



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE
EMBUTIDO VARIANDO LAS CONDICIONES DE LUBRICACIÓN
SOBRE EL ACERO AISI 304”**

**AUTORES: MAILA LOYOLA, ERIKA MICHELLE
TAPIA ARMAS, RONNY FABRICIO**

DIRECTOR: Ing. RIOFRIO VILLENA, PATRICIO GUSTAVO

SANGOLQUÍ

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTIDO VARIANDO LAS CONDICIONES DE LUBRICACIÓN SOBRE EL ACERO AISI 304**” fue realizado por los señores **Maila Loyola, Erika Michelle** y **Tapia Armas, Ronny Fabricio** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 27 de agosto del 2018

.....
MSC. Riofrío Villena, Patricio Gustavo

C. C. 1707512545



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Maila Loyola, Erika Michelle y Tapia Armas, Ronny Fabricio*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Experimentación y simulación del proceso de embutido variando las condiciones de lubricación sobre el acero AISI 304**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 27 de agosto del 2018

Firma

Erika Michelle Maila Loyola

C. C. 1717824971

Ronny Fabricio Tapia Armas

C. C. 1719745265



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

*Nosotros, Maila Loyola, Erika Michelle y Tapia Armas, Ronny Fabricio autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Experimentación y simulación del proceso de embutido variando las condiciones de lubricación sobre el acero AISI 304**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Sangolquí, 27 de agosto del 2018

Firma

Erika Michelle Maila Loyola

C. C. 1717824971

Ronny Fabricio Tapia Armas

C. C. 1719745265

DEDICATORIA

Comparto este logro con todas las personas que más quiero. En primer lugar quiero dedicar este trabajo a mis padres, Pablo y Teresa, quienes son el pilar fundamental de mi vida, el resultado de este esfuerzo es el reflejo de su responsabilidad y dedicación. A mis hermanas por brindarme su apoyo incondicional y a toda mi familia quienes me han extendido su mano en todo momento.

Erika Michelle Maila Loyola

A mis padres por su apoyo en cada momento difícil, por su educación y dedicación para convertirme en la persona que soy; a mis abuelitos quienes siempre confiaron en mí y con amor supieron guiarme por cada obstáculo en el camino, a ustedes gracias por ser pilar fundamental en mi vida.

Ronny Fabricio Tapia Armas

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios por permitirme concluir con esta etapa de mi vida. A toda mi familia, quienes me han acompañado en este camino. Mi mayor gratitud hacia mis padres, quienes con su paciencia y su amor me han sabido guiar por el sendero correcto. A mis hermanas, Salo y Ferny, por ser mis amigas y por demostrarme el verdadero significado de la perseverancia y dedicación.

Gracias a la Universidad y a mis profesores. A todas las personas que fueron parte de este proceso, a mi amigo y compañero de tesis, por ser un apoyo en esta etapa que culmina. Y a todos mis amigos con quienes he compartido durante toda o la mayor parte de este ciclo que hoy termina.

Infinitas gracias a todos y todas quienes han estado presente.

Erika Michelle Maila Loyola

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por bendecirme y darme la fortaleza necesaria para cumplir cada meta en mi vida; a mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo han sabido guiarme en el camino y son parte de este logro.

A mi hermana por su cariño y apoyo durante esta etapa de mi vida, a mis abuelitos que me enseñaron el significado del esfuerzo y perseverancia y han estado en cada paso en mi camino; a mi familia que de una u otra forma han aportado en el cumplimiento de esta meta.

A Eri por su compañía, apoyo y amistad incondicional a lo largo de toda esta etapa universitaria, a mis amigos que han estado a mi lado en todo este tiempo y con quienes he compartido grandes momentos.

Gracias a todos.

Ronny Fabricio Tapia Armas

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xx
ABSTRACT	xxi
 CAPÍTULO I.	
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del Proyecto.....	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Alcance del Proyecto.....	5
1.5. Justificación del Proyecto.....	5

CAPÍTULO II.

ESTUDIO DEL ARTE	7
2.1. Teoría de la deformación plástica	7
2.1.1. Plasticidad	7
2.1.2. Conformabilidad	8
2.1.3. Deformación.....	9
2.1.4. Curva de esfuerzo – deformación ingenieril	9
2.1.5. Curva de esfuerzo – deformación verdadera.....	12
2.2. Criterios de Fractura.....	15
2.2.1. Criterio de Von Mises	16
2.3. Regla de flujo	18
2.4. Curva de endurecimiento.....	20
2.5. Triaxialidad	20
2.6. Conformado por embutición	22
2.6.1. Mecánica del Embutido	23
2.6.3. Embutido Libre	31
2.6.4. Embutido con Pisador	32
2.6.5. Análisis de Ingeniería del Embutido	33
2.7. Acero AISI 304.	35

CAPÍTULO III.

DISEÑO	39
3.1. Características Equipo Embutido	39
3.2. Diseño de punzón	41
3.3. Diseño de matriz.....	43
3.4. Construcción conjunto matriz – punzón.....	44

CAPÍTULO IV.

EXPERIMENTACIÓN	45
4.1. Caracterización del acero AISI 304.....	45
4.1.1. Composición química.....	45
4.1.2. Análisis microestructural.....	46
4.1.3. Ensayo a tensión.....	47
4.2. Ensayo de embutido	61
4.3. Resultados del ensayo	64

CAPÍTULO V.

SIMULACIÓN.....	84
5.1. Objetivo de la simulación.....	84
5.2. Parámetros de simulación.....	84
5.3. Construcción del modelo de simulación	86
5.4. Resultados de Simulación	91

CAPÍTULO VI.**ANÁLISIS DE RESULTADOS 101**

6.1. Análisis de resultados del ensayo 101

6.2. Análisis de resultados de simulación..... 104

6.3. Comparación de los resultados de ensayo y simulación 108

6.4. Triaxialidad 128

CAPÍTULO VII.**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 132**

7.1. Conclusiones 132

7.2. Recomendaciones..... 135

CAPÍTULO VIII.**BIBLIOGRAFÍA 136****CAPÍTULO IX.****ANEXOS..... 141**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Tolerancias entre punzón y matriz</i>	23
Tabla 2	<i>Composición típica de Acero AISI 304</i>	36
Tabla 3	<i>Propiedades Mecánicas del Acero AISI 304</i>	38
Tabla 4	<i>Cuantificación de metales en dos muestras de acero inoxidable AISI 304</i>	45
Tabla 5	<i>Mediciones de Voltaje realizadas sobre el Extensómetro MTS 632-12C-20</i>	49
Tabla 6	<i>Encerado de Extensómetro MTS 632-12C-20 con Voltaje Final</i>	49
Tabla 7	<i>Valores de Fuerza y Deformación obtenidos de ensayo a tensión de Probeta 1</i>	51
Tabla 8	<i>Valores de Fuerza y Deformación obtenidos de ensayo a tensión de Probeta 2</i>	57
Tabla 9	<i>Detalle de ensayos a realizar</i>	63
Tabla 10	<i>Ensayo Sin Lubricante</i>	64
Tabla 11	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Sin Lubricante</i>	65
Tabla 12	<i>Ensayo Aceite Origen mineral. Fricción Punzón – Blanco – Matriz</i>	66
Tabla 13	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen mineral. Fricción P-B-M</i> ..	67
Tabla 14	<i>Ensayo Aceite Origen mineral. Fricción Punzón – Blanco</i>	68
Tabla 15	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen mineral. Fricción P-B</i>	69
Tabla 16	<i>Ensayo Aceite Origen mineral. Fricción Blanco – Matriz</i>	70
Tabla 17	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen mineral. Fricción B-M</i>	71
Tabla 18	<i>Ensayo Aceite Origen vegetal. Fricción Punzón – Blanco – Matriz</i>	72
Tabla 19	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen vegetal. Fricción P-B-M</i> ...	73
Tabla 20	<i>Ensayo Aceite Origen vegetal. Fricción Punzón – Blanco</i>	74
Tabla 21	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen vegetal. Fricción P-B</i>	75
Tabla 22	<i>Ensayo Aceite Origen vegetal. Fricción Blanco – Matriz</i>	76

Tabla 23	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen vegetal. Fricción B-M</i>	77
Tabla 24	<i>Ensayo grasa lubricante multipropósito. Fricción Punzón - Blanco – Matriz</i>	78
Tabla 25	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Grasa multipropósito. Fricción P-B-M</i> ...	79
Tabla 26	<i>Ensayo grasa lubricante multipropósito. Fricción Punzón - Blanco</i>	80
Tabla 27	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Grasa multipropósito. Fricción P-B</i>	81
Tabla 28	<i>Ensayo grasa lubricante multipropósito. Fricción Blanco – Matriz</i>	82
Tabla 29	<i>Fuerza máxima. Ensayos de embutido Grasa multipropósito. Fricción B-M</i>	83
Tabla 30	<i>Parámetros de simulación</i>	84
Tabla 31	<i>Fuerza máxima. Simulación Sin Lubricante</i>	91
Tabla 32	<i>Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen mineral P-B-M</i>	92
Tabla 33	<i>Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen mineral P-B</i>	93
Tabla 34	<i>Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen mineral B-M</i>	94
Tabla 35	<i>Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen vegetal P-B-M</i>	95
Tabla 36	<i>Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen vegetal P-B</i>	96
Tabla 37	<i>Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen vegetal B-M</i>	97
Tabla 38	<i>Fuerza máxima. Simulación Grasa multipropósito P-B-M</i>	98
Tabla 39	<i>Fuerza máxima. Simulación Grasa multipropósito P-B</i>	99
Tabla 40	<i>Fuerza máxima. Simulación Grasa multipropósito B-M</i>	100
Tabla 41	<i>Fuerza máxima y distancia. Ensayos de embutido</i>	101
Tabla 42	<i>Fuerza máxima. Simulación de proceso de embutido</i>	105
Tabla 43	<i>Fuerza máxima. Simulación de proceso de embutido</i>	107
Tabla 44	<i>Comparación Resultados Sin Lubricante Fricción Punzón – Blanco – Matriz</i> ..	111
Tabla 45	<i>Comparación Resultados Aceite de origen vegetal Fricción P-B-M</i>	112

Tabla 46	<i>Comparación Resultados Aceite de origen vegetal Fricción P-B.....</i>	114
Tabla 47	<i>Comparación Resultados Aceite de origen vegetal Fricción B-M.....</i>	115
Tabla 48	<i>Comparación Resultados Aceite de origen mineral Fricción P-B-M.....</i>	117
Tabla 49	<i>Comparación Resultados Aceite de origen mineral Fricción P-B.....</i>	118
Tabla 50	<i>Comparación Resultados Aceite de origen mineral Fricción B-M.....</i>	120
Tabla 51	<i>Comparación Resultados Grasa multipropósito Fricción P-B-M</i>	121
Tabla 52	<i>Comparación Resultados Grasa multipropósito Fricción P-B.....</i>	123
Tabla 53	<i>Comparación Resultados Grasa multipropósito Fricción B-M.....</i>	124
Tabla 54	<i>Comparación resultados fuerza máxima promedio ensayo y simulación.....</i>	126
Tabla 55	<i>Coordenadas de puntos seleccionados – Triaxialidad</i>	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Gráfica de esfuerzo – deformación de ingeniería, Región plástica Fuente:	
(Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, 1997).....	7
Figura 2 Chapa metálica conformada plásticamente Fuente: (ArcelorMittal, s.f.)	8
Figura 3 Diagrama típico de esfuerzo – deformación unitaria Fuente: (Mott, 2006)	10
Figura 4 Medición del porcentaje de elongación Fuente: (Mott, 2006).....	12
Figura 5 Comparación de curva esfuerzo – deformación verdadero e ingenieril Fuente:	
(Mangonon, 2001).....	13
Figura 6 Curva esfuerzo – deformación verdaderos en escala logarítmica Fuente:	
(Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, 1997)	14
Figura 7 Estado de esfuerzos biaxial plano para criterio Von Mises. Fuente: (Dalmau &	
Villardell, 2003)	17
Figura 8 Superficie de Tresca y Von Mises	18
Figura 9 Hipótesis de normalidad para tensión plana y material de Von Mises Fuente:	
(Pajuelo, 2014)	19
Figura 10 Endurecimiento isótropo.....	20
Figura 11 Deformación plástica vs. Factor de triaxialidad Fuente: (Stamper, 2017)	21
Figura 12 Estados de esfuerzo según factor de triaxialidad Fuente: (Körgeaar, Remes, &	
Romanoff, 2014)	21
Figura 13 a) Embutido de pieza acopada; b) piezas de trabajo correspondientes Fuente:	
(Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3Ed., 2007)	22
Figura 14 Etapas en la deformación del material de trabajo en el embutido profundo.....	25
Figura 15 Diagrama límite de conformado típico de un acero de bajo carbono	26

Figura 16 Valores de esfuerzo para radio de matriz de 4mm Fuente: (Kopanathi & Srikanth, 2012).....	27
Figura 17 Valores de esfuerzo para radio de matriz de 7mm Fuente: (Kopanathi & Srikanth, 2012).....	27
Figura 18 Los recipientes se pueden conformar por embutido (a) sin o con un pisador (b). Fuente: (Schey, 2000)	32
Figura 19 La razón limitante de estirado en el acopado de acero al bajo carbono, sin un pisador, es una función de la geometría de la matriz y de la razón del diámetro del blanco respecto al espesor de la lámina. Fuente: (Schey, 2000).....	32
Figura 20 El embutido profundo de copas de acero al carbono a partir de (a) un blanco redondo, con presión del pisador (b) insuficiente, (c) optimo y d excesiva. Fuente: (Schey, 2000)	33
Figura 21 Type 304 stainless Steel strip annealed 5min at 1065°C, cooled in air. Structure consists of equiaxed austenite grains and annealing twins. 10mL HNO ₃ , 10mL acetic acid, 15mL HCL, 2 drops glycerol. 250x Fuente: (American Society for Metals, 2004).....	37
Figura 22 Type 304 strip, annealed 2 min at 1065°C and air cooled. Structure is equiaxed austenite grains, annealing twins, and small stringer inclusions. Electrolytic: HNO ₃ -acetic acid, then 10% oxalic acid. 100x Fuente: (American Society for Metals, 2004)	38
Figura 23 Celda de carga RL9000	40
Figura 24 Sensor de desplazamiento.....	40
Figura 25 Equipo de embutido.....	41

