



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN LUIS POTOSÍ  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TESIS:

“ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE ENGARGOLADO DE LÁMINA METÁLICA  
UTILIZADOS POR LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, UTILIZANDO  
PROBETAS DE ALUMINIO 6061”

PRESENTA:

ING. ERWIN GONZÁLEZ JARAMILLO

PARA OBTENER GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR DE TESIS INTERNO:

DR. PEDRO DE JESÚS GARCÍA ZUGASTI

DIRECTOR DE TESIS EXTERNO:

DR. PABLO ALBERTO LIMON LEYVA

Soledad de Graciano Sánchez; S.L.P., México

Septiembre de 2019.



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. 18/septiembre/2019

SECCIÓN: DIV. ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
OFICIO: D.E.P.I./150  
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN.

**ING. ERWIN GONZÁLEZ JARAMILLO**  
**ALUMNO DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN ING.MECÁNICA**  
**PRESENTE.**

El que suscribe, Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, por este medio me permito comunicar a Usted que se autoriza la impresión de su trabajo de tesis titulado: **"ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE ENGARGOLADO DE LÁMINA METÁLICA UTILIZADOS POR LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, UTILIZANDO PROBETAS DE ALUMINIO 6061"**, para que con ello pueda usted continuar con los trámites para la obtención de su grado de Maestro en Ingeniería Mecánica.

Lo anterior de conformidad con el dictamen emitido favorablemente por los integrantes del H. Jurado Revisor, integrado por:

**DR. PEDRO DE JESÚS GARCÍA ZUGASTI**  
Presidente  
**M.I. ENRIQUE ALEJANDRO VÁZQUEZ HERNÁNDEZ**  
Secretario  
**M.A. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ PORTILLO**  
Vocal Propietario  
**DRA. MARÍA LISSETH FLORES CEDILLO**  
Vocal Suplente

**ATENTAMENTE.**

**"CON TECNOLOGÍA Y ESPÍRITU UNA PATRIA FORJARÉ"**



**M.C. ARIEL BENJAMÍN DE LA ROSA ZAPATA**  
**JEFE DEL DEPTO. DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL ITSLP.**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN LUIS POTOSÍ  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.C.P. ARCHIVO



Av. Tecnológico S/N Col. Unidad Pontano Arriaga,  
Ciudad de Graciano Sánchez, S. L. P., C. P 78437  
Tels:(444) 818.21.36, 804.70.00 fax 818.11.31 e-mail direccion@itslp.edu.mx  
www.itslp.edu.mx



RSGC 550  
Sector No.: 35  
Terminación: 2018-08-03  
Alcance: Proceso Educativo

## **Agradecimientos**

Agradezco al M.I. Martínez Guerrero Federico por ayudarme a encontrar el camino correcto en mi carrera profesional.

Agradezco a todos los Ingenieros, Maestros y Doctores que me apoyaron y enseñaron durante todos los años de mi Maestría en el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.

Agradezco a todos los miembros de mi familia por siempre estar atentos en mi camino profesional por el apoyo que me brindaron para que tuviera el tiempo para poder avanzar cada día con mi maestría.

Agradezco a mi asesor Dr. Pedro de Jesús García Zugasti por estar presente desde el primer día en la maestría y guiarme con las materias correctas para completar mis conocimientos.

## **Dedicatorias**

Esta tesis la dedico a la persona que me ofreció una segunda oportunidad para continuar en mi carrera profesional, que me enseñó a valorar su increíble dedicación y el amor que tiene por su vocación de docente y por su apoyo inmensurable para que yo lograra terminar esta segunda etapa de mi camino profesional todo gracias al Dr. Pablo Alberto Limón Leyva.

# ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| Capítulo I Introducción .....                                | 1  |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                        | 6  |
| 1.2. Justificación .....                                     | 7  |
| 1.3. Objetivos .....   | 8  |
| 1.3.1. Objetivo General .....                                | 8  |
| 1.3.2. Objetivos Especificos .....                           | 8  |
| 1.4. Hipótesis .....   | 9  |
| 1.5. Estructura del presente trabajo .....                   | 9  |
| Capítulo II Fundamentos Teóricos .....                       | 10 |
| 2.1. Procesos de manufactura .....                           | 10 |
| 2.2. Formado de metales .....                                | 11 |
| 2.3. Tipos de doblado de lámina .....                        | 14 |
| 2.4. Engargolado .....                                       | 18 |
| 2.5. Comportamiento plástico .....                           | 30 |
| 2.6. Fundamentos del Método de Elemento Finito (MEF) .....   | 37 |
| Capítulo III Desarrollo .....                                | 44 |
| 3.1. Descripción de la metodología implementada .....        | 44 |
| 3.2. Modelo de CAD paramétrico .....                         | 46 |
| 3.2.1. Probeta .....   | 47 |
| 3.2.2. Creación de la herramienta <i>Die Hemming</i> .....   | 49 |
| 3.2.3. Creación de la herramienta <i>Table Hemming</i> ..... | 49 |
| 3.2.4. Creación de la herramienta <i>Roll Hemming</i> .....  | 50 |
| 3.3. Análisis por Elemento Finito .....                      | 53 |
| 3.3.1. Selección de material .....                           | 54 |
| 3.3.2. Modelo de simulación <i>Die Hemming</i> .....         | 56 |
| 3.3.3. Modelo de simulación <i>Table Hemming</i> .....       | 65 |
| 3.3.4. Modelo de simulación <i>Roll Hemming</i> .....        | 72 |
| 3.3.5. Configuración de <i>SETUP Die Hemming</i> .....       | 81 |
| 3.3.6. Configuración de <i>SETUP Table Hemming</i> .....     | 85 |
| 3.3.7. Configuración de <i>SETUP Roll Hemming</i> .....      | 90 |
| 3.3.8. Configuración de solución .....                       | 94 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.4. Validación .....  | 98  |
| 3.4.1. Experimentación en prototipo de máquina para engargolar ..... | 98  |
| 3.4.1.1. Desarrollos previos al proceso de engargolado .....         | 102 |
| 3.4.1.2. Doblado de láminas en prototipo .....                       | 103 |
| 3.4.2. Análisis mediante Microscopio .....                           | 107 |
| Capítulo IV Resultados .....   | 116 |
| 4.1. Resultados del Análisis por Elemento Finito .....               | 116 |
| 4.2. Resultados del Análisis experimental en prototipo .....         | 117 |
| 4.3. Resultados del Análisis en microscopio .....                    | 121 |
| Capítulo V Conclusiones y recomendaciones .....                      | 132 |
| Referencias .....  | 135 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1.- Representación del proceso de engargolado el (naranja) del borde parte exterior se dobla alrededor de una parte interior (negro). ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 1  |
| Figura 1.2.- Etapas del engargolado: a) <i>Bending</i> ; b) <i>Pre-Hemming</i> ; c) <i>Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ...  | 2  |
| Figura 1.3.- Procesos de pre-engargolado (izquierda) y engargolado final (derecha): a) engargolado con dados de movimiento vertical; b) engargolado de mesa con dados de movimiento vertical y horizontal; c) engargolado por rodillo. ELABORACIÓN PROPIA. ....                   | 2  |
| Figura 1.4.- a) <i>Roll-in</i> , <i>Roll-Out</i> de un engargolado, b) <i>Warp</i> y <i>Recoil</i> de una pieza engargolada [9]. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 4  |
| Figura 2.1.- Clasificación de procesos de manufactura [14]. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 10 |
| Figura 2.2.- Procesos básicos de deformación volumétrica, (a) laminado, (b) forjado, (c) extrusión y (d) estirado. El movimiento relativo en las operaciones se indica por $v$ y las fuerzas se indican por $F$ , [14]. ELABORACIÓN PROPIA. ....                                  | 12 |
| Figura 2.3.- Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas; (a) doblado, (b) estirado y (c) corte; (1) al primer contacto del punzón con la lámina y (2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por $F$ y $v$ , [14]. ELABORACIÓN PROPIA. .... | 14 |
| Figura 2.4.- Tipos de doblado: (a) doblado en V y (b) doblado de bordes; (1) antes y (2) después del doblado, [24] . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 15 |
| Figura 2.5.- Dimensión de la abertura del dado D: (a) dado en V, y (b) dado deslizante, [14]. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 17 |
| Figura 2.6.- Longitud de la lámina, [24] . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 18 |
| Figura 2.7.- Engargolado: a) Lámina antes del engargolado y b) Lámina engargolada. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 18 |
| Figura 2.8.- Doblar de ceja: a) Panel Exterior antes del Doblar y b) Panel Exterior Doblar. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 19 |
| Figura 2.9.- Pasos de engargolado: a) Pre-Engargolado y b) Engargolado Final. ELABORACIÓN PROPIA. ..  | 19 |
| Figura 2.10.- Prensa para engargolar con el método de <i>Die Hemming</i> , [5]. ....  | 20 |
| Figura 2.11.- Prensas para engargolar con el método de <i>Table Hemming</i> , [5]. ....   | 21 |
| Figura 2.12.- Robots para el proceso de <i>Roll Hemming</i> , [5]. ....   | 22 |
| Figura 2.13.- Defectos dimensionales <i>Roll In</i> y <i>Roll Out</i> , [24]. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 23 |
| Figura 2.14.- Defectos superficiales: a) arrugas, b) Fractura y c) <i>Warp</i> y <i>Recoil</i> , [24]. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 24 |
| Figura 2.15.- Componentes experimentales del proceso de engargolado. ....   | 28 |
| Figura 2.16.- Factores que influyen en el proceso de engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 29 |
| Figura 2.17.- Ejes ortotrópicos del proceso de rolado de lámina de metal, [37] . ELABORACIÓN PROPIA. ...  | 31 |
| Figura 2.18.- Geometría del espécimen a) antes y b) después de la deformación, [30]. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 31 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.19.- Probeta para tensión con un ángulo de rolado $\theta$ , donde la dirección de rolado es RD, la dirección transversal es TD y la dirección normal es ND [30]. ELABORACIÓN PROPIA. .... | 33 |
| Figura 2.20.- Comparación de diagramas esfuerzo-deformación verdadera (línea continua) y de ingeniería (línea punteada), obtenidos de la prueba de tensión de la lámina metálica, [31]. ....        | 34 |
| Figura 2.21.- Gráfica log-log de fase plástica del diagrama esfuerzo-deformación real, [31]. ....   | 36 |
| Figura 2.22.- Nodos y puntos de integración, [33]. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 40 |
| Figura 2.23.- Elemento Solid 164, [42]. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 41 |
| Figura 2.24.- Elemento Shell 163, [42]. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 41 |
| Figura 2.25.- Hourglass, [42] ELABORACIÓN PROPIA.....   | 42 |
| Figura 3.1.- Etapas de la metodología implementada. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 44 |
| Figura 3.2.- Ventana Toolbox, pestaña geometría. ....   | 47 |
| Figura 3.3.- Pestaña de <i>modeling</i> . ....  | 48 |
| Figura 3.4.- Pestaña <i>Skeching</i> .....  | 48 |
| Figura 3.5.- Opción <i>fillet</i> en pestaña de <i>modify</i> . ....  | 48 |
| Figura 3.6.- Configuración de geometría. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 49 |
| Figura 3.7.- Configuración de geometría. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 50 |
| Figura 3.8.- Herramienta <i>translate</i> en <i>body transformation</i> . ....  | 51 |
| Figura 3.9.- Ventana de <i>translate</i> . ....   | 52 |
| Figura 3.10.- Configuración de geometría. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 52 |
| Figura 3.11.- Tool Box. ....  | 53 |
| Figura 3.12.-Ventana WORKBENCH® LS-DYNA®. ....  | 53 |
| Figura 3.13.- Ligar Geometría y WORKBENCH® LS-DYNA®. ....   | 54 |
| Figura 3.14.- Material Structural Steel. ....   | 55 |
| Figura 3.15.- Aluminum Alloy NL. ....   | 55 |
| Figura 3.16.- <i>Outline die hemming</i> . ....   | 56 |
| Figura 3.17.- Configuración de la lámina de prueba. ....  | 57 |
| Figura 3.18 Configuración de la lámina interior. ....   | 57 |
| Figura 3.19.- Configuración de la herramienta de pre-engargolado. ....  | 58 |
| Figura 3.20.- Configuración de la herramienta de engargolado final. ....  | 58 |
| Figura 3.21.- Conexiones y contactos. ....  | 59 |
| Figura 3.22.- Frictionless Lámina to pisador. ....  | 59 |
| Figura 3.23.- Interacción entre probeta de prueba y lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 60 |
| Figura 3.24.- Frictionless Lámina to punzón 30. ....  | 61 |
| Figura 3.25.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de pre-engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.26.- Frictionless lámina to punzón a 90. ....   | 62 |
| Figura 3.27.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de engargolado final. ELABORACIÓN PROPIA. .... | 62 |
| Figura 3.28.- Mallado general. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 63 |
| Figura 3.29.- Mallado fino. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 64 |
| Figura 3.30.- Mallado intermedio. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 64 |
| Figura 3.31.- Outline. ....  | 65 |
| Figura 3.32.- Configuración de la lámina de prueba. ....   | 65 |
| Figura 3.33.- Configuración de la lámina interior. ....  | 66 |
| Figura 3.34.- Configuración de la herramienta de pre-engargolado. ....   | 66 |
| Figura 3.35.- Configuración de la herramienta de engargolado final. ....                                       | 67 |
| Figura 3.36.- Conexiones y contactos. ....   | 67 |
| Figura 3.37.- Frictionless Lámina to pisador. ....   | 68 |
| Figura 3.38.- Interacción entre probeta de prueba y lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA. ....                  | 68 |
| Figura 3.39.- Frictionless Lámina to punzón 60. ....   | 69 |
| Figura 3.40.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de pre-engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 69 |
| Figura 3.41.- Frictionless Lámina to punzón a 90. ....   | 70 |
| Figura 3.42.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de engargolado final. ELABORACIÓN PROPIA. .... | 70 |
| Figura 3.43.- Mallado general. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 71 |
| Figura 3.44.- Mallado fino. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 71 |
| Figura 3.45.- Mallado intermedio. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 72 |
| Figura 3.46.- Outline. ....  | 72 |
| Figura 3.47.- Configuración de la lámina de prueba. ....   | 73 |
| Figura 3.48.- Configuración de la lámina interior. ....  | 73 |
| Figura 3.49.- Configuración de la herramienta de pre-engargolado. ....   | 74 |
| Figura 3.50.- Configuración de la herramienta de engargolado final. ....                                       | 74 |
| Figura 3.51.- Conexiones y contactos. ....   | 75 |
| Figura 3.52.- Frictionless Lámina to pisador. ....   | 75 |
| Figura 3.53.- Interacción entre probeta de prueba y lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA. ....                  | 76 |
| Figura 3.54.- Frictionless Rodillo a 60°. ....   | 76 |
| Figura 3.55.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de pre-engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 77 |
| Figura 3.56.- Frictionless Rodillo a 90°. ....   | 78 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 3.57.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de engargolado final. ELABORACIÓN PROPIA.<br>.....                | 78 |
| Figura 3.58.- Mallado general <i>roll hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA.....   | 79 |
| Figura 3.59.- Mallado fino <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 80 |
| Figura 3.60.- Mallado intermedio <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 80 |
| Figura 3.61.- Configuración del análisis. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 81 |
| Figura 3.62.- Fixed Support <i>die hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 81 |
| Figura 3.63.- Desplazamiento negativo al eje y, pre-engargolado <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ..                       | 82 |
| Figura 3.64.- Fuerza con dirección vectorial negativa al eje y, pre-engargolado <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....     | 82 |
| Figura 3.65.- Restricción de cuerpo rígido, pre-engargolado <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                         | 83 |
| Figura 3.66.- Desplazamiento negativo al eje y, engargolado final <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ..                     | 83 |
| Figura 3.67.- Fuerza con dirección vectorial negativa al eje y, engargolado final <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 84 |
| Figura 3.68.- Restricción de cuerpo rígido, engargolado final <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                       | 84 |
| Figura 3.69.- Restricción de cuerpo rígido, lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 85 |
| Figura 3.70.- Configuración del análisis, <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 86 |
| Figura 3.71.- Fixed Support <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 86 |
| Figura 3.72.- Desplazamiento positivo al eje z, pre-engargolado <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                   | 87 |
| Figura 3.73.- Fuerza con dirección vectorial positiva al eje z, pre-engargolado <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 87 |
| Figura 3.74.- Restricción de cuerpo rígido, pre-engargolado <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                       | 88 |
| Figura 3.75.- Desplazamiento negativo al eje y, engargolado final <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA.<br>.....             | 88 |
| Figura 3.76.- Fuerza con dirección vectorial negativa al eje y, engargolado final <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. .... | 89 |
| Figura 3.77.- Restricción de cuerpo rígido, engargolado final <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                     | 89 |
| Figura 3.78.- Restricción de cuerpo rígido, lámina <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                                | 90 |
| Figura 3.79.- Configuración del análisis <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 91 |
| Figura 3.80.- Fixed Support, <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 91 |
| Figura 3.81.- Desplazamiento positivo al eje x, pre-engargolado <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ..                      | 92 |
| Figura 3.82.- Restricción de cuerpo rígido, pre-engargolado <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                        | 92 |
| Figura 3.83.- Desplazamiento positivo al eje x, engargolado final <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                  | 93 |
| Figura 3.84.- Restricción de cuerpo rígido, engargolado final <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....                      | 93 |
| Figura 3.85.- Restricción de cuerpo rígido lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 94 |
| Figura 3.86.- Configuración de resultados de solución, esfuerzo de VON Misses, Stress. ....                                       | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.87.- Configuración de resultados de solución, <i>Deformation</i> . .....  | 95  |
| Figura 3.88.- Cara superior de la lámina de pruebas. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 96  |
| Figura 3.89.- Cara superior de donde empieza el radio de curvatura de la lámina de pruebas. ELABORACIÓN PROPIA. ....                 | 97  |
| Figura 3.90.- Configuración completa con paloma verde. ....  | 97  |
| Figura 3.91.- Altura de ceja. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 99  |
| Figura 3.92.- Angulo de engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 100 |
| Figura 3.93.- Posición de la herramienta. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 101 |
| Figura 3.94.- Diámetro del rodillo. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 101 |
| Figura 3.95.- Medición de espesores. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 102 |
| Figura 3.96.- Análisis de dimensiones y características de la geometría. ELABORACIÓN PROPIA. ....                                    | 103 |
| Figura 3.97.- Pre-engargolado <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 104 |
| Figura 3.98.- Engargolado final <i>Die Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 105 |
| Figura 3.99.- Pre-engargolado <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 105 |
| Figura 3.100.- Engargolado final <i>Table Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 106 |
| Figura 3.101.- Pre-engargolado <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 107 |
| Figura 3.102.- Engargolado final <i>Roll Hemming</i> . ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 107 |
| Figura 3.103.- Microscopio digital VHX-5000. ....  | 108 |
| Figura 3.104.- Ajustes del Microscopio. ....   | 111 |
| Figura 3.105.- Número de cuadros. ....   | 111 |
| Figura 3.106.- Ajuste de ejecución automático. ....  | 112 |
| Figura 3.107.- Enfoque. ....   | 112 |
| Figura 3.108.- Pieza examinada bajo el microscopio. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 113 |
| Figura 3.109.- Medición plano. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 113 |
| Figura 3.110.- Medición de altura de ceja. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 114 |
| Figura 3.111.- Medición de altura de ceja. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 115 |
| Figura 4.1.- Comportamiento del valor de arruga en el análisis numérico de los tres métodos de engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. .... | 117 |
| Figura 4.2.- Comportamiento de la arruga engargolado <i>Die Hemming</i> prototipo. ELABORACIÓN PROPIA. ....                          | 119 |
| Figura 4.3.- Valor de la arruga método <i>Table Hemming</i> pruebas en prototipo. ELABORACIÓN PROPIA. ....                           | 120 |
| Figura 4.4.- Comportamiento del valor de la arruga <i>Roll Hemming</i> Prototipo. ELABORACIÓN PROPIA. ....                           | 121 |
| Figura 4.5.- Valor de la arruga para el método <i>Die Hemming</i> tomado con microscopio. ELABORACIÓN PROPIA. ....                   | 123 |
| Figura 4.6.- Valor de la arruga método <i>Table Hemming</i> censado por microscopio. ELABORACIÓN PROPIA. ....                        | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.7.- Valor de la arruga método <i>Table Hemming</i> censado por microscopio. ELABORACIÓN PROPIA. .... | 125 |
| Figura 4.8.- Valores promedio de arruga tres métodos de engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. ....                 | 126 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |         |
|---|---------|
| Tabla 2.1.- Ventajas y desventajas del proceso de Engargolado por <i>Die Hemming</i> , [5] ELABORACIÓN PROPIA. ....                 | 20      |
| Tabla 2.2.- Ventajas y desventajas del proceso de engargolado por <i>Table Hemming</i> , [5] ELABORACIÓN PROPIA. ....               | 21      |
| Tabla 2.3.- Ventajas y desventajas del proceso de engargolado por <i>Roll Hemming</i> , [5]. ELABORACIÓN PROPIA. ....               | 22      |
| Tabla 2.4.- Proceso general del engargolado. ELABORACIÓN PROPIA. ....   | 25-26   |
| Tabla 3.1.- Propiedades mecánicas del material. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 98      |
| Tabla 3.2.- Composición del aluminio 6011 [43]. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 98-99   |
| Tabla 3.3.- Variables de entrada utilizadas en los diseños de experimentos. ELABORACIÓN PROPIA. ....                                | 102     |
| Tabla 3.4.- Ventajas de función HDR y desventajas del método convencional. ELABORACIÓN PROPIA. ...                                  | 110     |
| Tabla 4.1.- Valor de arruga resultados de simulación. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 116     |
| Tabla 4.2.- Resultados del análisis experimental en prototipo para el Die Hemming. ELABORACIÓN PROPIA. ....                         | 118     |
| Tabla 4.3.- Valor de arruga en el método <i>Table Hemming</i> prototipo. ELABORACIÓN PROPIA. ....                                   | 119-120 |
| Tabla 4.4.- Valor de la arruga <i>Roll Hemming</i> Prototipo. ELABORACIÓN PROPIA. ....  | 121     |
| Tabla 4.5.- Valor de la arruga método <i>Die Hemming</i> tomadas por microscopio. ELABORACIÓN PROPIA. .                             | 122     |
| Tabla 4.6.- Valor de la arruga método <i>Table Hemming</i> microscopio. ELABORACIÓN PROPIA. ....                                    | 123-124 |
| Tabla 4.7.- Valor de la arruga método <i>Roll Hemming</i> microscopio. ELABORACIÓN PROPIA. ....                                     | 124-125 |
| Tabla 4.8.- Resultados experimentales de pruebas en prototipo, con parámetros de entrada para cada prueba. ELABORACIÓN PROPIA. .... | 126-129 |
| Tabla 4.9.- Resultados censados en microscopio, con parámetros de entrada para cada prueba. ELABORACIÓN PROPIA. ....                | 129-131 |

## Lista de abreviaciones y acrónimos

|            |   |
|------------|---|
| DOE        | Diseño de Experimentos.   |
| CAD        | Diseño asistido por computadora.  |
| ANSYS 15.0 | Un Software comercial de simulación bajo la teoría de elemento finito.  |
| WORKBENCH  | Una Plataforma de software comercial desde donde se crean los proyectos de análisis.  |
| CAE        | Ingeniería asistida por computadora.  |
| INEGI      | Instituto nacional de estadística y geografía.  |
| LS-DYNA    | Un Paquete de software comercial de simulación multifísica desarrollado por Livermore Software Technology Corporation.                    |
| Hemming    | Engargolado.  |
| Roll in    | Doblado hacia adentro - distancia negativa entre el radio exterior del engargolado y la brida original del panel.                         |
| Roll out   | Doblado hacia afuera - distancia positiva entre el radio exterior del engargolado y la brida original del panel.                          |
| Recoil     | Arruga que se presenta como un ondulamiento que supera la base de la superficie original en la ceja de la lámina exterior.                |
| Warp       | Hundimiento que supera la base de la superficie.  |
| Outer      | Zona del panel exterior que no sufre doblez ni deformación.   |
| Inner      | Lámina doblada alrededor de un panel exterior.  |
| Flanging   | Doblado de ceja, orilla del panel exterior doblado 90° con respecto al panel interior.  |
| Flange     | Parte del panel exterior que queda doblada a 90°; Ceja.   |
| Hem Bed    | Pieza que tiene las mismas dimensiones y forma que el panel exterior en su primera parte y sirve como apoyo para realizar el engargolado. |
| GAP        | Espacio entre el panel interior y el panel exterior.  |
| Hourglass  | Deformación anormal del elemento bajo condiciones de carga.   |
| Screening  | Método no iterativo de muestreo directo utilizando un generador de combinaciones aleatorias.  |

|                 |                            |
|-----------------|----------------------------|
| Gráfica log-log | Gráfica doble logarítmica. |
| Tochos          | Lingotes                   |

## Nomenclatura

|              |  |
|--------------|--|
| 2 D          | Bidimensional.   |
| 3 D          | Tridimensional.  |
| mm           | Milímetros.  |
| kg           | Kilogramos.  |
| $\alpha$     | Ángulo de doblado.   |
| $\alpha'$    | Lámina de metal con un ángulo incluido.                        |
| t            | Espesor del material.  |
| $L_L$        | Longitud inicial de la lámina.                                 |
| $L_{PR}$     | Longitudes de las partes rectas pieza.                         |
| $L_{ZD}$     | Longitud de la Zona doblada.                                   |
| w            | Ancho de la Lámina.  |
| t            | Espesor de la Lámina.  |
| R            | Radio del doblado.   |
| M            | Matriz de masas.   |
| a            | Vector de aceleraciones nodales.                               |
| C            | Matriz de amortiguamiento.                                     |
| K            | Matriz de rigidez.   |
| u            | Vector de desplazamientos nodales.                             |
| $F_{ext}$    | Vector de fuerzas externas aplicadas al sistema.               |
| $R_{me}$     | Radio mínimo de engargolado.                                   |
| $T_{msf}$    | Espesor mínimo del borde engargolado que no presenta fractura. |
| $T_L$        | Espesor de la lámina   |
| BA           | Tolerancia de doblado en milímetros.                           |
| A            | Ángulo de doblado en grados                                    |
| $\epsilon_x$ | Deformaciones en la dirección del ancho de la probeta.         |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\varepsilon_y$ | Deformaciones en la densidad de la probeta.             |
| V               | Velocidad de desplazamiento.                            |
| F               | Fuerza del doblado.                                     |
| Fh              | Fuerza de Sujeción.                                     |
| RD              | Dirección de rolado.                                    |
| TD              | Dirección transversal.                                  |
| ND              | Dirección normal.                                       |
| $r$             | Coefficiente anisotrópico.                              |
| N               | Newton.   |
| MPa             | Mega Pascal.  |
| $w_0$           | Ancho inicial.  |
| $w$             | Ancho final.  |
| $t_0$           | Espesor inicial de la probeta.                          |
| $t$             | Espesor final de la probeta.                            |
| %               | Porcentaje.   |
| $S_{ut}$        | Esfuerzo de tensión último.                             |
| $S_y$           | Esfuerzo de cedencia.                                   |
| $n$             | Exponente de endurecimiento por deformación.            |
| $K$             | Coefficiente de esfuerzo.                               |
| $n = 0$         | Sólido perfectamente plástico.                          |
| $n = 1$         | Sólido elástico.  |
| $2^k$ .         | Diseño factorial con un valor mínimo y un valor máximo. |

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de producción de la industria metalmecánica se encuentran aquellos denominados procesos de conformado, el conformado de metales comprende una amplia variedad de procesos de manufactura, los cuales consisten en la deformación plástica de una pieza inicialmente plana (comúnmente una lámina), a la cual se le aplica una configuración final deseada por medio de múltiples herramientas [1]. Los principales procesos de conformado de metales incluyen laminado, forjado, doblado, embutido, engargolado, entre otros. Actualmente, debido a que el engargolado es utilizado ampliamente en la industria automotriz en cierres y uniones de carrocería, este ha sido ampliamente estudiado en la literatura [2-4].

El engargolado es un proceso utilizado en las etapas finales de producción de cierres de automóviles, por ejemplo: puertas, cofres, cajuela, etc. Por tal motivo el engargolado, tiene una influencia crítica en la apariencia final y calidad del vehículo. Este proceso de formado sirve para aumentar la rigidez de la parte engargolada, para optimizar los bordes de las estructuras y, por último, para unir los paneles interiores y exteriores como se representa en la Figura 1.1.



Figura 1.1.- Representación del proceso de engargolado el (naranja) del borde parte exterior se dobla alrededor de una parte interior (negro). ELABORACIÓN PROPIA.

El engargolado es un proceso de tres pasos, que consiste en doblar el extremo de una lámina sobre si misma o sobre otra lámina, inicialmente se lleva a cabo la etapa de doblado, la cual consiste en generar un doblez a  $90^\circ$  en el borde del panel exterior ver Figura 1.2 (a), lo que se denomina comúnmente ceja. Posteriormente, se realiza un segundo doblez en la etapa de pre-engargolado, el cual puede variar entre los  $30^\circ$  y  $60^\circ$  a partir del doblez inicial de la ceja ver

Figura 1.2 (b). Finalmente, en la etapa de engargolado final se realiza el doblado de la ceja a  $180^\circ$  con respecto a la posición original del panel exterior ver Figura 1.2 (c) [3,4].

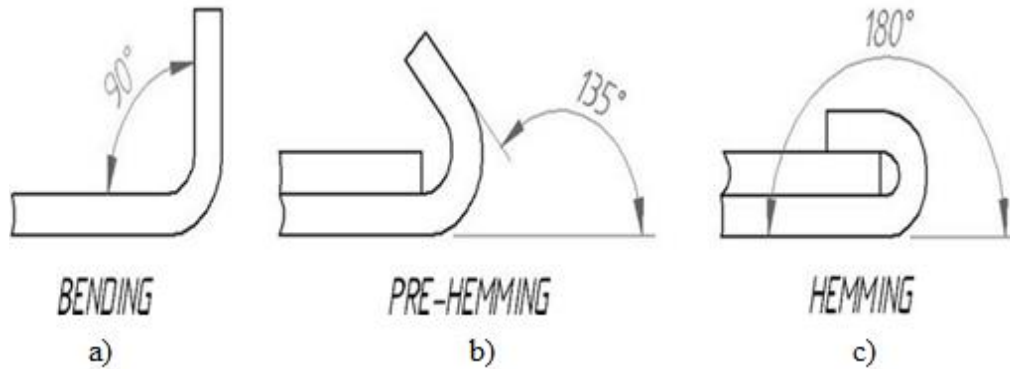


Figura 1.2.- Etapas del engargolado: a) *Bending*; b) *Pre-Hemming*; c) *Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Existen tres métodos para llevar a cabo el proceso de pre-engargolado y engargolado final. El *Die Hemming*, que se realiza utilizando una prensa complementada con herramientas con un patrón de movimiento vertical. De manera similar, el *Table Hemming* también se realiza empleando una prensa, sin embargo, el movimiento de los herramientas puede ser horizontal, vertical o una combinación de ambos. Por otro lado, el método de *Roll Hemming* que emplea un rodillo conducido a lo largo de una trayectoria dada [3-7]. Cabe mencionar que los tres procesos requieren de mecanismos complementarios para la generación de la pestaña inicial.

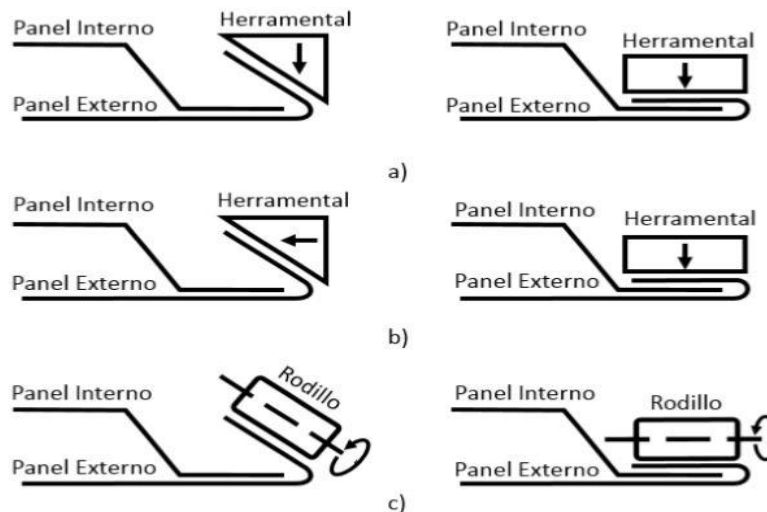


Figura 1.3.- Procesos de pre-engargolado (izquierda) y engargolado final (derecha): a) engargolado con dados de movimiento vertical; b) engargolado de mesa con dados de movimiento vertical y horizontal; c) engargolado por rodillo. ELABORACIÓN PROPIA.



Las tendencias actuales de la industria automotriz apuntan a la reducción del peso del automóvil, con el fin de desarrollar vehículos más ligeros que disminuyan el consumo de combustible, y reduzcan las emisiones de CO<sub>2</sub>, esto ha generado que el aluminio se posicione como favorito para la producción de paneles exteriores del vehículo.

Así también el engargolado ha sido foco de estudio por ser un método que en general se aplica a láminas de pequeño espesor (generalmente menores de un milímetro) y es un proceso rápido y de bajo costo, sin embargo, lograr y mantener la calidad del producto engargolado aun es un desafío y requiere un continuo desarrollo para adaptarse a la inclusión de nuevos materiales y requerimientos de diseño.

Es importante ser capaz de predecir la forma final y la calidad de la superficie del producto una vez realizado el proceso de engargolado, ya que la apariencia del vehículo se ve influenciada directamente por los parámetros utilizados para llevar a cabo el proceso. Los parámetros de calidad involucrados en el engargolado se pueden clasificar como dimensionales y superficiales, los cuales pueden clasificarse a su vez por parámetros específicos.

En el aspecto dimensional, se llama doblado hacia adentro (*Roll In*) a la distancia negativa entre el radio exterior del engargolado y la brida original del panel, ver Figura 1.4 (a). Mientras que a la distancia positiva entre el radio exterior del engargolado y la brida original del panel se le llama doblado hacia afuera (*Roll Out*). Para el caso de la industria automotriz se tiene una tendencia general a reducir los espacios entre las partes del cuerpo, minimizando el *Roll In* y *Roll Out* [8]. Sin embargo, en la literatura revisada no se encontró un método que permita predecir estos parámetros durante el proceso de engargolado.

Por otro lado, la calidad de la superficie está relacionada con las deformaciones que pueden o no generarse en el área interior y exterior a lo largo del borde del producto, tales como arrugas, grietas, *Recoil* y *Warp*. La formación de arrugas se presenta como un ondulamiento en la ceja de la lámina exterior que puede ser generada por una distribución de esfuerzos

longitudinales no uniforme [8]. El *Warp* se refiere al hundimiento que supera la base de la superficie, mientras que a la deformación de curvatura que supera la base de la superficie original se le denomina *Recoil*, tal como lo ilustra la Figura 1.4 (b) [8].

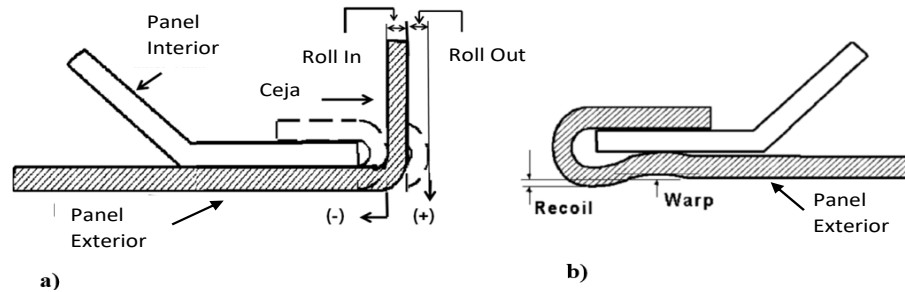


Figura 1.4.- a) Roll-in, Roll-Out de un engargolado, b) Warp y Recoil de una pieza engargolada [9].

ELABORACIÓN PROPIA.

El engargolado ha demostrado ser un proceso eficiente y económico, pero que a la vez presenta dentro de él una serie de problemas a nivel mundial, debido a las mayores exigencias de los clientes para obtener productos cada vez más complejos y con tolerancias geométricas cada vez más estrechas [2].

Para dar solución a esta problemática diversos autores han reportado el uso de software computacional que utiliza el método de los elementos finitos, (MEF) el cual ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles y físicos. Ya que permite resolver casos que hasta hace poco eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, someterlos a las condiciones reales de esfuerzos e ir realizando mejoras sobre la marcha, lo que traía consigo un elevado costo de tiempo y desarrollo.

Por su parte el MEF permite realizar un modelo matemático del sistema real, más fácil y económico que un prototipo real. Que, si bien no deja de ser un método aproximado de cálculo, este método ofrece diseños óptimos muy cercanos a la realidad [4].

Entre los estudios más recientes reportados en la literatura, se encuentra el N. Le Maout, S. Thuillier, PY Mañach, quienes realizaron pruebas de resistencia en probetas rectas y dentadas de aluminio considerando orientaciones diferentes en cuando a la dirección de rolado en busca de determinar límites de fractura del material durante el proceso de engargolado [10].

Por su parte, Livatyal y Larris, realizaron una investigación experimental para determinar las condiciones de formación de defectos superficiales en acero suave, durante el engargolado [11].

P. Jimbert, I. Eguia, et. al. Realizaron un análisis comparativo de los factores que afectan a la calidad en el engargolado del aluminio 6016 considerando el método convencional y un método experimental por medio de electromagnético [12].

En los estudios anteriores el factor común es el interés determinar los parámetros de entrada para el mejoramiento de la calidad del producto final, sin embargo, la industria automotriz es un ente en constante crecimiento y desarrollo, que requiere de estudios constantes para satisfacer las necesidades del mercado actual, en conciencia los procesos de manufactura utilizados por este sector, específicamente del engargolado es un proceso que también se mantiene en constante desarrollo y sigue siendo estudiado.

En el presente trabajo se presenta el análisis y comparación, teórico – experimental de los tres tipos de engargolado de lámina metálica utilizando probetas lineales de aluminio 6011, considerando el ángulo de corte de la probeta respecto a la dirección de rolado ( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ ).

Cabe mencionar que el propósito del presente se enfoca en encontrar la relación existente, es decir, la influencia de las variables de entrada hasta ahora consideradas en la literatura [1,12,14,24] sobre los parámetros de calidad que evalúan el proceso, por lo tanto no se analiza en el presente, una parte o pieza específica del vehículo, sino la posibilidad de encontrar el método y los criterios que presentan una mayor eficiencia bajo las condiciones que fueron posibles desarrollar en el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.

## 1.1 Planteamiento del problema

Durante el año 2016 México logro consolidarse como uno de los principales productores de autos y autopartes, detrás de países como China, Japón, Estados Unidos y Alemania, superando a Corea del Sur. Ya que actualmente, importa 30,000 millones de dólares en partes y componentes. Según datos del INEGI, el 61 % del valor de un auto se fabrica en el país, mientras que el 40 % de un vehículo en Estados Unidos se hace con productos mexicanos [13].

Sin embargo, la industria automotriz nacional requiere mantenerse en los altos niveles internacionales de competitividad, para esto debe apoyarse en tres aspectos fundamentales: asegurar la calidad de las partes suministradas, productividad y mejora continua.

En el caso del proceso de engargolado, a pesar de ser un proceso ampliamente estudiado durante la última década, lograr la calidad de las piezas al final del proceso sigue siendo una tarea complicada y que está profundamente influenciada por las propiedades mecánicas del material utilizado y los parámetros de entrada considerados para el proceso, los cuales pueden ser: espesor del material, fuerza de engargolado, diámetro del rodillo, altura de la ceja, entre otros, un aspecto que complica más la tarea es el hecho de que este es un proceso terminal y la estética del vehículo está ampliamente relacionada con el éxito del proceso.

Durante la revisión de la literatura se encontró que aunque se conocen los parámetros de entrada específicos para el proceso de engargolado, aun no se tienen valores específicos para cada uno de los métodos con los cuales se asegure la calidad del producto final, es por lo que el presente trabajo, se enfoca en el análisis comparativo teórico y experimental de los tres tipos de engargolado de lámina metálica utilizados por la industria automotriz: *Die Hemming*, *Table Hemming* y *Roll Hemming*; con el objetivo de determinar cuál de los tres procesos genera la mejor calidad de engargolado.

## 1.2 Justificación

Los requerimientos de la industria, sobre todo la automotriz, han generado un continuo desarrollo de los procesos de conformado; esto debido a los nuevos materiales y demandas del mercado. Tal es el caso del engargolado, ya que este método de manufactura es utilizado en el cierre y uniones de carrocería como cofres, cajuelas, toldos, por lo que la apariencia del vehículo depende directamente de los resultados del proceso. Lo anterior ha generado gran interés por el estudio del proceso, siempre en busca de mejorar la calidad del producto.

Recientemente se han realizado numerosos estudios mediante métodos teóricos y experimentales para analizar procesos críticos del engargolado, sin embargo, este proceso sigue siendo un tema ampliamente estudiado por el evidente interés de la industria por mantener la calidad del producto.

A nivel nacional nuestro país ha recibido una inversión de más de 27,000 millones de dólares, lo que añadirá aproximadamente 1.7 millones de unidades a la capacidad de producción actual. Atraídas por el capital humano competitivo, sus ventajas geográficas y su acceso preferencial a los principales mercados del mundo, las compañías automotrices siguen llegando a México. Tan sólo entre 2010 y 2015, México recibió inversiones de más de 22,000 millones de dólares, enfocadas principalmente a la construcción de nuevas plantas y a proyectos de expansión [13].

Lo anterior augura un mayor crecimiento para la industria y por consecuencia una mayor necesidad de atender necesidades que resulten de la puesta a punto de sus procesos, en este caso, el presente trabajo pretende estudiar el proceso de engargolado mediante los tres métodos, *Die Hemming*, *Table Hemming* y *Roll Hemming*, para el análisis del proceso se utilizaron probetas lineales de aluminio 6061, esto por ser un material de fácil acceso al menudeo y debido al presupuesto con el que se desarrolló el proyecto.

El estudio consistió en el análisis numérico y posterior validación mediante pruebas experimentales, para el estudio se realizaron nueve diseños de experimentos 2k, donde se consideraron tres variables geométricas para cada método y cada una fue replicada para los

ángulos de corte de las probetas respecto a la dirección de rolado ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ). Dichos diseños de experimentos pretenden determinar el método con mayor eficiencia y las variables que contribuyen a disminuir los defectos en la calidad del engargolado, tales como: *Roll in*, *Roll out* y *Arruga*.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar los tres tipos de engargolado de lámina metálica (*Die Hemming*, *Table Hemming* y *Roll Hemming*) utilizados por la industria automotriz mediante la construcción de un modelo de simulación en 3D FEA utilizando el software ANSYS 15.0®/LS-DYNA® en la interfaz de WORKBENCH® ANSYS 15.0® y pruebas experimentales.

Realizar la consulta bibliográfica de diversos documentos sobre el proceso estudiado para establecer un marco de referencia.

Desarrollar el modelo paramétrico de la geometría involucrada en el análisis.

Desarrollar el modelo de análisis por elemento finito del proceso estudiado.

Realizar el diseño de experimentos que describa el fenómeno estudiado bajo las variables de entrada consideradas para la investigación.

Realizar las pruebas experimentales en el prototipo de máquina para engargolar, determinadas en el DOE, para la validación de los resultados numéricos.

#### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Realizar las pruebas experimentales en el prototipo de máquina para engargolar determinadas en el DOE, considerando un espesor de engargolado ideal de 1.71 mm.
- Realizar el análisis de los resultados obtenidos del análisis numérico y experimental, considerando para la validación un rango de 5% entre los valores.

## **1.4 Hipótesis**

Es posible determinar la influencia de los parámetros de entrada sobre la calidad del proceso de engargolado mediante el análisis por elemento finito y validar los resultados realizando pruebas experimentales.

## **1.5 Estructura del presente trabajo**

La teoría fundamental del proceso de engargolado se presenta en el capítulo dos, incluyendo los tipos de doblado de lámina, los diferentes procesos de engargolado y la teoría de deformación plástica. Adicionalmente se presentan los conceptos básicos del proceso análisis por elemento finito.

En el capítulo tres, se presenta la metodología implementada para el desarrollo del trabajo. Se describe el diseño del CAD paramétrico, el análisis por elemento finito y el proceso de experimentación en el prototipo y microscopio.

En el capítulo cuatro, se presentan los resultados obtenidos del análisis numérico y experimental.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones realizadas a partir de los hallazgos realizados en la investigación.

# CAPÍTULO II

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los temas fundamentales para el análisis del proceso de engargolado deben incluir una descripción general de los procesos de manufactura enfocado en el formado de metales, especialmente en el doblado de lámina que es el origen del engargolado. Adicionalmente se presenta la teoría de plasticidad y de análisis por elemento finito.

### 2.1 Procesos de manufactura.

Un proceso de manufactura es el conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de las materias primas. Estas características pueden ser de naturaleza variada como la forma, la resistencia o el tamaño.

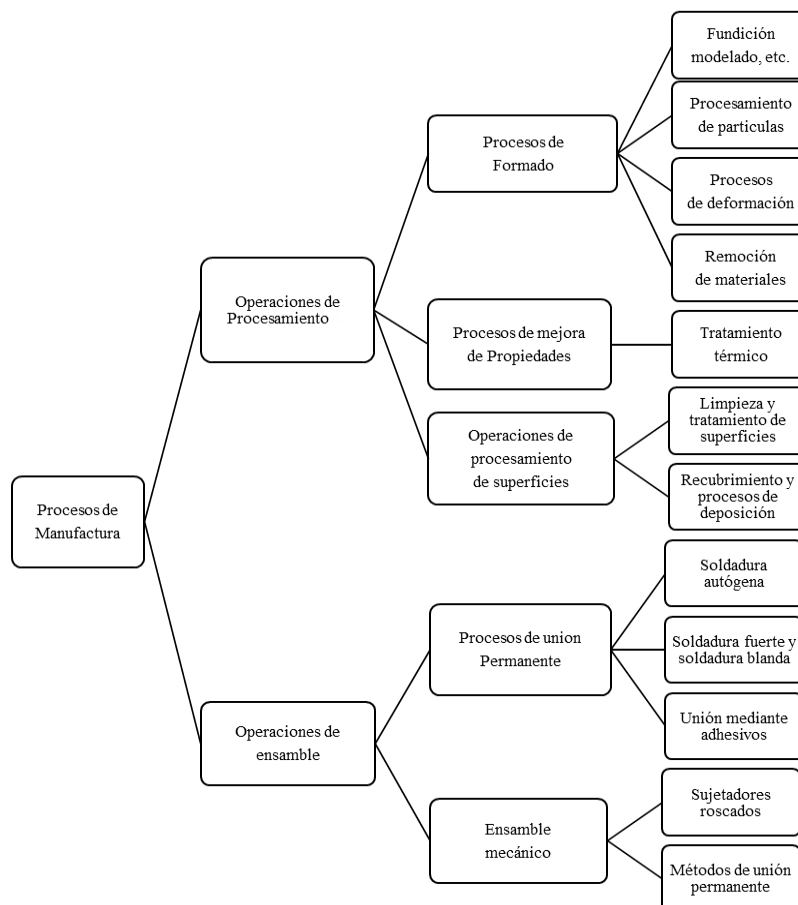


Figura 2.1.- Clasificación de procesos de manufactura [14]. ELABORACIÓN PROPIA.



Los procesos de manufactura pueden dividirse en dos tipos básicos: 1) operaciones de procesamiento y 2) operaciones de ensamble. Una operación de procesamiento transforma un material de trabajo de una etapa a otra más avanzada, que lo sitúa cerca del estado final deseado para el producto. Esto le agrega valor al cambiar la geometría, las propiedades o la apariencia del material inicial. Una operación de ensamble une dos o más componentes para crear una nueva entidad llamada ensamble, subensamble o cualquier otra manera que se refiera al proceso de unir (por ejemplo, a un sub ensamble soldado), ver Figura 2.1.

El presente trabajo se enfoca en el análisis y optimización de una de las operaciones de procesamiento de material como lo es el engargolado que es un proceso de deformación de láminas metálicas. En la siguiente sección se presenta una descripción de los procesos de formado de metales.

## **2.2 Formado de metales**

El formado de metales incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación resulta del uso de una herramienta, que usualmente es un dado para formar metales. Dicho dado, aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del material, por lo tanto, el metal toma la forma determinada por la geometría del dado.

Los procesos de formado de lámina se pueden clasificar en: procesos de deformación volumétrica y procesos de trabajo metálico.

