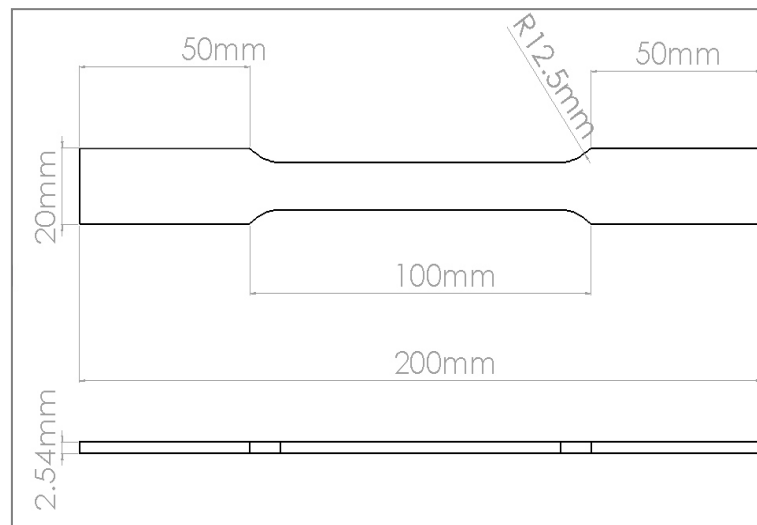
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (5.1)$$

Donde  $\sigma$  y  $\varepsilon$  son respectivos valores instantáneos de esfuerzo y deformación verdaderos.

#### **5.2.2.1 Preparación de probetas.**

Las probetas para el ensayo de tensión se obtuvieron siguiendo las normas ASTM E-8 [89], como se muestra en la figura 5.3. Las probetas tienen una sección rectangular y se realizaron las marcas de calibración para el uso del extensómetro a partir del centro de la muestra (50mm).

Las probetas fueron cortadas de la misma lámina por medio de una máquina de corte por chorro de agua que se muestra en la figura 5.4.



**Figura 5.3 Dimensiones en mm de la probeta de ensayos para tensión.**



**Figura 5.4 Máquina por chorro de agua utilizada para corte de probetas de tensión.**

#### **5.2.2.2 Ensayo de tensión y análisis realizados.**

Se llevó a cabo el ensayo de tensión en una máquina de tensión SHIMADZU Autograph AG-X (figura 5.5) con capacidad de 30 toneladas y con una capacidad de fuerza de 294 KN, un extensómetro con distancia calibrada de 50 mm y usando una velocidad de desplazamiento del cabezal de 5 mm/min hasta llegar al punto de fractura



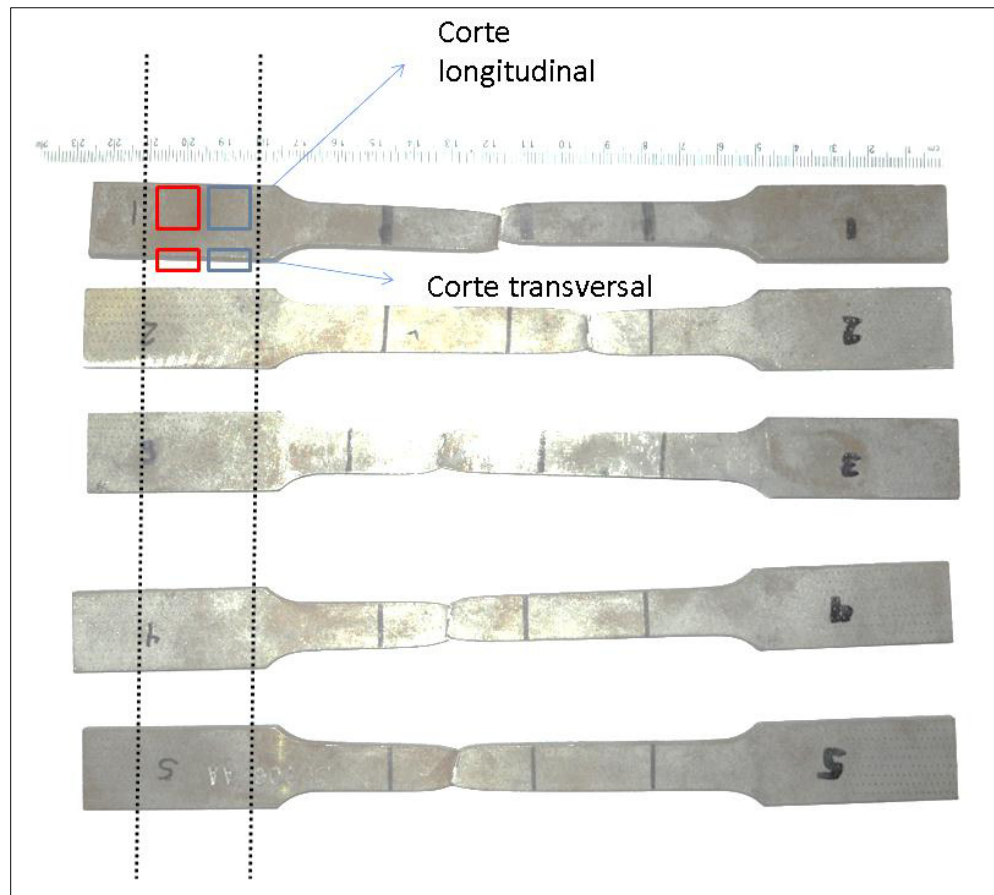
de las probetas, se realizaron 5 ensayos de tensión para comprobar la repetitibilidad del comportamiento mecánico del material (figura5.6).

El archivo original de los resultados del ensayo de tensión se obtuvo del equipo auxiliar de la maquina SHIMADZU, incluye las condiciones con que se realizó el ensayo así como el desplazamiento generado y la fuerza aplicada.

El procesamiento de los datos obtenidos del archivo se realizó mediante el paquete computacional ORIGIN 8.6 para generar la gráfica esfuerzo-deformación y realizar modificaciones después del punto de fractura, ya que tiende a caer al eje de las abscisas, para posteriormente obtener la ecuación constitutiva que representa el comportamiento del material por medio de la ecuación de Hollomon, descrita en los puntos 2.5.2 y 5.2.2.



**Figura 5.5 Maquina SHIMADZU Autograph AG-X de pruebas mecánicas.**



**Figura 5.6 Probetas de acero HSLA grado 50 utilizadas en el ensayo de tensión y obtención de muestras para análisis microestructural.**

### **5.2.2.3 Ensayos de dureza.**

Para culminar la caracterización mecánica se realizaron ensayos de microdureza Vickers en la lámina antes del proceso de conformado y la pieza obtenida después del proceso de conformado, en este caso mediante la laminación no plana (roloformado). El ensayo de dureza Vickers se realizó con una carga de 0.3Kg a 15s, con el objetivo de comparar si existía un cambio en la dureza al someter la placa por el proceso de conformado. Se siguió la norma E384 de la ASTM [90].

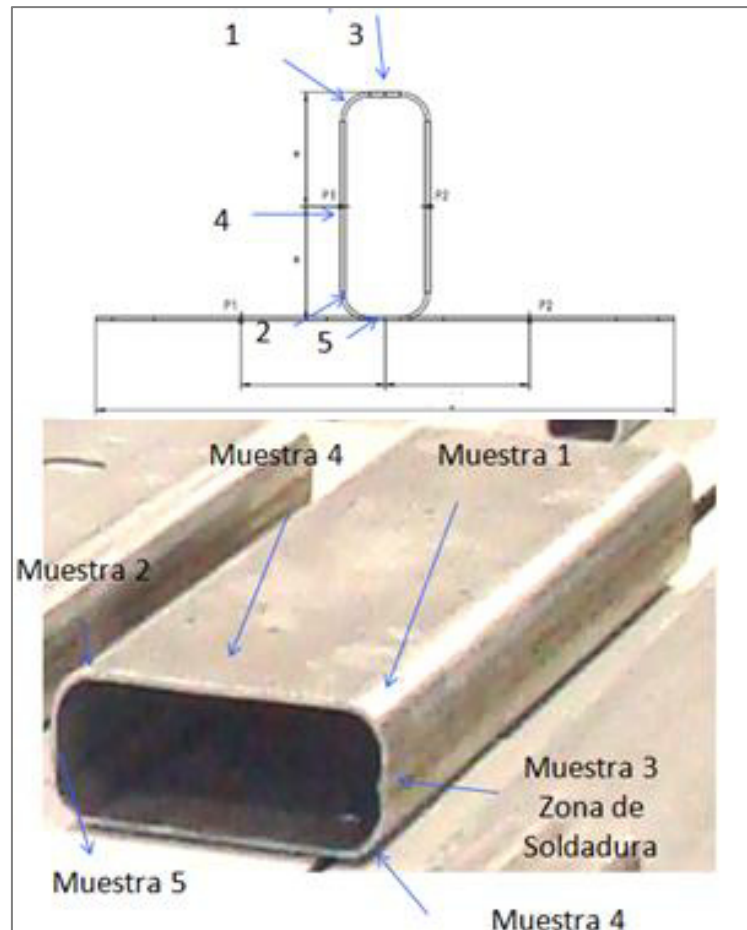
En la figura 5.7 se muestra el durómetro Vickers con el cual se realizaron los ensayos, y en las figuras 5.8 y 5.9 se muestran las secciones cortadas obtenidas y la localización de las diferentes áreas de la pieza o perfil tubular obtenido del proceso.



**Figura 5.7. Microdureza Vickers**



**Figura 5.8 Corte de secciones de las muestras de medición de dureza.**



**Figura 5.9 Ubicación de las muestras para estudio en diferentes zonas del perfil rectangular conformado mediante laminación no plana.**

### 5.2.3 Caracterización metalúrgica.

El objetivo de la caracterización metalúrgica detallada se realizó debido a que se desconocían todas las propiedades microestructurales del material utilizado en este trabajo, así mismo para corroborar que no existiera un cambio en su microestructura efectuado por el proceso y defectos posibles en el material antes y después del proceso. También se realizó la medición de grano para compararlo con el de la literatura [102] y que cumpliera con las propiedades de conformabilidad necesaria ya que el producto es utilizado en un sector metal mecánico importante a nivel mundial.

### 5.2.3.1 Pruebas metalográficas.

Para la caracterización microestructural se tomaron de referencia las normas ASTM-E3[91] y ASTM 407[92] para preparación metalográfica y ataque químico, respectivamente. Como primer paso se realizaron los cortes de las muestras en una cortadora marca Struers que se ilustra en la figura 5.10, posteriormente se montaron en frío y se realizó un pulido fino para concluir con el ataque químico que se realizó con una solución de ácido nítrico al 3% en 93% de alcohol metanol (figura 5.11).



**Figura 5.10** Cortadora y pulidora utilizados para la preparación de las muestras.



**Figura 5.11** Muestras metalografías.

La caracterización por microscopía óptica se realizó en un microscopio NIKON y el analizador de imágenes CLEMEX que se muestra en la figura 5.12, para obtener la microestructura del material y el tamaño de grano en base a la norma ASTM E114 [93].



**Figura 5.12 Microscopio Óptico Nikon**

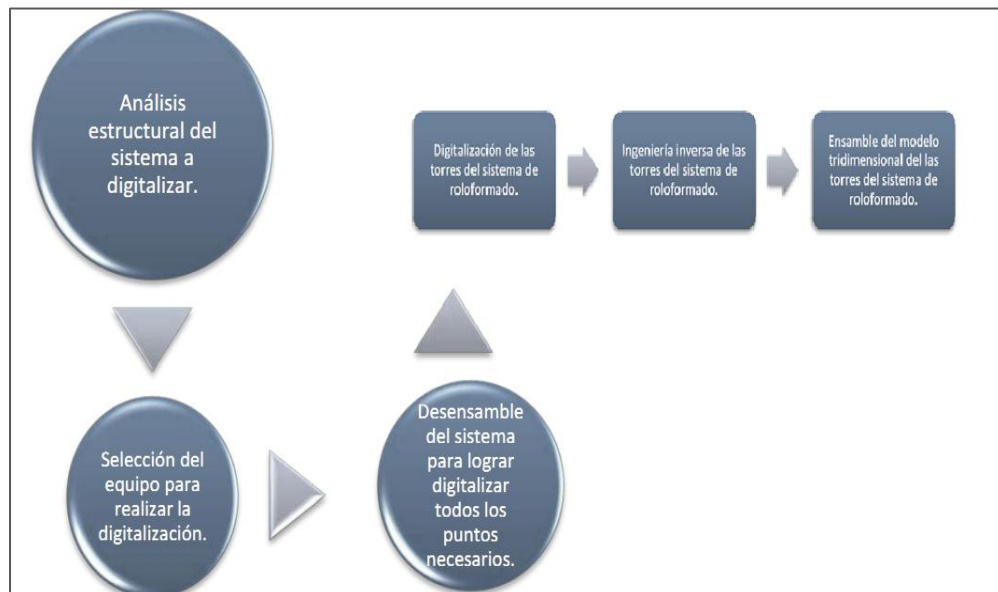
### **5.3 Ingeniería inversa y modelado.**

Para obtener las geometrías del sistema de laminación no plana se utilizó una metodología de ingeniería inversa<sup>3</sup> por medio de digitalización. La metodología de digitalización que se llevó a cabo en este trabajo fue propuesta por Botello [94], se

---

<sup>3</sup> La ingeniería inversa es el proceso de reconstrucción, de forma informática, de una pieza sin necesidad de documentación, partiendo de un modelo físico (modelos de diseño, industriales, artísticas, prototipos, etc.) para obtener el modelo CAD y del diseño conceptual del objeto en cuestión. También se refiere al proceso de capturar digitalmente entidades físicas de un componente concepto [95] el cuál es definido por investigadores como Abella et al. [96] que describen a la ingeniería inversa como: el concepto básico de producir una parte basada en un modelo original o físico sin la necesidad de un dibujo de la ingeniería. Yau et al. describen a la ingeniería inversa, como el proceso de recabar nuevas geometrías de una parte manufacturada digitalizando y modificando un modelo CAD existente [97].

muestra en la figura 5.13, la cual establece como primer punto un análisis estructural ya que el sistema está compuesto por diferentes partes y para esto se llevó a cabo un análisis visual para establecer la técnica de digitalización adecuada, ya que como se puede observar en la figura 5.14 el sistema se considera complejo.



**Figura 5.13 Metodología para la digitalización [94].**

Se prosiguió a la selección del equipo digitalizador, existe una variedad de técnicas para elegir el tipo de digitalizador, en resumen se pueden clasificar estas técnicas de contacto y no contacto [98] por lo que se tomó la decisión de elegir un digitalizador de no contacto ya que esta técnica presenta la ventaja que se puede realizar en el área de trabajo, en el caso del sistema de laminación no plana por su constante trabajo en el proceso no podía ser deshabilitado y trasladado al laboratorio.





**Figura 5.14 Línea de laminación no plana.**

En la técnica de no contacto existe una gran variedad de digitalizadores, esta variación se da debido al tipo de luz que hacen reflejar el objeto. La determinación de parámetros ideales para la selección de digitalización se basó principalmente en el tipo de técnica de no contacto, equipo portátil, precisión, limitantes de tamaño nulas, reflectividad del material controlable.

Para la digitalización del sistema de laminación no plana se empleó el equipo Konica Minolta, Range7 que se muestra en la figura 5.15, en el Anexo 7.2 B se muestra las especificaciones del digitalizador 3D.





**Figura 5.15 Digitalizador Konica Minolta Range 7 y configuración del sistema a utilizar (Tomada de [www.konicaminolta.com.mx](http://www.konicaminolta.com.mx))**

Para asegurar la precisión de digitalización del sistema, éste tiene que estar por debajo de los  $40\mu\text{m}$ , cabe mencionar que existen incertidumbres en las medición realizadas en esta índole, las cuales son eliminadas en el proceso de modelación [99].

Se prosiguió con el desensamble para la digitalización de cada uno de los componentes del sistema de roloformado como se ilustra en la figura 5.16.

Con los datos recabados con el digitalizador se utilizó el software Rapidform XOR distribuido por INUS Technology utilizado en ingeniería inversa en el ámbito ingenieril que cuenta con metodologías de ingeniería inversa tercera generación, esto quiere decir que utiliza NURBS, el cual es un modelo matemático para generar superficies, con el cual se puede obtener modelos tridimensionales totalmente paramétricos.



**Figura 5.16 Desensamble realizado en planta.**

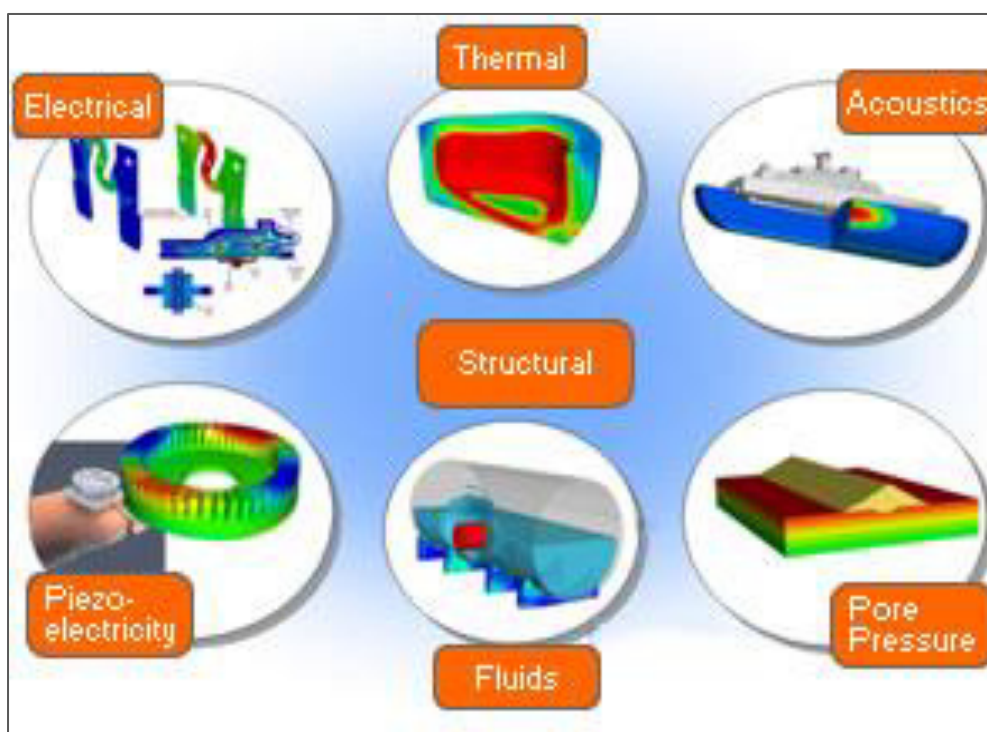
Al obtener este modelo paramétrico se exportó al programa computacional CAD. La geometría del modelo se construyó en el paquete de diseño Solid Works<sup>MR</sup> y CATIAV5R20<sup>MR</sup>, se modeló cada parte que forma el tren de laminación no plana (figura 5.16) en 3D y se exportó en el formato \*.dxf por medio de AUTOCAD<sup>MR</sup> versión 2010 y 2013 para posteriormente trabajar los componentes en 2D.

#### **5.4 Desarrollo del modelo numérico.**

Para elaborar el modelo numérico se utilizó un paquete computacional comercial de elementos finitos ABAQUS<sup>MR</sup>, que permite la resolución de problemas de todo tipo, tanto lineales, como no lineales. Además que puede trabajar con cualquier tipo de material y tipo de trabajo estructural, así como simular problemas de diferentes áreas,

como transferencia de calor, difusión de masas, acústica entre otras áreas como se muestra en la figura 5.17.

Para este trabajo se ha elegido trabajar con ABAQUS como modelo dinámico explícito, esto debido que implica contacto y fricción durante el proceso de LNP, dado que la velocidad de formación es generalmente lenta en el proceso puede ser considerado como un problema cuasi estático. Sin embargo se debe verificar la estabilidad de cálculo de las soluciones para asegurar que esta condición esté cerca de la condición cuasi estática.



**Figura 5.17 Módulos ABAQUS<sup>MR</sup> [100].**

Con lo que respecta a las características técnicas del equipo de cómputo, son de gran importancia, ya que de éstas depende del tamaño del modelo a procesar, y se utilizará como referencia para el interés de replicar el modelo y poder optimizarlo. El

equipo que se utilizó para la elaboración del modelo y el procesamiento de datos del presente trabajo cuenta con las siguientes características: un procesador Intel Xeon X3450, el cual tiene una velocidad de 2.67GHz, 16 GB de memoria RAM y con una capacidad de disco para almacenamiento de 463GB.

#### **5.4.1 Etapa a simular.**

El proceso de laminación no plana es un proceso para la producción de perfiles tubulares de diferentes secciones transversales mediante un formado consecutivo de una chapa o lámina mediante rodillos, sin presentar un cambio en el espesor de ésta.

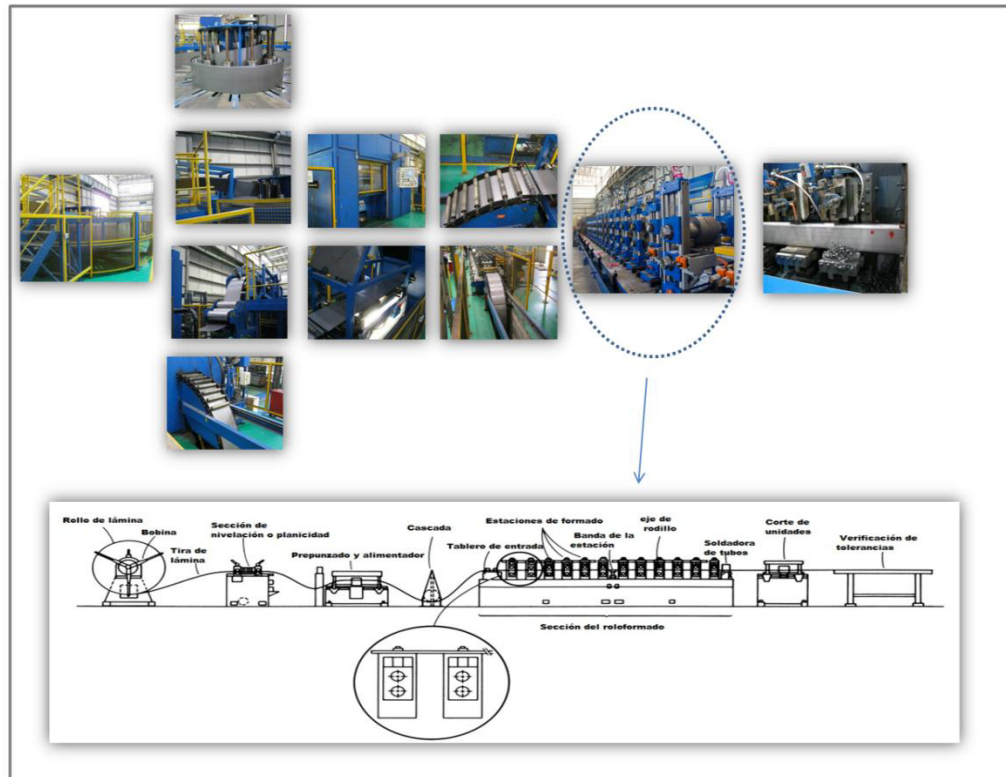
Este proceso consta de varias etapas, comenzando con la colocación de un rollo de lámina, como materia prima, las características de ésta se muestran en la Tabla 5.1 como son: el espesor, el ancho del fleje, el peso, diámetro interno y externo de la bobina, y con estos datos se calculó la velocidad de rotación de la bobina.

**Tabla 5.1 Características del material a conformarse**

Disponibilidad del acero	HSLA50 en bobinas
Espesor	3.2 mm
Ancho del fleje	Máximo 483 mm
Velocidad de rotación de la bobina	54 rpm.
Diámetro interno	508mm
Diámetro externo	1879.6mm
Peso	10 Ton.

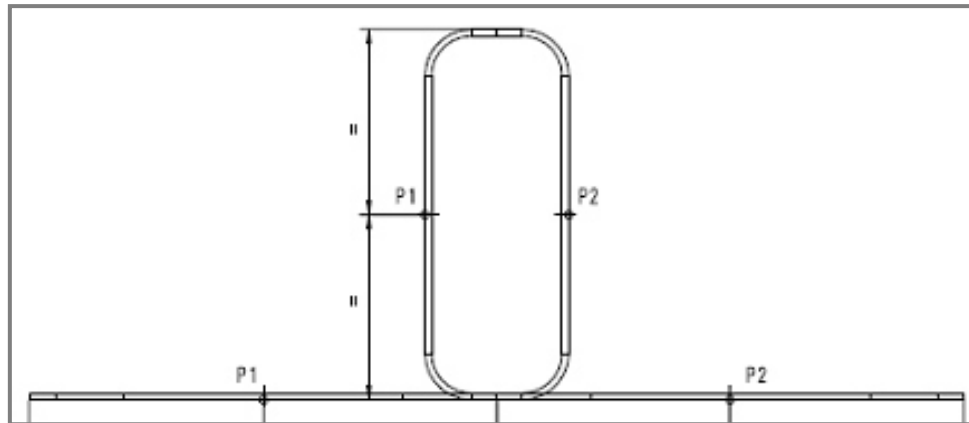
La siguiente etapa es el desenrollado, continuando con un enderezado, una inspección de planicidad, un proceso de perforado en el caso que se requiera en el producto final, un proceso de inspección y después entra a la etapa de roloformado, en esta se forma el perfil tubular y posteriormente pasa a una etapa de unión y por último

de corte. Estas etapas se ilustran en la figura 5.18 y haciendo énfasis en la etapa a simular en este trabajo que es el de roloformado.

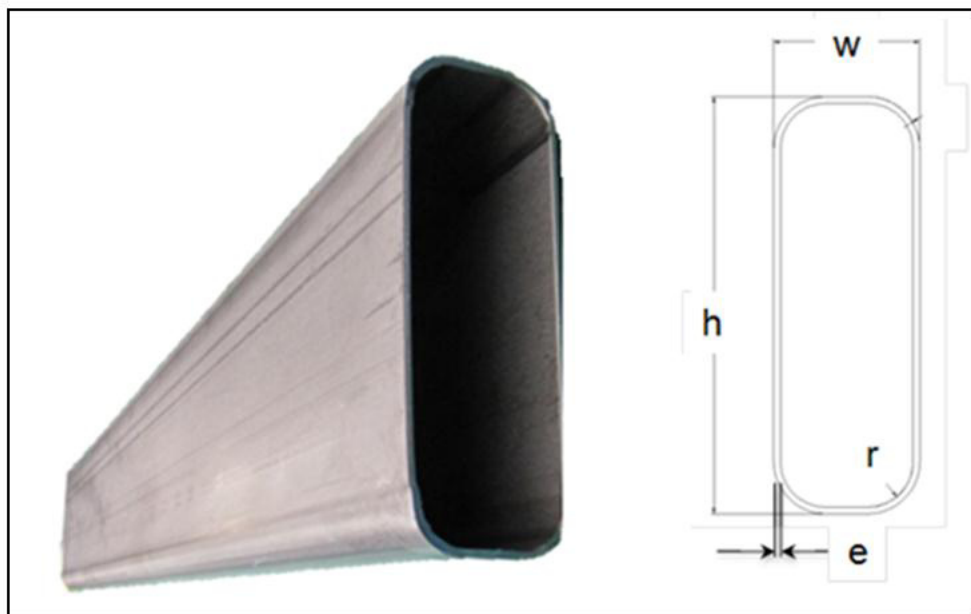


**Figura 5.18 Esquema del proceso de laminación no plana para el conformado del perfil tubular rectangular**

Así mismo, en este punto se presentan los principales parámetros y variables para simular el comportamiento mecánico de la chapa o lámina de acero HSLA50 durante el proceso de laminación no plana. La geometría inicial y final de la chapa se muestra en la figura 5.19 y el perfil tubular de sección rectangular se muestra en la figura 5.20.



**Figura 5.19 Geometría inicial y final.**

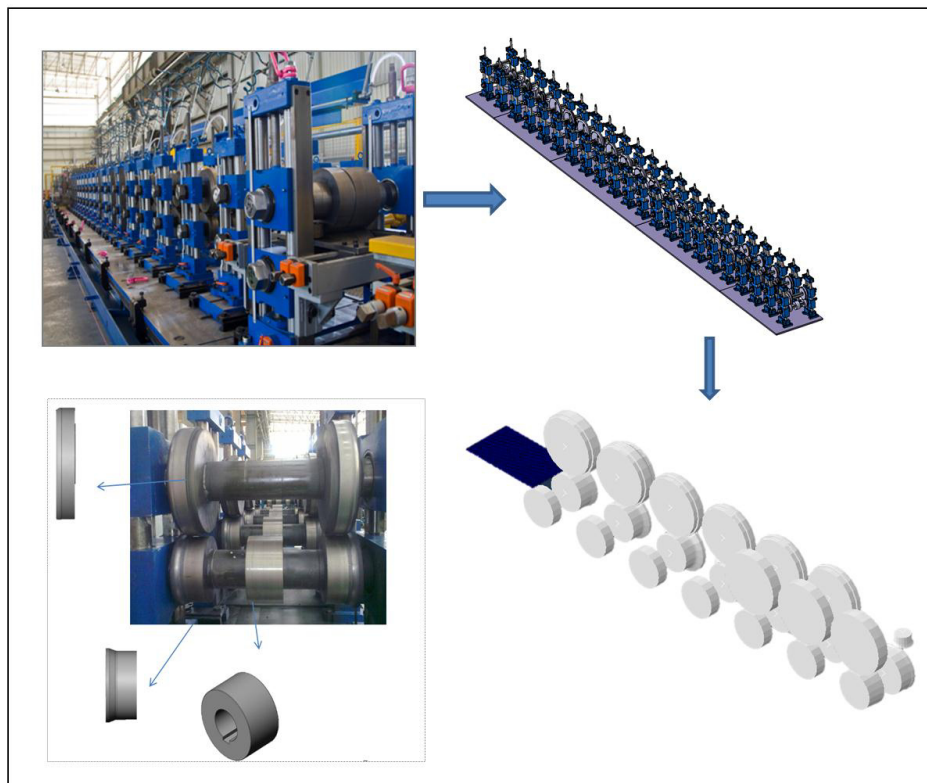


**Figura 5.20 Perfil tubular rectangular obtenido del proceso de laminación no plana.**

#### **5.4.2 Parámetros y simplificaciones del proceso de la laminación no plana.**

El proceso completo de laminación no plana consta de varias etapas descritas en el punto anterior, en este trabajo solo se concreta como objeto de estudio la etapa de formado o rolado de la lámina por diferentes pases. La figura 5.21 muestra la etapa a

simular numéricamente, como se puede observar el sistema es complejo por lo que se realizó una simplificación, siguiendo el esquema explicado en el Capítulo 4 y mostrado en la figura 4.1, acerca de la representación del MEF, en el cual se identifica el problema físico y se realiza la simplificación del mismo.



**Figura 5.21 Simplificación del sistema de laminación no plana.**

#### **5.4.2.1 Diseño de experimentos.**

En este punto se muestra el diseño de experimentos multifactorial y el procedimiento estadístico que se siguió.

Se inició por establecer las variables que representan un interés en el proceso, planteando las variables cualitativas y las cuantitativas, considerando la aparición de

algún efecto especial como el aspecto del acabado superficial, siendo éste una variable cuantificable pero en la mayoría de los casos no presenta límites claros para tomar una decisión, por lo que se descarta en este trabajo. Por lo que se toman solo aquellas variables que son medibles, asignando un valor numérico representativo, clasificando estas variables en función de la magnitud que se representa. Esta clasificación se muestra en la Tabla 5.2, donde se presenta las variables de interés en el proceso en función de la magnitud, ya sea mecánicas, geométricas y económicas, con respecto a las mecánicas se muestran la fuerza, momentos, potencia, energía y frecuencias en el proceso; con respecto al material se muestran las propiedades, el estado tensional y las deformaciones. En cuestión a la geometría, principalmente abarca las dimensiones y la forma.

**Tabla 5.2 Variables de interés en el proceso en función de la magnitud.**

<b>Mecánicas</b>	<b>Geométricas</b>	<b>Económicas</b>
Fuerza y momentos	Macrogeometría	Costos
Potencia necesaria en el proceso	Dimensiones y forma	Duración de los herramientales
Energía necesaria para obtener el perfil	Microgeometría	Tiempos
Propiedades del material		
Frecuencias propias		
Estados tensionales del material		
Deformaciones sufridas por el material		

En la parte económica, principalmente se toman en cuenta lo relacionado con la productividad del proceso, como es la duración de los herramentales, los tiempos de producción y los costos.

Partiendo de lo anterior se definieron los factores que influyen en estas variables; basándose en la organización de los factores se establecen los tratamientos; se



denomina como tratamiento a las variaciones del sistema introducidas durante el experimento y se obtienen por medio de la combinación de diferentes niveles de los factores; al conjunto de tratamientos con características comunes se denomina clasificaciones [101].

En base a las premisas establecidas en el punto anterior se establece la metodología del diseño de experimentos. En la Tabla 5.3 se muestra la estructura del trabajo experimental.

**Tabla 5.3 Estructura del trabajo experimental**

<b>Factores principales</b>	<b>Factores Secundarios</b>
Velocidad de la placa	Ciclos sucesivos
Velocidad de los rodillos	Lubricación utilizada
Ajuste entre rodillos	Radios de curvatura de los rodillos
Distancia entre cada estación	Rigidez del conjunto
Diámetro de los rodillos	Presión ejercida por los rodillos
Geometría y radios de curvatura del perfil estructural	Forma especial de los rodillos
Espesor de la placa	Material de los rodillos
Material de la placa	Operaciones previas
Número de estaciones	Flechas entre rodillos y casete

La ventaja que se tiene al establecer un diseño de experimentos es establecer un orden de ejecución y a la vez eliminar aquellos tratamientos que no aporten información valiosa.

En la Tabla 5.4 se muestran los factores a considerar del proceso de LNP y las condiciones que se aplicarán al modelo.

**Tabla 5.4 Factores y sus respectivos valores.**

<b>Factores Principales</b>	<b>Condición</b>	<b>Unidades</b>
Velocidad de la placa	Media**	mm/s
Velocidad de los rodillos	Variable*	rad/s
distancia entre cada stand	Alta	mm
Números de estaciones	Alta	**

\*Velocidad de la placa al 75% del proceso

\*La velocidad depende del diámetro de los rodillos

Para todas las pruebas que se realizaron durante el proceso de simulación se tomó un intervalo de datos para cada uno de los factores que se pueden observar en la Tabla 5.5, cabe destacar que estos valores no se asemejan a ninguno de los reportados en la literatura consultadas en las referencias [47, 50, 51, 62], la mayoría de estas pruebas se trabajan en prototipos a nivel laboratorio; la información de este trabajo se obtuvo de una línea de proceso real utilizada en una empresa de la localidad para elaborar perfiles estructurales y los valores utilizados son reales para asegurar la confiabilidad del modelo.

**Tabla 5.5 Condiciones experimentales.**

<b>Factores Principales</b>	<b>Rango</b>	<b>Unidades</b>
Velocidad de la placa	300-400	mm/s
Velocidad de los rodillos	2-5	rad/s
distancia entre cada stand	300-630	mm
Números de estaciones	18-22	**
Fricción estática y dinámica	0.3-0.12	**

Los datos generales de la máquina se pueden observar en la Tabla 5.6 Por lo consiguiente se establecieron valores fijos como son el espesor de la placa, las propiedades del material y la geometría del perfil estructural (Figura 5.7).