Figura 26 Punzón 3D	41
Figura 27 Matriz 3D.....	43
Figura 28 Muestras A y B de acero inoxidable AISI 304.....	45
Figura 29 Microestructura de acero inoxidable 304 bajo la aplicación de 10mL HNO ₃ , 10mL ácido acético, 15mL HCL, y dos gotas de glicerina.100x.....	46
Figura 30 Microestructura de acero inoxidable 304 Fuente: (Coello & Ferrer, 2009)	47
Figura 31 Esquema dimensiones de probeta acero inoxidable AISI 304 según la Norma ASTM E8.....	48
Figura 32 Probetas de acero inoxidable AISI 304, cortadas con chorro de agua.....	48
Figura 33 Probeta ajustada en las mordazas y ubicación del extensómetro	48
Figura 34 Gráfica Voltaje – Desplazamiento de Extensómetro 632-12C-20	50
Figura 35 Esfuerzo – Deformación Ingenieril Probeta 1	53
Figura 36 Esfuerzo – Deformación Real Probeta 1	54
Figura 37 Probeta 1 acero inoxidable AISI 304 después de ensayo a tensión.....	54
Figura 38 Cálculo gráfico límite de fluencia Probeta 1	55
Figura 39 Gráfica de ajuste de Hollomon Probeta 1	56
Figura 40 Gráfica Esfuerzo – Deformación, Real y Aproximación de Hollomon.....	56
Figura 41 Gráfica Esfuerzo – Deformación Ingenieril Probeta 2	58
Figura 42 Gráfica Esfuerzo – Deformación Real Probeta 2	58
Figura 43 Probeta 2 acero inoxidable AISI 304 después de ensayo a tensión.....	59
Figura 44 Cálculo gráfico Límite de Fluencia Probeta 2	59
Figura 45 Gráfica de ajuste de Hollomon Probeta 2	60
Figura 46 Gráfica Esfuerzo Deformación, Real. Aproximación Hollomon Probeta 2	61

Figura 47 Blanco. Diámetro 50mm.....	62
Figura 48 Ejemplo de copas obtenidas después de ensayo Lubricación Blanco – Matriz Lubricante: Grasa Multipropósito.....	62
Figura 49 Gráfica Ensayos de embutido – Sin lubricante.....	65
Figura 50 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción P-B-M	67
Figura 51 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción P-B	69
Figura 52 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción B-M.....	71
Figura 53 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B-M	73
Figura 54 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B.....	75
Figura 55 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción B-M.....	77
Figura 56 Gráfica Ensayos de embutido – Grasa multiuso - Fricción P-B-M	79
Figura 57 Gráfica Ensayos de embutido – Grasa Multiuso - Fricción P-B.....	81
Figura 58 Gráfica Ensayos de embutido – Grasa Multiuso - Fricción B-M	83
Figura 59 Gráfica Esfuerzo – Deformación (convergencia de malla)	85
Figura 60 Creación nuevo documento	86
Figura 61 Geometría Conjunto Punzón – Blanco – Matriz.....	87
Figura 62 Condiciones material	87
Figura 63 Valor crítico material	88
Figura 64 Ventana selección de fricción.....	88
Figura 65 Ventana Controles de Simulación	89
Figura 66 Longitud de elemento de mallado.....	89
Figura 67 Controles de simulación	89
Figura 68 Generación de simulación.....	90

Figura 69 Gráfica Simulación de embutido Sin Lubricante.....	91
Figura 70 Gráfica Simulación de embutido Aceite de origen mineral - Fricción P-B-M.....	92
Figura 71 Gráfica Simulación de embutido Aceite de origen mineral - Fricción P-B.....	93
Figura 72 Gráfica Simulación de embutido Aceite de origen mineral - Fricción B-M	94
Figura 73 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B-M ...	95
Figura 74 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B	96
Figura 75 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción B-M.....	97
Figura 76 Gráfica Simulación de embutido – Grasa multiuso - Fricción P-B-M	98
Figura 77 Gráfica Simulación de embutido – Grasa Multiuso - Fricción P-B.....	99
Figura 78 Gráfica Simulación de embutido – Grasa Multiuso - Fricción B-M	100
Figura 79 Gráfica Comparativa Ensayos Combinación P-B-M.....	102
Figura 80 Gráfica Comparativa Ensayos Combinación P-B.....	102
Figura 81 Gráfica Comparativa Ensayos Combinación B-M	103
Figura 82 Copa embutida Lubricación Punzón – Blanco. De izq a der: Lubricante aceite vegetal, Lubricante aceite mineral, grasa multipropósito.	104
Figura 83 Copa embutida Lubricación B-M: Lubricante Grasa multipropósito.....	104
Figura 84 Simulación de embutido. Lubricante de origen vegetal. Blanco – Matriz	105
Figura 85 Simulación de embutido. Lubricante grasa multipropósito. Blanco – Matriz	106
Figura 86 Simulación de embutido. Lubricante aceite de origen mineral. B-M.....	106
Figura 87 Datos ingresados en forma de vector.....	109
Figura 88 Ingreso de datos desplazamiento fuerza en la ventana de comando - Matlab	110
Figura 89 Resultados del programa MatLab	110
Figura 90 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Sin Lubricante	112

Figura 91	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen vegetal P-B-M.....	113
Figura 92	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen vegetal P-B.....	115
Figura 93	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen vegetal B-M	116
Figura 94	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen mineral P-B.M	118
Figura 95	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen mineral P-B	119
Figura 96	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen mineral B-M.....	121
Figura 97	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Grasa multipropósito P-B-M.....	122
Figura 98	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Grasa multipropósito P-B.....	124
Figura 99	Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Grasa multipropósito B-M	125
Figura 100	Gráfica comparativa Fuerza Máxima – Punzón Blanco	126
Figura 101	Gráfica comparativa Fuerza Máxima – Blanco Matriz	127
Figura 102	Gráfica comparativa Fuerza Máxima – Blanco Matriz Punzón	127
Figura 103	Ejemplo puntos seleccionados	128
Figura 104	Ejemplo puntos seleccionados	128
Figura 105	Deformación efectiva – Triaxialidad. Grasa multipropósito – Cara interior	129
Figura 106	Deformación efectiva – Triaxialidad. Grasa multipropósito– Cara exterior	130

RESUMEN

El presente proyecto de investigación consiste en la experimentación y simulación por el método de elementos finitos del proceso de embutido variando las condiciones de lubricación del acero AISI 304. Primero se caracterizó el material mediante un análisis químico, la microestructura y un ensayo de tensión, para obtener la curva esfuerzo - deformación real de la que se obtiene el modelo matemático necesario por el MEF mediante el software de simulación para proceso de conformado mecánico. Se realizaron ajustes necesarios en el equipo de embutido que dispone el Laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, además se diseñó y construyó un conjunto matriz - punzón para la ejecución de los ensayos. Se realizaron un total de 30 ensayos, utilizando tres tipos de lubricante: aceite de origen vegetal, aceite de origen mineral y grasa multipropósito, con diferentes combinaciones de lubricación entre el punzón, el blanco y la matriz. Las gráficas Fuerza – Desplazamiento del punzón obtenidas en los ensayos experimentales, fueron comparadas y analizadas con las gráficas obtenidas mediante la simulación en el software computacional. Se logró un adecuado ajuste entre los resultados de los ensayos y simulación; se determinó que las condiciones de lubricación con diferentes combinaciones entre el punzón, el blanco y la matriz influyen en los resultados de fuerza máxima que ejerce el punzón dentro del proceso de embutición.

Palabras clave:

- *AISI 304*
- *MICROESTRUCTURA*
- *EMBUTIDO*

ABSTRACT

The following research project consists of the experimentation and simulation by the finite element method of the deep-drawing process varying the lubrication conditions of the AISI 304 steel. First, the material was characterized by a chemical analysis, the microstructure and a stress test, for obtain the force curve- actual deformation curve from which the mathematical model required by the FEM is obtained by means of the simulation software for the mechanical forming process. Necessary adjustments were made to the deep-drawing process equipment available at the Materials Science Laboratory of the University of the Armed Forces - ESPE, and a die-punch assembly was designed and built for the execution of the tests. A total of 30 tests were carried out, using three types of lubricant: oil of vegetable origin, oil of mineral origin and multipurpose oil, all with different lubrication combinations between the punch, the blank and the die. The Force - Displacement graphs of the punch obtained in the experimental tests were compared and analyzed with the graphs obtained by means of the simulation in the computer software. An adequate adjustment was achieved between the results of the tests and simulation; It was determined that the lubrication conditions with different combinations between the punch, the blank and the die do influence the results of maximum force exerted by the punch within the drawing process.

Key words:

- **AISI 304**
- **MICROSTRUCTURE**
- **DEEP-DRAWING PROCESS**

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los distintos procesos de conformado de chapas metálicas representan un grupo importante dentro de los procesos de manufactura para distintas aplicaciones. Según (Arteaga, 2013), los procesos de embutido abarcan un amplio rango de operaciones y condiciones de fluencia en las que se distinguen diversos estados de esfuerzo y deformación.

Se denomina embutición al proceso de conformado de láminas metálicas, utilizado para fabricar piezas de forma acopada, de caja y otras formas huecas más complejas (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, Procesos y Sistemas, 1997). Uno de los procesos de manufactura de mayor desafío es la tecnología de embutido profundo, debido a la gran cantidad de variables que deben ser controladas: tamaño, espesor, forma, material de embutición, condiciones de lubricación, fuerza de sujeción, etc.

En (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, Procesos y Sistemas, 1997), señala que la relación de embutido puede ser de un límite aproximado de 2; la reducción, cuyo valor debe ser menor que 0.50; y la relación de espesor al diámetro, la cual es recomendable que sea mayor que 1%. En los casos que el diseño exceda los límites expuestos, la forma deberá ser embutida en dos o más pasos.

Históricamente, el desarrollo y evolución del conformado de chapas metálicas, ha ido progresando lentamente, debido a que se han basado en la experiencia, ensayos de prueba y error y cierta habilidad artesanal. (Keeler, 1977).

Según (Gutiérrez, 2010), desde el aspecto del diseño industrial, considerando las propiedades de los materiales y el diseño de forma, el costo económico es mayor cuando se realizan

experimentos empíricos; para solucionar este inconveniente, a lo largo del tiempo se ha ido introduciendo el uso de software computacionales para la simulación de procesos de conformado empleando el método de elementos finitos, convirtiéndose así en una herramienta útil al momento de resolver problemas sobre las variables que intervienen en el proceso de embutido, prediciendo así los fallos en las piezas debido a su comportamiento frente a las tensiones y deformaciones.

El uso del Método de Elementos Finitos en la fase de diseño y manufactura es deseable para el ingeniero o diseñador, a fin de disminuir drásticamente los problemas y desperdicios físicos y económicos, alcanzando así una mayor competitividad.

Actualmente, los procesos mecánicos de conformación de chapas metálicas, debido a su elevada productividad, confiabilidad y bajo costo, tienen una gran popularidad y son ampliamente utilizados en las industrias médico-farmacéuticas, biotecnológica, utensilios en general, sector energético, automovilístico y militar.

En Ecuador, son diferentes las industrias que utilizan el proceso de embutido como solución a la producción de ciertas piezas en serie; un ejemplo es la Fábrica de Municiones Santa Bárbara, la cual ha incursionado en distintos campos de la industria metalmecánica, enfocándose en la producción en serie de artículos como vajillas, hebillas y cubiertos. A partir de diferentes proyectos se ha realizado el rediseño de las matrices y simulación del proceso de embutido, optimizando los procesos de fabricación.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se están desarrollando líneas de investigación relacionadas al conformado mecánico y plasticidad a través de tesis de la Maestría en Manufactura y Diseño Asistido por Computador.

1.2.Descripción del Proyecto

El proyecto se fundamenta en la experimentación y simulación del proceso de embutido variando las condiciones de lubricación del acero AISI 304; para lograr lo previsto se empezará caracterizando el material, a través de la composición química y su micro-estructura; así también, se realizará un ensayo de tensión, el cual proporcionará información necesaria para la construcción del diagrama esfuerzo – deformación unitaria real, en donde se identificará: el límite de proporcionalidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y el esfuerzo de ruptura; además de calcular los parámetros requeridos para la simulación del proceso de embutido y obtener la curva de endurecimiento del material.

A continuación, se realizarán los ajustes necesarios en el equipo de embutido disponible en el Laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE; perfeccionando la programación existente en Labview; además se diseñará y construirá un conjunto matriz – punzón para la ejecución de los ensayos.

Para el diseño de la matriz, se considerarán las recomendaciones de diferentes autores, con respecto a los radios de las esquinas del punzón y la matriz; así también se debe tomar en cuenta la holgura que debe existir entre la matriz y el punzón, la cual debe ser aproximadamente 10% mayor que el espesor del material a embutir. (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, Procesos y Sistemas, 1997)

La mayoría de los metales se los trabaja en frío, ya que este proceso mejora la precisión, la exactitud dimensional y el terminado superficial del metal. Es recomendable que el proceso de embutido se lleve únicamente en frío, por lo que los ensayos a realizar se trabajarán a temperatura ambiente.

El equipo en el que se desarrollarán los ensayos, presenta una interfaz en LabView, la cual brindará los datos de Fuerza – Desplazamiento con su respectiva gráfica de cada ensayo de embutido; estas gráficas serán comparadas con las obtenidas en las distintas simulaciones a ejecutar en el software de simulación para proceso de conformado mecánico.

En los ensayos a realizar se utilizarán diferentes lubricantes en distintas combinaciones entre el punzón, el blanco y la matriz.

En el software computacional se importarán los sólidos correspondientes al punzón, el blanco y la matriz y se construirá un modelo de simulación variando diferentes parámetros como son: propiedades del material, número de elementos de malla, valores de fricción correspondiente a los diferentes lubricantes, modelo de endurecimiento, etc.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Establecer una adecuada correlación entre los resultados de ensayos experimentales y de los obtenidos en la simulación del proceso de embutición variando las condiciones de lubricación sobre el acero AISI 304.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el acero AISI 304, para obtener las propiedades mecánicas, la composición química y su micro-estructura.
- Diseñar y construir un conjunto matriz – punzón, adaptables al equipo de embutición existente en el Laboratorio de Ciencias de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

- Ejecutar los ensayos de embutición a fin de obtener las curvas Fuerza – Desplazamiento y sus puntos de fuerza máxima.
- Simular mediante el método de elementos finitos con software comercial el proceso de embutición.
- Alcanzar una adecuada concordancia entre resultados experimentales y de simulación.

1.4. Alcance del Proyecto

El alcance del proyecto de investigación contempla la caracterización del material a utilizar en el proceso de conformado por embutición. Se procederá con los ajustes necesarios en el equipo de embutición que se encuentra en el Laboratorio de Ciencias de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Se realizará el diseño y construcción del conjunto matriz – punzón adaptable a la máquina de embutición, además de la mejora en el funcionamiento de la máquina dentro de la programación y funcionamiento de la misma.

La experimentación del proceso de embutido contendrá varios ensayos en frío del material ya mencionado variando las condiciones de lubricación para su posterior simulación en el software computacional; dentro de la simulación se analizará el modo de falla o rotura del material para su posterior comparación con el proceso real. Finalmente se compararán los resultados obtenidos de manera teórica y experimental.

1.5. Justificación del Proyecto

El proceso de conformado por embutición es utilizado en gran medida dentro de la industria para la fabricación de piezas de diversas formas, depósitos y recipientes a partir de chapas

metálicas. Dentro de la industria ecuatoriana el proceso de embutición es muy utilizado tanto en el sector público como privado.

La empresa pública Santa Bárbara utiliza este proceso de conformado en la fabricación de varias piezas indispensables para el uso del Ejército ecuatoriano, tales como, menaje de cocina, implementos para armas y municiones, etc. Por otro lado, el sector privado también hace uso de este proceso de conformado como la empresa Ecuamatrix dedicada a la fabricación de cajas metálicas para medidores, cajas de distribución, tableros metálicos, etc., partiendo de chapas metálicas de diferentes materiales. Este proceso posee múltiples usos dentro de varias industrias como la automotriz, alimenticia, eléctrica, etc., por lo cual existe una gran variedad de materiales utilizados en este proceso de conformado, cada uno de ellos con diferentes características.