**Procesos de deformación volumétrica**, se caracteriza por deformaciones significativas y cambios de forma, y la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término volumétrico describe a las partes de trabajo que tienen esta baja relación de área-volumen. La forma de trabajo inicial para estos procesos incluye tochos

cilíndricos y barras rectangulares. Las operaciones básicas de deformación volumétrica son las siguientes [14]:

- **Laminado.** Es un proceso de deformación por compresión en el cual el espesor de una placa se reduce por medio de herramientas cilíndricas opuestas llamadas rodillos. Los rodillos giran para deformar la placa y realizar el trabajo de compresión dentro de la abertura entre ellos, ver Figura 2.2 (a).
- **Forjado.** En el forjado se comprime una pieza de trabajo entre dos dados opuestos, de manera que la forma del dado se imprima para obtener el trabajo requerido. El forjado es un proceso tradicional de trabajo en caliente, pero muchos tipos de forjado se hacen también en frío, ver Figura 2.2 (b).
- **Extrusión.** Es un proceso de compresión en el cual se fuerza el metal de trabajo a fluir a través de la abertura de un dado para que tome la forma de la abertura de éste en su sección transversal, ver Figura 2.2 (c).
- **Estirado.** En este proceso de formado es similar a la extrusión. Sin embargo, aquí el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira de la pieza a través de la abertura de un dado, ver Figura 2.2 (d).

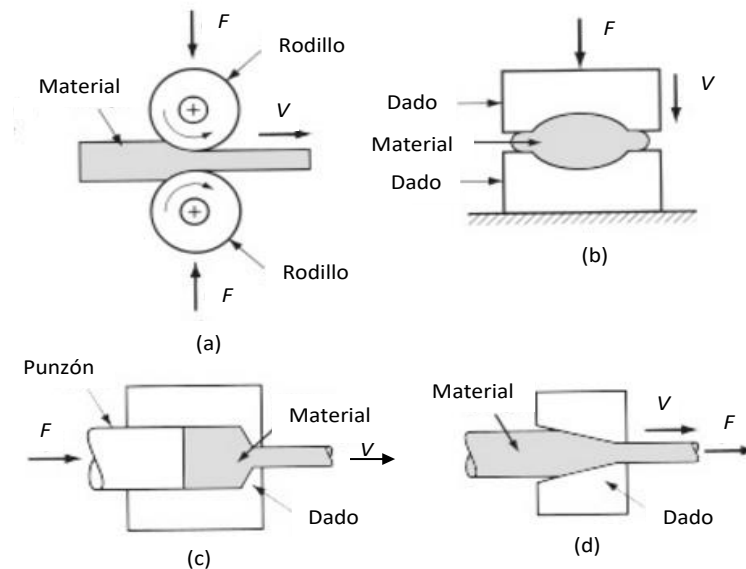


Figura 2.2.- Procesos básicos de deformación volumétrica, (a) laminado, (b) forjado, (c) extrusión y (d) estirado.

El movimiento relativo en las operaciones se indica por  $v$  y las fuerzas se indican por  $F$ , [14]. ELABORACIÓN PROPIA.

Una gran mayoría de las industrias manufactureras como la automotriz utilizan elementos que se han sometido a deformaciones volumétricas. Posterior a un proceso como el laminado se tienen procesos, como el engargolado, que se aplican directamente sobre láminas metálicas, los cuales se presentan a continuación.

**Trabajo de láminas metálicas.** Son operaciones de formado o preformado de láminas de metal, tiras y rollos. La relación del área superficial y el volumen del material inicial son altos; por lo que esta relación es un medio útil para distinguir la deformación volumétrica de los procesos con láminas metálicas.

Las operaciones con láminas metálicas se ejecutan en tibio, así como en frío y se utiliza en la mayoría de los casos un juego de herramientas llamadas punzón y dado. El punzón es la porción positiva (es el que genera la deformación en la lámina) y el dado es la porción negativa (es el que da la geometría final de la lámina) del juego de herramientas. Las operaciones básicas con lámina de metal se describen en las Figura 2.3 (a-c), [14,15].

- **Doblado:** El doblado de metales es la deformación de láminas alrededor de un determinado ángulo. Los ángulos pueden ser clasificados como abiertos (si son mayores a 90 grados), cerrados (menores a 90°) o rectos. Durante la operación, las fibras externas del material están en tensión, mientras que las interiores están en compresión. El doblado no produce cambios significativos en el espesor de la lámina, ver Figura 2.3 (a).
- **Embutido:** Se refiere a la transformación de una lámina plana de metal en una forma hueca o cóncava, como una copa, mediante el estirado de metal. Se utiliza un sujetador para mantener fija la plantilla, mientras el punzón empuja la lámina de metal, ver Figura 2.3 (b).
- **Corte:** este proceso conlleva la fractura del material que se trabaja; consiste en cortar una sección de la lámina usando un punzón y un dado, ver Figura 2.3 (c).

Una descripción detallada de cada uno de los procesos de manufactura antes mencionados pueden encontrarse en diversa literatura [16-19]. Como se ha mencionado, el estudio propuesto se basa en el proceso de engargolado por rodillo. La base de dicho proceso es el doblado de lámina; los distintos tipos de doblado se presentan a continuación.

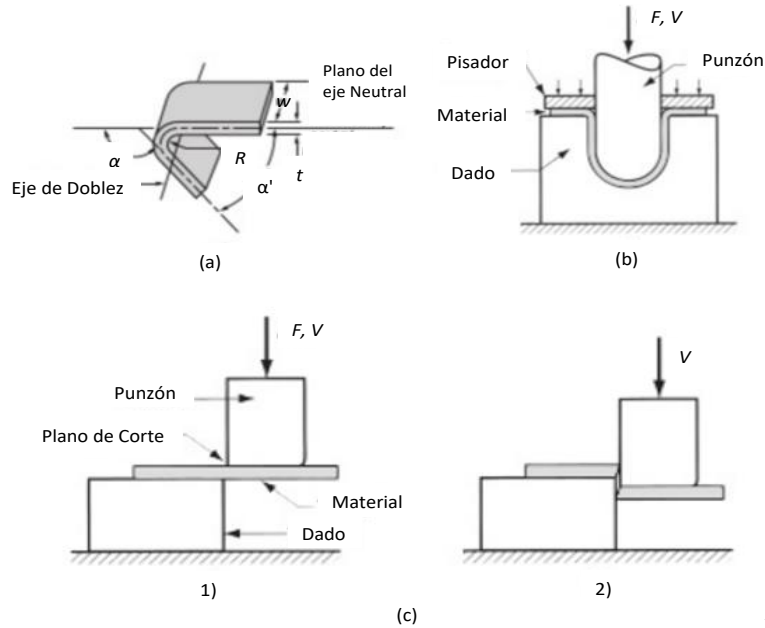


Figura 2.3.- Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas; (a) doblado, (b) estirado y (c) corte; (1) al primer contacto del punzón con la lámina y (2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por  $F$  y  $v$ , [14]. ELABORACIÓN PROPIA.

### 2.3 Tipos de doblado de lámina.

Las operaciones de doblado se realizan usando como herramientas de trabajo diversos tipos de punzones y dados. Los dos métodos de doblado más comunes y sus herramientas asociadas son el doblado en V, ejecutado con un dado en V; y el doblado de bordes, ejecutando con un dado deslizante. Estos métodos se ilustran en las Figura 2.4 (a y b).

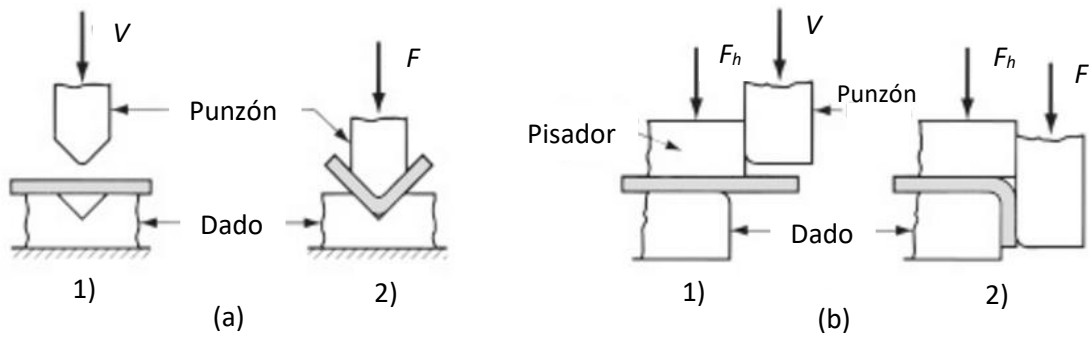


Figura 2.4.- Tipos de doblado: (a) doblado en V y (b) doblado de bordes; (1) antes y (2) después del doblado, [24]  
 . ELABORACIÓN PROPIA.

De la Figura 2.4,  $V$  representa la velocidad de desplazamiento del punzón,  $F$  la fuerza de doblado y  $F_h$  la fuerza de sujeción. Para el doblado en V, la lámina de metal se dobla en ángulos que fluctúan desde los muy obtusos (cercanos a  $180^\circ$ ) hasta los muy agudos (cercanos a  $0^\circ$ ). El doblado en V se usa generalmente para operaciones de baja producción y se realiza frecuentemente en una prensa de cortina. Los correspondientes dados en V son relativamente simples y de bajo costo.

En contraste con el doblado en V, el doblado de Bordes involucra una carga voladiza sobre la lámina de metal. Se usa una placa de presión que aplica una fuerza de sujeción ( $F_h$ ) para sostener la base de la pieza contra el dado, mientras el punzón corresponde a la parte volada que genera el doblado sobre el borde de un dado. En el arreglo que se muestra en la Figura 2.4b, el doblado se limita a ángulos de  $90^\circ$  o menores. Se pueden diseñar dados deslizantes más complicados para ángulos mayores de  $90^\circ$ . Los dados deslizantes son más complicados y más costosos que los dados en V y se usan en trabajos de alta producción. Algunas características principales del proceso se presentan a continuación, [14-18].

**Análisis del doblado, [14].** Algunos términos importantes se identificaron en la Figura 2.3a: el espesor del material es  $t$ ; la lámina se dobla a través de un ángulo, llamado ángulo de doblado  $\alpha$ . El resultado del doblado es una lámina de metal con un ángulo incluido  $\alpha'$ , tal que  $\alpha + \alpha' = 180^\circ$ . El radio del doblado  $R$  se especifica normalmente sobre la parte interna, en lugar de

sobre el eje neutral. Este radio del doblado se determina por el radio del dado que se usa para ejecutar la operación. El doblado se hace sobre el ancho de la pieza de trabajo  $w$ .

**Tolerancia de doblado, [14].** Si el radio de doblado es pequeño con respecto al espesor del material, el metal tiende a estirarse durante el doblado. Es importante poder estimar la magnitud del estirado que ocurre, de manera que la longitud de la parte final pueda coincidir con la dimensión especificada. El problema es determinar la longitud del eje neutro antes del doblado, para tomar en cuenta el estirado de la sección doblada final. Esta longitud se llama tolerancia de doblado y se puede estimar como:

$$BA = 2\pi \frac{A}{360} (R + K_{ba}t) \quad (2.1)$$

Donde  $BA$  es la tolerancia de doblado en mm;  $A$  es el ángulo de doblado en grados;  $R$  es el radio del doblado en mm;  $t$  es el espesor del material en mm;  $K_{ba}$  es un factor para estimar el estirado. Los siguientes valores de diseño se recomiendan para  $K_{ba}$ : si  $R < 2t$ ,  $K_{ba} = 0.33$ ; y si  $R \geq 2t$ ,  $K_{ba} = 0.50$ . Estos valores de  $K_{ba}$  predicen que el estiramiento ocurre solamente si el radio de doblado es menor que el espesor de la lámina.

**Fuerza de doblado, [14].** Es la fuerza que se requiere para realizar el doblado de la lámina. Esta fuerza depende de la geometría del punzón y del dado, así como de la resistencia, espesor y ancho de la pieza que se dobla. La fuerza máxima de doblado se puede estimar por medio de la siguiente ecuación, basada en el doblado de una viga simple:

$$F = \frac{K_{bf}TSwt^2}{D} \quad (2.2)$$

Donde  $F$  es la fuerza de doblado en N;  $TS$  es la resistencia a la tensión de la lámina en MPa;  $w$  es el ancho de la parte en la dirección del eje de doblado en mm;  $t$  es el espesor del material en mm; y  $D$  es la dimensión del dado abierto en mm, como se muestra en la Figura 2.5. En mecánica, la ec. (2.2) se basa en el doblado de una viga simple, y  $K_{bf}$  es una constante que considera las diferencias encontradas en los procesos de doblado. Su valor depende del tipo de doblado; para doblado en V,  $K_{bf} = 1.33$  y para doblado de bordes,  $K_{bf} = 0.33$ .

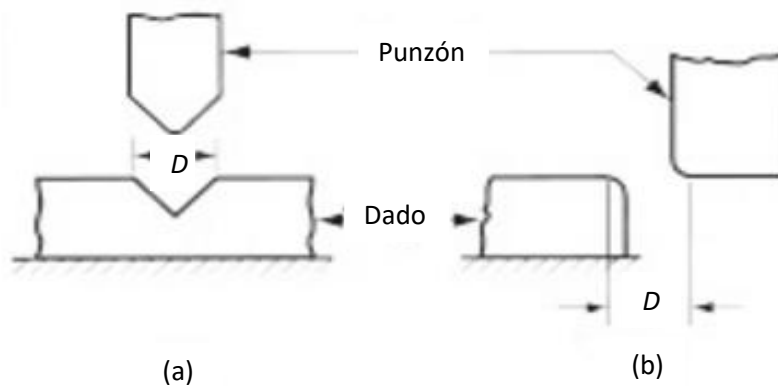


Figura 2.5.- Dimensión de la abertura del dado D: (a) dado en V, y (b) dado deslizante, [14]. ELABORACIÓN PROPIA.

**Longitud de la lámina, [14].** Para determinar la longitud inicial de la lámina antes del proceso de doblado debemos considerar la longitud de las partes rectas,  $L_1 + L_2$ , posteriormente debemos considerar la longitud de la zona doblada que está dada por (BA) como lo ilustra la Figura 2.6, con esta información podemos calcular la longitud de la lámina con la siguiente ecuación.

$$L_L = L_{PR} + L_{ZD} \quad (2.3)$$

$$L_{PR} = L_1 + L_2 \quad (2.4)$$

$$L_{ZD} = BA = 2\pi(R + K_{ba}t) \quad (2.5)$$

Donde:

$L_L$  = Longitud inicial de la lámina.

$L_{PR}$  = Son las longitudes de las partes rectas pieza.

$L_{ZD}$  = Es longitud de la zona doblada.

$w$  = Es el ancho de la lámina.

$t$  = Es el espesor de la lámina.

$R$  = Es el radio del doblado.

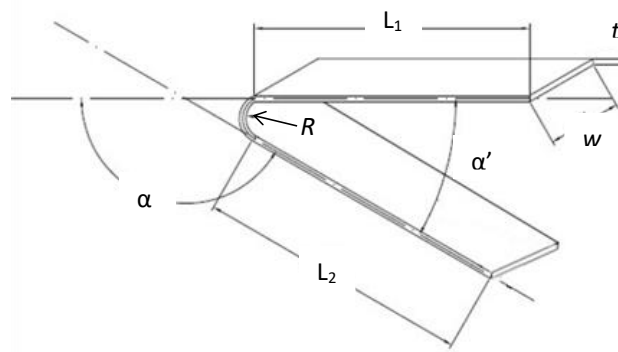


Figura 2.6.- Longitud de la lámina, [24] . ELABORACIÓN PROPIA.

Uno de los procesos de acabado del conformado de láminas es el engargolado. La etapa inicial de este proceso consiste en un doblado a  $90^\circ$ , mismo que se puede generar con base en los procesos descritos anteriormente [15-20]. Una descripción detallada del proceso de engargolado se describe a continuación.

## 2.4 Engargolado

El engargolado es un proceso de manufactura que consiste en doblar el extremo de una lámina sobre sí misma o sobre otra lámina. Este proceso de formado sirve principalmente para: aumentar la rigidez de la parte engargolada, optimizar los bordes de las estructuras, y, por último, unir los paneles interiores (*Inner*) y exteriores (*Outer*), ver Figura 2.7. Dicho proceso ha sido caso de estudio desde la segunda mitad de los 90's donde mayormente se llevaba a cabo empíricamente, [21].

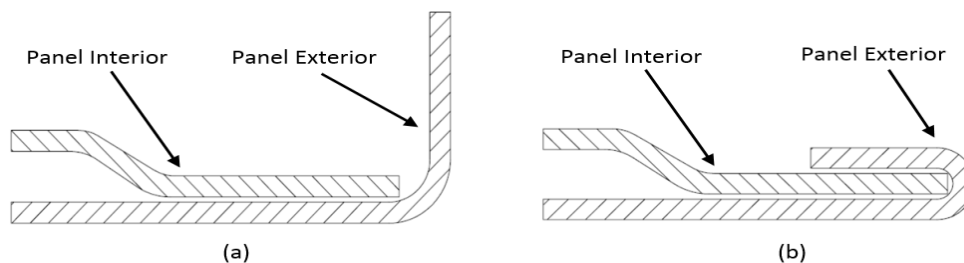


Figura 2.7.- Engargolado: a) Lámina antes del engargolado y b) Lámina engargolada. ELABORACIÓN PROPIA.



Como se puede observar en la Figura 2.8, el panel exterior debe estar doblado a  $90^\circ$  con respecto al panel interior para poder realizar el proceso de engargolado, a este paso se le llama doblado de ceja (flanging) y a la parte del panel exterior que queda deformada plásticamente se le llama ceja (*flange*).

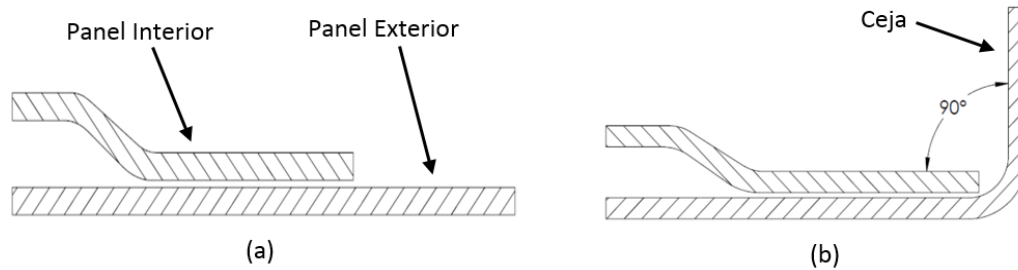


Figura 2.8.- Doblado de ceja: a) Panel Exterior antes del Doblado y b) Panel Exterior Doblado. ELABORACIÓN PROPIA.

Regularmente el engargolado se lleva a cabo en dos pasos, ver Figura 2.9. El primer paso consiste en realizar un pre-engargolado, que consiste en el doblado identificado con  $\theta$ . El ángulo de pre-engargolado ( $\theta$ ) varía desde  $0$  a  $60^\circ$ . Posteriormente, se realiza el engargolado final, el cual consiste en doblar la ceja a  $180^\circ$  con respecto a la horizontal, [21].

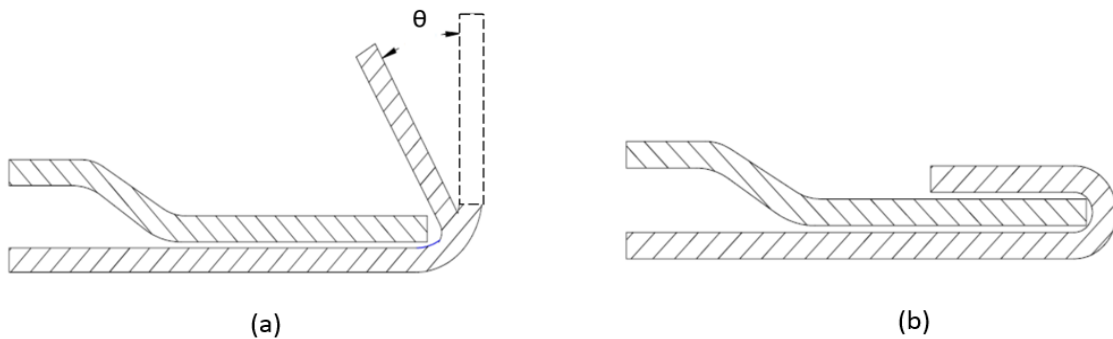


Figura 2.9.- Pasos de engargolado: a) Pre-Engargolado y b) Engargolado Final. ELABORACIÓN PROPIA.

Actualmente, existen una gran variedad de métodos para generar el proceso de engargolado. A continuación, se presentan los tres principales métodos de engargolado de lámina que se utilizan en la industria, incluyendo sus ventajas y desventajas, [21].

### a) *Die Hemming*

El método de *Die Hemming* consiste en realizar el proceso de engargolado por medio de una prensa (ver Figura 2.10) que cuenta con herramientas con movimiento relativo únicamente vertical, los cuales se diseñan específicamente para cada geometría que se desee engargolar. Lo anterior produce altos costos para la fabricación de herramientas, ya que se necesita un pisador, un dado, y 2 o 3 punzones dependiendo del número de pasos de engargolado para cada pieza. Sin embargo, si se considera la producción de una pieza única en grandes cantidades, el *Die Hemming* es una buena opción debido a su alta velocidad de producción.

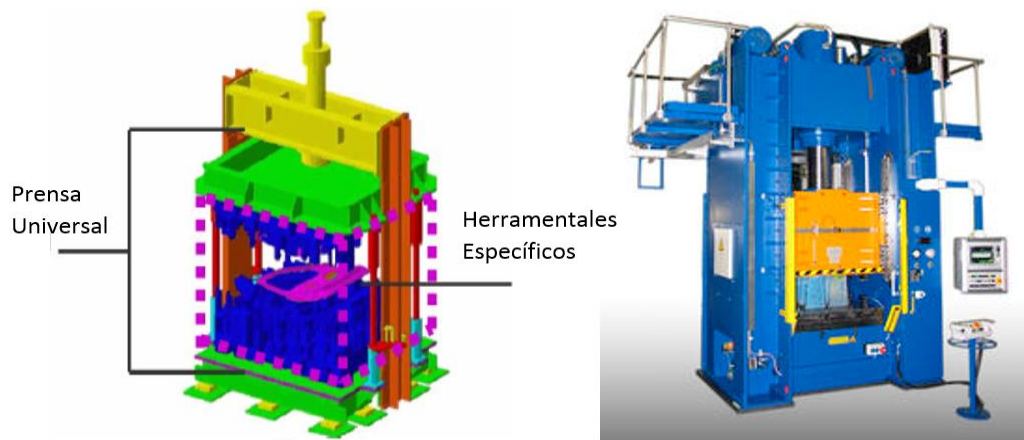


Figura 2.10.- Prensa para engargolar con el método de *Die Hemming*, [5].

En la siguiente tabla se enlistan algunas ventajas y desventajas del proceso de *Die Hemming*.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas del proceso de Engargolado por *Die Hemming*, [5] . ELABORACIÓN PROPIA.

| <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Producción en serie.</b></li><li>• <b>Bajo mantenimiento.</b></li><li>• <b>Velocidad de producción alta.</b></li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Calidad superficial del producto baja.</li><li>• Altos costos debido al cambio constante de herramientas.</li><li>• Geometrías en ocasiones limitadas.</li></ul> |

### b) *Table Hemming*

El método de *Table Hemming* es similar al método anterior. Este método también se realiza empleando una prensa, sin embargo, el movimiento del herramental puede ser horizontal, vertical o una combinación de ambos, ver Figura 2.11. En este método se incrementa el costo

de cada herramienta por lo que el proceso de engargolado se realiza típicamente en 2 pasos. Dichos pasos consisten en realizar un pre-doblado, moviendo el herramental en la dirección vertical, y el engargolado final, en el cual el herramental se mueve en forma horizontal.



Figura 2.11.- Prensas para engargolar con el método de *Table Hemming*, [5].

En la siguiente tabla se enlistan algunas ventajas y desventajas del proceso de *Table Hemming*.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas del proceso de engargolado por *Table Hemming*, [5]. ELABORACIÓN PROPIA.

| <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Producción en serie.</b></li> <li>• <b>Velocidad de producción alta.</b></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Costos de inversión elevados.</li> <li>• Altos costos por cambio de herramientas.</li> </ul> |

### c) *Roll Hemming*

El método de *Roll Hemming* emplea un rodillo conducido a lo largo de una trayectoria dada. Este método presenta una mayor flexibilidad, en comparación con los métodos anteriores, debido a que no se necesitan cambiar los herramientas para el engargolado de diferentes geometrías, [5,9,21]. La característica principal de este proceso consiste en que la herramienta para engargolar es uno o más rodillos, los cuales son guiados comúnmente por un manipulador, ver Figura 2.12. El uso de un robot industrial permite el seguimiento de múltiples trayectorias que incluyan diferentes rotaciones y traslaciones. Lo anterior facilita el engargolado de una gran

variedad de geometrías, ya sean rectas o curvas, en 2 o 3 dimensiones. Este proceso ofrece también la ventaja de variar el número de pasos a conveniencia, con el fin de mejorar la calidad del engargolado. El costo por pasada es bajo en comparación con los métodos anteriores, representando una alternativa factible para la automatización del proceso.

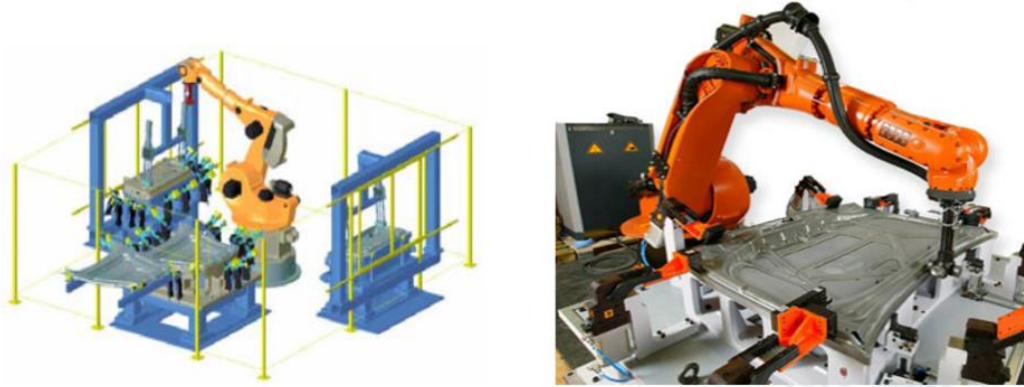


Figura 2.12.- Robots para el proceso de *Roll Hemming*, [5].

En la siguiente tabla se enlistan algunas ventajas y desventajas del proceso de *Roll Hemming*.

Tabla 2.3. Ventajas y desventajas del proceso de engargolado por *Roll Hemming*, [5]. ELABORACIÓN PROPIA.

| <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Producción en serie.</b></li> <li>• <b>Inversión inicial baja (herramientales).</b></li> <li>• <b>Flexibilidad alta.</b></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de un manipulador industrial (alto costo de inversión).</li> <li>• Velocidad de producción más baja que otros métodos.</li> <li>• Tecnología en desarrollo.</li> </ul> |

El engargolado por rodillo conducido es un proceso en desarrollo, y por lo tanto es necesario su estudio para la aplicación adecuada de este método a nivel industrial. El desarrollo del presente trabajo ayudara a entender y comprender mejor el proceso. Lo anterior debido a las ventajas que presenta este método en cuanto a la facilidad de automatización del proceso, así como a su flexibilidad para trabajar con múltiples geometrías. A continuación, se presentan los aspectos fundamentales del engargolado.

#### d) Características del engargolado

Al igual que en los otros métodos descritos, para el engargolado por rodillo es importante ser capaz de predecir la forma final y calidad de la superficie del producto. Como se mencionó previamente, el engargolado es un proceso de acabado, el cual se aplica principalmente sobre cierres de carrocerías en la industria automotriz. Debido a que la apariencia del vehículo se ve influenciada directamente por el proceso de engargolado, se deben eliminar o en su defecto minimizar los defectos que se pueden generar en el proceso. Dichos defectos pueden ser dimensionales o superficiales, [22] (ver Figura 2.13 y Figura 2.14), y tanto su magnitud como frecuencia varían dependiendo del método de engargolado que se esté utilizando. Los principales tipos de defectos dimensionales y superficiales se exponen a continuación.

- Defectos dimensionales (Figura 2.13):
  - *Roll-In*: Es la distancia negativa entre el radio del panel exterior y la ceja inicial del engargolado. Esto provoca que la longitud del panel exterior de la pieza terminada se acorte más de lo necesario. Algunos estudios se han enfocado en determinar cómo predecir la magnitud de este fenómeno [23,24], la figura 2.13 muestra de forma grafica la presencia del roll – in en una lamina engargolada.
  - *Roll-Out*: Es la distancia positiva entre el radio del panel exterior del engargolado y la ceja, el panel exterior final tiene una longitud más grande de la esperada, de igual forma este fenómeno puede observarse en la figura 2.13.

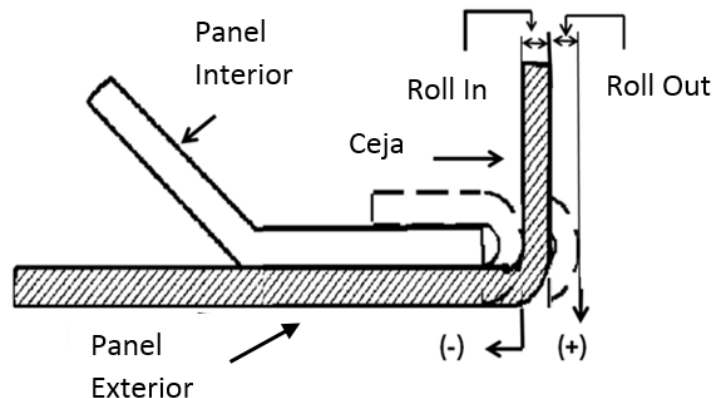


Figura 2.13.- Defectos dimensionales *Roll In* y *Roll Out*, [24]. ELABORACIÓN PROPIA.

- Defectos superficiales, [24] (Figura 2.14a-c):
  - Arrugas: La formación de arrugas se presenta como un ondulamiento en la ceja de la lámina exterior. Esta, puede ser generada por una distribución de esfuerzos longitudinales no uniforme, es un defecto superficial visible. Generalmente aparece en trayectorias cerradas y cuando el material no fluye.
  - Fracturas: Se puede definir como la culminación del proceso de deformación plástica. En general, se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un estado de esfuerzos dado. En el engargolado la fractura generalmente se presenta en el borde del panel exterior por un esfuerzo a la tensión excesivo.
  - Retroceso (*Recoil*): Es un defecto que se genera debido a la flexión en el borde engargolado. Se define como la deformación de curvatura del panel exterior que supera la base de la superficie original.
  - Estampado (*Warp*): se refiere al hundimiento o pandeo que se presenta en el panel exterior.

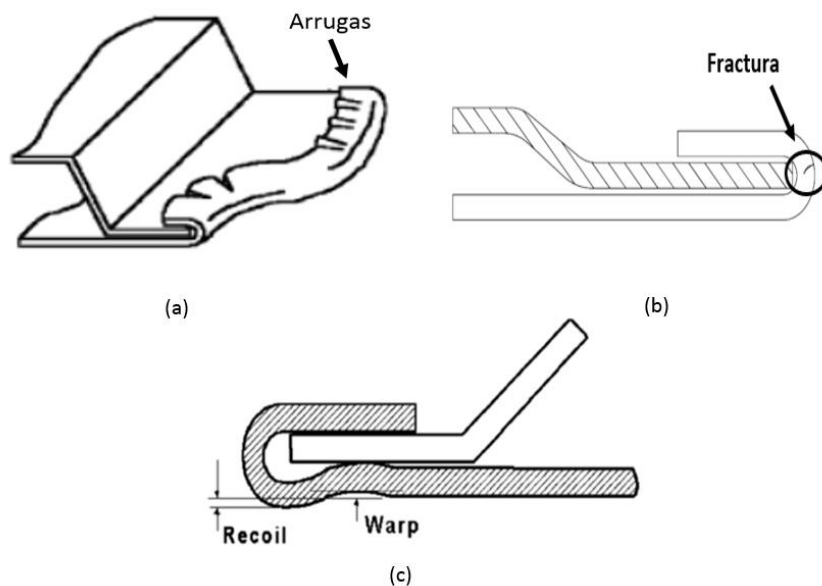




Figura 2.14.- Defectos superficiales: a) arrugas, b) Fractura y c) *Warp* y *Recoil*, [24]. ELABORACIÓN PROPIA.

El engargolado por rodillos es un método de reciente incursión en la industria en comparación con el *Die Hemming* y el *Table Hemming* por lo tanto con menos avances en el campo de la investigación. A continuación, se presenta una descripción del proceso, así como de los factores involucrados.

- **Proceso general del engargolado por rodillo**

A continuación, se describe el proceso general que se requiere llevar a cabo para el engargolado por rodillo conducido, [11-18]. Dicho proceso varía en función de los requerimientos del producto. El proceso general consiste en los siguientes pasos, [18].

Tabla 2.4. Proceso general del engargolado. ELABORACIÓN PROPIA.

| <b>Etapa I: Procesos iniciales</b>  | <b>Imagen ejemplo</b>  |
|---|--|
| <p><b>Embutido</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El panel exterior y el panel interior se someten a una deformación plástica, para proveer la forma deseada de la pieza a engargolar.</li> </ul>   |   |
| <p><b>Corte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El panel exterior y el panel interior se someten al proceso de corte. En este proceso es de suma importancia considerar los esfuerzos residuales que se generan en los paneles. Se recomienda utilizar el corte por láser o chorro de agua, debido a que estos procesos inducen menor cantidad de esfuerzos residuales.</li> </ul> |  |

## Etapa II: Engargolado

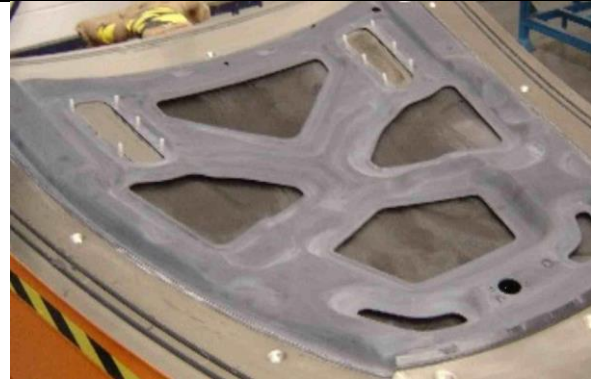
### Doblez de la ceja (flanging)

- El proceso de doblado consiste principalmente en realizar un doblado a  $90^\circ$  en el borde del panel exterior para generar la ceja. Posteriormente, dicha ceja será utilizada para unir el panel exterior con el interior por medio de una deformación plástica.



### Ensamblaje de los paneles

- El ensamble consiste en colocar el panel interior dentro del panel exterior. Este proceso puede ser realizado en forma manual o por medio de un manipulador; a su vez se puede utilizar dicho manipulador o algún dispositivo mecánico de sujeción. En algunas piezas se añade adhesivo como medio para prevenir vibraciones.



### Pre-Engargolado

- Una vez ensamblados los dos paneles, el pre-engargolado consiste en realizar un doblado a la ceja que puede variar [5] entre los  $30^\circ$  y  $60^\circ$ , a partir del doblado de la ceja.



### Engargolado final

- El engargolado final consiste en realizar el doblado de la ceja a  $90^\circ$  con respecto al doblado de la ceja, es decir a  $180^\circ$  en el panel exterior.





Como se observa en el listado anterior, existen varios procesos iniciales que se deben de tomar en cuenta en el proceso de engargolado. Estos procesos, son vitales para obtener un producto de calidad; esto debido a los esfuerzos residuales que se pueden generar en la pieza.

En las etapas de pre-engargolado y engargolado final se puede determinar la calidad del producto, así como también la fuerza de sujeción del engargolado. En diversas pruebas experimentales que se desarrollaron, se pudo observar que la fuerza de aplastado en el engargolado final influye directamente en la sujeción del panel interior. En la sección de resultados se presenta un análisis detallado de este efecto.

En la presente investigación se analiza el engargolado por el método de *Roll Hemming*, sin considerar las deformaciones previas que generan el embutido y el doblado de ceja. Esto con el fin de analizar únicamente el efecto de los factores de engargolado, tales como el diámetro del rodillo, ángulo de la ceja y el ángulo de pre-engargolado sobre el producto terminado. Dichos factores de engargolado son descritos en la siguiente sección.

A continuación, se presenta un listado de los componentes experimentales que se requieren para realizar el engargolado por rodillo. Ver Figura 2.15.

Elementos deformables:

- Panel interior (*Inner*): Es el panel sobre el cual se engargolará el panel exterior.
- Panel exterior (*Outer* y *Flange*): el panel exterior se divide en dos partes. La primera parte es el *Outer*, que se puede considerar la parte de la placa que no sufrirá deformaciones, y la ceja la cual se va a engargolar.

Sistema mecánico:

- Herramientales: Es la herramienta con la cual se deformará la ceja.

- Base del engargolado (*Hem Bed*): Es una pieza que tiene las mismas dimensiones y forma que el panel exterior en su primera parte (*Outer*) y sirve como apoyo para realizar el engargolado.
- Mesa de trabajo: Es la estructura sobre la que se monta la base del engargolado.

Sistema de sujeción: Elemento mecánico que restringe el movimiento tanto de la base del engargolado, como de los paneles interior y exterior, fijándolos a la mesa de trabajo. Aunado a los elementos deformables y el sistema mecánico se deben de considerar los siguientes factores que influyen en el proceso de engargolado, [25].

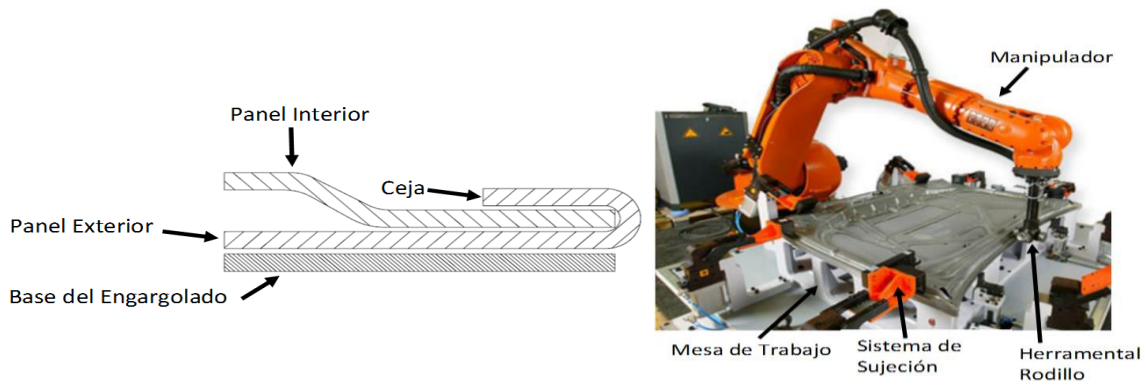


Figura 2.15.- Componentes experimentales del proceso de engargolado.

- **Factores que influyen en el proceso de engargolado:**

- El ángulo de pre-engargolado: Es un parámetro cuyo valor depende de la referencia que se utilice. Regularmente, las dos referencias más comunes son: la ceja inicial ( $\theta_1$ ) y el panel interior ( $\theta_2$ ), ver Figura 2.16a. En la literatura consultada se reportan ángulos en un rango de  $30^\circ$  a  $60^\circ$ , comúnmente tomando como referencia la ceja inicial.
- Material a engargolar: Es deseable que el material de trabajo tenga propiedades de formabilidad altas para evitar la formación de fracturas al deformar la pieza.
- Espacio entre el panel interior y el panel exterior: A este espacio se le conoce también como Gap. Este parámetro influye directamente en la rigidez del ensamble; valores

elevados de este parámetro ( $> 2 \text{ mm}$ ) generan un engargolado deficiente, en el que la sujeción del panel interior será débil, ver Figura 2.16b.

- Radio de la ceja: Se refiere al radio generado en el proceso de doblado de ceja, ver Figura 2.16c. Este parámetro es relevante debido a su influencia sobre defectos como el *Recoil* y el *Roll Out*, los cuales deterioran la calidad del producto.

- Altura de la ceja: La ceja consiste en el doblado inicial al que es sometido la lámina original y es la parte que sufre la deformación del proceso de engargolado, ver Figura 2.16d. Este parámetro afecta a la longitud del rodillo; entre mayor sea la longitud de la ceja más largo tiene que ser el rodillo.

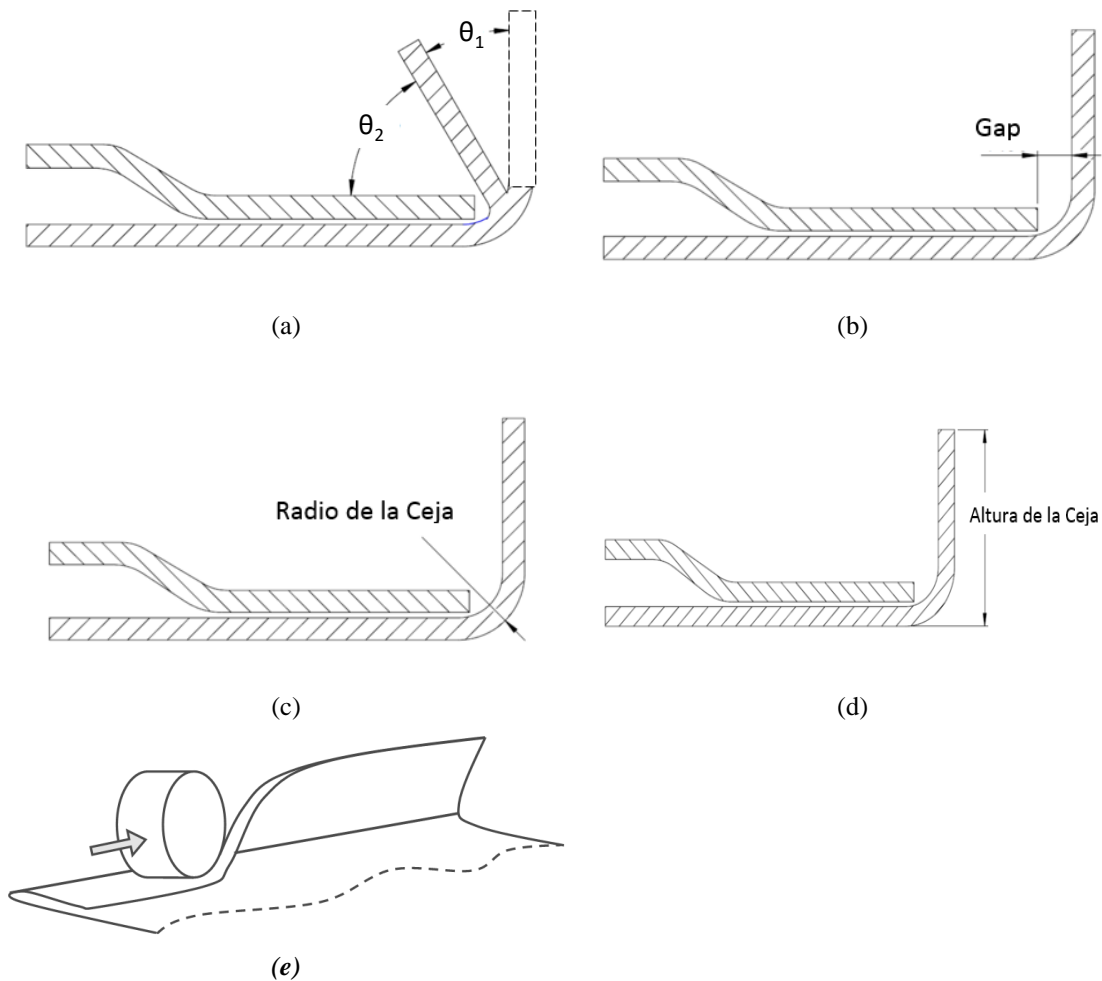


Figura 2.16.- Factores que influyen en el proceso de engargolado. ELABORACIÓN PROPIA.

Como ya se mencionó previamente el proceso de engargolado consiste en la deformación plástica del panel exterior. Los fundamentos teóricos del comportamiento plástico de los materiales se presentan a continuación.

## **2.5 Comportamiento plástico**

La plasticidad es una propiedad mecánica de los materiales que les permite sobrellevar una deformación continua y permanente sin que el material falle. La transición del estado elástico al plástico ocurre cuando el esfuerzo alcanza el punto de cedencia del material. La importancia de predecir la plasticidad en el trabajo de conformado metálico se debe a que se prevé una aproximación de los fenómenos que ocurrirán en la práctica, tales como adelgazamiento de la lámina, falla por tensión, entre otros.

El estado plástico depende de las características propias de los materiales [26-30]; entre las cuales se pueden encontrar las siguientes.

- **Anisotropía de una lámina de metal**

Debido a su estructura cristalográfica y a las características del proceso de rolado, las láminas de metal muestran generalmente una anisotropía característica de las propiedades mecánicas. El proceso de rolado induce una anisotropía caracterizada por la simetría de las propiedades mecánicas, con respecto a los tres planos ortogonales; tal comportamiento mecánico es llamado ortotrópico.

Las líneas de intersección de los planos de simetría son los ejes ortotrópicos. En el caso del rolado de láminas de metal su orientación es la siguiente: dirección de rolado *RD*, dirección transversal *TD* y dirección normal *ND*, ver Figura 2.17.

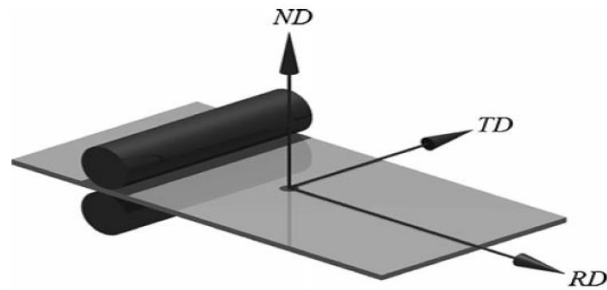


Figura 2.17.- Ejes ortotrópicos del proceso de rolado de lámina de metal, [37] . ELABORACIÓN PROPIA.

En láminas metálicas, la variación de su comportamiento plástico, con respecto a la dirección de rolado [34-36]; es representada por el parámetro Lankford o coeficiente anisotrópico (normalmente designado como parámetro  $r$ ). Este coeficiente es determinado por una prueba de tensión uniaxial sobre una probeta normalizada. (Puede leerse sobre este tema en el trabajo realizado por [37]). El coeficiente anisotrópico ( $r$ ) es definido por:

$$r = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (2.6)$$

Donde  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$  son las deformaciones unitarias en la dirección del ancho y el espesor de la probeta, ver Figura 2.18. En el caso de un material isotrópico, el coeficiente es 1. Si el coeficiente es mayor a 1, las deformaciones en el ancho serán las dominantes (la resistencia al adelgazamiento será más pronunciada). Por otro lado, para materiales que tengan un coeficiente menor a las deformaciones en el espesor serán las que predominen.

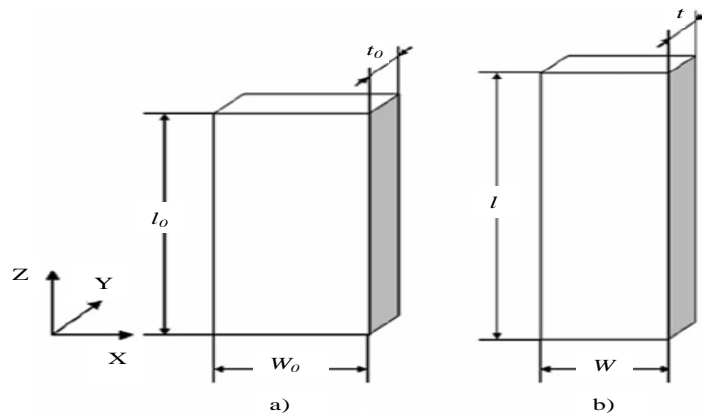


Figura 2.18.- Geometría del espécimen a) antes y b) después de la deformación, [30]. ELABORACIÓN PROPIA.

Usando la notación de la Figura 2.18 la ec. (2.6) Puede ser reescrita en la siguiente forma:

$$r = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (2.7)$$

Donde  $w_0$  y  $w$  son el ancho inicial y final respectivamente, mientras  $t_0$  y  $t$  son el espesor inicial y final de la probeta, respectivamente.

La medición de los parámetros necesarios para determinar el parámetro  $r$  se dificulta cuando la relación entre el espesor de la probeta y su ancho es menor al 10 %. Por lo tanto, la relación anterior es remplazada por una que implique cantidades que tengan el mismo orden de magnitud, por ejemplo, el largo y el ancho del espécimen, tomando en cuenta la condición de volumen constante, ec. (2.8):

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (2.8)$$

Combinando las ecuaciones (2.6) y (2.8) se obtiene la siguiente relación:

$$r = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z + \varepsilon_y} \quad (2.9)$$

Por consiguiente, la ec. (2.7) Puede reescribirse como:

$$r = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{l_0 \cdot w_0}{l \cdot w}} \quad (2.10)$$

Donde  $l_0$  y  $l$  son la longitud inicial y final de la probeta.

Esta relación es usada en la práctica para la evaluación de los coeficientes anisotrópicos. En la literatura se reporta que  $r$  depende de las direcciones sobre el plano [39]. Si el espécimen a tensión es cortado teniendo su eje longitudinal a un ángulo  $\theta$  con respecto a la dirección de rolado, el coeficiente  $r_\theta$  es obtenido, ver Figura 2.19, es decir, el subíndice

especifica el ángulo entre el eje del espécimen y la dirección de rolado. Para pruebas experimentales, normalmente se utilizan probetas cortadas a  $r_0$ ,  $r_{45}$  y  $r_{90}$ .