**Tabla 5.6 Características de la máquina de laminación no plana**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Número de pasos o etapas de conformado	22
Separación vertical entre centro de ejes conformadores	238 mm
Separación entre rodillos	3.2 mm
Variación continua de velocidad de avance del material	23.29 m/min
Velocidad de producción	>10 perfiles/min

**Tabla 5.7 Factores y valores fijos del proceso de laminación no plana**

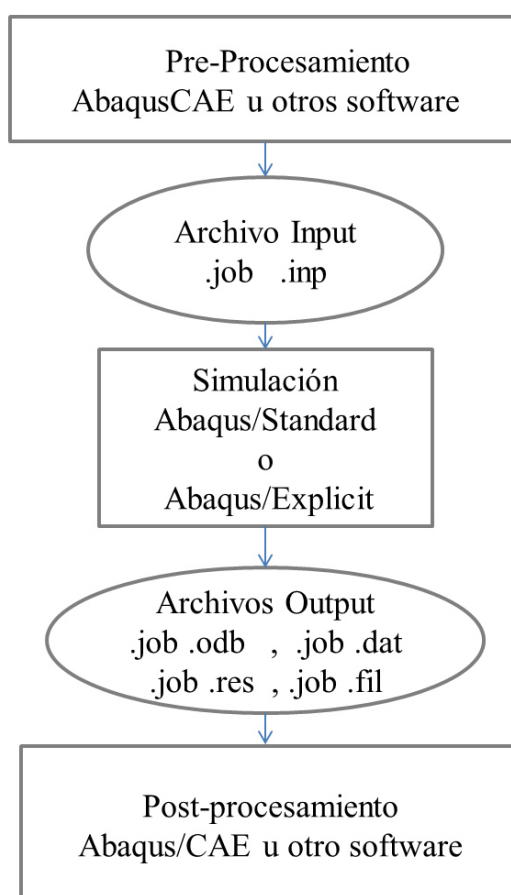
<b>Factores Principales</b>	<b>Valores Fijos</b>
Velocidad de la placa	Espesor de la placa
Velocidad de los rodillos	Propiedades del material
distancia entre cada stand	Geometría y radios de curvatura del perfil estructural
Números de estaciones	

### 5.4.3 Etapas del desarrollo del modelo mediante ABAQUS<sup>MR</sup>.

La metodología de análisis en ABAQUS<sup>MR</sup> consiste en tres etapas: pre-procesamiento, simulación y post- procesamiento. Estas etapas están relacionadas mediante archivos, como se ilustra en la figura 5.22, la etapa de pre-procesamiento consiste en modelar el problema físico, en el que se crea un archivo \*.inp, denominado input file, el cual contiene la información geometría, los datos de discretización, condiciones de contorno e información de las variables de salida que se utilizan en el análisis de resultados.

En la segunda etapa denominada simulación se generan varios archivos, entre ellos \*.sta (*Status file*) en el cual permite consultar el número de incrementos necesarios de cada etapa de resolución, otro archivo es \*.dat (*Data file*), el cual contiene la información del mallado, proporcionando el número de elementos y el número de grados de libertad (DOF). Otro archivo importante es el \*.msg (*Message file*) que

proporciona la información de los errores que se presentan en la simulación, en el caso de no presentarse errores durante el proceso de simulación se crea un archivo output con extensión \*.odb, este archivo contiene todos los resultados necesarios para el post-procesamiento. En la última etapa de post-procesamiento se puede trabajar en cualquier software, en este caso se utilizó ABAQUS<sup>MR</sup>, ya que cuenta con un módulo de visualización de resultados en el cual se trabaja con el archivo output y se realiza el análisis de los mismos.



**Figura 5.22 Etapas de simulación y archivos en ABAQUS<sup>MR</sup>.**

ABAQUS<sup>TM</sup> está subdividida en 9 módulos: *Part*, *Property*, *Assembly*, *Step*, *Interaction*, *Load*, *Mesh*, *Job*, *Visualization*. Estos módulos se utilizan para la realización del modelo y la creación de las condiciones bajo a las cuales estará sujeto.

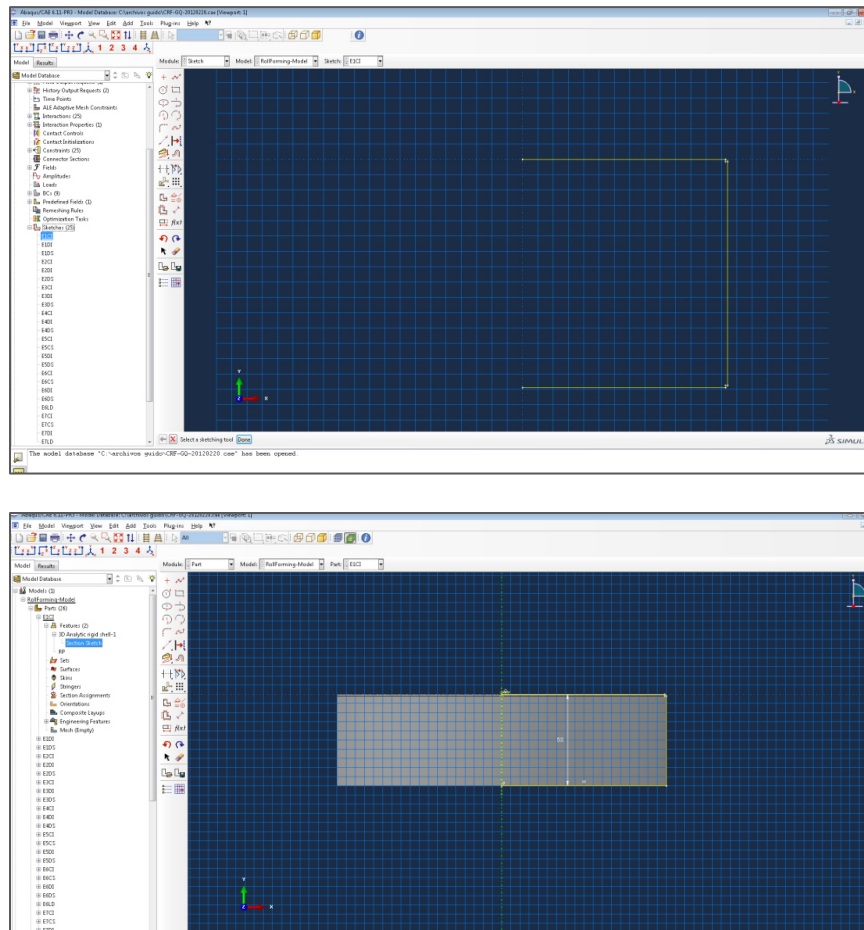
Para la construcción del modelo se utilizó el módulo *Part* en el cual se crean los elementos, partes y geometrías del sistema, debido a que este módulo está limitado a la creación de elementos complejos, se utilizó el paquete de diseño AUTOCAD<sup>MR</sup> versión 2010 para importar los perfiles en extensión \*.*dxf*. de cada rodillo de trabajo (Figura 5.23). Finalmente, la placa se generó directamente en ABAQUS<sup>TM</sup> (Figura 5.24).

Las unidades que se utilizaron en este trabajo se muestran en la Tabla 5.8 y están derivadas en el Sistema Internacional (SI), a fin de asegurar la consistencia del modelo, ya que el software no define algún sistema de unidades específico [100].

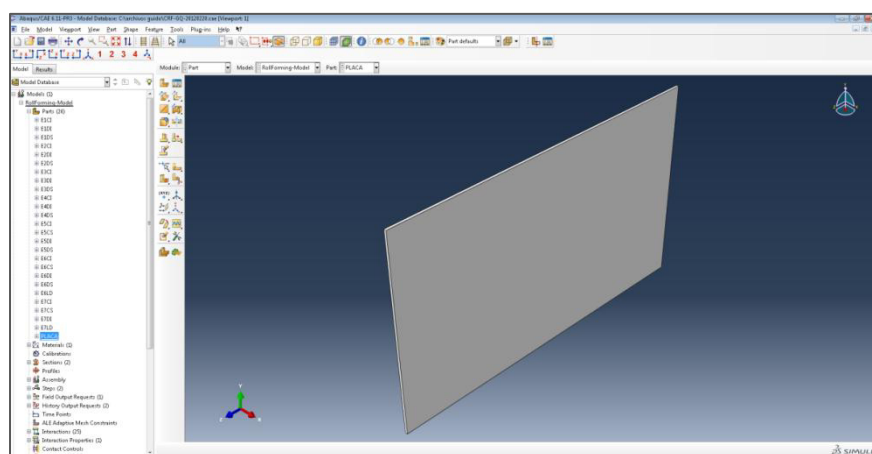
**Tabla 5.8. Sistema de unidades utilizada en el modelo de la laminación no plana.**

Unidad	Longitud	Fuerza	Masa	Tiempo	Esfuerzo	Energía	Densidad
<b>SI (mm)</b>	mm	N	Tonne (10 <sup>3</sup> kg)	s	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	mJ (10 <sup>-3</sup> J)	Tonne/mm <sup>3</sup>

Los rodillos de trabajo se consideraron como sólidos rígidos, es decir que los rodillos no se contemplan para el análisis, por lo que en ellos no se realiza ningún cálculo. Con lo que respecta a la lámina, ésta se diseñó como sólido deformable ya que es la parte de estudio, en la lámina se especificaron las condiciones de frontera y las propiedades del material.



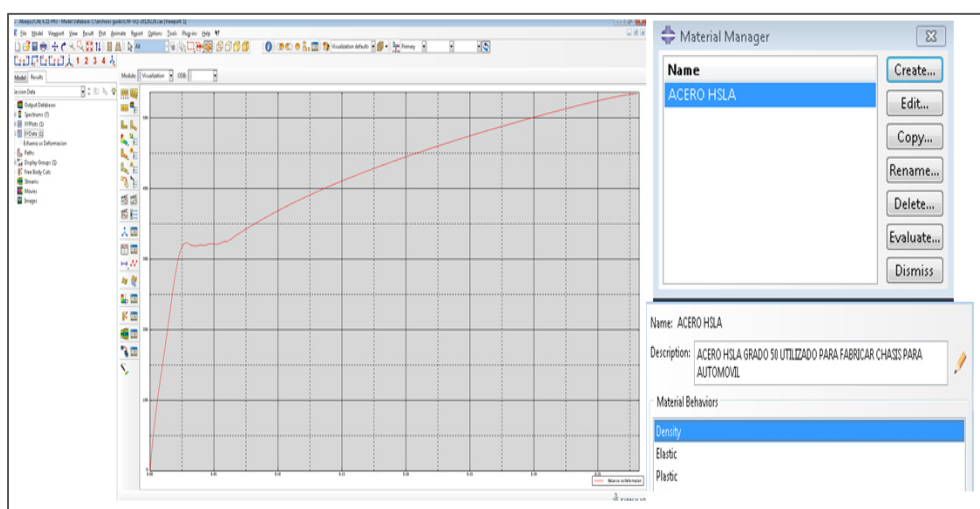
**Figura 5.23 (a) Importación de archivo \*.dxf al sketch y (b) creación una parte a partir de un sketch en ABAQUS<sup>MR</sup>.**



**Figura 5.24 Creación de la lámina como solido deformable en ABAQUS<sup>MR</sup>.**

En el módulo *Property* se definieron las propiedades del material, las cuales dependen del tipo de análisis. Las propiedades que se alimentan en el programa pueden ser mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas, electromagnéticas, entre otras.

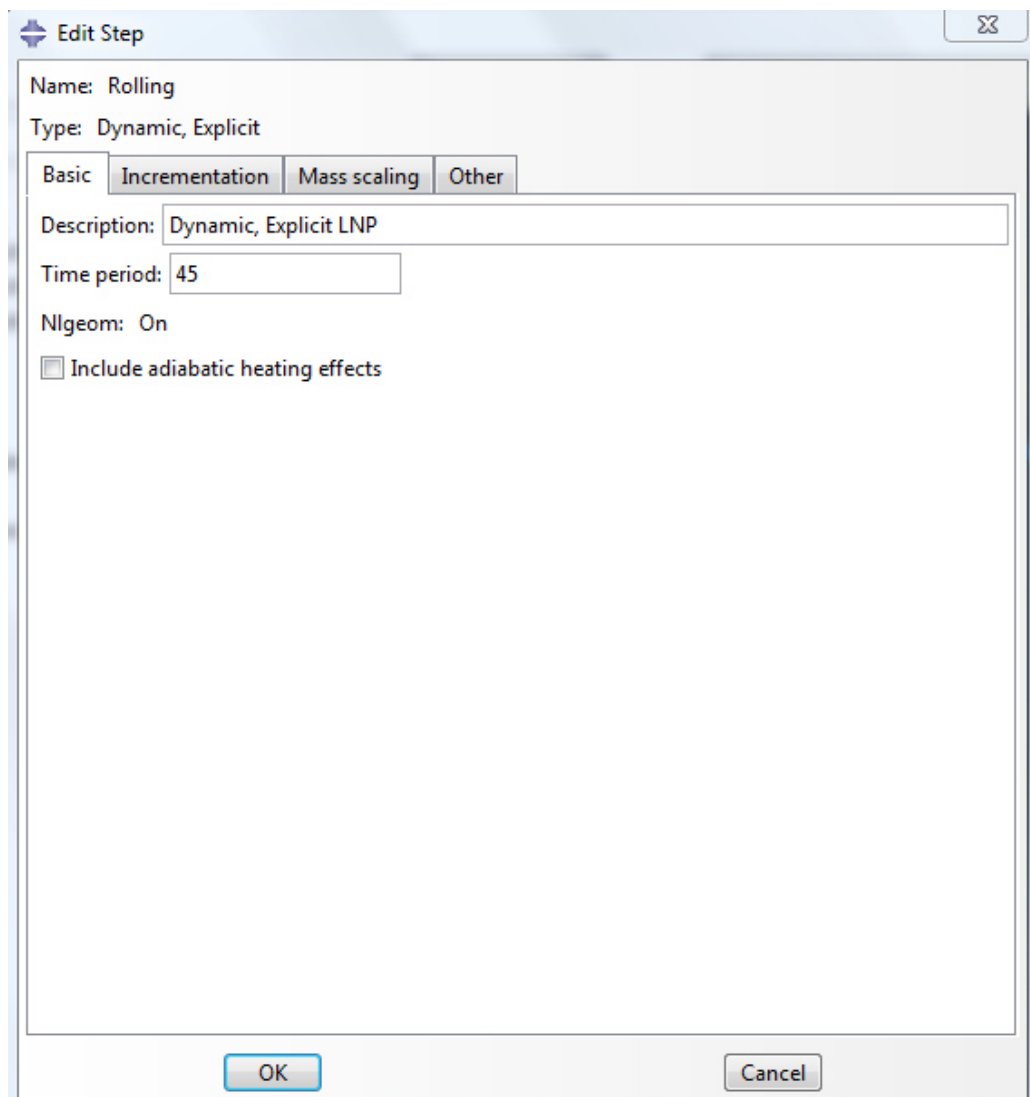
En este módulo se definieron y se asignaron las propiedades del acero HSLA a la lámina obtenidas mediante ensayos mecánicos (Figura 5.25). Las propiedades mecánicas que se definieron fueron las elásticas (módulo de Young y el coeficiente de Poisson) y las del comportamiento plástico definido por la ecuación constitutiva, estas propiedades fueron alimentadas en forma de Tabla y por último las propiedades físicas como la densidad. Todas las propiedades de obtuvieron a temperatura de trabajo, es decir a temperatura ambiente. No se asignaron propiedades de los rodillos ya que se consideraron como superficies rígidas analíticas, quedando como perfectamente rígidos e indeformables.



**Figura 5.25 Propiedades del material**

El módulo *Step* (Figura 5.26), es fundamental para el desarrollo del modelo, ya que en éste se define el tipo de análisis como estático, dinámico implícito, dinámico explícito, transferencia de calor, entre otros.

Los tipos de análisis se pueden llevar a cabo mediante secciones llamadas pases, en éstas existen opciones para el incremento de tiempo y escalamiento de masa, el primero es calculado para que el análisis se realice de una manera estable y el segundo solo se activa cuando se requiere disminuir el tiempo de cómputo.

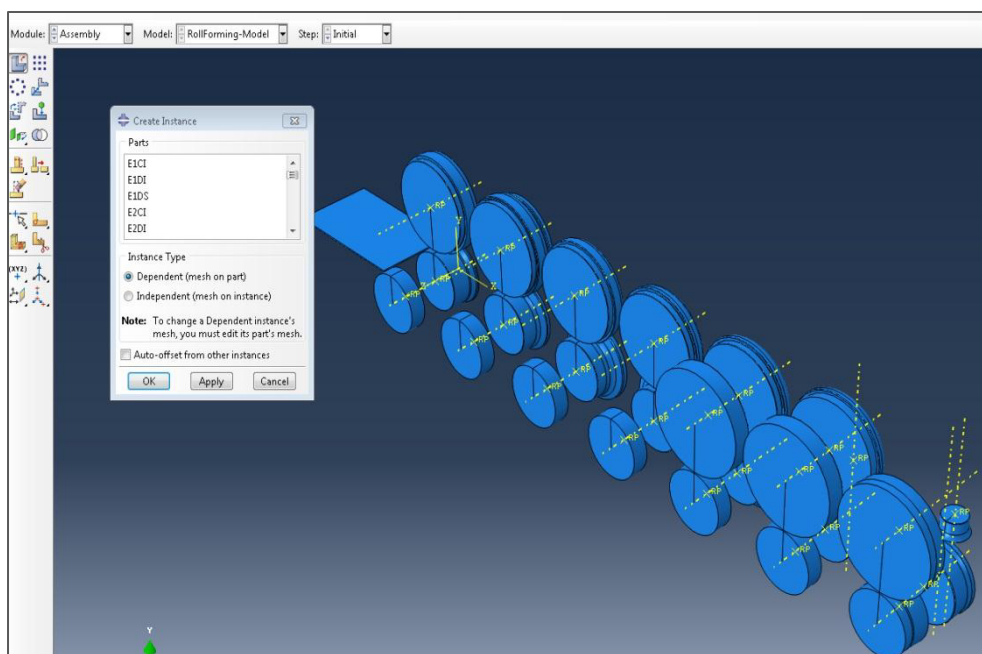


**Figura 5.26 Módulo Step.**



Para el modelo, el tiempo de duración del proceso es de 45 s y se utilizó un incremento automático.

Para conseguir el modelo final en el cual se realizó el análisis, se utilizó el módulo *Assembly*, en el cual se realiza el ensamblado de todas las partes definidas en el módulo *Parts*, de tal modo que todas estén en el sitio correspondiente de manera que simule el sistema o diseño real. El ensamble del proceso se ilustra en la figura 5.27.

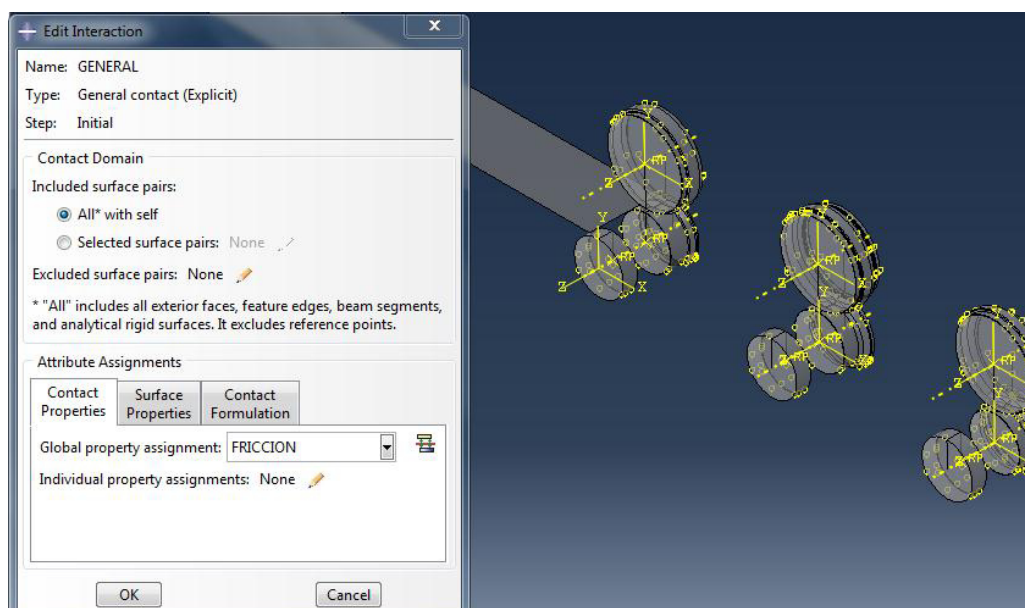


**Figura 5.27 Módulo Assembly.**

El siguiente módulo que se utilizó fue el *Interaction*, en éste se definen todas las interacciones que existen entre las partes del modelo. Para el modelo del proceso de laminación no plana se creó una interacción de contacto general de superficie-superficie entre la superficie del rodillo y la superficie de la lámina, se utilizó la fricción estática y dinámica en el modelo, además se definió a cada rodillo como un

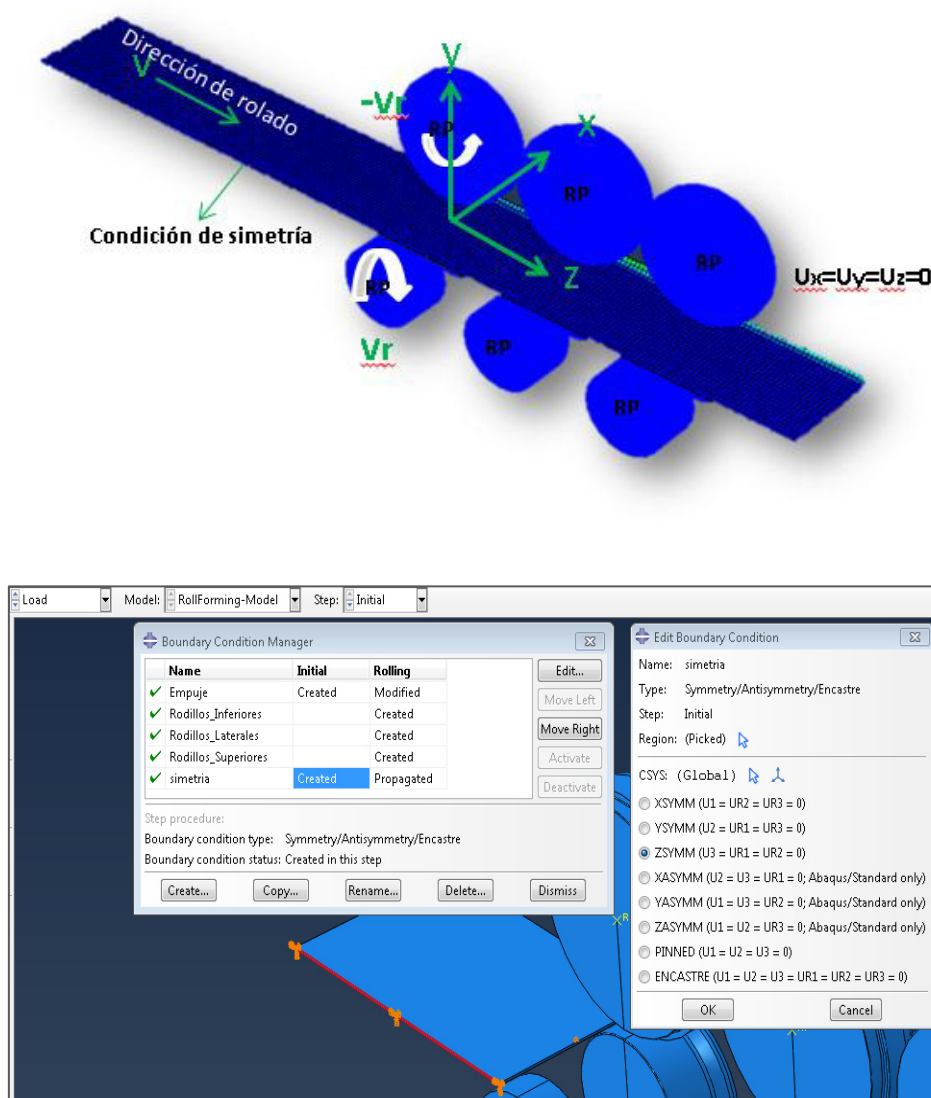
cuerpo rígido con una superficie rígida y un punto de referencia (RP) para colocar condiciones de frontera.

En la figura 5.28 se ilustra la condición de interacción entre las superficies de los rodillos y la superficie de la lámina.



**Figura 5.28 Superficies de contacto general generadas entre rodillos y la lámina.**

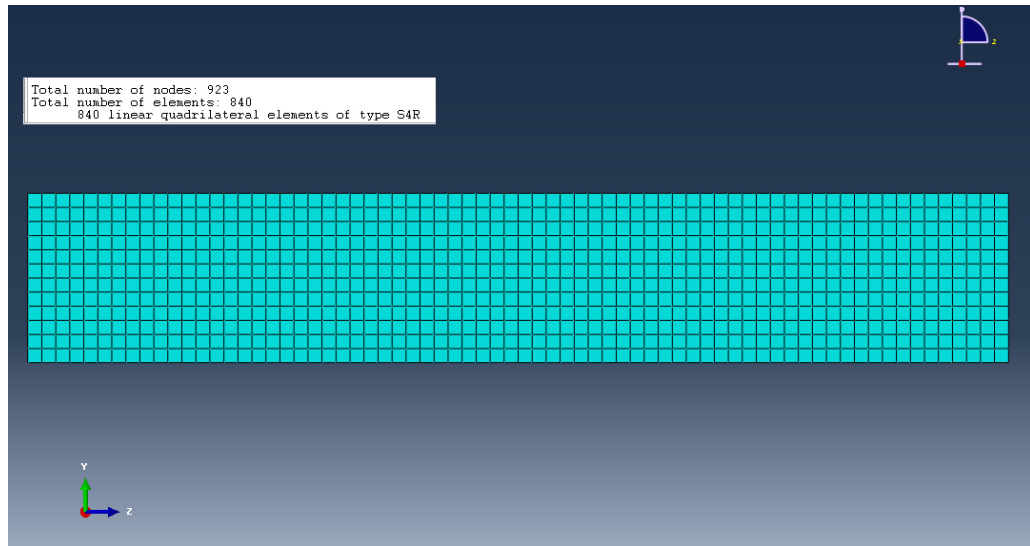
En el módulo *Load* se definen las cargas que tendrá el sistema. Las variables de entrada son: velocidad de la lámina, la velocidad de los rodillos, así como también, las restricciones de la lámina y de los rodillos. También se agregó la condición de simetría en el plano correspondiente, como se muestra en la figura 5.29.



**Figura 5.29** Condición de simetría en la lámina y restricción de desplazamiento en rodillos.

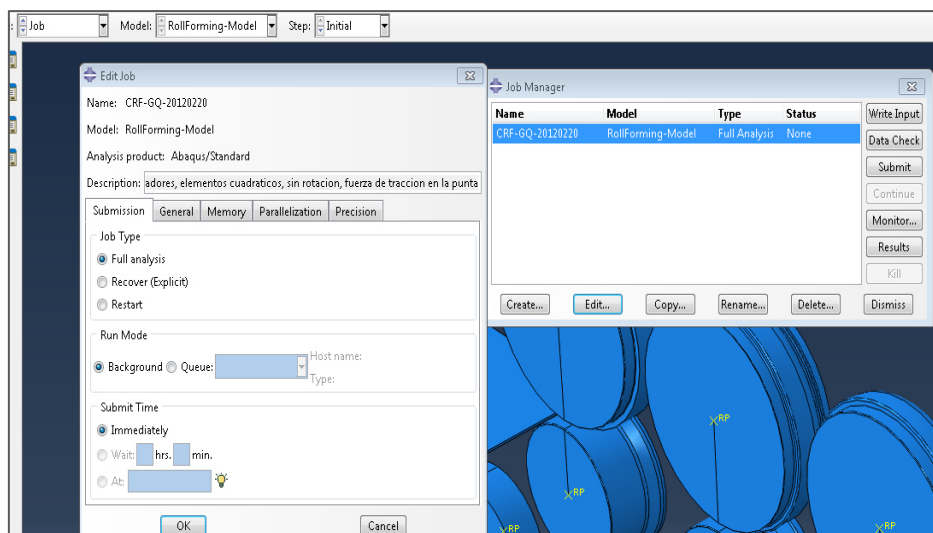
El módulo *Mesh* genera el mallado de cada parte del sistema dependiendo de la complejidad de los elementos, en este caso solo se realiza en la lámina, utilizando elementos tipo cascarón denominados SR4, los cuales se detallan en el Capítulo 6; al realizar el mallado el componente o sección mallada cambia a esta condición y se refleja en forma cuadriculada, en el caso de la lámina se observa en la figura 5.30 y

significa que la geometría esta discretizada y genera el número de elementos y nodos con los cuales se resolverá el sistema de ecuaciones.



**Figura 5.30 Malla de la placa.**

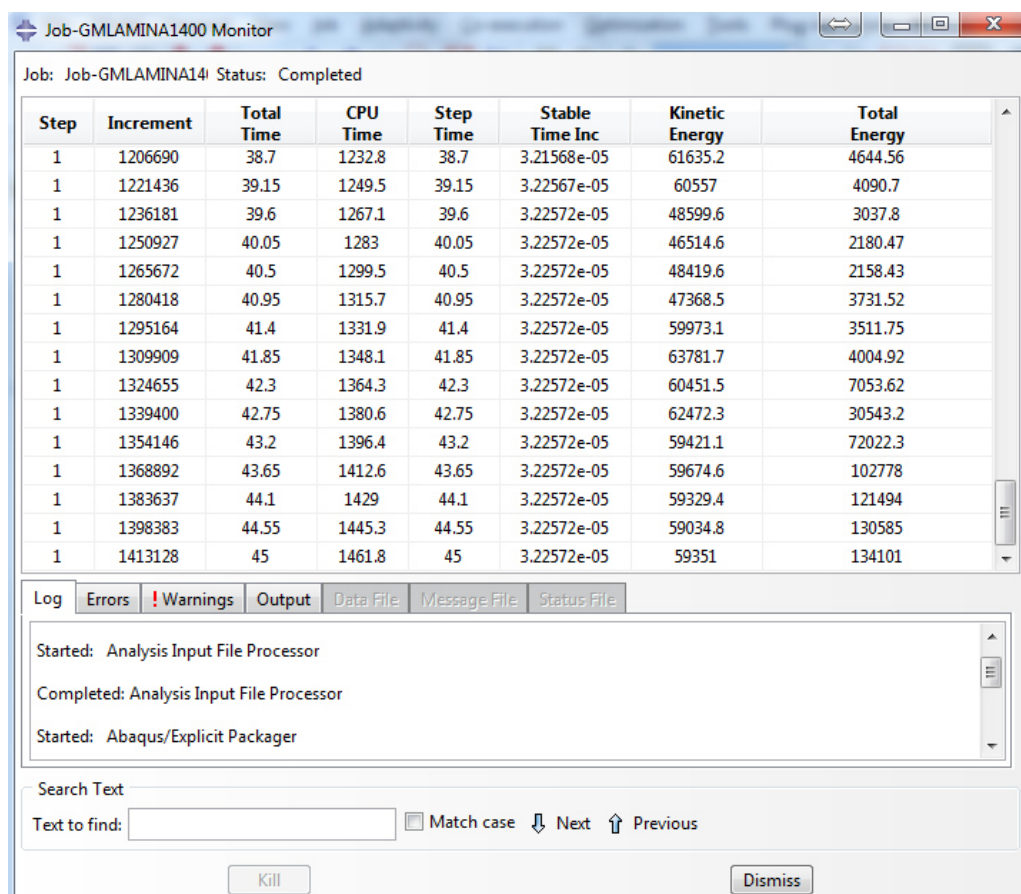
En el módulo de *Job* se crea un trabajo de análisis que asocia el modelo y las variables del análisis, al cual se le define un nombre, que se ve reflejado en el análisis y para someter el trabajo al análisis se realiza mediante la opción Submit, como se ilustra en la figura 5.31. Durante esta etapa se crea el archivo de entrada \*.inp, el cual es sometido al análisis.



**Figura 5.31 Proceso de análisis del modelo.**

Después que se somete el trabajo al análisis, la información en la columna de *Status* se actualiza para indicar el estado del trabajo y se pueden observar mediante *Monitor* los pasos generados y cuando este se encuentra en *Completed*, quiere decir que el análisis se ha completado, como se ilustra en la figura 5.32,. La salida se ha escrito en la base de datos de generando un archivo *\*odb*.

En el caso de presentar algún error en la etapa de simulación se crea un archivo *\*msg*, que detalla el error generado y posiblemente el estado (*Status*), sea abortado, esto quiere decir que se interrumpe el análisis.



**Figura 5.32 Monitoreo del proceso de corrida de simulación.**

Por último en el módulo de *Visualization* se procesa la base de datos generada por ABAQUS durante el análisis, esto con el fin de visualizar e interpretar los resultados. El programa computacional muestra una gráfica en base a colores proporcionando como variables de respuesta los esfuerzos presentado en varios criterios. Los resultados del proceso de laminación no plana obtenidos en este módulo se presentan en el Capítulo 6.

#### 5.4.4 Pruebas para validación geométrica del modelo.

Para comprobar la simulación del proceso, se deben de tener datos numéricos, éstos se obtuvieron mediante la medición geométrica de la lámina por medio de un brazo de mediciones FARO<sup>MR</sup>, las cuales se realizaron en diferentes pases del proceso de laminación no plana.

Se realizaron mediciones en 15 puntos en el ancho de la lámina como se muestra en la figura 5.33 y se procesaron en el paquete computacional ORIGIN 8.6.



**Figura 5.33** Medidas de puntos en la lámina entre la estación de rolado 1 y 2.

## Capítulo 6

### Resultados y discusión

#### 6.1 Introducción.

En este Capítulo se presentan los resultados y su análisis obtenidos del desarrollo experimental, en el cual se obtuvo el análisis químico del material, análisis microestructural, las propiedades mecánicas de la lámina y del perfil tubular de sección rectangular, así como los resultados de la simulación por elemento finito y la discusión de los mismos.

#### 6.2 Caracterización del material.

El material seleccionado como objeto de estudio en este trabajo de tesis, es un acero de alta resistencia baja aleación denominado HSLA grado 50, al cual se le efectuó un análisis químico para obtener su composición. El análisis de la composición del acero HSLA grado 50 se muestra en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1 Composición química del acero HSLA grado 50 (% peso).**

Element	C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	Ni	Nb	Cr	Cu	V
W%	0.06	0.5	0.007	0.005	0.01	0.037	0.001	0.01	0.016	0.01	0.02	0.001



A partir de la Tabla 6.1 se corroboró que se trata de un acero microaleado HSLA cuyos elementos característicos son manganeso, silicio, vanadio y niobio, así como también aluminio y titanio, esta composición se comparó con la mostrada en la referencia [103], la cual muestra que los valores de los elementos presentes están dentro del rango de un acero ASTM A542 o también denominado SAE J1392 Gr. 50 (HSLA grado 50). Este acero tiene la característica que presenta una cantidad máxima de C de 0.13% y un 0.90% de Mn.