Existen diferentes factores que influyen en el proceso de embutido, según (Altan & Tekkaya, 2012), uno de los factores que influye en el límite de embutibilidad (LDR), es la fricción existente entre los diferentes elementos que participan en el proceso; es por eso la necesidad del estudio de la variación de las condiciones de lubricación.

Por lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo se pretende estudiar el proceso de conformado por embutición, así como las características del acero AISI 304 a ser utilizado, y realizar una comparación entre la teoría y la práctica mediante la experimentación y simulación del proceso, todo esto debido a la importancia del proceso de embutido dentro de la industria ecuatoriana, y la necesidad de la Universidad de la Fuerzas Armadas – ESPE de aportar al país con investigaciones dentro del campo tecnológico de los procesos de manufactura.

CAPÍTULO II. ESTUDIO DEL ARTE

2.1. Teoría de la deformación plástica

2.1.1. Plasticidad

Según (Collieu & Powney, 1977), la plasticidad es la capacidad de un material para experimentar deformaciones permanentes sin llegar a la rotura, después de haber sido sometido a tensiones mayores que su límite elástico. En la figura 1, se puede observar la curva Esfuerzo – Deformación de ingeniería, en la cual se distingue la región elástica, región plástica y el punto de fractura.

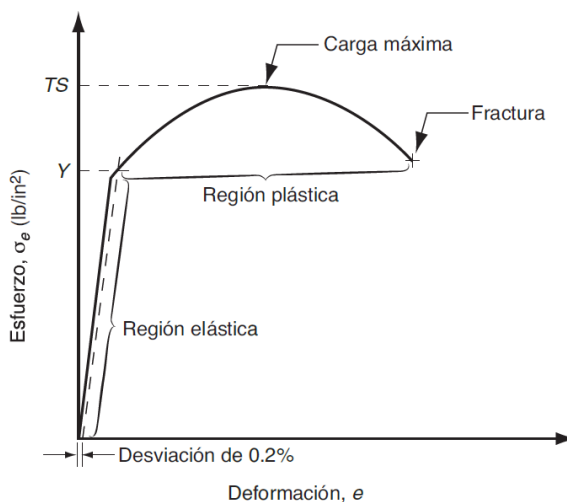


Figura 1 Gráfica esfuerzo – deformación de ingeniería, Región plástica

Fuente: (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, Procesos y Sistemas, 1997)

(González, Metalurgia Mecánica, 2003) en su libro “Metalurgia Mecánica”, indica que experimentalmente se ha encontrado que la deformación plástica presenta las siguientes tres características:

- a. Irreversible: La condición interna del material habrá cambiado por lo que no se puede obtener la forma inicial después de haber sido deformado plásticamente.

- b. Depende de la trayectoria: La deformación total dependerá de la trayectoria que se haya seguido durante la deformación.
- c. Constancia de volumen: Los sólidos son incompresibles, su volumen no variará durante la deformación plástica.

2.1.2. Conformabilidad

Según (Iurman, Lucaioli, Bergé, & Insausti, 2013) la conformabilidad está ligada al éxito dentro de una operación de deformación plástica, es decir es la conformabilidad es la capacidad de un material para ser deformado; (Iurman, Lucaioli, Bergé, & Insausti, 2013) también indica que dentro de una operación de embutido profundo (figura 2) la pared de la pieza final debe soportar la tensión para que el disco se introduzca al interior de la matriz, ya que si esta no es lo suficientemente resistente podría disminuir su espesor y llegar a la rotura; por otro lado, el material cerca de la boca de la matriz debe se debe deformar en su propio plano de manera que se compriman a medida que avance el embutido.



Figura 2 Chapa metálica conformada plásticamente
Fuente: (ArcelorMittal, s.f.)

La facilidad para ser embutido de un material está determinada por varios factores, entre ellos, la ductilidad, que es la propiedad que permite que el material se deforme en el plano y en el espesor hasta llegar eventualmente a la rotura; otro de los factores más importantes es la anisotropía que es la capacidad de un material para deformarse en el plano de la chapa de mejor manera que en el espesor de la misma.

2.1.3. Deformación

Los cambios de forma que sufre un material sometido a un esfuerzo de tensión, un esfuerzo cortante o esfuerzo hidrostático, se denomina deformación. Un esfuerzo de tensión induce al material a alargarse en dirección paralela a la fuerza y a contraerse lateralmente en dirección perpendicular a la misma fuerza (Mangonon, 2001).

Siendo así, la deformación longitudinal o por tensión se expresa de la siguiente manera:

$$\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (1)$$

Donde L_o es la dimensión inicial u original de la probeta y L_f corresponde a la longitud final o deformada.

2.1.4. Curva de esfuerzo – deformación ingenieril

Según (Mangonon, 2001), la porción inicial del Diagrama Esfuerzo – Deformación corresponde a la respuesta de los materiales a la Ley de Hooke, definiendo así al Módulo de Young del material ensayado como la pendiente de ésta porción lineal, así como se observa en la Figura 3.

En la deformación elástica que se observa en la figura 3, el material se comportará elásticamente, lo que significa que recuperará su forma inicial cuando se elimine el esfuerzo aplicado; esto no ocurre en la región de deformación plástica, ya que aquí es donde el material se deformará de manera permanente.

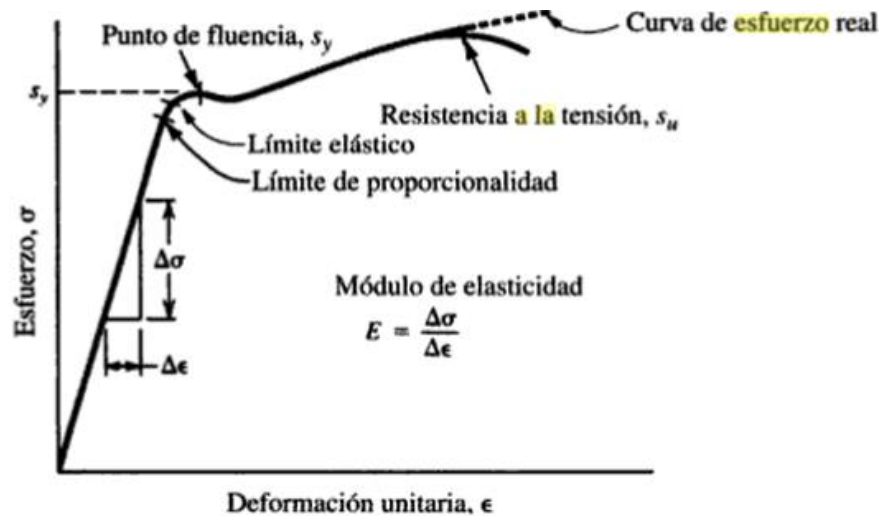


Figura 3 Diagrama típico de esfuerzo – deformación unitaria
Fuente: (Mott, 2006)

2.1.4.1. Resistencia a la tensión, s_u

Es el punto máximo de la curva esfuerzo-deformación; después de alcanzar el esfuerzo máximo, se presenta un decremento de la sección transversal del espécimen, lo que se conoce como formación de cuello. (Mott, 2006)

2.1.4.2. Resistencia de fluencia, s_y

Según (Mott, 2006) la resistencia de fluencia corresponde a la parte del diagrama esfuerzo – deformación donde existe un gran incremento de la deformación y poco aumento de esfuerzo.

2.1.4.3. Límite de proporcionalidad

Es el punto de la curva esfuerzo – deformación donde por debajo se desvía una línea recta, la cual cumple con la ley de Hooke, en donde el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria.

2.1.4.4. Límite elástico

Este punto es el límite el cual, por debajo de este, el material se comporta en forma totalmente elástico.

2.1.4.5. Módulo de elasticidad en tensión, E

Según (Mott, 2006) el módulo de elasticidad corresponde a la constante de proporcionalidad de la región rectilínea de la curva esfuerzo – deformación unitaria, es la pendiente de ésta parte del diagrama e indica la resistencia a la deformación del material.

2.1.4.6. Ductilidad y porcentaje de elongación

Se conoce como ductilidad al grado en el que un material se deformará antes de su fractura final, su medida usual es el porcentaje de elongación o de alargamiento que es la diferencia entre la longitud final e inicial del espécimen, dividida entre la longitud inicial:

$$\%elongación = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \quad (2)$$

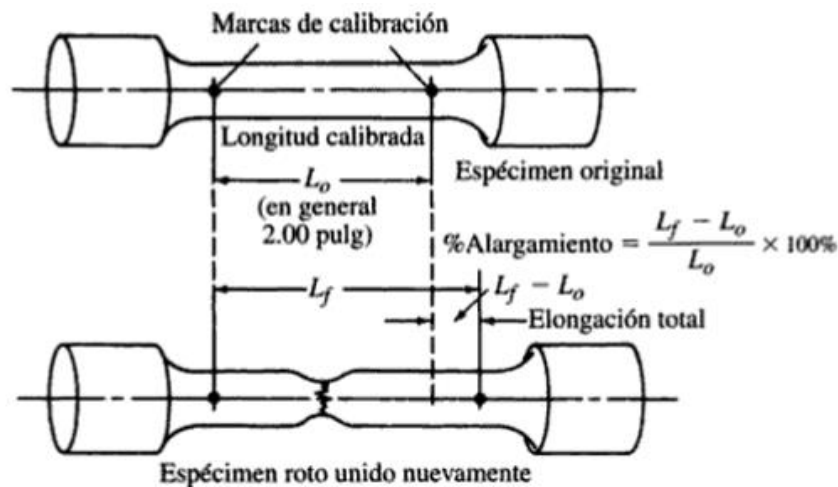


Figura 4 Medición del porcentaje de elongación

Fuente: (Mott, 2006)

2.1.5. Curva de esfuerzo – deformación verdadera

Esta curva no es una indicación precisa de los esfuerzos y deformaciones reales del material ya que se basa en las dimensiones de área y longitud de calibre originales del espécimen; esta curva también se la conoce como curva de esfuerzo de fluencia. (Mangonon, 2001).

El esfuerzo verdadero es la relación entre la carga y el área instantánea:

$$\sigma = \frac{P}{A_{inst}} \quad (3)$$

Y la deformación verdadera se define de la siguiente manera:

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_o} \quad (4)$$

En la figura 5 se muestra el esquema de la curva esfuerzo – deformación ingenieril (s – e) y verdadero ($\sigma - \epsilon$). La relación entre el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera con los valores ingenieriles se los puede expresar así:

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_o} \quad (5)$$

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln(1 + e) \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \cdot \frac{A_0}{A_0} = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = s \frac{L}{L_0} = s(1 + e) \quad (7)$$

Las ecuaciones anteriormente descritas son válidas hasta la carga máxima, después de este punto es necesario determinar el valor verdadero de esfuerzo a partir de las mediciones de carga y área reales.



Figura 5 Comparación de curva esfuerzo – deformación verdadero e ingenieril

Fuente: (Mangonon, 2001)

Se han realizado números estudios para poder ajustar una ecuación matemática a la curva esfuerzo – deformación verdadera ($\sigma - \epsilon$) a la parte que corresponde a la deformación plástica, obteniéndose así la siguiente expresión, la cual es conocida como la ecuación de Hollomon:

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (8)$$

Donde K se conoce como coeficiente de resistencia y es igual al valor del esfuerzo verdadero para un valor igual a 1 de la deformación verdadera; n es el exponente de endurecimiento por

deformación y determina el comportamiento del material después de la cedencia, es la pendiente de la recta de la figura 6. (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, Procesos y Sistemas, 1997)

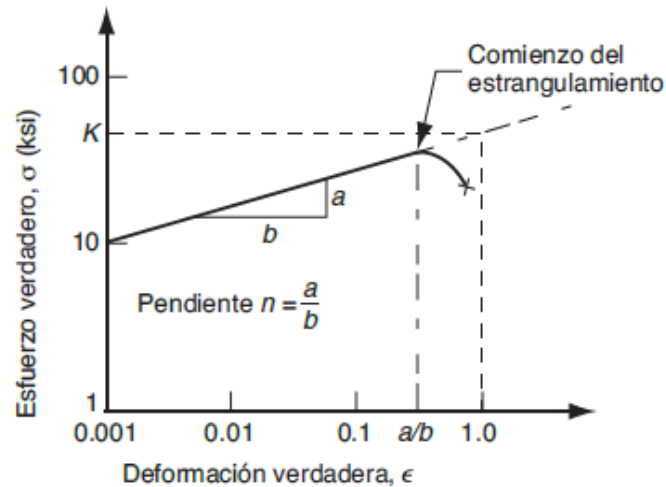


Figura 6 Curva esfuerzo – deformación verdaderos en escala logarítmica
Fuente: (Altan & Tekkaya, 2012)

Así mismo existen otras ecuaciones empíricas que se ajustan a una curva esfuerzo – deformación de un material, según (Aparicio, Heber, & Ciaccia, 2007), entre estos modelos se encuentran los de Ludwik y Swift:

-Ecuación de Ludwik

$$\sigma = \sigma_0 + h\epsilon^m \quad (9)$$

Donde σ_0 se lo interpreta como el esfuerzo de fluencia, mientras que el término $h\epsilon^m$ se lo considera como el término que depende de la deformación.

-Ecuación de Swift

$$\sigma = K_1 \cdot (A + \epsilon)^{n_1} \quad (10)$$

Según (Bejarano, 2013) esta expresión representa una aproximación para distintos materiales, pero es algo difícil de manejar, los valores de K_1 , A y n_1 son constantes del material.

El exponente de endurecimiento por deformación de un material perfectamente plástico es $n = 0$ y el de un material perfectamente elástico es $n = 1$. Un material perfectamente plástico no presenta endurecimiento por deformación y se deforma continuamente cuando el esfuerzo alcanza el esfuerzo de fluencia del material, y no se puede conformar un material perfectamente elástico ya que este tiende a recuperar su forma original, es por esto que el valor de n será entre 0.10 y 0.50. (Mangonon, 2001)

2.2. Criterios de Fractura

La fractura de un material se debe principalmente a la deformación plástica que sufre el material o lo que se llama la acumulación del daño. La relación general para varios criterios de fractura está dada por:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} f(\sigma) d\bar{\epsilon} = C^* \quad (11)$$

Donde $f(\sigma)$ es una función del estado de esfuerzos, $d\bar{\epsilon}$ es la deformación equivalente, $\bar{\epsilon}_f$ es la deformación a la que se produce la fractura y C^* es una constante del material.

Para predecir el punto de fractura basado en las diferentes propiedades del material, se han desarrollado diferentes criterios, los cuales se aplican dependiendo de la posible falla que pueda tener un material, si es frágil o dúctil. Para los materiales frágiles se aplica la teoría de Mohr-Coulomb, mientras que para los materiales dúctiles se utiliza el criterio de Von Mises.