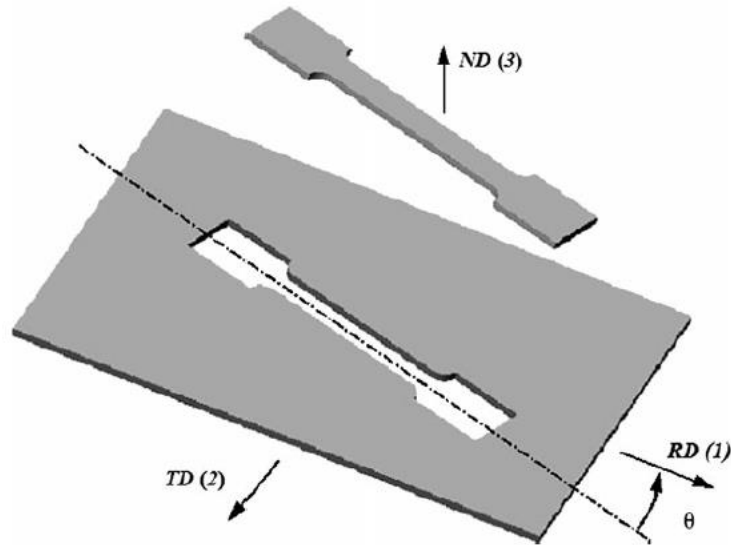


Figura 2.19.- Probeta para tensión con un ángulo de rolado  $\theta$ , donde la dirección de rolado es RD, la dirección transversal es TD y la dirección normal es ND [30]. ELABORACIÓN PROPIA.

Para lograr una caracterización mecánica completa del comportamiento plástico de los materiales se requiere, adicional al parámetro  $r$ , otros parámetros tales como  $k$  y  $n$ . Estos parámetros se obtienen directamente de la curva esfuerzo deformación real del material. A continuación, se describe la estimación de dichos parámetros.

- **Curva esfuerzo-deformación verdadera y los parámetros  $n$  y  $k$ .**

Para realizar el análisis de un proceso de engargolado, es necesario estimar los esfuerzos originados por la deformación plástica de la ceja. Por lo anterior, el diagrama esfuerzo-deformación de ingeniería no es útil para la caracterización del material y por lo tanto se utiliza el diagrama esfuerzo-deformación verdadera, ver Figura 2.20. El diagrama esfuerzo-deformación de ingeniería (o nominales) no considera la reducción de sección transversal que sufren las probetas, sobre todo al alcanzar el esfuerzo último. Por otro lado, el diagrama esfuerzo-deformación verdadera calcula el esfuerzo existente durante toda la prueba, considerando el cambio instantáneo de la sección transversal de la probeta.

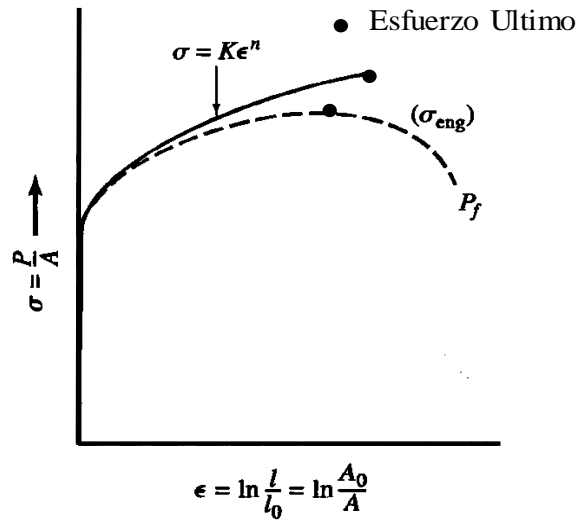


Figura 2.20.- Comparación de diagramas esfuerzo-deformación verdadera (línea continua) y de ingeniería (línea punteada), obtenidos de la prueba de tensión de la lámina metálica, [31].

La deformación que sufre el material durante el ensayo de tensión uniaxial, en base al diagrama de esfuerzo deformación ingenieril, se calcula con la siguiente relación:

$$\varepsilon_{ing} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{l_1}{l_0} - 1, \quad (2.11)$$

Y en el diagrama esfuerzo contra deformación real o verdadero se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{real} = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln(\varepsilon_{ing} + 1). \quad (2.12)$$

Otro de los parámetros importantes que se pueden obtener en el ensayo de tensión uniaxial es el esfuerzo. Tanto el diagrama de ingeniería como el verdadero, tiene una fase elástica donde se cumple la ley de Hooke ( $\varepsilon_{ing} = \varepsilon_{real}$ ), ver ec. (2.13).

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon \quad (2.13)$$

Se debe considerar que el esfuerzo de tensión último ( $S_{ut}$ ) y el de cedencia ( $S_y$ ), reportados comúnmente en la literatura, son los de ingeniería y no los verdaderos. En la práctica, ambos esfuerzos son mayores en la curva verdadera. Como se observa en la Figura 2.20, el valor



máximo del esfuerzo real o último de tensión corresponde a la ruptura del espécimen mientras que es esfuerzo último en ingeniería es el valor mayor (el más alto) de la curva de ingeniería.

En función de determinar los parámetros  $n$  y  $k$  a partir de los valores reportados en la literatura, las ecuaciones (2.14) y (2.15) establecen la relación entre ambos diagramas (verdadera y de ingeniería).

$$\sigma_{real} = \sigma_{ing} (\varepsilon_{ing} + 1) \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(\varepsilon_{ing} + 1) \quad (2.15)$$

Las relaciones anteriores son útiles antes de la estricción; después de esta, se debe considerar la reducción del área. Una aproximación a la curva esfuerzo-deformación verdadera en su parte plástica es la siguiente:

$$\sigma(\varepsilon_{real}) = K \varepsilon_{real}^n \quad (2.16)$$

En lo sucesivo, se considerará  $\varepsilon_{real} = \varepsilon$  para simplificar. En una gráfica log-log, esta curva toma la forma de una línea, como puede verse en la Figura 2.21, ya que:

$$\log(\sigma) = \log(K) + n \log(\varepsilon) \quad (2.17)$$

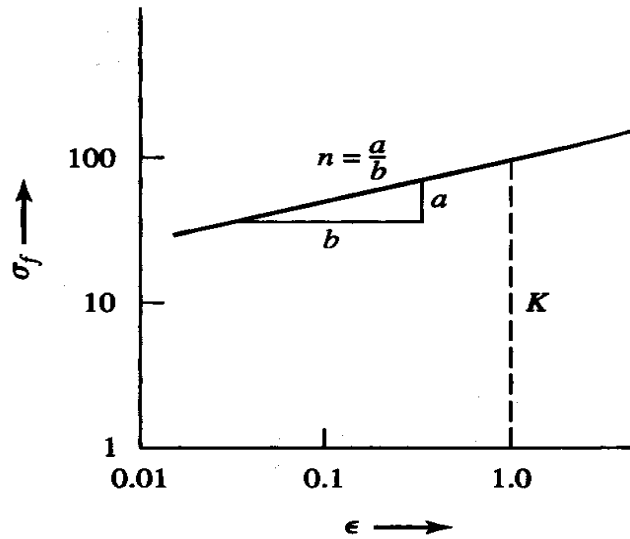


Figura 2.21.- Gráfica log-log de fase plástica del diagrama esfuerzo-deformación real, [31].

En donde  $n$  es el *exponente de endurecimiento por deformación* y  $K$  es el *coeficiente de esfuerzo*, siendo ambos constantes. El valor de  $K$  se obtiene de evaluar el esfuerzo verdadero cuando  $\varepsilon=1$  y es entonces que  $\sigma_\varepsilon = K$ . Por lo tanto,  $K$  es el esfuerzo verdadero para una deformación verdadera  $\varepsilon = 1$ .

El parámetro  $n$  se conoce también como *exponente de endurecimiento por deformación* y es igual a la relación entre el parámetro  $a$  y  $b$  de la gráfica log-log como se muestra en la Figura 2.21, este parámetro puede tomar valores entre  $n=0$  (sólido perfectamente plástico) y  $n=1$  (sólido elástico). Para la mayoría de los metales,  $n$  tiene valores entre 0.10 y 0.50.

Para valores de  $n$  cercanos a 0.5, el material presenta un mayor endurecimiento por deformación. Una vez obtenidos todos los parámetros de interés del material ( $r$ ,  $k$  y  $n$ ), se tiene una completa caracterización del mismo, tanto en la región elástica como en la plástica. Esta caracterización sirve de base para la predicción del comportamiento de los materiales en diversos procesos de manufactura. Adicionalmente, los parámetros obtenidos son utilizados en el modelado de los materiales para su simulación por el Método de Elemento Finito (MEF). Una descripción general de los conceptos fundamentales del MEF se presenta en la siguiente sección.

## **2.6 Fundamentos del Método de Elemento Finito (MEF).**

Como se mencionó previamente, el alto costo de inversión que conllevan las pruebas experimentales impulsaron el desarrollo de nuevas alternativas, como los estudios numéricos, incluyendo el Método de Elemento Finito (MEF), para el análisis y optimización de diversos procesos de manufactura [32,33].

El MEF se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en la solución de una extensa gama de problemas en ingeniería. El MEF es una técnica computacional de análisis numérico utilizada para obtener aproximaciones de solución a problemas de ingeniería. La implementación básica del MEF es la solución de problemas matemáticos en los cuales una o más variables dependientes deben satisfacer una ecuación diferencial dentro de un dominio conocido de variables independientes y condiciones de frontera.

En este método de análisis, MEF, una región compleja de un medio continuo se discretiza (proceso de mallado) en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades elásticas, plásticas y las relaciones que gobiernan el comportamiento del material son consideradas en los elementos finitos. Cada uno de los elementos representa una ecuación y se une con los demás a través de nodos, la interacción de todos los elementos determina entonces el comportamiento del sistema.

Diferentes métodos de solución pueden ser empleados en el método de elemento finito dependiendo de la naturaleza del problema, es decir, si el sistema a estudiar se considera estático, cuasi estático o dinámico.

En el presente trabajo se presenta el Método de Elemento Finito (MEF) del proceso de engargolado [5]. En general un sistema mecánico, como el que describe el proceso de engargolado, se representa a través de la ecuación de movimiento en un tiempo determinado como:

$$Ma + Cv + Ku = F_{ext} \quad (2.18)$$

Dónde:

$M$  → Es la matriz de masas

$a$  → Es el vector de aceleraciones nodales

$C$  → Es la matriz de amortiguamiento

$v$  → Es el vector de velocidades nodales

$K$  → Es la matriz de rigidez

$u$  → Es el vector de desplazamientos nodales

$F_{ext}$  → Es el vector de fuerzas externas aplicadas al sistema

La ecuación anterior permite resolver sistemas mecánicos que se consideren dinámicos. Por otro lado, en un problema estático los parámetros involucrados no son dependientes del tiempo, por lo tanto, la ec. (2.18) se reduce a:

$$Ku = F_{ext} \quad (2.19)$$

Finalmente, un sistema dinámico puede ser considerado cuasi estatico cuando la variación de la carga dinámica aplicada es despreciable, siendo considerada constante. En el caso del conformado de metales, como el engargolado, se presentan comportamientos no lineales debido a que el material cambia sus propiedades conforme sufre deformaciones. Por lo anterior, el engargolado es un proceso dinámico.

En el método de elemento finito existen dos modos de solucionar los sistemas matemáticos propuestos, el método implícito y el explícito. El análisis implícito resuelve la ec. (2.19) a través del método de Newton-Raphson. Uno de los inconvenientes de este método es que cuando el sistema presenta no linealidades, puede requerir un elevado número de iteraciones para llegar a la solución.

El análisis explícito resuelve la ec. (2.18) a través del método de diferencias centrales, utilizando los datos anteriores inmediatos para calcular el valor presente. Este método tiene la ventaja de no requerir iteraciones. En general se puede considerar que un análisis implícito es

adecuado para resolver sistemas estaticos, mientras que el análisis explícito se utiliza en sistemas dinámicos. Cuando un sistema es considerado como cuasi estatico, ambos tipos de análisis funcionan.

Existen diferentes tipos de elementos y formas disponibles en los paquetes comerciales de simulación por elemento finito. La clasificación de los elementos se da por sus dimensiones, grados de libertad, números de nodos y puntos de integración, ver Figura 2.22.

Para el desarrollo del presente trabajo se implementó el software comercial ANSYS 15.0® LS-DYNA®. LS-DYNA® cuenta con 9 tipos de elementos, sin embargo, para la simulación del proceso de engargolado se utilizaron elementos tipo SÓLIDO y SHELL [34-41]. Por lo anterior, en este documento se incluye únicamente la descripción de estos dos elementos.

A continuación, se presenta la lista de elementos disponibles en ANSYS 15.0® LS-DYNA®.

- *LINK 160*
- *BEAM 161*
- *PLANE 162*
- *SHELL 163*
- *SOLID 164*
- *COMBI 165*
- *MASS 166*
- *LINK 167*
- *SOLID 168*

De los elementos mencionados, todos pueden implementarse en un análisis 3D excepto el elemento PLANE 162. Por otro lado, a excepción del elemento MASS o LINK, todos tienen integración reducida predeterminadamente (por default). La integración reducida se refiere a que el número de puntos para la integración numérica es menor a la necesaria para una integración exacta. Los elementos SOLID y SHELL tienen por default únicamente un punto de integración, sin embargo, se puede acceder a la integración completa a través de las opciones del software. Los elementos explícitos, como SOLID y SHELL, con funciones de

desplazamiento lineales y un punto de integración son los más adecuados para aplicaciones no lineales con grandes deformaciones y falla en el material.

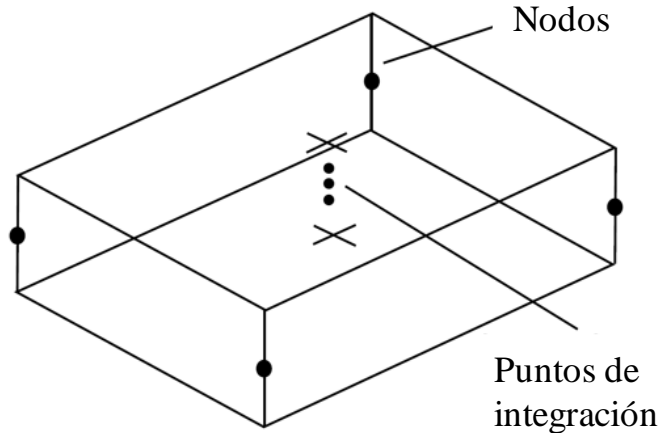


Figura 2.22.- Nodos y puntos de integración, [33]. ELABORACIÓN PROPIA.

Los elementos sólidos son utilizados para definir el volumen de un modelo. La deformación de este elemento se describe a través de los desplazamientos de sus nodos. En ANSYS 15.0® LS-DYNA® existen dos tipos de elementos sólidos, SOLID 164 y SOLID 168.

El elemento SOLID 164 es un elemento de 8 nodos con 9 grados de libertad (traslaciones, velocidades y aceleraciones en las direcciones nodales  $x$ ,  $y$  y  $z$ ), ver Figura 2.23. Este elemento es de uso exclusivo en análisis dinámicos explícitos. Posee diferentes configuraciones tales como bloque, cuña, pirámide y tetraedro. Para el MEF se deben evitar las configuraciones de cuña, pirámide y tetraedros debido a que son demasiado rígidos a flexión y generan problemas en ciertos casos. De ser necesario el uso de tetraedros se recomienda utilizar el elemento SOLID 168, [42].

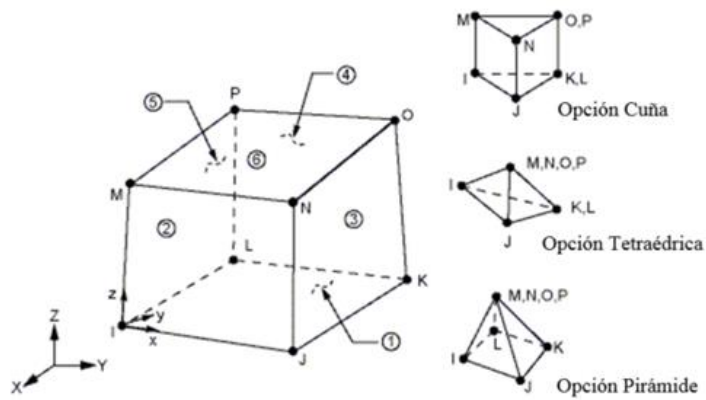


Figura 2.23.- Elemento Solid 164, [42]. ELABORACIÓN PROPIA.

Una gran cantidad de modelos de material pueden ser usados con elementos sólidos, entre ellos el elástico isotrópico, el cual fue utilizado para modelar los rodillos en el proceso de engargolado.

A diferencia de los elementos sólidos, un elemento Shell no puede ser comprimido en la dirección de su espesor; el espesor solo puede variar al deformar axialmente el plano medio de estos elementos. El elemento SHELL 163 de ANSYS 15.0® LS-DYNA® tiene 4 nodos con capacidad de flexión, permite cargas en el plano y normales, cada nodo tiene 12 grados de libertad (traslaciones, aceleraciones, velocidades y rotaciones en las direcciones nodales  $x$ ,  $y$  y  $z$ ), ver Figura 2.24.

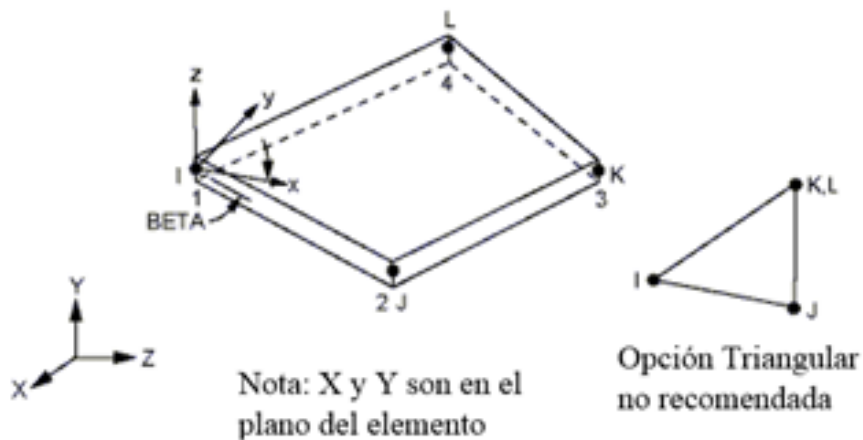


Figura 2.24.- Elemento Shell 163, [42]. ELABORACIÓN PROPIA.

Este elemento cuenta con 12 diferentes formulaciones, entre las cuales se encuentra la Integración completa de Belytschko-Tsay [42], la cual se implementó en este trabajo para el MEF. Esta formulación tiene 4 puntos de integración en el plano y aunque tiene mayor costo computacional que el resto de las formulaciones no necesita control de Hourglass (entendiendo como Hourglass a la deformación anormal del elemento bajo condiciones de carga), ver Figura 2.25.

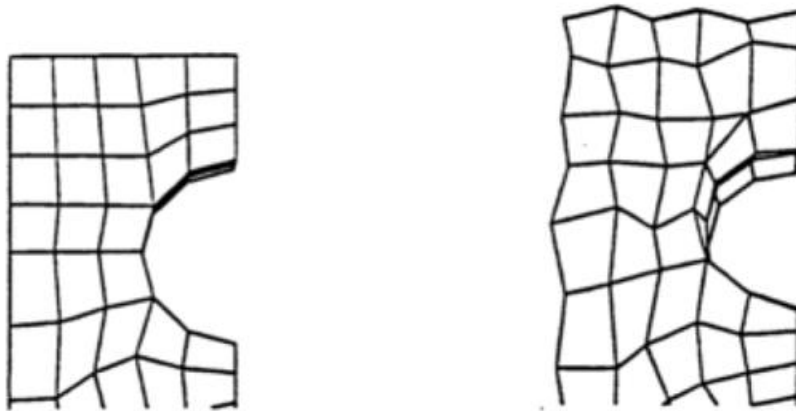


Figura 2.25.- Hourglass, [42]. ELABORACIÓN PROPIA.

Se requieren típicamente 2 puntos de integración en el espesor del elemento SHELL para comportamiento elástico y se recomiendan 3 o más para comportamiento plástico. Se debe tener en cuenta que el esfuerzo de salida se da en el punto de integración más exterior y no en la superficie. Para materiales elásticos los esfuerzos pueden ser extrapolados a las superficies. Para materiales no lineales es muy común utilizar 4 o 5 puntos de integración en el espesor para reducir el error en la extrapolación.

Para la simulación del proceso de engargolado, se utilizó el elemento SHELL 163 con el modelo de Barlat [34] de plasticidad anisotrópica para definir la lámina tanto exterior como la interior, así como la base de engargolado. Por otro lado, el elemento SOLID 164 se utilizó para definir los rodillos (con material elástico isotrópico). La definición completa de ambos elementos utilizados en este trabajo, SOLID 164 y SHELL 163, se detalla en [43].



Comúnmente, el Método de Elemento Finito se utiliza para calcular desplazamientos y, posteriormente los esfuerzos y deformaciones que sufre el sistema analizado. En este trabajo, se implementó el MEF para la simulación del proceso de engargolado por rodillo conducido. El resultado de interés de dicho análisis consiste principalmente en la deformación de la lámina, con la cual se determinaron los parámetros de calidad del proceso: *Roll In*, *Roll Out* y la formación de arrugas.

## CAPÍTULO III DESARROLLO

En el presente capítulo se presenta la descripción de la metodología implementada para el desarrollo del presente trabajo. La Figura 3.1 muestra la metodología propuesta para el análisis por elemento finito y validación experimental del proceso de engargolado.

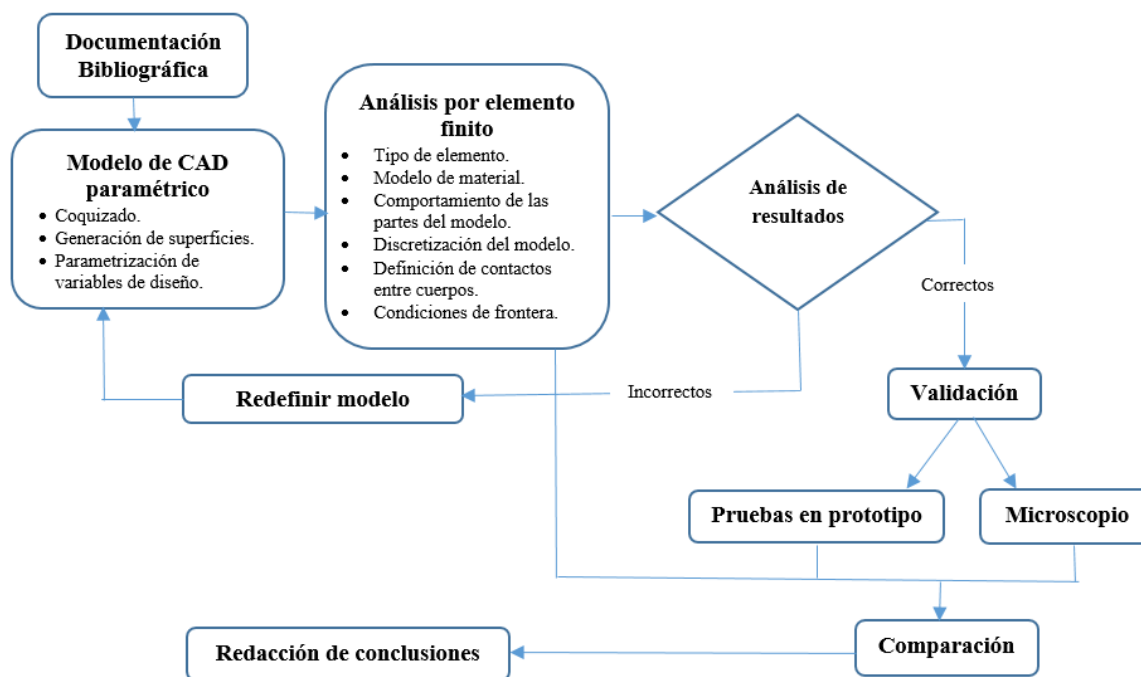


Figura 3.1.- Etapas de la metodología implementada. ELABORACIÓN PROPIA.

A continuación, se presenta una descripción detallada de cada una de las etapas de la metodología presentada en la Figura 3.1.

### 3.1 Descripción de la metodología implementada

La metodología implementada en el presente trabajo de investigación consiste en las siguientes etapas:

- **Documentación bibliográfica.**

Consistió en la consulta de distintas fuentes de información donde se recuperaron documentos en distintos formatos tomados como sustento para el desarrollo del trabajo.

- **Modelo de CAD paramétrico**

En esta etapa se estableció la geometría a analizar, para lograrlo se requirió modelar dicha geometría (pieza), partiendo de un croquizado 2D, que posteriormente fue requerido para generar las superficies deseadas. Con la geometría generada se prosiguió a identificar y parametrizar las variables de diseño consideradas para realizar el proceso de engargolado.

- **Análisis por Elemento Finito**

Se realizó el análisis por el método de elemento finito, dicho método parte del modelo de CAD paramétrico generado en la etapa anterior. Para realizar el análisis, fue necesario asignar parámetros como el tipo de elemento a utilizar, el modelo de material recomendado para el material utilizado, el comportamiento de las partes que intervienen en la simulación, ya sean rígidas (herramientales) o deformables (lámina). Definidos los parámetros anteriores, se prosiguió con la discretización del modelo analizado, generando los contactos entre todas las partes involucradas en el modelo de elemento finito; adicionalmente, se aplicaron las condiciones de frontera necesarias y las trayectorias de las herramientas utilizadas. Finalmente, se resolvió el modelo de Elemento Finito y se analizaron los resultados iniciales. Con base en los resultados, se puede determinar si es factible continuar con la metodología (resultados correctos) o se procede a redefinir el modelo (resultados incorrectos).

- **Validación.**

Consistió en la realización de pruebas experimentales en un prototipo de máquina para engargolar donde se doblaron 72 probetas, las cuales posteriormente fueron analizadas utilizando un microscopio digital VHX-5000.

- **Comparación.**

Esta etapa, consistió en la comparación de los resultados de las variables de salida (*Roll In*, *Roll Out* y *Arruga*) obtenidos de la simulación y las pruebas experimentales.

- **Redacción de conclusiones.**

En la etapa final se realizó resumen de los hallazgos más importantes del proyecto, las recomendaciones para proyectos futuros y el cumplimiento de los objetivos iniciales.

### **3.2 Modelo de CAD paramétrico.**

Para el desarrollo de la simulación del proceso de engargolado fue necesario modelar las siguientes geometrías:

- **Panel interior (*Inner*):** Es el panel sobre el cual se engargolará el panel exterior.
- **Panel exterior (*Outer y Flange*):** el panel exterior se divide en dos partes. La primera parte es el *Outer*, que se puede considerar la parte de la placa que no sufrirá deformaciones, y la ceja (*Flange*) la cual se va a engargolar.
- **Base del engargolado (*Hem Bed*):** Es una pieza que tiene las mismas dimensiones y forma que el panel exterior (*Outer*) y sirve como apoyo para realizar el engargolado.
- **Herramientales:** Es la herramienta con la cual se deformará la ceja.

Para generar el modelo geométrico, se eligió el software de diseño con el que cuenta la interfaz de WORKBENCH®, DesignModeler. Esto con el fin de evitar problemas con la importación del modelo desde otro paquete de CAD comercial, como podría ser, SOLIDWORKS® o CATIA®. El software de diseño DesignModeler cuenta con herramientas de dibujo para generar las partes necesarias en el proceso deseado. Adicionalmente, cuenta con la posibilidad de parametrizar el modelo. La parametrización es un método donde la geometría es controlada por parámetros que definen su diseño en tamaño y forma. Normalmente estos parámetros son variables como, alto, ancho, profundidad, etc. La característica principal del

diseño paramétrico es que al modificar alguno de los parámetros, el diseño cambia para reflejar dicha modificación.

El procedimiento para generar los modelos de los elementos requeridos en el proceso de engargolado, utilizando el DesignModeler es el siguiente:

### 3.2.1. Probeta

Dentro del software ANSYS 15.0® en la parte izquierda se encuentra la ventana “Toolbox” Figura 3.2 donde hay una lista de opciones para diferentes proyectos, de dicha lista se debe elegir la opción *Geometría*, una vez seleccionado aparecerá la siguiente ventana del lado derecho, Figura 3.2.

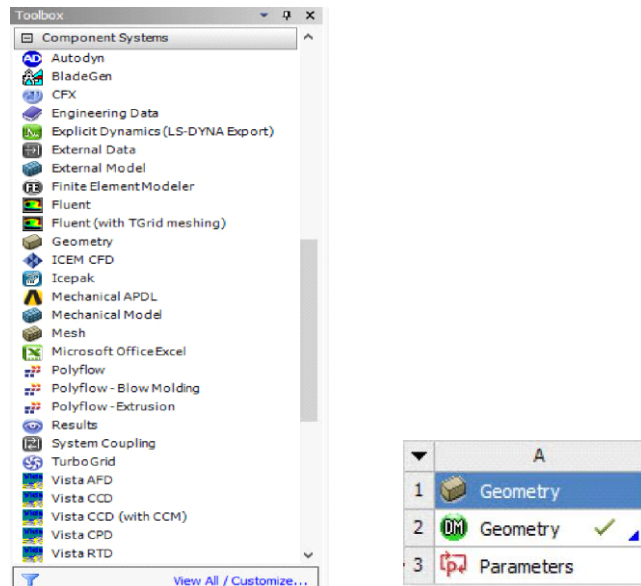


Figura 3.2.- Ventana Toolbox, pestaña geometría.

Posteriormente en la ventana de *Tree Outline* en la pestaña de *modeling* se elige el plano YZ Figura 3.3 para comenzar a crear el perfil central de la probeta, una vez seleccionado se le da clic al icono de *new sketch* una vez abierta la pestaña de *sketching toolboxes* en la opción de *draw* se da clic en *line* Figura 3.4 para crear dos líneas perpendiculares ambas líneas se les da una separación de 0.28 mm de su eje paralelo respectivamente que equivale a la mitad del espesor de la lámina.

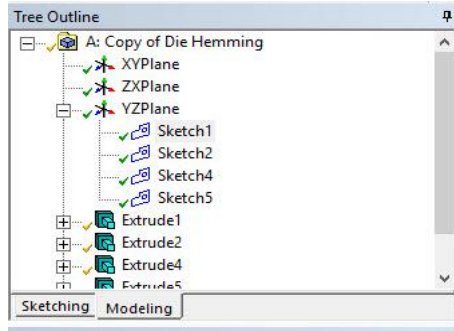


Figura 3.3.- Pestaña de *modeling*.

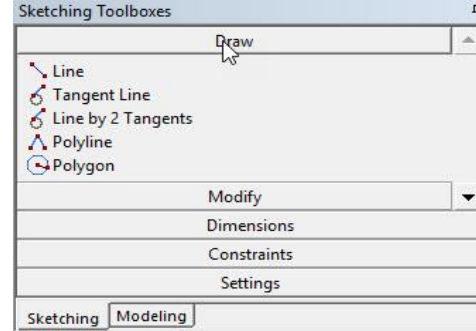



Figura 3.4.- Pestaña *Sketching*.

Para finalizar la creación del perfil central de la probeta en la opción de *modify* se selecciona la opción de *fillet* y se coloca un radio de 0.95 mm Figura 3.5 en la intersección de ambas líneas el radio se obtuvo del promedio de todas las muestras experimentales medidas antes de someterlas al engargolado una vez obtenido el perfil central se procede a darle profundidad a la pieza muestra con la opción de *extrude* .

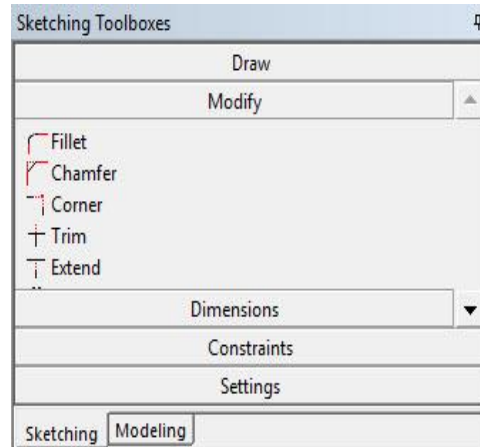


Figura 3.5.- Opción *fillet* en pestaña de *modify*.

En el plano YZ se genera en un nuevo sketch la lámina interior colocándola paralelo al eje z con una separación de 0.28 mm contemplando la mitad de espesor de la probeta más nuevamente 0.28 mm de la otra mitad de la lámina interior.

### 3.2.2. Creación de herramienta *Die Hemming*

En el plano YZ se generan dos *sketch* nuevos en donde se coloca las herramientas que harán el doblé, la primera herramienta tendrá un ángulo de  $60^\circ$  con respecto al eje z que se encargará del pre-engargolado y deberá de estar en una posición más alta que la altura de la probeta, la segunda herramienta estará paralelo al plano z y se encargará del engargolado final para ambas herramientas, se debe generar una línea recta de 15 mm y utilizar la opción de extrude para dar la respectiva profundidad de 15 mm.

La configuración final de la geometría será el conjunto compuesto por la probeta con la lámina interior y las dos herramientas de doblé Figura 3.6.

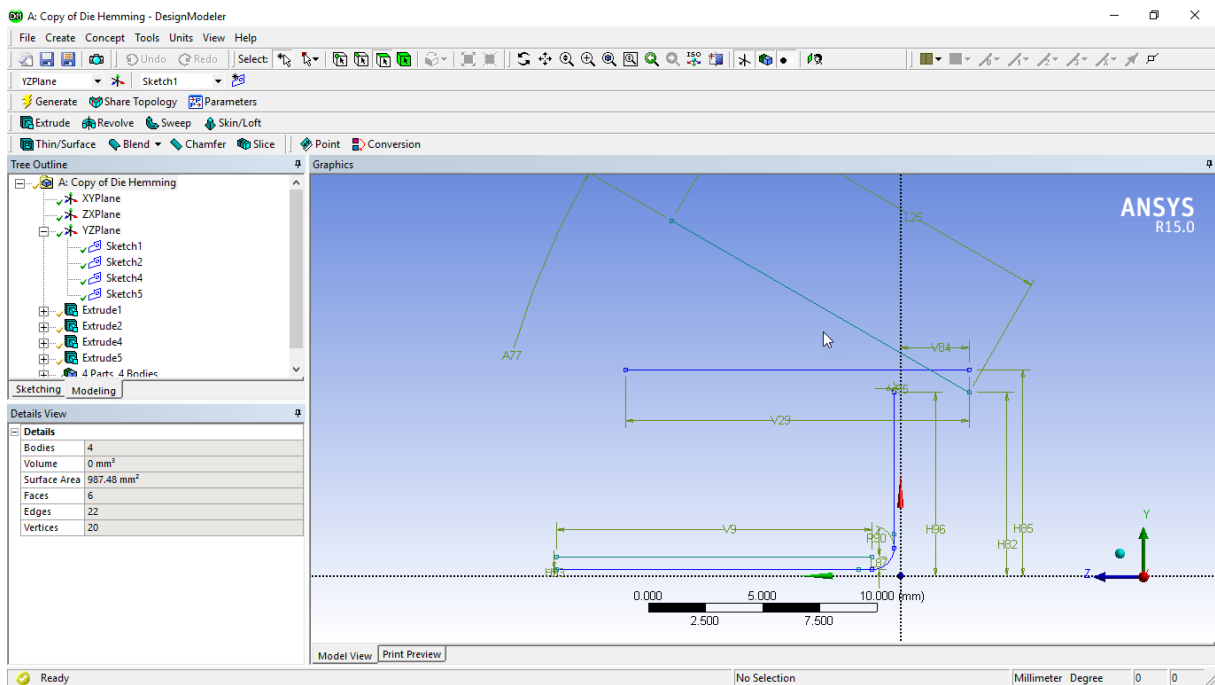


Figura 3.6.- Configuración de geometría. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.2.3 Creación de herramienta *Table Hemming*

En el plano YZ se generan dos *sketches* nuevos en donde se coloca las herramientas que harán el doblé, la primera herramienta tendrá un ángulo de  $60^\circ$  con respecto al eje z que se encargará del pre-engargolado y su vértice inferior deberá de estar en el eje z, la segunda

herramienta estará paralelo al plano z y se encargará del engargolado final para ambas herramientas se debe de generar una línea recta de 15 mm y utilizar la opción de extrude para darle su respectiva profundidad de 15 mm.

La configuración final de la geometría será el conjunto compuesto por la probeta con la lámina interior y las dos herramientas de doblez Figura 3.7.

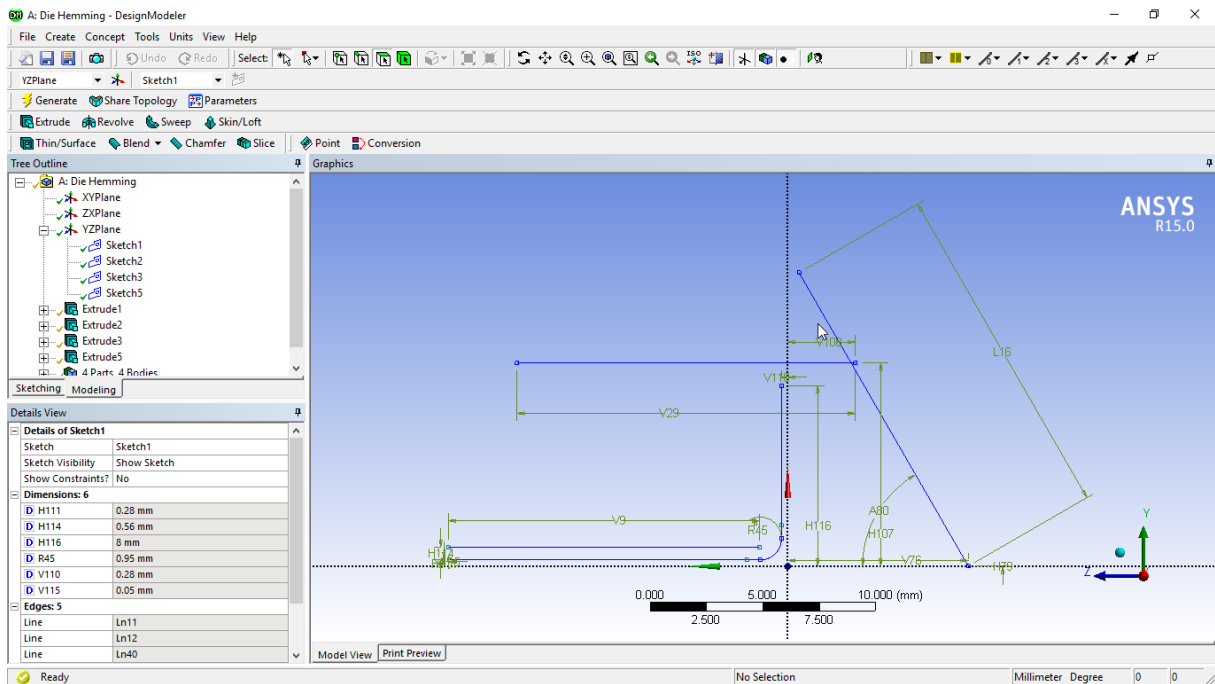


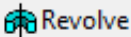
Figura 3.7.- Configuración de geometría. ELABORACIÓN PROPIA.


### 3.2.4. Creación de herramienta *Roll Hemming*

En el plano YZ se generan dos *sketches* nuevos en donde se colocan las herramientas que serán encargadas de generar el doblez.

Para poder generar la primera herramienta que se encargara del pre-engargolado se requiere trazar una línea recta de 15 mm a un ángulo de  $60^\circ$  con respecto al eje z después se trazara otra línea recta paralela a la anterior pero con una separación de 30 mm a continuación



clic en la operación *revolve*  señalando la primera línea creada para que sea la superficie externa del rodillo y la segunda servirá como su eje de revolución.

Para la segunda herramienta que se encargara del engargolado final se requiere trazar una línea recta de 15 mm paralela al eje z después se trazara otra línea recta paralela a la anterior pero con una separación de 30 mm, a continuación clic en la operación *revolve*  se señala la primera línea creada para que sea la superficie externa del rodillo y la segunda servirá como su eje de revolución.

Para finalizar el correcto posicionamiento de las herramientas se requiere desplazarlas fuera de la probeta de trabajo, para lo anterior se localiza la opción *create* y se posiciona el cursor del mouse en donde dice *Body transformation* allí se encontrará la herramienta *Translate* Figura 3.8.

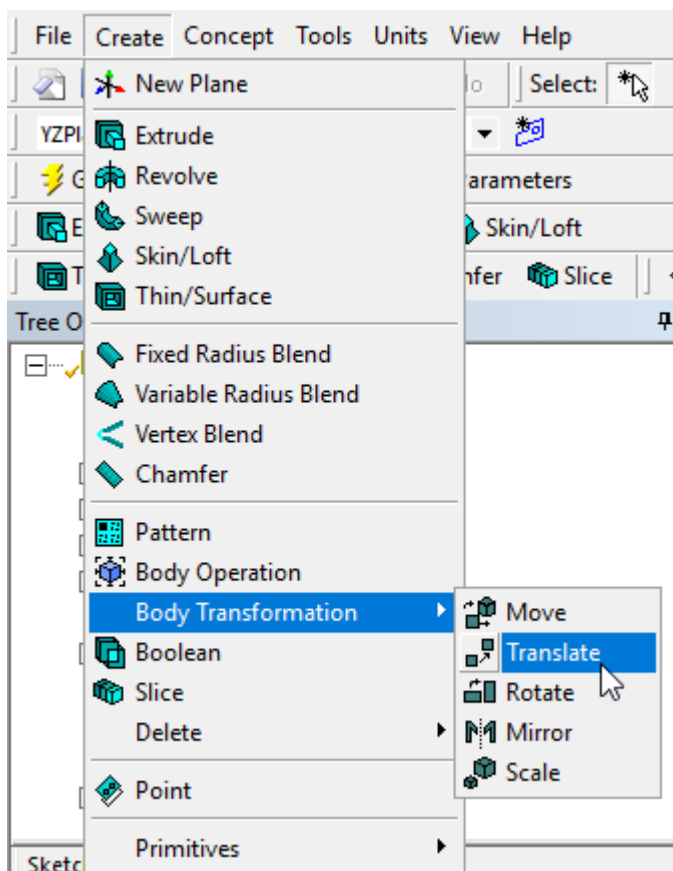


Figura 3.8.- Herramienta *translate* en *body transformation*.

En la ventana de *Translate* Figura 3.9 se señala la herramienta que se pretende mover y le daremos un valor de -22.5 mm.

| Details View                           |             |
|--|-------------|
| Details of Translate1                  |             |
| Translate                              | Translate1  |
| Preserve Bodies?                       | No          |
| Bodies                                 | 1           |
| Direction Definition                   | Coordinates |
| <input type="checkbox"/> FD3, X Offset | -22.5 mm    |
| <input type="checkbox"/> FD4, Y Offset | 0 mm        |
| <input type="checkbox"/> FD5, Z Offset | 0 mm        |

Figura 3.9.- Ventana de *translate*.

La configuración final de la geometría será el conjunto compuesto por la probeta con la lámina interior y las dos herramientas de doblez Figura 3.10.

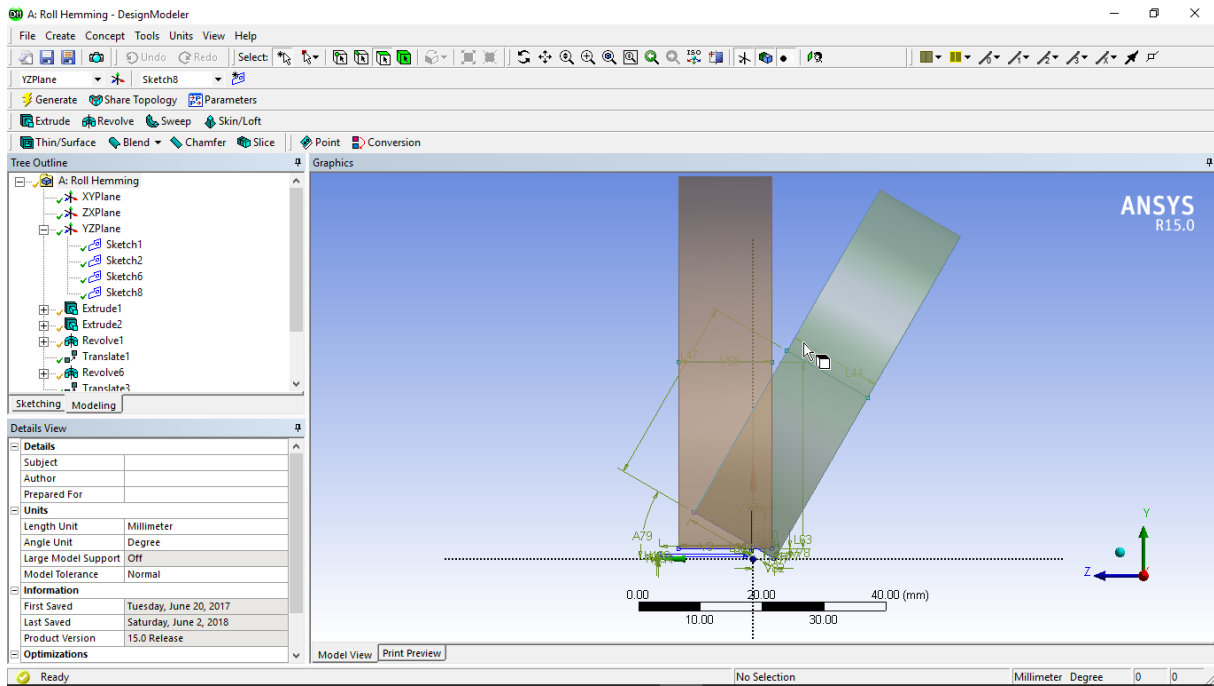


Figura 3.10.- Configuración de geometría. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.3 Análisis por Elemento Finito.

Para realizar el análisis por Elemento Finito, se debe configurar modelos de elemento finito, estableciendo, el tipo de material, asignar el tipo de material para cada pieza de análisis, establecer los contactos, las condiciones de frontera, mallado, fijación, fuerza y movimiento. Lo anterior se realiza desde la página principal de ANSYS 15.0®, al final de la *Tool box* Figura 3.11 se encuentra la herramienta “WORKBENCH® LS-DYNA®” al seleccionar aparecerá del lado derecho la siguiente ventana Figura 3.12 que se encuentra en la hoja de trabajo para este proyecto, la ventana de WORKBENCH® LS-DYNA® indica los pasos necesarios para que la configuración del análisis funcione correctamente.

1. *Engineering Data.*
2. *Geometry.*
3. *Model.*
4. *Setup.*
5. *Solution.*
6. *Results.*

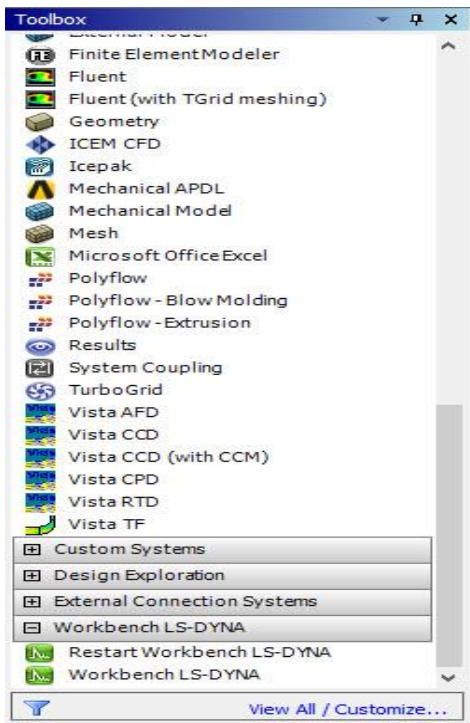


Figura 3.11.- Tool Box.

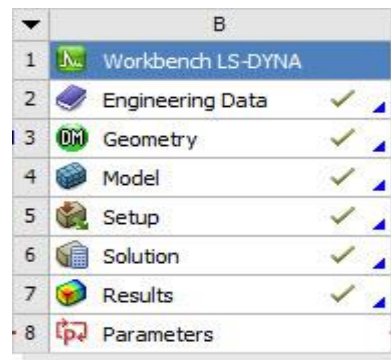


Figura 3.12.-Ventana WORKBENCH® LS-DYNA®.

Primeramente, se debe ligar la geometría creada anteriormente con la geometría de la ventana de LS-DYNA® Figura 3.13.

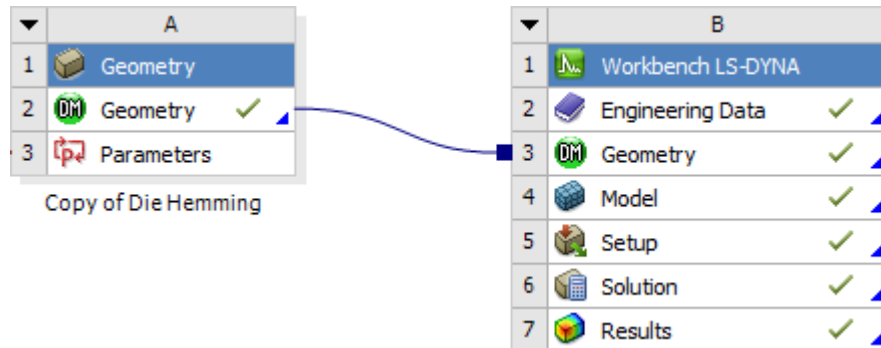



Figura 3.13.- Ligar Geometría y WORKBENCH® LS-DYNA®.