### **6.3 Pruebas mecánicas a tracción.**

Para obtener la curva esfuerzo-deformación del acero HSLA grado 50, se procedió a realizar las pruebas mecánicas descritas detalladamente en el Capítulo 5.

La figura 6.1 muestra las gráficas resultantes de los ensayos de tensión uniaxial en términos de esfuerzo y deformación ingenieril. También se obtuvo la curva esfuerzo-deformación real que se muestra en la figura 6.2, la cual se calculó mediante las ecuaciones 2.9 y 2.10.

Se observan en las gráficas de esfuerzo-deformación (Figura 6.1 y 6.2) un comportamiento al inicio de la deformación plástica, el cual es denominado formación de bandas de Lüders, estas bandas son zonas donde la deformación se presenta de forma localizada. El material fuera de las bandas sólo se deforma elásticamente. Las bandas se pueden propagar desde uno o ambos extremos de las muestras y se manifiestan en la curva esfuerzo-deformación a esfuerzos prácticamente constante. Una vez que las bandas han recorrido la sección útil de la probeta se inicia el endurecimiento por deformación característico de los materiales dúctiles [108].

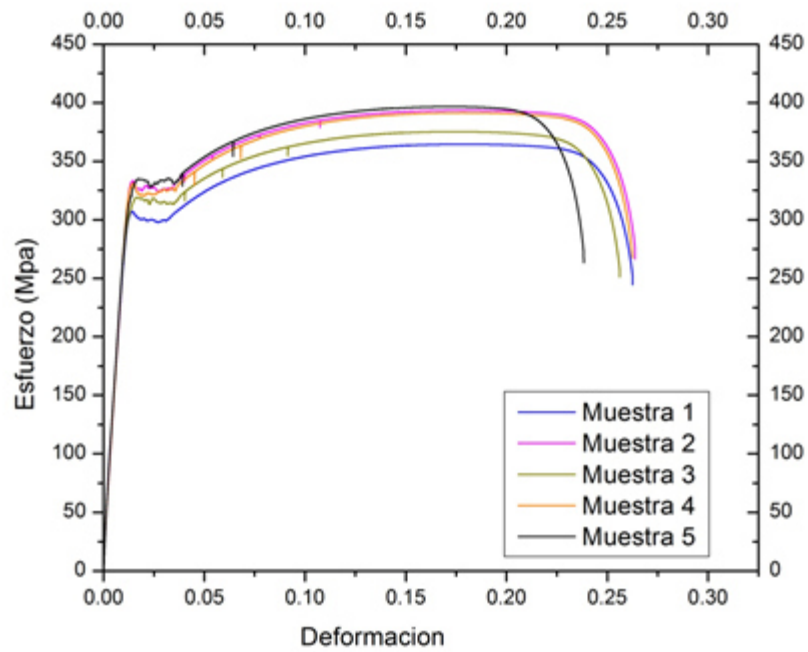


Figura 6.1 Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril del acero HSLA grado 50.

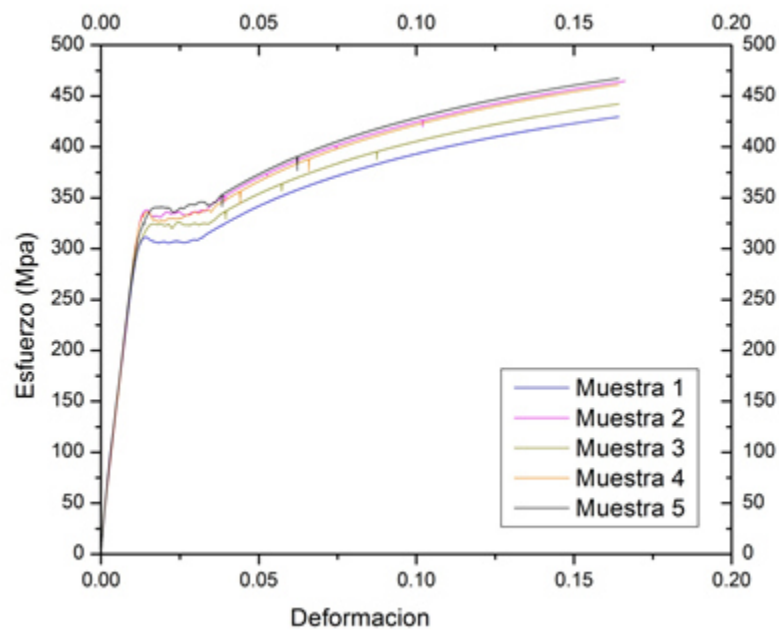


Figura 6.2 Gráfica esfuerzo-deformación verdadera del acero HSLA grado 50.

Los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas, son los valores de la gráfica promedio de esfuerzo-deformación real, los cuales se utilizaron para establecer las propiedades del material de la lámina del modelo de simulación por elemento finito en el software ABAQUS<sup>MR</sup>. Los resultados del ensayo se procesaron, ya que se obtuvieron 30,000 datos y solo se tomaron los valores en la zona plástica, los cuales fueron introducidos mediante un archivo \*.txt., el cual se encuentra en el Anexo 7.3 C.

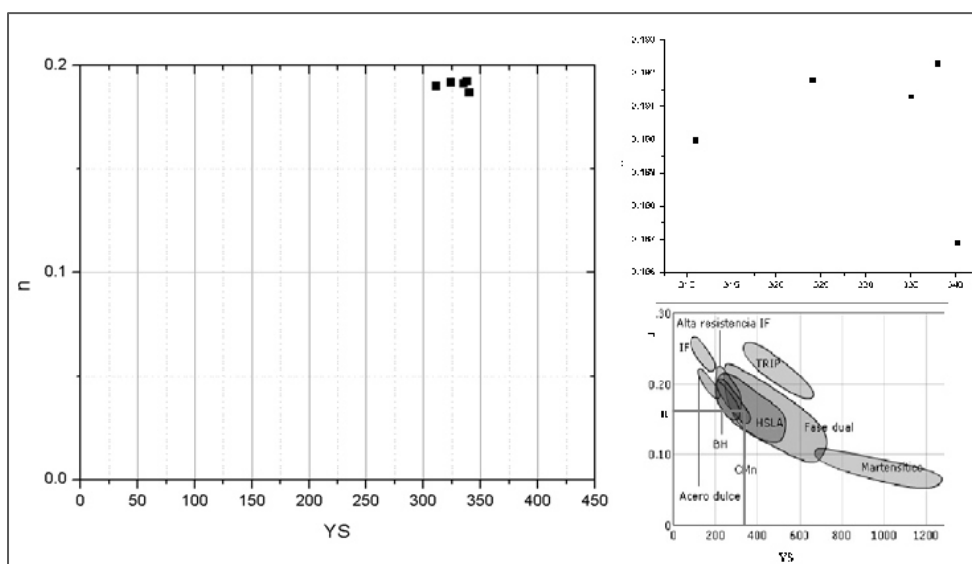
Los resultados de las propiedades mecánicas del acero HSLA50 obtenidos de las pruebas de tensión son: esfuerzo de cedencia ( $\sigma_y$ ), esfuerzo último ( $\sigma_u$ ), coeficiente de resistencia ( $K$ ), exponente de endurecimiento por deformación ( $n$ ) y el porcentaje de elongación (%E), estas se muestra en la Tabla 6.2, donde se observa el valor promedio de cedencia de 330 MPa y un esfuerzo máximo de 459 MPa, mientras que para el coeficiente de resistencia  $K$  es de 660 MPa. Estos valores son para una placa con un promedio de espesor ( $t$ ) 3.18mm.

El porcentaje de elongación promedio que mostraron los especímenes es de 25.6%, aunado a esto, el promedio del coeficiente de endurecimiento por deformación  $n$  es de 0.19, este valor está dentro de lo que reporta Dieter [104], mencionando que los valores de  $n$  para metales dúctiles a temperatura ambiente varían generalmente entre 0.02 y 0.5.

**Tabla 6.2 Propiedades mecánicas del HSLA grado 50 obtenidas del ensayo de tensión.**

Muestra	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$n$	$K$ (MPa)	%E
1	311	430	309	0.19	693	26.2
2	339	465	337	0.19	661	26.3
3	324	453	315	0.19	630	25.6
4	335	475	338	0.19	655	26.2
5	340	473	326	0.18	659	23.8

En la figura 6.3 se muestran los resultados de  $n$  relacionados con el esfuerzo de cedencia donde se corrobora que corresponde a un acero de alta resistencia y baja aleación.



**Figura 6.3 Gráfica exponente de endurecimiento por deformación-deformación del acero HSLA grado 50.**

También se realizó una comparativa de las propiedades mecánicas del acero HSLA50 antes del proceso de laminación no plana, y las propiedades obtenidas del perfil tubular, que se obtuvieron en dirección de formado, estos resultados se muestran en la Tabla 6.3, donde se observa que no hay un cambio significativo en el esfuerzo de

cedencia, en el esfuerzo máximo y en la relación de esfuerzo ( $\sigma_y/\sigma_{max}$ ), el incremento del exponente de endurecimiento por deformación (o endurecimiento por trabajo) no se ve afectado, ya que va desde 0.15 a 0.16, donde los incrementos reportados del coeficiente de endurecimiento por deformaciones se deben a que el material se va endureciendo conforme es deformado[105].

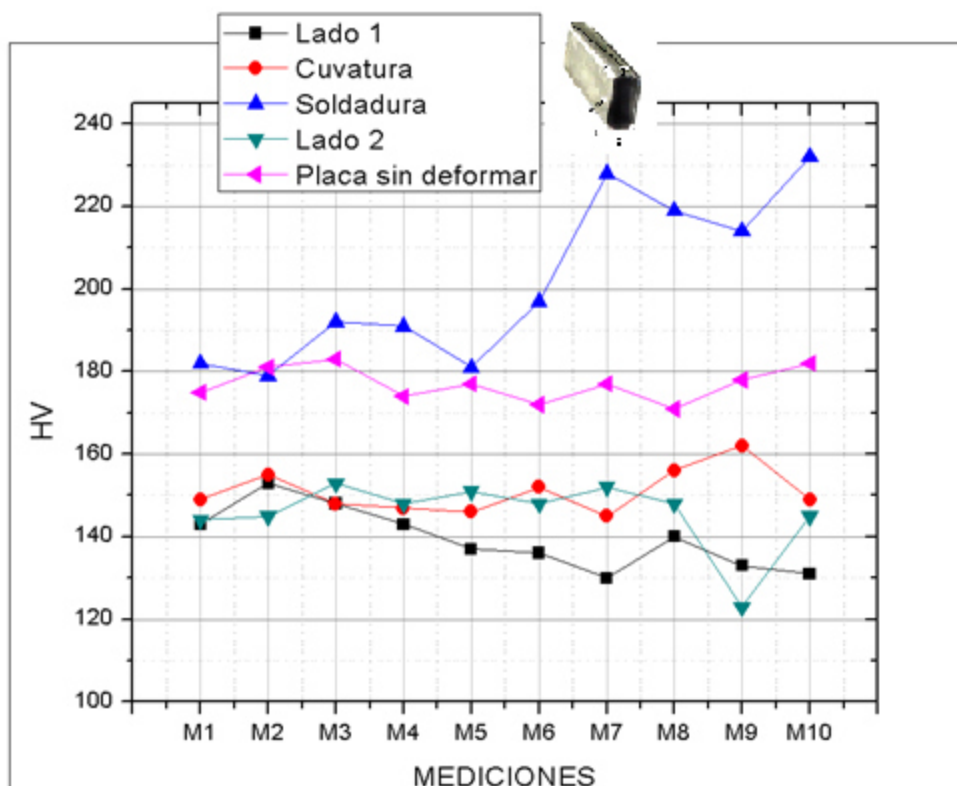
**Tabla 6.3 Propiedades mecánicas del acero HSLA50**

Acero HSLA50	Espesor	Ancho	Área	Esfuerzo de cedencia	Esfuerzo Máximo	Elongación	Relación de esfuerzo	Coeficiente de endurecimiento por deformación (n)
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	MPa	MPa	%		
Acero base	3.05	12.53	39.84	350	432	30	0.81	0.15
Acero formado	3.16	12.63	39.91	369	440	32	0.84	0.16

## 6.4 Dureza

Se realizaron ensayos de microdureza Vickers en la placa antes de someterla al proceso de laminación no plana, teniendo un promedio de 158 HV. También se realizaron mediciones en distintas secciones del perfil tubular, los valores obtenidos se muestran en la Figura 6.4. Mostrando las zonas que están en contacto con los rodillos valores comprendidos entre 123 HV y 153 HV, con un valor medio de dureza en estas zonas de 145 HV. Y en la zona de unión un valor medio de dureza de 201 HV.

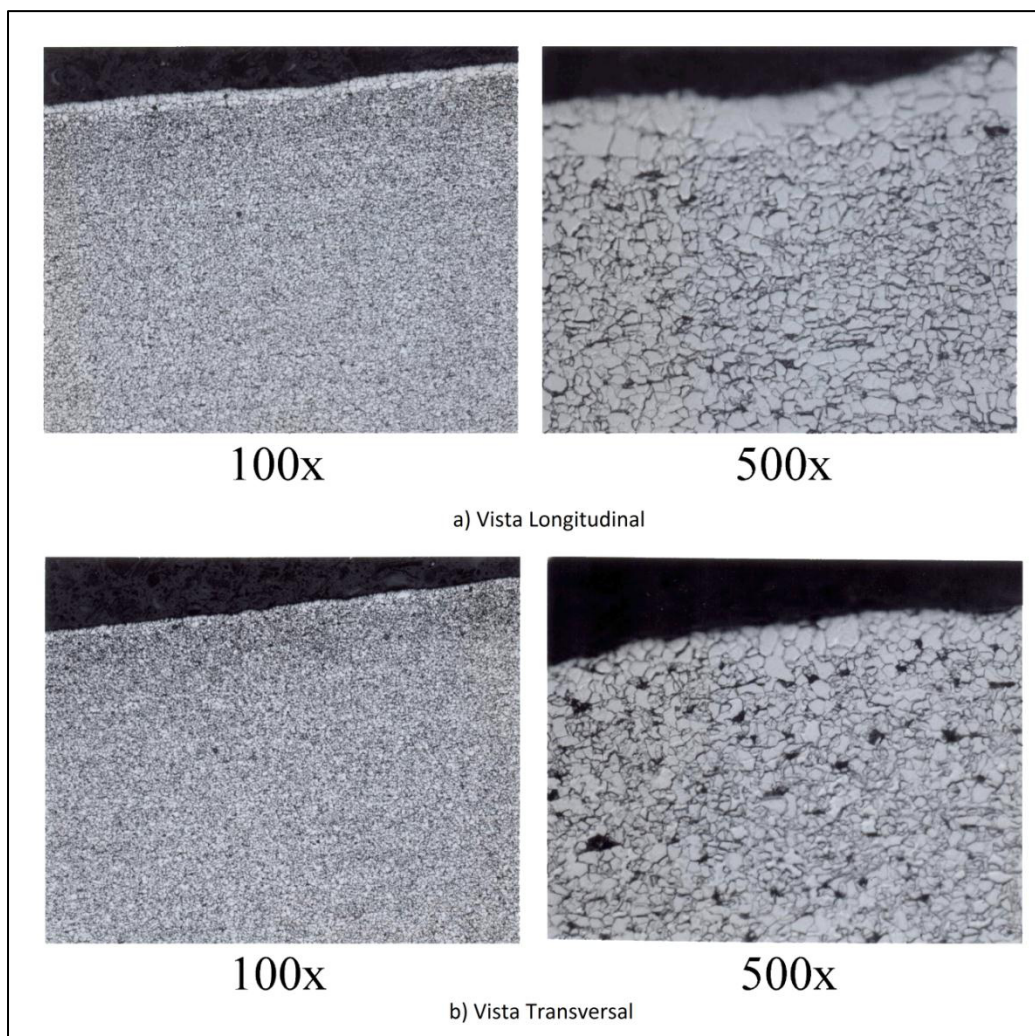
Los resultados de dureza muestran un incremento en la zona de unión del perfil estructural, la unión se realiza por medio de un proceso de soldadura por inducción. Con respecto a las zonas restantes se presentan una disminución de la dureza comparándola con la inicial.



**Figura 6.4 Perfil de durezas en distintas áreas del perfil tubular de acero HSLA50.**

### 6.5 Análisis microestructural

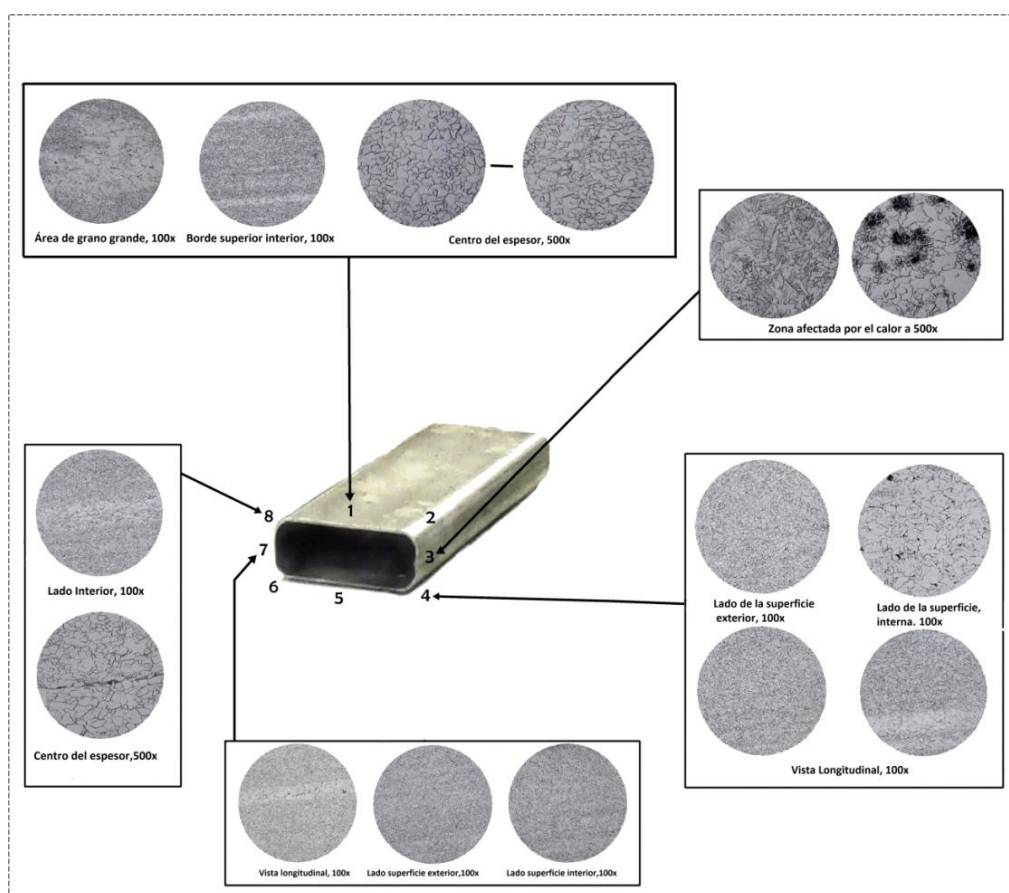
Los resultados del análisis microestructural que se obtuvieron de la placa de acero HSLA 50 antes del proceso de LNP, se muestran en la figura 6.5. Donde se observan micrografías de zonas transversales y longitudinales del espécimen, que presenta una microestructura de ferrita con grano no equiaxial fino de tamaño 10 ASTM, con precipitación de perlita fina en toda la sección, también se aprecian algunos óxidos en forma de inclusiones. El estudio realizado mediante microscopía óptica y SEM, muestra que el material a estudiar es un acero ferrítico-perlítico.



**Figura 6.5 Micrografías Acero HSLA 50 a) longitudinal y c) transversal (microscopía óptica a 100x y 500x, reactivo químico Nital al 3%).**

También se realizó un estudio microestructural del perfil estructural tubular obtenido del proceso de LNP. En la figura 6.6 se muestra los resultados visuales de las microestructuras obtenidas en diferentes zonas del perfil, en el Anexo 7.4 D se muestra el total de las micrografías de todas las áreas obtenidas. Los resultados muestran que en las zonas deformadas (2, 4, 6 y 8) por los rodillos durante el proceso se presenta una microestructura ferrítica y un tamaño promedio de grano ASTM 9. Por otro lado, las zonas que no se someten a una deformación, son las zonas 1, 3, 5, y 7. Los resultados de la zona 1 y 5 presentan un tamaño de grano promedio de 6, mientras que para la

zona 7 se obtuvo un tamaño de grano promedio de 9 y presenta unas bandas con tamaño de grano 7. La zona 3 es una zona de unión mediante un proceso de soldadura, teniendo como resultado en la zona afectada por el calor una microestructura constituida por ferrita con precipitación de nódulos de bainita y en la zona de unión también presenta una matriz de ferrita, pero con un eutectoide globular fino en forma acicular (agujas de ferrita).

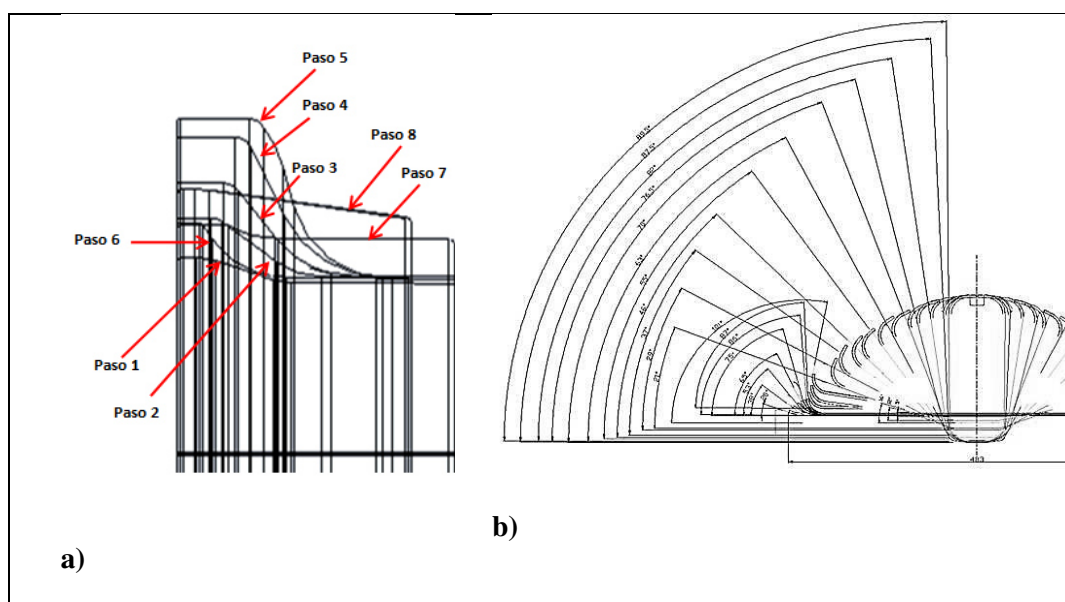


**Figura 6.6 Caracterización microestructural del perfil tubular obtenido del proceso de laminación no plana (microscopia óptica a 100x, reactivo químico Nital al 2%).**



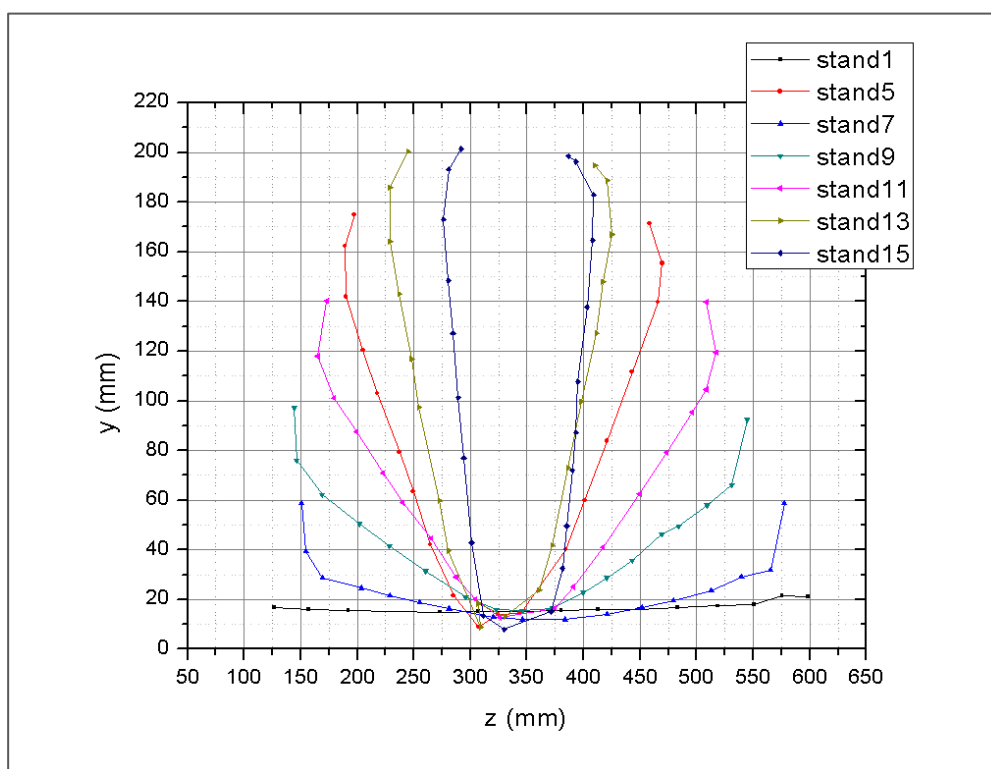
## 6.6 Diagrama flor por ingeniería inversa y medición.

Se llama “la flor” al diagrama que representa el conjunto de secciones obtenidas al final de cada etapa de conformado y define cuál es el flujo del material a lo largo del proceso, este se forma con todas las secciones superpuestas entre sí [106]. Los resultados de la flor para el perfil estructural tubular de sección rectangular se obtuvieron en primera instancia por las geometrías de los rodillos (figura 6.7a), obteniendo como resultado la flor presentada en la figura 6.7b. Las geometrías de los rodillos se obtuvieron por ingeniería inversa como se detalló en la sección 5.3.



**Figura 6.7 a) Secciones superpuestas de rodillos y b) flor del perfil tubular estructural de sección rectangular.**

También se obtuvo como resultado la construcción de un diseño preliminar del diagrama flor presentado en la figura 6.8, obtenida de la medición de puntos entre las estaciones de formado del proceso de LNP. Se obtuvieron los datos y se procesaron las coordenadas de las estaciones impares 1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13. En el anexo 7.5 E se muestran los datos recabados.



**Figura 6.8 Resultado del diagrama flor obtenida mediante medición por FARO<sup>MR</sup>.**

Los ángulos que se obtuvieron con la construcción de la flor se utilizarán para la fórmula empírica establecida y calcular el número de pasos actual del proceso. Al realizar el cálculo se parte de que la flor contendrá  $n+1$  secciones, siendo  $n$  el número total de etapas de conformado, siendo la primera sección de la flor la placa plana del ancho inicial y la última el perfil del producto que se requiere obtener, en este caso un perfil de sección rectangular.

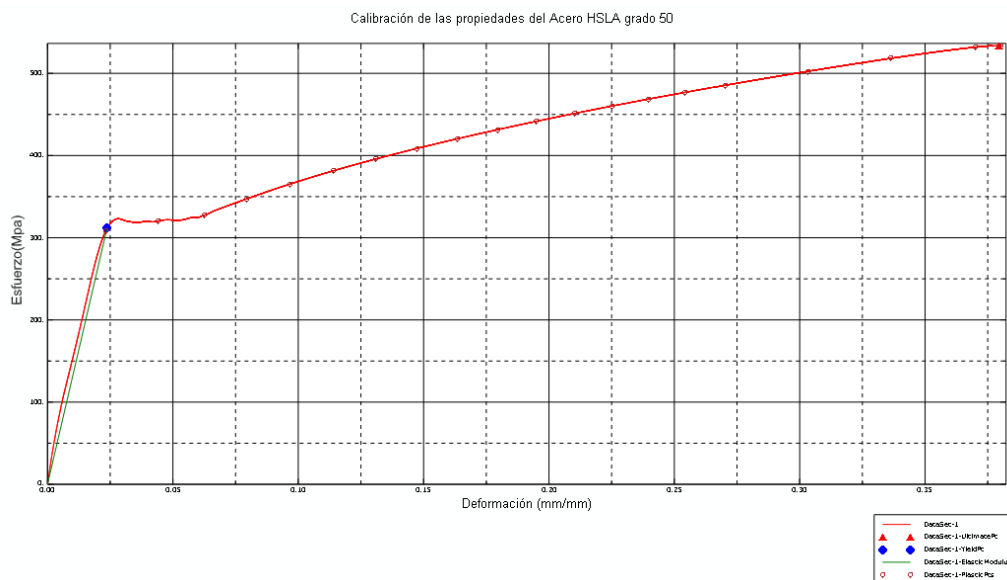
### **6.7 Resultados numéricos y discusión.**

En esta sección se presentan los resultados numéricos y la discusión de los mismos del proceso de LNP analizando el comportamiento del acero HSLA 50, este proceso se

desarrolla en forma real en un tiempo total de 45 segundos a temperatura ambiente a un 75% de volumen de producción, es decir que las condiciones que se tomarón para realizar el modelo fueron proporcionados por la planta de producción con este porcentaje real, y se calcularon los parámetros de velocidad de la placa y velocidad de los rodillos.

Debido a que los resultados de las pruebas mecánicas presentaban 30,000 datos, se realizó una calibración del material mediante el programa ABAQUS<sup>MR</sup>, para poder utilizarlos en el modelo de simulación del proceso de LNP, ya que se presentaban errores en las iteraciones del modelo, obteniendo como resultado el diagrama esfuerzo-deformación del acero HSLA grado 50 que se muestra en la figura 6.9. Se demuestra que no existe una alteración del comportamiento del material obtenido con las pruebas de tensión respecto al obtenido por la calibración de puntos obtenidos mediante el programa ABAQUS<sup>MR</sup>.

En la Tabla 6.4 se presentan los datos resultantes de la calibración del material reduciendo de 30,000 datos a 40 datos. Así mismo se obtuvo el coeficiente de Poisson de 0.29, los cuales fueron alimentados en el programa ABAQUS<sup>MR</sup>.



**Figura 6.9 Diagrama calibrado esfuerzo-deformación del acero HSLA 50.**

**Tabla 6.4. Datos calibrados del material Acero HSLA50**

Deformación Plástica (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
0.02321	308.37449
0.043915285	320.141636
0.062547296	327.375152
0.079553361	347.447972
0.096726557	365.427614
0.11400447	381.478991
0.130927936	395.765677
0.147546149	408.712307
0.163473621	420.439849
0.179401767	431.398167
0.194815362	441.630655
0.210122866	451.114339
0.225092652	460.216323
0.239599497	468.671465
0.25403218	476.719241
0.270256212	485.419865
0.303167492	502.393307
0.33635201	518.253343
0.369949457	531.821128
0.380405455	533.734631

El material presenta un comportamiento elástico-plástico, donde la zona plástica es modelada mediante la ecuación 2.11, que se explicó en los Capítulos 4 y 5. La ley de endurecimiento que se utilizó en el modelo, y la cual es válida para utilizarla en ABAQUS<sup>MR</sup> es de endurecimiento isotrópico, el cual tiene aplicaciones en análisis de formado del metal, impacto y estudios generales de colapso [107].

Teniendo los resultados de las propiedades mecánicas, se trabajó con diferentes tipos de análisis la modelación del proceso de LNP, en primera instancia se trabajó con un modelo estático, considerando que el proceso de LNP es un proceso lento y tomando los efectos inerciales despreciables, teniendo complicaciones de convergencia y un costo computacional alto, además de que la simulación no fue completada en varios intentos, por lo que se optó por analizarlo como un problema dinámico, ya que este tipo de análisis es aplicable en problemas de deformaciones extremas, alta velocidad, no lineales y estudios cuasiestáticos, entre otros.

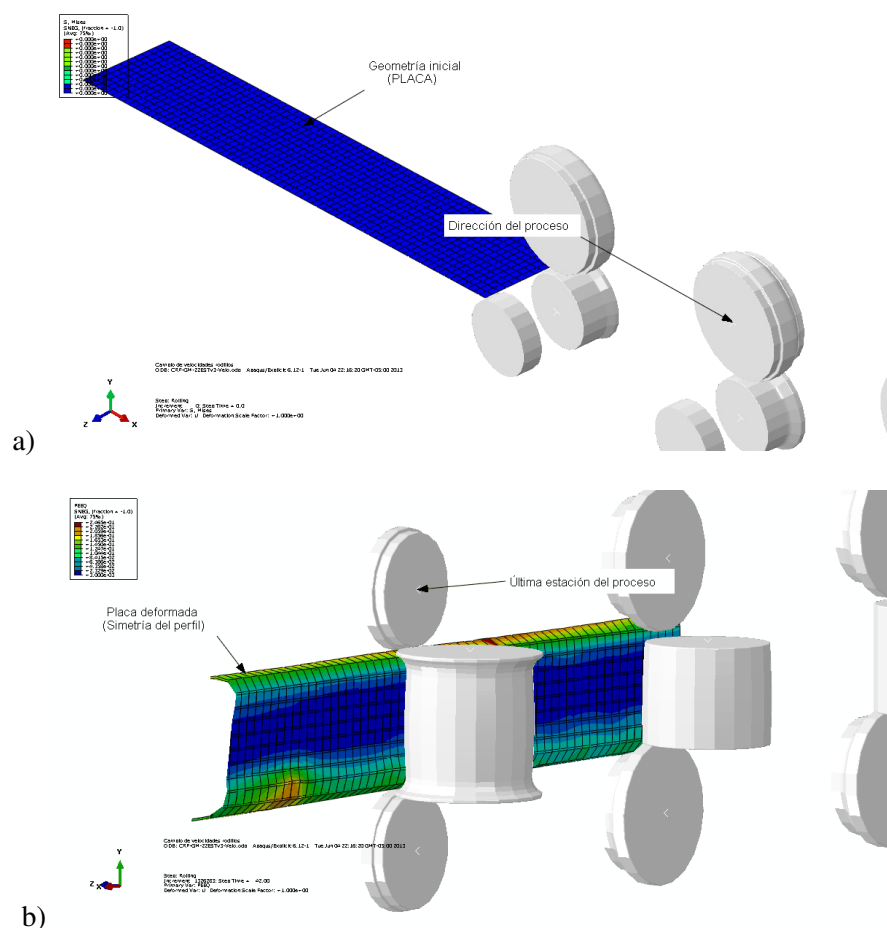
Otra de la razones por las cuales se seleccionó el análisis de tipo dinámico es debido a que se aplica en simulaciones de ensamble, en procesos de formado, impacto, térmicos, acústicos y otros manejados por ABAQUS<sup>MR</sup>.