2.2.1. Criterio de Von Mises

Según (Vicentini, 2008) su aplicación se basa en el uso de materiales metálicos; este propone una superficie de plastificación representada por la siguiente función:

$$f = \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (12)$$

Donde k es la tensión de plastificación a cortadura pura, y J_2 es el segundo invariante del desviador, teniendo así las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{\sigma_e^T}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (14)$$

Reemplazando tenemos:

$$f = \sqrt{3J_2} - \sigma_e^T = 0 \quad \text{o} \quad f = q - \sigma_e^T = 0 \quad (15)$$

$$q = \sqrt{3J_2} = \sigma_{eq}^{VM} \quad (16)$$

$$\sigma_{eq}^{VM} = \sigma_e^T \quad (17)$$

Donde σ_{eq}^{VM} es el esfuerzo equivalente de Von Mises y σ_e^T es el límite elástico del material en tracción, para representar de manera gráfica (Figura 8) el criterio de Von Mises, se representa la superficie de plastificación como un cilindro de radio $\frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_e^T$, y el eje de este en la dirección de la tensión hidrostática σ_m , donde:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (14)$$

Siendo $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, los esfuerzos principales del estado general de esfuerzos considerado; según éste criterio, no se alcanzará la fluencia mientras el primer miembro no rebase el valor dado por el segundo. En el estado de esfuerzos biaxiales (Figura 7), los esfuerzos principales se los calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (15)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (16)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (17)$$

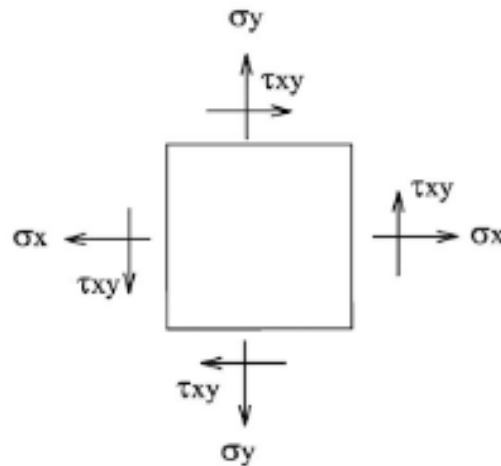


Figura 7 Estado de esfuerzos biaxial plano para el criterio de Von Mises.
Fuente: (Dalmau & Vilardell, 2003)

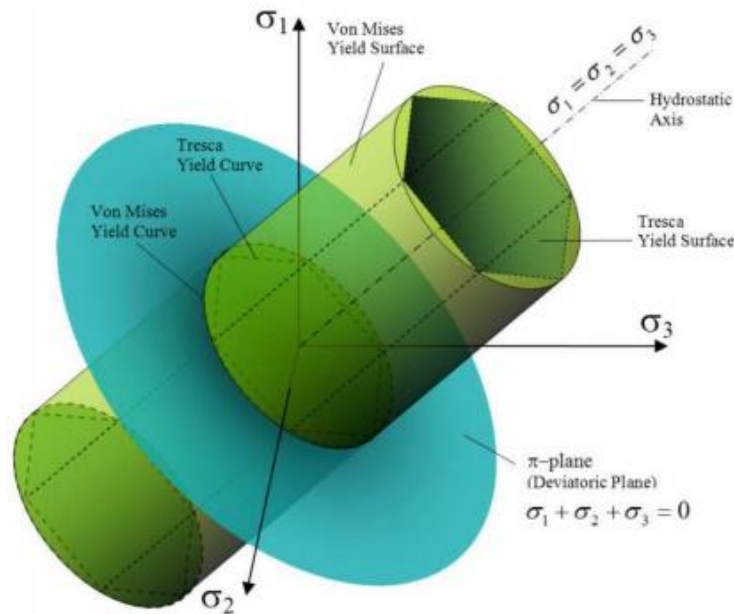


Figura 8 Superficie de Tresca y Von Mises

Fuente: (Vicentini, 2008)

2.3.Regla de flujo

Según (Vicentini, 2008), la regla de flujo determina la dirección de la deformación plástica, es decir indica la variación de las variables internas en función del tiempo después de que el material ha alcanzado un estado de tensiones donde aparece la fluencia. Su formulación matemática es la siguiente:

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda_p \left\{ \frac{d\psi}{d\sigma} \right\} \quad (18)$$

Donde λ_p , representa la constante denominada multiplicador plástico o factor de proporcionalidad, la cual determina la cantidad de deformación plástica. ψ representa una función de las tensiones, llamada potencial plástico y su gradiente determina la dirección de la deformación plástica. (Mroginiski, Di Rado, Beneyto, & Awruch, 2006)

Cuando un material fluye, resulta una relación entre deformaciones que depende del estado de esfuerzos. Las reglas de flujo son expresadas matemáticamente de la siguiente manera:

2.4. Curva de endurecimiento

Según (Vicentini, 2008) la curva de endurecimiento (regla de endurecimiento) describe el cambio de la superficie de plastificación, a fin de que las condiciones de plastificación puedan ser definidas. En la figura 10 se observa la regla de endurecimiento isótropo, donde la deformación plástica se expande a los lados de manera idéntica desde la línea central, esto conforme avanza la deformación plástica.

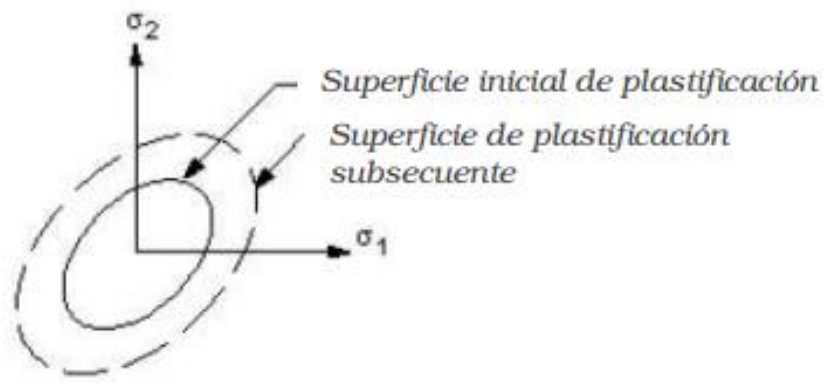


Figura 10 Endurecimiento isótropo

Fuente: (Vicentini, 2008)

2.5. Triaxialidad

Se define como triaxialidad al estado de tensión el cual es influido por la cantidad de deformación plástica que puede sufrir un material antes de que se produzca una falla dúctil. (Mirone, 2007). Matemáticamente se la puede expresar como la relación entre el esfuerzo medio y el esfuerzo efectivo Von Misses.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} = \frac{\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}}{\sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)}} \quad (23)$$

Como se observa en la Figura 11, a un factor de triaxialidad mayor y a una carga de tensión dominante, la deformación plástica es menor comparado si se presenta un estado de compresión. Por lo tanto, la deformación depende del nivel de triaxialidad.

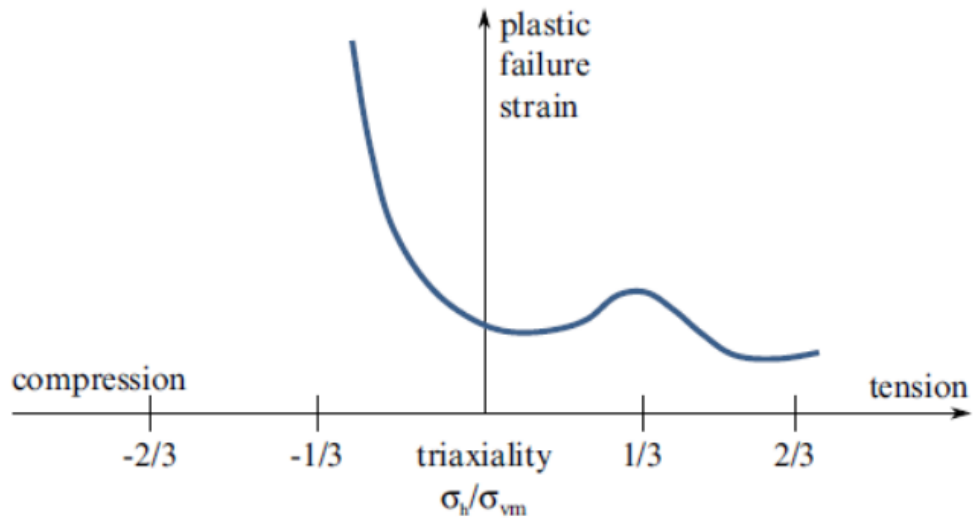


Figura 11 Deformación plástica vs. Factor de triaxialidad
Fuente: (Stamper, 2017)

En la Figura 12, se observa que valores de triaxialidad, corresponde a los diferentes estados de esfuerzo.

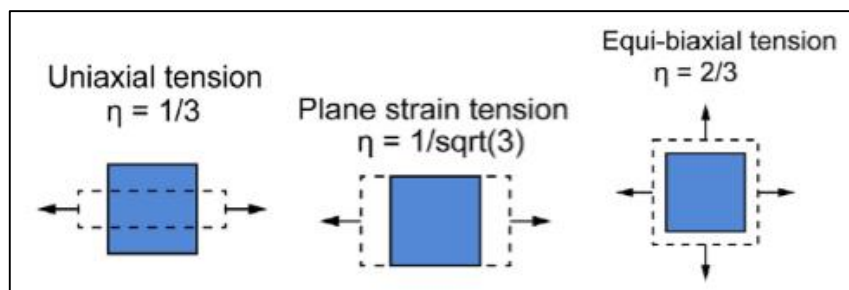


Figura 12 Estados de esfuerzo según factor de triaxialidad
Fuente: (Körgesaar, Remes, & Romanoff, 2014)

2.6. Conformado por embutición

Según (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3Ed., 2007) el embutido es una operación de formado de láminas metálicas usado para realizar piezas de forma acopada, de caja y otras formas huecas complejas. Este es realizado al empujar un punzón por cavidad de un troquel, como se muestra en la figura 13. Existen varias piezas comunes que se realizan a través del conformado por embutición como por ejemplo latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y piezas para carrocería de automóviles.

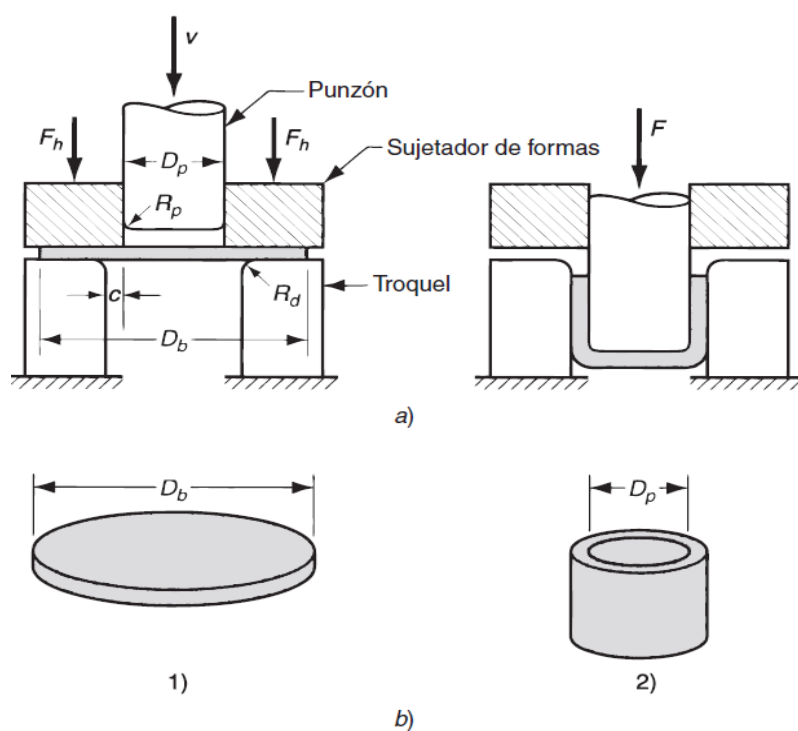


Figura 13 a) Embutido de una pieza acopada;

b) piezas de trabajo correspondientes

Fuente: (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3Ed., 2007)

2.6.1. Mecánica del Embutido

(Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3Ed., 2007) señala que la operación más básica del embutido es el embutido de piezas acopadas, con dimensiones y parámetros mostrados en la figura 13; Un disco de diámetro D_b es embutido dentro de un troquel mediante un punzón de diámetro D_p . Tanto el punzón como el troquel deben tener un radio R_p y R_d en las esquinas, ya que si $R_p = R_d = 0$, se tendría una operación de perforado. Los lados del troquel y el punzón se encuentran separados por una distancia c , la cual es aproximadamente 10% mayor al espesor del material a embutir, es decir:

$$C = 1.1 t \quad (24)$$

Según (Oehler, 1977), el juego por lado se considera de 7 a 12% más que el espesor de la chapa, de esta manera se evita el arrugamiento de la pared lateral y rotura de la cápsula. En la tabla 3 se indican las tolerancias entre punzón y matriz para diferentes espesores de chapa.

Tabla 1

Tolerancias entre punzón y matriz

Espesor (t)		Tolerancia entre matriz y punzón	
Pulgadas (in)	Milímetros (mm)	Embutido	Reembutido
Hasta 0.015	0.381	1.07 a 1.09 t	1.08 a 1.10 t
0.16 a 0.05	0.4064 a 1.27	1.08 a 1.10 t	1.09 a 1.12 t
0.051 a 1.25	1.2954 a 3.175	1.10 a 1.12 t	1.12 a 1.14 t
0.126 y más	3.3004 y más	1.12 a 1.14 t	1.15 a 1.20 t

Fuente: (Oehler, 1977)

El radio del punzón es un parámetro importante para un correcto proceso de embutido, si el radio es demasiado grande se producirán ondulaciones y arrugas en el disco, mientras que si el radio es muy pequeño, puede cortar el material realizando un proceso de cizalladura, por lo que se hace recomendable que este radio no sea menor al espesor de la chapa. (Escribano, 2018)

$$3t \leq r \leq 5t \quad (25)$$

Mientras que para el radio de la matriz, se pueden adoptar los siguientes valores:

$t < 1\text{mm}$	$R = 6 \text{ a } 8t$
$1 < t < 3\text{mm}$	$R = 4 \text{ a } 6t$
$3 < t < 4\text{mm}$	$R = 2 \text{ a } 4t$

Tanto el punzón como el sujetador de piezas realizan una fuerza sobre la lámina, el punzón ejerce una fuerza F hacia abajo y el sujetador una fuerza de sujeción F_h como se muestra en el diagrama. De acuerdo al recorrido del punzón hacia abajo hasta su posición final, la lámina experimenta una compleja serie de esfuerzos y deformaciones al tomar la forma del punzón. Las etapas dentro del proceso de deformación se ilustran en la figura 14(1). El punzón somete a la lámina de metal a una operación de *doblado* al empujar sobre esta; la lámina es doblada sobre la esquina del punzón y del troquel como se muestra en la figura 14(2).

Mientras el punzón avanza se produce un *enderezado* del metal sobre el radio del troquel, figura 14(3). El metal al fondo de la copa, y a lo largo del radio del punzón fue movido hacia abajo con ayuda del punzón; por otro lado, el metal que se dobló en el radio del troquel debe ser jalado y enderezado para formar la pared del cilindro. El metal de borde exterior sirve como reemplazo del metal que forma la pared del cilindro. De este tipo de flujo de metal a través de un espacio restringido es de donde toma su nombre el proceso de embutido.