### 3.3.1 Selección de material

En la sección de Engineering Data se determina el material, para lo cual lo primero será seleccionar el icono Engineering data sources  Engineering Data Sources.

El primer material con el que se trabajó se encuentra en General *Materials* después se abrirá la ventana *Outline of general material* donde se eligió el material *Structural Steel* Figura 3.14.

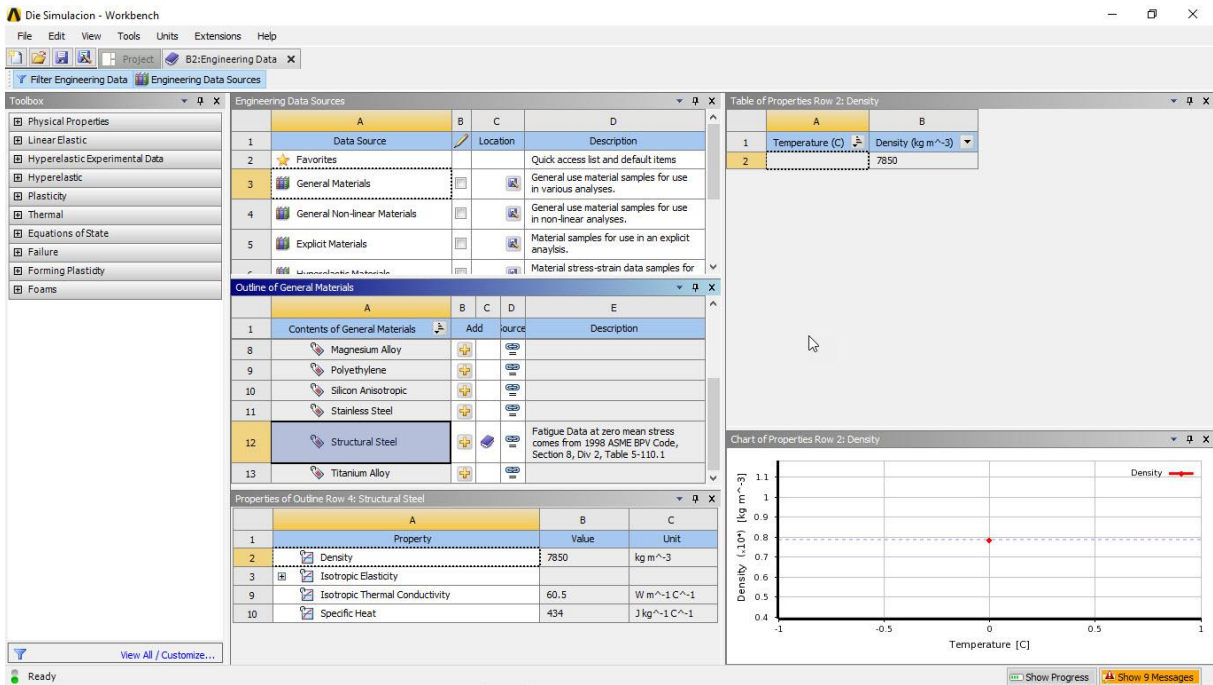


Figura 3.14.- Material Structural Steel.

En el segundo material con el que vamos a trabajar se encuentra en *General Non-linear Materials* después se abrirá la ventana *Outline of general material* y escogeremos el material Aluminum Alloy NL Figura 3.15.

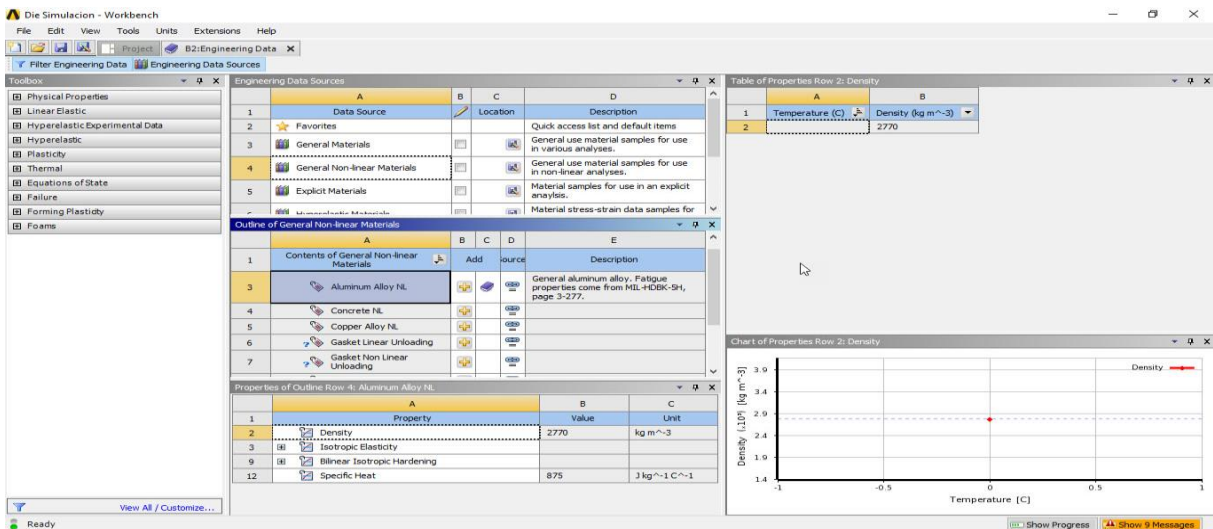


Figura 3.15.- Aluminum Alloy NL.

### 3.3.2 Modelo de simulación *Die Hemming*

Para poder completar los siguientes pasos correctamente se tendrá que ingresar en la sección de *Model* donde encontraremos la ventana con el nombre de *Outline* Figura 3.16 aquí se encuentran las 4 piezas creadas.

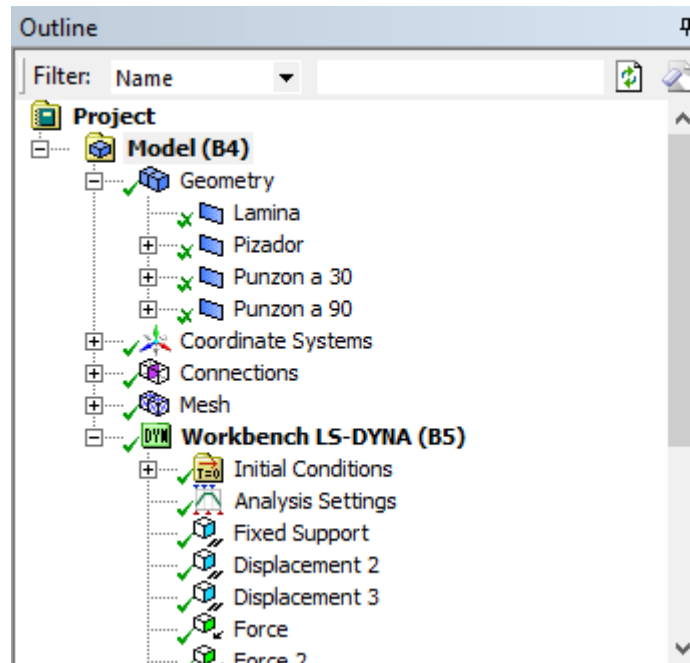


Figura 3.16.- *Outline die hemming.*

Se selecciona la lámina que será nuestra probeta de pruebas y se dará la siguiente configuración Figura 3.17.

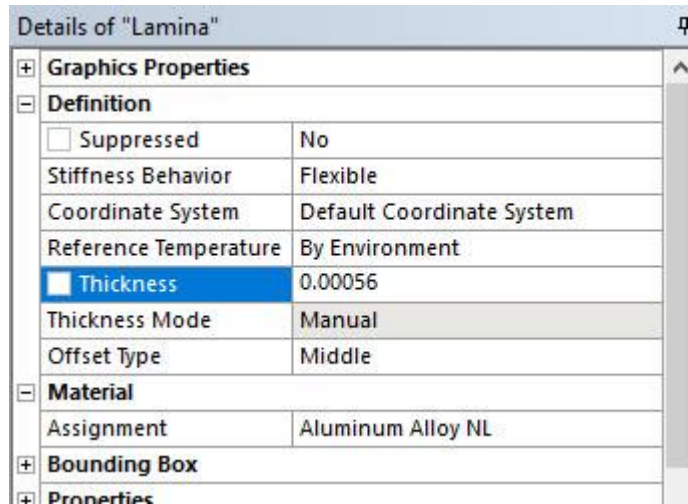


Figura 3.17.- Configuración de la lámina de prueba.

Después se selecciona la lámina interior que funcionara también como pisador y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.18.

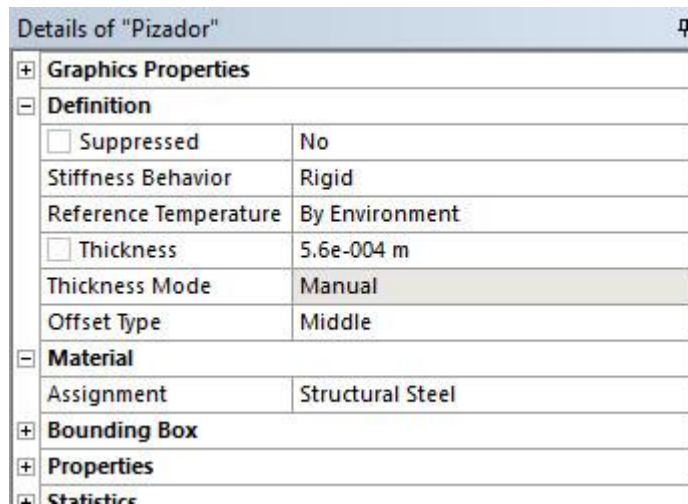


Figura 3.18.- Configuración de la lámina interior.

Ahora se configura la primera herramienta que se encargará del pre-engargolado y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.19.

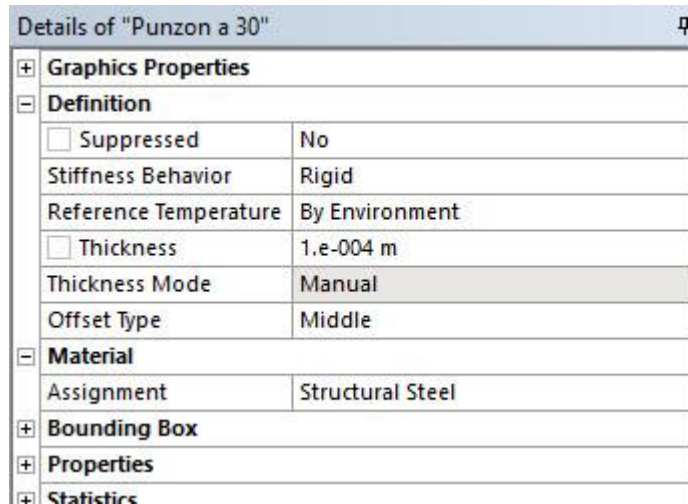


Figura 3.19.- Configuración de la herramienta de pre-engargolado.

Por último, se configura la segunda herramienta que se encargará del engargolado final y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.20.

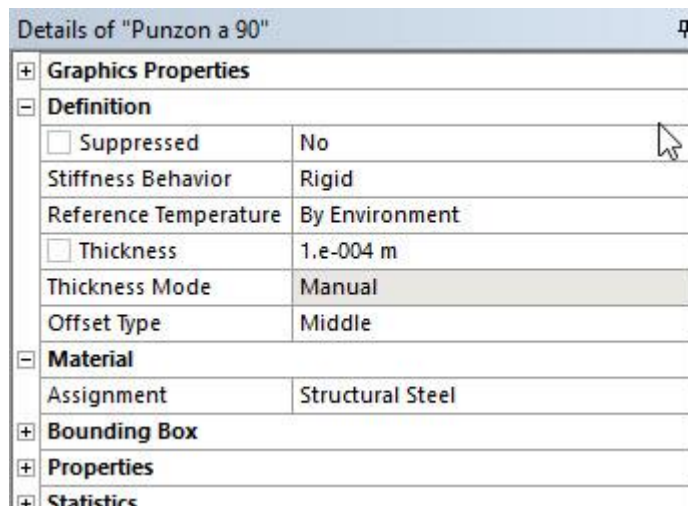


Figura 3.20.- Configuración de la herramienta de engargolado final.

Como siguiente paso se requiere asignar las conexiones y contactos Figura 3.21 que estarán interactuando al momento de la simulación se crearán 3 contactos.



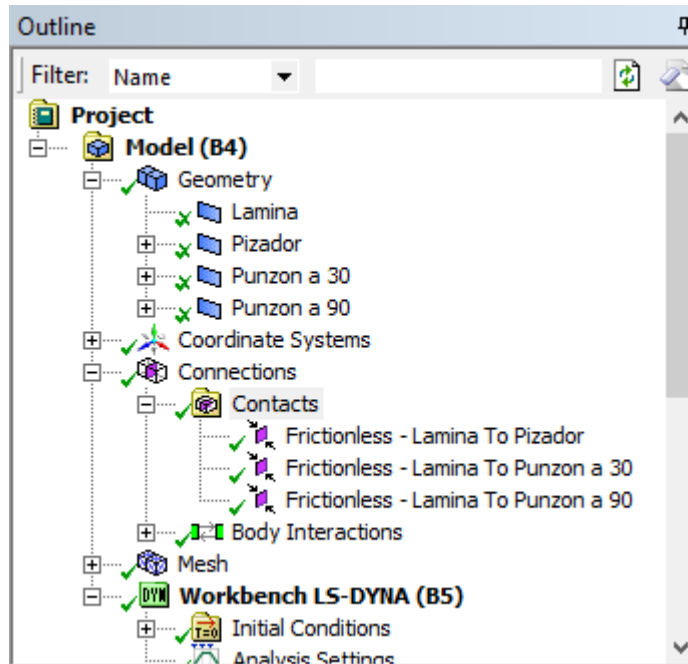


Figura 3.21.- Conexiones y contactos.

El primer contacto será *Frictionless* Lámina to pisador Figura 3.22 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* se selecciona la probeta de prueba y en *Target Bodies* se selecciona la lámina interior.

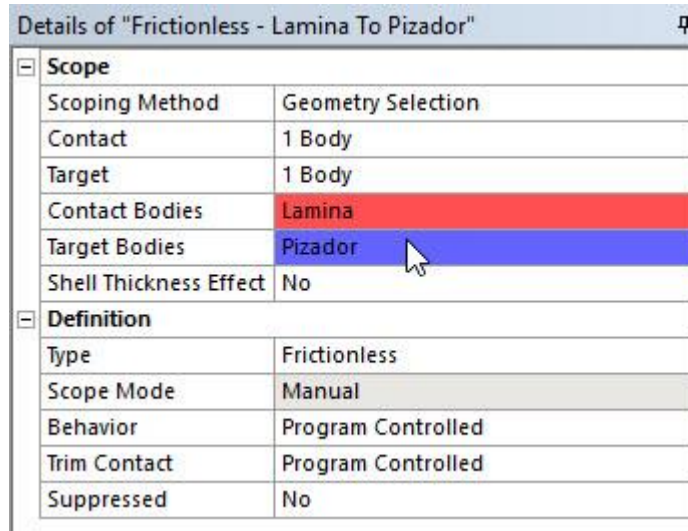


Figura 3.22.- Frictionless Lámina to pisador.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y el cuerpo de la lámina interior Figura 3.23 porque con la fuerza aplicada de sujeción ambas cuentan con un contacto entre ellas.

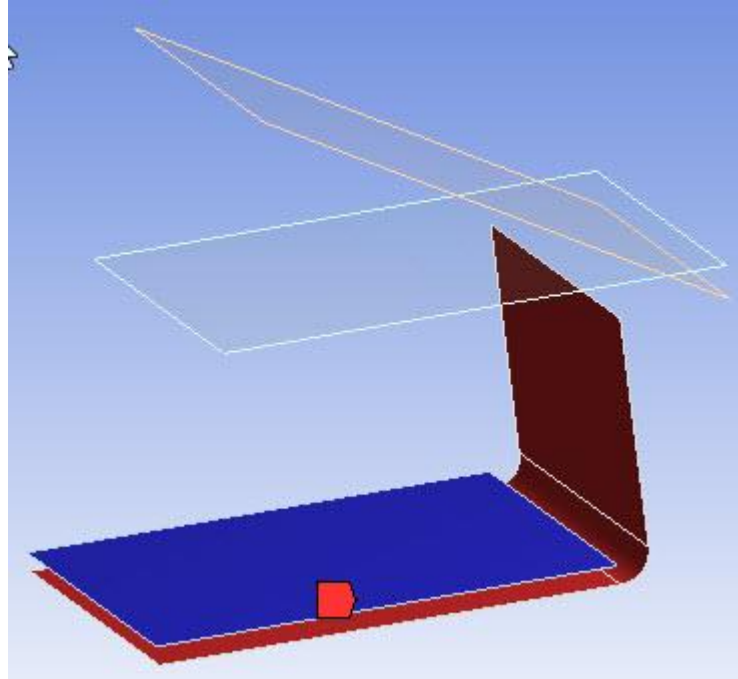


Figura 3.23.- Interacción entre probeta de prueba y lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA.

El primer contacto será *Frictionless* Lámina to punzón 30 Figura 3.24 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* se selecciona la probeta de prueba y en *Target Bodies* se selecciona la herramienta de pre-engargolado.

| Details of "Frictionless - Lamina To Punzon a 30" |                    |
|---|--------------------|
| [-] <b>Scope</b>                                  |                    |
| Scoping Method                                    | Geometry Selection |
| Contact   | 1 Body             |
| Target  | 1 Face             |
| Contact Bodies                                    | Lamina             |
| Target Bodies                                     | Punzon a 30        |
| Target Shell Face                                 | Bottom             |
| Shell Thickness Effect                            | No                 |
| [-] <b>Definition</b>                             |                    |
| Type  | Frictionless       |
| Scope Mode  | Manual             |
| Behavior  | Program Controlled |
| Trim Contact                                      | Program Controlled |
| Suppressed  | No                 |

Figura 3.24.- Frictionless Lámina to punzón 30.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y la superficie inferior de la herramienta de pre-engargolado Figura 3.25 porque al momento que se desplaza la herramienta tendrá una fricción y un doblé de 60° por el contacto entre ellas.

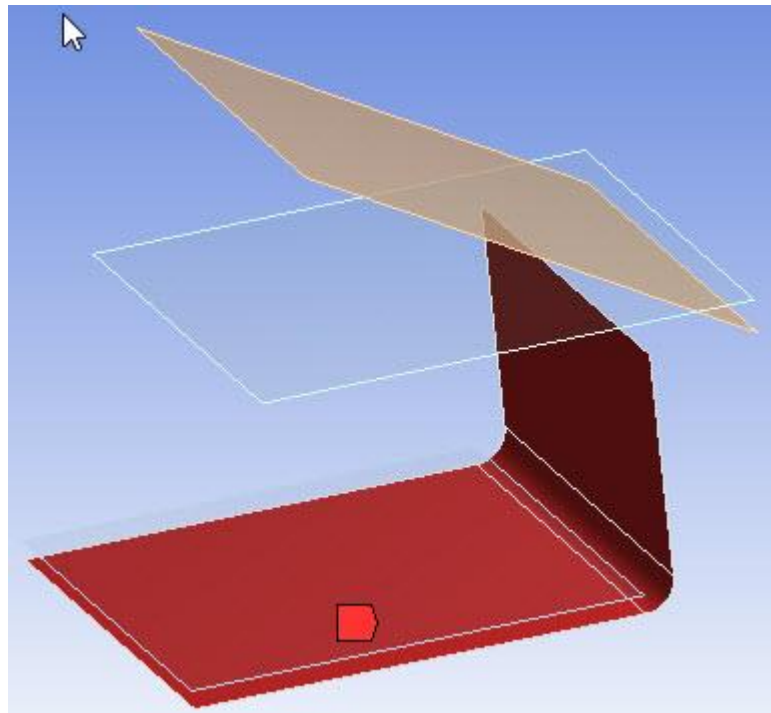


Figura 3.25.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de pre-engargolado. ELABORACIÓN PROPIA.

El primer contacto será *Frictionless* Lámina to punzón a 90 Figura 3.26 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* se selecciona la probeta de prueba y en *Target Bodies* se selecciona la herramienta de engargolado final.

| Details of "Frictionless - Lamina To Punzon a 90" |                    |
|---|--------------------|
| [-] <b>Scope</b>                                  |                    |
| Scoping Method                                    | Geometry Selection |
| Contact   | 1 Body             |
| Target  | 1 Face             |
| Contact Bodies                                    | Lamina             |
| Target Bodies                                     | Punzon a 90        |
| Target Shell Face                                 | Bottom             |
| Shell Thickness Effect                            | No                 |
| [-] <b>Definition</b>                             |                    |
| Type  | Frictionless       |
| Scope Mode  | Manual             |
| Behavior  | Program Controlled |
| Trim Contact                                      | Program Controlled |
| Suppressed  | No                 |

Figura 3.26.- Frictionless lámina to punzón a 90.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y la superficie inferior de la herramienta de engargolado final Figura 3.27 porque al momento que se desplaza la herramienta tendrá una fricción y un doblado de 0° por el contacto entre ellas.

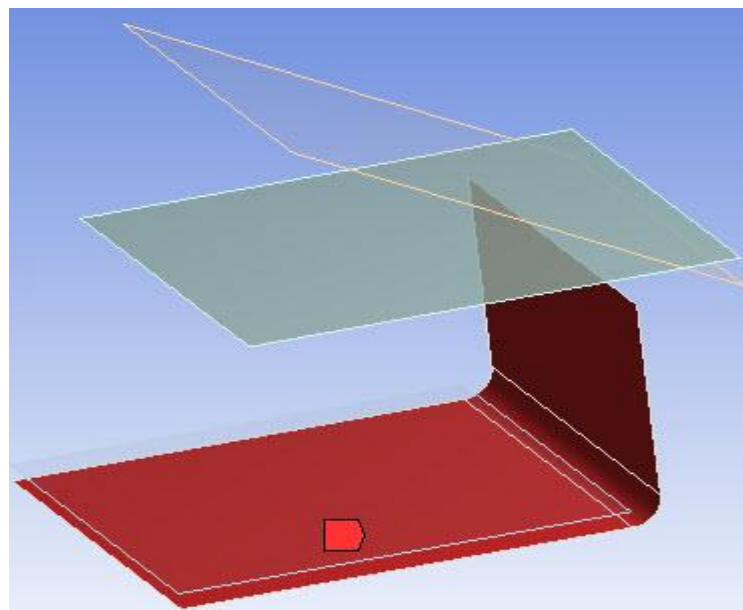


Figura 3.27.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de engargolado final. ELABORACIÓN PROPIA.

Como siguiente paso se asignan 3 valores diferentes de mallado para el modelo de simulación, utilizando la herramienta *Sizing*. El primero será un mallado general Figura 3.28 el cual se seleccionan los 4 cuerpos existentes en el proyecto, con valor de tamaño de 5 e-003m.

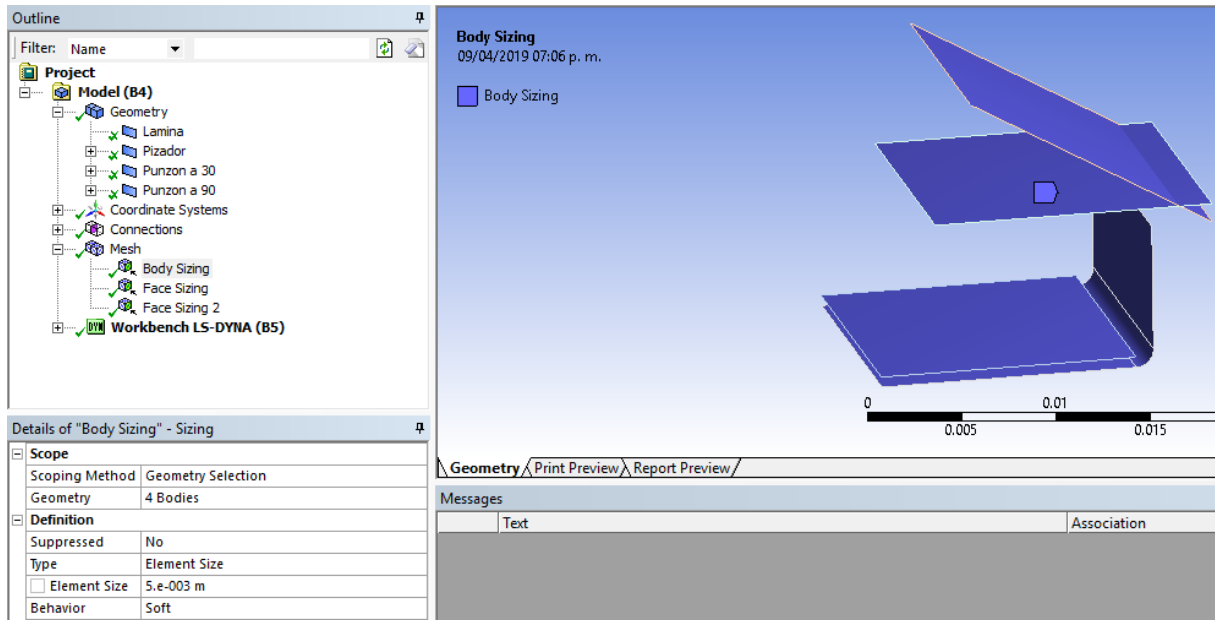


Figura 3.28.- Mallado general. ELABORACIÓN PROPIA.

El segundo será un mallado fino Figura 3.29 únicamente al radio del doblé de la lámina de prueba y se le asignará un valor de tamaño de 1 e-004m.

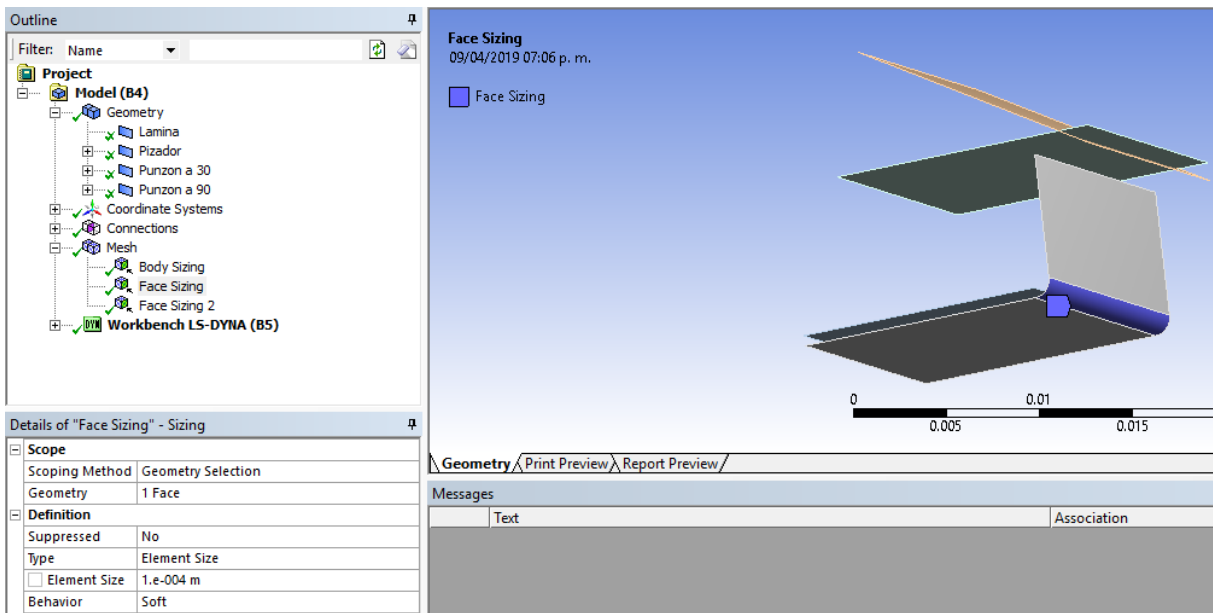


Figura 3.29.- Mallado fino. ELABORACIÓN PROPIA.

El tercero será un mallado intermedio Figura 3.30 a la pared de la lámina de prueba y se asignó un valor de tamaño de 1 e-003m.

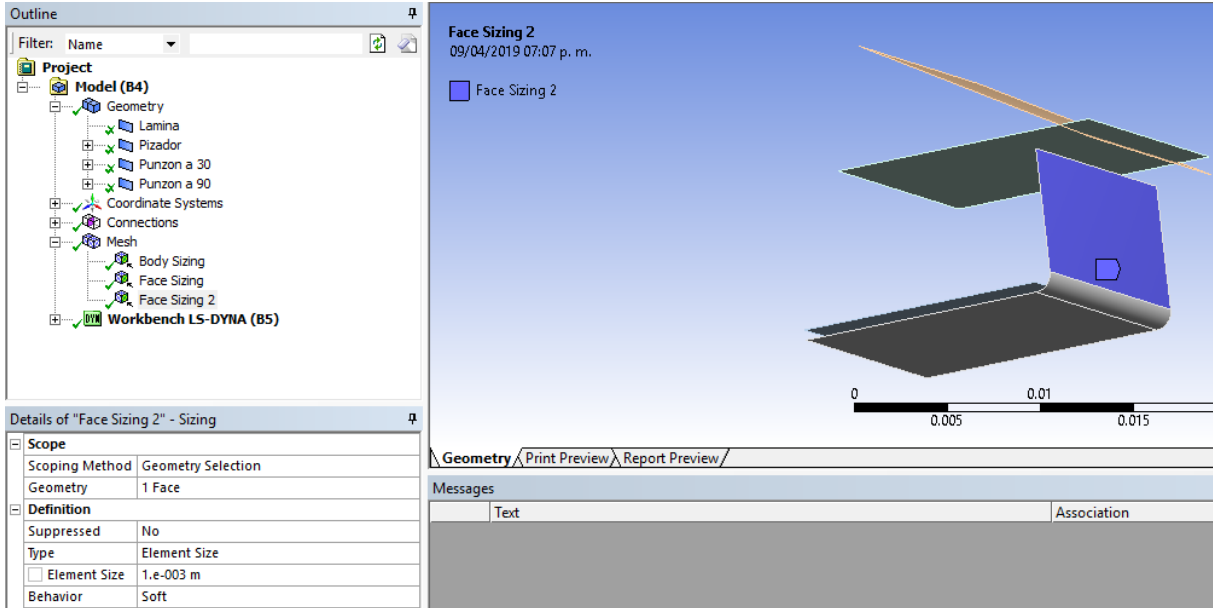


Figura 3.30.- Mallado intermedio. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.3.3 Modelo de simulación *Table Hemming*

Para poder completar los siguientes pasos correctamente se tendrá que ingresar en la sección de Model donde encontraremos la ventana con el nombre de Outline Figura 3.31 aquí se encuentran las 4 piezas creadas.

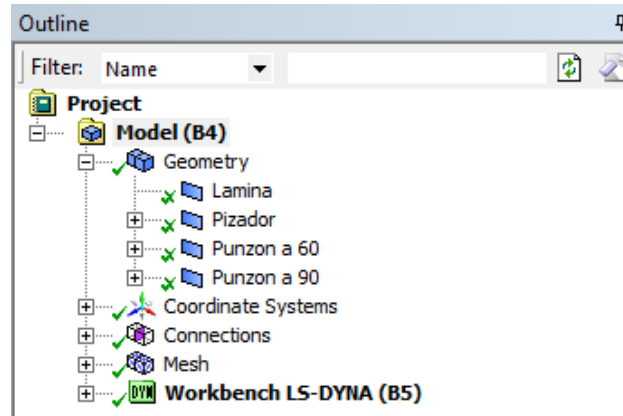


Figura 3.31.- Outline.

Se selecciona la lámina que será la probeta de pruebas y se le dará la siguiente configuración Figura 3.32.

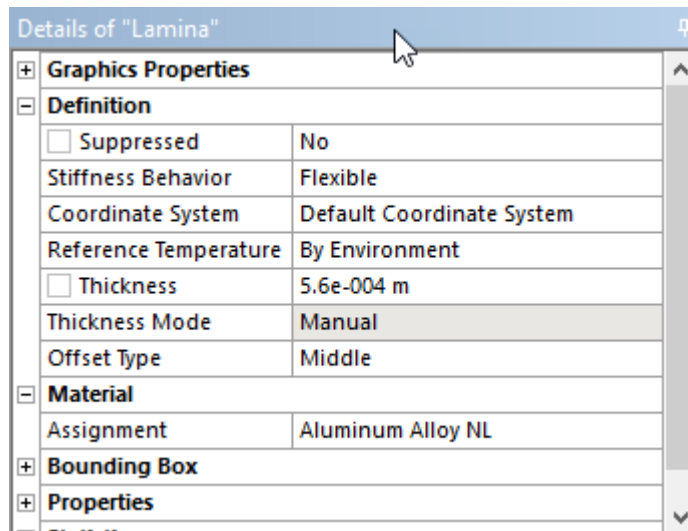


Figura 3.32.- Configuración de la lámina de prueba.

Después se selecciona la lámina interior que funcionara también como pisador y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.33.

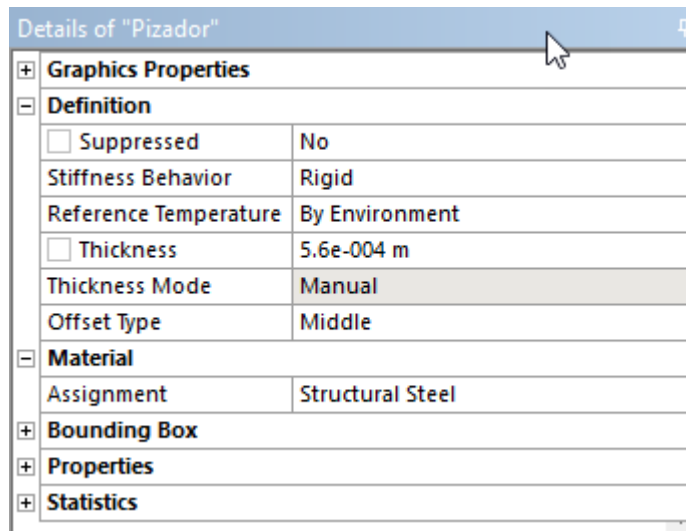


Figura 3.33.- Configuración de la lámina interior.

Ahora se configura la primera herramienta que se encargará del pre-engargolado y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.34.

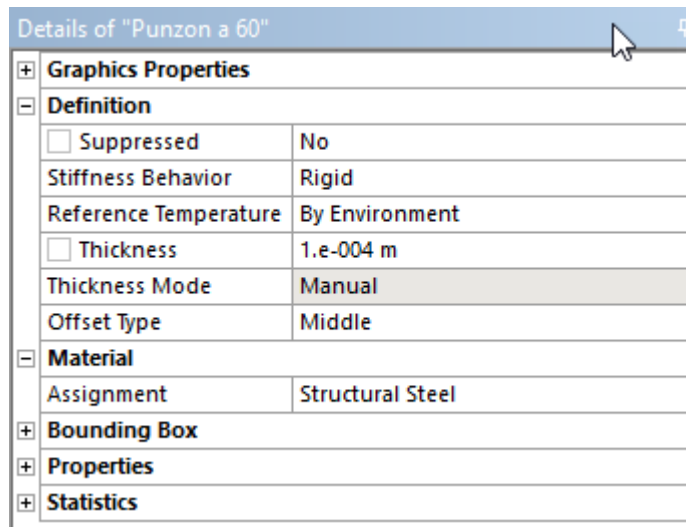


Figura 3.34.- Configuración de la herramienta de pre-engargolado.

Por último, se configura la segunda herramienta que se encargará del engargolado final y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.35.



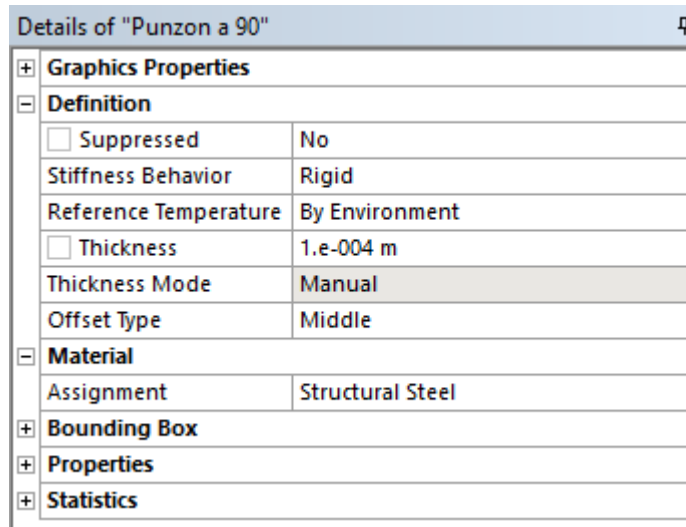


Figura 3.35.- Configuración de la herramienta de engargolado final.

Como siguiente paso se necesita asignar las conexiones y contactos Figura 3.36 que estarán interactuando al momento de la simulación se crearán 3 contactos.

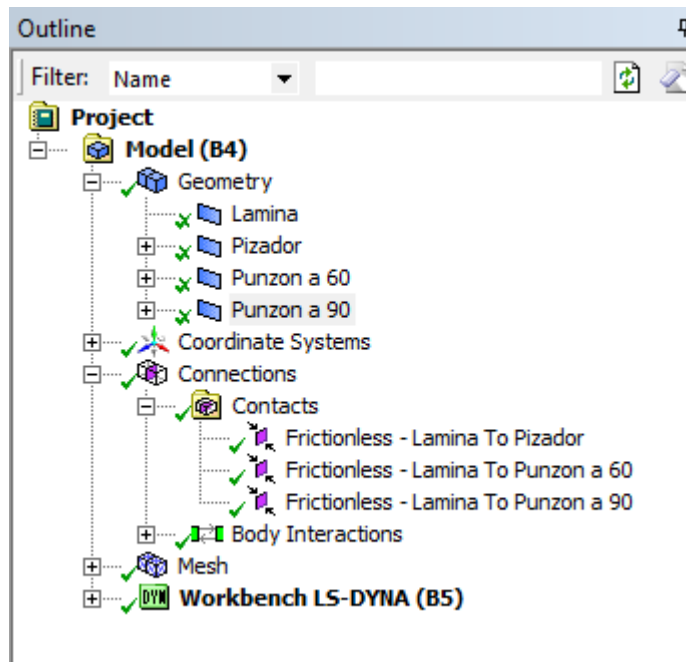


Figura 3.36.- Conexiones y contactos.

El primer contacto será *Frictionless* Lámina to pisador Figura 3.37 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* se selecciona la probeta de prueba y en *Target Bodies* se selecciona la lámina interior.

| Details of "Frictionless - Lamina To Pizador" |                    |
|---|--------------------|
| [-] <b>Scope</b>                              |                    |
| Scoping Method                                | Geometry Selection |
| Contact                                       | 1 Body             |
| Target  | 1 Body             |
| Contact Bodies                                | Lamina             |
| Target Bodies                                 | Pizador            |
| Shell Thickness Effect                        | No                 |
| [-] <b>Definition</b>                         |                    |
| Type  | Frictionless       |
| Scope Mode                                    | Manual             |
| Behavior                                      | Program Controlled |
| Trim Contact                                  | Program Controlled |
| Suppressed                                    | No                 |

Figura 3.37.- Frictionless Lámina to pisador.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y el cuerpo de la lámina interior Figura 3.38 porque con la fuerza aplicada de sujeción ambas cuentan con un contacto entre ellas.

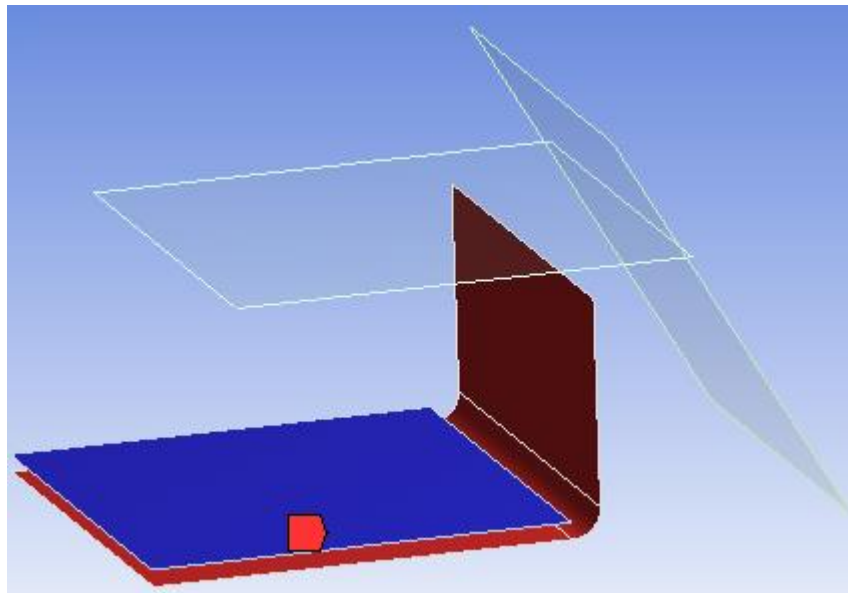


Figura 3.38.- Interacción entre probeta de prueba y lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA.

El primer contacto será *Frictionless* Lámina to punzón 60 Figura 3.39 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* se selecciona la probeta de prueba y en *Target Bodies* se selecciona la herramienta de pre-engargolado.

| Details of "Frictionless - Lamina To Punzon a 60" |                    |
|---|--------------------|
| <b>Scope</b>                                      |                    |
| Scoping Method                                    | Geometry Selection |
| Contact   | 1 Body             |
| Target  | 1 Face             |
| Contact Bodies                                    | Lamina             |
| Target Bodies                                     | Punzon a 60        |
| Target Shell Face                                 | Bottom             |
| Shell Thickness Effect                            | No                 |
| <b>Definition</b>                                 |                    |
| Type  | Frictionless       |
| Scope Mode  | Manual             |
| Behavior  | Program Controlled |
| Trim Contact                                      | Program Controlled |
| Suppressed  | No                 |

Figura 3.39.- Frictionless Lámina to punzón 60.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y la superficie inferior de la herramienta de pre-engargolado Figura 3.40 porque al momento que se desplaza la herramienta tendrá una fricción y un doblé de 60° por el contacto entre ellas.

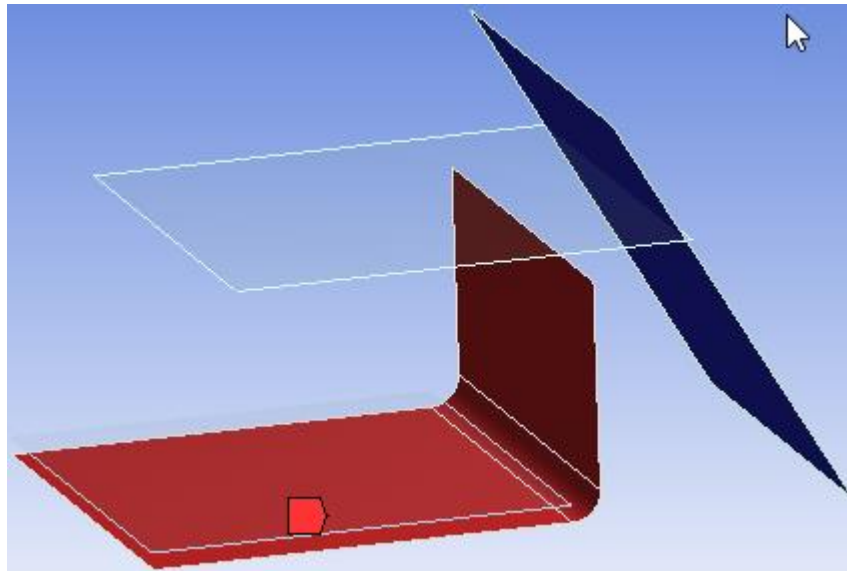


Figura 3.40.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de pre-engargolado. ELABORACIÓN PROPIA.

El primer contacto será *Frictionless* Lámina to punzón a 90 Figura 3.41 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* se selecciona la probeta de prueba y en *Target Bodies* se selecciona la herramienta de engargolado final.

| Details of "Frictionless - Lamina To Punzon a 90" |                    |
|---|--------------------|
| [-] <b>Scope</b>                                  |                    |
| Scoping Method                                    | Geometry Selection |
| Contact   | 1 Body             |
| Target  | 1 Face             |
| Contact Bodies                                    | Lamina             |
| Target Bodies                                     | Punzon a 90        |
| Target Shell Face                                 | Bottom             |
| Shell Thickness Effect                            | No                 |
| [-] <b>Definition</b>                             |                    |
| Type  | Frictionless       |
| Scope Mode  | Manual             |
| Behavior  | Program Controlled |
| Trim Contact                                      | Program Controlled |
| Suppressed  | No                 |

Figura 3.41.- Frictionless Lámina to punzón a 90.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y la superficie inferior de la herramienta de engargolado final Figura 3.42 porque al momento que se desplaza la herramienta tendrá una fricción y un doblado de 0° por el contacto entre ellas.

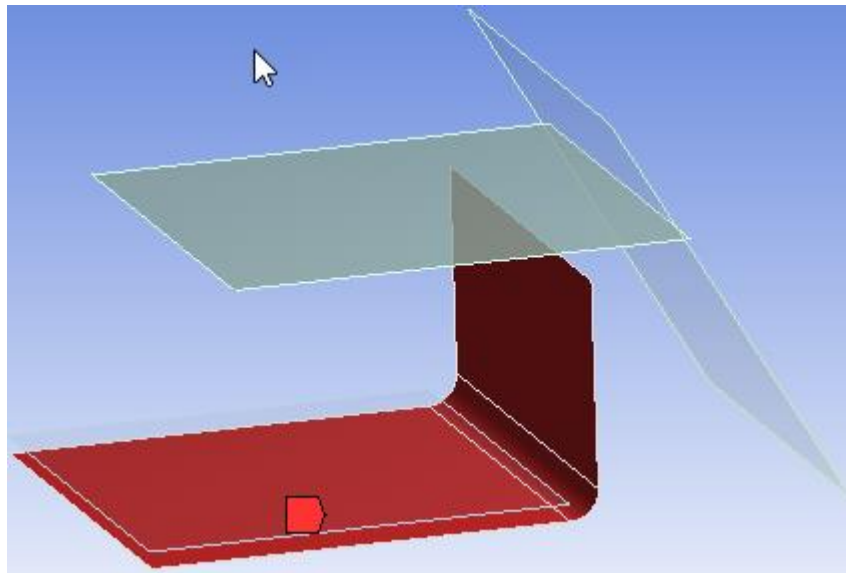


Figura 3.42.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de engargolado final. ELABORACIÓN PROPIA.

Como siguiente paso se asignan 3 valores diferentes de mallado para el modelo de simulación, utilizando la herramienta *Sizing*.

El primero será un mallado general Figura 3.43 el cual se seleccionan los 4 cuerpos existentes en el proyecto y se le asignará un valor de tamaño de 5 e-003m.

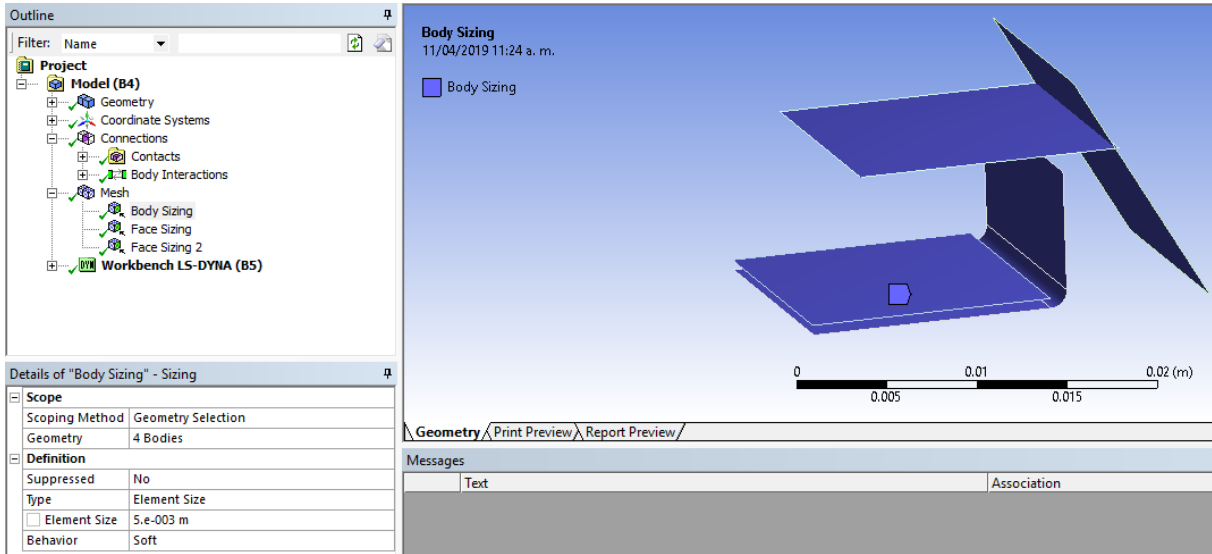


Figura 3.43.- Mallado general. ELABORACIÓN PROPIA.