Otro punto es la formulación que se puede aplicar, el programa de elemento finito ABAQUS<sup>MR</sup> trabaja con formulaciones implícitas y explícitas, se descartó un análisis con formulación implícita ya que resulta inadecuada al presentarse problemas que involucran no linealidades de estatus cambiante, como es el contacto entre el herramental y la pieza de trabajo, además que es incondicionalmente estable al incremento de tiempo, generando incrementos demasiados pequeños, presentando problemas como oscilaciones en las iteraciones. Por lo que se seleccionó un análisis

dinámico explícito, en el cual la principal características es la no linealidad del mismo, además que la formulación explícita es condicionalmente estable en cuanto al incremento de tiempo, por lo que el tamaño del incremento que utiliza este tipo de formulación es controlado de un límite determinado.

Los resultados de aplicar este tipo de análisis en el proceso de LNP se asocian a que la geometría (placa) sufre grandes desplazamientos y se encuentra en contacto directo con los rodillos conformadores en cada estación, experimentando importante cambios en la geometría inicial, es decir de pasar de una placa plana hasta conformar el perfil tubular de sección rectangular, como se observa en la figura 6.10.

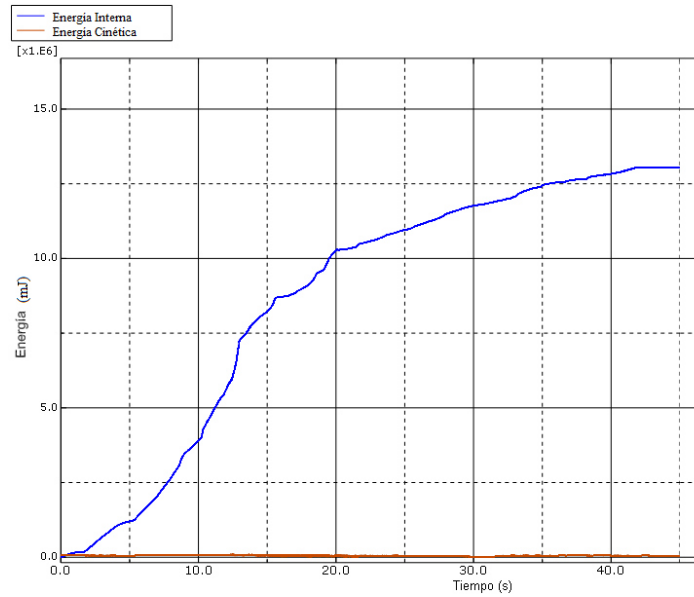
Aunque el método implícito y explícito ha sido utilizado en las simulaciones del proceso de laminación no plana, Hellborg [33] reportó que al realizar la simulación del proceso de 6 estaciones con un total de 12 rodillos mediante el método implícito, no fue completado el análisis deteniendo el proceso en un rodillo con un ángulo de  $80^\circ$  y mostrando un traslape entre la placa y el rodillo. Por lo que en este trabajo de tesis, el método explícito resultó ser el que dio resultados con un tiempo de solución de menos de 8 horas en la simulación de las 22 estaciones con un total de 72 rodillos.



**Figura 6.10. Imagen de la (a) geometría inicial y la (b) geometría final de la pieza de trabajo.**

En lo que respecta al contacto entre la placa y los diferentes rodillos, introducen una fuerte no linealidad además de una disipación de energía debida a la deformación plástica.

Se utilizó un escalamiento de masa para reducir el costo computacional, por lo que se tuvo que monitorear la energía cinética del sistema, para garantizar que el escalamiento de masa no afecta a la aproximación cuasi estática usando la formulación explícita. En la figura 6.11 se observa que no se afecta la energía cinética al utilizar la formulación explícita.

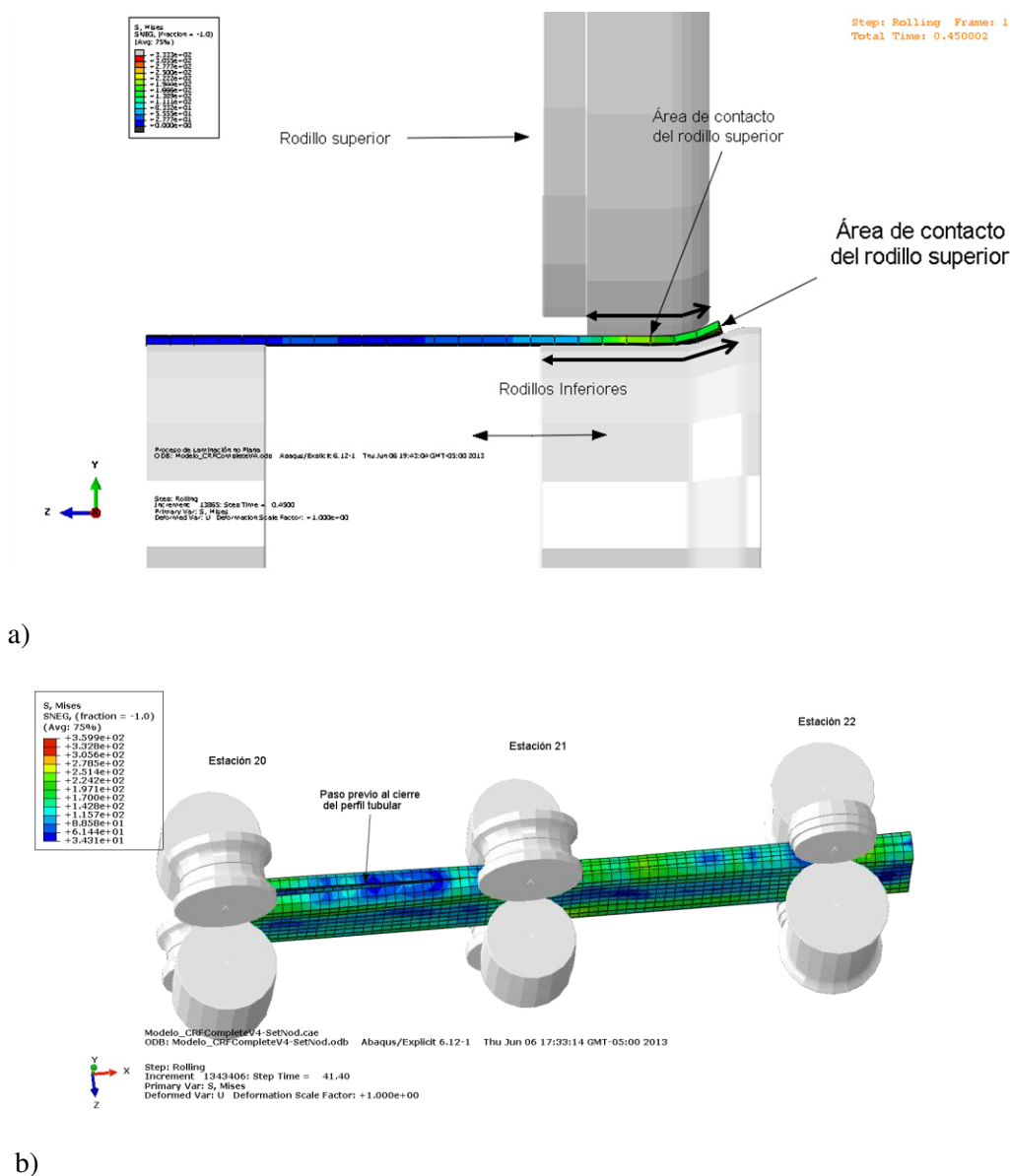


**Figura 6.11. Comparación de la energía cinética e interna.**

#### **6.7.1 Esfuerzo-deformación, fricción y velocidades.**

El modelo de laminación no plana, está constituido por partes rígidas (rodillos) y una parte deformable (placa), en la figura 6.12 se muestran los componentes del sistema, constituido principalmente por los rodillos superiores e inferiores, los cuales van dando la geometría correspondiente en cada paso, los primeros resultados que se validaron fueron los cambio correspondientes al ángulo de flexión a través de los rodillos hacia la placa al inicio y al final del proceso. La figura 6.12a muestran la geometría obtenida en el paso 1, obteniendo en la simulación un ángulo de flexión de la placa de  $19.12^\circ$ , mientras que en la figura 6.12b se muestran los pasos 20, 21, y 22, en estos pasos se obtuvieron ángulos de flexión de  $89.86^\circ$ ,  $89.74^\circ$  y  $90.98^\circ$ , respectivamente. Los resultados de los ángulos obtenidos de las geometrías de ingeniería inversa para el paso 1 son  $20^\circ$  y de  $89.5^\circ$ ,  $92^\circ$  y  $94^\circ$  para las estaciones 20, 21 y 22, respectivamente., mostrando que no hay una variación en el ángulo de flexión.

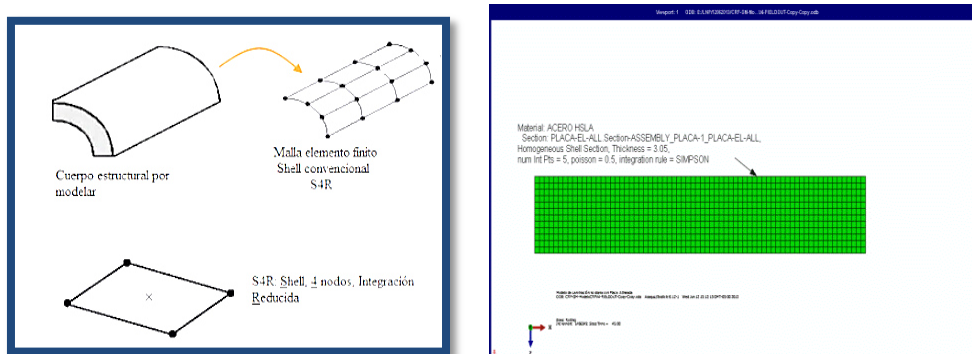




**Figura 6.12. Proceso de LNP (a) Estación 1 y (b) entre las últimas tres estaciones 20, 21 y 22.**

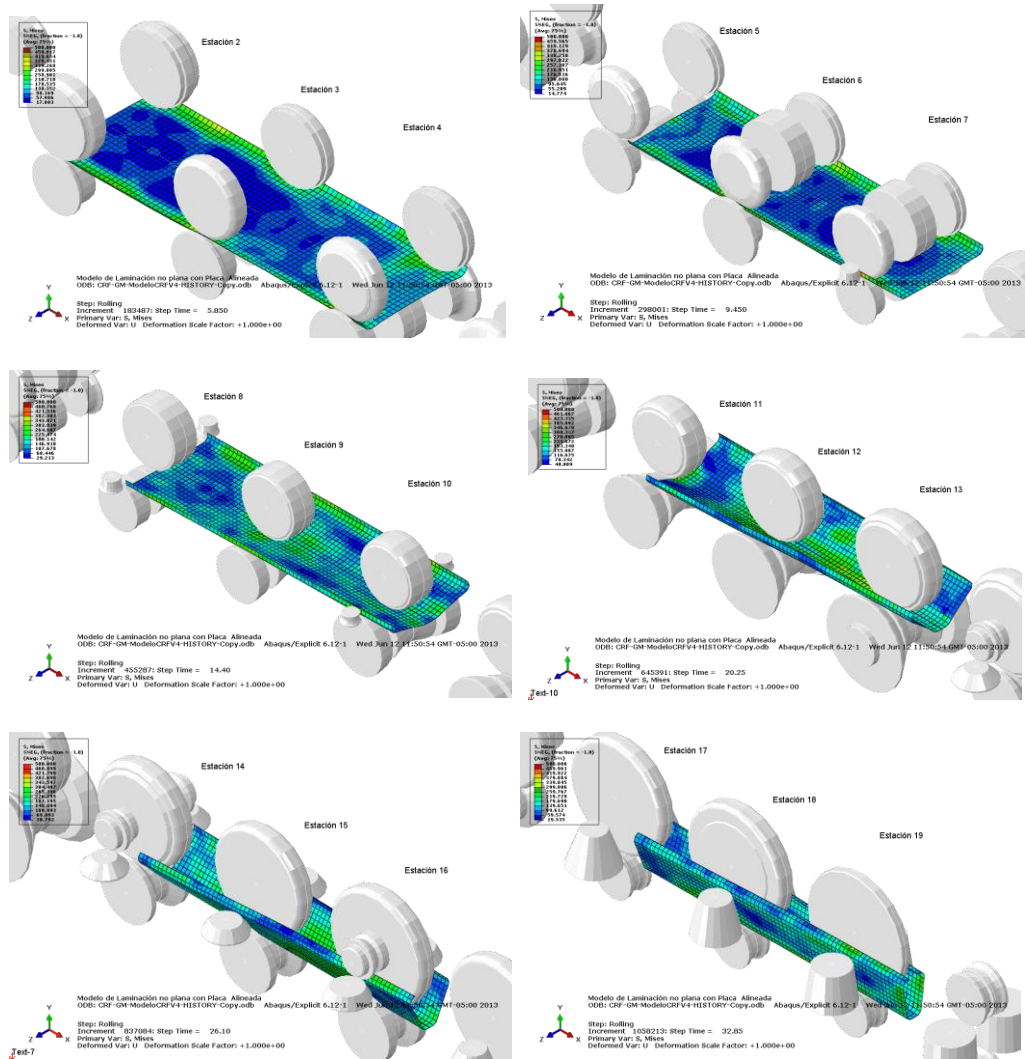
Un punto importante del modelo de LNP fue la selección del tipo de elemento. En primera instancia se aplicaron elementos tipo sólido C3D8R, los cuales presentaron un costo computacional alto y no se llegó a completar el análisis. Los resultados que se presentan en este trabajo se obtuvieron utilizando para el cuerpo deformable, elementos tipo S4R como los que se ilustran en la figura 6.13, ya que estos elementos denominados tipo cascarón (Shell) de 4 nodos e integración reducida, son utilizados

cuando se someten a flexión, que es el principal comportamiento durante el proceso de LNP.



**Figura 6.13. Tipo de elemento utilizado en el modelo de LNP**

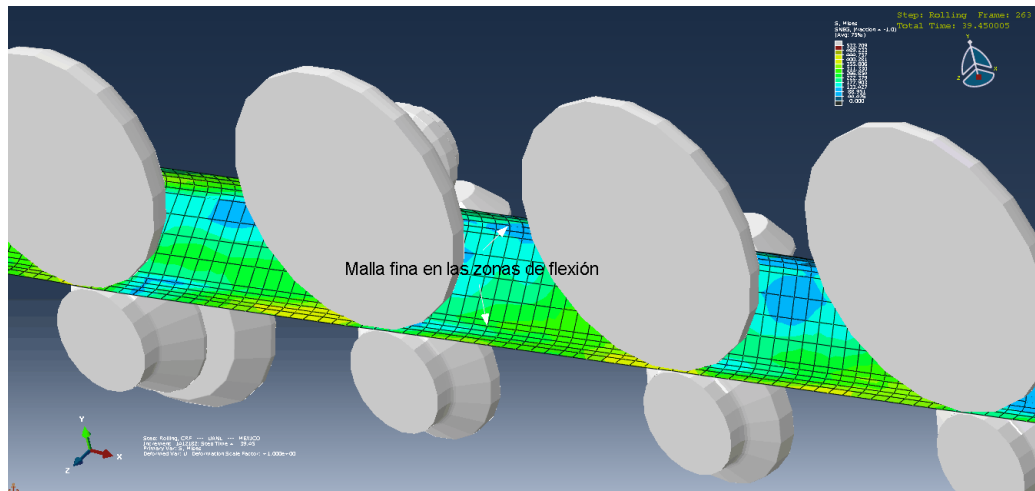
En la figura 6.14 se muestra la distribución de los esfuerzos de Von Mises en cada estación donde comienza la flexión, para una malla de 12x70 elementos para la mitad de la geometría, este tamaño de malla que se muestra es de la mitad de la placa mostrada ya que en cada estación completa se utilizó la condición de simetría. El principal problema que se presentó al utilizar este tipo de malla fue que no se logró capturar correctamente los radios del perfil, como se muestra en la figura 6.15. Por lo que se realizó un modelo con malla refinada en las zonas de flexión, aumentando el tiempo de cómputo de dos hasta ocho horas, la malla de la placa resultante fue de 7469 nodos y 6962 elementos (figura 6.16), el tipo de elemento utilizado fue también el tipo S4R, otra condición fue aumentar el largo de la placa, este fue abarcar todo el tamaño de la línea (figura 6.17), ya que se presentaban defectos de ondulamiento en los bordes (figura 6.18), a pesar de colocar una condición frontera de gravedad.



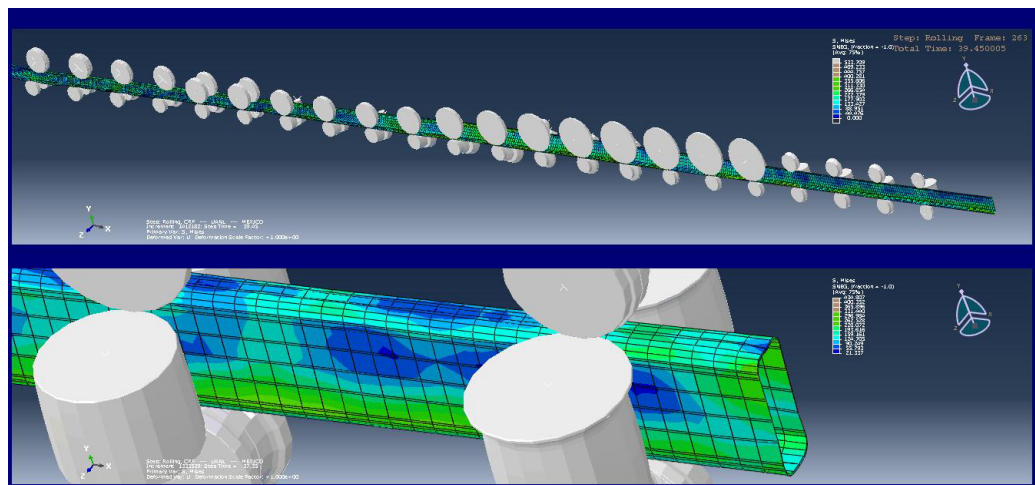
**Figura 6.14.** Imagen de la distribución de esfuerzos en diferentes etapas del proceso de LNP, para una malla de 12x70 elementos.



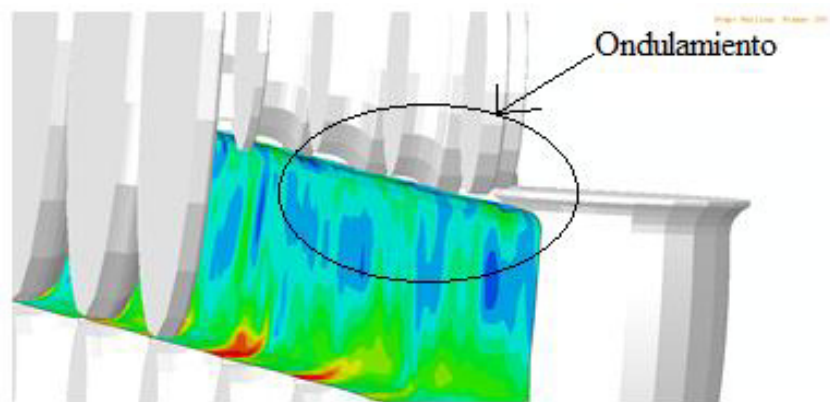
**Figura 6.15.** Geometría obtenida de la malla de 12x70 elementos.



**Figura 6.16. Mallado refinado en zonas de flexión.**



**Figura 6.17. Placa Alargada y refinada, mostrando la geometría final.**



**Figura 6.18. Defecto de ondulamiento en la geometría final.**

Se utilizaron coeficientes de fricción dinámica y estática para el modelo, además de que se introdujo una velocidad inicial de la placa solo para hacer contacto en la primera estación y poder desplazarse por toda la línea por medio del contacto de los rodillos y la velocidad de giro y con acción de la fricción. Los coeficientes de fricción utilizados en el modelo fueron de 0.16 (fricción dinámica) y 0.21 (fricción estática) obtenidas de la referencia [109].

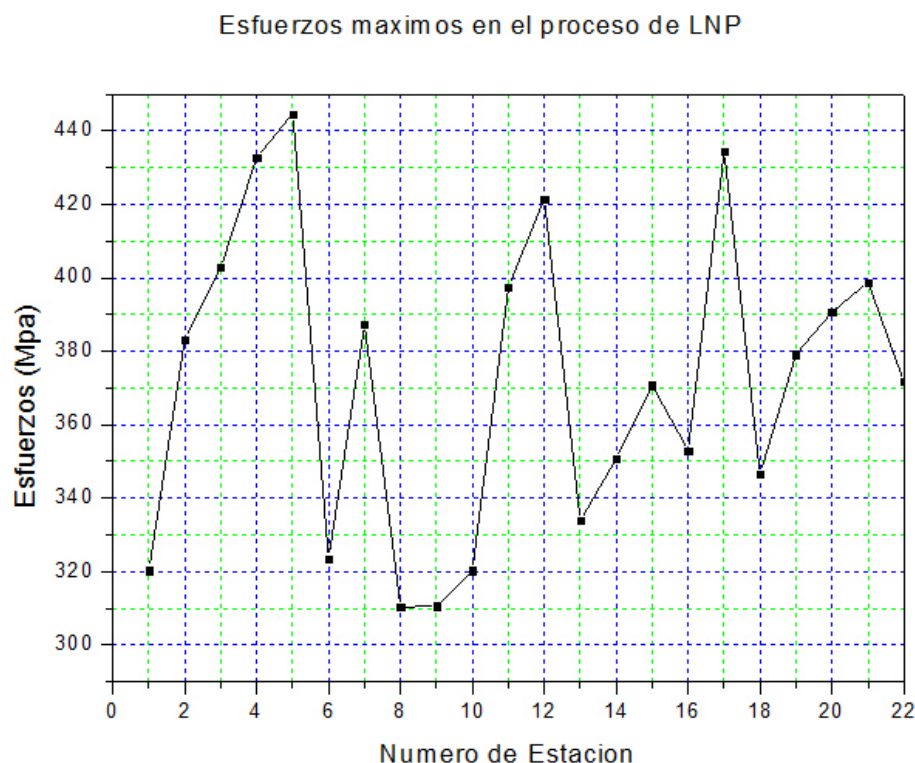
Las velocidades utilizadas en cada uno de los rodillos se muestran en la Tabla 6.5, las cuales fueron calculadas con respecto a los diámetros de los mismos y la velocidad lineal.

**Tabla 6.5 Velocidades de rodillos utilizados en el modelo de simulación.**

Rodillo	Velocidad (rad/s)	Rodillo	Velocidad (rad/s)	Rodillo	Velocidad (rad/s)
Rod-Sup-ET1	2.68	Rod-Inf-ET1	4.06	Rod-Lat-ET6	9.62
Rod-Sup-ET2	2.68	Rod-Inf-ET2	3.63	Rod-Lat-ET7	8.63
Rod-Sup-ET3	2.73	Rod-Inf-ET3	3.32	Rod-Lat-ET9	9.48
Rod-Sup-ET4	2.69	Rod-Inf-ET4	4.31	Rod-Lat-ET13	4.01
Rod-Sup-ET5	2.69	Rod-Inf-ET5	4.31	Rod-Lat-ET14	4.09
Rod-Sup-ET6	2.68	Rod-Inf-ET6	4.31	Rod-Lat-ET15	4.09
Rod-Sup-ET7	2.69	Rod-Inf-ET7	3.7	Rod-Lat-ET16	3.4
Rod-Sup-ET8	2.69	Rod-Inf-ET8	3.7	Rod-Lat-ET17	3.79
Rod-Sup-ET9	2.68	Rod-Inf-ET9	2.96	Rod-Lat-ET18	3.72
Rod-Sup-ET10	2.43	Rod-Inf-ET10	2.54	Rod-Lat-ET19	3.77
Rod-Sup-ET11	2.16	Rod-Inf-ET11	2.1	Rod-Lat-ET20	3.77
Rod-Sup-ET12	1.89	Rod-Inf-ET12	1.89	Rod-Lat-ET21	4.04
Rod-Sup-ET13	1.73	Rod-Inf-ET13	2.82	Rod-Lat-ET22	3.63
Rod-Sup-ET14	1.65	Rod-Inf-ET15	2.81		
Rod-Sup-ET15	1.55	Rod-Inf-ET16	3.81		
Rod-Sup-ET16	1.55	Rod-Inf-ET17	3.77		
Rod-Sup-ET17	1.52	Rod-Inf-ET18	3.81		
Rod-Sup-ET18	1.52	Rod-Inf-ET19	3.73		
Rod-Sup-ET19	3.61	Rod-Inf-ET20	3.7		
Rod-Sup-ET20	3.77	Rod-Inf-ET21	3.59		
Rod-Sup-ET21	3.58	Rod-Inf-ET22	4.31		
Rod-Sup-ET22	3.63				

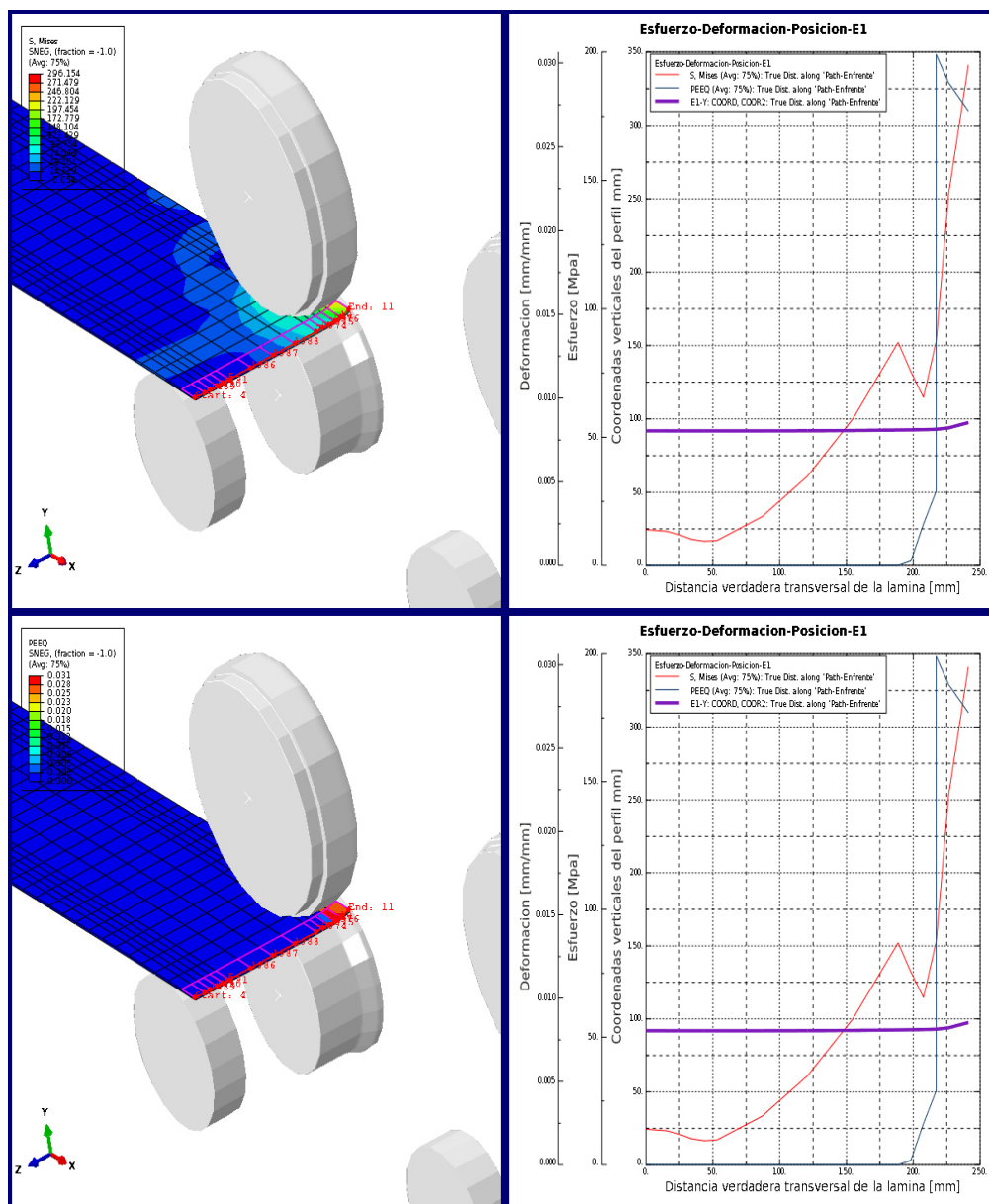
### 6.7.2 Esfuerzo máximo-deformación máxima.

Los valores máximos de esfuerzo que se obtuvieron en el modelo de placa corta de 1400 mm de largo estuvieron en el intervalo entre 320 y 445 MPa, como se muestra en la figura 6.19.



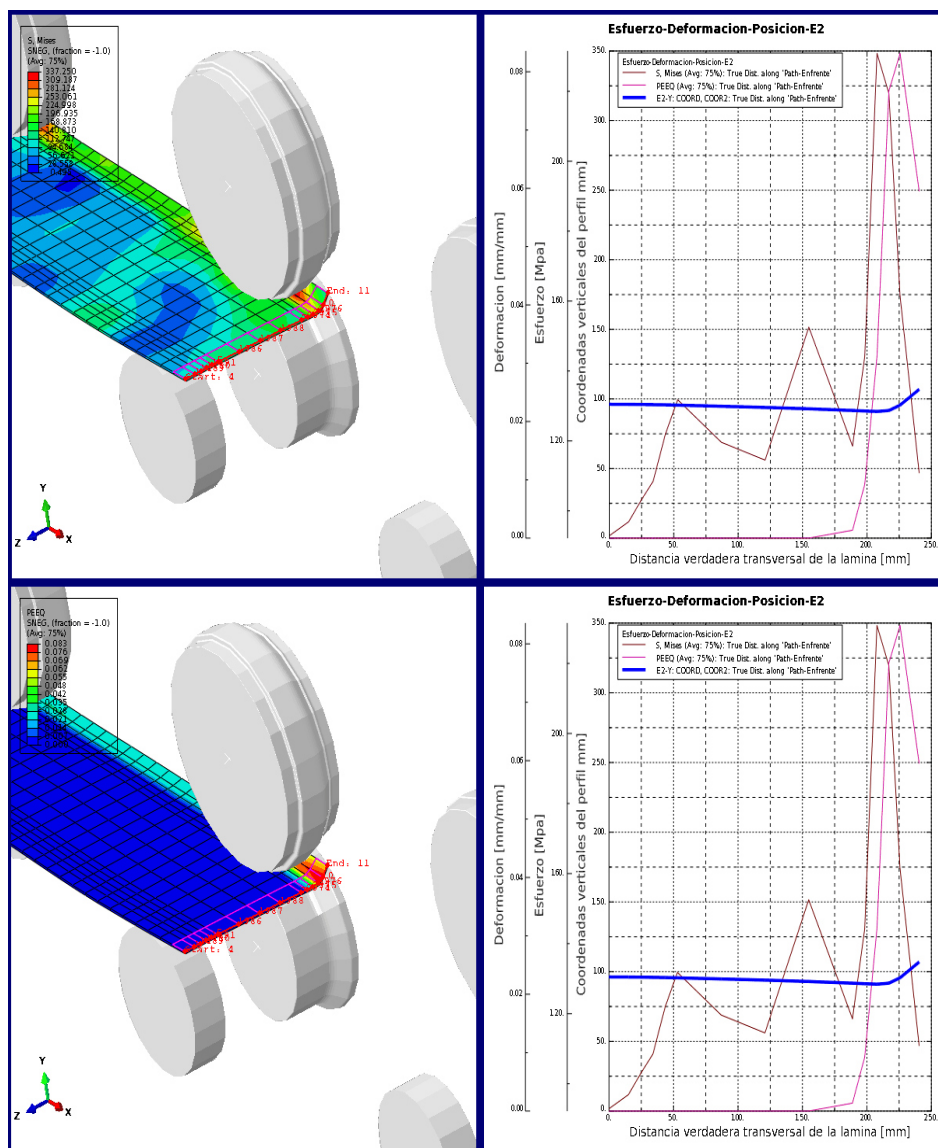
**Figura 6.19. Esfuerzos máximos obtenidos en cada estación del modelo de malla de 12x70 elementos.**

Los resultados de esfuerzos y deformación de la placa larga de 15000 mm, se detallan a continuación, ya que este modelo fue el que se acercó a la geometría real. Las figuras 6.20 a la 6.40, representan las imágenes de la evolución de la distribución de esfuerzos de Von Mises y la deformación plástica equivalente, los diferentes colores presentan la magnitud de estos valores en cada punto de la placa deformada en cada estación.