A medida que el metal de esta porción de la forma se estira hacia el centro, el perímetro exterior se hace menor. Debido a que el volumen del metal permanece constante, el metal se comprime y se hace más grueso al reducirse el perímetro. Esto ocasiona frecuentemente el arrugado de la brida remanente de la pieza o forma, especialmente cuando la lámina es delgada o cuando la fuerza del sujetador es demasiado baja. Esta condición no puede corregirse una vez que ha ocurrido. Los efectos de la fricción y de la compresión se ilustran en la figura 14(4).

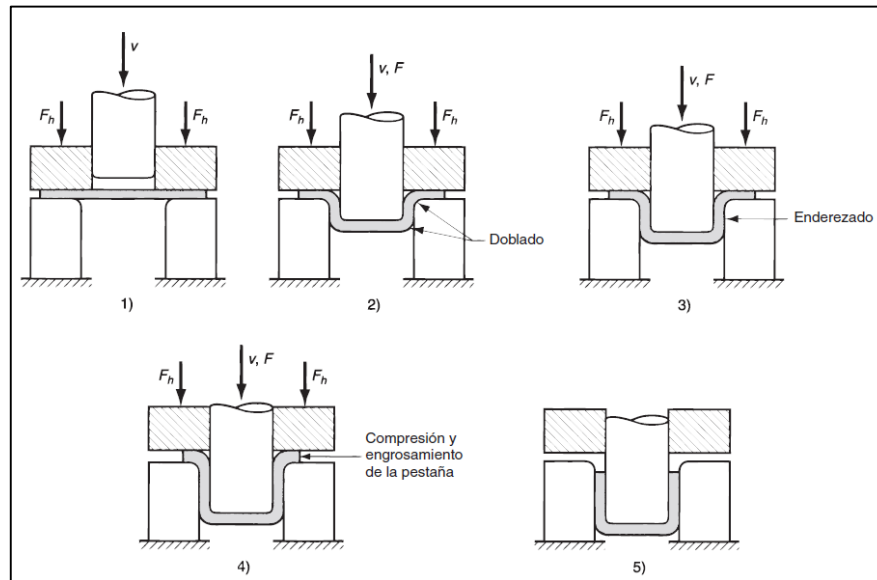


Figura 14 Etapas en la deformación del material de trabajo en el embutido profundo

Fuente: (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3Ed., 2007)

Los diferentes materiales de los que están hechas las chapas metálicas, se deforman hasta un cierto punto antes de que produzca un adelgazamiento y una fractura. Dicho punto depende de la deformación máxima y mínima en el plano de la chapa. La curva de Keeler – Goodwing fue trazada considerando las deformaciones convencionales (Figura 15), en la que se pueden apreciar lo siguiente:

- A mayor uniformidad en el estirado biaxial, es decir cuando e_1/e_2 tiende a uno, mayor es el nivel de deformaciones posibles antes de que ocurra la falla.
- Los esfuerzos de compresión, en la zona de tracción – compresión, ayudan a soportar una deformación mayor. (Iurman, Lucaioli, Bergé, & Insausti, 2013)

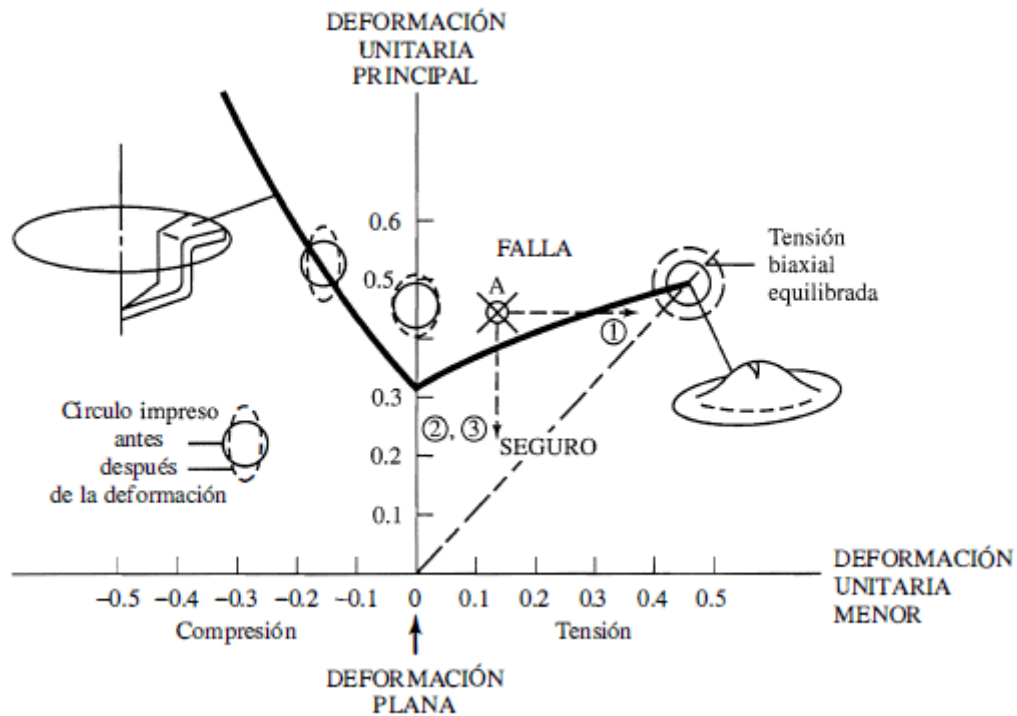


Figura 15 Diagrama límite de conformado típico de un acero de bajo carbono
Fuente: (Schey, 2000)

Se puede comparar diversos materiales, con ayuda del DLC, a partir de tiras de lámina con distintos anchos, con lubricación en el punzón, a medida que disminuye el ancho de la tira, la deformación menor decrece, hasta que el ancho característico de la tira, llega a cero.

2.6.2. Lubricación

La fricción y la compresión son importantes dentro de la operación de embutido, ya que para que la brida se mueva hacia el agujero del troquel se debe superar la fricción existente entre la lámina de metal y la superficie del sujetador y del troquel. En un inicio es la fricción estática la que domina la operación, pero cuando empieza el flujo del metal la fricción dinámica es la que gobierna la operación.

En la investigación denominada “Simulación del efecto del radio de matriz en un proceso de embutido” (Kopanathi & Srikanth, 2012), el objetivo fue determinar los factores que influyen en un proceso de embutido y analizar dicho proceso variando el radio de la matriz y manteniendo un valor de fricción, radio de punzón y espesor del blanco constantes. El material utilizado para el análisis fue el Al 6061, diámetro de blanco 56mm y la fricción 0.3. Se concluyó que el valor del esfuerzo es mayor mientras el radio de la matriz decrece, así como se observa en la figura 16 y 17, en las cuales se utilizan radios de 4mm y 7mm, respectivamente; mientras que los valores de la deformación disminuyen mientras el radio de la matriz disminuye. El autor recomienda a partir de los resultados y análisis obtenidos, utilizar un radio de matriz de 7mm, siendo éste un valor referencial para posibles investigaciones.

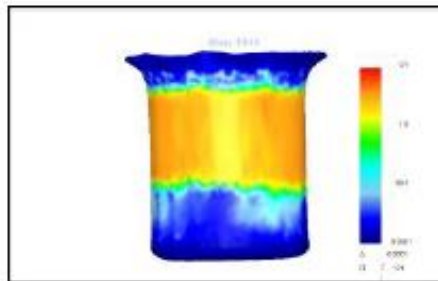


Figura 16 Valores de esfuerzo para radio de matriz de 4mm

Fuente: (Kopanathi & Srikanth, 2012)

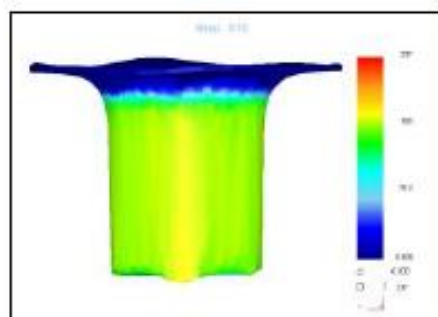


Figura 17 Valores de esfuerzo para radio de matriz de 7mm

Fuente: (Kopanathi & Srikanth, 2012)

La magnitud de la fuerza de sujeción aplicada por el sujetador, así como las condiciones de fricción de las dos interfaces, son factores que determinan el éxito de este aspecto de la operación de embutido. Generalmente se usan lubricantes o compuestos para reducir las fuerzas de fricción durante el embutido.

Según (Padmanabhan, Oliveira, Alves, & Menezes, 2007), en su investigación determinaron que un proceso de embutido depende de diferentes parámetros como: fuerza del punzón, lubricación, radio de matriz y punzón y propiedades mecánicas adicionales. El material utilizado para la simulación fue el AISI 304, se realizaron 9 experimentos variando el coeficiente de fricción y el radio de la matriz, concluyendo que el radio de la matriz tiene un rol muy importante en el proceso de embutido, ya que mientras el radio disminuye, la fuerza del punzón para la embutición es mayor; y así mismo menciona que el coeficiente de fricción tiene influencia moderada en el proceso, ya que utilizando una fricción de 0.2 el esfuerzo de tensión equivalente es menor comparado con una fricción de 0.08.

2.6.2.1.Sin Lubricación

Según (Schey, 2000) debido a que las superficies de los elementos no son completamente lisas existe un valor de fricción al interactuar unas con otras; dentro de los procesos de conformado es inevitable el apareamiento de este fenómeno, es por ello el objetivo de utilizar diferentes tipos de lubricantes para disminuir la fricción entre ambos elementos, al no existir ningún tipo de lubricante (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna Materiales, Procesos y Sistemas, 1997) indica que los valores típicos para el coeficiente de fricción metal – metal varían entre 0.1 y 0.5.

2.6.2.2. Aceite de origen Mineral

Según (Quiminet.com, 2011) el aceite mineral es obtenido a partir de la refinación del petróleo mediante el proceso de destilación atmosférica del crudo; dependiendo de su utilización se realizan una serie de procesos para llegar al producto deseado, los cuales pueden ser el desparafinado, desasfaltado e hidrogenación; este tipo de aceite se diferencia por su capacidad de lubricación a altas temperaturas así como su capacidad de disipar el calor.

Debido a su estabilidad frente a altas temperaturas este tipo de aceites son muy utilizados en la lubricación de máquinas y motores que se calientan, también, en industrias como automotriz, metalmecánica, cosmética y farmacéutica. Dentro del conformado de metales (Shashidhara & Jayaram, 2012) en su publicación “Deep drawing of 304 L Steel Sheet using Vegetable oils as Forming Lubricants” concluye que las cargas bajo el aceite mineral son menores que las cargas bajo el aceite vegetal, además, indica que el coeficiente de fricción para el aceite mineral varía entre 0.060 a 0.070.

2.6.2.3. Aceite de origen Vegetal

Según (Gawrilow, 2005) los aceites de origen vegetal se los utiliza en diferentes aplicaciones como son: aceites hidráulicos, aceites para desmoldantes, equipamiento agrícola, minero y forestal, etc. A diferencia de los aceites minerales, este tipo de aceites presentan un elevado índice de viscosidad, son de bajo costo y es ideal como lubricante debido a los ácidos grasos que se encuentran en algunos aceites lo cual permite que se adhiera a superficies metálicas en forma más efectiva.

Este tipo de aceite son fácilmente biodegradables y ambientalmente seguros comparados con los aceites minerales, ya que no requieren una tecnología particular para su fabricación por lo que el coste industrial es menor. (sinc, La ciencia es noticia, 2015)

En el estudio realizado por (Delgado & Aperador, 2014) en su investigación denominada “Estudio Comparativo del Poder Lubricante y estabilidad Oxidativa entre el Aceite vegetal y Aceite Mineral”, se indican diferentes experimentos en los que concluyen determinando valores aproximados de coeficiente de fricción del aceite vegetal, correspondiente a 0,070-0,080.

2.6.2.4.Grasa multipropósito

La grasa lubricante es un material semifluido formado por 3 componentes: agente espesante, aceite base y una serie de aditivos. El agente espesante puede ser jabones metálicos simples o complejos; mientras que el aceite base es una combinación de aceite mineral, vegetal y sintético. (Aranzabe & Adolfo, 2016)

Las grasas lubricantes multipropósito son productos que combinan las propiedades de dos o más grasas especializadas las cuales pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones debido a que ofrecen excelentes propiedades anti-desgaste y resistencia a cargas.

En la publicación “Thin-film grease lubrication” (Cann, 1999), indica que el coeficiente de fricción de una grasa lubricante varía según los aditivos que la componen, estos valores pueden variar entre 0.025 a 0.030.

Existen diferentes software computacionales para poder predecir distintos defectos que se presentan en el proceso de embutido, así como lo menciona (Bin, 2013) en su investigación denominada Predicción de defectos en el Proceso de embutido a partir de Simulación de Elementos Finitos, el modelo planteado se lo analizó por Static Structural Analysis y sus parámetros se los consideraron únicamente con fines experimentales; como por ejemplo la simulación sin

lubricación indica un esfuerzo equivalente de 2,14MPa, mientras que con lubricante el esfuerzo es 0.6424MPa; de esta manera se determinó la importancia de lubricante para prevenir defectos como arrugamiento o corrosión.

Además de la fricción, ocurre también la compresión en las pestañas exteriores de la forma. A medida que el metal de esta porción de la forma se estira hacia el centro, el perímetro exterior se hace menor. Debido a que el volumen del metal permanece constante, el metal se comprime y se hace más grueso al reducirse el perímetro. Esto ocasiona frecuentemente el arrugado de la brida remanente de la pieza o forma, especialmente cuando la lámina es delgada o cuando la fuerza del sujetador es demasiado baja. Esta condición no puede corregirse una vez que ha ocurrido.

2.6.3. Embutido Libre

Se puede evitar el arrugamiento de la lámina cuando esta es suficientemente rígida (Figura 18(a)). Como en el caso de embutido poco profundo, cuando la razón de embutido $do/Dp < 1.2$. Los blancos gruesos en relación con su diámetro permiten razones de embutido mayores (Figura 18); el arrugamiento de la lámina también depende del perfil de la matriz, el cual determina la magnitud de la compresión circunferencial. La matriz más favorable es la matriz tractriz (Figura 19).