El segundo será un mallado fino Figura 3.44 únicamente al radio del doblés de la lámina de prueba y le daremos un valor de tamaño de 1 e-004m.

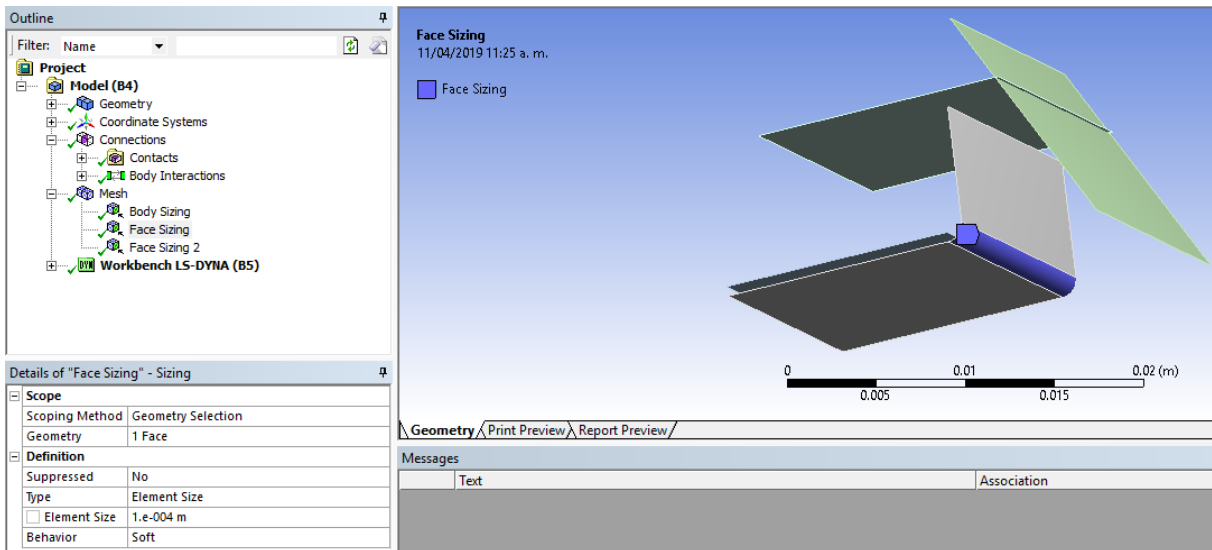


Figura 3.44.- Mallado fino. ELABORACIÓN PROPIA.

El tercero será un mallado intermedio Figura 3.45 a la pared de la lámina de prueba y se le dará un valor de tamaño de 1 e-003m, con esto se finaliza el modelo.

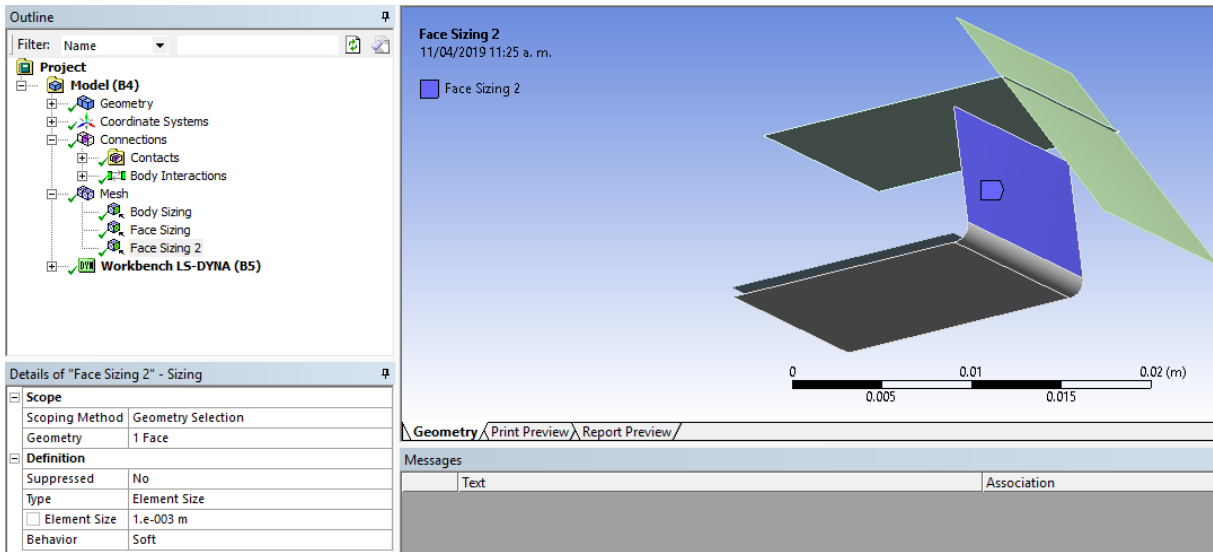


Figura 3.45.- Mallado intermedio. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.3.4 Modelo de simulación *Roll Hemming*

Para poder completar los siguientes pasos correctamente se tendrá que ingresar en la sección de *Model* donde se encontrará la ventana con el nombre de *Outline* Figura 3.46 aquí se encuentran las 4 piezas creadas.

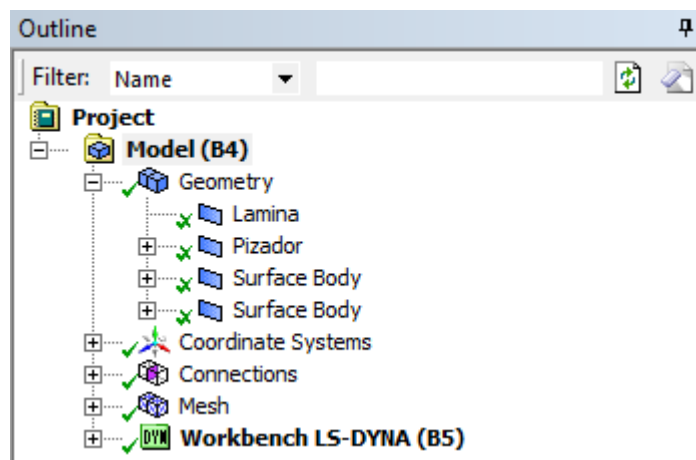


Figura 3.46.- Outline.

Se selecciona la lámina que será la probeta de pruebas y se le dará la siguiente configuración Figura 3.47.

| Details of "Lamina" <span style="float: right;">↕</span> |                           |
|--|---------------------------|
| + <b>Graphics Properties</b>                             |                           |
| - <b>Definition</b>                                      |                           |
| <input type="checkbox"/> Suppressed                      | No                        |
| Stiffness Behavior                                       | Flexible                  |
| Coordinate System  | Default Coordinate System |
| Reference Temperature                                    | By Environment            |
| <input type="checkbox"/> Thickness                       | 5.6e-004 m                |
| Thickness Mode   | Manual                    |
| Offset Type  | Middle                    |
| - <b>Material</b>  |                           |
| Assignment   | Aluminum Alloy NL         |
| + <b>Bounding Box</b>                                    |                           |
| + <b>Properties</b>                                      |                           |
| + <b>Statistics</b>                                      |                           |

Figura 3.47.- Configuración de la lámina de prueba.

Después se selecciona la lámina interior que funcionara también como pisador y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.48.

| Details of "Pizador" <span style="float: right;">↕</span> |                  |
|---|------------------|
| + <b>Graphics Properties</b>                              |                  |
| - <b>Definition</b>                                       |                  |
| <input type="checkbox"/> Suppressed                       | No               |
| Stiffness Behavior  | Rigid            |
| Reference Temperature                                     | By Environment   |
| <input type="checkbox"/> Thickness                        | 5.6e-004 m       |
| Thickness Mode  | Manual           |
| Offset Type   | Middle           |
| - <b>Material</b>   |                  |
| Assignment  | Structural Steel |
| + <b>Bounding Box</b>                                     |                  |
| + <b>Properties</b>                                       |                  |
| + <b>Statistics</b>                                       |                  |

Figura 3.48.- Configuración de la lámina interior.

Ahora se configura la primera herramienta que se encargará del pre-engargolado y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.49.

| Details of "Surface Body" <span style="float: right;">↕</span> |                  |
|--|------------------|
| + <b>Graphics Properties</b>                                   |                  |
| - <b>Definition</b>  |                  |
| <input type="checkbox"/> Suppressed                            | No               |
| Stiffness Behavior   | Rigid            |
| Reference Temperature  | By Environment   |
| <input type="checkbox"/> Thickness                             | 1.e-004 m        |
| Thickness Mode   | Manual           |
| Offset Type  | Middle           |
| - <b>Material</b>  |                  |
| Assignment   | Structural Steel |
| + <b>Bounding Box</b>  |                  |
| + <b>Properties</b>  |                  |
| + <b>Statistics</b>  |                  |

Figura 3.49.- Configuración de la herramienta de pre-engargolado.

Por último, se configura la segunda herramienta que se encargará del engargolado final y se le asigna la siguiente configuración Figura 3.50.

| Details of "Surface Body" <span style="float: right;">↕</span> |                  |
|--|------------------|
| + <b>Graphics Properties</b>                                   |                  |
| - <b>Definition</b>  |                  |
| <input type="checkbox"/> Suppressed                            | No               |
| Stiffness Behavior   | Rigid            |
| Reference Temperature  | By Environment   |
| <input type="checkbox"/> Thickness                             | 1.e-004 m        |
| Thickness Mode   | Manual           |
| Offset Type  | Middle           |
| - <b>Material</b>  |                  |
| Assignment   | Structural Steel |
| + <b>Bounding Box</b>  |                  |
| + <b>Properties</b>  |                  |
| + <b>Statistics</b>  |                  |

Figura 3.50.- Configuración de la herramienta de engargolado final.

Como siguiente paso se necesita asignar las conexiones y contactos Figura 3.51 que estarán interactuando al momento de la simulación se crearán 3 contactos.



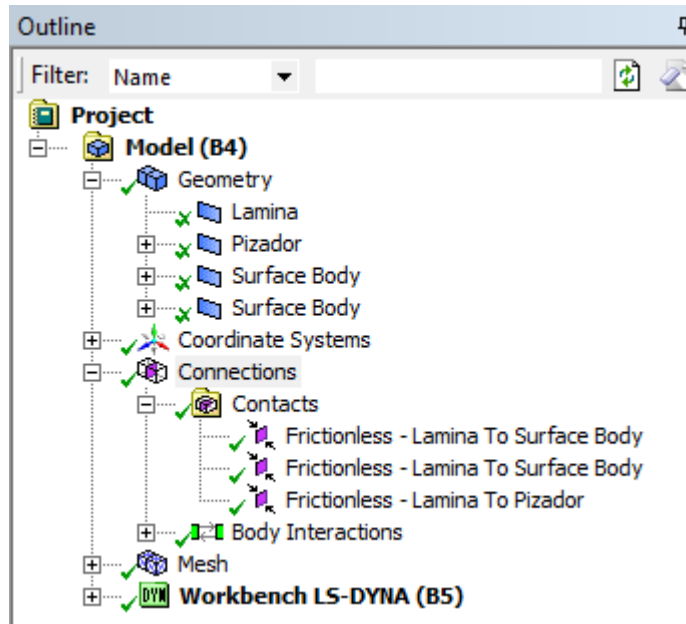


Figura 3.51.- Conexiones y contactos.

El primer contacto será *Frictionless* Lámina to pisador Figura 3.52 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* se selecciona la probeta de prueba y en *Target Bodies* se selecciona la lámina interior.

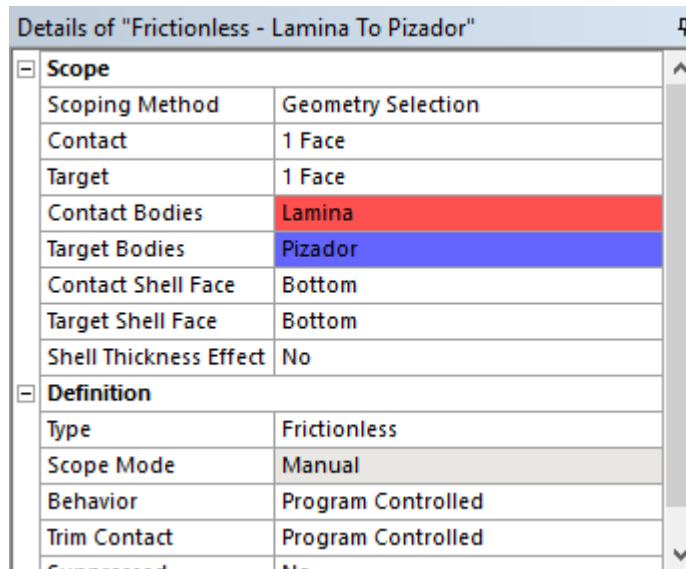


Figura 3.52.- Frictionless Lámina to pisador.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y el cuerpo de la lámina interior Figura 3.53 porque con la fuerza aplicada de sujeción ambas cuentan con un contacto entre ellas.

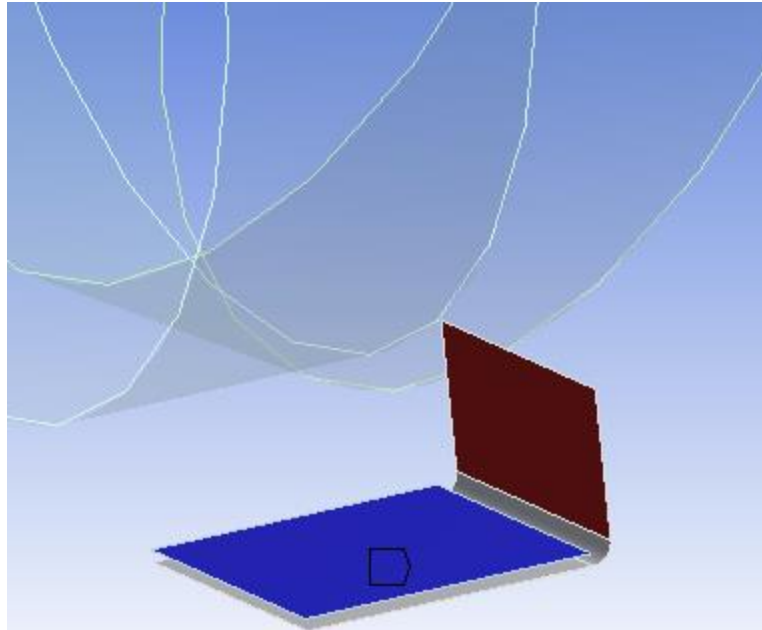


Figura 3.53.- Interacción entre probeta de prueba y lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA.

El primer contacto será *Frictionless* en el rodillo a 60° Figura 3.54 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* seleccionar la probeta de prueba y en *Target Bodies* seleccionar la herramienta de pre-engargolado.

| Details of "Frictionless - Lamina To Surface Body" |                    |
|--|--------------------|
| [-] <b>Scope</b>                                   |                    |
| Scoping Method                                     | Geometry Selection |
| Contact  | 1 Body             |
| Target   | 1 Face             |
| Contact Bodies                                     | Lamina             |
| Target Bodies                                      | Surface Body       |
| Target Shell Face                                  | Bottom             |
| Shell Thickness Effect                             | No                 |
| [-] <b>Definition</b>                              |                    |
| Type   | Frictionless       |
| Scope Mode   | Manual             |
| Behavior   | Program Controlled |
| Trim Contact                                       | Program Controlled |
| Suppressed   | No                 |

Figura 3.54.- Frictionless Rodillo a 60°.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y la superficie inferior de la herramienta de pre-engargolado Figura 3.55 porque al momento que se desplaza la herramienta tendrá una fricción y un doblado de 60° por el contacto entre ellas.

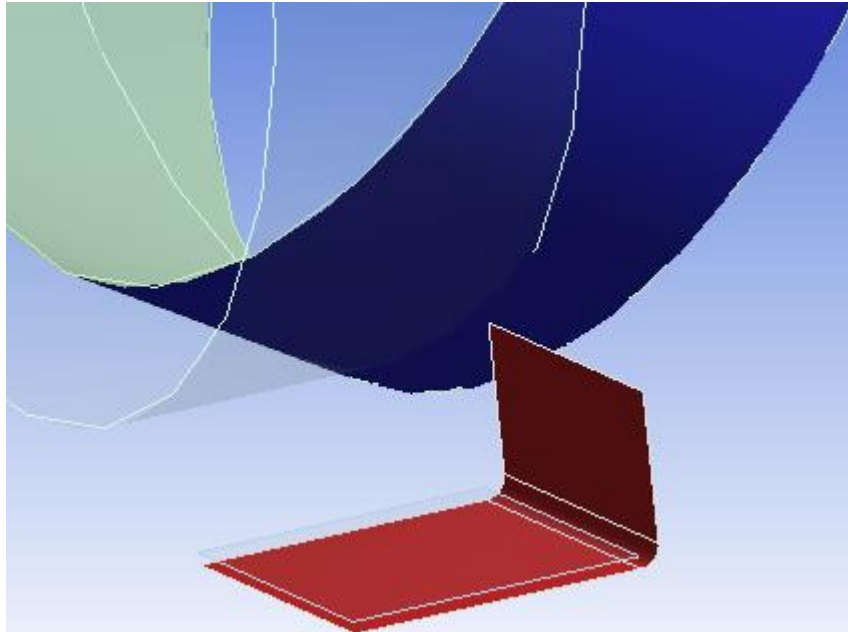


Figura 3.55.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de pre-engargolado. ELABORACIÓN PROPIA.

El primer contacto será *Frictionless* Rodillo a 90° Figura 3.56 ya que entre ellos no existe fricción, en *Contact Bodies* seleccionar la probeta de prueba y en *Target Bodies* seleccionar la herramienta de engargolado final.

| Details of "Frictionless - Lamina To Surface Body" <span style="float: right;">↕</span> |                    |
|---|--------------------|
| [-] <b>Scope</b>  |                    |
| Scoping Method  | Geometry Selection |
| Contact   | 1 Body             |
| Target  | 1 Face             |
| Contact Bodies  | Lamina             |
| Target Bodies   | Surface Body       |
| Target Shell Face   | Top                |
| Shell Thickness Effect  | No                 |
| [-] <b>Definition</b>   |                    |
| Type  | Frictionless       |
| Scope Mode  | Manual             |
| Behavior  | Program Controlled |
| Trim Contact  | Program Controlled |
| Suppressed  | No                 |

Figura 3.56.- Frictionless Rodillo a 90°.

En este contacto se selecciona la interacción entre el cuerpo de la probeta de prueba y la superficie inferior de la herramienta de engargolado final Figura 3.57 porque al momento que se desplaza la herramienta tendrá una fricción y un doblado de 0° por el contacto entre ellas.

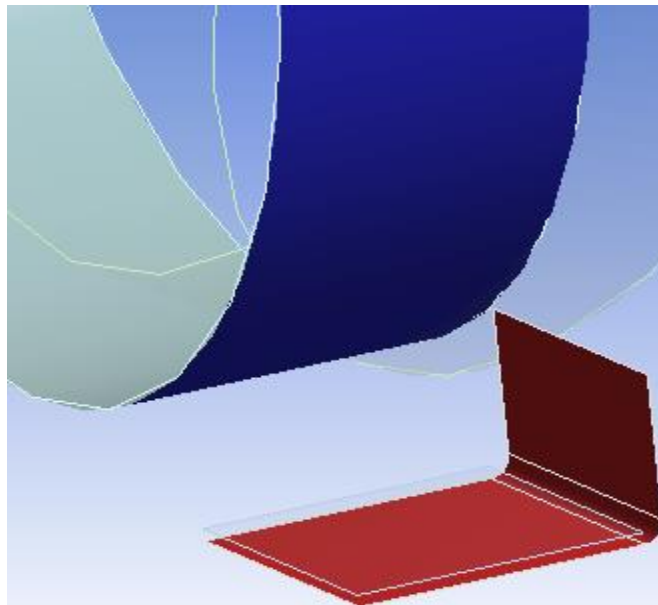


Figura 3.57.- Interacción entre probeta de prueba y herramienta de engargolado final. ELABORACIÓN PROPIA.

Como siguiente paso se asignan 3 valores diferentes de mallado para el modelo de simulación, utilizando la herramienta *Sizing*.

El primero será un mallado general Figura 3.58 el cual se seleccionan los 4 cuerpos existentes en el proyecto y le daremos los siguientes valores en valores por defaults o en español predeterminados por el software ANSYS 15.0®.

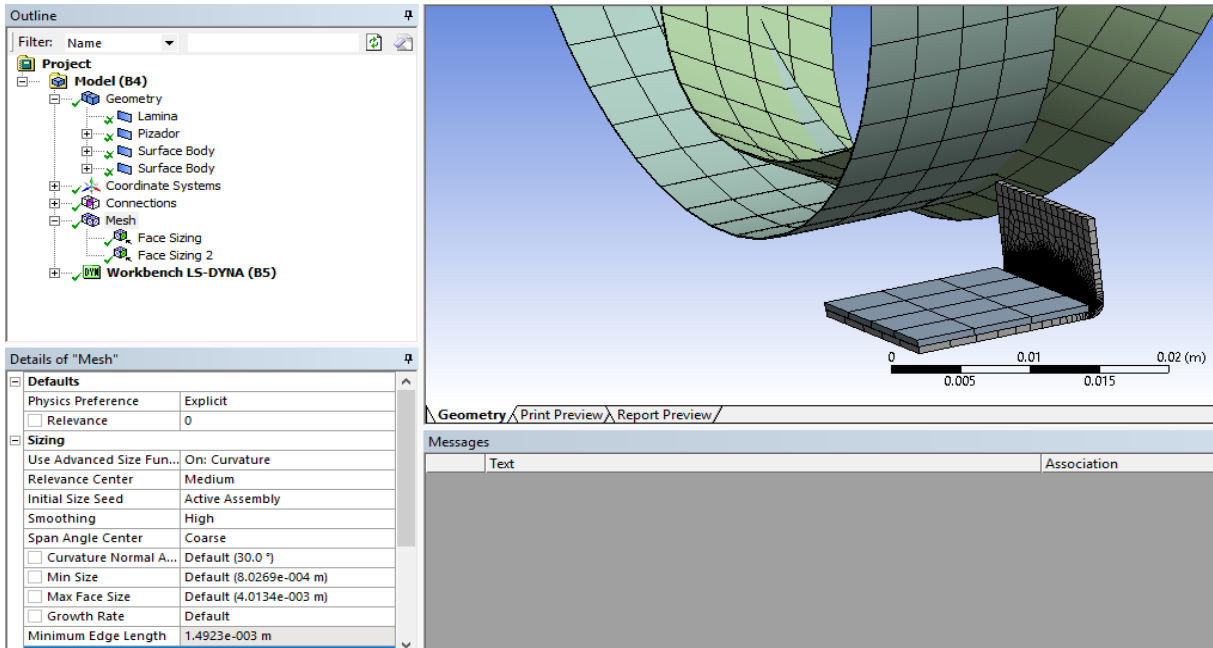


Figura 3.58.- Mallado general roll hemming. ELABORACIÓN PROPIA.

El segundo será un mallado fino Figura 3.59 únicamente al radio del dobléz de la lámina de prueba y le daremos un valor de tamaño de 1 e-004m.

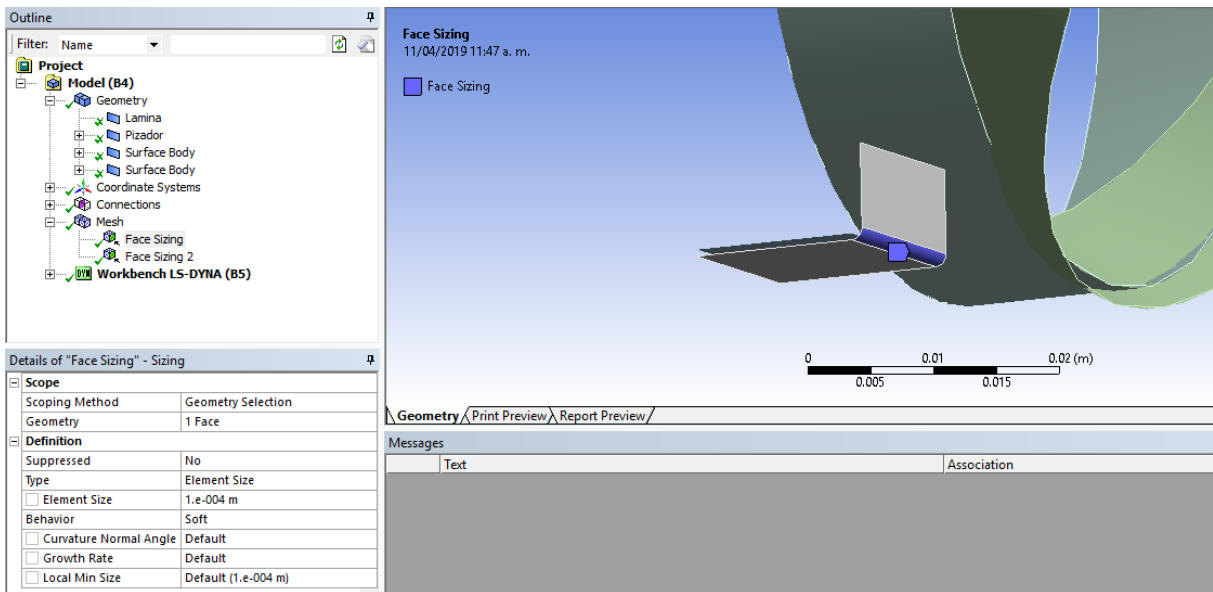


Figura 3.59.- Mallado fino *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

El tercero será un mallado intermedio Figura 3.60 a la pared de la lámina de prueba y le daremos un valor de tamaño de 1 e-003m, con esto se finaliza el modelo.

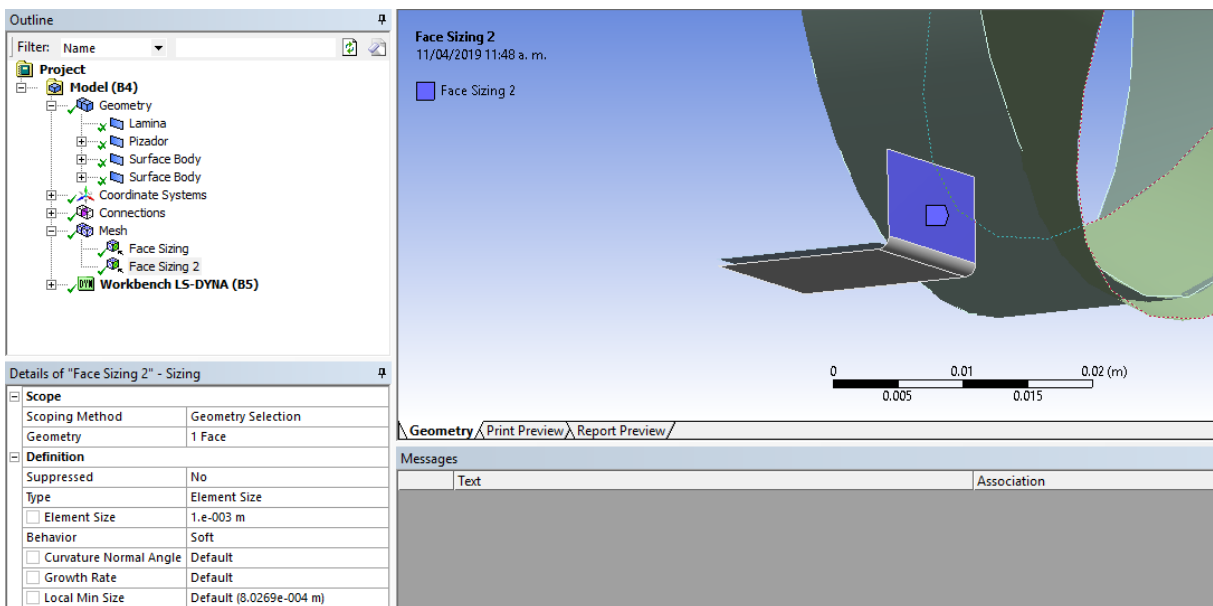


Figura 3.60.- Mallado intermedio *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.3.5 Configuración de *SETUP Die Hemming*

En el apartado del *Setup*, se establecen los tipos de fijación, fuerzas y movimientos que tendrán las piezas, Figura 3.61. Aquí mismo se establece el tiempo de final de la simulación 0.1 así como también se colocará el número de CPUs que tenga la computadora en el caso de estudio serán 2.

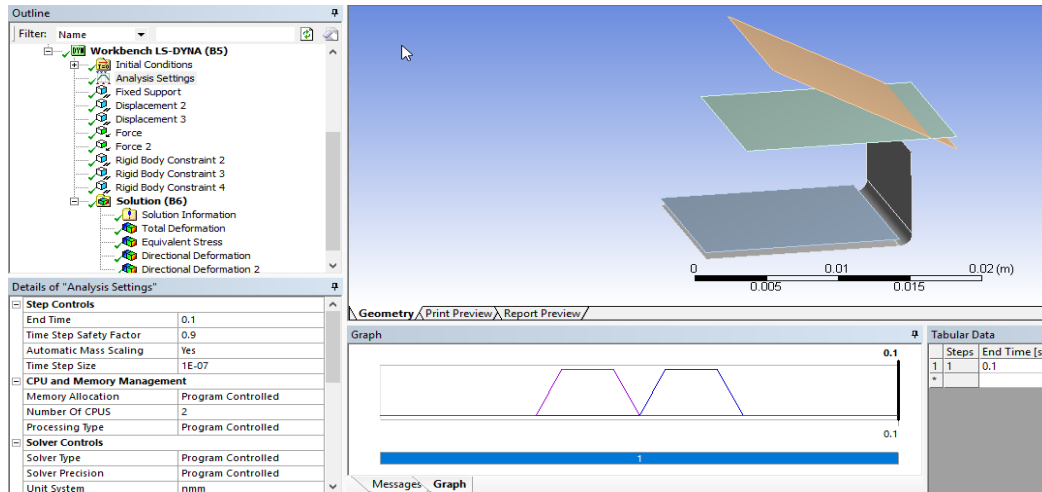


Figura 3.61.- Configuración del análisis. ELABORACIÓN PROPIA.

A la cara inferior de la lámina de prueba se colocará un *Fixed Support* Figura 3.62, que es igual a un empotramiento para evitar que se mueva la pieza de esa posición simulando de esta manera la base en donde se coloca las pruebas experimentales.

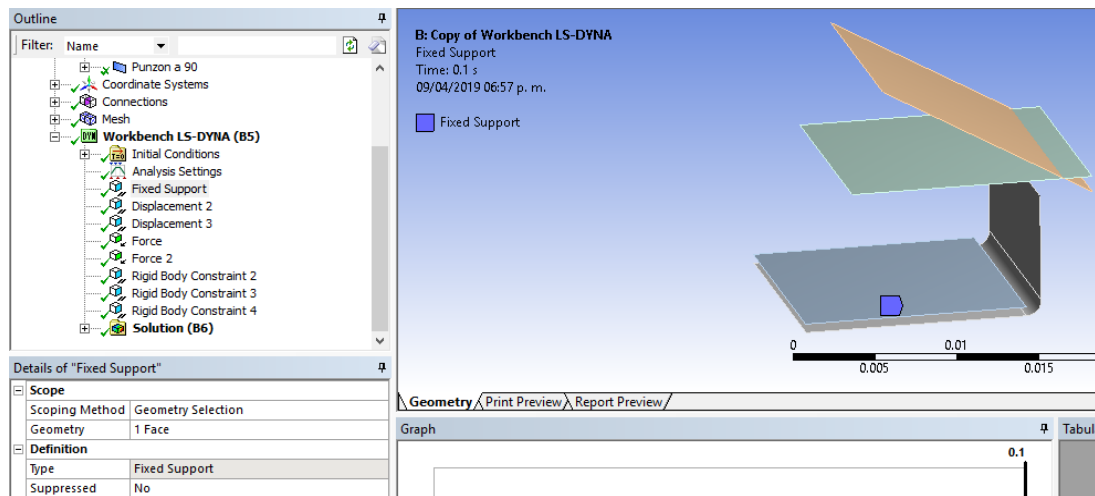


Figura 3.62.- Fixed Support *die hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la herramienta de pre-engargolado se le asigna un desplazamiento de sistema de coordenadas Figura 3.63 y una fuerza vectorial con dirección vectorial negativa al eje y Figura 3.64 también se asigna una restricción de cuerpo rígido Figura 3.65 para restringir todos sus movimientos y rotaciones la única excepción sería dejar libre el eje y.

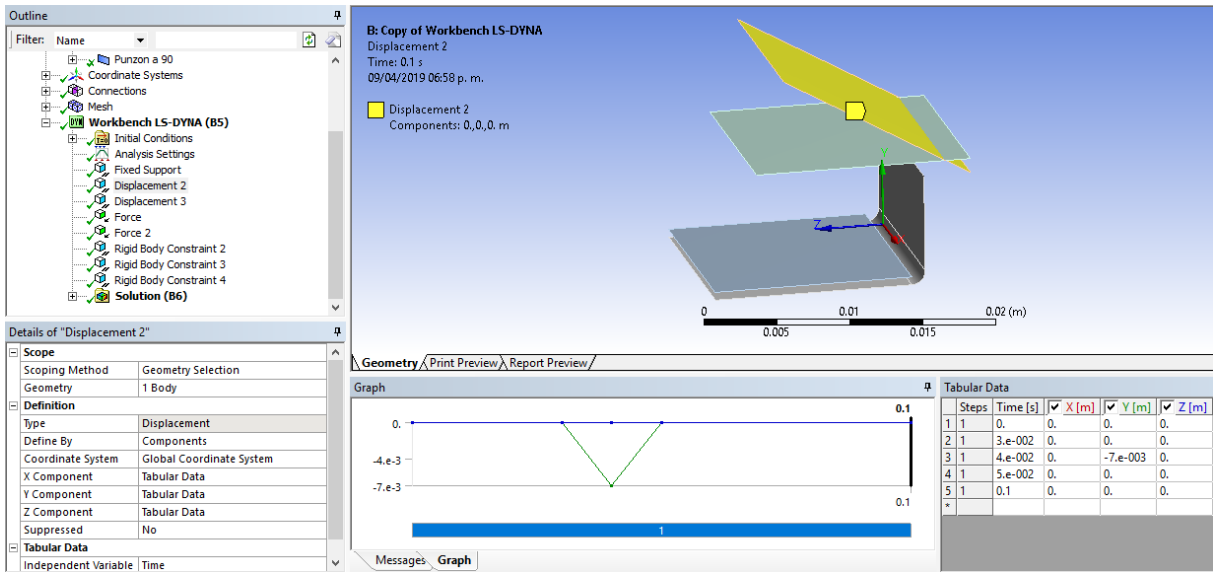


Figura 3.63.- Desplazamiento negativo al eje y, pre-engargolado *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

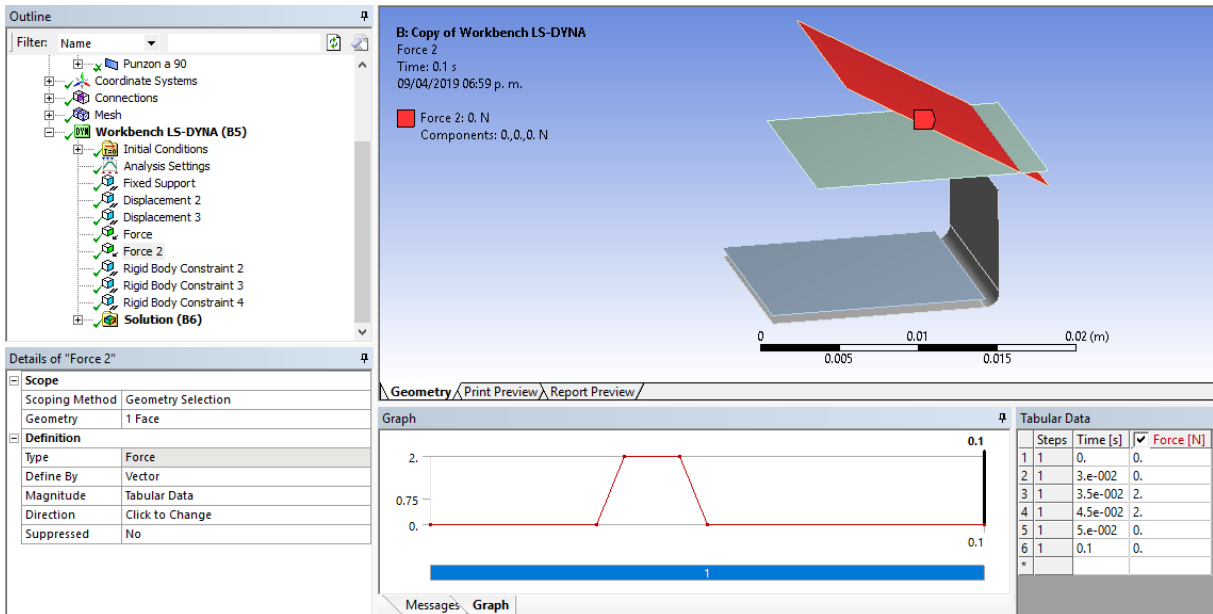


Figura 3.64.- Fuerza con dirección vectorial negativa al eje y, pre-engargolado *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.



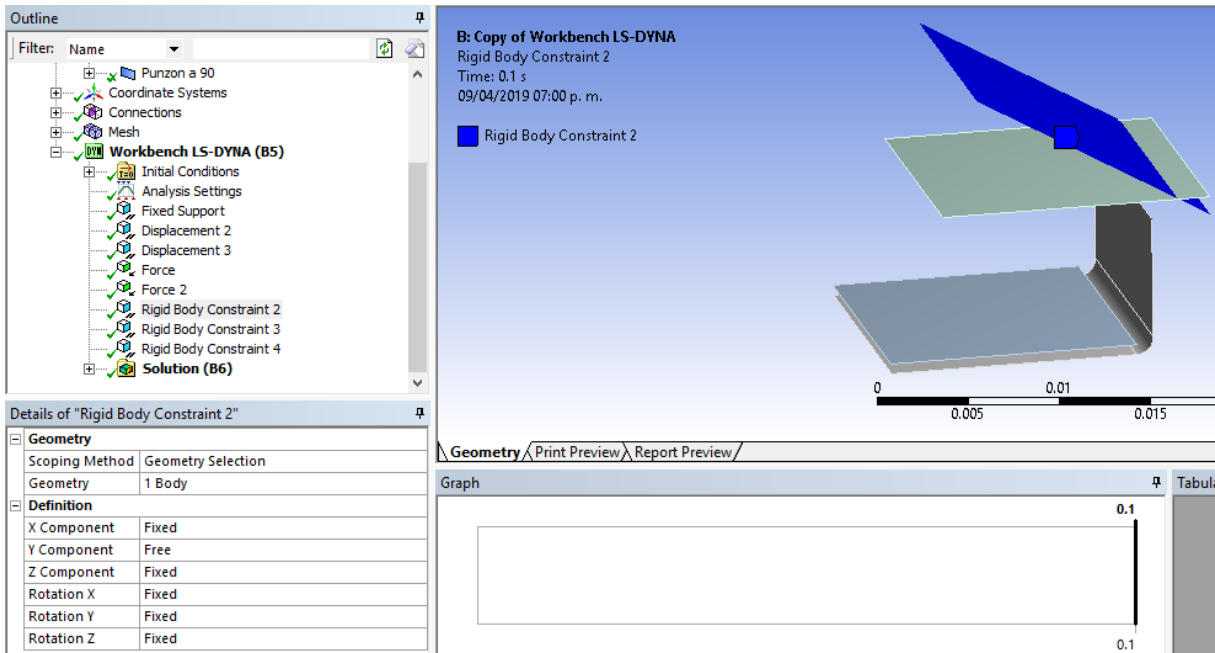


Figura 3.65.- Restricción de cuerpo rígido, pre-engargolado *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la herramienta de engargolado final se le asigna un desplazamiento de sistema de coordenadas Figura 3.66 y una fuerza vectorial con dirección negativa al eje y Figura 3.67, también se asigna una restricción de cuerpo rígido Figura 3.68 para restringir todos sus movimientos y rotaciones la única excepción será dejar libre el eje y.

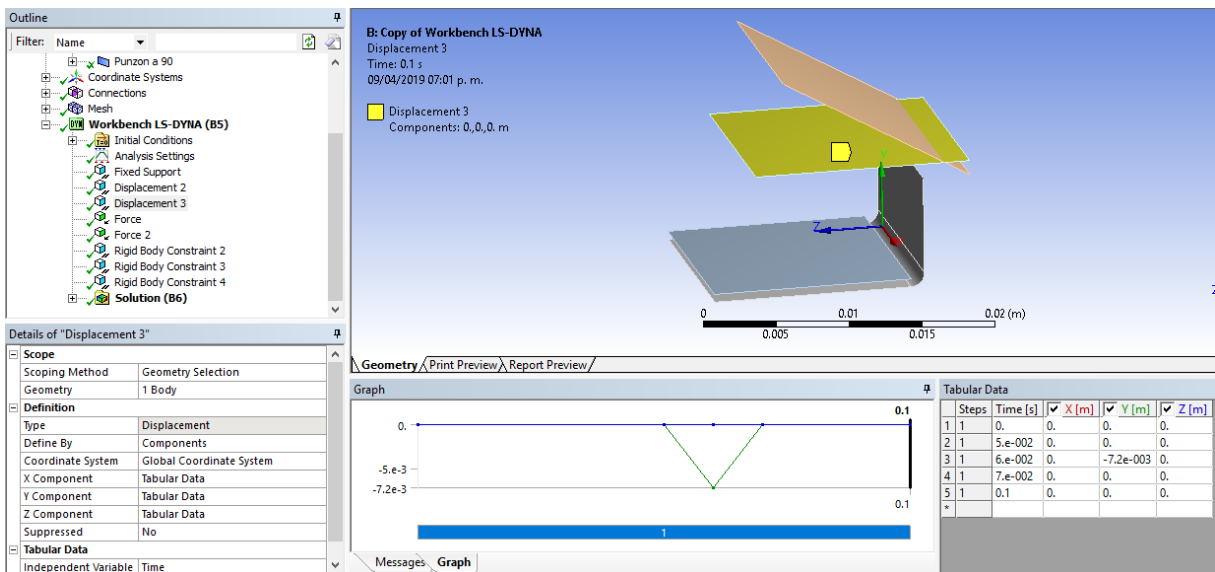


Figura 3.66.- Desplazamiento negativo al eje y, engargolado final *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

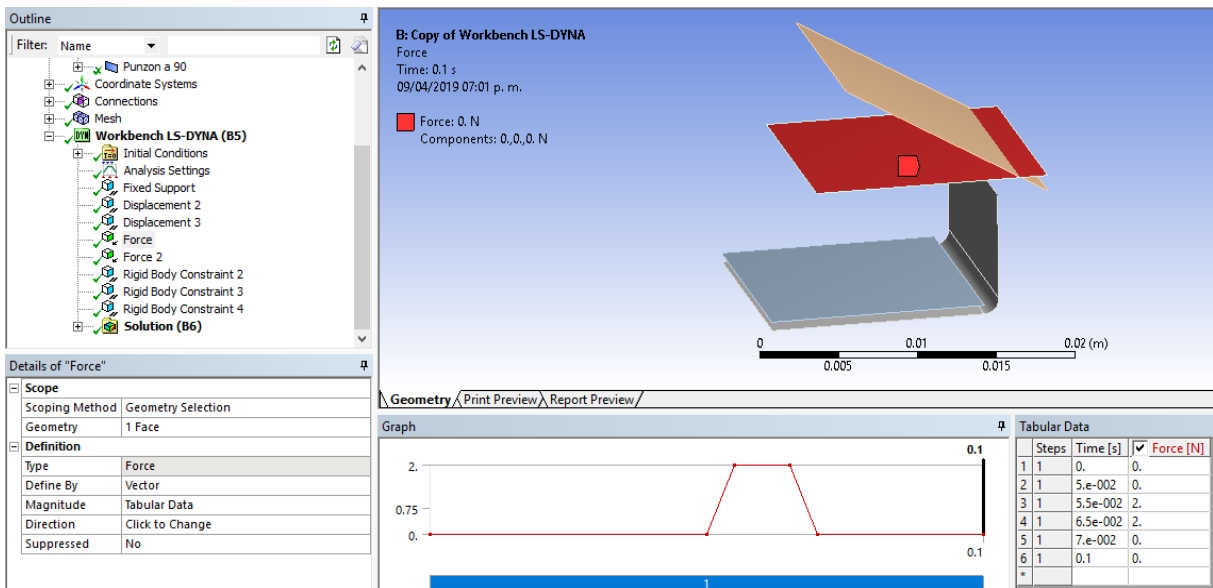


Figura 3.67.- Fuerza con dirección vectorial negativa al eje y, engargolado final *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

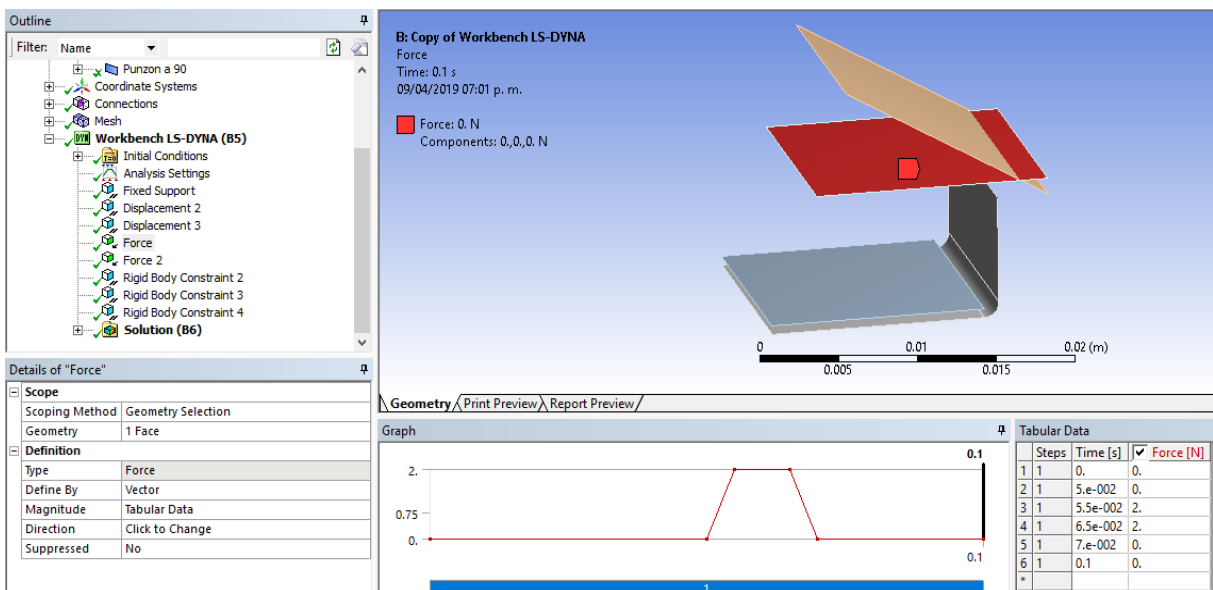


Figura 3.68.- Restricción de cuerpo rígido, engargolado final *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la lámina interior se asigna una restricción de cuerpo rígido Figura 3.69, para restringir todos sus movimientos y rotaciones.

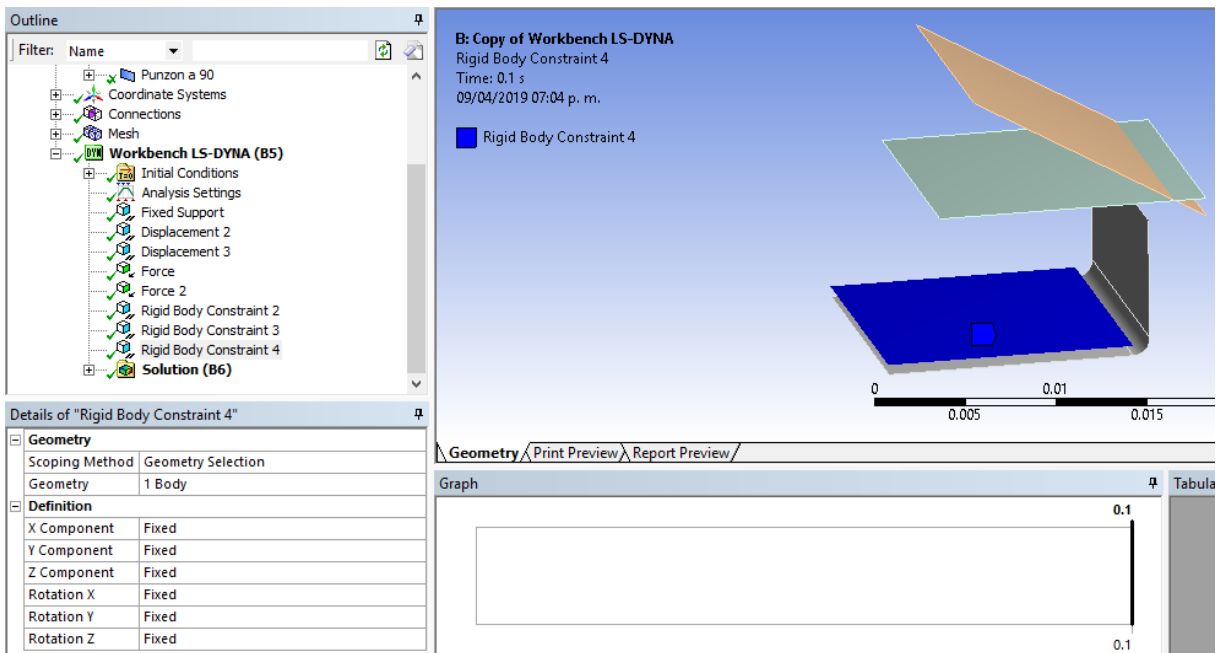


Figura 3.69.- Restricción de cuerpo rígido, lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.3.6 Configuración de *SETUP Table Hemming*

De igual forma se realiza la configuración del análisis para el método de *Table Hemming*, Figura 3.70, Se coloca 0.1 el tiempo de final de la simulación y también se colocará el número de CPUs que tenga la computadora en el caso de estudio serán 2.