**Figura 6.20. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 1.**





**Figura 6.21. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 2.**



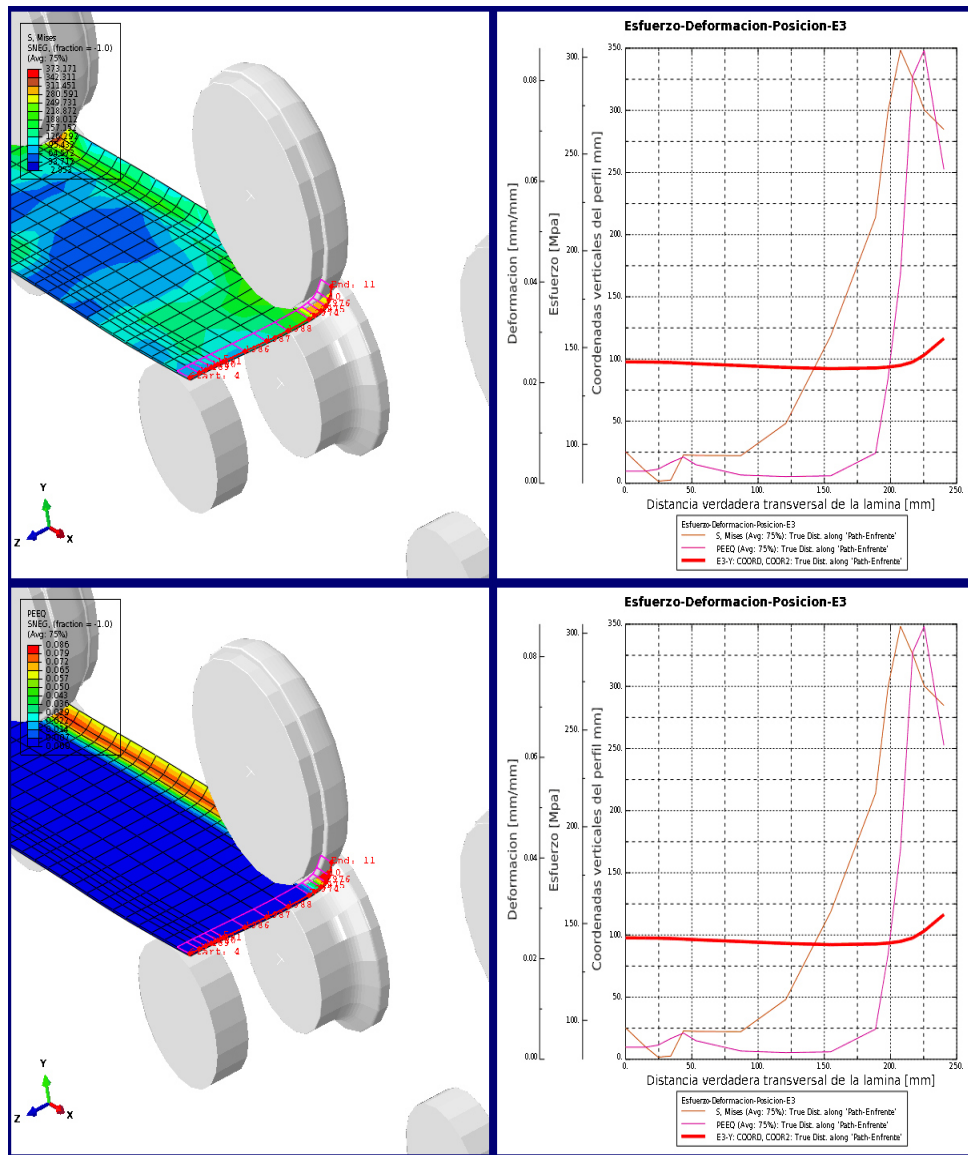
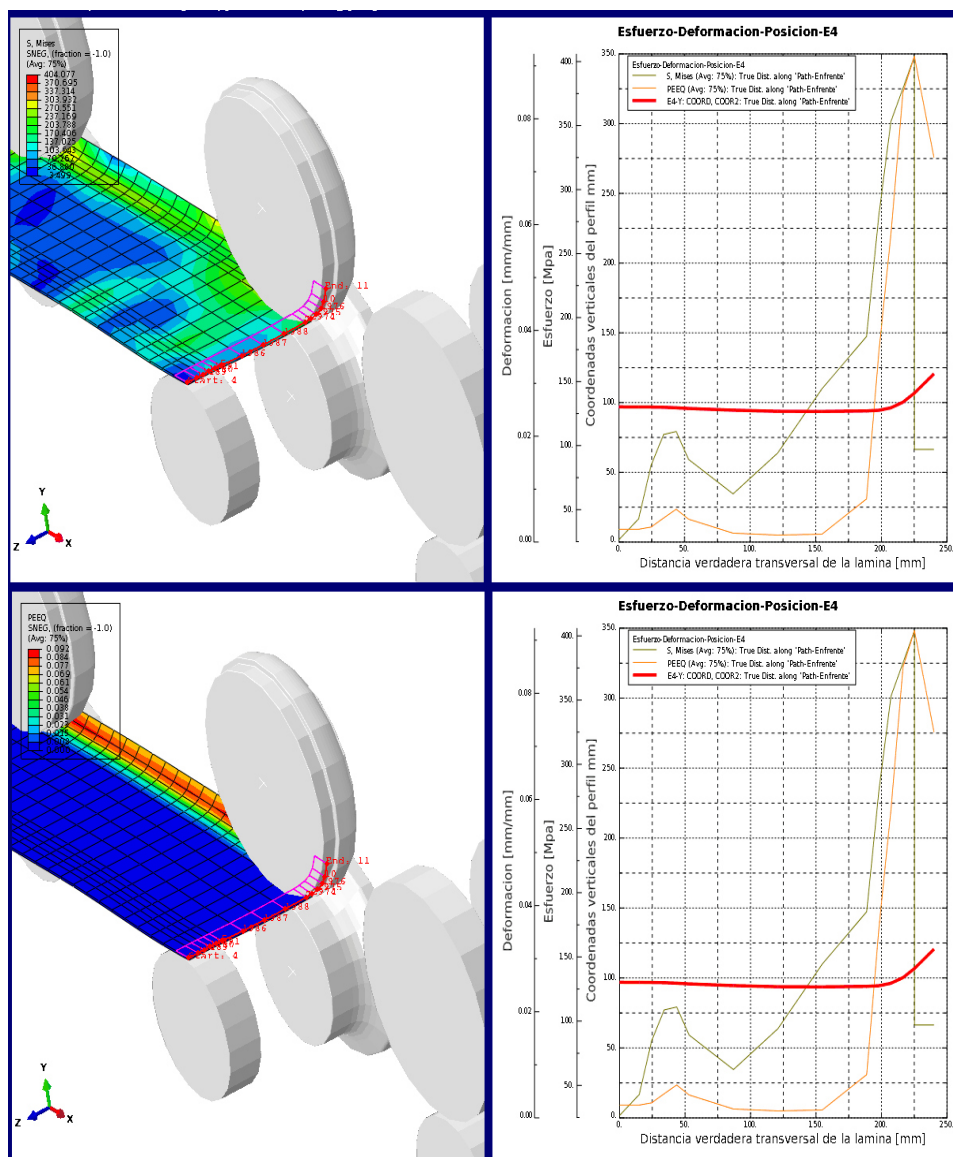
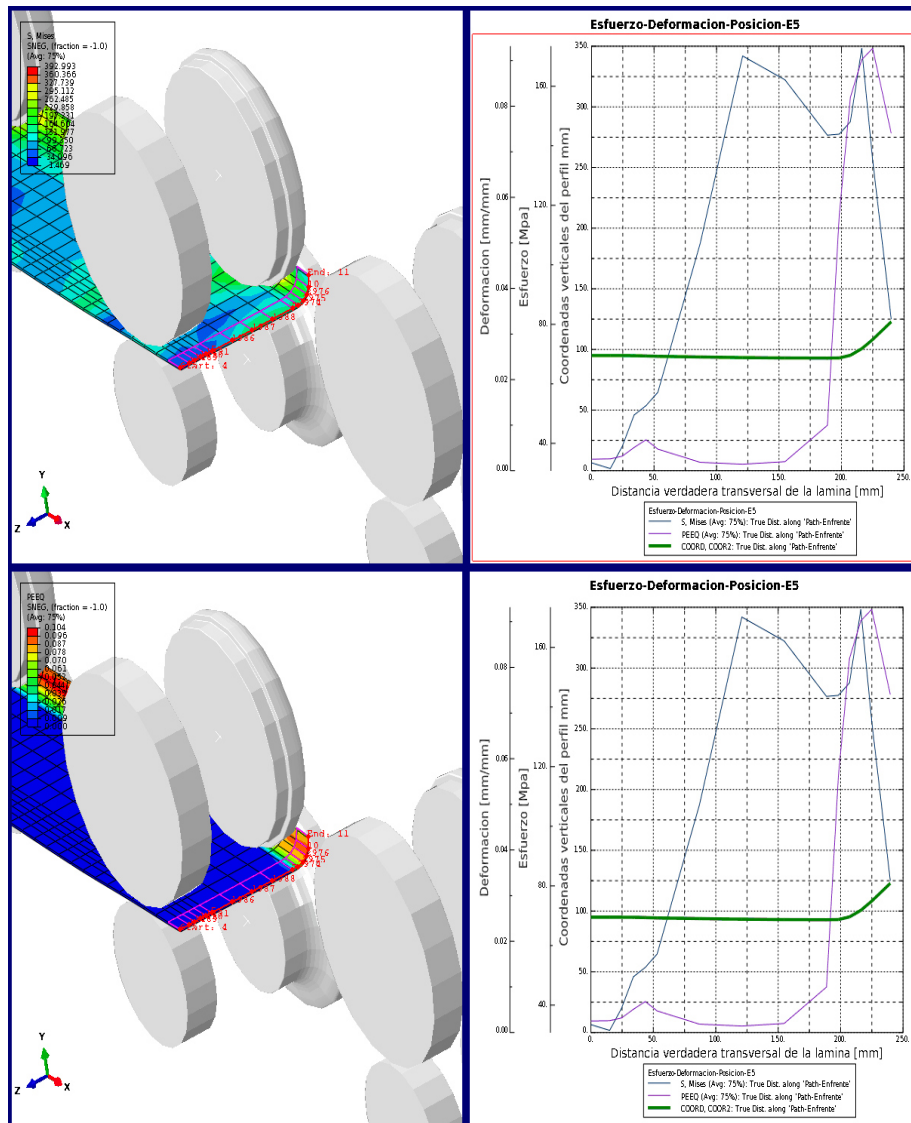


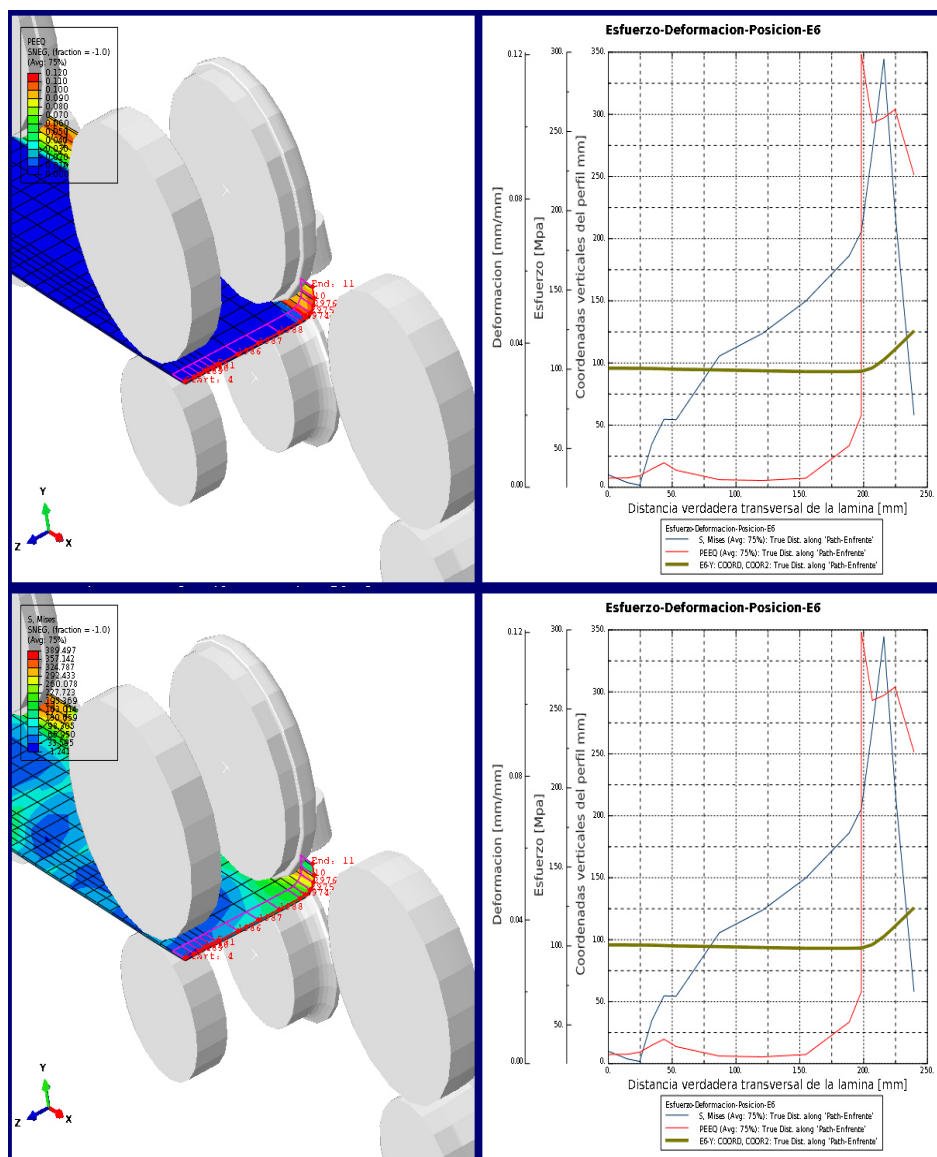
Figura 6.22. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 3.



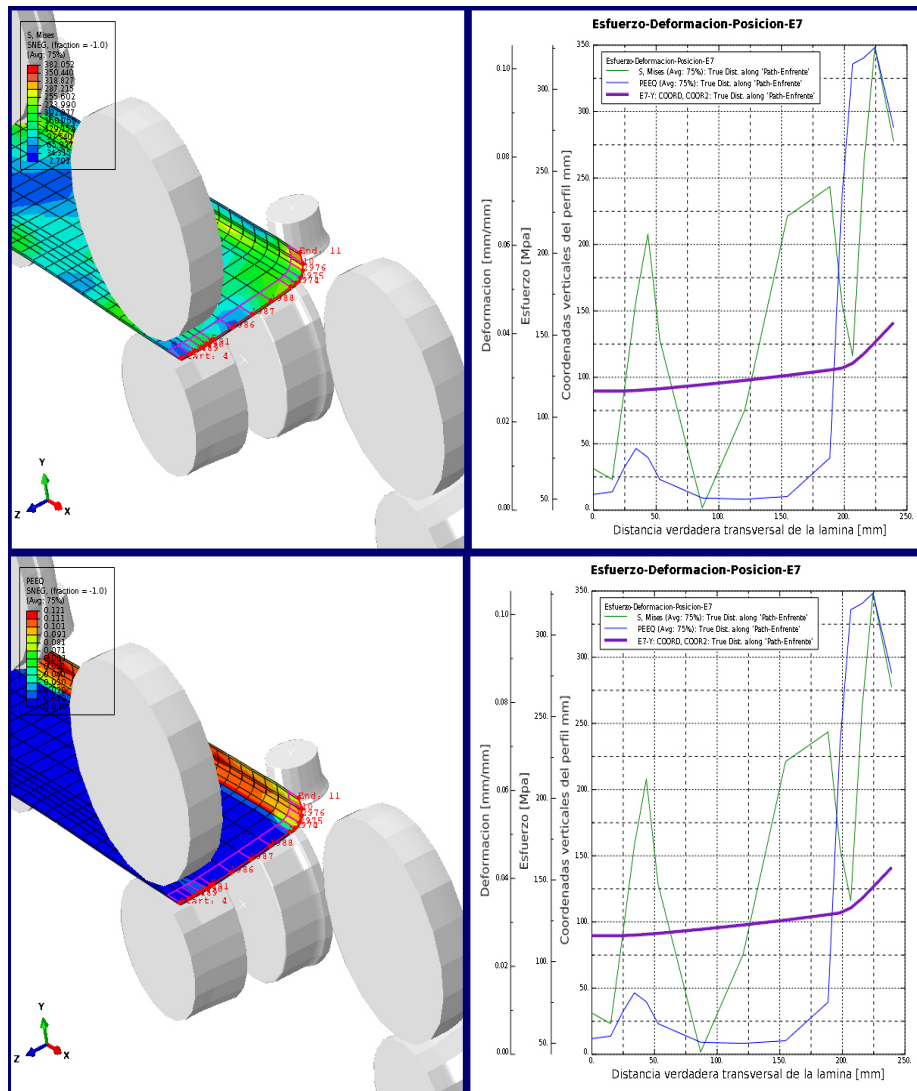
**Figura 6.23. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 4.**



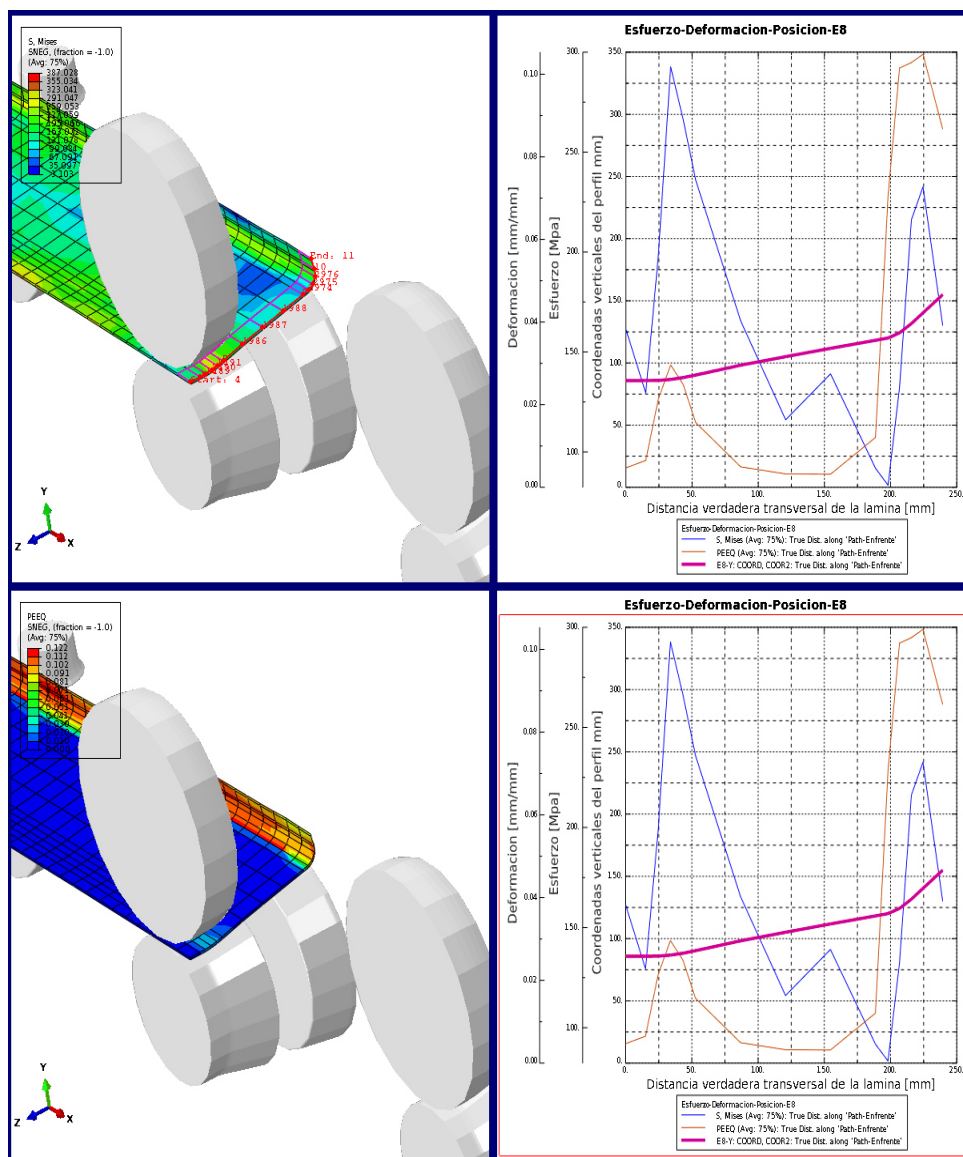
**Figura 6.24. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 5.**



**Figura 6.25. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 6.**



**Figura 6.26. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 7.**



**Figura 6.27. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 8.**

Como se puede observar, las figura 6.20 a la 6.23 presentan la misma configuración de rodillos, por lo que se construyó una trayectoria del frente de la lámina en la salida de cada estación, esta trayectoria se utilizó como referencia para obtener el comportamiento de los esfuerzos y la deformación plástica equivalente a través de la dirección transversal de la lámina. Al observar el comportamiento de la deformación equivalente plástica se deduce que hay deformación permanente y alcanza un pico

máximo al estar en la zona donde se forma el primer ángulo de flexión. También se observa el comportamiento de los esfuerzos máximos que llegan a alcanzar hasta 404 MPa, así mismo se presentan esfuerzos residuales por la deformación plástica, esto es debido a que la lámina entra plana y se dobla continua y progresivamente en la dirección transversal de la línea formada por el conjunto de rodillos conformadores, induciendo tensiones y momentos residuales en las secciones transversales.

También se observa que la placa consta de tres zonas de formación, la parte central que es una zona la cual no entra en contacto directo con un rodillo de contorneado, la zona de formación es la que está en contacto con los rodillos de contorneado y que termina en la línea central de los mismos, también se puede localizar otra región la cual es la zona elástica que comienza en la zona de la salida de la línea central de los rodillos. Por lo tanto, las zonas de transición del perfil tubular comprenden tanto la zona de formación sin contacto y la zona de formación de contacto.

En la figura 6.24 y 6.25 se muestra que hay una diferencia en el comportamiento de los esfuerzos al colocar un rodillo lateral en la estación 5; con lo que respecta a la deformación plástica, ésta conserva su comportamiento ya que no hay un cambio geométrico drástico, por lo cual se considera un punto importante el analizar la obtención de la geometría omitiendo la estación 6, a pesar de que existen esfuerzos residuales debido al estiramiento y compresión en la estación 5, estos pueden contribuir a que no llegue a la fractura.

En las figuras 6.26, 6.27 y 6.28, muestran las estaciones 7, 8 y 9, respectivamente, donde hay un cambio importante en el esfuerzo y en la deformación plástica, debido a

que la placa es sometida en el mismo paso a dos zonas de flexión por compresión y a su vez de tensión al salir de la estación.

En la figura 6.26 se observa gráficamente un incremento en los esfuerzos hasta 215 MPa y una deformación de 0.015 a una posición de 50 mm y un ángulo de  $5^\circ$  con respecto al eje de simetría, mientras que al obtenerse un ángulo de  $87^\circ$ , tanto el esfuerzo y la deformación disminuyen drásticamente a una distancia transversal de la placa entre 50 a 125 mm, esto se debe a la función del rodillo lateral ya que actúa para disminuir la fricción y de guía para que entre a la siguiente estación.

Por otro lado al entrar en la siguiente zona donde ya existe un radio conformado obtenido de las estaciones anteriores, se observan que están presentes esfuerzos residuales por la deformación plástica, esto debido al comportamiento de los esfuerzos en toda la distancia de la sección transversal de la placa. Atenuando este comportamiento en las figuras 6.27 y 6.28.

Las figuras 6.29 y 6.30, correspondiente a las estaciones 10 y 11 tienen el mismo comportamiento con respecto a la deformación ya que no se observa un desplazamiento con respecto a la distancia transversal de la lámina, pero sí hay un cambio en los esfuerzos ya que la placa se eleva hasta llegar a un ángulo de  $21^\circ$  a  $29^\circ$ . Con lo que respecta a la figura 6.31, correspondiente a la estación 12, tiene el mismo comportamiento en la deformación plástica correspondiente y teniendo un ángulo de  $37^\circ$ , por lo cual es el mismo intervalo de  $8^\circ$  en cada estación. Con respecto a los esfuerzos máximos presentes llegan a alcanzar hasta 350 MPa en las tres estaciones.



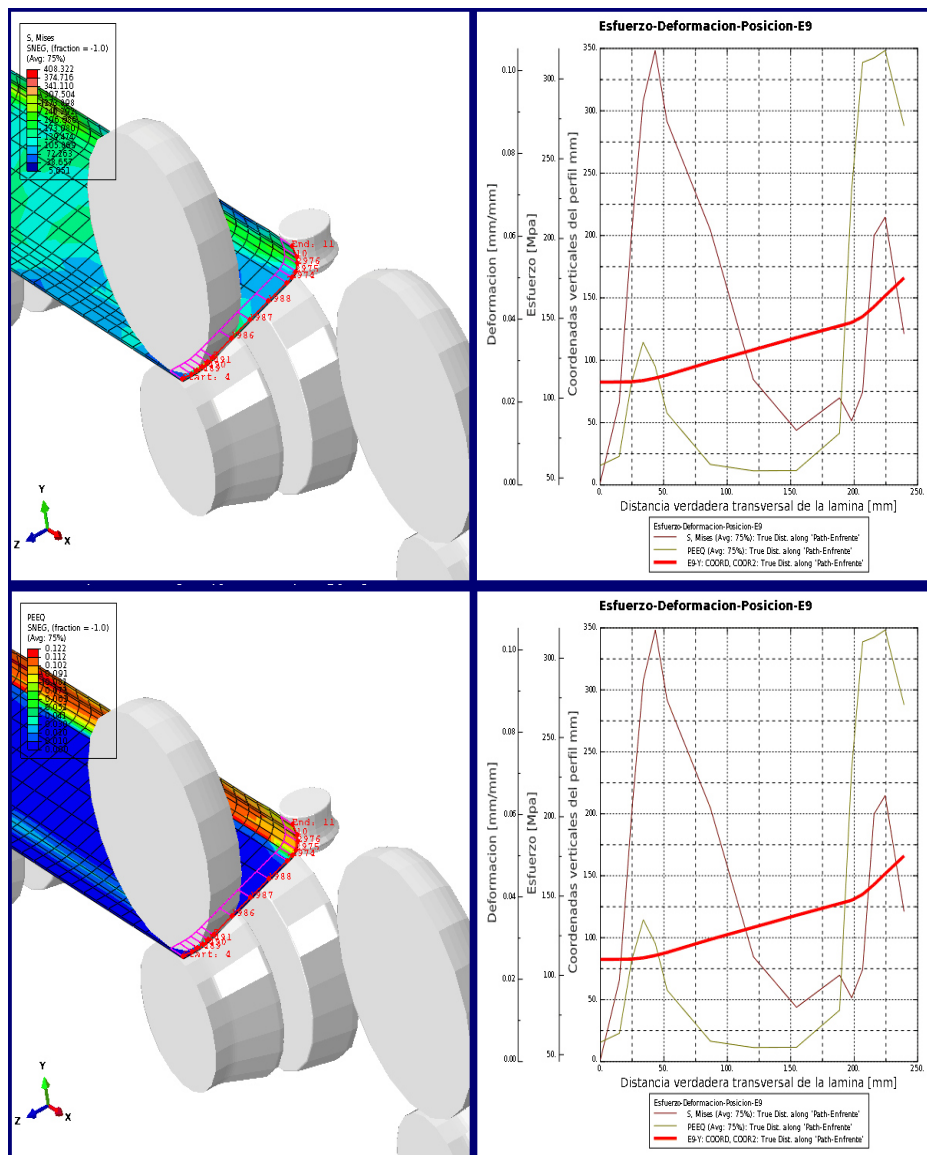


Figura 6.28. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 9.

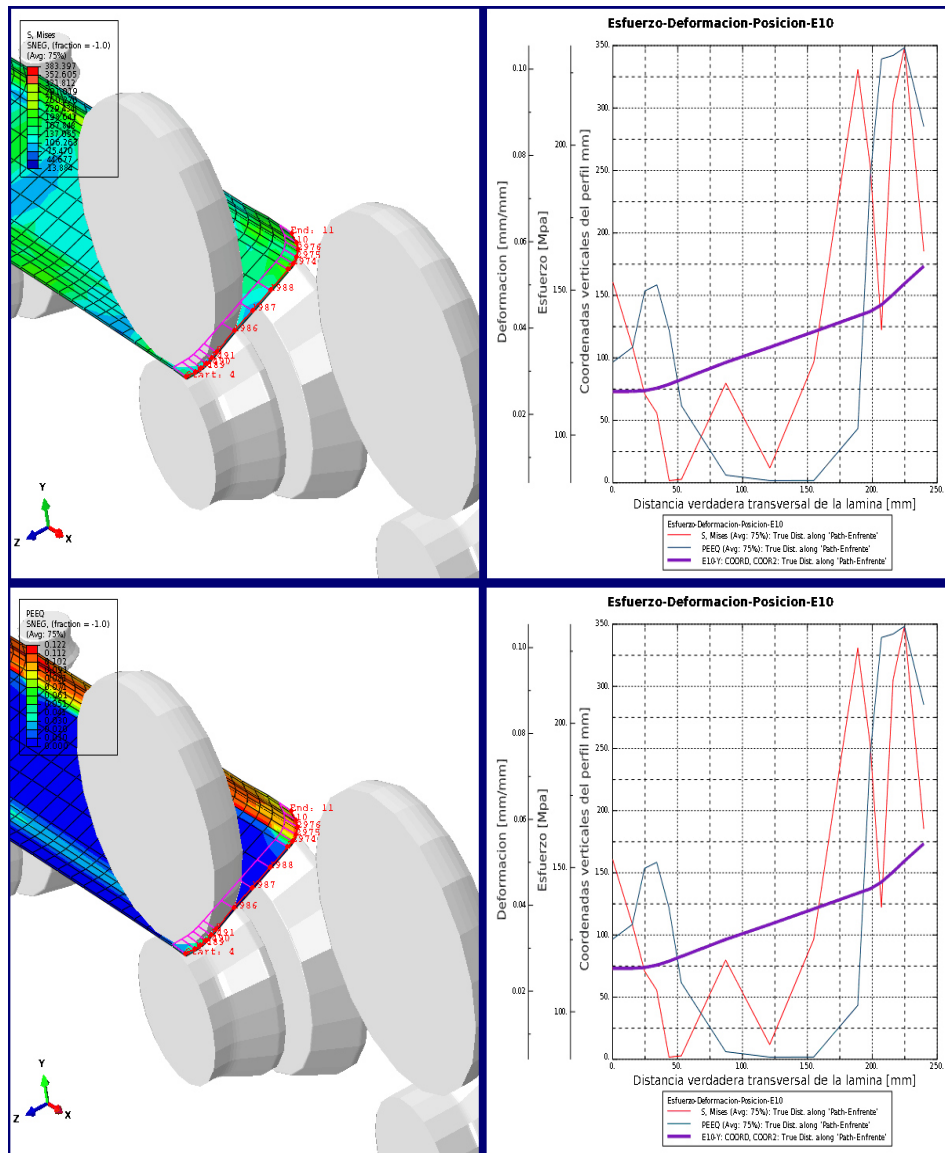
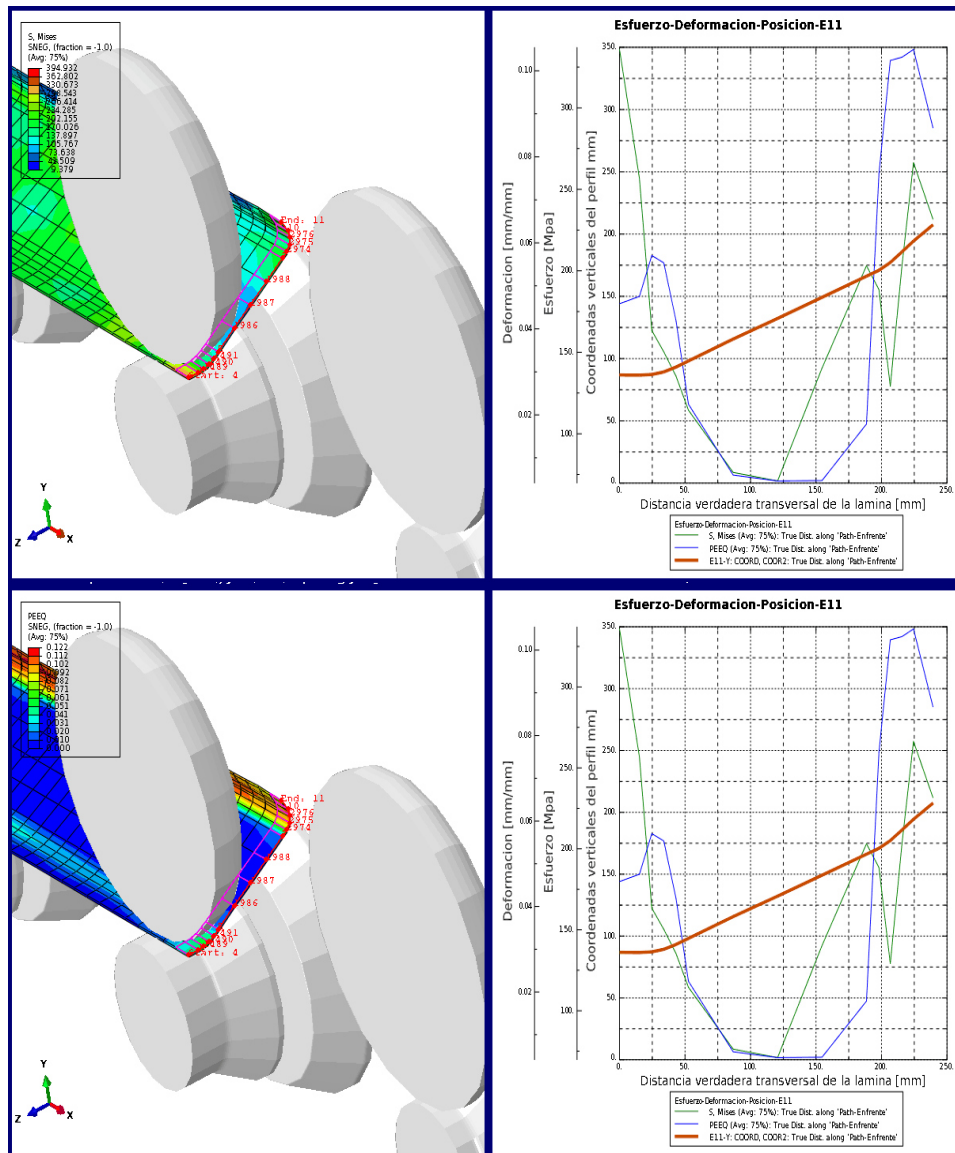
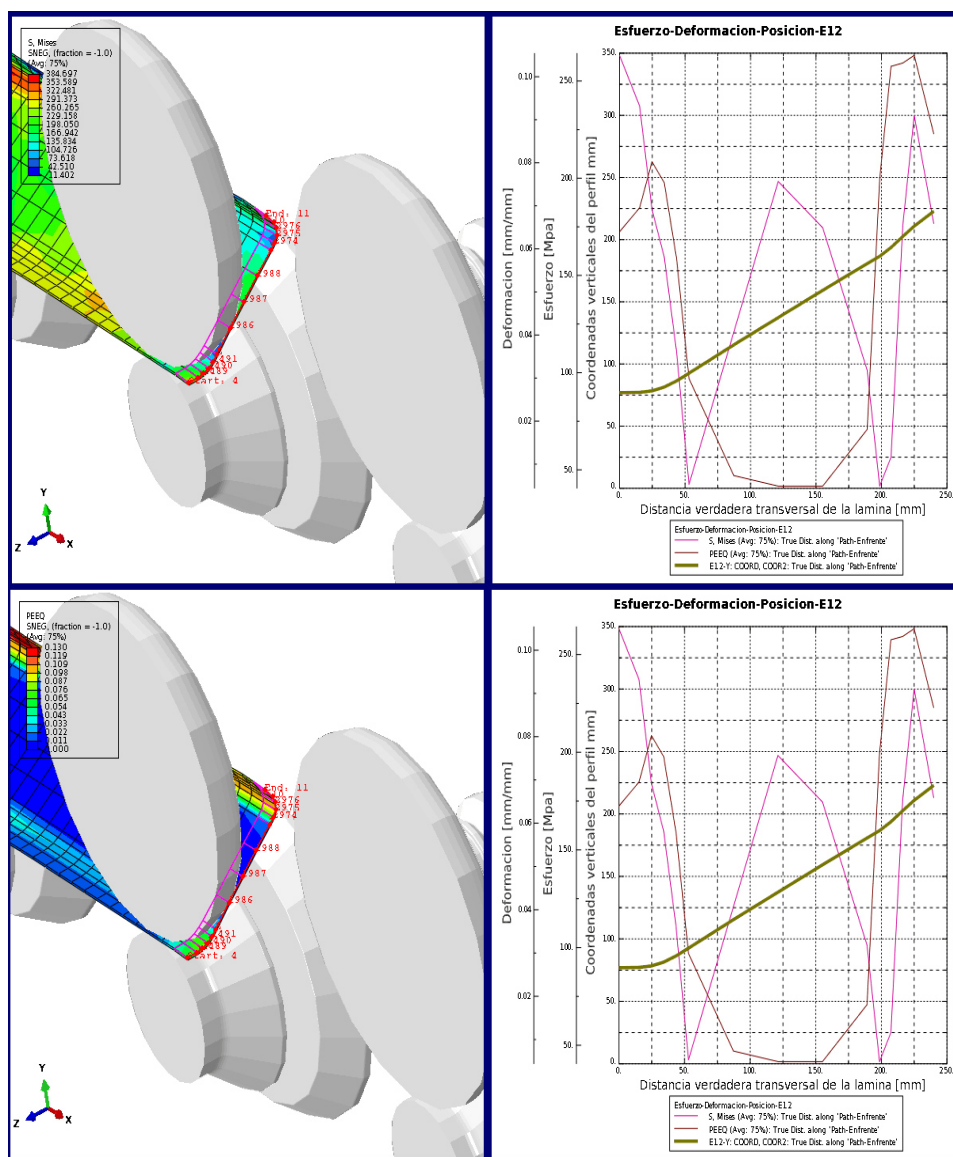


Figura 6.29. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 10.