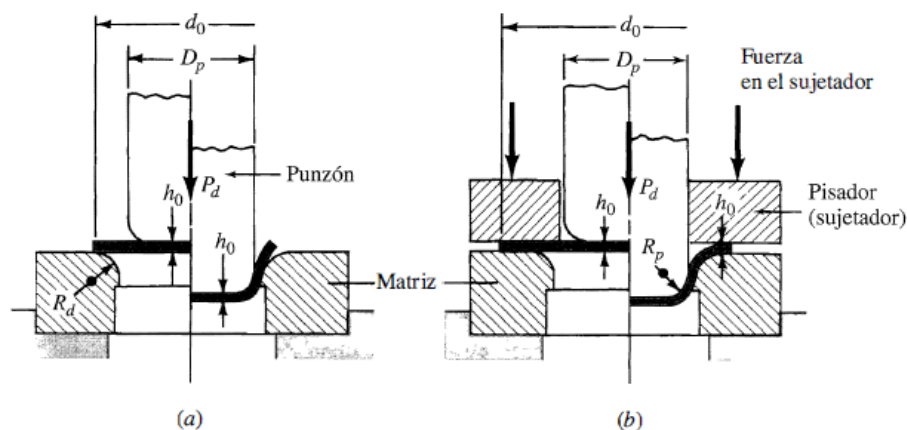


Figura 18 Los recipientes se pueden conformar por embutido (a), sin o con un pisador (b).
Fuente: (Schey, 2000)

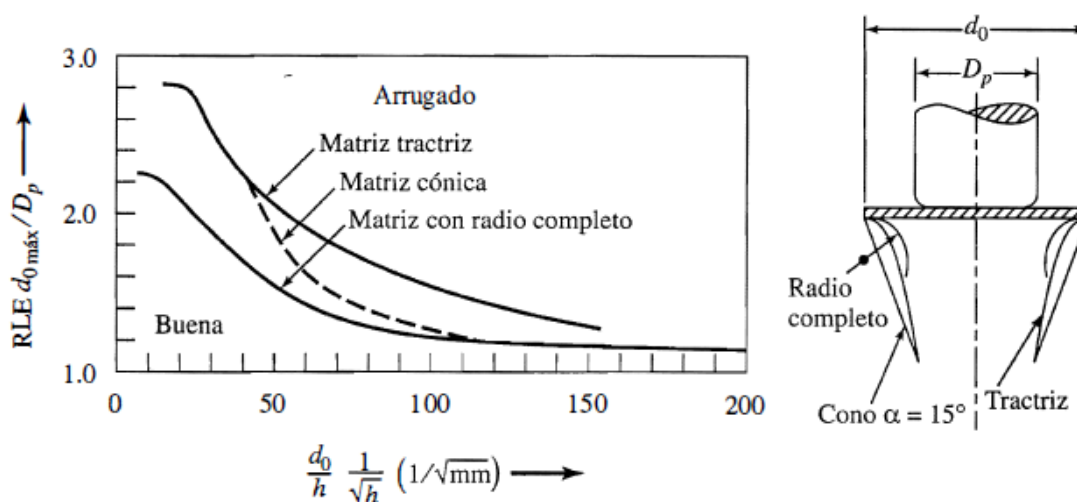


Figura 19 La razón limitante de estirado en el acopado de acero al bajo carbono, sin un pisador, es una función de la geometría de la matriz y de la razón del diámetro del blanco respecto al espesor de la lámina.

Fuente: (Schey, 2000)

2.6.4. Embutido con Pisador

El desplazamiento de la brida debe ser restringido en ocasiones, como cuando la lámina es relativamente delgada y la razón de embutido se encuentra más allá de los límites indicados en la figura 18, esto con la ayuda de un pisador (Figura 20(b)), el cual debe ejercer suficiente presión para evitar el arrugamiento (Figura 20(b)), pero sin que esta restrinja el deslizamiento del blanco

en el anillo de embutido, debido a que causaría fracturas en la pared de la copa (Figura 20(d)). Para producir una copa sana (Figura 20(c)), la presión del pisador se puede considerar, en una primera aproximación, como 1.5% del esfuerzo de cedencia ($\sigma_{0.2}$) del material.

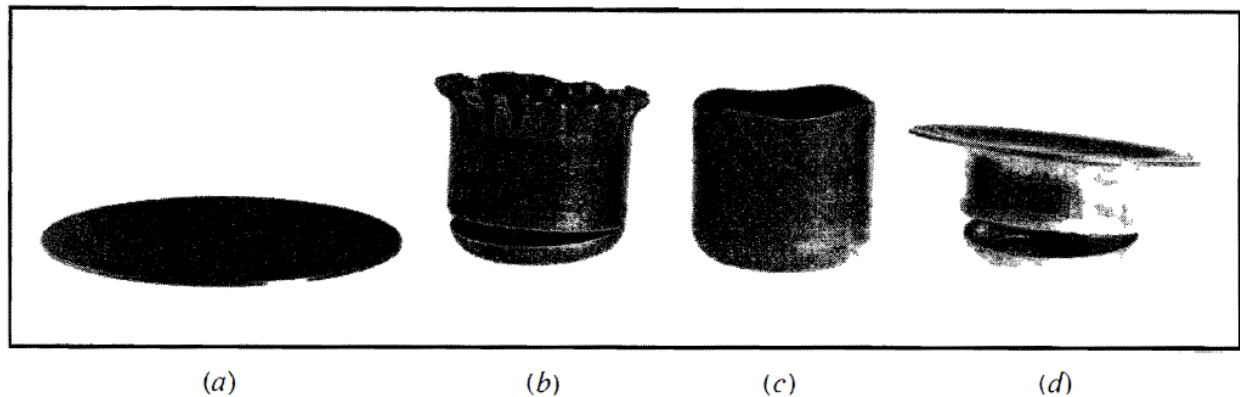


Figura 20 El embutido profundo de copas de acero al carbono a partir de (a) un blanco redondo, con presión del pisador (b) insuficiente, (c) óptimo y (d) excesiva.

Fuente: (Schey, 2000)

Según (Pavan, Uday, & Sabitha, 2017), los defectos que aparecen durante un proceso de embutido ocurren debido al mal control de factores como: geometría, fuerzas, fricción y temperatura; siendo los defectos más comunes el arrugamiento en el borde, arrugamiento en la pared, desgarro y fractura. El principal objetivo de una industria de embutido es optimizar los parámetros del proceso para obtener productos finales con la menor cantidad de defectos.

2.6.5. Análisis de Ingeniería del Embutido

Resulta de gran importancia tomar en cuenta las limitaciones que posee el proceso de embutido, (Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna 3Ed., 2007) presenta las siguientes:

2.6.5.1.Relación de Embutido (DR)

Es la relación existente entre el diámetro de la forma inicial D_b y el diámetro del punzón D_p .

Visto desde una ecuación:

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \quad (26)$$

La relación de embutido es un indicador de la severidad de la operación, donde a mayor relación mayor severidad del embutido. Un límite aproximado es de 2, y en este dependen los radios (R_p y R_d), las condiciones de fricción, la profundidad de embutido y de las características de la lámina de metal.

2.6.5.2.Reducción (r)

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} \quad (27)$$

La reducción está estrechamente relacionada con la relación de embutido. Donde el valor de la reducción r debe ser menor que 0.50.

2.6.5.3.Relación de Espesor al diámetro

$$\frac{t}{D_b} \quad (28)$$

Se recomienda que este valor sea mayor al 1%, ya que al decrecer aumenta el arrugamiento. Cuando la pieza a embutir excede los límites antes mencionados es conveniente realizar la operación en múltiples pasos, algunas veces con recocido entre ellos.

2.6.5.4.Fuerza de Embutido

$$F = \pi D_p t (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad (29)$$

Donde:

F = fuerza de embutido

t = espesor original de la forma

TS = resistencia a la tensión

D_b y D_p son los diámetros de la forma inicial y del punzón, respectivamente.

La constante 0.7 es un factor de corrección para la fricción. Esta ecuación presenta la fuerza máxima de operación la cual usualmente se alcanza a la tercera parte de la longitud de la carrera.

2.7.Acero AISI 304.

Los aceros inoxidable reciben este nombre debido a que en presencia de oxígeno forman una película delgada y dura muy adherente de óxido de cromo, lo cual protege al material de la corrosión. Según (Molera, 1990), este tipo de aceros son aleaciones base hierro, las cuales contienen un mínimo de 12% de Cromo, bajo contenido en Carbono y diferentes porcentajes de Níquel, Molibdeno, Titanio, etc. Se los clasifica en cuatro grupos principales: ferríticos, martensíticos, austeníticos, PH y Dúplex; siendo los más utilizados los aceros inoxidable martensíticos y austeníticos.

Los aceros inoxidable martensíticos son aleaciones de hierro y cromo con un porcentaje de éste último elemento que varía entre 12% al 18%, la adición de otros elementos como el Níquel no influye en las propiedades corrosivas de la aleación.

Los aceros inoxidable austeníticos, contienen Cromo y Níquel como elementos importantes, sus porcentajes varían entre 16%-25% y 6%-22%, respectivamente. Poseen una buena resistencia

a la tracción y ductilidad, y son ideales para el trabajo en frío. Dentro de este grupo, se diferencian dos subgrupos: austeníticos Cromo-Níquel y, austeníticos Cromo-Manganeso-Níquel.

Según (Kalpakjian & Schmid, 2002), los aceros inoxidable austeníticos se endurecen mediante trabajo en frío, son antimagnéticos y tienen una excelente resistencia a la corrosión, son los más dúctiles entre todos los aceros inoxidable por lo que son fácilmente formado, entre sus aplicaciones se encuentran: utensillos de cocina, construcciones soldadas, acoplamientos, piezas para hornos y para intercambiadores de calor, equipo de transporte ligero y componentes para ambientes químicos severos.

AISI corresponde al acrónimo en inglés de American Iron and Steel Institute (Instituto americano de hierro y acero). Para los aceros inoxidable el sistema AISI utiliza un código de tres dígitos, el primero de ellos corresponde a la clase de acero, siendo el 2xx y 3xx inoxidable austeníticos, el segundo y tercer dígito no están relacionados con la composición.

Tabla 2

Composición típica de Acero AISI 304

<i>AISI</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>N</i>
304	18-20	8-10	Máx. 0.08	Máx. 2.0	Máx. 1	Máx. 0.045	Máx. 0.030	Máx. 0.10

Fuente: (American Society for Metals, 2004)

La composición química de los aceros inoxidable influye significativamente en sus propiedades, una de las principales propiedades es su resistencia a la corrosión, así como se observa en la Tabla 2, el cromo es el principal elemento aleante de este tipo de acero, el cual permite una excelente resistencia a muchos ambientes. (Padilla, 1999)

Según (Kalpakjian & Schmid, 2002), la resistencia a la fluencia del acero inoxidable 304 varía entre 240-290 MPa y su porcentaje de elongación en 50mm de probeta varía entre 60-55 %, por

otro lado (American Society for Metals, 1982), indica que la resistencia máxima a la tensión es de 505 MPa.

Según (Samantaray, Kumar, Bhaduri, & Dutta, 2013), la microestructura de cualquier material depende de su composición química y diferentes parámetros como la velocidad de calentamiento, temperatura de procesamiento, carga mecánica, etc. Las figuras 21 y 22 muestran la microestructura del acero inoxidable AISI 304 después de haber aplicado agentes químicos para su respectiva revelación.

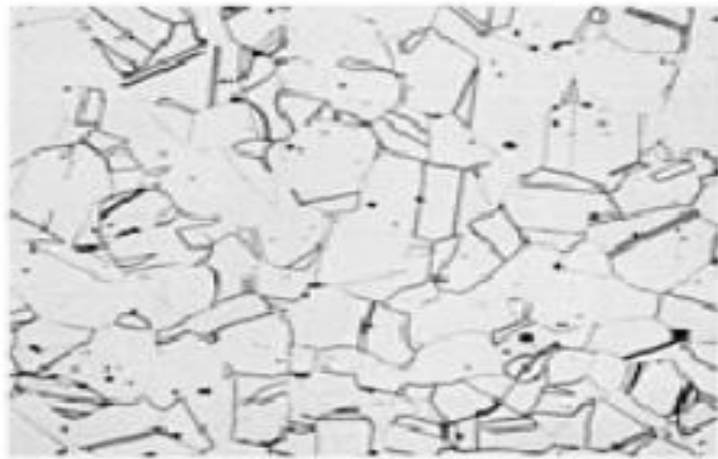


Figura 21 Type 304 stainless Steel strip, annealed 5min at 1065°C, cooled in air.. 10mL HNO₃, 10mL acetic acid, 15mL HCL, and 2 drops glycerol. 250x
Fuente: (American Society for Metals, 2004)

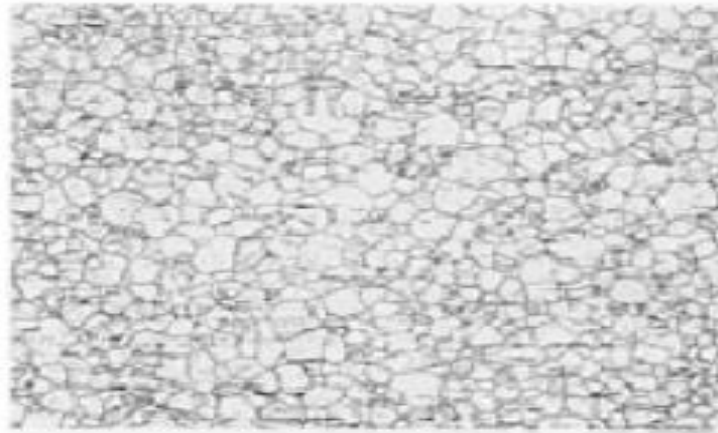


Figura 22 Type 304 strip, annealed 2 min at 1065°C and air cooled. Electrolytic: HNO₃-acetic acid, then 10% oxalic acid. 100x

Fuente: (American Society for Metals, 2004)

Tabla 3

Propiedades Mecánicas del Acero AISI 304

Propiedades Mecánicas	
<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
<i>Resistencia a la fluencia (MPa)</i>	240-290
<i>% Elongación</i>	60-55
<i>Resistencia a la tensión (MPa)</i>	505

CAPÍTULO III. DISEÑO

3.1. Características Equipo Embutido

Se utilizó el equipo de embutido del Laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

La prensa del equipo tiene las siguientes características:

- *Cilindro hidráulico*

Diámetro del pistón: 80 mm

Diámetro del vástago: 35 mm

Velocidad máxima (salida del pistón): 10 m/s

Recorrido: 170 mm

- *Motor WEG Steel motor monofásico*

Potencia: 0.5 HP

Frecuencia: 60 Hz

Amperaje: 8.40/4.20 amperes

Revoluciones por minuto: 1720 rpm

Voltaje: 110/220 V

- *Bomba GP1-0013*

Cilindrada: 1.3 cm³/vuelta

Caudal: 2 lt/min

Presión máxima: 220 bares

Velocidad de rotación: 1500 rpm

La presión máxima alcanzada es de 3000 psi, siendo una presión de trabajo de 2500 psi se determina la fuerza de la prensa, a partir del área del pistón: $50,26 \text{ cm}^2$, dando así una fuerza de 8,8 Ton.

El equipo dispone de una celda de carga de compresión RL9000 (Figura 23), con una capacidad de carga de 10000 lb



Figura 23 Celda de carga RL9000

A su vez el equipo dispone de un sensor de desplazamiento el cual permite medir la distancia de embutición de la chapa durante todo el proceso.

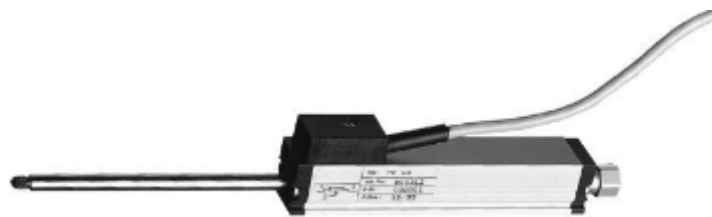


Figura 24 Sensor de desplazamiento

El sistema de control está programado en el Software LabView, y para la adquisición de datos tanto de la celda de carga como del sensor de desplazamiento consta de una tarjeta Ni myDAQ.