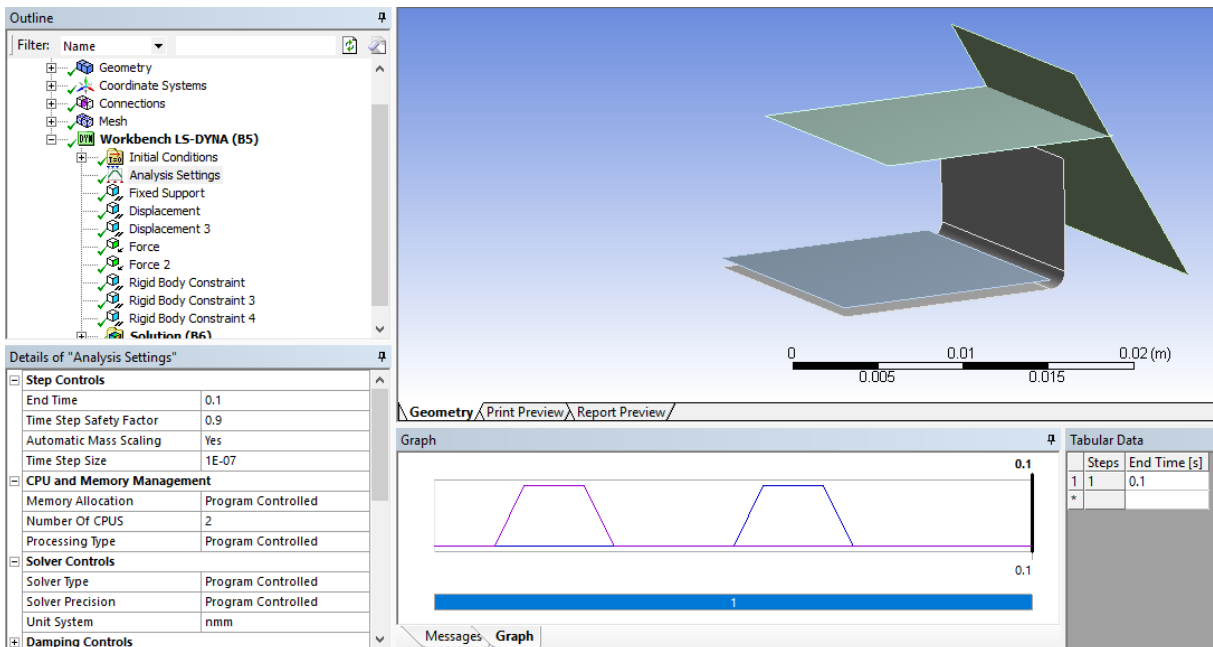


Figura 3.70.- Configuración del análisis, *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Continuando con la configuración es necesario colocar los tipos de fijación, fuerzas y movimientos que tendrán las piezas.

A la cara inferior de la lámina de prueba se colocará un *Fixed Support* Figura 3.71 que es igual a un empotramiento para evitar que se mueva la pieza de esa posición simulando de esta manera la base en donde se coloca las pruebas experimentales.

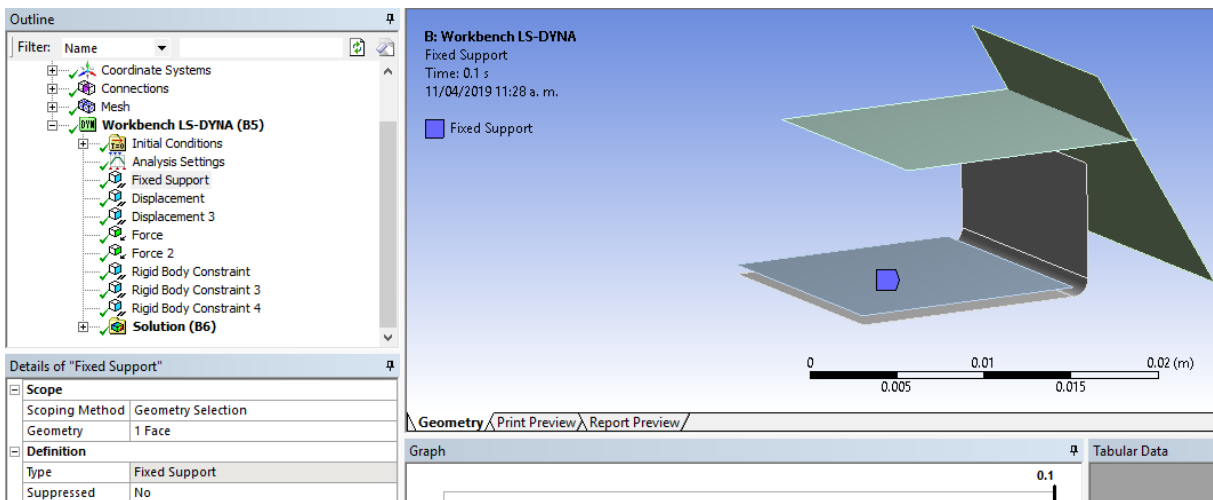


Figura 3.71.- Fixed Support *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la herramienta de pre-engargolado se le asigna un desplazamiento de sistema de coordenadas Figura 3.72 y una fuerza vectorial con dirección vectorial positiva al eje z Figura 3.73 también se asigna una restricción de cuerpo rígido Figura 3.74 para restringir todos sus movimientos y rotaciones la única excepción sería dejar libre el eje z.

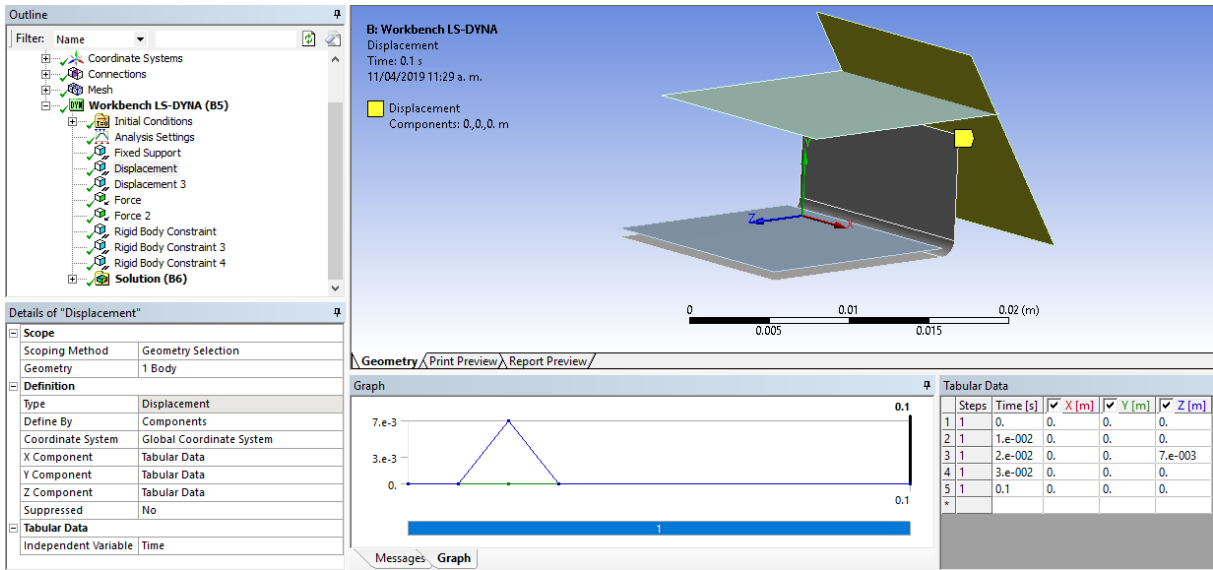


Figura 3.72.- Desplazamiento positivo al eje z, pre-engargolado *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

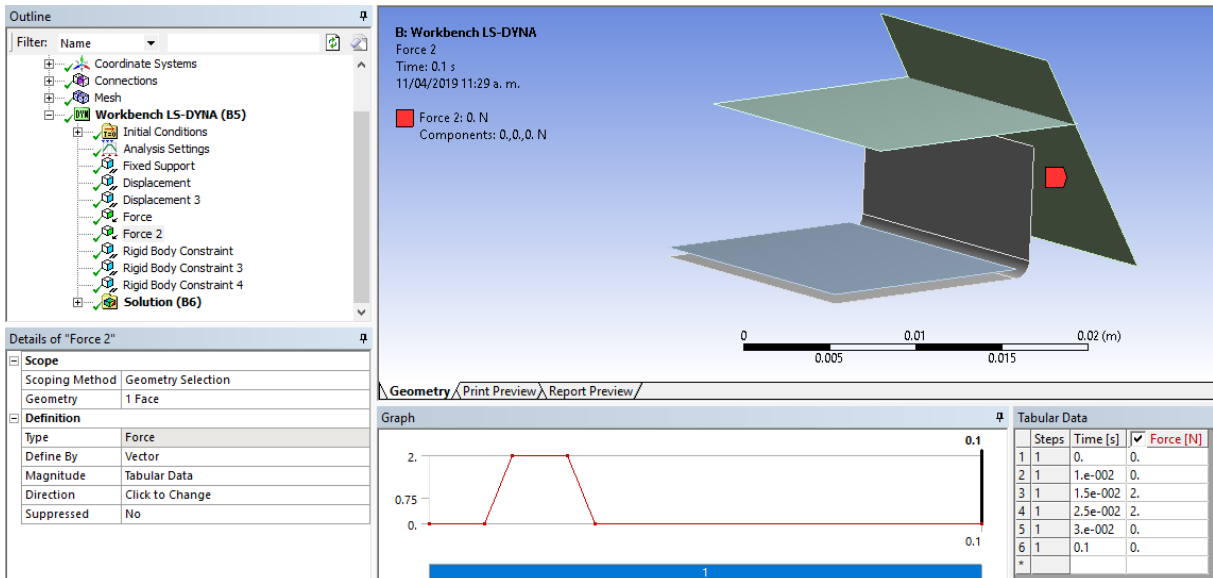


Figura 3.73.- Fuerza con dirección vectorial positiva al eje z, pre-engargolado *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

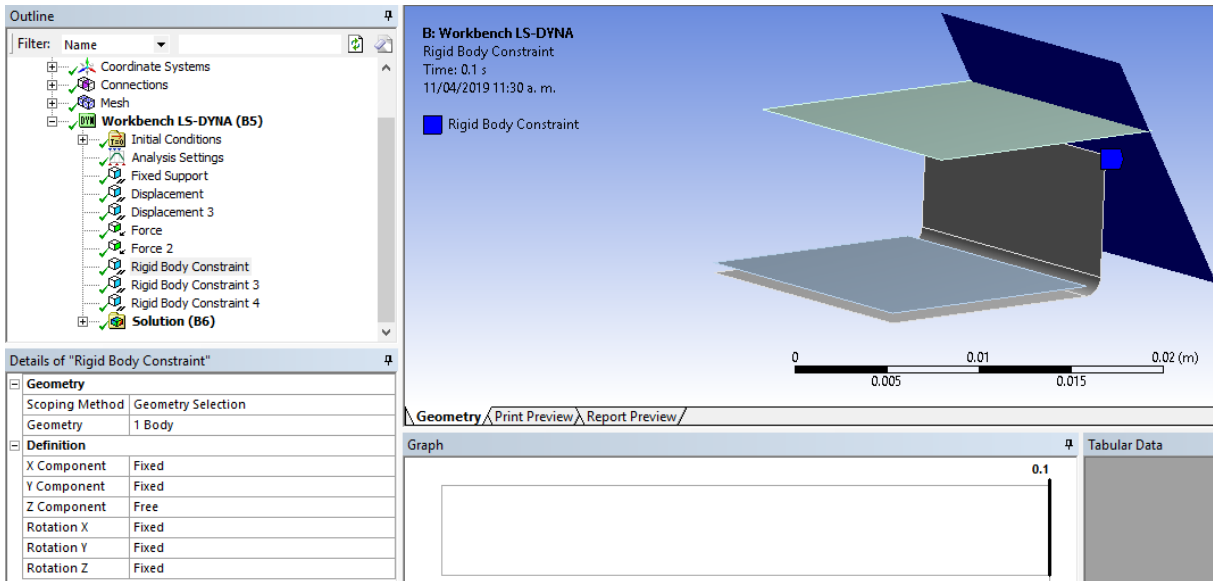


Figura 3.74.- Restricción de cuerpo rígido, pre-engargolado *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la herramienta de engargolado final se le asigna un desplazamiento de sistema de coordenadas Figura 3.75 y una fuerza vectorial con dirección negativa al eje y Figura 3.76 también se asigna una restricción de cuerpo rígido Figura 3.77 para restringir todos sus movimientos y rotaciones la única excepción será dejar libre el eje y.

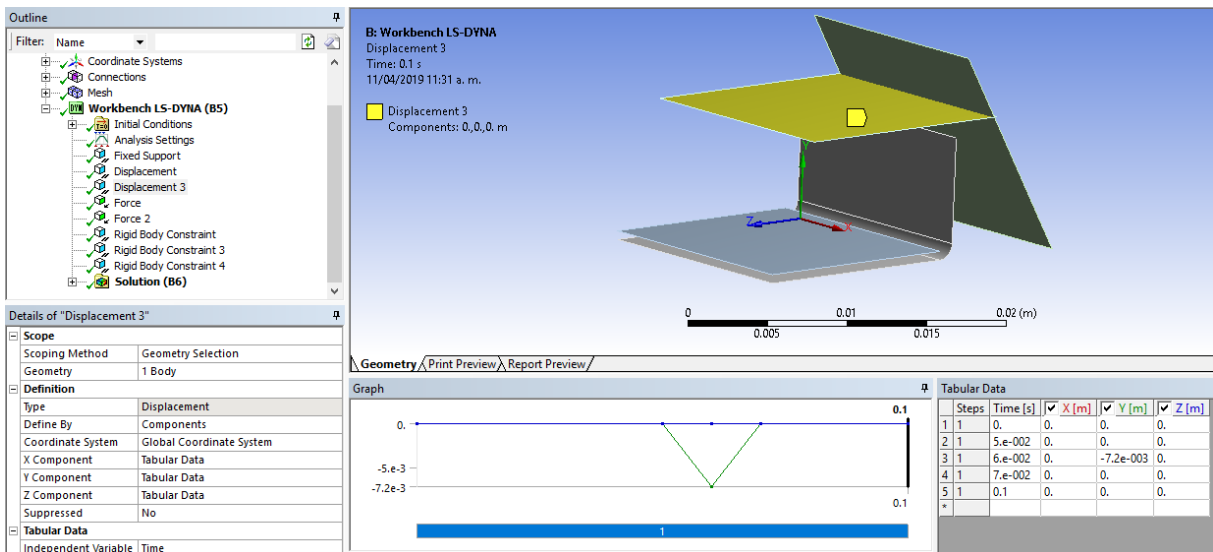


Figura 3.75.- Desplazamiento negativo al eje y, engargolado final *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

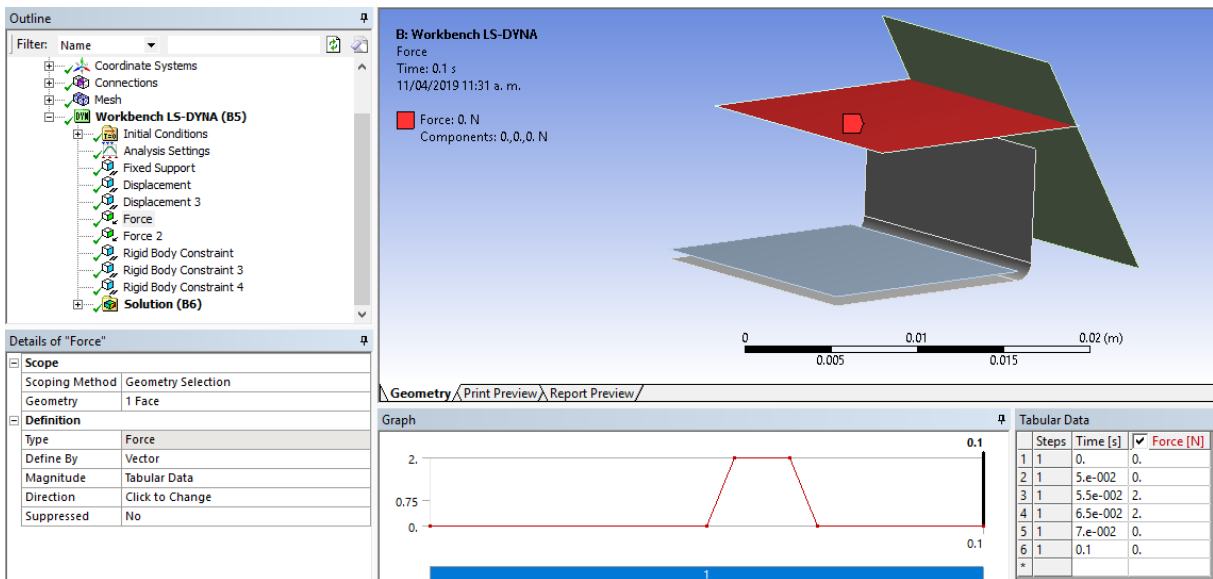


Figura 3.76.- Fuerza con dirección vectorial negativa al eje y, engargolado final *Table Hemming*.

ELABORACIÓN PROPIA.

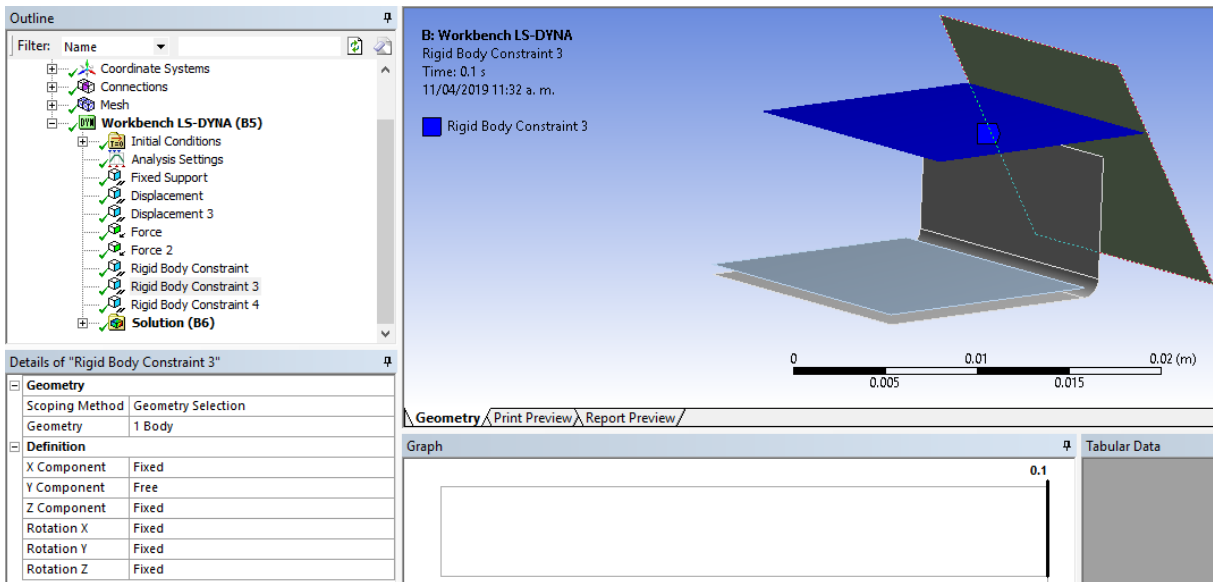


Figura 3.77.- Restricción de cuerpo rígido, engargolado final *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la lámina interior se asigna una restricción de cuerpo rígido Figura 3.78 para restringir todos sus movimientos y rotaciones.

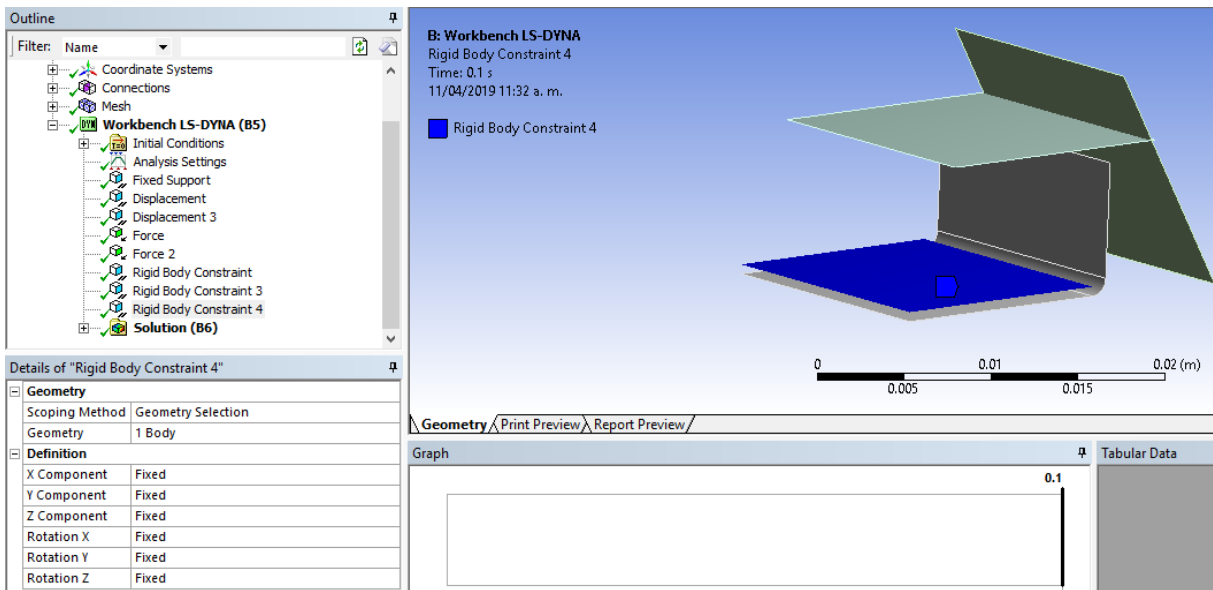


Figura 3.78.- Restricción de cuerpo rígido, lámina *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.3.7 Configuración de *SETUP Roll Hemming*

Para la configuración del análisis por el método de *Roll Hemming*, Figura 3.79, se coloca 0.1 el tiempo de final de la simulación y también se colocará el número de CPUs que tenga la computadora en como ya se mencionó serán 2.



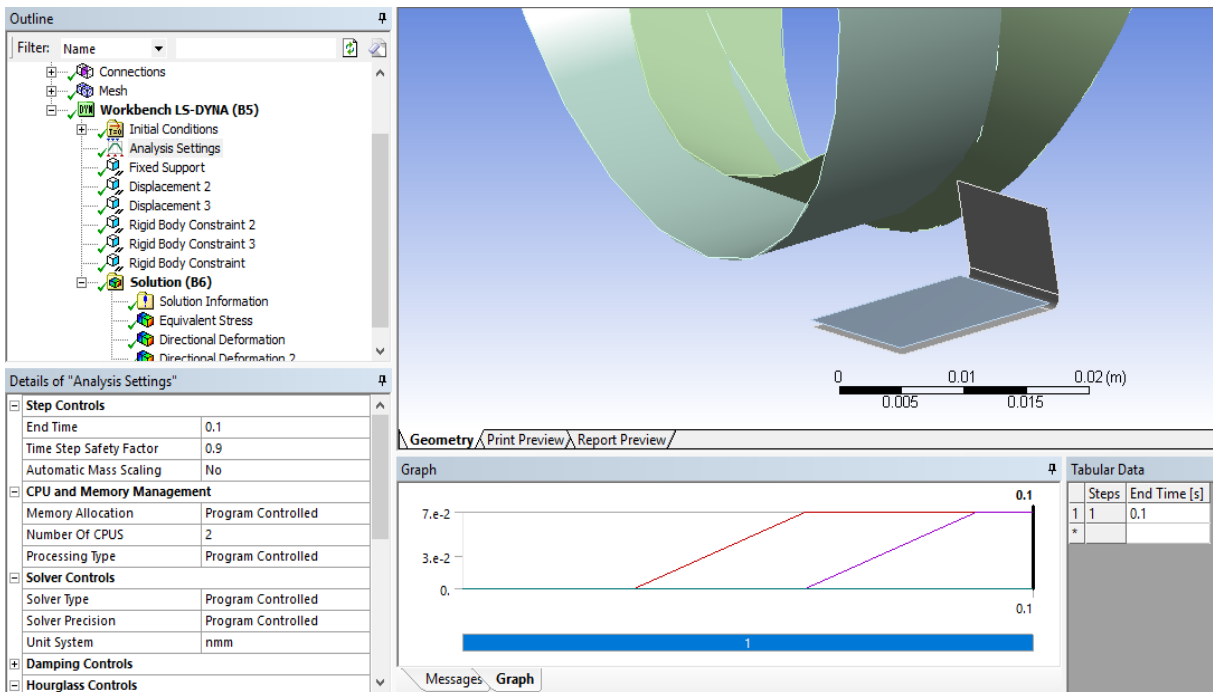


Figura 3.79.- Configuración del análisis *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Continuando con la configuración es necesario colocar los tipos de fijación, fuerzas y movimientos que tendrán las piezas. A la cara inferior de la lámina de prueba se colocará un *Fixed Support* Figura 3.80 que es igual a un empotramiento para evitar que se mueva la pieza de esa posición simulando de esta manera la base en donde se coloca las pruebas experimentales.

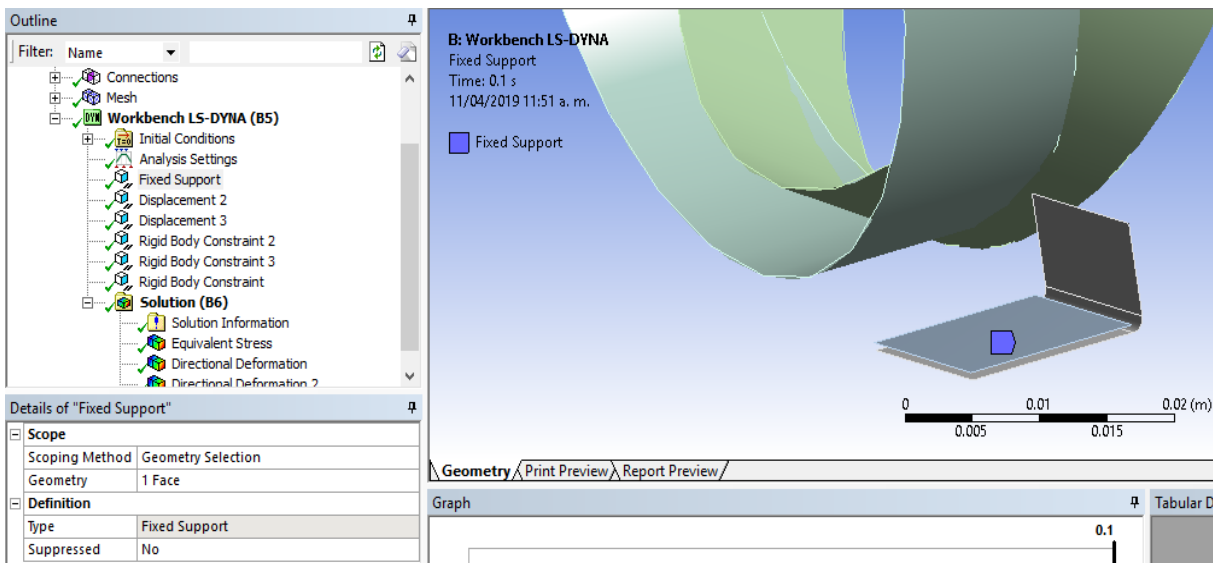


Figura 3.80.- Fixed Support, *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la herramienta de pre-engargolado se le asigna un desplazamiento de sistema de coordenadas Figura 3.81 en el eje x positivo y asignamos una restricción de cuerpo rígido Figura 3.82 para restringir todos sus movimientos y rotaciones la única excepción sería dejar libre el eje x.

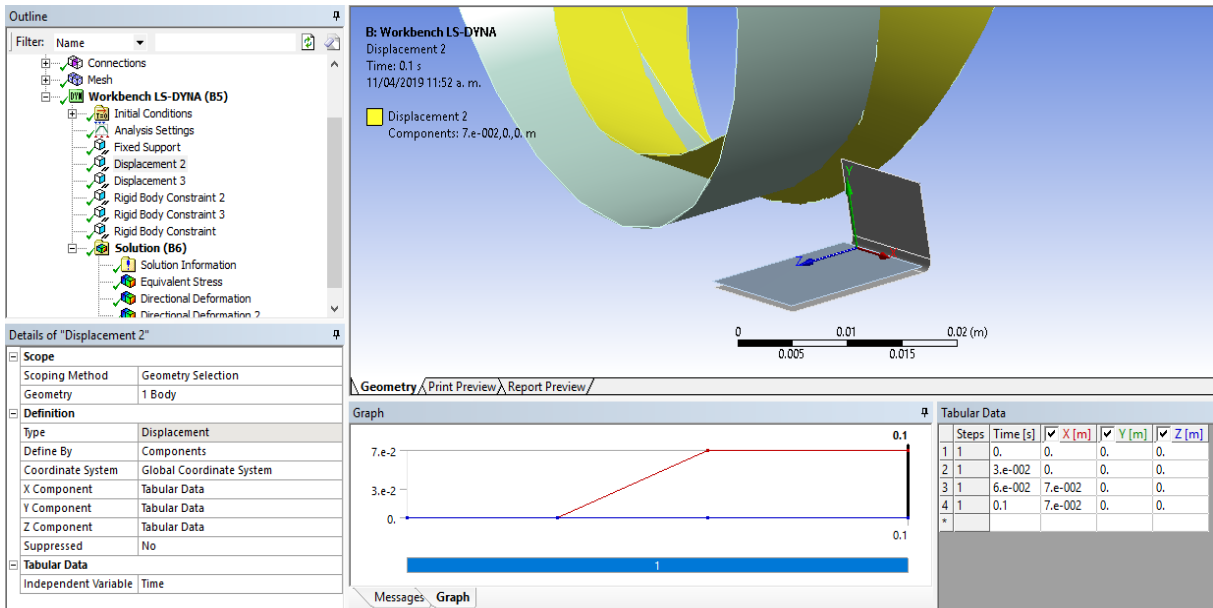


Figura 3.81.- Desplazamiento positivo al eje x, pre-engargolado *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

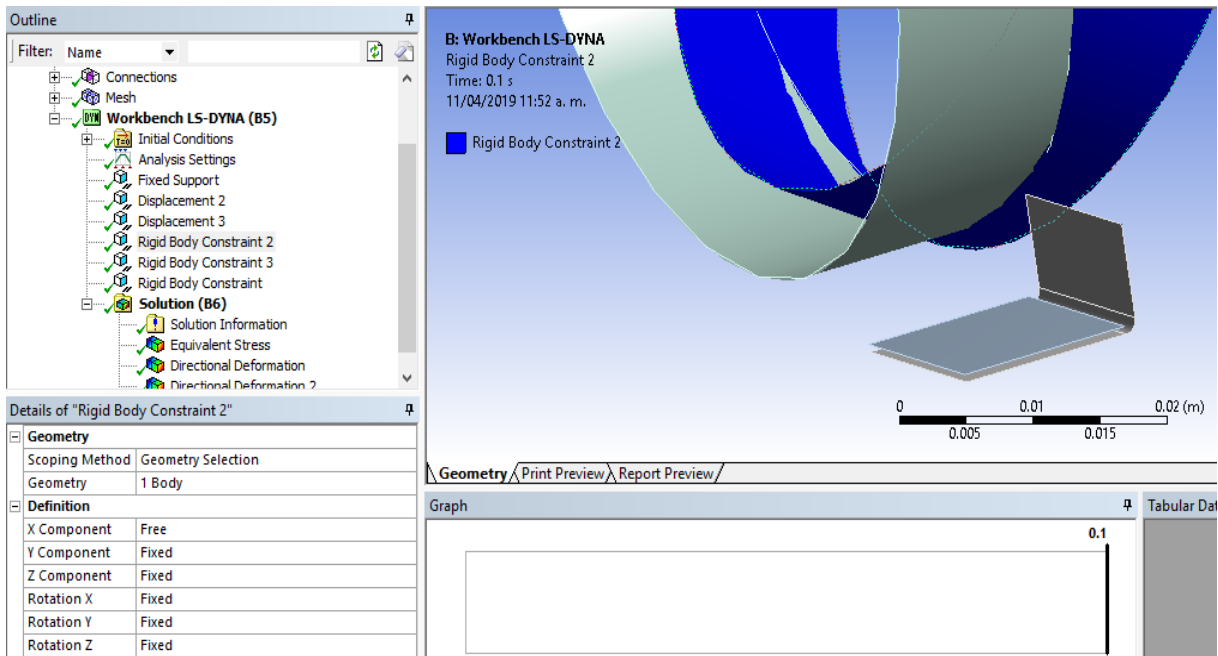


Figura 3.82.- Restricción de cuerpo rígido, pre-engargolado *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la herramienta de engargolado final se le asigna un desplazamiento de sistema de coordenadas Figura 3.83 en el eje x positivo y asignamos una restricción de cuerpo rígido Figura 3.84 para restringir todos sus movimientos y rotaciones la única excepción será dejar libre el eje x.

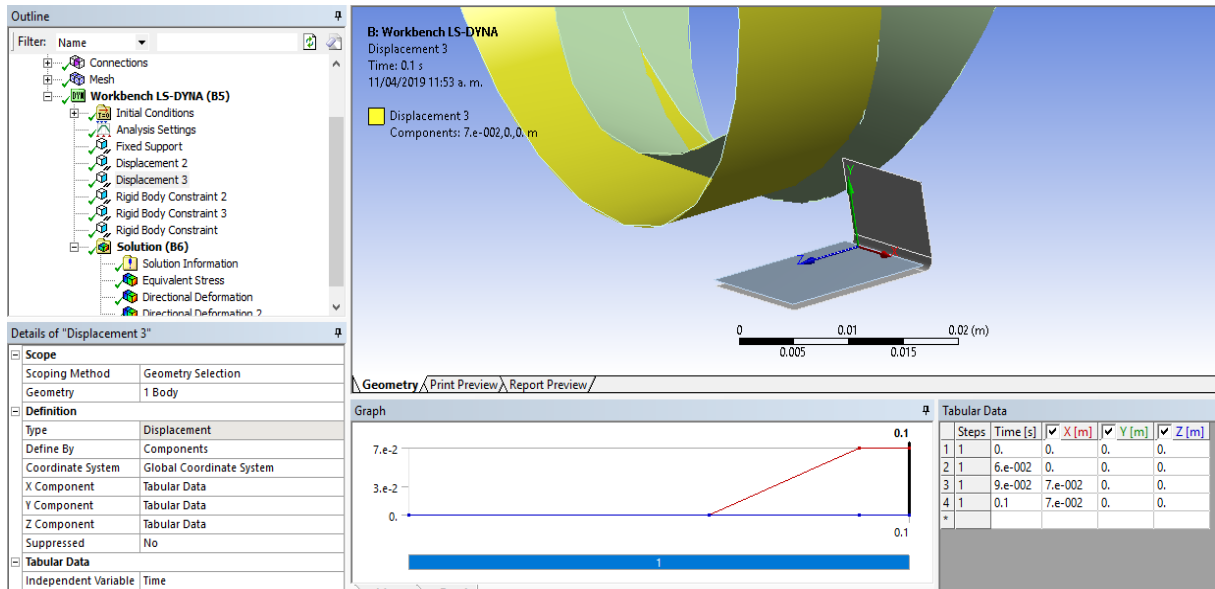


Figura 3.83.- Desplazamiento positivo al eje x, engargolado final *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

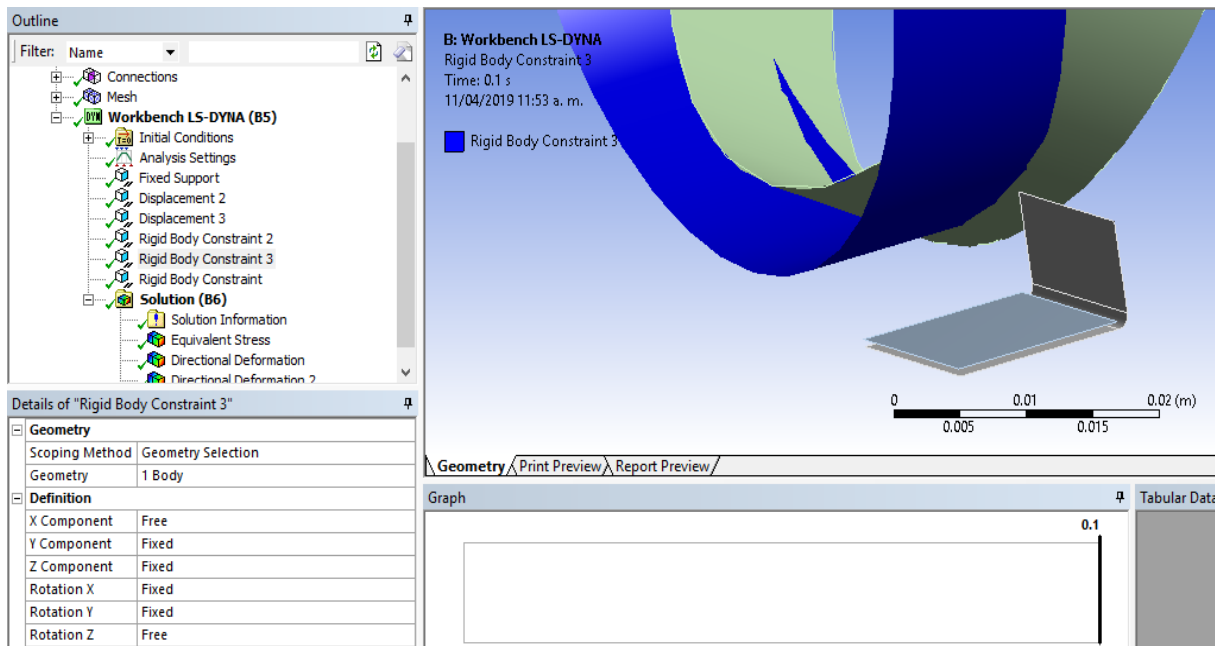


Figura 3.84.- Restricción de cuerpo rígido, engargolado final *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la lámina interior se asigna una restricción de cuerpo rígido Figura 3.85 para restringir todos sus movimientos y rotaciones.

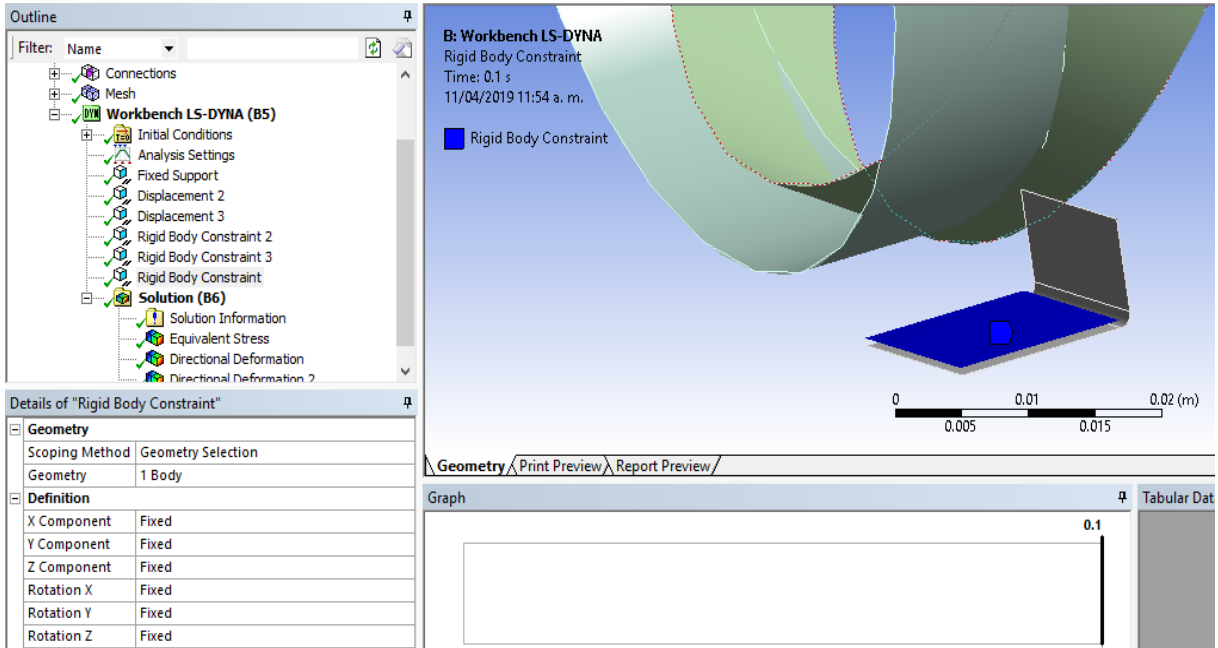


Figura 3.85.- Restricción de cuerpo rígido lámina interior. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.3.8 Configuración de solución

En la sección de solución, se configura según los valores analizados para el caso de estudio.

En la parte superior se encuentra, el botón de “Stress” Figura 3.86, posteriormente se selecciona *Equivalent Stress de Von misses* (Se señalan todos los cuerpos).

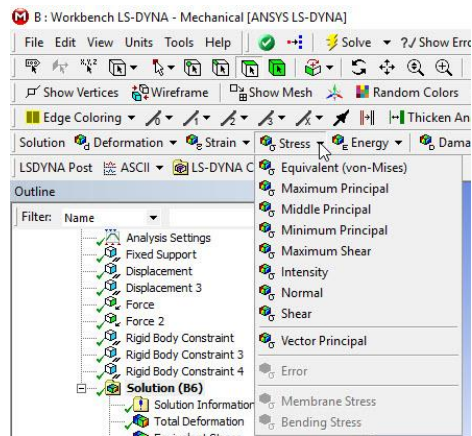


Figura 3.86.- Configuración de resultados de solución, esfuerzo de VON Misses, Stress.

Así mismo, en la parte superior se encuentra el botón de “*Deformation*” Figura 3.87, donde se deberán seleccionar las siguientes opciones.

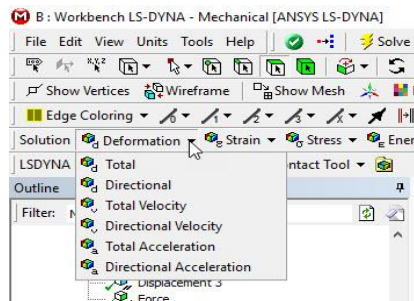


Figura 3.87.- Configuración de resultados de solución, *Deformation*.

- Total *Deformation* y se señalan todos los cuerpos, con esta opción se obtendrá el valor máximo de deformación de todas las piezas.
- Direccional *Deformation* y se señala únicamente la cara superior de la lámina de pruebas Figura 3.88, donde se debe indicar que lo mida en la orientación del eje Y.

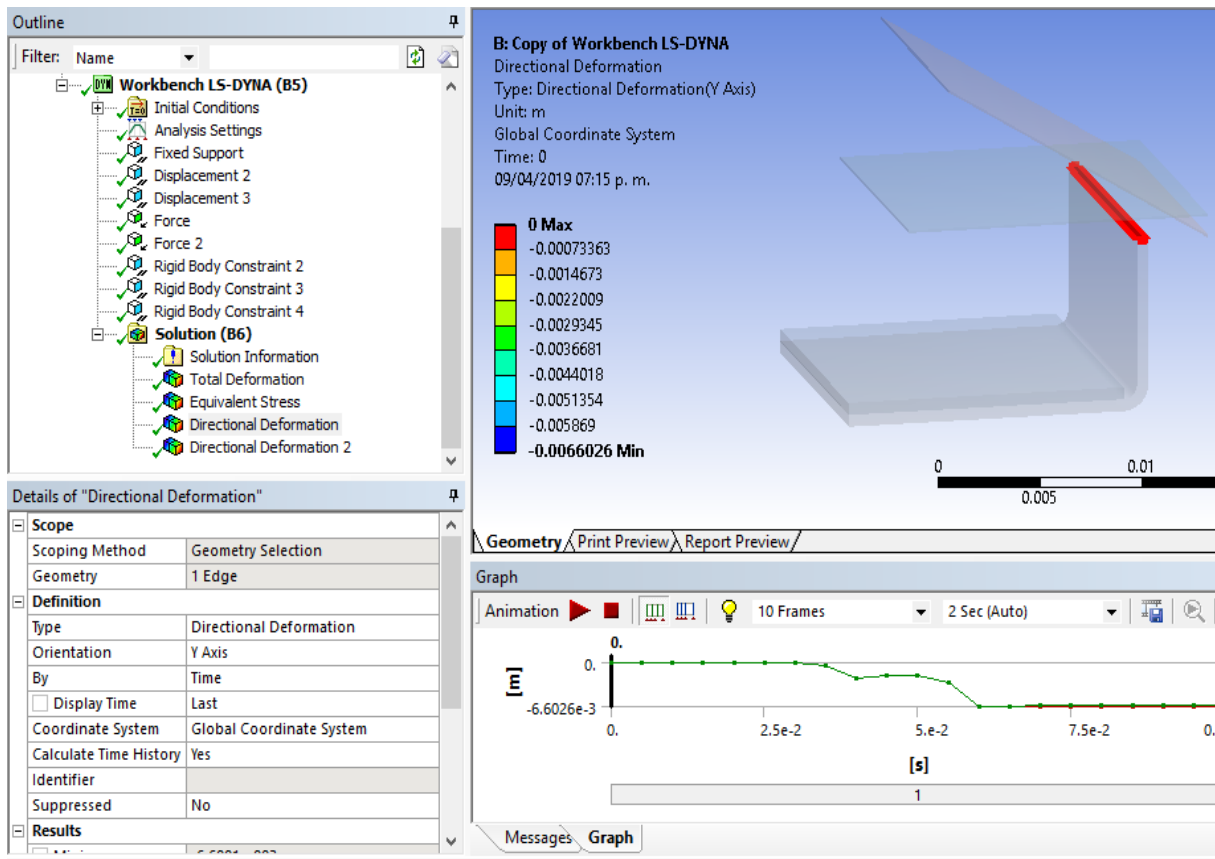


Figura 3.88.- Cara superior de la lámina de pruebas. ELABORACIÓN PROPIA.

- Direccional *Deformation 2* y se señala únicamente la cara superior de donde empieza el radio de curvatura de la lámina de pruebas Figura 3.89, se indica que se tome medida en la orientación del eje Z.

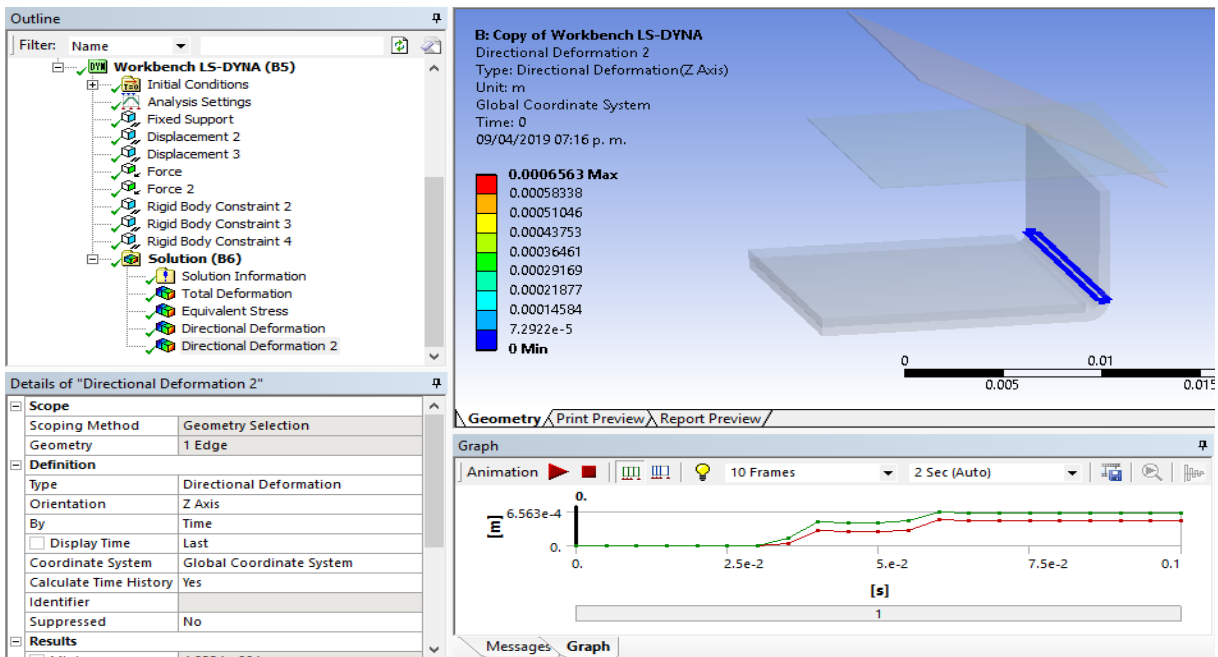



Figura 3.89.- Cara superior de donde empieza el radio de curvatura de la lámina de pruebas. ELABORACIÓN PROPIA.