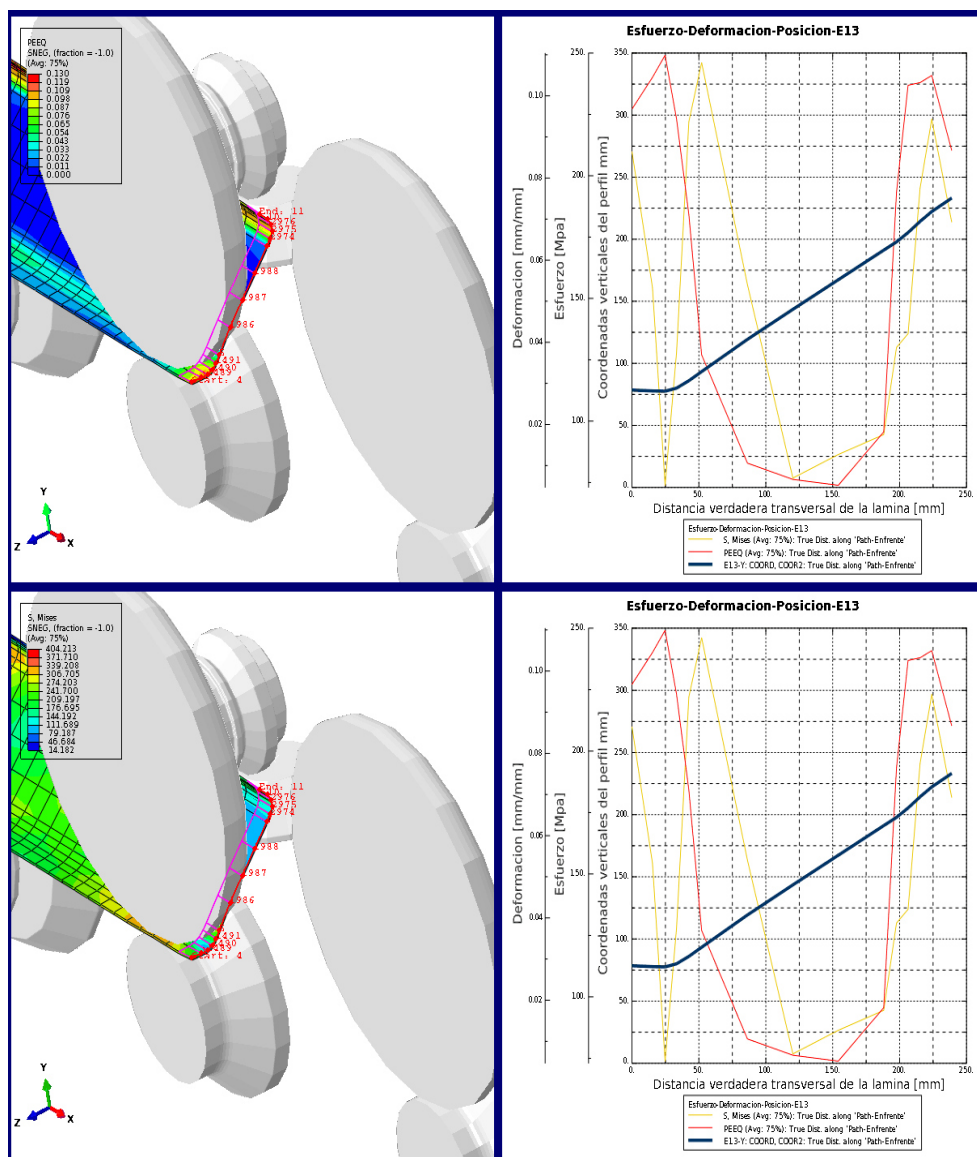


**Figura 6.30. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 11.**

Comparando las estaciones 12 y 13, se observa un comportamiento similar a la deformación plástica equivalente como máxima de 0.11; con lo que respecta a los esfuerzos en la estación 13 mostrada en la figura 6.32, se observa que hay un esfuerzo de compresión por la acción de los rodillos laterales a una distancia trasversal de la placa entre 100 y 200 mm.

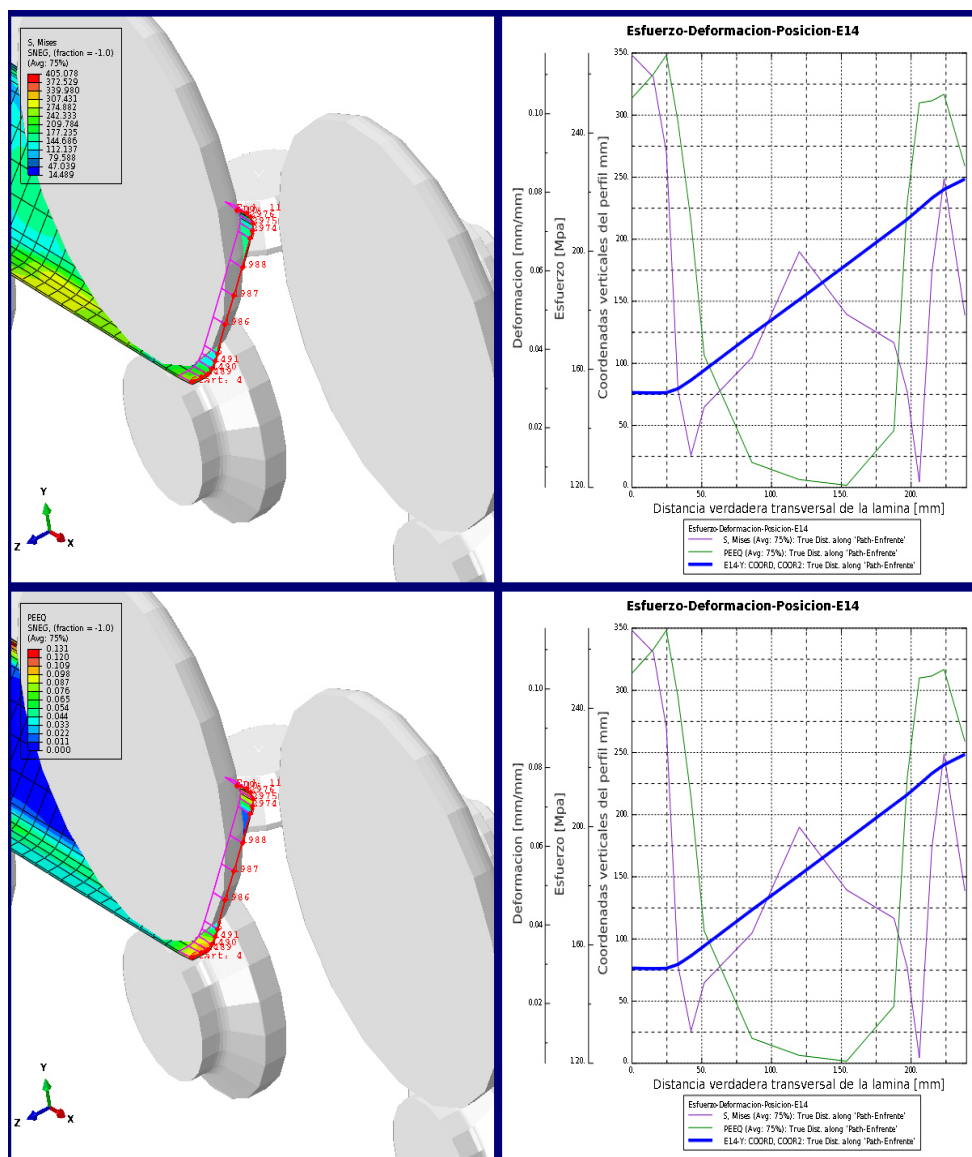


**Figura 6.31. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 12.**



**Figura 6.32. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 13.**

En las figura 6.33 se obtiene un pico máximo de esfuerzo de 274 MPa y una deformación equivalente de 0.120, mientras que en la figura 6.32 se muestra la estación 15 donde se registra un esfuerzo máximo de 271 y en la figura 6.33b correspondiente a la estación 16 se registró un esfuerzo de 271 MPa. Con lo que respecta a la deformación se obtuvieron los mismos valores para ambas estaciones de 0.120.



**Figura 6.33. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 14.**



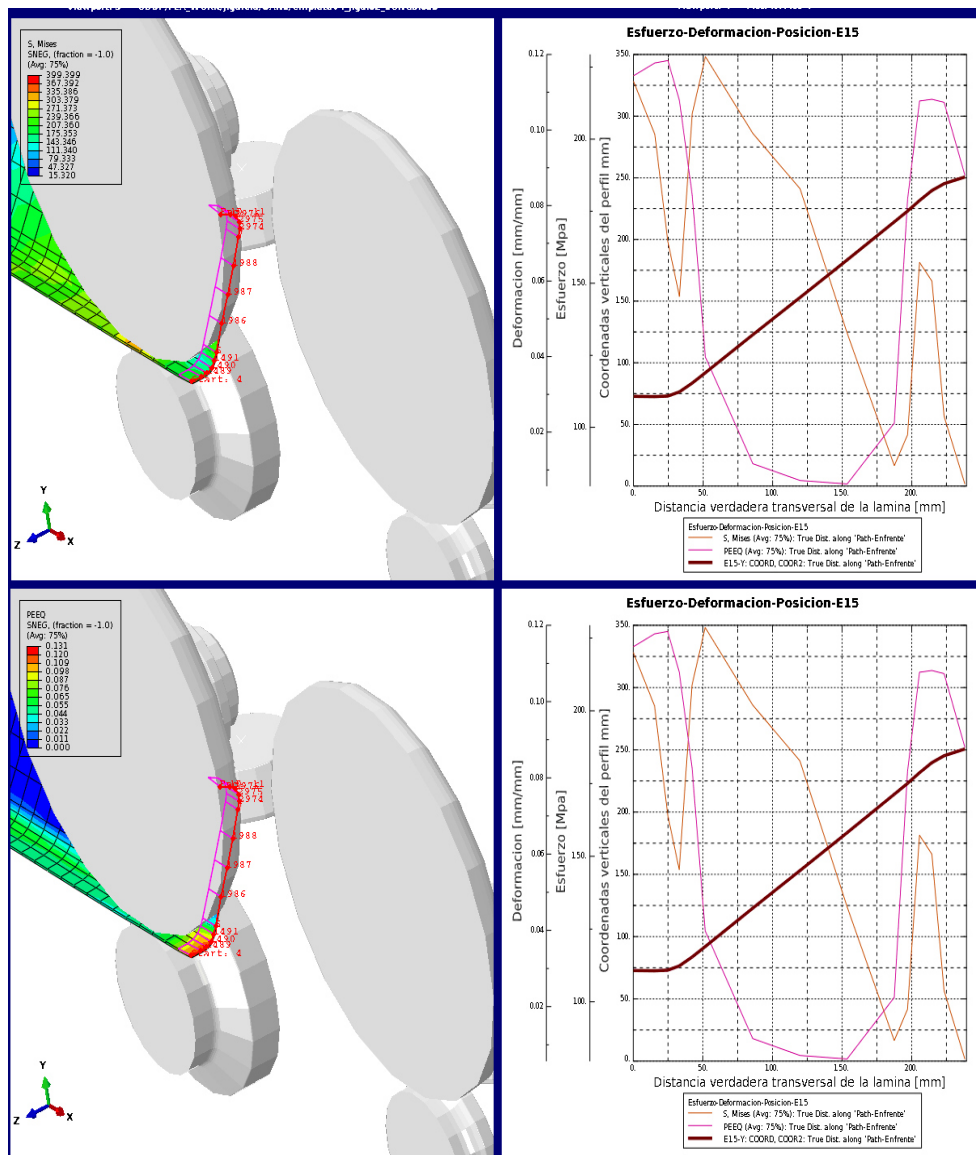
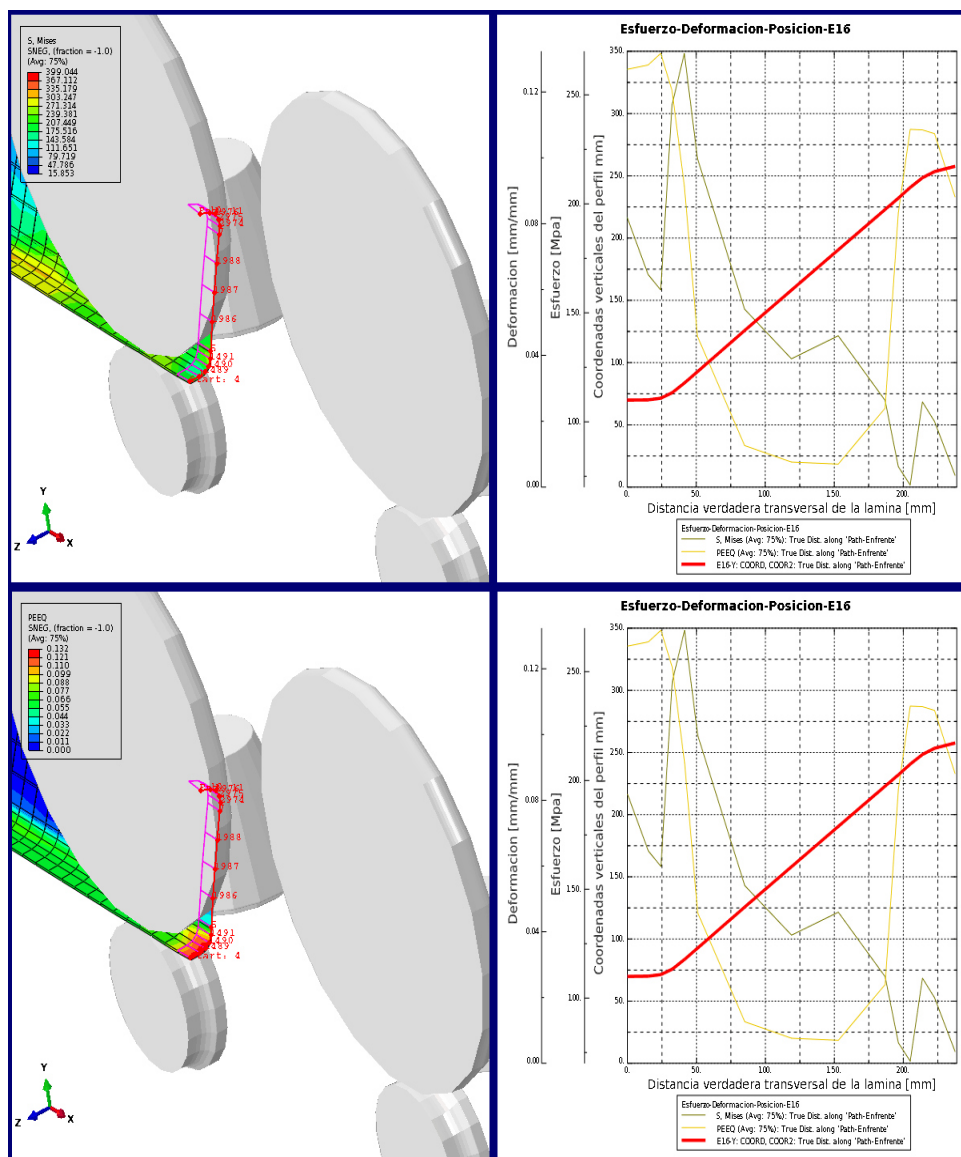


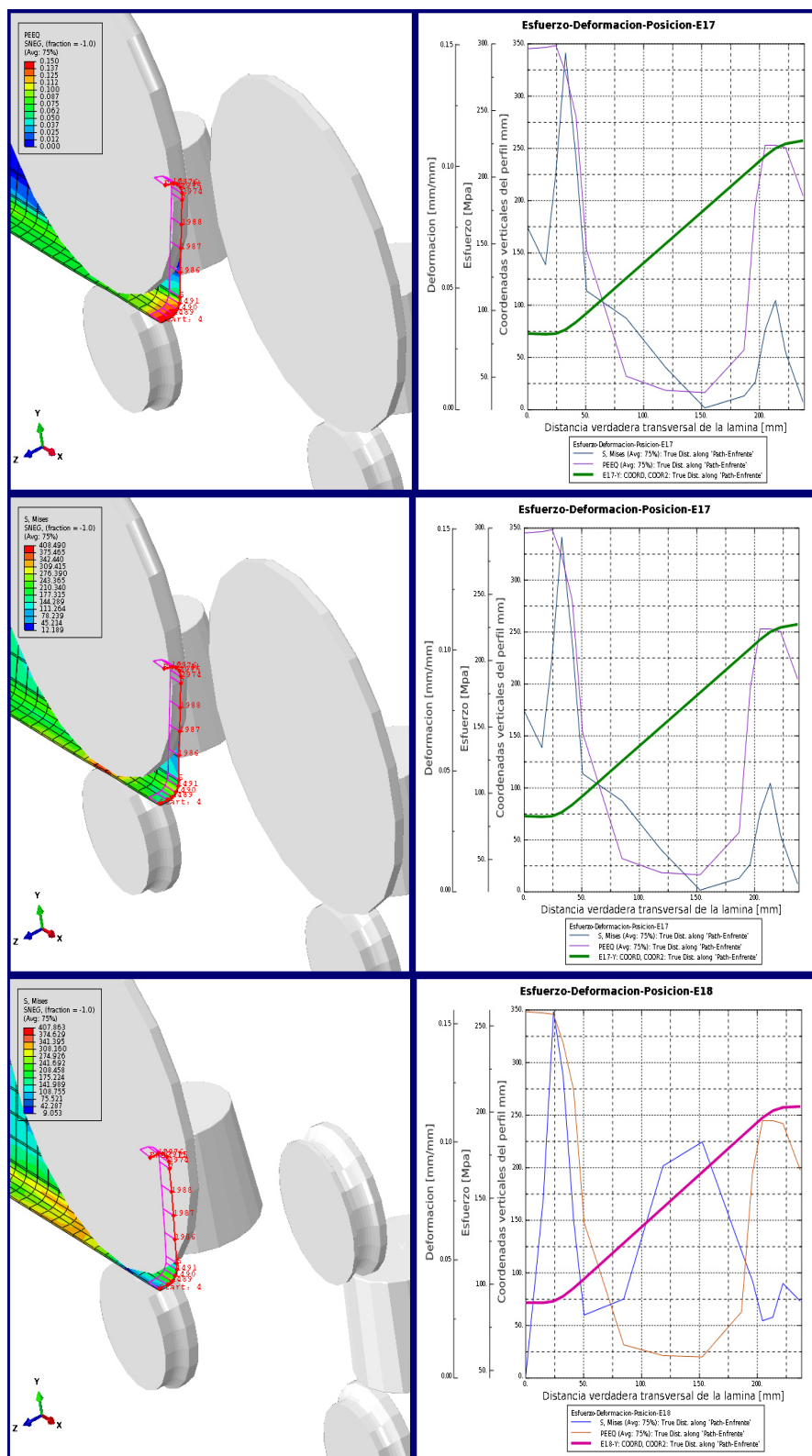
Figura 6.34. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 15.



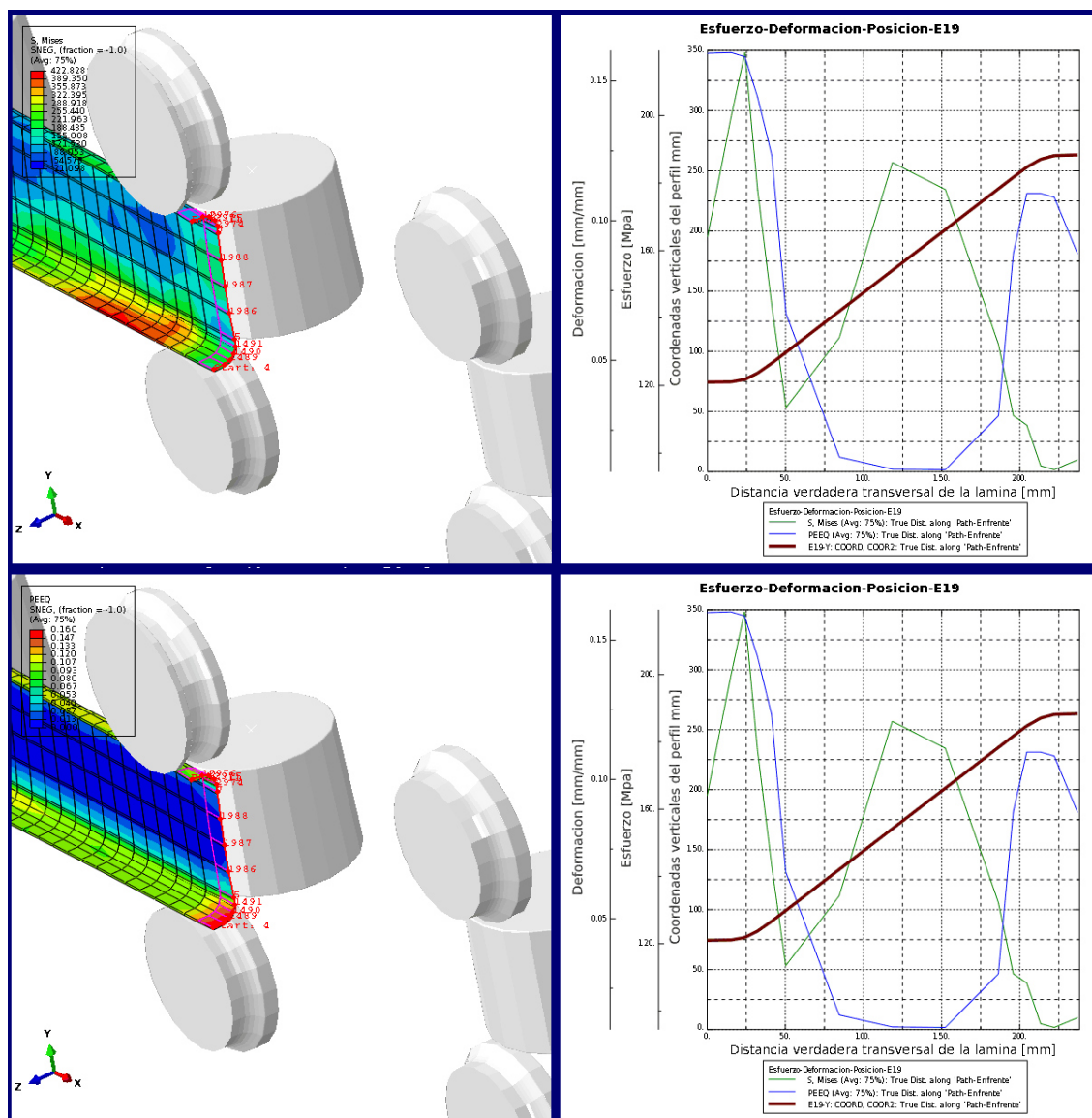
**Figura 6.35. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 16.**

Las estaciones 17 y 19, mostradas en la figura 6.36 y 6.37, muestran un incremento en el esfuerzo de 309 y 328 MPa, respectivamente. Por otro en lado la estación 18 hay un disminución en el esfuerzo máximo registrando 275 MPa. Con lo que respecta a la deformación plástica esta muestra incremento de 0.121 a 0.137.





**Figura 6.36. Distribución de Esfuerzos Mises de la estación 17 y Deformación plástica equivalente en la estación 17 y 18.**



**Figura 6.37. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 19.**

En las figuras 6.38 a la 6.40, correspondientes a las estaciones 20, 21 y 22, donde se muestra un comportamiento similar tanto en el esfuerzo máximo registrado de 429 MPa como en la deformación plástica equivalente de 17.5 mm/mm. Estas son las últimas estaciones del proceso.

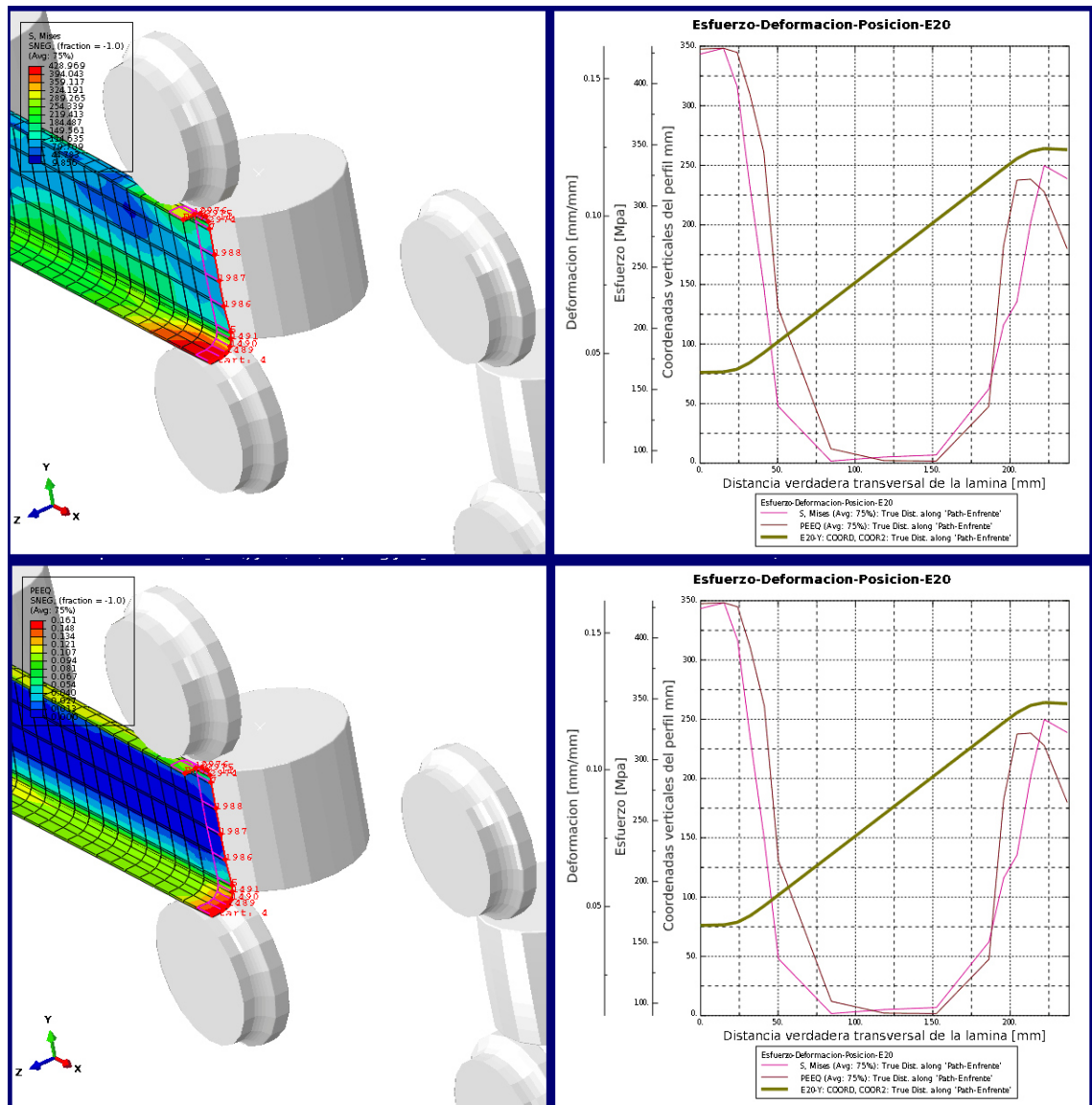
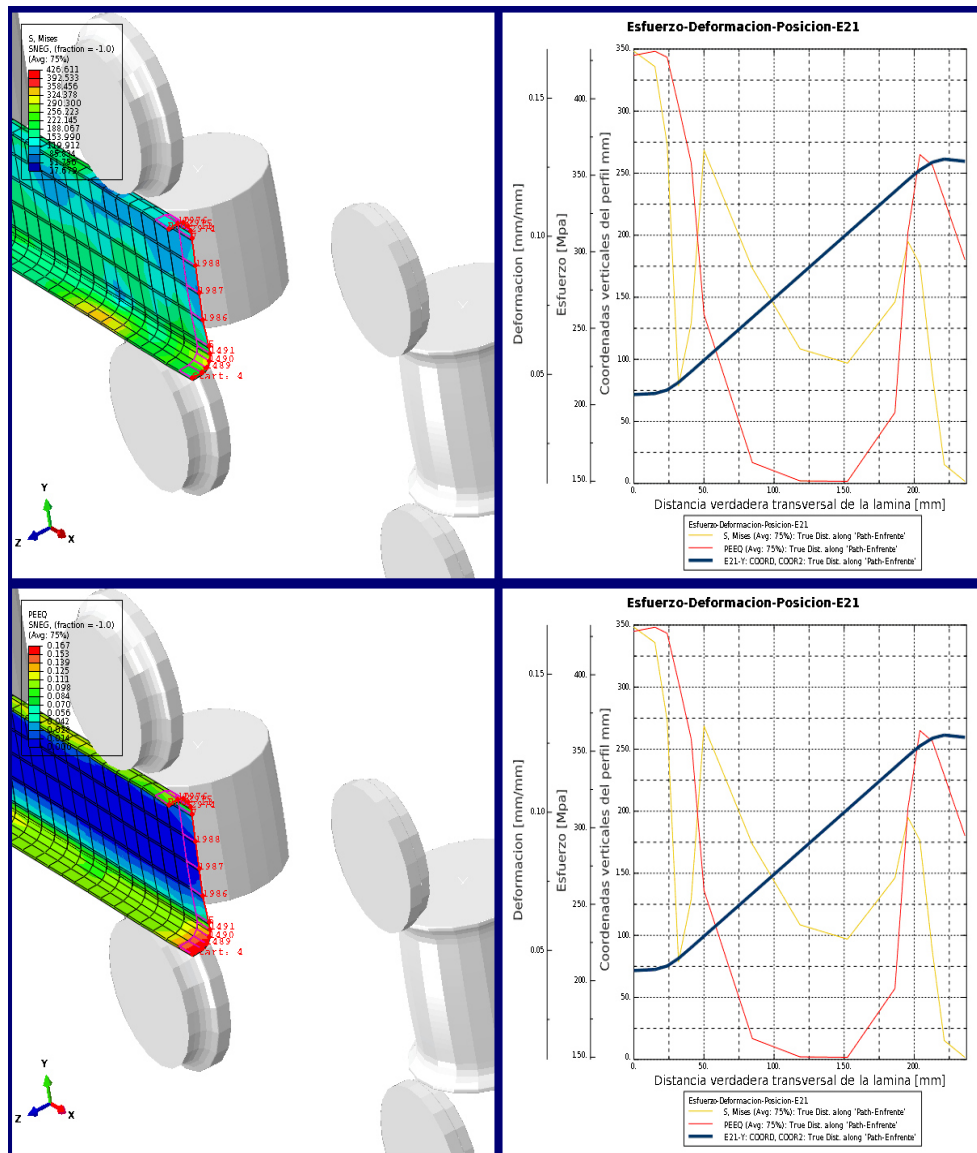
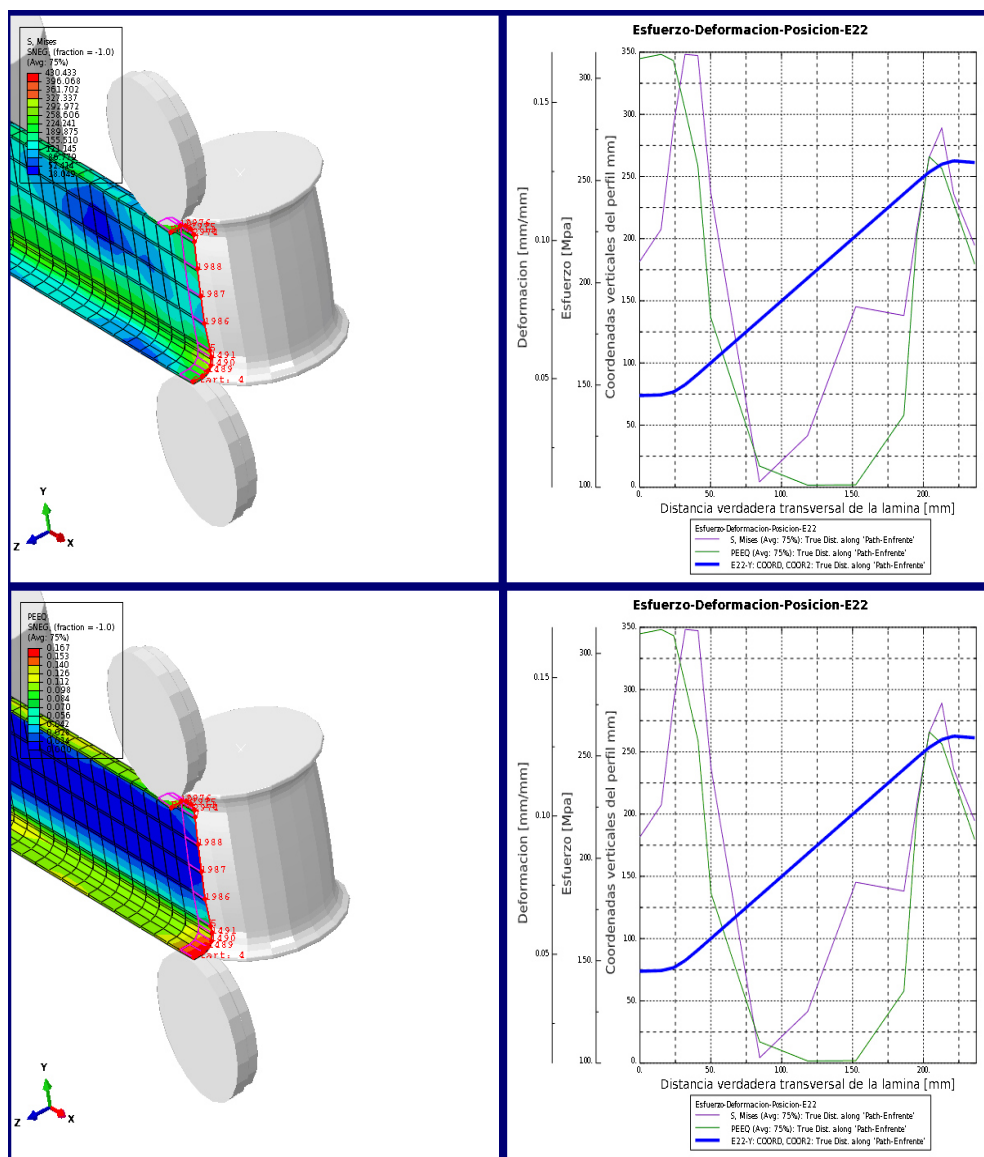


Figura 6.38. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 20.