El equipo utilizado es el que se indica en la Figura 25.



Figura 25 Equipo de embutido

3.2. Diseño de punzón

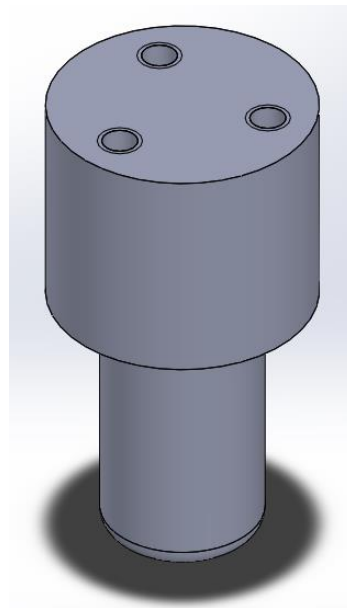


Figura 26 Punzón 3D

Para el diseño del punzón se tomó como consideración principal la fuerza máxima admitida por la celda de carga, la cual es de 4536 Kg, además de las limitaciones indicadas dentro del apartado “Análisis de Ingeniería del embutido” vistas en el capítulo 2 del presente trabajo.

Se comenzó proponiendo valores D_b y D_p hasta lograr una convergencia con la fuerza admitida por la celda de carga, es así que se tomó los valores de 50mm y 30mm para los parámetros D_b y D_p respectivamente.

$$F = \pi(30)(0.95)(505) \left(\frac{50}{30} - 0.7 \right) \quad (30)$$

$$F = 4456 \text{ Kg} < 4536 \text{ Kg} \quad (31)$$

Además, se comprobó las condiciones indicadas en el capítulo 2

- Relación de embutido

$$DR = \frac{50}{30} = 1.66 < 2 \quad (32)$$

- Reducción

$$r = \frac{50 - 30}{50} = 0.4 < 0.5 \quad (33)$$

- Relación de espesor al diámetro

$$\frac{t}{D_b} = \frac{0.95}{50} = 1.9\% > 1\% \quad (34)$$

- Radio del punzón

$$3t \leq r_p \leq 5t \quad (35)$$

$$r_p = 3t \quad (36)$$

$$r_p = 2.85 \approx 3 \text{ mm} \quad (37)$$

- Altura de Embutición

$$h = 0.266D_b \quad (38)$$

$$h = 13.3mm \quad (39)$$

3.3.Diseño de matriz

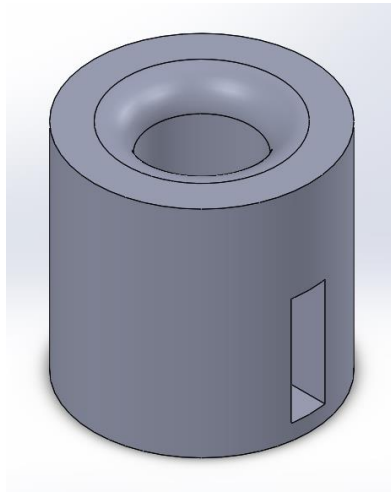


Figura 27 Matriz 3D

Para el dimensionamiento de la matriz se toman los valores de D_p y t obtenidos anteriormente, donde:

$$c = 1.1t \quad (40)$$

$$c = 1.05 \approx 1.1mm \quad (41)$$

- Diámetro de la matriz

$$D_m = D_p + 2c \quad (42)$$

$$D_m = 30 + 2(1.1) \quad (43)$$

$$D_m = 32.2mm \quad (44)$$

- Radio de la matriz

$$4t \leq r_m \leq 6t \quad (45)$$

$$r_m = 6t \quad (46)$$

$$r_m = 5.7 \approx 6mm \quad (47)$$

3.4. Construcción conjunto matriz – punzón

Para la construcción tanto de la matriz como del punzón, se utilizaron procesos de arranque de viruta como son: torneado, fresado y taladrado. El material utilizado fue el Acero K110, se lo conoce según la denominación AISI como D2, el cual es ideal para la fabricación de matrices y punzones debido a su excelente tenacidad y alta resistencia al desgaste.

La matriz y el punzón fueron sometidos a un proceso de tratamiento térmico, cuyo objetivo fue endurecer y eliminar las tensiones provocadas en el material debido al proceso de mecanizado sometido en su fabricación.

El tratamiento térmico recomendado para el Acero AISI D2 es el temple, cuyo procedimiento consiste en calentar el acero a una temperatura determinada por encima de su punto de transformación para conseguir una estructura cristalina, continuando un enfriamiento rápido a través de un medio líquido: agua, aceite o sales fundidas; o a través de aire o gases.

La temperatura de precalentamiento para este tipo de acero debe ser de 815°C y se debe alcanzar la temperatura de austenización entre 970°C – 1010°C por un tiempo de 15 minutos y su enfriamiento debe ser al aire, obteniendo así una dureza de 64HRC.

CAPÍTULO IV. EXPERIMENTACIÓN

4.1. Caracterización del acero AISI 304

4.1.1. Composición química

La cuantificación de los metales presentes en las dos muestras de acero inoxidable AISI 304 (Figura 28), se lo realizó en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación se muestran los resultados obtenidos.



Figura 28 Muestras A y B
de acero inoxidable AISI 304

Tabla 4

Cuantificación de los metales presentes en dos muestras de acero inoxidable AISI 304

Metales	Muestra A (%)	Muestra B (%)
Carbono (C)	0,049	0,050
Silicio (Si)	0,324	0,324
Manganeso (Mn)	1,058	1,062
Fósforo (P)	0,013	0,014
Azufre (S)	0,005	0,005
Cromo (Cr)	18,36	18,36
Molibdeno (Mo)	0,024	0,024
Níquel (Ni)	7,932	7,904
Cobre (Cu)	0,138	0,140
Cobalto (Co)	0,209	0,208
Niobio (Nb)	0,003	0,003
Vanadio (V)	0,085	0,086
Hierro (Fe)	71,76	71,78

4.1.2. Análisis microestructural

A partir de la composición química obtenida en el punto 4.1.1, (Geels, 2007) determina que se pueden ocupar las siguientes codificaciones de químicos: 13b, 89, 87, 88, 83a, 95, 101, 212, 221, 226; los químicos correspondientes a cada uno de los códigos se los indica en la Tabla 12.2 de (Geels, 2007), “Numerical list of etchants”. Se ha escogido como primera opción el químico de código 89, cuya composición y procedimiento son los siguientes:

Composición:

10 mL HNO_3
10 mL *acetic acid*
15 mL *HCl*
2 – 5 drops *glycerol*

Procedimiento:

Sumergir o limpiar la muestra previamente pulida con un hisopo por unos pocos segundos a unos pocos minutos. Se sumergió la muestra en la solución durante 30 segundos, para observar la microestructura se utilizó un microscopio binocular acromático se obtuvieron los siguientes resultados:

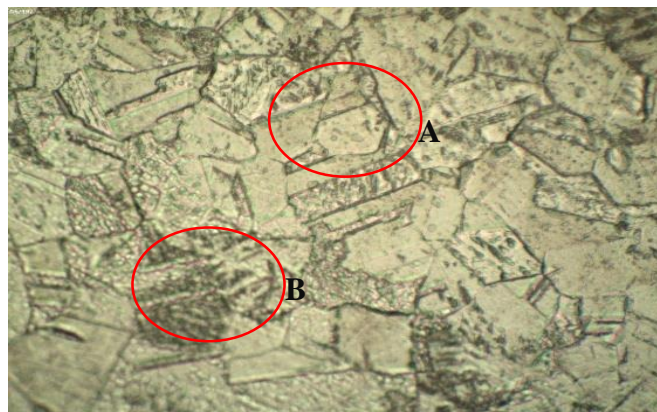


Figura 29 Microestructura de acero inoxidable 304
10mL HNO_3 , 10mL ácido acético, 15mL HCL , y
dos gotas de glicerina. 100x

En la figura 29 se observa la microestructura de acero inoxidable 304 el cual fue preparado metalográficamente y sumergido en la solución química indicada anteriormente, los resultados muestran los granos austeníticos equiaxiados uniformemente de acero inoxidable (Figura 28, región A), las regiones más oscuras indican Cque el tiempo de aplicación de solución en la muestra fue superior al necesario para observar la microestructura (Figura 28, región B). La figura 30 es un ejemplo de microestructura de acero inoxidable 304 obtenida en la investigación denominada “Caracterización de la deformación de chapa de acero inoxidable AISI 304 bajo tensiones multiaxiales”, se puede observar la similitud con la obtenida en el presente trabajo.

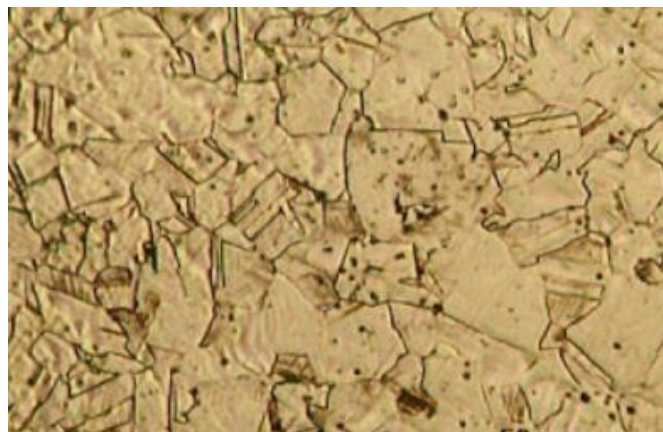


Figura 30 Microestructura de acero inoxidable 304
Fuente: (Coello & Ferrer, 2009)

4.1.3. Ensayo a tensión

Para la ejecución de los ensayos a tensión en el acero inoxidable AISI 304, se realizaron dos probetas según las dimensiones establecidas por la norma ASTM E8 – Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Para no modificar las propiedades del material se utilizó corte por chorro de agua, en la figura 30 se indica el esquema de la probeta.

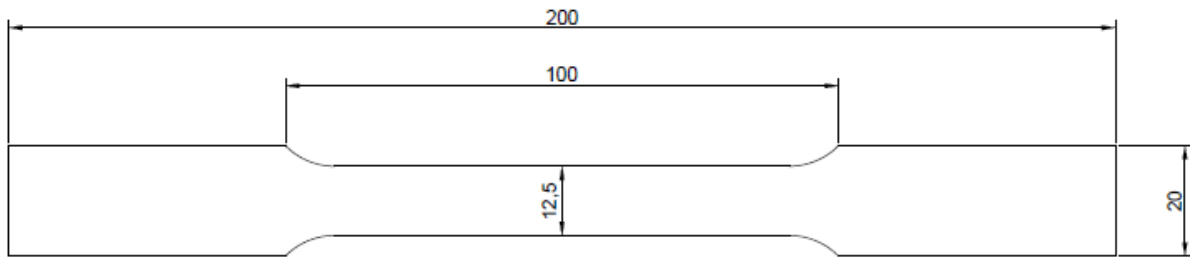


Figura 31 Esquema dimensiones de probeta acero inoxidable AISI 304 según la Norma ASTM E8



Figura 32 Probetas de acero inoxidable AISI 304, cortadas con chorro de agua

La máquina utilizada para el ensayo fue MTS 810 – Material Test System, para obtener los valores de deformación de la probeta, se utilizó el Extensómetro MTS 632-12C-20, en la figura 33 se observa la probeta colocada en las mordazas de la máquina y la ubicación del extensómetro.



Figura 33 Probeta ajustada en las mordazas de la máquina

Calibración

Para la calibración del extensómetro se obtuvo tres medidas de voltaje para diferentes desplazamientos, y así obtener la medida promedio, tal como se observa en la Tabla 7 y el respectivo encerado (Tabla 8).

Tabla 5

Mediciones de Voltaje realizadas sobre el Extensómetro MTS 632-12C-20

EXTENSOMETRO 632-12C-20				
<i>Desplazamiento (mm)</i>	<i>Medida 1 (V)</i>	<i>Medida 2 (V)</i>	<i>Medida 3 (V)</i>	<i>Promedio (V)</i>
25	1,45	1,44	1,4	1,430
25,3	1,81	1,85	1,92	1,860
25,8	2,8	2,9	2,84	2,847
26,3	3,88	3,84	4,01	3,910
26,8	4,96	4,98	5,02	4,987
27,3	6,35	6,36	6,22	6,310
27,8	7,46	7,39	7,4	7,417
28,3	8,64	8,58	8,45	8,557

Tabla 6

Encerado de Extensómetro MTS 632-12C-20 con Voltaje Final

Desplazamiento (mm)	Voltaje (V)
25	0,000
25,3	0,430
25,8	1,417
26,3	2,480
26,8	3,557
27,3	4,880
27,8	5,987
28,3	7,127

A partir de los datos obtenidos de la Tabla 8, se realiza la gráfica Voltaje vs Desplazamiento (Figura 33), para así determinar la ecuación característica.

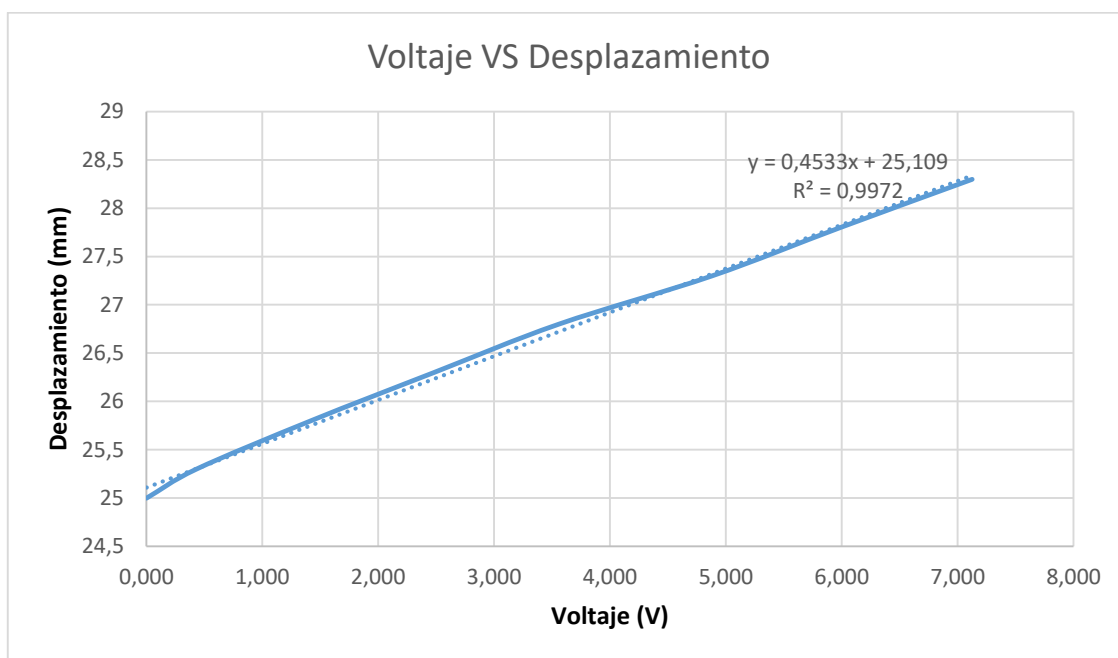


Figura 34 Gráfica Voltaje – Desplazamiento de Extensómetro 632-12C-20

La ecuación característica del extensómetro es:

$$\text{Desplazamiento (mm)} = 0.4533 \times \text{Voltaje} + 25.109 \quad (48)$$

Para la toma de datos se colocaron dos multímetros conectados a los puntos de Fuerza y deformación correspondientes a la máquina de ensayos, por lo que, a partir de la ecuación obtenida anteriormente, se podrá calcular el valor de desplazamiento (mm) para los diferentes valores de voltaje obtenidos durante el ensayo; mientras que para el cálculo de Fuerza (N), se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Fuerza(N)} = \text{Voltaje} \times 500 \times 9.81 \quad (49)$$

a. *Ensayo Probeta 1*

- **Datos Iniciales**

Sección Inicial: 0.96 x 12.61 mm

Longitud Inicial de marcas: 50 mm

$$\text{Área Inicial} = 12,11 \text{ mm}^2$$

- **Resultados**

A partir de los voltajes obtenidos del ensayo tanto de Fuerza como Desplazamiento, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 9. Cabe recalcar que el extensómetro fue retirado a los 7V debido a su desplazamiento máximo.