Una vez que se ha terminado la configuración del análisis, se debe proceder a realizar el análisis, la forma de verificar que la configuración está completa, es revisar que los apartados se encuentren palomeados en verde, Figura 3.90, una vez que se cumpla esta condición es posible proceder a dar clic en Solve  para obtener los resultados de la simulación.

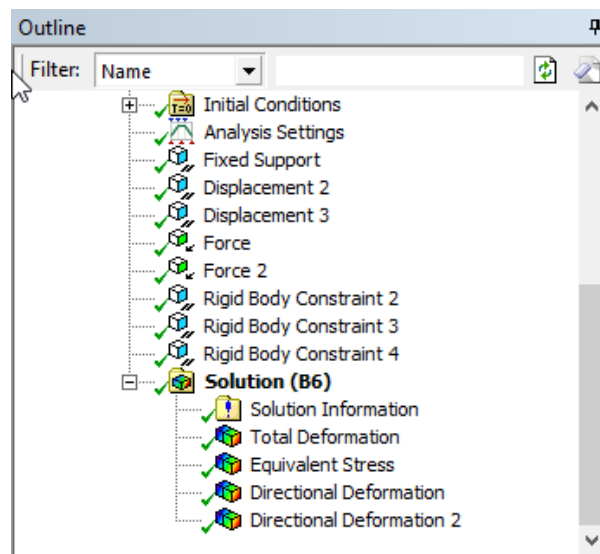


Figura 3.90.- Configuración completa con paloma verde.

### 3.4 Validación

#### 3.4. 1. Experimentación en prototipo de máquina para engargolar.

En el presente trabajo, se reportan los resultados de una serie de diseños de experimentos (DOE) desarrollados con el fin de identificar las variables que presentan mayor influencia en los parámetros de calidad del proceso de engargolado. El diseño planteado considera tres tipos de engargolado, *Die Hemming*, *Table Hemming* y *Roll Hemming*, donde, para cada uno de los procesos se realizó un diseño de experimentos para probetas obtenidas a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de rolado, dando como resultado, nueve diseños de experimento  $2^k$  considerando tres variables geométricas, para una suma total de 72 pruebas experimentales.

Para el estudio se utilizaron láminas de aluminio automotriz de la serie 6000 (Al-6011) [14], cuyas propiedades se enlistan en la Tabla 3.1 y su composición [43] se enlistan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas del material. ELABORACIÓN PROPIA.

| Propiedad                   | Valor                  |
|-----------------------------|------------------------|
| Densidad                    | 2770 Kg/m <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad       | 70 GPa                 |
| Razón de Poisson            | 0.3                    |
| Constante de endurecimiento | 533 MPa                |
| Exponente de endurecimiento | 0.261                  |
| Resistencia a la cedencia   | 151 MPa                |
| Exponente de Barlat         | 8                      |
| Coefficiente Lankford 0°    | 0.780                  |
| Coefficiente Lankford 45°   | 0.527                  |
| Coefficiente Lankford 90°   | 0.599                  |

Tabla 3.2. Composición del aluminio 6011 [43]. ELABORACIÓN PROPIA.

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| Aluminio, Al  | <b>92.5 - 98.4 %</b> |
| Cromo, Cr     | <b>&lt;=0.30 %</b>   |
| Cobre, Cu     | <b>0.40 - 0.90 %</b> |
| Hierro, Fe    | <b>&lt;=1.0 %</b>    |
| Magnesio, Mg  | <b>0.60 -1.2 %</b>   |
| Manganeso, Mn | <b>&lt; = 0.80 %</b> |



|              |             |
|--------------|-------------|
| Niquel, Ni   | <= 0.20 %   |
| Otras        | <= 0.05 %   |
| Otras, total | <= 0.15 %   |
| Silicio, Si  | 0-60 -1.2 % |
| Titanio, Ti  | <= 0.20 %   |
| Zinc, Zn     | <= 1.5 %    |

Los factores que se enlistan a continuación fueron considerados como variables de entrada para cada uno de los diseños de experimentos realizados:

- **Altura de la ceja**, Figura 3.91 se refiere a la medida de la ceja en referencia a la base del engargolado, para el estudio se consideran valores de 10 mm como altura máxima y 7 mm como mínima, debido a que tales valores generan una mejor calidad del engargolado de acuerdo a la literatura consultada [15]. Se analiza este parámetro ya que la medida de la ceja incrementa o disminuye la calidad superficial del engargolado.

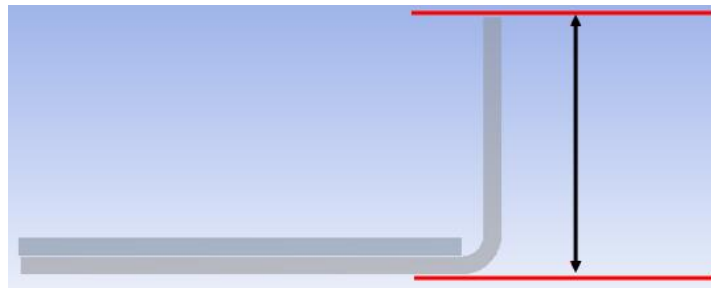


Figura 3.91.- Altura de ceja. ELABORACIÓN PROPIA.

- **Ángulo de pre-engargolado**, Figura 3.92 Esta orientación representa un paso de engargolado, dependiendo la cantidad de orientaciones que se tenga en la herramienta es la cantidad de paso que tendrá el proceso, es un parámetro cuyo valor depende de la referencia que se utilice, regularmente, las dos referencias más comunes son: la ceja inicial ( $\theta_1$ ) y el panel interior ( $\theta_2$ ). En la literatura consultada se reporta el uso de ángulos en un rango de  $30^\circ$  a  $60^\circ$ , comúnmente tomando como referencia la ceja inicial.

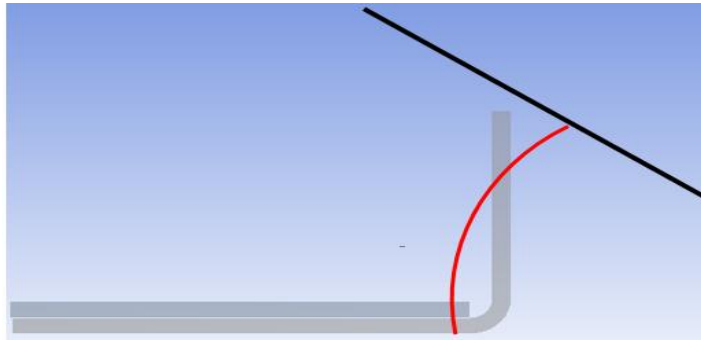


Figura 3.92.- Angulo de engargolado. ELABORACIÓN PROPIA.

- **Ubicación de la herramienta**, se refiere a la alineación o desfase del centro de gravedad del formador con el borde de la ceja inicial, donde 0 representa el centro de gravedad alineado al borde de la ceja y 10 mm representan un desfase hacia afuera de la ceja, los valores utilizados fueron considerados como hipótesis de que la variación tiene influencia en la calidad del engargolado, aplica para los métodos *die hemming* y *table hemming*.

Es posición inicial de trabajo de la herramienta que realizara la operación, esta posición está compuesta de diferentes distancias que se contemplan.

- **Distancia vertical (DV):** Es la distancia vertical que tiene el punto inferior de la herramienta con respecto al plano horizontal de trabajo esta distancia está representada de color rojo (Figura 3.92) puede cambiar su uso dependiendo el proceso.
  - En *Die Hemming* representa la carrera que tendrá la herramienta hacia el material de pruebas.
  - En *Table Hemming* representa la altura fija que la que la herramienta deberá respetar durante su desplazamiento horizontal.
- **Distancia horizontal (DH):** Es la distancia horizontal que tiene el punto inferior de la herramienta con respecto al plano vertical de la superficie de la pieza esta distancia está representada de color amarillo (Figura 3.93) puede cambiar su uso dependiendo el proceso.

- En *Die Hemming* representa la separación horizontal fija que la herramienta deberá respetar durante su desplazamiento vertical.
- En *Table Hemming* representa la carrera que tendrá la herramienta hacia nuestro material de pruebas.

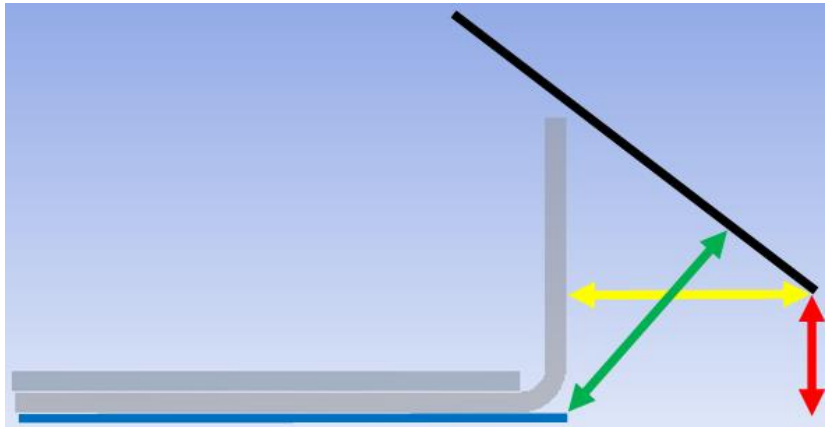


Figura 3.93.- Posición de la herramienta. ELABORACIÓN PROPIA.

- ***Diámetro del rodillo***, indica el diámetro exterior del rodillo, los valores considerados fueron tomados como referencia de estudios anteriores por demostrarse que al exceder el rango se presentan defectos en el proceso de engargolado [16] solo aplica para el método *roll hemming*. Este parámetro es esencial para el proceso de *Roll Hemming* porque significa que el rodillo tendrá mayor o menor contacto superficial con la pieza (Figura 3.94). Al variar el diámetro tiene el efecto de incrementar o disminuir las ondas o arrugas en la zona de deformación a lo largo de la pieza, este efecto se presenta en los pasos de pre-engargolado y se conserva en el paso final de engargolado.

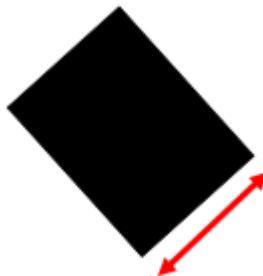


Figura 3.94.- Diámetro del rodillo. ELABORACIÓN PROPIA.

Para llevar a cabo los diseños de experimentos, se determinaron valores máximos y mínimos de los parámetros de entrada antes mencionados, mismos que se observan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Variables de entrada utilizadas en los diseños de experimentos. ELABORACIÓN PROPIA.

| Variables               | Valor  |        | Método     |
|-------------------------|--------|--------|------------|
|                         | Mín.   | Máx.   |            |
| Altura de ceja          | 7 mm   | 10 mm  | DH, TH, RH |
| Pre-engargolado         | 30°    | 60°    | DH, TH, RH |
| Posición de herramienta | 0      | 10 mm  | DH, TH,    |
| Diámetro del rodillo    | 1.5 in | 2.5 in | RH         |

De la Tabla 3.3, *DH* es *Die Hemming*; *TH* es *Table hemming* y *RH* es *Roll hemming*.

### 3.4.1.1. Desarrollos previos al proceso de engargolado.

Mediante un proceso de corte de la lámina se obtienen 20 muestras de 100 mm por 100 mm antes de someterlas al siguiente proceso se miden los espesores de 8 muestras, el promedio del espesor de dichas muestras es de 558.6  $\mu\text{m}$  si se compara con el certificado entregado por el proveedor que vendió el material, se concluye que el material es 99.76 % confiable ya que solo tiene una variación de 1.4  $\mu\text{m}$  lo que equivale a 0.24 % de variación. por lo que para el caso de estudio se utilizara el valor dado por el vendedor que corresponde a 0.56 mm o 560  $\mu\text{m}$ .

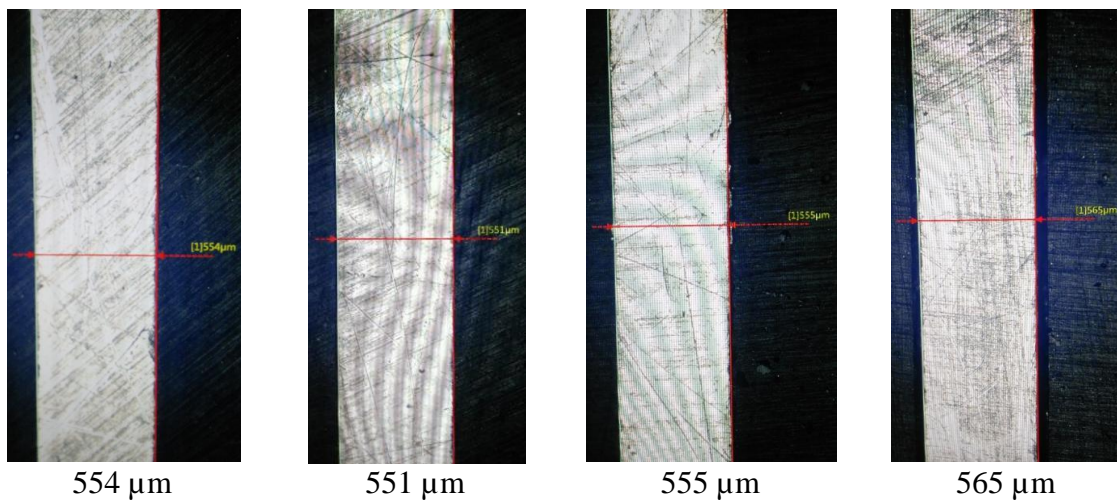


Figura 3.95.- Medición de espesores. ELABORACIÓN PROPIA.

Antes de comenzar con los análisis al proceso de engargolado, es necesario someter las muestras con las que se va a trabajar por un proceso de doblado de lámina a  $90^\circ$  mediante una prensa.

Después de haber sido transformadas se obtuvieron muestras para análisis de dimensiones y características de la geometría, midiendo el radio interno, radio externo y la altura de la ceja para 7 y 10 mm.

Para realizar dichas mediciones, las muestras son colocadas en un recipiente el cual se llena de un cerámico líquido que después de solidificar es pulido para una mejor visión de la geometría, después se obtiene una medición utilizando un microscopio digital VHX-5000, el cual está diseñado para realizar un barrido electrónico rápido a lo largo de la distancia focal de la muestra, reconociendo las áreas enfocadas para construir con ellas una imagen completamente nítida.

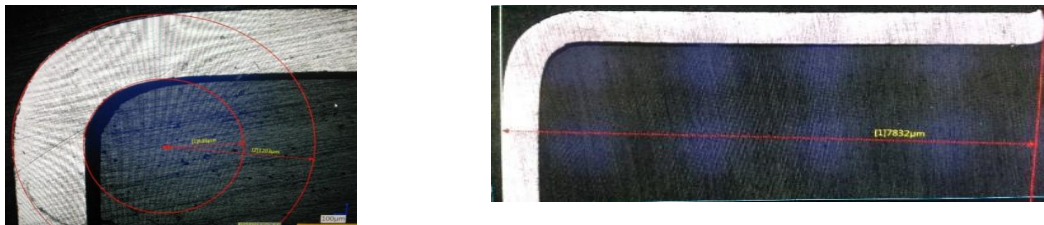


Figura 3.96.- Análisis de dimensiones y características de la geometría. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.4.1.2. Doblando de láminas en prototipo.

Considerando los diseños de experimentos planteado  $2^k$ , y al ser evaluadas tres variables para cada método, donde  $k$  representa el número de variables se obtienen 8 combinaciones para cada caso. De esta manera, el proceso de doblado de ceja (flanging), fue realizado a las 72 probetas utilizadas mediante el uso de una dobladora universal. Considerando las especificaciones del estudio, se realizaron probetas con cejas de 7 mm y 10 mm.

Una vez realizada la ceja en cada uno de los especímenes, se procedió a realizar la sujeción y alineamiento de la lámina y el herramental. Para cada caso, las longitudes de ceja, los ángulos de pre-engargolado y posición de la herramienta estuvieron especificados por el diseño de experimentos, los cuales se replicaron uno por cada ángulo de corte de la probeta respecto a la dirección de rolado ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ).

Para el caso del engargolado por *Die Hemming*, se realizó el pre-engargolado considerando un ángulo de 30° o 60°, mismo que fue dado por la orientación de la herramienta (formador) en contacto con la lámina engargolada. Para lograr el engargolado se aplicó presión verticalmente sobre la ceja del panel exterior, como puede observarse en la Figura 3.97.



Figura 3.97.- Pre-engargolado *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Después de realizar el pre-engargolado deseado, se ajustó la herramienta con los requerimientos para el engargolado final, es decir, la lámina y la herramienta en contacto plano. Una vez sujeta y preparada la probeta, se procedió a accionar la prensa aplicando carga de forma vertical hasta realizar el engargolado final, ver Figura 3.98.

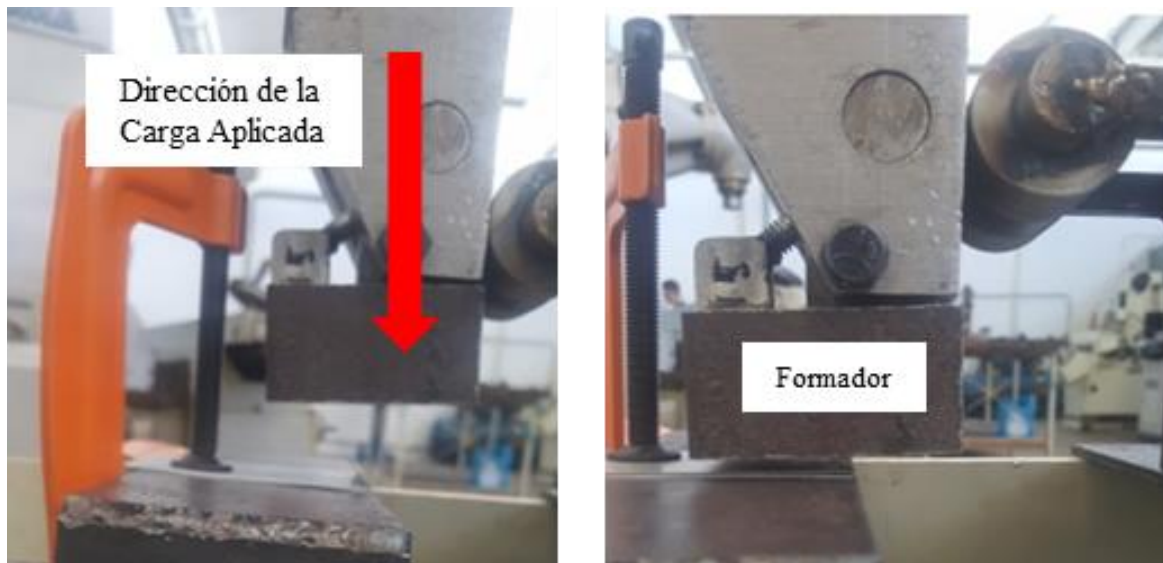


Figura 3.98.- Engargolado final *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Para los experimentos del método *Table Hemming*, inicialmente se sujetó la lámina y se alineo el herramental, para posteriormente realizar el pre-engargolado. Sin embargo, a diferencia del método anterior, el herramental en este proceso se mueve de forma horizontal para lograr el pre-engargolado, ver Figura 3.99.

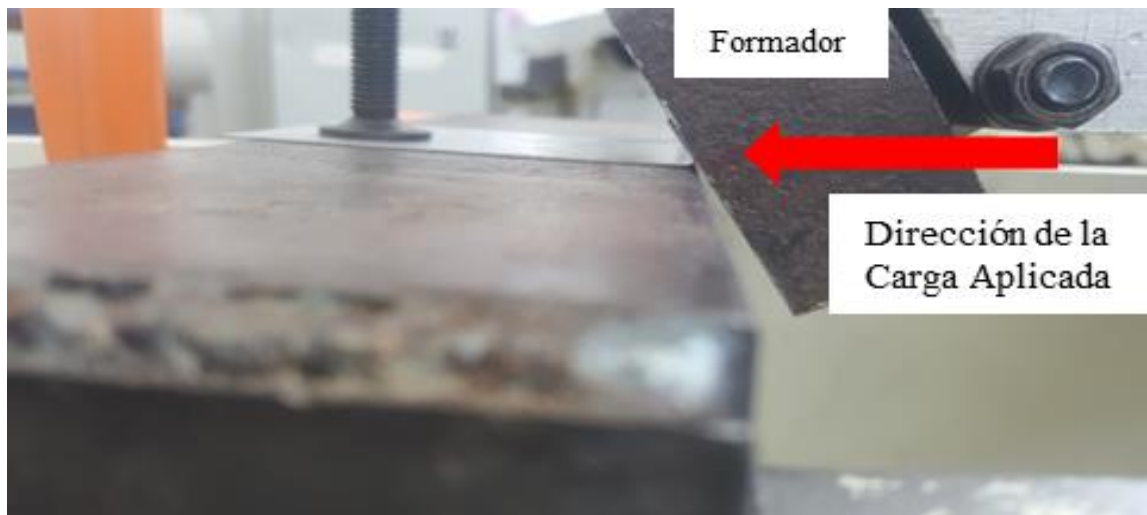


Figura 3.99.- Pre-engargolado *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Después de realizar el pre-engargolado requerido, se ajustó el ángulo de la herramienta para lograr el engargolado final, es decir, contacto plano (Figura 3.100). Para este propósito, la prensa aplica presión vertical sobre la lámina pre-engargolada.



Figura 3.100.- Engargolado final *Table Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

Por último, para el proceso de engargolado por rodillo, (*Roll-Hemming*) se consideraron la longitud de ceja, el ángulo de pre-engargolado y el diámetro del rodillo como variables de entrada para el diseño de experimentos.

En este proceso, tanto para el pre-engargolado como para el engargolado final, la herramienta (formador) avanza, guiando al rodillo de forma horizontal a lo largo de la ceja, ver Figura 3.101.

Para lograr el pre-engargolado, la configuración del rodillo se ajustó a 30° y 60° grados, mientras que para el engargolado final se utilizó un ángulo de 90° respecto a la vertical (Figura 3.102).

Para estudiar la influencia del diámetro del rodillo en la calidad del engargolado se utilizaron dos versiones, una con diámetro exterior de 1.5 in y otra de 2.5 in, considerando estos números por ser el promedio de valores registrados en la literatura consultada [1,2,4,7-9,14,17-19], tomando esto en consideración y según los requerimientos del DOE los rodillos formadores fueron adaptados a la estación de trabajo.





Figura 3.101.- Pre-engargolado *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.



Figura 3.102.- Engargolado final *Roll Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.4.2. Análisis mediante Microscopio.

Para poder realizar las mediciones de resultados experimentales mediante el microscopio, se optó por utilizar un sistema de montaje mediante acrílico. Lo anterior debido a que los sistemas de montaje en acrílico ofrecen un tiempo de curado corto, aproximadamente menor a 5 minutos lo cual es un beneficio en el aumento de rendimiento en el montaje y se recomiendan para montar muestras que sean sensibles a altas presiones y temperaturas.

Los sistemas de montaje además de que son rápidos son muy fáciles de utilizar sólo se requiere la combinación de dos componentes.

Para el caso de estudio se utilizaron productos de la marca internacional Buehler.

Los componentes utilizados son los siguientes:

1. SamplKwick Liquid Fast Cure Acrylic 20-3568.
2. SamplKwick Powder Fast Cure Acrylic 20-3562-025.
3. Los moldes de EPDM son copas de montaje circulares, flexibles y reutilizables para montaje moldeable.

Para poder hacer un molde de acrílico correcto se debe saber que por cada  $1\text{cm}^3$  de líquido 20-3568 se debe añadir  $1\text{cm}^3$  de polvo 20-3568. El procedimiento es relativamente sencillo ya que únicamente se requiere realizar la mezcla de los dos componentes y colocar las muestras en el molde EPDM, luego verter la muestra y esperar unos minutos a que la mezcla solidifique.

Una vez solidificado y creado el acrílico, se pule utilizando una lija de agua grado 1200 o 1500 con lo que se logrará una visión más limpia de la geometría

Una vez preparado el acrílico para la prueba se procede a realizar el ensamble de imágenes en 2D, las mediciones se llevaron a cabo utilizando un microscopio digital marca Keyence modelo VHX-5000 (Figura 3.103) facilitado por una empresa del sector automotriz (los números de serie del equipo son confidenciales).



Figura 3.103.- Microscopio digital VHX-5000.

#### Características del equipo:

- Profundidad de campo 20 veces mayor que los microscopios ópticos.
  - Las lentes, la cámara y el motor de gráficos están diseñados para optimizar la relación entre profundidad de campo, resolución y brillo.
- Observación multiangular.
- Captura de imagen, guarde imágenes y datos.
  - El disco duro de 500 GB permite que imágenes, videos y datos de medición se guarden en el sistema. Los archivos se pueden ver en una PC.
- Medición directamente en la pantalla.
  - Se pueden realizar mediciones dimensionales en el microscopio haciendo clic en el área a medir con el mouse y el dato se almacena como un archivo de imagen.
- Repetibilidad y mejor visualización.
  - Mecanismo de bloqueo para garantizar que la lente esté configurada en 0 grados.
- Capacidad sísmica.
  - Marco para el soporte de aluminio fundido a presión, resistencia a la vibración
- Sensor de ángulo de inclinación.
- Movimiento en eje Z.
  - La velocidad máxima de la etapa motorizada del eje Z en 17 mm/seg. Esta velocidad mejora el autoenfoco y composición de profundidad.
- Sistema de observación de ángulo libre (XYZ motorizado).
- Motor gráfico de última generación REMAX V.
- La cámara genera 50 cuadros por segundos, una gran cantidad de datos de imágenes con cada posición de enfoque.
- Alta resolución, imágenes de área ancha: Puntado de imagen ultra alta velocidad.
  - Como cualquier sistema óptico, a medida que crece el aumento, el campo de visión disminuye. El VHX incorpora una unión de imágenes utilizando un algoritmo con una etapa XY motorizada para mover y unir automáticamente imágenes adyacentes en tiempo real. Como resultado se obtiene una imagen con una vista general de alta resolución hasta 20,000 x 20,000 píxeles, mientras se evita cualquier desalineación típicamente asociada con otras técnicas de unión.
- Función autocorrección.

- Produce una imagen unida de alta calidad automáticamente.
- Ajustar los cambios de brillo que pueden resultar de aberraciones alrededor de la periferia de la lente.
- La resolución de la imagen se incrementará hasta en un 25%.
- Observación HDR de alta resolución de IC (1500X).
- Función HDR+.
  - La cámara captura múltiples imágenes a diferentes niveles de brillo variando la velocidad de obturación, y luego produce una imagen.
  - Con un alto nivel de tonalidad de color, esto permite una observación clara de los objetivos con deslumbramiento o bajo contraste, lo cual permite obtener imágenes con precisión, que no serían posible con los microscopios tradicionales. Consta de un nuevo algoritmo que permite representar con precisión los colores del blanco.
  - Hace que la observación sea más parecida a la vista.

Tabla 3.4. Ventajas de función HDR y desventajas del método convencional. ELABORACIÓN PROPIA.

| Método convencional   | Función HDR+   |
|---|--|
| Desventajas   | Ventajas   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● Utilizando 8 bits y usando un solo obturador se obtienen 256 niveles de tonalidad (método convencional).</li> <li>● El estrecho rango de niveles de brillo causa deslumbramiento en áreas que están sobresaturadas.</li> <li>● Los cambios sutiles en el contraste no se pueden visualizar debido a la resolución de color grueso.</li> <li>● Los colores difieren entre lo que ve el ojo humano y la imagen capturada.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Utilizando 16 bits y usando un obturador de velocidad variable se obtienen 65,536 niveles de tonalidad, función HDR en comparación con el método convencional.</li> <li>● Un rango más amplio de niveles de brillo disminuye el resplandor percibido.</li> <li>● Mejora las áreas de bajo contraste para mejorar los detalles.</li> <li>● Los colores naturales se reproducen con precisión.</li> </ul> |

Para poder completar el ensamble, como primer paso se requiere especificar el área o rango (Figura 3.104) en que va a trabajar el microscopio.

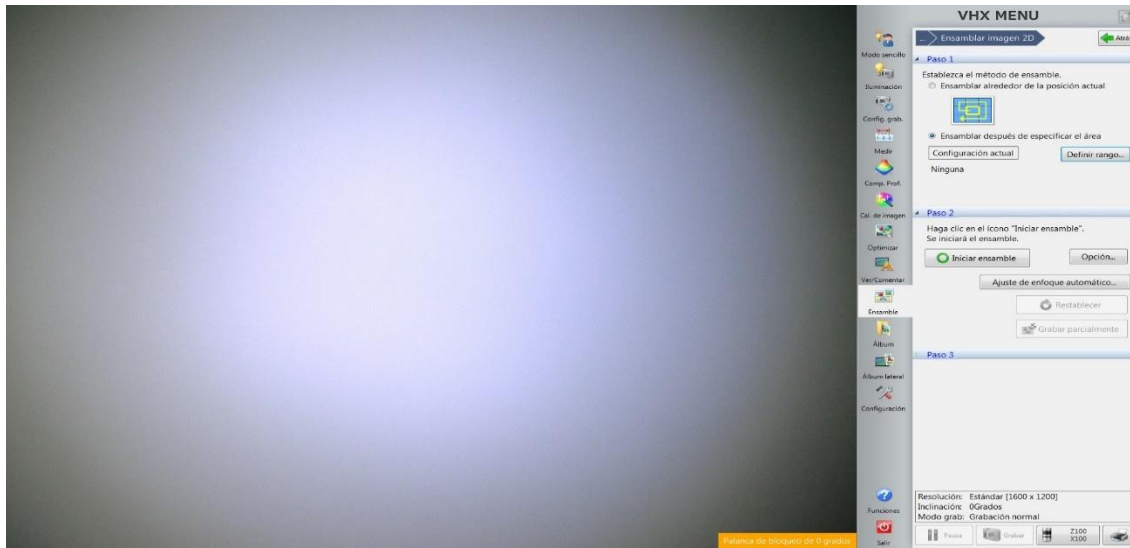


Figura 3.104.- Ajustes del Microscopio.

Se selecciona la cantidad de cuadros (Figura 3.105) necesarios para cubrir el área en la que se desea trabajar.

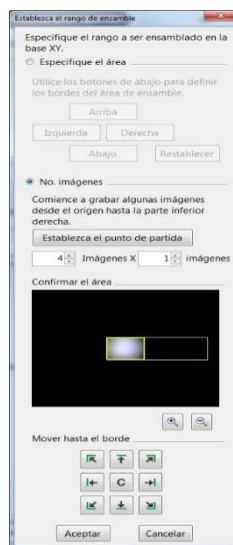


Figura 3.105.- Número de cuadros.

Únicamente en el área seleccionada se realizará un barrido electrónico rápido a lo largo de la distancia focal de la muestra, reconociendo las áreas enfocadas para construir con ellas una

imagen completamente nítida. Para finalizar el ajuste del ensamble en el paso 2 se necesita tener un mejor enfoque por ende se selecciona la casilla de “Ajuste de ejecución automática” (Figura 3.106) y se deja marcado el valor de medio “M”. Esto proporciona un enfoque intuitivo e instantáneo que satisface la necesidad universal de observaciones con aumento y nitidez.

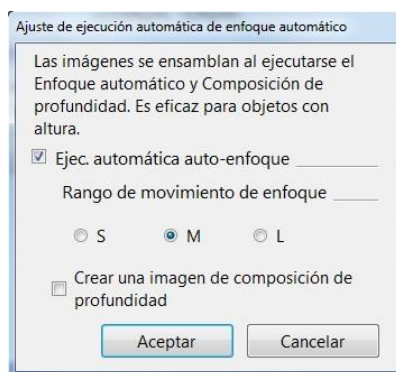


Figura 3.106.- Ajuste de ejecución automático.

Esta tecnología identifica los datos con el mejor enfoque para cada píxel y genera al instante en la pantalla una imagen ampliada totalmente enfocada, la alta resolución se obtiene utilizando luz de onda corta y la función HDR (alto rango dinámico) que captura varias imágenes a distintas velocidades de obturación, por ese motivo una vez que iniciemos el ensamble el microscopio, avisará que el lente del microscopio se moverá en un rango de 3112.5  $\mu\text{m}$  (Figura 3.107). Esto produce una imagen con una alta gradación de color, alta resolución y contraste agudo, lo que antes era imposible de obtener.

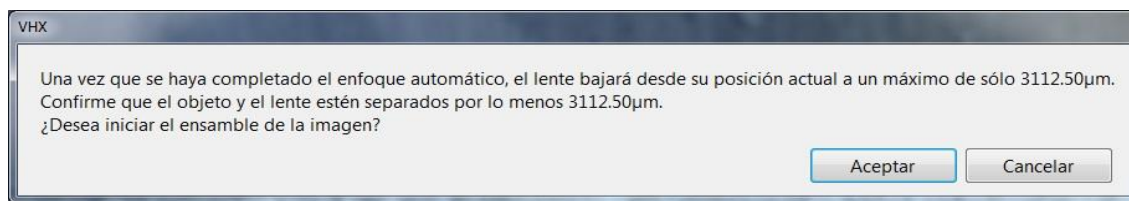


Figura 3.107.- Enfoque.

Los datos de medición se almacenan junto con el archivo de imagen para facilitar el intercambio de información, e incluso se pueden exportar los resultados como archivo CSV.

Una vez completado el ensamble, si este fue exitoso se debe seleccionar completar (Figura 3.108)



Figura 3.108.- Pieza examinada bajo el microscopio. ELABORACIÓN PROPIA.

Para generar los dimensionales de la imagen obtenida se selecciona la casilla “Medir”, en el caso de estudio se utilizó la opción de “Medición de plano” (Figura 3.109).

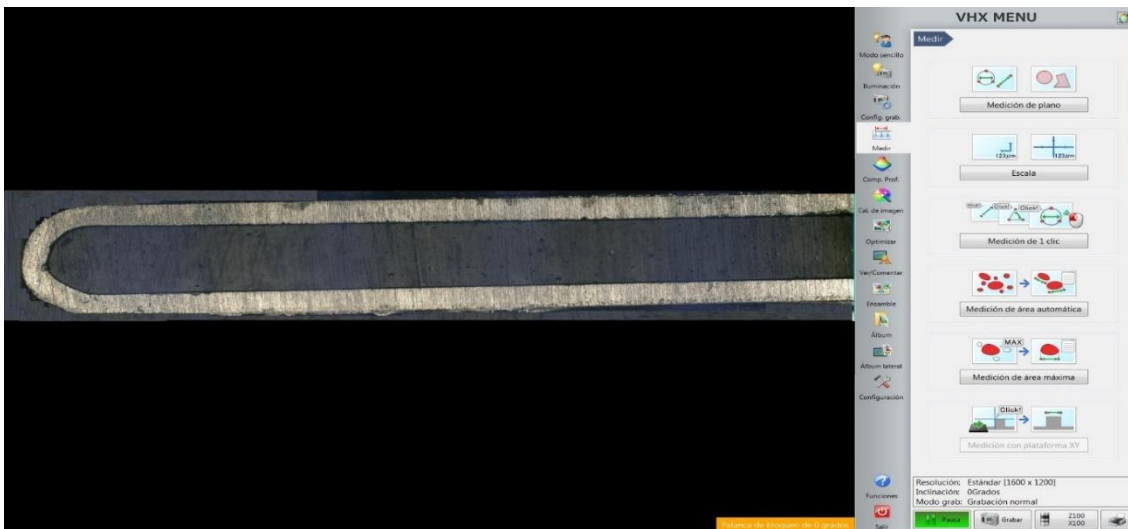


Figura 3.109.- Medición plano. ELABORACIÓN PROPIA.

Para obtener un dimensional con medidas en tamaño real se debe tener seleccionada la casilla “Mida la imagen original sin cambios en el tamaño”. En esta sección se encuentran todas las herramientas necesarias para hacer los estudios dimensionales.

Antes de realizar las pruebas experimentales en el prototipo, de los métodos de engargolado, es necesario obtener el valor real del dobléz de  $90^\circ$  para eso en este caso se pretende medir el radio interno y externo con la herramienta “Radios” para lo cual se requiere seleccionar 3 puntos del perímetro del dobléz de la lámina para que en esos 3 puntos genere un círculo, obteniendo así el valor del radio del círculo formado, para las consideraciones del estudio también se requiere conocer la altura de la ceja, esta medición se obtuvo utilizando la herramienta “Paralela”, primero se generan dos puntos por donde pasara la primera línea generada después se selecciona la posición en donde termina la medición esto generara una segunda línea paralela a la primera y con esto se obtendrá la distancia entre ambas líneas.

Una vez finalizado todas las pruebas experimentales del diseño de experimentos, se midió cada resultado utilizando las siguientes herramientas:

Para medir la ondulación o altura en la que se encuentra la punta superior de la ceja se utiliza la herramienta “Perpendicular” la cual pide generar dos puntos por donde pasara la primera línea generada después seleccionar la posición superior en donde termina la altura de la ceja con esto se obtiene la distancia perpendicular entre línea a punto (Figura 3.110).



Figura 3.110.- Medición de altura de ceja. ELABORACIÓN PROPIA.



Para tomar las mediciones del *roll in*, *roll out* y el retroceso del panel se obtendrán utilizando la herramienta “Paralela” para ambos casos, primero se generan dos puntos por donde pasará la primera línea generada después se selecciona la posición en donde termina nuestra medición esto generará una segunda línea paralela a la primera y con esto se obtendrá la distancia entre ambas líneas (Figura 3.111).



Figura 3.111.- Medición de altura de ceja. ELABORACIÓN PROPIA.

El procedimiento de obtención de datos dimensionales se replicó para cada una de las probetas de los 72 experimentos realizados según el Diseño de Experimentos

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados obtenidos del análisis numérico y las pruebas experimentales realizadas en el prototipo de máquina para engargolar, así como las mediciones realizadas utilizando el microscopio digital VHX-5000.

#### 4.1 Resultados del Análisis por Elemento Finito.

A continuación, se presentan los resultados del valor de la arruga para los tres métodos estudiados, considerando que para el análisis numérico no se toma en cuenta el ángulo de corte de la probeta respecto a la dirección de rolado, ya que las tres direcciones se consideran en el modelo de material, los resultados presentados están en función de las variables de entrada consideradas para el presente estudio, tales como, ángulo de pre-engargolado, altura de la ceja y ubicación de la herramienta. para obtener mayor detalle puede consultarse el anexo 1.

En el análisis por elemento finito del método *Die Hemming*, se encontró como valor máximo de arruga 1.799 mm tomando en cuenta que un espesor ideal del engargolado equivale a 1.71 mm, entonces la altura máxima de la arruga sobre la base del engargolado equivale a 0.089 mm, para el engargolado por *Table Hemming* el valor máximo encontrado fue de 1.796 mm con 0.086 mm de diferencia respecto a la base del engargolado, finalmente para el método por *Roll Hemming*, el valor máximo de arruga encontrado fue de 2.575, equivalente a 0.865 mm.

Tabla 4.1.- Valor de arruga resultados de simulación. ELABORACIÓN PROPIA.

| Valor de la arruga         |                             |                              |                               |                             |                              |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <i>Die Hemming</i><br>7 mm | <i>Die Hemming</i><br>10 mm | <i>Table Hemming</i><br>7 mm | <i>Table Hemming</i><br>10 mm | <i>Roll Hemming</i><br>7 mm | <i>Roll Hemming</i><br>10 mm |
| 1.799 mm                   | 1.789 mm                    | 1.712 mm                     | 1.722 mm                      | 2.575 mm                    | 1.992 mm                     |
| 1.782 mm                   | 1.782 mm                    | 1.717 mm                     | 1.780 mm                      | 1.773 mm                    | 1.777 mm                     |
| 1.795 mm                   | 1.797 mm                    | 1.708 mm                     | 1.786 mm                      | 1.754 mm                    | 1.931 mm                     |
| 1.775 mm                   | 1.788 mm                    | 1.710 mm                     | 1.796 mm                      | 1.958 mm                    | 1.992 mm                     |

Valores de arruga tres metodos en Simulación

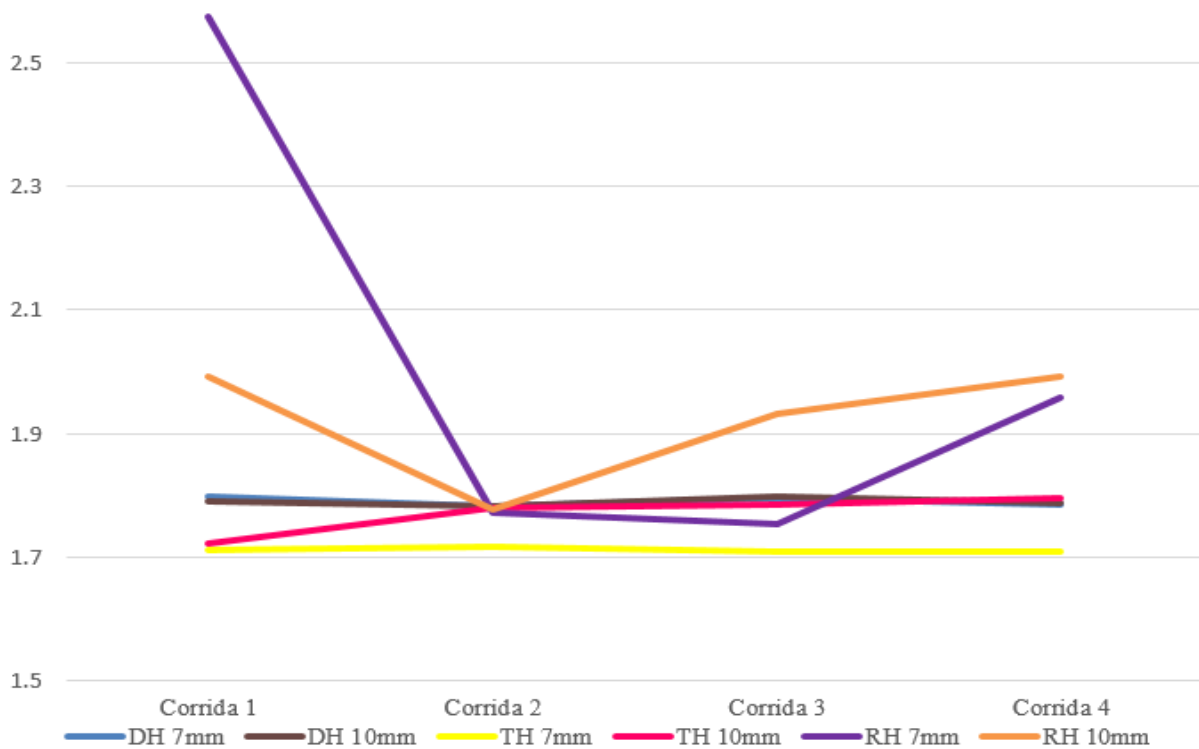


Figura 4.1.- Comportamiento del valor de arruga en el análisis numérico de los tres métodos de engargolado.  
ELABORACIÓN PROPIA.

En la Figura 4.1 puede observarse un gráfico que representa el comportamiento del valor de la arruga en el análisis numérico de los tres métodos de engargolado, donde DH, representa el *Die Hemming* con sus dos respectivas medidas en la altura de pestaña (7 y 10 mm), TH representa el *Table Hemming* igualmente con dos diferentes valores de altura de pestaña y RH representa el *Roll Hemming*, con la misma variación de altura de pestaña que los métodos anteriores

#### 4.2 Resultados del análisis experimental en prototipo.

Para el análisis experimental se consideraron los parámetros de entrada, según el DOE, los cuales fueron altura de la ceja, ángulo de pre-engargolado y posición de la herramienta, cada experimento se realizó considerando las condiciones iniciales, así como el ángulo de corte de la

probeta respecto a la dirección de rolado, lo que dan 24 experimentos por cada método de engargolado, los resultados obtenidos para el método de *Die Hemming* se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2.- Resultados del análisis experimental en prototipo para el *Die Hemming*. ELABORACIÓN PROPIA.

| <b>Valor de la arruga <i>Die Hemming</i> prototipo</b> |                 |                |                 |                |                 |
|--|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| <b>0°</b>  |                 | <b>45°</b>     |                 | <b>90°</b>     |                 |
| <b>Corrida</b>   | <b>Valor mm</b> | <b>Corrida</b> | <b>Valor mm</b> | <b>Corrida</b> | <b>Valor mm</b> |
| <b>1</b>   | 1.8833          | <b>1</b>       | 1.7500          | <b>1</b>       | 1.9000          |
| <b>2</b>   | 1.7733          | <b>2</b>       | 1.7367          | <b>2</b>       | 1.7533          |
| <b>3</b>   | 1.8400          | <b>3</b>       | 1.8067          | <b>3</b>       | 1.9033          |
| <b>4</b>   | 1.7967          | <b>4</b>       | 1.8133          | <b>4</b>       | 1.8300          |
| <b>5</b>   | 1.7333          | <b>5</b>       | 1.7367          | <b>5</b>       | 1.7300          |
| <b>6</b>   | 1.8300          | <b>6</b>       | 1.8633          | <b>6</b>       | 1.8500          |
| <b>7</b>   | 1.9400          | <b>7</b>       | 1.7633          | <b>7</b>       | 1.9967          |
| <b>8</b>   | 1.8833          | <b>8</b>       | 1.8233          | <b>8</b>       | 1.8367          |

De las pruebas en el prototipo para el engargolado por *Die Hemming*, se encontró como valor máximo de arruga de 1.9967 mm y mínimo 1.7300 mm, tomando en cuenta que un espesor ideal del engargolado equivale a 1.71 mm, entonces la altura máxima de la arruga sobre la base del engargolado equivale a 0.2867 mm, y mínima es decir con mayor aproximación al engargolado ideal fue de 0.02 mm, en la Figura 4.2 puede observarse un gráfico que representa el comportamiento del valor de la arruga en el análisis experimental del doblado de láminas en prototipo según la dirección de rolado y las variables consideradas en el DOE.

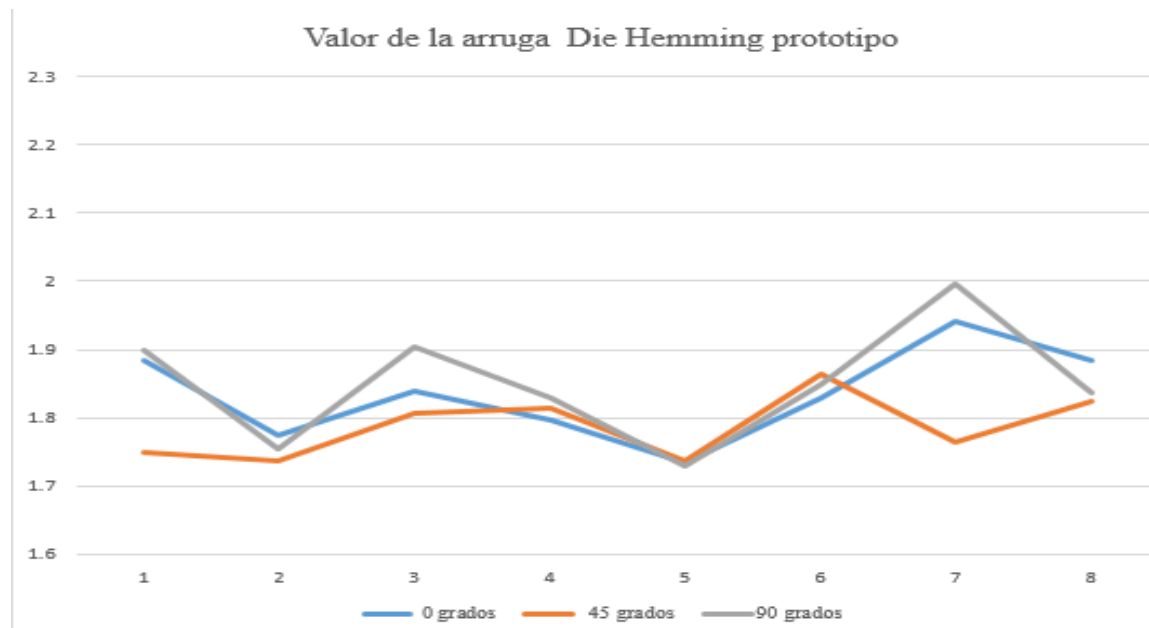


Figura 4.2.- Comportamiento de la arruga engargolado *Die Hemming* prototipo. ELABORACIÓN PROPIA.