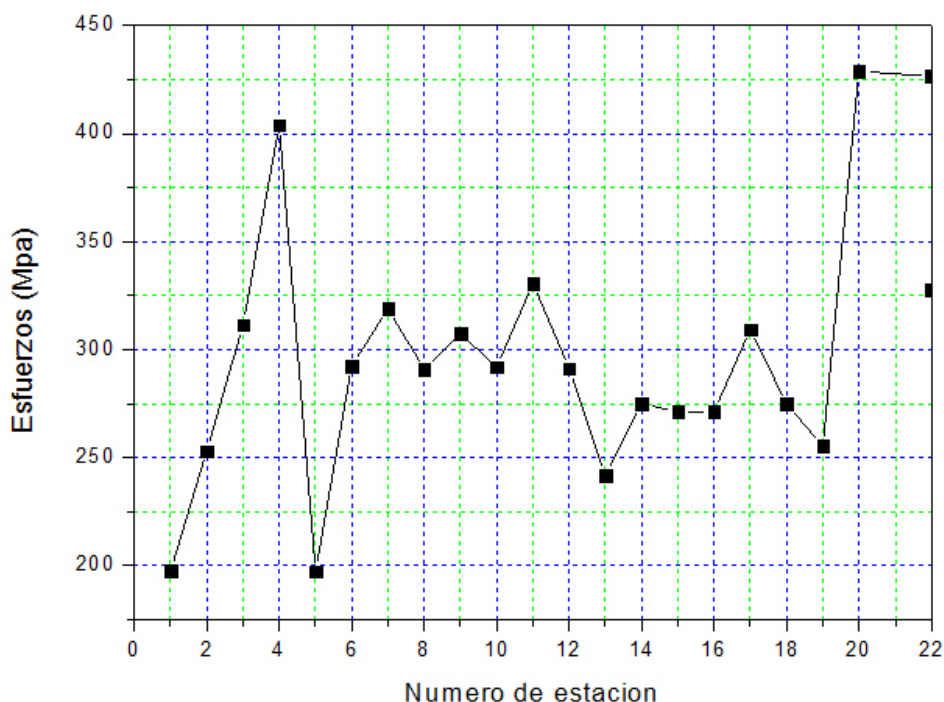
**Figura 6.39. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 21.**



**Figura 6.40. Distribución de esfuerzos de Von Mises y deformación plástica equivalente en la estación 22.**

En la figura 6.41 se muestra el comportamiento de los esfuerzos de Von Mises del modelo de LNP con malla refinada, se observa que en las primeras 4 estaciones se incrementan los esfuerzos hasta superar los 400 MPa, después hay un descenso de esfuerzos en la estación 5, registrando 200 MPa. Entre las estaciones 6 y 19 se registras esfuerzos en un intervalo de 225 MPa a 330 MPa, En las estaciones 20 y 21 se observa

una estabilización de los esfuerzos de 425 MPa, esto es debido a que no hay un cambio geométrico de la lámina conformada en estas estaciones, mientras que en la última estación el esfuerzo decae hasta 325 MPa.

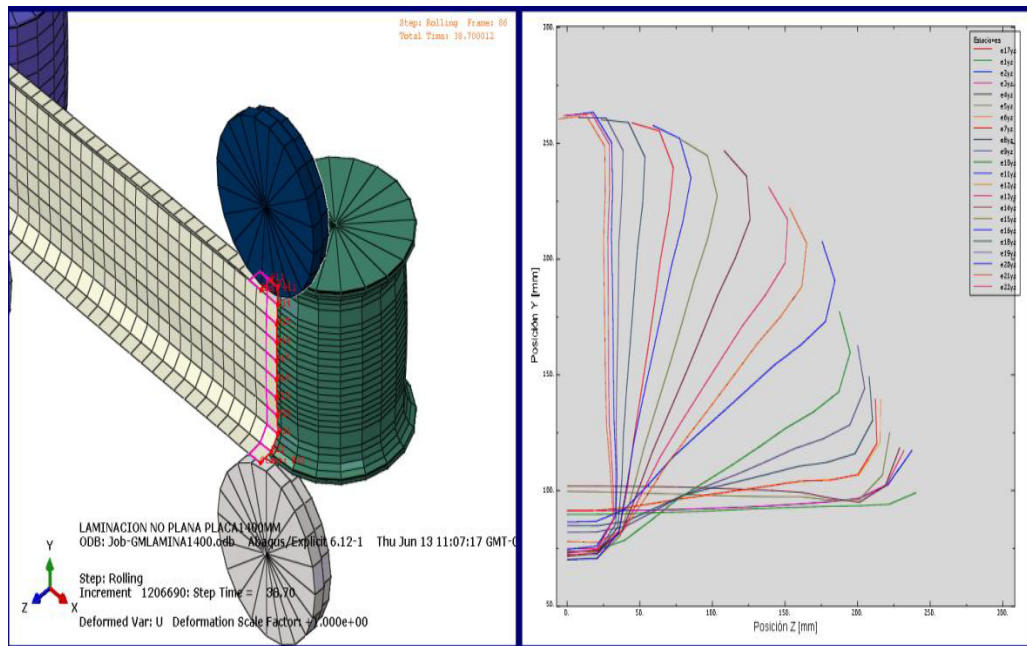


**Figura 6.41. Esfuerzos máximos obtenidos en cada estación del modelo de malla fina.**

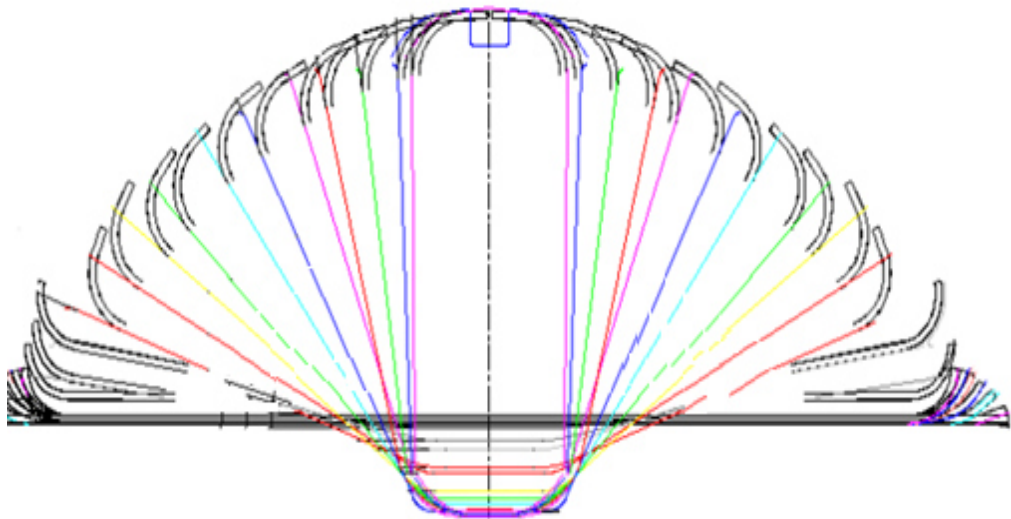
#### 6.7.4 Obtención del diagrama de formación (flor).

Al obtener los modelos con dos tipos de malla para el proceso de laminación de 22 estaciones, se obtuvo el diagrama de formación (flor) para cada uno de ellos, en el cual para la malla burda (ver figura 6.40) no se captan los radios del perfil tubular obtenido del proceso, por otro lado se observa que el más cercano al diseñado por CAD presentado en la figura 6.41 fue el de la malla fina, presentado en la figura 6.42.

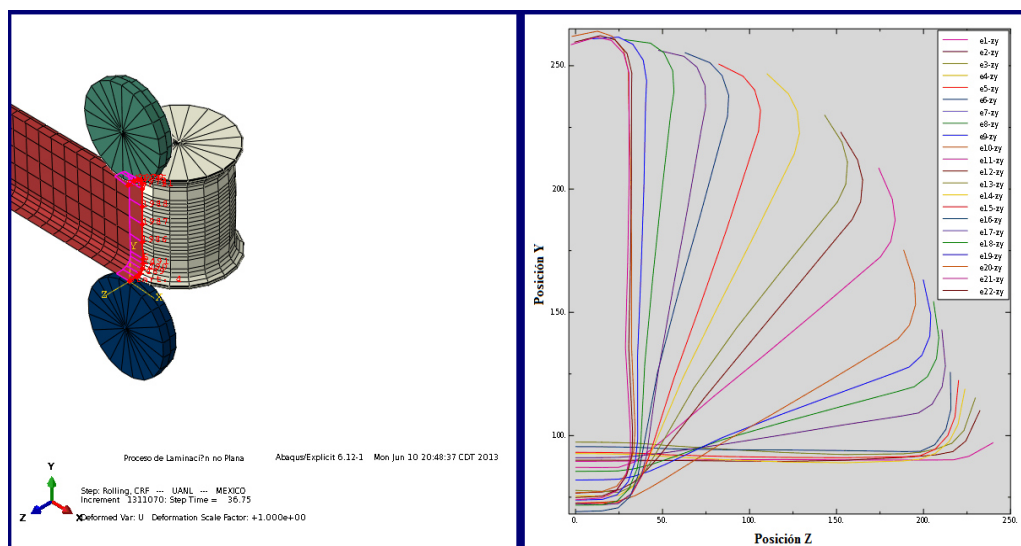




**Figura 6.42. Diagrama de formación con una malla de 12x70 elementos.**



**Figura 6.43. Diagrama de formación obtenida de ingeniería inversa por medio de CAD.**

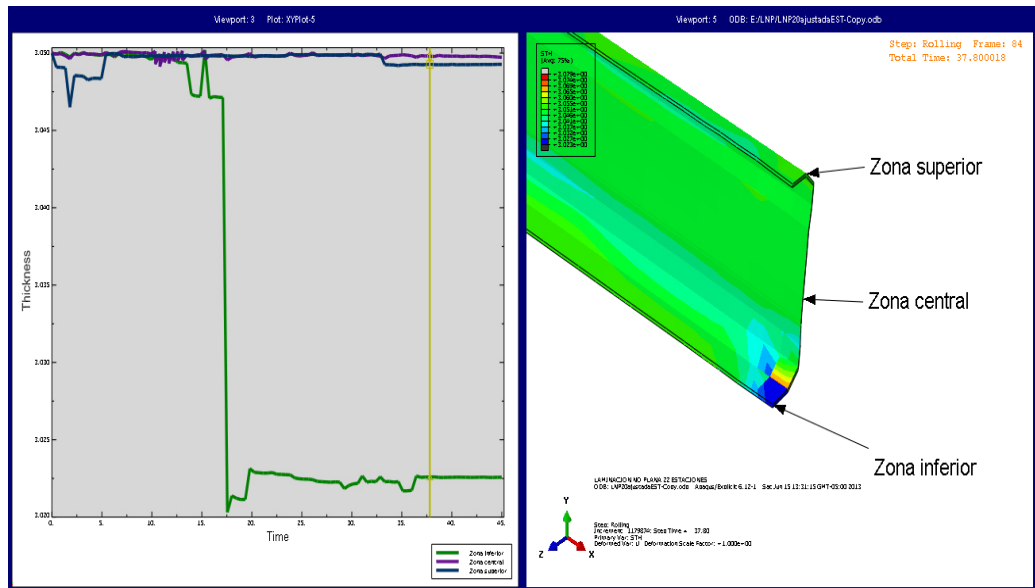


**Figura 6.44. Diagrama de formación con una malla refinada (6963 elementos) en la zona de flexión.**

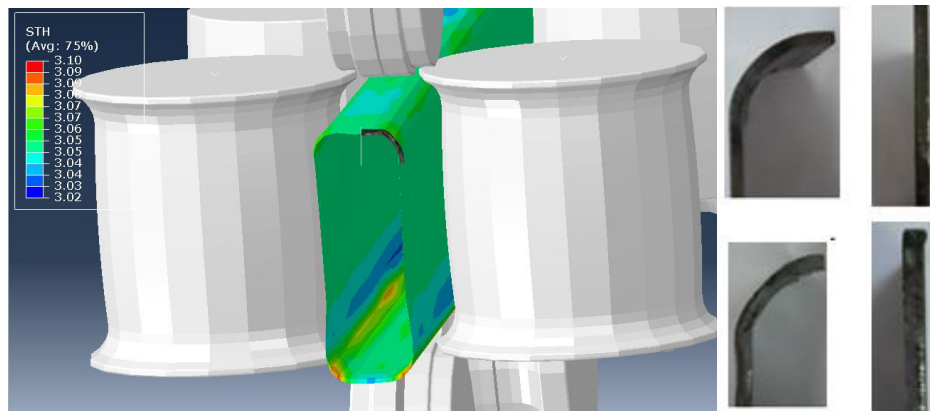
Con los resultados obtenidos de los esfuerzos y las deformaciones plásticas del modelo de 22 estaciones, se predice cómo reacciona la lámina en cada estación de rodillos, así mismo se obtuvo el diagrama de formación del proceso.

También se observó una variación en el espesor de la placa, principalmente una reducción en la zona inferior señalada en la figura 6.45, esto es debido principalmente al espacio entre rodillos, ya que el sistema de LNP consta de un ajuste manual por parte del operador, por lo cual no es un proceso controlable con lo que respecta este punto y la muestra obtenida presenta la variación de espesores mostrada en la figura 6.46, además de que existe una compresión dada por los rodillos.





**Figura 6.45. Espesores después del proceso de LNP.**



**Figura 6.46. Espesores en la pieza final después del proceso de LNP.**

## **Capítulo 7**

### **Conclusiones y recomendaciones**

#### **7.1 Conclusiones.**

Los ensayos de tensión realizados en la placa antes del proceso de conformado permitieron conocer las propiedades mecánicas del acero HSLA50 a temperatura ambiente, las cuales fueron utilizadas para alimentar el modelo de simulación del proceso de LNP. Con lo que respecta a la ingeniería inversa permitió la obtención de las geometrías de los rodillos de trabajo que componen el sistema LNP para poder realizar el modelo, utilizando técnicas CAD-CAM-CAE para la construcción de la línea de LNP, compuesta por 22 estaciones y 72 rodillos.

Las mediciones experimentales obtenidas mediante técnicas de ingeniería inversa y CAD permitieron la construcción geométrica del perfil tubular conformado mediante el proceso de LNP, comparándolo con el obtenido mediante la simulación.

El programa de elemento finito utilizado para la simulación del proceso de LNP utiliza formulación implícita y explícita, concluyendo que la formulación explícita presentó mejores resultados a bajo costo computacional para el modelo en 3D. Los elementos utilizados tipo shell y el refinado de malla en las zonas de flexión presentaron resultados con mayor exactitud, mientras que los elementos sólidos demandaron tiempo para que se llevara a cabo la convergencia sin obtener soluciones.

## **7.2 Recomendaciones.**







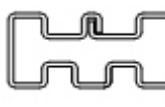

Se recomienda emplear el módulo de optimización de Abaqus<sup>MR</sup> para optimizar la geometría de los rodillos, así mismo modelar estos como cuerpos deformables. Además de realizar pruebas experimentales que permitan obtener los coeficientes de fricción y las velocidades reales. El modelo que se generó se puede utilizar para otros tipos de materiales, espesores y así poder optimizar el proceso.

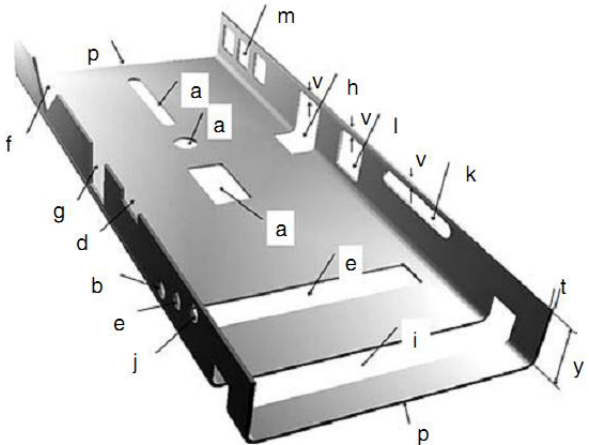
## **7.3 Contribución científica y tecnológica.**

En este trabajo se realizó un estudio a través del método de elemento finito y la implementación de la metodología de simulación de la línea de formado en frío de lámina de acero, obteniendo un modelo tridimensional de las 22 estaciones de formado, la cual está compuesta por 72 rodillos. En la actualidad, la mayoría de los modelos son bidimensionales y utilizan un número menor de estaciones de formado, por lo que este trabajo representa la generación de conocimiento en procesos de formado en frío utilizados actualmente en la industria. Además, éste modelo podrá ser reproducido por otros investigadores, promoviendo su aplicación de conocimientos en el área de conformado, incorporando nuevos materiales, generando innovación tecnológica para el desarrollo de nuevas tecnologías de formado, ya que se obtuvo el diagrama de la flor, que podrá ser utilizado en el estudio de la optimización geométrica del proceso, en análisis de deformaciones involucradas y la predicción de recuperación elástica del material.

## ANEXOS

## Anexo 7.1 A Valores aplicados a las Ec. 3.10 y 3.11 [32]

Efectos de forma en número de pases				
Factor de Forma	1	1	1.05	1.05
S				
	1-1.05	1.1-1.2	1.4	1.5
				
Efectos de los agujeros y muescas (z) en el número de pases				
Z				



y= Altura

t= Espesor

v= distancia desde el borde

	$\frac{y}{t} < 20$	$\frac{y}{t} > 40$
no perforaciones	0	0
a	0	0
b	0	0
c	0	0.07
d	0.03	0.05
e	0.05	0.05
f	0.07	0.12
g	0.07	0.12
h	0.1	0.1
i	0.12	0.15
j	0.12	0.15 (if $s \geq 5t$ )
k	0.15	0.2 – 0.4 (*)
l	0.25	0.3 – 0.5 (*)
m	0.5	0.6 – 0.7
n <sub>1</sub>	0	Ranuras n2 bordes continuos n3 continuidad del límite de borde
n <sub>2</sub>	0.05	
n <sub>3</sub>	0.05	
n <sub>4</sub>	0.30	
n <sub>5</sub>	0.25	
p	0.18	0.18 Pre-corte

---

<b>Efectos del factor tolerancia (f) en el número de pases</b>	
Holgado (construcción)	0
Medio	0.5-1.0
Ajustado (automotriz)	1.1-1.7
Extremadamente ajustado	1.9-(2)

---

## Anexo 7.2 B Especificaciones del digitalizador Range 7 Konica Minolta [92]

### Especificaciones del digitalizador Range 7 Konica Minolta

Método de Medición			Triangulación por el método de luz seccionada.			
Fuente de Luz			Laser semiconductor, Longitud de onda: 660 nm.			
Clase del Laser			Clase 2 (IEC 60825 - 1 Edición 2)			
Número de Píxeles Obtenidos			1.31 megapíxeles (1280 x 1024)			
Distancia de Medición			450 a 800 mm			
Lentes Receptores			TELE, WIDE			
Rango de Medición (mm)	Distancia		TELE 450 mm	TELE 800 mm	WIDE 450 mm	WIDE 800 mm
	Dirección	X x Y	79 x 99	141 x 176	150 x 188	267 x 334
		Z	54	97	109	194
Precisión (Distancia entre esferas)*¹			±40µm			
Precisión (Z,σ)*²			4 µm			
Auto-Enfoque			Si			
Auto-Exposición			Si			
Tiempo de escaneo			Aproximadamente 2 segundos por toma.			
Función de vista preliminar			Aproximadamente 0.4 segundos por toma.			
Condiciones de luz ambiental durante escaneo			500 lx o menos			
Interface de salida			USB			
Alimentación			Incluye Adaptador AC Voltaje de entrada: 100 a 240 VCA(50 - 60 Hz.) Corriente: 1.4 A (100 VCA)			
Dimensiones			295 (W) x 190 (H) x 200 (D) mm excluyendo las agarraderas.			
Peso			Aproximadamente 6.7 Kg.			
Temperatura de Operación / Rango de humedad			10 a 40° C / Humedad relativa del 65% o menor (sin condensación)			
Storage temperatura / rango de humedad			- 10 a 50°C / Humedad relativa del 85% o menor (a 35°C, sin condensación)			

\*1 Al medir la distancia entre dos esferas como se define en VDI/DE 2634-2 bajo las condiciones de medición del sensado de Konica Minolta. Condiciones de medición del sensado de Konica Minolta: Temperatura: 20±1°C; Lente: TELE; Distancia de Medición: 450 mm; Precalentamiento: 20 min.; Software utilizado: Range Viewer, software de procesamiento de Konica Minolta; Después de calibrar el instrumento; Objetivo de medición: estándar de 2 esferas de Konica Minolta; Arreglo del objetivo de medición: Arreglo estándar de Konica Minolta (10 posiciones dentro del espacio de medición); Incertidumbre del objetivo estándar no incluida.

\*2 Condiciones de Medición: Temperatura: 20±1°C; Lente: TELE; Distancia de Medición: 450 mm; Precalentamiento: 20 min.; Objetivo de medición: tabla planar estándar de Konica Minolta; Software utilizado: Range Viewer, software de procesamiento de Konica Minolta; valor de 1 σ.

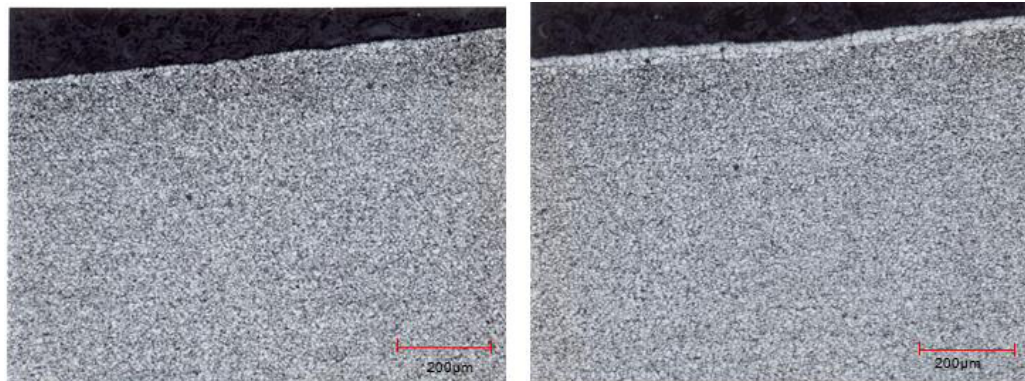
**Anexo 7.3 C Datos obtenidos de las pruebas de tensión de la zona plástica para el acero HSLA50.**

Deformación	Esfuerzo (MPa)	Deformación	Esfuerzo (MPa)
0.02374	311.548	0.186841878	436.376837
0.029572838	322.189354	0.190768087	438.89965
0.034284627	318.926273	0.194815362	441.630655
0.039100793	320.134486	0.198459869	443.854425
0.043915285	320.141636	0.202493574	446.46152
0.048689108	321.782205	0.206222978	448.734229
0.053302382	321.429247	0.210122866	451.114339
0.057832487	324.845976	0.213831233	453.428531
0.062547296	327.375152	0.217387648	455.613074
0.06670657	332.92301	0.221181314	457.895724
0.07093645	337.817706	0.225092652	460.216323
0.075199116	342.574937	0.228759708	462.315251
0.079553361	347.447972	0.232580323	464.657941
0.083823726	352.04547	0.235918683	466.461002
0.088253504	356.766433	0.239599497	468.671465
0.092361243	360.947821	0.243137696	470.708546
0.096726557	365.427614	0.246750116	472.652404
0.101150678	369.583075	0.250364738	474.624038
0.10542319	373.595263	0.25403218	476.719241
0.109844175	377.750367	0.257525653	478.656211
0.11400447	381.478991	0.261146723	480.61669
0.118202928	385.154742	0.264513912	482.382607
0.122372321	388.693207	0.270256212	485.419865
0.126713661	392.343841	0.278459047	489.741974
0.130927936	395.765677	0.286670187	494.039558
0.134957273	399.076702	0.294907285	498.258558
0.139369284	402.510865	0.303167492	502.393307
0.143466966	405.720158	0.311437156	506.492282
0.147546149	408.712307	0.319725718	510.502998
0.151625333	411.876001	0.328033652	514.411387
0.155655542	414.879405	0.33635201	518.253343
0.159752665	417.683392	0.34469288	521.961645
0.163473621	420.439849	0.353059813	525.524735
0.167643772	423.395097	0.361470452	528.847234
0.171654741	426.119427	0.369949457	531.821128
0.175579654	428.876599	0.377364279	533.248733
0.179401767	431.398167	0.380405455	533.734631
0.183003036	433.849723		

#### **Anexo 7.4 D Micrografías del acero HSLA 50**



**Microestructura del Acero HSLA 50**

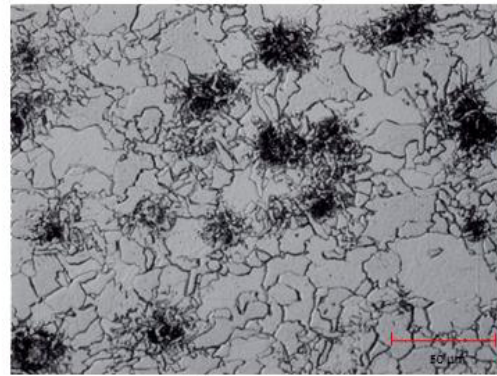


**Area a) Transversal y (b) longitudinal micrografía del acero previo al proceso de roloformado , ASTM 10 tamaño de grano, 100x.**





a)



b)

**Micrografía(a) Área de soldadura 1 (b) Área afectada por el calor, 500x.**

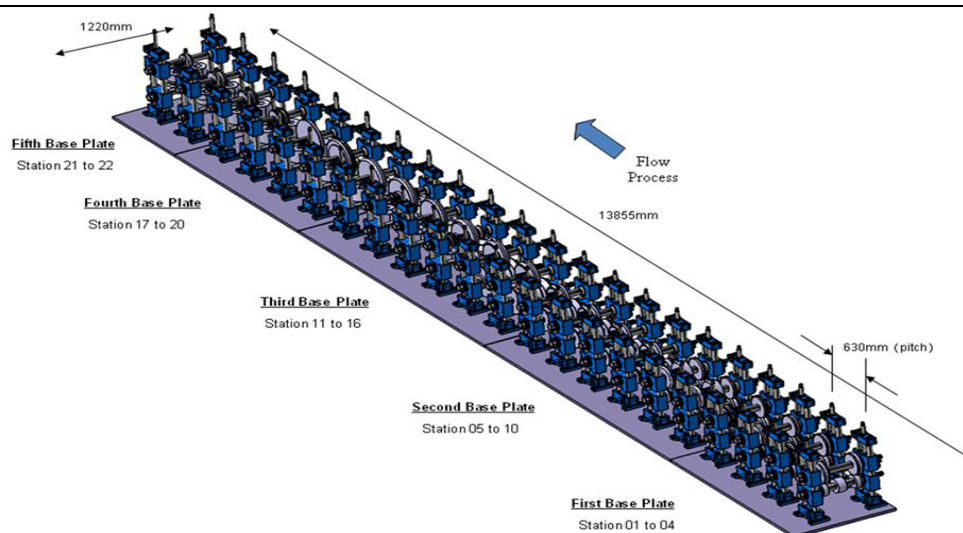
Anexo 7.5 E Mediciones obtenidas del FARO<sup>MR</sup>

Long Name	stand1		stand5		stand7		stand9		stand11		stand13		stand15	
Units							mm							
Comments	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y
1		16,9879	197,46	174,9385	150,8475	58,7531	144,3043	97,1449	172,7774	140,1871	244,9962	200,2508	291,7781	201,4189
2	156,936	15,9774	189,0105	162,1573	154,8927	39,4381	146,2442	76,0014	164,9699	117,9619	228,6719	185,9227	280,7679	193,2861
3	192,0486	15,5534	189,9551	141,9372	169,4703	28,843	168,9671	62,0945	179,5828	101,0842	228,7704	164,0362	276,2621	173,1073
4	273,1837	14,9878	205,1629	120,3262	203,4872	24,6117	201,9272	50,5391	199,1895	87,3984	237,2174	142,9239	280,5676	148,4833
5	306,848	15,0787	217,9923	102,947	228,7737	21,7219	228,4427	41,6316	222,9774	70,7925	247,7701	116,8724	284,4193	127,2618
6	345,0624	15,2129	237,4511	79,1634	255,4745	18,8266	260,3835	31,4503	240,3297	59,0005	254,2728	97,3337	289,2531	101,3012
7	380,311	15,517	249,5001	63,525	281,1057	16,3149	295,8877	21,1365	265,2359	44,6209	272,7208	59,7471	293,9905	76,9849
8	413,1448	15,8692	264,8343	42,0275	320,4121	12,9828	323,1219	15,9402	287,4491	29,0307	280,5334	39,7028	301,0239	42,874
9	449,2457	16,2064	284,9845	21,5761	346,0619	11,9638	346,3365	15,4826	304,1454	20,019	309,211	8,7372	311,3048	13,5357
10	482,8307	16,7636	307,1769	8,936	383,7784	11,9221	372,5292	16,4454	326,2422	12,7422	306,9276	18,3568	329,951	8,006
11	518,9241	17,3862	324,611	14,1022	421,0925	14,057	399,67	22,7667	374,7363	16,4703	330,9387	13,078	371,1461	15,1351
12	550,9341	17,8091	344,1408	14,5916	451,5529	16,8858	420,5113	28,781	391,2935	25,1059	360,7773	23,8077	381,4671	32,5966
13	575,5238	21,4149	384,3467	40,1501	479,4969	19,7396	443,1772	35,7906	417,0602	41,0598	372,2142	41,8695	385,3204	49,6198
14	598,6535	21,1917	401,1423	59,8745	512,8581	23,5399	469,4477	46,2783	449,4761	62,5894	386,4588	73,0361	390,0912	72,0124
15			420,821	83,8032	539,6182	29,242	484,2389	49,4541	473,303	79,1302	398,1308	99,686	393,2985	87,3104
16			442,9355	111,62	565,4507	31,8665	509,2674	58,0432	496,2409	95,3794	411,5311	127,2951	394,9416	107,6581
17			465,7223	139,8064	577,619	58,7194	531,3238	66,2184	508,7294	104,5795	417,0566	147,8338	403,0302	137,7787
18			469,5265	155,3461			544,3352	92,3771	517,4423	119,3984	424,8502	166,992	407,9292	164,6946
19			458,3848	171,2356					508,7357	139,8684	420,8409	188,6581	408,8932	182,9026
20											410,2393	194,8661	393,2057	196,2953
21													386,5112	198,5247

### Anexo 7.6 F Cálculos del número de estaciones.

Número de estaciones (n)	22			
Factor	67.1573604			
Distancia entre cada stand (d)	630	mm	24.8031496	in
Altura de la sección (h)	197	mm	7.75590551	in

Distancia entre cada stand (d)	630	mm	24.8031496	in
Altura de la sección (h)	197	mm	7.75590551	in
	factores			
	67.1573604	1		
número de estaciones ( n)	21		22	



$$n = \left[ 3.16h^{0.8} + 0.05/t^{0.87} + \alpha/90 \right] \left[ v^{2.1}/40U \right]^{0.15} s(1 - 0.5z) + e + f + 5zs$$

Aplicando esta ecuación se obtienen 25 estaciones, tomando valores mínimos de resistencia a la tensión y esfuerzo de fluencia.

### Cálculos Modelo Ángel [42]

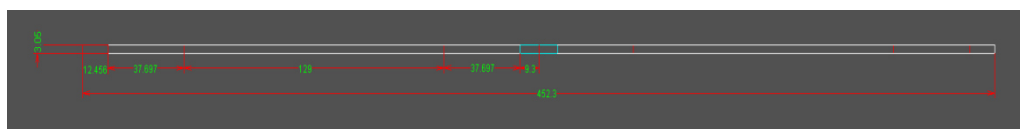
Parámetros	Valores
Lt	452.3
A	129
B	18.6
BA	304.7
BA	37.73847
PI	3.1416
R	22.5
K	0.5
T	1.525
S	3.05
A	90
S	3.05
R/S	7.377049 18

No. estación	De	Distancia entre estación
1		630
2		1260
3		1890
4		2520
5		3150
6		3780
7		4410
8		5040
9		5670
10		6300
11		6930
12		7560
13		8190
14		8820
15		9450
16		10080
17		10710
18		11340
19		11970
20		12600
21		13230
22		13860

$L=A+B-BD$	VALOR
L	452.3
A	180
B	69.6
BD	202.7

$L=A+B+B$	Valor	Calc ulo por lado
BA	150.788	37.69
A	258	
B	43.512	

$L=(n-1)d$	VALOR
L	12600
n	22
d	630
L	13230
h	180
$cota=L/h$	
cota	73.5
$\alpha$	0.78
n	22

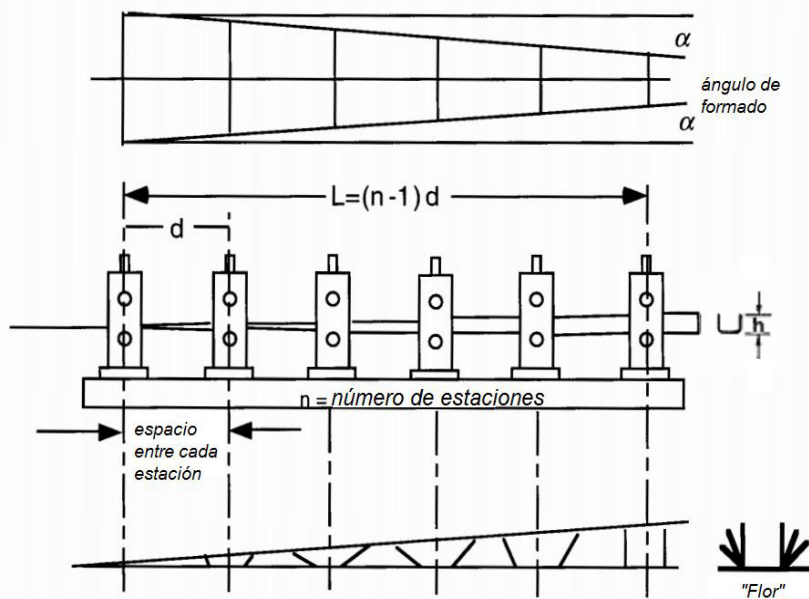


### Anexo 7.7 G Ángulo de formado

Distancia entre cada stand (d)	630	mm	24.80314961	in
Altura de la sección (h)	197	mm	7.755905512	in
factores				
	67.15736041	1		
Número de estaciones (n)	21	22		

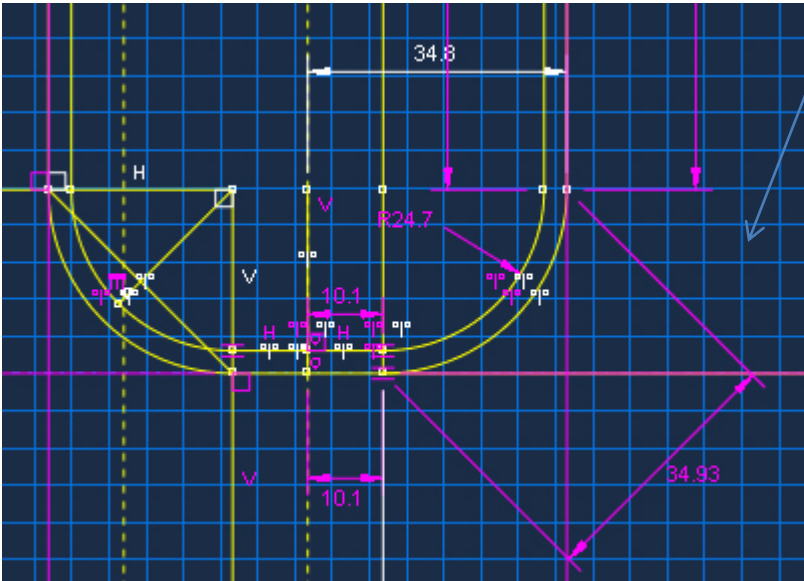
Medición obtenida en planta (L)	13855	mm	545.4724409	in
L	13230	mm	520.8661417	in
N	22	pasos		
D	630	mm	24.80314961	in

L	13230	mm	520.8661417	in
Altura de la sección (h)	197	mm	7.755905512	in
L/h			67.15736041	in
Ángulo de formado ( $\alpha$ )	0.014890401	0.0148893	0.853094063	Grados
n-1	21			
Ángulo de formado ( $\alpha$ )	67.15736041	0.0148893	0.853094063	Grados



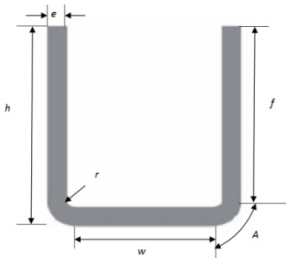
Anexo 7.8 Hanchura desarrollada

BA	1.60976339	in	40.88799	mm
Factor	0.01743	0.01694965	0.0078	0.00093661
Radio interior de la curva r		0.97244094	in	24.7
Espesor del material e		0.12007874	in	3.05
Ángulo de flexión A		90	Grados	



DW	19.6674	in	499.55196	mm
BA	1.60976339	in	34.61319	mm
f	5.81102362	in	147.6	mm
w	0.80314961	in	20.4	mm

La anchura que muestra el diagrama proporcionado es de 483+0.5/0





### Anexo 7.9 I Cálculos para el ángulo y anchura desarrollada.

STATION	ANGULO	CALCULO MEDIANTE PROGRAMA	PROYECCION DE FORMA DE PERFIL																																																	
1	20	<div><div>Dist.Stand: 630.000 y0: <div></div></div><div>Stp.Width: 452.300 Direc.(°): <div></div></div><table><thead><tr><th>No.</th><th>Typ</th><th>Di</th><th>Radius dis.</th><th>Angle dis.</th><th>St.Length</th><th>Str.</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>9.300</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>37.697</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>129.000</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>A1</td><td>L</td><td>106.469</td><td>20.000</td><td>37.697</td><td>2</td></tr><tr><td>5</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>12.456</td><td></td></tr><tr><td>6</td><td>PS</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></tbody></table></div>	No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.	1	L				9.300		2	L				37.697		3	L				129.000		4	A1	L	106.469	20.000	37.697	2	5	L				12.456		6	PS						
No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.																																														
1	L				9.300																																															
2	L				37.697																																															
3	L				129.000																																															
4	A1	L	106.469	20.000	37.697	2																																														
5	L				12.456																																															
6	PS																																																			
2	38	<div><div>Pass: 2 x0: <div></div></div><div>Dist.Stand: 300.000 y0: <div></div></div><div>Stp.Width: 452.300 Direc.(°): <div></div></div><table><thead><tr><th>No.</th><th>Typ</th><th>Di</th><th>Radius dis.</th><th>Angle dis.</th><th>St.Length</th><th>Str.</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>9.300</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>37.697</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>129.000</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>A1</td><td>L</td><td>55.314</td><td>38.000</td><td>37.697</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>12.456</td><td></td></tr></tbody></table></div>	No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.	1	L				9.300		2	L				37.697		3	L				129.000		4	A1	L	55.314	38.000	37.697	4	5	L				12.456									
No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.																																														
1	L				9.300																																															
2	L				37.697																																															
3	L				129.000																																															
4	A1	L	55.314	38.000	37.697	4																																														
5	L				12.456																																															
3	53																																																			
4	65																																																			
5	75																																																			
6	86																																																			
7	87																																																			
8	8																																																			
9	101																																																			
10	21	<div><div>Dist.Stand: 630.000 y0: <div></div></div><div>Stp.Width: 452.300 Direc.(°): <div></div></div><table><thead><tr><th>No.</th><th>Typ</th><th>Di</th><th>Radius dis.</th><th>Angle dis.</th><th>St.Length</th><th>Str.</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>9.300</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>A1</td><td>L</td><td>101.326</td><td>21.000</td><td>37.697</td><td>2</td></tr><tr><td>3</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>129.000</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>A1</td><td>L</td><td>22.475</td><td>90.000</td><td>37.697</td><td>11</td></tr><tr><td>5</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>12.456</td><td></td></tr></tbody></table></div>	No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.	1	L				9.300		2	A1	L	101.326	21.000	37.697	2	3	L				129.000		4	A1	L	22.475	90.000	37.697	11	5	L				12.456									
No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.																																														
1	L				9.300																																															
2	A1	L	101.326	21.000	37.697	2																																														
3	L				129.000																																															
4	A1	L	22.475	90.000	37.697	11																																														
5	L				12.456																																															
11	29																																																			
12	37																																																			
13	46																																																			
14	55																																																			
15	63	<div><div>Pass: 15 x0: 0.000</div><div>Dist.Stand: 630.000 y0: <div></div></div><div>Stp.Width: 452.300 Direc.(°): <div></div></div><table><thead><tr><th>No.</th><th>Typ</th><th>Di</th><th>Radius dis.</th><th>Angle dis.</th><th>St.Length</th><th>Str.</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>9.300</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>A1</td><td>L</td><td>32.759</td><td>63.000</td><td>37.697</td><td>7</td></tr><tr><td>3</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>129.000</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>A1</td><td>L</td><td>23.303</td><td>87.000</td><td>37.697</td><td>10</td></tr><tr><td>5</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>12.456</td><td></td></tr><tr><td>6</td><td>PS</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></tbody></table></div>	No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.	1	L				9.300		2	A1	L	32.759	63.000	37.697	7	3	L				129.000		4	A1	L	23.303	87.000	37.697	10	5	L				12.456		6	PS						
No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.																																														
1	L				9.300																																															
2	A1	L	32.759	63.000	37.697	7																																														
3	L				129.000																																															
4	A1	L	23.303	87.000	37.697	10																																														
5	L				12.456																																															
6	PS																																																			
16	70																																																			
17	76.5	<div><div>Pass: 20 x0: <div></div></div><div>Dist.Stand: 630.000 y0: <div></div></div><div>Stp.Width: 452.300 Direc.(°): <div></div></div><table><thead><tr><th>No.</th><th>Typ</th><th>Di</th><th>Radius dis.</th><th>Angle dis.</th><th>St.Length</th><th>Str.</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>9.300</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>A1</td><td>L</td><td>22.609</td><td>89.500</td><td>37.697</td><td>11</td></tr><tr><td>3</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>129.000</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>A1</td><td>L</td><td>22.475</td><td>90.000</td><td>37.697</td><td>11</td></tr><tr><td>5</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>12.456</td><td></td></tr></tbody></table></div>	No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.	1	L				9.300		2	A1	L	22.609	89.500	37.697	11	3	L				129.000		4	A1	L	22.475	90.000	37.697	11	5	L				12.456									
No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.																																														
1	L				9.300																																															
2	A1	L	22.609	89.500	37.697	11																																														
3	L				129.000																																															
4	A1	L	22.475	90.000	37.697	11																																														
5	L				12.456																																															
18	82																																																			
19	87.5																																																			
20	89.5	<div><div>Pass: 20 x0: <div></div></div><div>Dist.Stand: 630.000 y0: <div></div></div><div>Stp.Width: 452.300 Direc.(°): <div></div></div><table><thead><tr><th>No.</th><th>Typ</th><th>Di</th><th>Radius dis.</th><th>Angle dis.</th><th>St.Length</th><th>Str.</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>9.300</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>A1</td><td>L</td><td>22.609</td><td>89.500</td><td>37.697</td><td>11</td></tr><tr><td>3</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>129.000</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>A1</td><td>L</td><td>23.303</td><td>87.000</td><td>37.697</td><td>10</td></tr><tr><td>5</td><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td>12.456</td><td></td></tr><tr><td>6</td><td>PS</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></tbody></table></div>	No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.	1	L				9.300		2	A1	L	22.609	89.500	37.697	11	3	L				129.000		4	A1	L	23.303	87.000	37.697	10	5	L				12.456		6	PS						
No.	Typ	Di	Radius dis.	Angle dis.	St.Length	Str.																																														
1	L				9.300																																															
2	A1	L	22.609	89.500	37.697	11																																														
3	L				129.000																																															
4	A1	L	23.303	87.000	37.697	10																																														
5	L				12.456																																															
6	PS																																																			
21	92																																																			
22	94																																																			

**Anexo 7.10 J ARCHIVO \*.INP**

```

*Part, name=E1DI
*End Part
**
*Part, name=E1DS
*End Part
**
*Part, name=E1CI
*End Part
**
...

**
*Part, name=E22CI
*End Part
**
*Part, name=E22CS
*End Part
**
*Part, name=E22LS
*End Part
**
*Part, name=PLACA
*Node
    1, 3.04999995, 241.699997, 1500.
.
.
.
3600, 3749, 3750, 3775, 3774
*Nset, nset=Placa-EL-ALL, generate
    1, 3775, 1
*Elset, elset=Placa-EL-ALL, generate
    1, 3600, 1
*Nset, nset=_PickedSet18, internal, generate
    1, 3775, 1
*Elset, elset=_PickedSet18, internal, generate
    1, 3600, 1
** Section: Cont-Shell
*Shell Section, elset=_PickedSet18, material="ACERO HSLA", offset=SPOS
3.05, 5
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=E1DI-1, part=E1DI
-0.00189034636933653, -0.618951933501942, -257.995872186671

```



```

-0.00189034636933653,      -0.618951933501942,      -257.995872186671,      -
0.579207425398668, -1.1963351198586, -257.418521658229, 119.998738501948
*Node
    1, -1.42108547e-14,      -93.,      0.
*Nset, nset=E1DI-1-RefPt_, internal
1,
*Surface, type=REVOLUTION, name=RigidSurface_, internal
START,      0.,      0.
LINE, 96.9733946114036,      0.
CIRCL,      97.9904851872,      -0.975718013400017,      96.9907763800596,      -
0.999848925647478
LINE, 97.9904458279, -5.61609077470002
CIRCL,      97.1300256494024,      -10.6231867615759,      82.9904458297086,      -
5.61596373035476
LINE, 91.4898535960239, -26.5501118611898
CIRCL, 90.6294335639, -31.557207013, 105.629433564288, -31.5573344794634
LINE, 90.6289207012, -92.0225500261
CIRCL, 89.6045449130006,      -93., 89.6291681924859, -92.0003031989112
LINE,      0.,      -93.
*End Instance
**
*Instance, name=E2DI-1, part=E2DI
630.197318191462, 0.00348543499675861, -165.98978058385
630.197318191462, 0.00348543499675861, -165.98978058385, 629.61997910285, -
0.573887137747777, -165.412441495238, 119.996917902334
*Node
    1, -2.02788897e-10, 6.999999992e-16,      0.
*Nset, nset=E2DI-1-RefPt_, internal
1,
*Surface, type=REVOLUTION, name=CP-1-E2DI-1
START,      0., 89.999999997972
LINE, 106.000000000611, 89.9999999995921
CIRCL,      106.99999999797,      88.9999999998972,      105.99999999797,
88.9999999995921
LINE, 106.99999999797, 80.5196028777972
CIRCL,      105.946424658552,      77.4494673091656,      102.000000005297,
80.5196028763972
LINE, 94.2143013631527, 62.3687193567317
CIRCL,      89.999999997972,      50.0881770827972,      110.000000001097,
50.0881770818972
LINE, 89.999999997972, 0.9999999996972
CIRCL, 89.0000000006098,      0., 88.999999997972, 1.00000000000225
LINE,      0.,      0.
*End Instance
**
.
.
.
*Instance, name=E22LS-1, part=E22LS
13212.7301025435, 61.3756624564631, -130.070660271901

```

```

13212.7301025435, 61.3756624564631, -130.070660271901, 13212.7301025435,
60.3756624564631, -130.070660271901, 90.
*Node
1, -2.55795385e-13, 210.425644, 1.28848543e-14
*Nset, nset=E22LS-1-RefPt_, internal
1,
*Surface, type=REVOLUTION, name=CP-13-E22LS-1
START, 0., 210.425641543537
LINE, 105., 210.425641543537
CIRCL, 107., 208.425641543537, 105., 208.425641543537
LINE, 107., 206.012162140837
CIRCL, 105.858648728043, 204.205861401251, 105., 206.012162140837
CIRCL, 91.9312605691357, 180.45044290944, 116.3770956466, 182.078677341337
LINE, 93.0022787197694, 163.066327761635
CIRCL, 94.1472199927947, 136.666583244536, -905.398918490713,
106.541559603322
CIRCL, 94.6215049351201, 105.212820771769, -950.378494719102,
105.185933539535
CIRCL, 94.1472199927948, 73.7590582990013, -950.378494719102,
105.239708004
CIRCL, 93.0022787197695, 47.3593137819017, -905.398918490713,
103.884081940212
LINE, 91.9312605691359, 29.9751986340976
CIRCL, 105.858648728043, 6.21978014228629, 116.3770956466, 28.3469642022
CIRCL, 107., 4.41347940270001, 105., 4.4134794027
LINE, 107., 2.000000000000001
CIRCL, 105., 0., 105., 2.000000000000001
LINE, 0., 0.
*End Instance
**
*Nset, nset=Rodillos, instance=E1DI-1
1,
.
.
.
*Nset, nset=_T-Paso22-Lateral, internal
_PickedSet1196,
*Transform, nset=_T-Paso22-Lateral
1., 0., 0., 0., 1., 0.
** Constraint: Constraint-1
*Rigid Body, ref node=_PickedSet248, analytical surface=E1DS-1.RigidSurface_
.
.
.
analytical surface=E22CS-1.CP-14-E22CS-1
** Constraint: Constraint-72
*Rigid Body, ref node=_PickedSet1042, analytical surface=E22LS-1.CP-13-E22LS-1
** Constraint: Constraint-73
*Rigid Body, ref node=_PickedSet1044, analytical surface=E22CI-1.CP-13-E22CI-1

```

\*End Assembly

\*\*

## \*\* MATERIALS

\*\*

\*\* ACERO HSLA GRADO 50 UTILIZADO PARA FABRICAR CHASIS PARA AUTOMÓVIL

\*Material, name="ACERO HSLA"

\*Density

7.9e-09,

\*Elastic

200000., 0.29

\*Plastic

308.374, 0.

320.142, 0.0195204

327.375, 0.0376012

347.448, 0.0530777

365.428, 0.0688808

381.479, 0.0849356

395.766, 0.10077

408.712, 0.116402

420.44, 0.131436

431.398, 0.146529

441.631, 0.161163

451.114, 0.175748

460.216, 0.190024

468.671, 0.203887

476.719, 0.217706

485.42, 0.233267

502.393, 0.264885

518.253, 0.296861

531.821, 0.329425

533.735, 0.339735

\*\*

## \*\* INTERACTION PROPERTIES

\*\*

\*Surface Interaction, name=FRICCION

\*Friction

0.12,

\*Surface Interaction, name=SinFriccion

\*Friction

0.,

\*Surface Behavior, pressure-overclosure=EXPONENTIAL

0.1, 350.

\*\*

## \*\* BOUNDARY CONDITIONS

\*\*

\*\* Name: simetria Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

\*Boundary

Placa-SYMM-Z, ZSYMM

\*\*

## \*\* PREDEFINED FIELDS

```

**
** Name: Placa Type: Velocity
*Initial Conditions, type=VELOCITY
_PickedSet230, 1, 388.
_PickedSet230, 2, 0.
_PickedSet230, 3, 0.
**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: GENERAL
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
, , FRICCION
** -----
**
** STEP: Rolling
**
*Step, name=Rolling
*Dynamic, Explicit
, 45.
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
** Mass Scaling: Semi-Automatic
** Whole Model
*Fixed Mass Scaling, dt=3.04e-05, type=set equal dt
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: Rod-Inf-ET1 Type: Velocity/Angular velocity
*Boundary, type=VELOCITY
_PickedSet1077, 1, 1
_PickedSet1077, 2, 2
_PickedSet1077, 3, 3
_PickedSet1077, 4, 4
_PickedSet1077, 5, 5
_PickedSet1077, 6, 6, -4.06
.
.
.
** Name: Rod-Sup-ET22 Type: Velocity/Angular velocity
*Boundary, type=VELOCITY
_PickedSet1197, 1, 1
_PickedSet1197, 2, 2
_PickedSet1197, 3, 3
_PickedSet1197, 4, 4
_PickedSet1197, 5, 5
_PickedSet1197, 6, 6, 3.63
**
** OUTPUT REQUESTS
**

```

```
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT, number interval=100
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT, frequency=1
*End Step
```

### Referencias

- [1] M. Torres, V. Di Graci y G. González, “Determinación de la resistencia a la fluencia de un acero AISI 1040 deformado en frío por tensión y laminación”, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Vol. 20, No. 1 (2000), pp. 23.29.
- [2] M.N. Salan, “Tecnología de proceso y transformación de material”, Universidad Politécnica de Catalunya, 2009.
- [3] R.G Andrade, “Desarrollo del proceso de fabricación del perfil omega de acero galvanizado para la construcción liviana”, Tesis, UPN, 2010.
- [4] Y. Ormaza, C. Glenn y F. C. Brausendorff, "Proyecto para implementación de una planta para conformado de láminas metálicas con una capacidad de 500 toneladas por mes" Artículo de Tesis de Grado, ESPOL, 2012.
- [5] S. L. Semiatin, “ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming”, Vol. 14, ASM International (OH), 2006.
- [6] F. Vollertsen, A. Sprenger, J. Kraus y H.Arnet, “Extrusion, channel, and profile bending: a review”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, Issues 1–3, 15 March 1999, pp. 1–27.
- [7] N. Duggal, M. A. Ahmetoglu, G. L. Kinzel y T Altan, "Computer aided simulation of cold roll forming—a computer program for simple section profiles", Journal of materials processing technology Vol. 59 Issue1-2 (1996), pp. 41-48.
- [8] G. Nefussi y P. Gilormini, "A simplified method for the simulation of cold-roll forming", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 35, No. 10 (1993), pp. 867-878.
- [9] M. Salmani, et al., "Localized edge buckling in cold roll-forming of circular tube section", Journal of materials processing technology Vol. 177, no. 1 (2006), pp.617-620.

- [10] A. Taylan y V. Vázquez, "Numerical process simulation for tool and process design in bulk metal forming." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* Vol. 45 Issue 2 (1996), pp. 599-615.
- [11] ZW. Han, C Liu, WP Lu y LQ Ren, "Simulation of a multi-stand roll-forming process for thick channel section." *Journal of materials processing technology* Vol. 127 Issue 3 (2002), pp. 382-387.
- [12] M. Lindgren, "Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel." *Journal of materials processing technology*, Vol. 186 Issue 1 (2007), pp. 77-81.
- [13] S. Kobayashi, S. Oh y Altan, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University, Press, Nueva York, 1989.
- [14] M. Dolores, G. Pulido y J. Oliver, " Contribuciones a la simulación numérica del fallo material en deformaciones infinitesimales. Modelos de degradación y daño continuo", *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.* Vol. 22, 3 (2006), pp. 299-334.
- [15] F. W. Boulger, "Metal forming: status and challenges". In *Towards the factory of the future: emergence of the computerized factory and its impact on society*. Annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Chicago, Illinois, November 16-21, Vol. 1, ASME, (1980), p. 17.
- [16] O. Kienzle, "Classes and Characteristics of Plastic-Deformation Processes," *Machine Design*, Nov. 7 1963, p.p. 200-207.
- [17] E. G. Dieter, " Mechanical metallurgy", Mc.Graw Hill Book Company, London, 1988.
- [18] E. P. De Garmo, J.T. Black y R.A. Kohser, " Materiales y Procesos de Fabricación", Reverte, S.A. Vol. 1, Cap. 3 p. 83, 2002.
- [19] Banabic D, Bunge H –J, Pöhlandt K, Tekkaya AE. *Formability of Metallic Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000.

- [20] A. Campos, et al., "Diagramas límite de conformado", 8vo. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica
- [21] A. E. Tekkaya, "State-of-the art of simulation of sheet metal forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103(2000), pp.14-22.
- [22] G. M. Goodwin, "Paper no. 680093", presented at the SAE Automotive engineering congress, Detroit, January 1968.
- [23] S.P. Keerler, Paper no. 680092, presented at the SAE Automotive engineering congress, Detroit, January 1968.
- [24] S.P. Keerler, "Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches", Thesis MIT, 1961.
- [25] A. Campos, "Análisis del conformado plástico del embutido de una abrazadera para tubo por medio del método de elemento finito", Tesis Maestro en Ciencias, UPN, Agosto 2004.
- [26] D. Banabic, H-J. Bunge, K. Pöhlandt y AE. Tekkaya, "Formability of Metallic Materials." Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2000.
- [27] C.R., Calladine, "Plasticity for Engineer Theory and Applications", Horwood Publishing, Chichester, 2000.
- [28] J.P. Schaffer, "Ciencia y diseño de materiales para ingeniería", CECSA, 2000.
- [29] G. Aparicio, H. D'Armas y Marco Ciaccia, "Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569", Revista ingeniería UC. Vol. 14 (2007), No 1, pp. 57-63.
- [30] J. L. González, "Metalurgia mecánica", Limusa, 1999, p. 79-83.
- [31] M.L. García, "Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa. Modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final", Tesis Doctoral. Universitat de Girona, 2005.



- [32] G. T. Halmos, , “Roll Forming Handbook”, pp.1-3. ISBN 0824795636. CRC Press, 2005.
- [33] S. Hellborg, “Finite Element Simulation of Roll Forming”, Master Thesis, Institute of Technology Linköping University. January 2007.
- [34] Pai, et al. “Roll Forming Process State of the Technology and Analysis”, ERC/NSM-S-92-53, Sep. 1992
- [35] H. William, “Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Chapter 34 Design Considerations, pp.37-4. 1989.
- [36] I. N. Paralikas, “Cold Roll Forming Process Energy Efficiency Optimization”. PhD Dissertation. Mechanical & Aeronautical Engineer, University of Patras, 2012.
- [37] A. Depauw, D. Herisson, R. Boman and R. Kergen, ”Roll forming of Ultra High Strength Steels: progresses in experimental and modelling knowledge”. Proceedings of International Roll Forming Congress, 2009.
- [38] ULSAB AVC, “Ultra-Light Steel Auto Body Advanced Vehicle Concepts”, Technical Transfer Dispatch No. 6, pp. 1-12, Mayo 2001.
- [39] Sage, A.M. HSLA Steels: Processing, properties and Applications. Ed. By The Minerals, Metals & Materials Society. Beijing (China) 1990 pp 53-60
- [40] Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna. Ed Pearson, Prentice Hall , 1997, Capitulo 7, págs. 125 y 126.
- [41] Automotive Woldwide, Catalogo técnico Arcelor Mittal, Aceros micro aleados para conformación en frío.
- [42] R. T. Angel, Designing tools for cold roll-forming, The Iron Age, Nov., 1949, pp.83-88.
- [43] Bui et al. “Numerical simulation of cold roll-forming processes”, Journal of Material Processing Technology 202, 2008. Doi:10.1016/j.jmatprotect.2007.08.073.

- [44] J. Abad et al., "Design of cold roll forming rollers by a finite elements bidimensional model", *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 23 No. 3. 2002.
- [45] *Automotive Steel Design Manual*, Section 4.2 Roll Forming. May 1996.
- [46] Halmos, «op. cit. » pág. 5-3.
- [47] J. Paralikas y et al. "Optimization of roll forming process parameter—a semi-empirical approach", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010. Doi: 10.1007/s00170-009-2252-z.
- [48] Q.V. Bui, J.P. Phonthot. "Numerical simulation of cold roll-forming processes", *Journal of Materials Processing Technology* 202, 2008 doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.08.073.
- [49] Damm,K., "Determination of longitudinal strains in roll forming of standard sections in a multi-stand machine". Dissertation. Institute for Production Technology, University of Sarmstadt, Germany, 1989.
- [50] Heislitz et al. "Simulation of cold roll forming process with the 3-D FEM code PAM-STAMP. *J. Mater. Process. Technol*, Mater. Process. Technol. 59, 59-67. 1996.
- [51] Hong et al. "A parametric study on forming length in roll forming". *J. Mater. Process. Technol*, 113, 774-778. 2001.
- [52] Technical Bulletin FTB-5. Forming, Roll-forming Steel Strip, Rev3, BlueScope Steel, November 2010.
- [53] Halmos, «op. cit. » pág. 5-4.
- [54] K. Lange y K. Pohlandt, "Handbook of metal forming", Mc.Graw Hill, 1985.
- [55] S. Kalpakjian, "Manufacturing processes for engineering materials", Prentice Hall.
- [56] J. Beddoes, "Principles of metal manufacturing process", London: Arnold, 1999.
- [57] M. Rossi, "Estampado en frío de la Chapa", Dossat, España, 1979.

- [58] L.R. Gale, “New concept in rollform machinery and tooling. SME Conference, Pittsburgh, PA, Sep. 27-30, 1982.
- [59] H. Ona, T. Jimma, H. Kozono, “A computer aided design system for cold roll forming”, *Adv. Techn. of Plasticity*, Vol 1. (1984), pp. 422-427.
- [60] G. Schulze, *Kenngrossen für die Entwicklung und den Einsatz von Profilermaschinen, Maschinenbautechnik*, Vol1. 1959, pp.181-191.
- [61] J.H. Wiebenga, M. Wiss, B. Rolfe, A.H. van den Boogaard, “Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process”, *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013), pp. 978-986.
- [62] N. Duggal, “Process simulation of roll forming and roll pass design”, Thesis, Ohio state University, 1995.
- [63] O.C. Zienkiewicz, “El método de los elementos finitos”, Reverte, 2007.
- [64] A. Alsamhan, P. Hartely y I. Pillinger. “The computer simulation of cold-roll-forming using FE methods and applied real time re-meshing techniques”, *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003), pp. 102–111
- [65] H.L. Soriano, “Método de elementos finitos em análise de estruturas”, Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [66] J.N. Reddy, “An introduction to the finite element method”, McGraw Hill, 1993.
- [67] H. David. “Fundamentals of finite element analysis”, McGraw Hill, 2004.
- [68] K.H. Huebner, E.A. Thornton y T.G. Byrom, “The finite element method for engineers”, Wiley, 1995.
- [69] R. Courant, “Variational method for solution of problems Equilibrium and Vibrations”, *Bull. Am. Math Soc.* Vol.49 (1943), pp. 1-23.
- [70] W. Prager y J.L. Synge, “Approximation in elasticity based on the concept of function space”, *Q. Appl. Math.*, Vol. 5 (1947), pp.241-269.

- [71] A. Hrenikoff, "Solution of problems in elasticity by the framework method," J. Appl. Mch. Vol. 8 (1941), pp.175-196.
- [72] O.C. Zienkiewicz y Y. K. Cheung, "The finite elements in the solution of field problems", Engineer, Vol. 220 (1965), pp.507-510.
- [73] O.C. Zienkiewicz y R.L. Taylor, "The finite element method, Vol. 1: The basis", Butterworth, 2000.
- [74] Z.A. da Fonseca, "El método de los elementos finitos: una introducción", Ed. Universidad Rafael Urdanate, 2011.
- [75] G.R. Liu y S. S. Quek, "The finite element method. A practical approach", Butterworth.
- [76] C.H. Edwards y D. E. Penney, "Ecuaciones diferenciales", Prentice Hall, 2001
- [77] J. M. Izar , "Elementos de métodos numéricos para Ingeniería" ,Universidad Autónoma de San Luis Potosi, Mexico, 1998.
- [78] H. Ricardo, "Ecuaciones diferenciales: una introducción moderna", Reverte, 2008
- [79] L.G. Díaz. "Simulación del proceso de laminado en frío de aceros al carbono por el método de elemento finito usando ABACUS0MR", Tesis, UANL, Agosto 2003.
- [80] Ypma, Tjalling J. "Historical development of the Newton-Raphson method."SIAM review 37.4 (1995): 531-551.
- [81] Ben-Israel, Adi. "A Newton-Raphson method for the solution of systems of equations." J. Math. Anal. Appl 15.243 (1966): 1.
- [82] W.C. Davidon, "Variable metric method for minimization", Argonne National Laboratory report ANL-5990, 1959.
- [83] J.E. Dennis y J. More, "Quasi-Newton methods-motivation and theory", SIAM Rev., Vol. (1977), pp. 46-89.
- [84] H. Matthies y G. Strang, "The solution of nonlinear finite element equations", Int. J. Num. Meth. Eng, Vol. 14 (1979), pp. 1613-1626.

- [85] O.C. Zienkiewics y R. L. Taylor, “El método de los elementos finitos-Formulación básica y problemas lineales”, Vol. 2, McGraw Hill, 1994.
- [86] Systèmes, D. (2011). ABAQUS® User Manual (version 6.11). SIMULIA, a division of Dassault Systèmes, Providence, Rhode Island.
- [87] Committee under AM direction. “Metals handbook ASM, Handbook: Materials selection and design”. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- [88] Banabic, Dorel. “Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits”. Springer Verlag, 2000
- [89] ASTM E8. (2000). “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [90] Hetzner, D. (2003). “Microindentation hardness testing of materials using ASTM e384. Microscopy and Microanalysis”, 9(S02), 708-709.
- [91] ASTM E3, “Standard Guide for Preparation Metallographic Specimens”. Annual Book of Standards Volume: 03.01, ASTM International
- [92] ASTM E407, “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”, ASTM International, Pennsylvania, 2007
- [93] Standard, A. S. T. M. (1996). E112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshocken.
- [94] O. L. Botello, “Rediseño y reconfiguración de un sistema de roloformado de componentes estructurales automotrices”, Tesis Maestría, UANL, 2011.
- [95] S. Motavalli,. "Object-oriented modelling of a feature-based reverse engineering system." International Journal of Computer Integrated Manufacturing 9.5 (1996): 354-368.
- [96] R. Abella, et al. “Reverse engineering industrial applications. Computers & industrial engineering”, 1994, vol. 26, no 2, p. 381-385.

- [97] Y. Hong-Tzong et. al. "Reverse engineering in the design of engine intake and exhaust ports". ASME Prod Eng Div Publ Ped, Asme, New York, NY, (USA), 1993, vol. 64, p. 139-148.
- [98] J. A. Rojas, et al. "Digitalización 3D del rodete de un compresor centrífugo: un procedimiento alternativo." *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* 15.3 (2007): 236-244.
- [99] K. Arámbula, Evaluation of Technologies for dimensional/geometrical and surface metrology of sculptures surfaces, Master Degree Thesis, August 2010.
- [100] Abaqus User's Manual 6.11; 2012
- [101] W. Mendenhal, "Introducción a la probabilidad y estadística". EEUU: Wadsworth Internacional/Iberoamericana, 1982.
- [102] L. Silvestre et. al. "High Strength Steel as a Solution for the Lean Design of Industrial Buildings", *J. Mater. Res. Technol.*; pp.01:35-41, 2012
- [103] ASM International: Alloying Understanding the basic, High strength Low-Alloy Steel. 2011.
- [104] G. Dieter, Mechanical Metallurgy, McCraw-Hill, New York, 1986
- [105] M.N Nuria Salán, "Tecnología de proceso y transformación de materiales", pp. 99.
- [106] Cuesta, E., García, P., Fernández, P., & Alvarez Alvarez, B. (2010). Avances tecnológicos en el diseño de líneas de perfilado de la chapa (2ª parte). *Deformación metálica: Técnicas de fabricación, acabado y transformación del fleje, chapa, tubos y alambre*, 36(311), 12-21.
- [107] Abaqus 6.12 User's Manual. Ref. Material and section properties.
- [108] A. L. Delgado, "Anisotropía de cinta de acero de bajo carbono laminada en caliente", Tesis Maestría, UANL, 1999.
- [109] T. Baumeister, "Mechanical Engineers' Handbook", Editor Chief, McGraw Hill.

### Divulgación científica

- 2013 Autora en la ponencia **“SIMULACIÓN DEL PROCESO DE LAMINACIÓN NO PLANA DE PERFILES ESTRUCTURALES DE ACERO HSLA”**, Congress on Numerical Method in Engineering-CMN 2013, June 25-28, 2013, Bilbao, Spain. <http://congress.cimne.com/metnum2013/Proceedings/>
- 2012 Autora en la ponencia **“LA VINCULACIÓN ACADEMIA-INDUSTRIA EN LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL ROLOFORMADO EN FRIO PARA COMPONENTES AUTOMOTRICES”**, VII Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica.5-8 Noviembre. Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas, Cuba y Universität Magdeburg, Otto Von Guericke, Alemania. MEMORIA EN EXTENSO ISBN 978-959-250-757-9
- 2012 Coautora en la ponencia **“INVERSE ENGINEERING AND PRELIMINARY SIMULATION OF A CLOSED PROFILE ROLL-FORMING LINE”**, 12th. International LS-Dyna® Users Conference. Junio 3-5. Dearborn, Michigan USA. Publicado FEA Information Engineering Journal, Optimization Volume 1, Issue 8, September. ISSN 2167-1273.  
<http://www.feaiej.com/2012/FEA%20Information%20Engineering%20Journal%20September%202012.pdf#page=12>
- 2011 As Speaker **“CHARACTERIZATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF AUTOMOTIVE STEEL IN THE ROLL FORMING PROCESS”**, XX, symposium 3, Structural and Chemical Characterization of Metals Alloys and Compounds International Material Research Congress, Sociedad Mexicana de Materiales, Cancun Quintana Roo.
- 2011 Poster Presentation **“STUDY OF AN AUTOMOTIVE STEEL GRAIN SIZE IN THE ROLL FORMING PROCESS”**, XX, symposium 3, Structural and Chemical Characterization of Metals Alloys and Compounds International Material Research Congress, Sociedad Mexicana de Materiales, Cancún Quintana Roo.

## **Resumen autobiográfico**

### **Guadalupe Maribel Hernández Muñoz.**

Candidata para el Grado de Doctor en Ingeniería de Materiales

Tesis:

Diseño y simulación de una línea de formado en frío de lámina de acero.

La M.I. Guadalupe Maribel Hernández Muñoz nació en la ciudad de Monterrey, Nuevo León el 8 de Diciembre de 1982. Es hija del Sr. Alejandro Hernández Domínguez y la Sra. Alicia Muñoz López.

Cursó la licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico Administrador en Marzo de 2005 becada por PRONABE y FIME. Se graduó en el 2008 de la Maestría en Ingeniería Mecánica con Especialidad en Manufactura becada por Fondos Mixtos de CONACYT e inició el Doctorado en Ingeniería de Materiales en agosto de 2009 becada por CONACYT. Realizo una estancia para experimentación y escritura de tesis en COMIMSA, Saltillo apoyada por la beca PROMEP.

Su carrera laboral comenzó en Febrero de 2005 como subgerente en Servicios Operacionales Benavides y después combinando con su carrera de Profesor la cual inició en Agosto de 2005 en el Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica impartiendo asignaturas en la Carrera Técnico Bachiller en Productividad Industrial.

Desde febrero de 2007 es Profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, impartiendo las asignaturas de Máquinas Herramientas, Procesos de Manufactura y Metodología del Diseño. Desempeño el cargo de jefe de la carrera de Ingeniero Mecánico Administrador.