En el caso de las pruebas en el prototipo para el engargolado por *Table Hemming*, considerando el espesor ideal del engargolado de 1.71 mm, entonces la altura máxima de la arruga sobre la base del engargolado equivale a 0.3767, y mínima es decir con mayor aproximación al engargolado ideal fue de 0.0861, en la Figura 4.3 puede observarse un gráfico que representa el comportamiento del valor de la arruga en el análisis experimental del doblado de láminas en prototipo siguiendo el método de *Table Hemming*, según la dirección de rolado y las variables consideradas en el DOE.

Tabla 4.3.- Valor de arruga en el método *Table Hemming* prototipo. ELABORACIÓN PROPIA.

| Valor de la arruga <i>Table Hemming</i> prototipo |          |         |          |         |          |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|
| 0°  |          | 45°     |          | 90°     |          |
| Corrida   | Valor mm | Corrida | Valor mm | Corrida | Valor mm |
| 1   | 1.9033   | 1       | 1.9100   | 1       | 1.9167   |
| 2   | 1.9833   | 2       | 1.9633   | 2       | 2.0867   |
| 3   | 1.8733   | 3       | 1.7967   | 3       | 1.8767   |
| 4   | 1.8033   | 4       | 1.8267   | 4       | 1.8733   |

|   |        |   |        |   |        |
|---|--------|---|--------|---|--------|
| 5 | 1.8733 | 5 | 1.9367 | 5 | 1.9400 |
| 6 | 1.8833 | 6 | 1.8567 | 6 | 1.8967 |
| 7 | 1.9667 | 7 | 1.9433 | 7 | 1.9500 |
| 8 | 1.8333 | 8 | 1.8867 | 8 | 1.9367 |

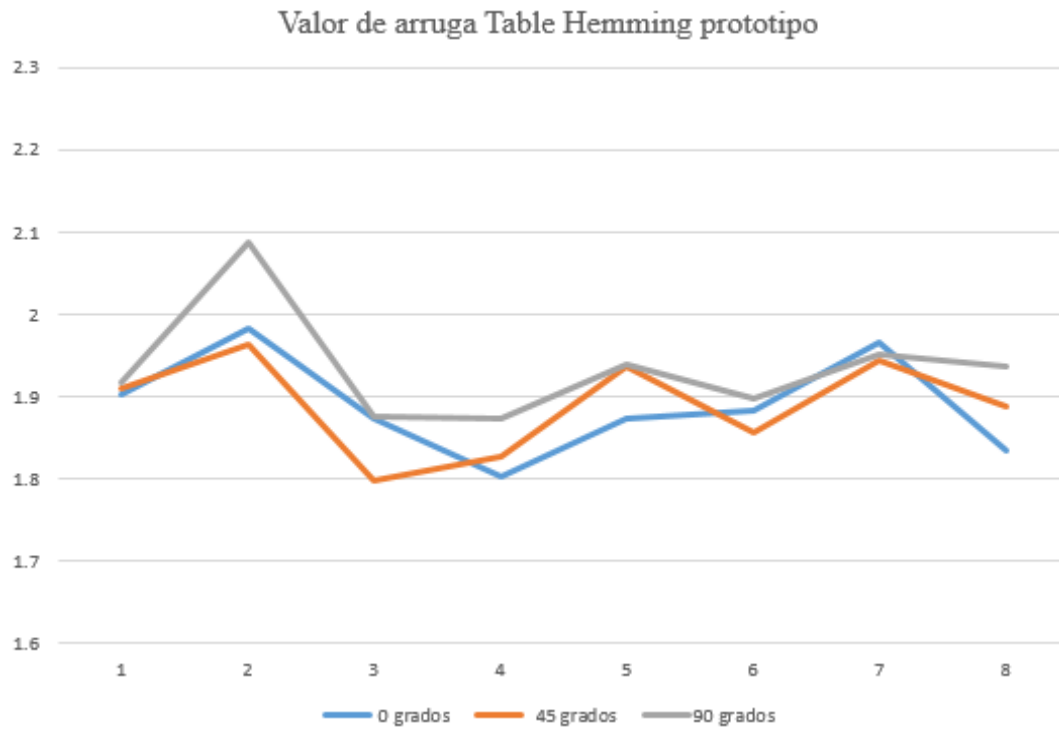


Figura 4.3.- Valor de la arruga método *Table Hemming* pruebas en prototipo. ELABORACIÓN PROPIA.

En los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el prototipo para el engargolado por *Roll Hemming* el valor máximo de arruga encontrado fue de 1.9667 mm, menos el valor del espesor ideal, se obtendría un valor de 0.2567 mm en la arruga con mayor tamaño, para el caso del valor mínimo de arruga se encontró 1.7267, que equivale a un valor de 0.0167 mm sobre la base del engargolado. Los resultados descritos y el detalle de las 24 corridas pueden apreciarse en la tabla 4.4, estos datos también se presentan de manera gráfica para facilitar la apreciación del comportamiento de la arruga, Figura 4.4.

Tabla 4.4. Valor de la arruga Roll Hemming Prototipo. ELABORACIÓN PROPIA.

| Valor de la arruga Roll Hemming prototipo |          |         |          |         |          |
|---|----------|---------|----------|---------|----------|
| 0°  |          | 45°     |          | 90°     |          |
| Corrida                                   | Valor mm | Corrida | Valor mm | Corrida | Valor mm |
| 1   | 1.7833   | 1       | 1.7267   | 1       | 1.7533   |
| 2   | 1.8233   | 2       | 1.9300   | 2       | 1.7733   |
| 3   | 1.9167   | 3       | 1.8433   | 3       | 1.8300   |
| 4   | 1.7600   | 4       | 1.7800   | 4       | 1.7800   |
| 5   | 1.7633   | 5       | 1.8600   | 5       | 1.8467   |
| 6   | 1.8733   | 6       | 1.7667   | 6       | 1.9667   |
| 7   | 1.7667   | 7       | 1.7767   | 7       | 1.8100   |
| 8   | 1.7333   | 8       | 1.7900   | 8       | 1.7733   |

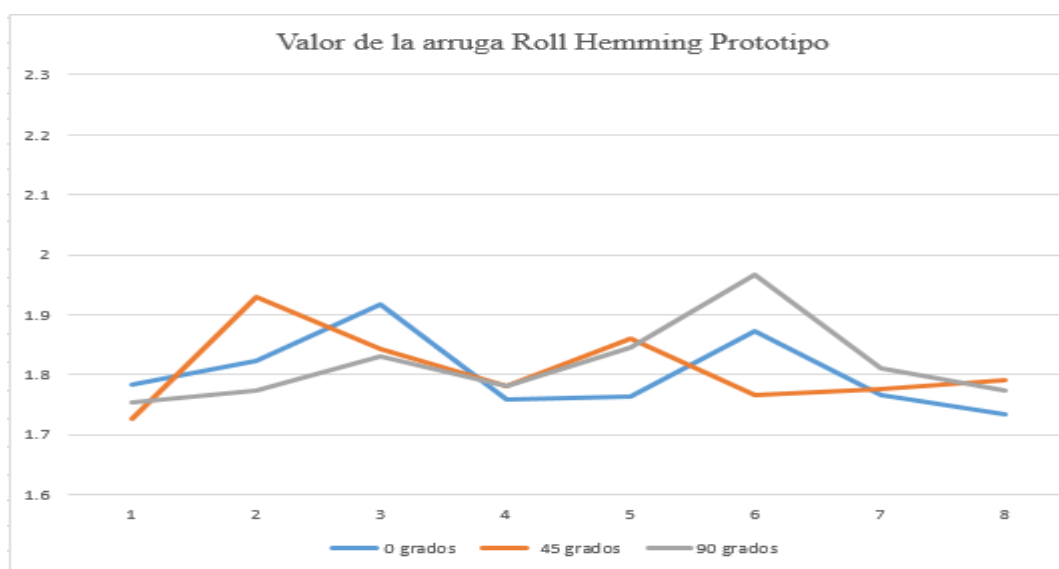


Figura 4.4.- Comportamiento del valor de la arruga Roll Hemming Prototipo. ELABORACIÓN PROPIA.

### 4.3 Resultados del análisis en microscopio.

Los resultados del análisis en microscopio representan las mediciones hechas a las probetas engargoladas mediante los tres diferentes métodos de engargolado, según el DOE

diseñado en base a los parámetros de entrada mencionados en la descripción del método, por lo que de la misma forma se tienen 24 mediciones por cada método de engargolado.

Para el método de engargolado por *Die Hemming*, el valor máximo encontrado en las mediciones fue de 1.9033 con diferencia de 0.1933 del valor ideal, el valor más cercano al espesor ideal, fue de 1.721 mm con 0.011 mm de desviación. Los resultados de las 24 mediciones realizadas pueden observarse en la tabla 4.5 que se presenta a continuación.

Tabla 4.5. Valor de la arruga método *Die Hemming* tomadas por microscopio. ELABORACIÓN PROPIA.

| <b>Valor de la arruga <i>Die Hemming</i> Microscopio</b> |                 |                |                 |                |                 |
|--|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| <b>0°</b>  |                 | <b>45°</b>     |                 | <b>90°</b>     |                 |
| <b>Corrida</b>   | <b>Valor mm</b> | <b>Corrida</b> | <b>Valor mm</b> | <b>Corrida</b> | <b>Valor mm</b> |
| <b>1</b>   | 1.767           | <b>1</b>       | 1.767           | <b>1</b>       | 1.776           |
| <b>2</b>   | 1.741           | <b>2</b>       | 1.692           | <b>2</b>       | 1.701           |
| <b>3</b>   | 1.762           | <b>3</b>       | 1.762           | <b>3</b>       | 1.769           |
| <b>4</b>   | 1.88            | <b>4</b>       | 1.865           | <b>4</b>       | 1.683           |
| <b>5</b>   | 1.772           | <b>5</b>       | 1.734           | <b>5</b>       | 1.732           |
| <b>6</b>   | 1.721           | <b>6</b>       | 1.788           | <b>6</b>       | 1.747           |
| <b>7</b>   | 1.866           | <b>7</b>       | 1.831           | <b>7</b>       | 1.725           |
| <b>8</b>   | 1.9033          | <b>8</b>       | 1.723           | <b>8</b>       | 1.771           |

La Figura 4.5 presenta una representación gráfica del comportamiento del valor de arruga censado con el uso del microscopio.



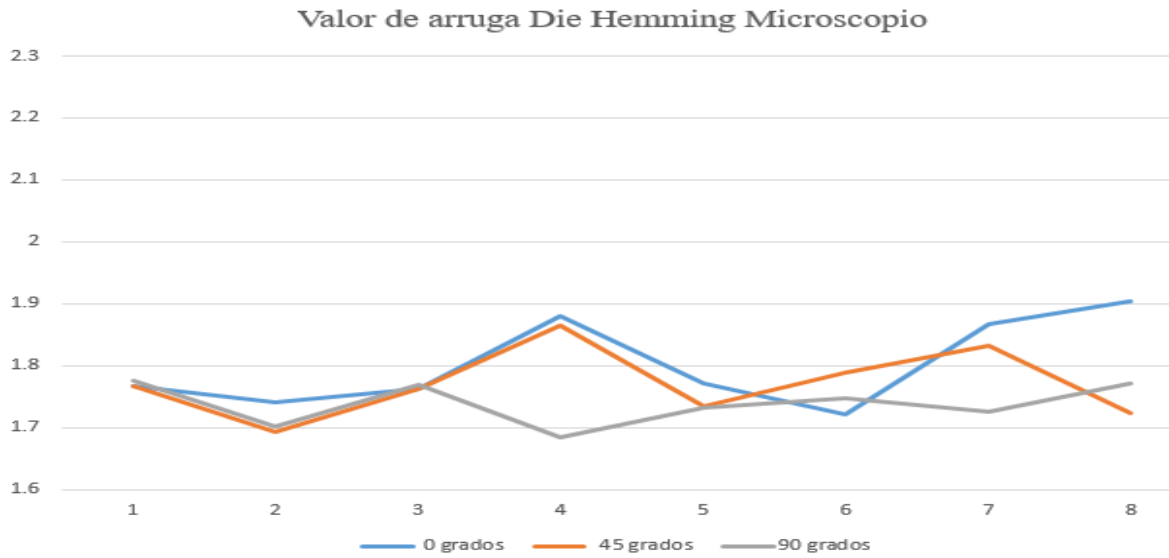


Figura 4.5.- Valor de la arruga para el método *Die Hemming* tomado con microscopio. ELABORACIÓN PROPIA.

En el caso del método de engargolado por *Table Hemming*, el valor máximo encontrado en las mediciones fue de 1.823 con diferencia de 0.133 del valor ideal, el valor más cercano al espesor ideal, fue de 1.712 mm con 0.002 mm de desviación. Los resultados de las 24 mediciones realizadas pueden observarse en la tabla 4.6 que se presenta a continuación, así como la representación gráfica del comportamiento del valor de arruga que se presenta en la Figura 4.6.

Tabla 4.6. Valor de la arruga método *Table Hemming* microscopio. ELABORACIÓN PROPIA.

| <b>Valor de la arruga <i>Table Hemming</i> Microscopio</b> |                 |                |                 |                |                 |
|--|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| <b>0°</b>  |                 | <b>45°</b>     |                 | <b>90°</b>     |                 |
| <b>Corrida</b>   | <b>Valor mm</b> | <b>Corrida</b> | <b>Valor mm</b> | <b>Corrida</b> | <b>Valor mm</b> |
| <b>1</b>   | 1.759           | 1              | 1.779           | 1              | 1.765           |
| <b>2</b>   | 1.784           | 2              | 1.815           | 2              | 1.787           |
| <b>3</b>   | 1.719           | 3              | 1.726           | 3              | 1.792           |
| <b>4</b>   | 1.802           | 4              | 1.804           | 4              | 1.783           |
| <b>5</b>   | 1.77            | 5              | 1.737           | 5              | 1.799           |

|   |       |   |       |   |       |
|---|-------|---|-------|---|-------|
| 6 | 1.767 | 6 | 1.746 | 6 | 1.823 |
| 7 | 1.712 | 7 | 1.749 | 7 | 1.776 |
| 8 | 1.805 | 8 | 1.768 | 8 | 1.808 |

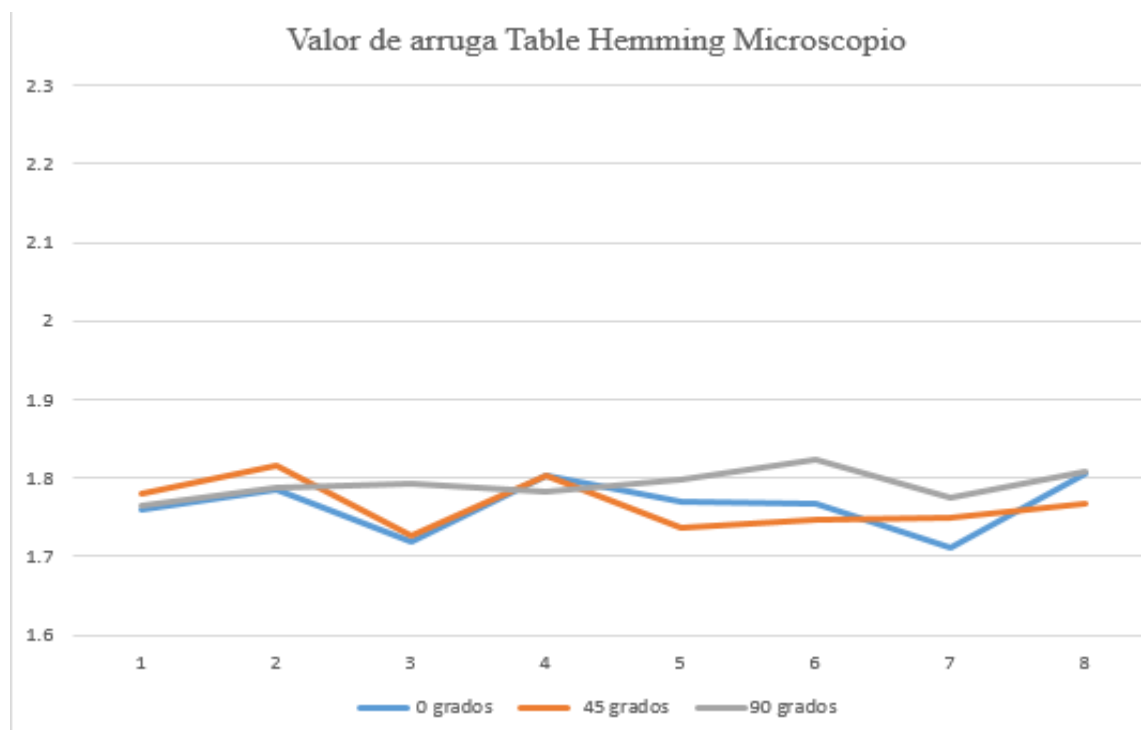


Figura 4.6.- Valor de la arruga método *Table Hemming* censado por microscopio. ELABORACIÓN PROPIA.

Finalmente, para el método de *Roll Hemming* se obtuvieron los siguientes valores, máximo 0.497 de diferencia del valor ideal, el valor más cercano al espesor ideal, fue de 1.763 mm con 0.052 mm de desviación. Los resultados de las 24 mediciones realizadas pueden observarse en la tabla 4.7 que se presenta a continuación, así como la representación gráfica del comportamiento del valor de arruga que se presenta en la Figura 4.7.

Tabla 4.7. Valor de la arruga método *Roll Hemming* microscopio. ELABORACIÓN PROPIA.

| Valor de la arruga <i>Roll Hemming</i> Microscopio |          |         |          |         |          |
|--|----------|---------|----------|---------|----------|
| 0°   |          | 45°     |          | 90°     |          |
| Corrida  | Valor mm | Corrida | Valor mm | Corrida | Valor mm |

|          |       |   |       |   |       |
|----------|-------|---|-------|---|-------|
| <b>1</b> | 1.843 | 1 | 1.878 | 1 | 1.895 |
| <b>2</b> | 1.901 | 2 | 2.207 | 2 | 1.951 |
| <b>3</b> | 1.975 | 3 | 1.776 | 3 | 1.788 |
| <b>4</b> | 1.918 | 4 | 1.908 | 4 | 1.763 |
| <b>5</b> | 1.902 | 5 | 1.889 | 5 | 1.879 |
| <b>6</b> | 2.027 | 6 | 1.858 | 6 | 1.915 |
| <b>7</b> | 1.968 | 7 | 1.889 | 7 | 1.955 |
| <b>8</b> | 1.853 | 8 | 2.031 | 8 | 1.922 |

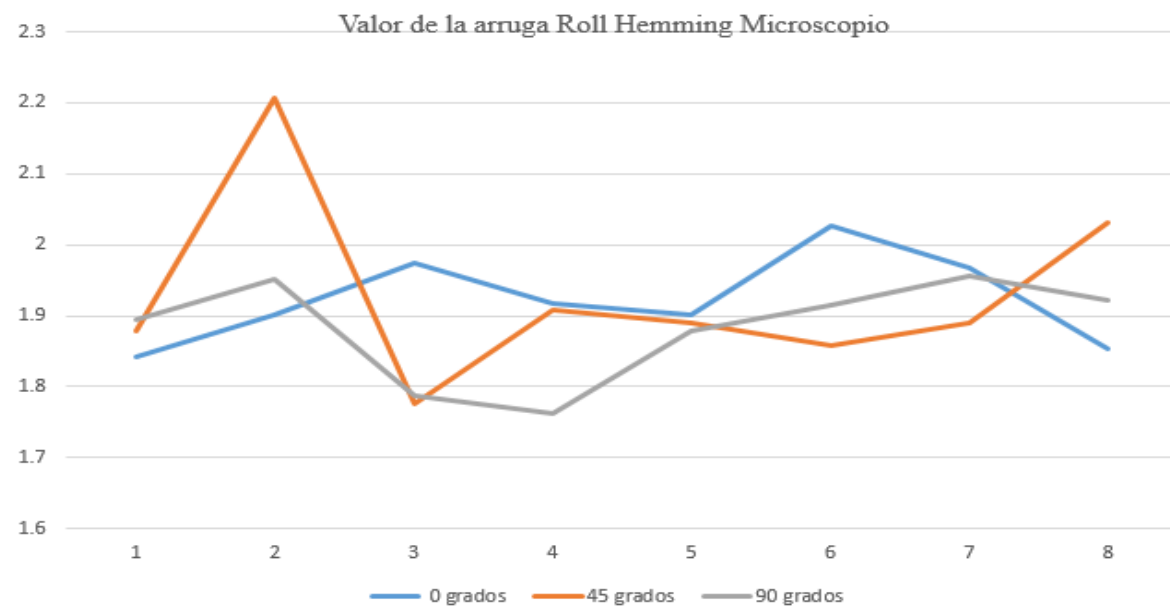


Figura 4.7.- Valor de la arruga método *Table Hemming* censado por microscopio. ELABORACIÓN PROPIA.

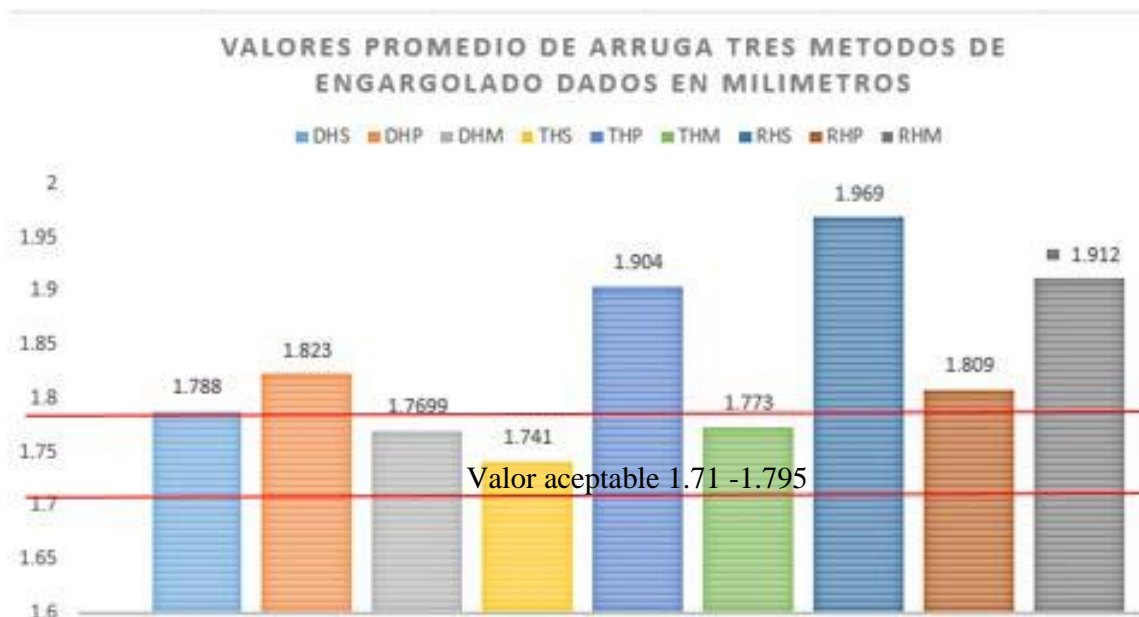


Figura 4.8.- Valores promedio de arruga tres métodos de engargolado. ELABORACIÓN PROPIA.

Finalmente la Figura 4.8 presenta un concentrado de los valores promedio de arruga por cada uno de los métodos estudiados y para cada tipo de análisis, es decir, se presentan el promedio de los valores para la arruga en el método *Die Hemming* obtenidos del análisis numérico (DHS), método *Die Hemming* pruebas en prototipo (DHP), método *Die Hemming* censadas con microscopio (DHM), método *Table Hemming* análisis numérico (THS), *Table Hemming* pruebas en prototipo (THP), *Table Hemming* microscopio (THM), *Roll Hemming* análisis numérico (RHS), *Roll Hemming* prototipo (RHP) y *Roll Hemming* microscopio (RHM).

Tabla 4.8.- Resultados experimentales de pruebas en prototipo, con parámetros de entrada para cada prueba. ELABORACIÓN PROPIA.

| Número de prueba | Proceso     | Angulo de corte de la probeta | Largo pestaña | Angulo preengargolado | Posicion de herramienta | Diametro del rodillo | Valor de arruga |
|------------------|-------------|-------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| 1                | Die Hemming | 0°                            | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.8833</b>   |
| 2                | Die Hemming | 0°                            | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.7733</b>   |
| 3                | Die Hemming | 0°                            | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.84</b>     |
| 4                | Die Hemming | 0°                            | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.7967</b>   |

|    |               |     |       |     |    |               |
|----|---------------|-----|-------|-----|----|---------------|
| 5  | Die Hemming   | 0°  | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.7333</b> |
| 6  | Die Hemming   | 0°  | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.83</b>   |
| 7  | Die Hemming   | 0°  | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.94</b>   |
| 8  | Die Hemming   | 0°  | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.8833</b> |
| 9  | Die Hemming   | 45° | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.75</b>   |
| 10 | Die Hemming   | 45° | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.7367</b> |
| 11 | Die Hemming   | 45° | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.8067</b> |
| 12 | Die Hemming   | 45° | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.8133</b> |
| 13 | Die Hemming   | 45° | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.7367</b> |
| 14 | Die Hemming   | 45° | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.8633</b> |
| 15 | Die Hemming   | 45° | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.7633</b> |
| 16 | Die Hemming   | 90° | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.8233</b> |
| 17 | Die Hemming   | 90° | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.9</b>    |
| 18 | Die Hemming   | 90° | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.7533</b> |
| 19 | Die Hemming   | 90° | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.9033</b> |
| 20 | Die Hemming   | 90° | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.83</b>   |
| 21 | Die Hemming   | 90° | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.73</b>   |
| 22 | Die Hemming   | 90° | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.85</b>   |
| 23 | Die Hemming   | 90° | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.9967</b> |
| 24 | Die Hemming   | 90° | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.8367</b> |
| 25 | Table Hemming | 0°  | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.9033</b> |
| 26 | Table Hemming | 0°  | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.9833</b> |
| 27 | Table Hemming | 0°  | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.8733</b> |
| 28 | Table Hemming | 0°  | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.8033</b> |
| 29 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.8733</b> |
| 30 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.8833</b> |
| 31 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.9667</b> |
| 32 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 60° | 10 | <b>1.8333</b> |
| 33 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.91</b>   |
| 34 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.9633</b> |
| 35 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 30° | 0  | <b>1.7967</b> |
| 36 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 60° | 10 | <b>1.8267</b> |
| 37 | Table Hemming | 45° | 10 mm | 30° | 0  | <b>1.9367</b> |

|    |               |     |       |     |    |     |               |
|----|---------------|-----|-------|-----|----|-----|---------------|
| 38 | Table Hemming | 45° | 10 mm | 60° | 10 |     | <b>1.8567</b> |
| 39 | Table Hemming | 45° | 10 mm | 30° | 0  |     | <b>1.9433</b> |
| 40 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 10 |     | <b>1.8867</b> |
| 41 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 30° | 0  |     | <b>1.9167</b> |
| 42 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 60° | 10 |     | <b>2.0867</b> |
| 43 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 30° | 0  |     | <b>1.8767</b> |
| 44 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 60° | 10 |     | <b>1.8733</b> |
| 45 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 30° | 0  |     | <b>1.94</b>   |
| 46 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 10 |     | <b>1.8967</b> |
| 47 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 30° | 0  |     | <b>1.95</b>   |
| 48 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 10 |     | <b>1.9367</b> |
| 49 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 30° |    | 1.5 | <b>1.7833</b> |
| 50 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 60° |    | 2.5 | <b>1.8233</b> |
| 51 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 30° |    | 1.5 | <b>1.9167</b> |
| 52 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 60° |    | 2.5 | <b>1.76</b>   |
| 53 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 30° |    | 1.5 | <b>1.7633</b> |
| 54 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 60° |    | 2.5 | <b>1.8733</b> |
| 55 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 30° |    | 1.5 | <b>1.7667</b> |
| 56 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 60° |    | 2.5 | <b>1.7333</b> |
| 57 | Roll Hemming  | 45° | 7 mm  | 30° |    | 1.5 | <b>1.7267</b> |
| 58 | Roll Hemming  | 45° | 7 mm  | 60° |    | 2.5 | <b>1.93</b>   |
| 59 | Roll Hemming  | 45° | 7 mm  | 30° |    | 1.5 | <b>1.8433</b> |
| 60 | Roll Hemming  | 45° | 7 mm  | 60° |    | 2.5 | <b>1.78</b>   |
| 61 | Roll Hemming  | 45° | 10 mm | 30° |    | 1.5 | <b>1.86</b>   |
| 62 | Roll Hemming  | 45° | 10 mm | 60° |    | 2.5 | <b>1.7667</b> |
| 63 | Roll Hemming  | 45° | 10 mm | 30° |    | 1.5 | <b>1.7767</b> |
| 64 | Roll Hemming  | 90° | 10 mm | 60° |    | 2.5 | <b>1.79</b>   |
| 65 | Roll Hemming  | 90° | 7 mm  | 30° |    | 1.5 | <b>1.7533</b> |
| 66 | Roll Hemming  | 90° | 7 mm  | 60° |    | 2.5 | <b>1.7733</b> |
| 67 | Roll Hemming  | 90° | 7 mm  | 30° |    | 1.5 | <b>1.83</b>   |
| 68 | Roll Hemming  | 90° | 7 mm  | 60° |    | 2.5 | <b>1.78</b>   |
| 69 | Roll Hemming  | 90° | 10 mm | 30° |    | 1.5 | <b>1.8467</b> |
| 70 | Roll Hemming  | 90° | 10 mm | 60° |    | 2.5 | <b>1.9667</b> |

|    |              |     |       |     |     |               |
|----|--------------|-----|-------|-----|-----|---------------|
| 71 | Roll Hemming | 90° | 10 mm | 30° | 1.5 | <b>1.81</b>   |
| 72 | Roll Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 2.5 | <b>1.7733</b> |

Tabla 4.9.- Resultados censados en microscopio, con parámetros de entrada para cada prueba. ELABORACIÓN PROPIA.

| Número de prueba | Proceso       | Angulo de corte de la probeta | Largo pestaña | Angulo preengargolado | Posicion de herramienta | Diametro del rodillo | Valor de arruga |
|------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| 1                | Die Hemming   | 0°                            | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.767</b>    |
| 2                | Die Hemming   | 0°                            | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.741</b>    |
| 3                | Die Hemming   | 0°                            | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.762</b>    |
| 4                | Die Hemming   | 0°                            | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.88</b>     |
| 5                | Die Hemming   | 0°                            | 10 mm         | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.772</b>    |
| 6                | Die Hemming   | 0°                            | 10 mm         | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.721</b>    |
| 7                | Die Hemming   | 0°                            | 10 mm         | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.866</b>    |
| 8                | Die Hemming   | 0°                            | 10 mm         | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.9033</b>   |
| 9                | Die Hemming   | 45°                           | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.767</b>    |
| 10               | Die Hemming   | 45°                           | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.692</b>    |
| 11               | Die Hemming   | 45°                           | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.762</b>    |
| 12               | Die Hemming   | 45°                           | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.865</b>    |
| 13               | Die Hemming   | 45°                           | 10 mm         | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.734</b>    |
| 14               | Die Hemming   | 45°                           | 10 mm         | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.788</b>    |
| 15               | Die Hemming   | 45°                           | 10 mm         | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.831</b>    |
| 16               | Die Hemming   | 90°                           | 10 mm         | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.723</b>    |
| 17               | Die Hemming   | 90°                           | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.776</b>    |
| 18               | Die Hemming   | 90°                           | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.701</b>    |
| 19               | Die Hemming   | 90°                           | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.769</b>    |
| 20               | Die Hemming   | 90°                           | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.683</b>    |
| 21               | Die Hemming   | 90°                           | 10 mm         | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.732</b>    |
| 22               | Die Hemming   | 90°                           | 10 mm         | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.747</b>    |
| 23               | Die Hemming   | 90°                           | 10 mm         | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.725</b>    |
| 24               | Die Hemming   | 90°                           | 10 mm         | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.771</b>    |
| 25               | Table Hemming | 0°                            | 7 mm          | 30°                   | 0                       |                      | <b>1.759</b>    |
| 26               | Table Hemming | 0°                            | 7 mm          | 60°                   | 10                      |                      | <b>1.784</b>    |

|    |               |     |       |     |     |              |
|----|---------------|-----|-------|-----|-----|--------------|
| 27 | Table Hemming | 0°  | 7 mm  | 30° | 0   | <b>1.719</b> |
| 28 | Table Hemming | 0°  | 7 mm  | 60° | 10  | <b>1.802</b> |
| 29 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 30° | 0   | <b>1.77</b>  |
| 30 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 60° | 10  | <b>1.767</b> |
| 31 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 30° | 0   | <b>1.712</b> |
| 32 | Table Hemming | 0°  | 10 mm | 60° | 10  | <b>1.805</b> |
| 33 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 30° | 0   | <b>1.779</b> |
| 34 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 60° | 10  | <b>1.815</b> |
| 35 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 30° | 0   | <b>1.726</b> |
| 36 | Table Hemming | 45° | 7 mm  | 60° | 10  | <b>1.804</b> |
| 37 | Table Hemming | 45° | 10 mm | 30° | 0   | <b>1.737</b> |
| 38 | Table Hemming | 45° | 10 mm | 60° | 10  | <b>1.746</b> |
| 39 | Table Hemming | 45° | 10 mm | 30° | 0   | <b>1.749</b> |
| 40 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 10  | <b>1.768</b> |
| 41 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 30° | 0   | <b>1.765</b> |
| 42 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 60° | 10  | <b>1.787</b> |
| 43 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 30° | 0   | <b>1.792</b> |
| 44 | Table Hemming | 90° | 7 mm  | 60° | 10  | <b>1.783</b> |
| 45 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 30° | 0   | <b>1.799</b> |
| 46 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 10  | <b>1.823</b> |
| 47 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 30° | 0   | <b>1.776</b> |
| 48 | Table Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 10  | <b>1.808</b> |
| 49 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 30° | 1.5 | <b>1.843</b> |
| 50 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 60° | 2.5 | <b>1.901</b> |
| 51 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 30° | 1.5 | <b>1.975</b> |
| 52 | Roll Hemming  | 0°  | 7 mm  | 60° | 2.5 | <b>1.918</b> |
| 53 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 30° | 1.5 | <b>1.902</b> |
| 54 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 60° | 2.5 | <b>2.027</b> |
| 55 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 30° | 1.5 | <b>1.968</b> |
| 56 | Roll Hemming  | 0°  | 10 mm | 60° | 2.5 | <b>1.853</b> |
| 57 | Roll Hemming  | 45° | 7 mm  | 30° | 1.5 | <b>1.878</b> |
| 58 | Roll Hemming  | 45° | 7 mm  | 60° | 2.5 | <b>2.207</b> |
| 59 | Roll Hemming  | 45° | 7 mm  | 30° | 1.5 | <b>1.776</b> |



|    |              |     |       |     |     |              |
|----|--------------|-----|-------|-----|-----|--------------|
| 60 | Roll Hemming | 45° | 7 mm  | 60° | 2.5 | <b>1.908</b> |
| 61 | Roll Hemming | 45° | 10 mm | 30° | 1.5 | <b>1.889</b> |
| 62 | Roll Hemming | 45° | 10 mm | 60° | 2.5 | <b>1.858</b> |
| 63 | Roll Hemming | 45° | 10 mm | 30° | 1.5 | <b>1.889</b> |
| 64 | Roll Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 2.5 | <b>2.031</b> |
| 65 | Roll Hemming | 90° | 7 mm  | 30° | 1.5 | <b>1.895</b> |
| 66 | Roll Hemming | 90° | 7 mm  | 60° | 2.5 | <b>1.951</b> |
| 67 | Roll Hemming | 90° | 7 mm  | 30° | 1.5 | <b>1.788</b> |
| 68 | Roll Hemming | 90° | 7 mm  | 60° | 2.5 | <b>1.763</b> |
| 69 | Roll Hemming | 90° | 10 mm | 30° | 1.5 | <b>1.879</b> |
| 70 | Roll Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 2.5 | <b>1.915</b> |
| 71 | Roll Hemming | 90° | 10 mm | 30° | 1.5 | <b>1.955</b> |
| 72 | Roll Hemming | 90° | 10 mm | 60° | 2.5 | <b>1.922</b> |

Las tablas 4.8 y 4.9, muestran los resultados obtenidos de las pruebas en prototipo, así como en las medidas censadas utilizando microscopio, pueden observarse en las tablas, las condiciones de cada prueba, tales como, método utilizando, ángulo de corte respecto a la dirección de rolado de la probeta, altura de la pestaña, ángulo de pre engargolado y posición de la herramienta, la cual puede variar según el método utilizado, hacia el lado derecho pueden observarse los resultados de cada combinación de factores. De los cuales se pretende tomar el valor con mayor aproximación al espesor ideal que corresponde a la corrida número 31, esto para replicas en trabajos futuros donde se consideré una pieza específica con el fin de confirmar los resultados obtenidos

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe la metodología implementada para el análisis numérico y experimental de los tres tipos de engargolado de lámina utilizados por la industria automotriz, con el propósito de determinar el método con mayor eficiencia para disminuir los defectos en la calidad del engargolado.

Para el estudio, se realizó un Diseño de Experimentos (DOE) que considero los parámetros de entrada de altura de la ceja (7 y 10 mm), para el ángulo de pre-engargolado se consideraron  $30^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ ; la posición de la herramienta se tomó a 0 mm y 10 mm para el engargolado por *Die* y *Table Hemming*; y el diámetro del rodillo 1.5 in - 2.5 in para el método por *Roll Hemming*. Se realizaron ocho corridas (simulaciones) de cada proceso en base a los requerimientos del DOE, para la experimentación se generaron probetas cortadas a  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $90^{\circ}$  respecto a la dirección de rolado de la lámina para evaluar el comportamiento anisotrópico del material estudiado.

Se realizó el modelo de Elemento Finito para cada proceso de engargolado, se simuló y se obtuvieron resultados del análisis numérico, así mismo se desarrollaron las 72 pruebas experimentales de doblado de lámina con las consideraciones indicadas por el DOE, se midieron los resultados de los experimentos de forma manual y posteriormente se implementó un método de medida por microscopio con la intención de obtener mediciones con mayor fidelidad.

Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados, primeramente se compararon los resultados de cada método, en simulación se determinó que el método de engargolado por *Roll Hemming* presentó valores de defecto mayores, ya que se encontró como valor promedio 0.259 mm de desviación respecto al espesor ideal del engargolado, por su parte el método de *Die Hemming* presentó en promedio 0.078 mm de desviación, mientras que el método con menor desviación fue el *Table Hemming* con 0.031 mm como valor promedio.

De las medidas tomadas manualmente a las probetas engargoladas se determinó con menor eficiencia el método de *Table Hemming* por presentar la mayor desviación promedio del espesor ideal con un valor de 0.194 mm, seguido del método *Die Hemming* con un valor promedio de 0.113 mm, mientras que el *Roll Hemming* obtuvo un promedio de 0.0993 mm de desviación.

Finalmente, de las medidas censadas mediante el uso del microscopio se consideró con mayor deficiencia el *Roll Hemming* por presentar el valor máximo de desviación de 0.202 mm, seguido del método *Table Hemming* con 0.063 mm, mientras que el *Die Hemming* obtuvo un promedio de 0.0599 mm.

Considerando las condiciones del estudio, incluidas las variables de entrada, así como los factores mecánicos y humanos, se considera que el método *Table Hemming* obtuvo mayor eficiencia en calidad de la arruga, aun cuando en los valores promedio de los resultados censados de forma manual a las probetas engargoladas se colocó como el método más deficiente, puede observarse a través de las gráficas del comportamiento de cada método, que los resultados presentaron mayor estabilidad entre el valor máximo y mínimo en simulación y en la medición en microscopio, en ambos casos los valores obtenidos se encontraron cercanos al valor de espesor ideal, lo cual podría significar la presencia de la incertidumbre en los resultados tomados de forma manual. Por el contrario, para el método de engargolado por *Roll Hemming* se observó un comportamiento irregular con una amplia variación entre valores máximos y mínimos, en su mayoría alejados del espesor ideal de 1.71 mm. Por lo que se concluye que los parámetros utilizados en el estudio para el proceso de engargolado por *Roll Hemming* no son ideales debido a la relación entre las fuerzas aplicadas y el espesor de la lámina utilizada en el presente estudio.

Durante el desarrollo del trabajo se encontraron dificultades técnicas debido a los requerimientos de la metodología desarrollada, es decir, de manera inicial se pretendía evaluar otros defectos en la calidad de engargolado tales como el recoil, sin embargo, en simulación no es posible monitorear el total del perfil, los resultados finales muestran el valor mínimo y máximo y estos generalmente se presentan en los extremos de las piezas analizadas (orillas),

por lo tanto la medición del recoil solo es posible de forma experimental, y para lograrlo se requiere un banco experimental, instrumentado con sensores laser para medición de espesor y distancia a lo largo de todo el perfil, el cual no se encuentra en las instalaciones de Instituto Tecnológico de San Luis Potosí y tampoco fue posible disponer de el de manera externa.

Es importante considerar que los resultados presentados están relacionados con la sujeción de la probeta y en su caso, con la posición de la herramienta y el diámetro del rodillo utilizados para los experimentos. Por lo que los resultados obtenidos son representativos solo para fijaciones mecánicas, similares al banco de pruebas experimental utilizado. Sin embargo, la metodología propuesta para el análisis comparativo de los métodos de engargolado puede ser escalada para el estudio de diferentes condiciones de operación.

El desarrollo del presente servirá como precedente en el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí para el desarrollo de los futuros proyectos de investigación sobre uno de los procesos ampliamente utilizado en una de las industrias con mayor desarrollo a nivel mundial, esto a través de la metodología de investigación que considere el análisis numérico y posterior validación experimental, que podrían realizarse en piezas específicas.

Se considera un eje central para el desarrollo de futuros trabajos el que se logre realizar convenios de colaboración con la industria, con el fin de mejorar las condiciones y recursos para la investigación además de atender de forma directa los retos que se presenten en el día a día de la industria, contribuyendo así con el desarrollo tecnológico del país.

## Referencias

- [1] Le Maout N., Thuillier S., Manach P., (2009) Aluminum alloy damage evolution for different strain paths – Application to hemming process. *Engineering Fracture Mechanics* 76 1202 -1214.
- [2] M. Sigvant, K. Mattiasson, FE-Simulation Of Hemming In The Automotive Industry. In AIP Conference Proceedings, **778** (2005) 675.
- [3] B.S. Cacique, G. Capilla, N.I. Aguilera, R.B. Arroyo, M.H. Orozco, Metodología para el análisis del proceso de engargolado por rodillos en una probeta especializada. *Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM* (2013).
- [4] J.G. Lin, G.R. Zhou, J.Q. Wang, Y.W. Huang, Q.H. Wang, MEF-Simulation of Automobile Sheet Metal Hemming Process. In *Applied Mechanics and Materials*, 602 (2014) 86-89.
- [5] B. Jonkers, 2006. Simulation of the Robot Roller hemming process.
- [6] Parsa M., Nasher al ahkami S., Pishbin H., Kazemi M., (2012); Investigating spring back phenomena in double curved metals forming, *Materials and Design* 41326 – 337.
- [7] Muderrisoglua A., Muratab M., Ahmetoglua M., Kinzel G & Altan T., (1996) Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet-an experimental study, *Journal of Materials Processing Technology* 59 10-17.
- [8] W. Kubli, J. Reissner, Optimization of sheet-metal forming processes using the special-purpose program AUTOFORM. *Journal of Materials Processing Technology*, **50** (1995) 292-305.
- [9] H. Livatyali, A. Muderrisoglu, M.A. Ahmetoglu, N. Akgerman, G.L. Kinzel, T. Altan, Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design. *Journal of Materials Processing Technology*, **98** (2000) 41-52.
- [10] Le Maoût, N., Manach, P. Y., & Thuillier, S. (2012). Influence of prestrain on the numerical simulation of the roller hemming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2), 450-457.
- [11] Livatyali, H., Laxhuber T., Altan T., (2004) Experimental investigation of forming defects in flat surface – convex edge hemming. *Journal of material processin technology* 146 20- 27.
- [12] M. Firat, Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts. *Materials and Design*, **28** (2007) 1298-1303.
- [13] <http://www.metalmecanica.com/temas/Produccion-automotriz-mexicana-crecera-33-para-2017+7095037>  
22 de marzo de 2016.
- [14] R. Bahloul, Optimisation of process parameters in flanging operation in order to minimise stresses and Lemaitre's damage. *Materials and Design*, **32** (2011) 108–120.
- [15] A. S. Wifi, T. F. Abdelmaguid, A.I. El-Ghandour, A review of the optimization techniques applied to the deep drawing process. In *Proceedings of the 37th international conference on computers and industrial engineering*, (2007) 1111-1112 Ceretti, E., Attanasio, A., Fiorentino, A., & Giardini, C. (2007, August).

- Sheet Hemming with Rolling Tools: Analysis and Optimization of the Part Quality. In *Key Engineering Materials* (Vol. 344, pp. 357-364).
- [16] P. A. Limon, R. Pérez, E. Aguilera, E. R. Ledesma, H. Plascencia, I. Martínez. Diseño de experimentos en el engargolado por rodillo de un modelo rectilíneo. *avances de la ingeniería mecánica en manufactura y materiales*. ISBN 978-607-96746-4-9. (2014).
- [17] Thuillier S., Le Maout N., Manach P.Y., Debois D., (2008) Numerical simulation of the roll hemming process. *Journal of materials processing technology*; 198; 226 – 233.
- [18] X. Hu, Z. Q. Lin, S. H. Li, Y. X. Zhao, Fracture limit prediction for roller hemming of aluminum alloy sheet. *Materials & Design*, **31** (2010) 1410-1416.
- [19] P.A. Pérez, A. Saldaña, I. Ruiz, G. Pacheco, H. Plascencia, E. Aguilera, Estudio del efecto de spring-back en lámina de acero DP-590 mediante prueba de doblez en tres puntos. *Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM* (2013), Pachuca, Hidalgo, México.
- [20] Svensson M., Mattiassonb K., (2002) Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method, *Journal of Materials Processing Technology* 128 142–154.
- [21] Livatyali H., Larris S.J., (2004), Experimental investigation on forming defects in flat surface – convex edge hemming: roll, recoil and warp. *Journal of material processin technology* 913 – 919.
- [22] Golovashchenko S., (2005) Sharp Flanging and Flat Hemming of Aluminum Exterior Body Panel, *ASM International*, JMEPEG 14:508-515.
- [23] Hu X., Zhao Y., Huang S., Li S., Lin Z., (2012) Numerical analysis of the roller hemming process, *Int J Adv Manuf Technol* 62:543–550.
- [24] Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación.
- [25] Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- [26] Schonberger, R. J. (1998). *Manufactura de clase mundial*.
- [27] Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G. (Eds.). (2005). *Cold and hot forging: fundamentals and applications* (Vol. 1). ASM international.
- [28] Serope, K., & Schmid Steven, R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Editorial Pearson educación.
- [29] Jansson, T. (2005). *Optimization of sheet metal forming processes*.
- [30] Oh, S. I., & Altan, T. (1989). *Metal forming and the finite-element method*. Oxford university press.
- [31] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (1977). *The finite element method* (Vol. 3). London: McGraw-hill.
- [32] Chandrupatla, T. R., Belegundu, A. D., Ramesh, T., & Ray, C. (1997). *Introduction to finite elements in engineering* (pp. 279-300). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- [33] Manual, L. D. K. U. S. Version R7.0. Livermore Software Technology Corporation. (2013).
- [34] Hutton, D. V., & Hutton, D. (2003). *Fundamentals of finite element analysis*.

- [35] J.Q. Hallquist, LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume II, Material Models, Version 971, Livermore Software Technology Company, Livermore, CA, August (2006b).
- [36] Le Port, A., Thuillier, S., & Manach, P. Y. (2011). Characterization of surface defects after flanging of metallic sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12), 2062-2071.
- [37] Banabic D., *Sheet Metal Forming Processes, Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, (2006).
- [38] ASM International, *ASM Handbook Volume 14 "Forming and Forging"*, Metal Parks Ohio.
- [39] Hill R., (1948) A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Mathematical, Physical & engineering sciences. Proc. R. Soc. Lond.* doi: 10.1098/rspa.1948.0045, published 27, May 1948, proceedings of the royal society, Downloaded from [rspa.royalsocietypublishing.org](http://rspa.royalsocietypublishing.org) on January 8, 2014.
- [40] Hill R. A (1993) *User-Friendly Theory Of Orthotropic Plasticity In Sheet Metals*, Pergamon Press Ltd, Great Britain, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 35, No. I, pp. 19 25, 1993 0020-7403/93.
- [41] Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J., *Mechanics of sheet metal forming*, Butterworth Heinemann, London (2002).
- [42] **Sluzalec**, A., *Theory of metal forming plasticity, classical and advanced topic*. Springer – Verlag- Berlin-Heidelberg, Germany (2004).
- [43] <http://www.matweb.com/>, Matweb material property data.