Tabla 7

Valores de Fuerza y Deformación obtenidos de ensayo a tensión de Probeta 1

Voltaje Strain (V)	Voltaje Fuerza (V)	Desplazamiento Medido (mm)	Desplazamiento Corregido (mm)	Fuerza (N)
0	0	25,109	25,000	0,000
0,01	0,0953	25,114	25,005	467,447
0,02	0,208	25,118	25,009	1020,240
0,03	0,3269	25,123	25,014	1603,445
0,04	0,4173	25,127	25,018	2046,857
0,05	0,4942	25,132	25,023	2424,051
0,06	0,5787	25,136	25,027	2838,524
0,07	0,6449	25,141	25,032	3163,235
0,08	0,6733	25,145	25,036	3302,537
0,09	0,7085	25,150	25,041	3475,193
0,1	0,7153	25,154	25,045	3508,547
0,2	0,7267	25,200	25,091	3564,464
0,3	0,7405	25,245	25,136	3632,153
0,4	0,7511	25,290	25,181	3684,146
0,5	0,7636	25,336	25,227	3745,458
0,6	0,7737	25,381	25,272	3794,999
0,7	0,7843	25,426	25,317	3846,992
0,8	0,7939	25,472	25,363	3894,080
0,9	0,8061	25,517	25,408	3953,921
1	0,8121	25,562	25,453	3983,351
1,5	0,8542	25,789	25,680	4189,851

CONTINÚA



2	0,8876	26,016	25,907	4353,678
2.5	0,9251	26,242	26,133	4537,616
3	0,9553	26,469	26,360	4685,747
3.5	0,9877	26,696	26,587	4844,669
4	1,0202	26,922	26,813	5004,081
4.5	1,0454	27,149	27,040	5127,687
5	1,0754	27,376	27,267	5274,837
5.5	1,1016	27,602	27,493	5403,348
6	1,1361	27,829	27,720	5572,571
6.5	1,1506	28,055	27,946	5643,693
7	1,1844	28,282	28,173	5809,482

- **Gráficas Resultantes**

La figura 34, indica la gráfica Esfuerzo – Deformación Ingenieril, para su obtención se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\text{Esfuerzo Ingenieril (MPa)} = \frac{\text{Fuerza (N)}}{\text{Área Inicial (mm}^2\text{)}} \quad (50)$$

$$\Delta L \text{ (mm)} = \text{Longitud inicial (mm)} - \text{Longitud final (mm)} \quad (51)$$

$$\text{Deformación Ingenieril} = \frac{\Delta L}{\text{Longitud inicial}} \quad (52)$$

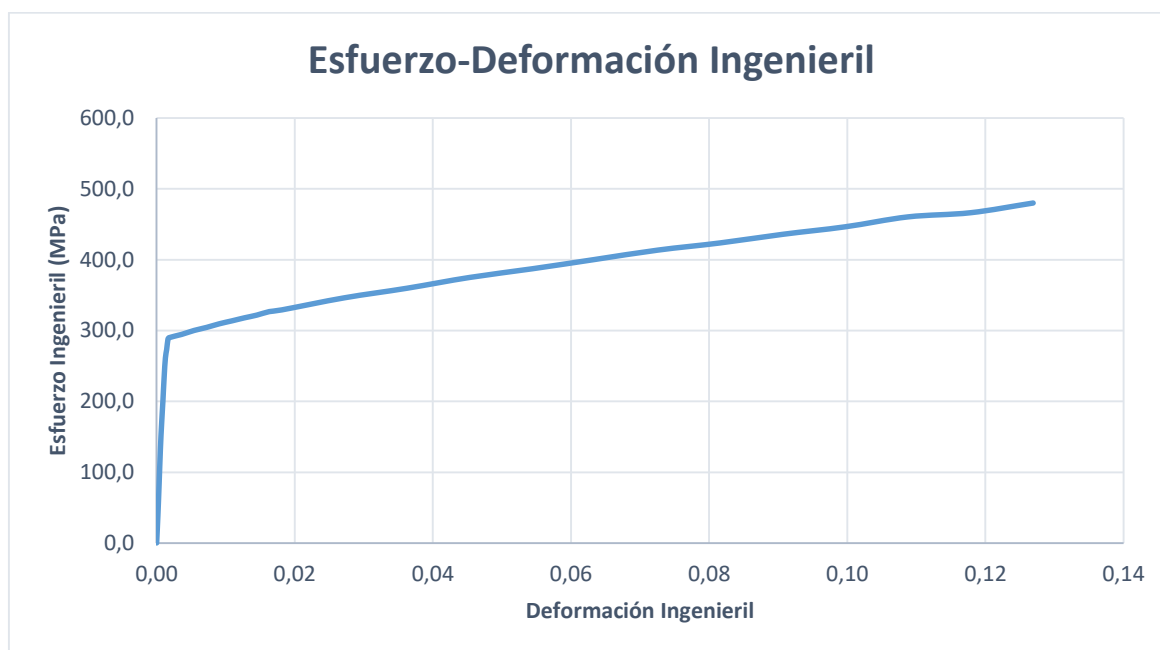


Figura 35 Esfuerzo – Deformación Ingenieril Probeta 1

La figura 35, indica la gráfica Esfuerzo – Deformación Real, para su obtención se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\text{Esfuerzo Real (MPa)} = \frac{\text{Fuerza (N)}}{\text{Área Instantánea (mm}^2\text{)}} \quad (53)$$

$$\text{Área Instantánea (mm}^2\text{)} = \frac{A_o \times L_o}{L} \quad (54)$$

$$\text{Deformación Real} = \ln\left(\frac{L}{L_o}\right) \quad (55)$$

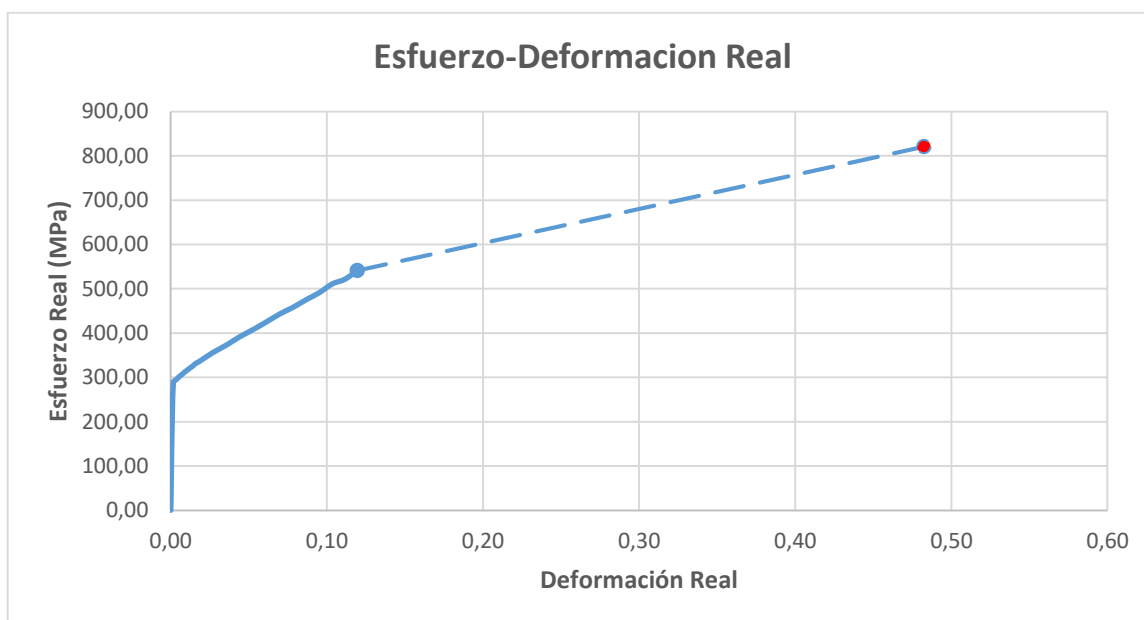


Figura 36 Esfuerzo – Deformación Real Probeta 1

En la gráfica de Esfuerzo – Deformación Real, el punto marcado de color rojo representa el punto de rotura de la probeta, el cual se obtuvo a partir del voltaje final (1,80V) antes de que éste cambie a cero; la deformación se obtuvo al medir la longitud entre marcas al terminar el ensayo. En la figura 36 se observa la probeta después del ensayo a tensión.



Figura 37 Probeta 1 acero inoxidable AISI 304 después de ensayo a tensión

Para el cálculo del Módulo de Elasticidad, se calculó la pendiente de la parte elástica de la curva Esfuerzo – Deformación Real, obteniéndose un resultado de 205140 MPa.

El cálculo de límite de fluencia S_y , se lo realiza a partir de la curva Esfuerzo – Deformación Real (Línea color azul de Figura 37) y la línea de intersección trasladada al 0.2% de la deformación (Línea color naranja de Figura 37).

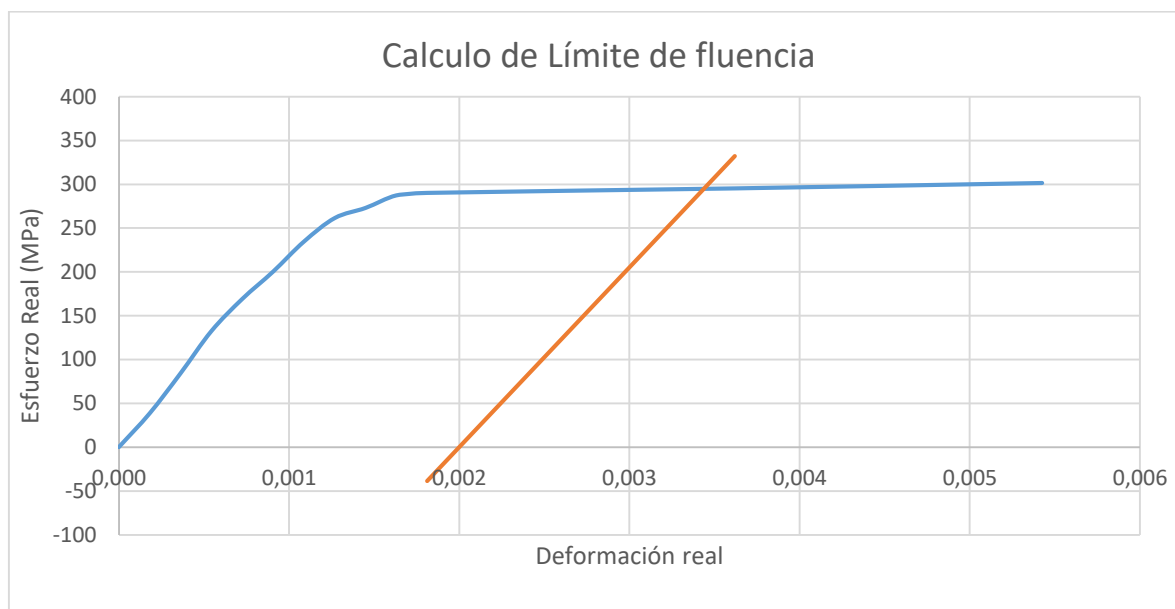


Figura 38 Cálculo gráfico límite de fluencia Probeta 1

Por lo tanto el límite de fluencia es 295 MPa, comparando este valor con el referido por (Kalpakjan & Schmid, 2008) de 290 MPa, existe un porcentaje de diferencia de 1,7%.

Para el cálculo de coeficiente de resistencia (K) y exponente de endurecimiento (n) se utilizó la aproximación de Hollomon que relaciona el esfuerzo y deformación real de la siguiente manera:

$$\sigma = K * \varepsilon^n \quad (56)$$

Estos valores son obtenidos a partir de la linealización de la ecuación anteriormente expuesta, quedando esta de la siguiente forma:

$$\ln(\sigma) = \ln(K) + n * \ln(\varepsilon) \quad (57)$$

En la figura 38 se muestran los puntos finales tomados del ensayo a tensión y la ecuación lineal a la que tienden estos puntos; tomando la ecuación anterior se encuentran los valores de (K) y (n), siendo estos de 1045 MPa y 0,32 respectivamente.

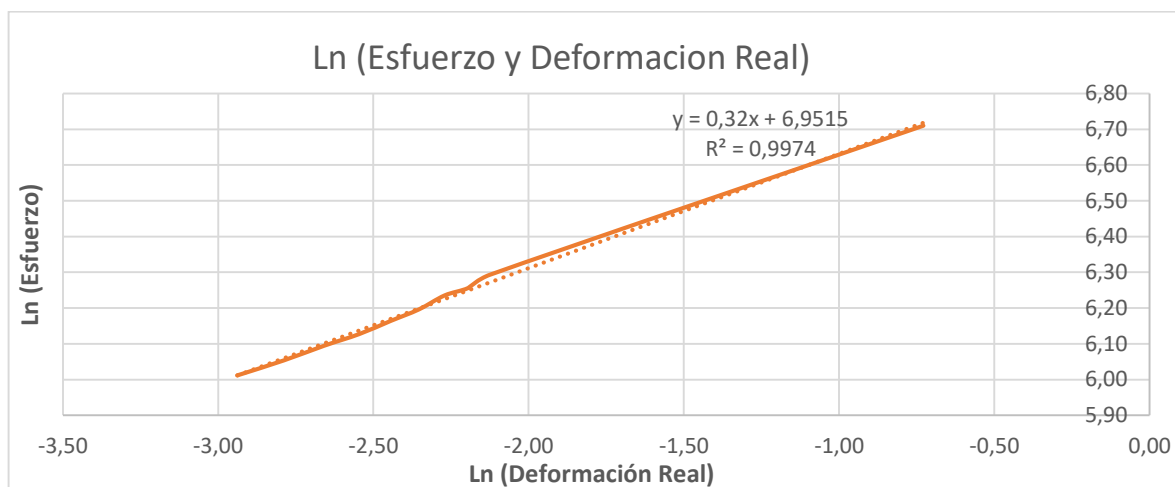


Figura 39 Gráfica de ajuste de Hollomon Probeta 1

Ya obtenidos los valores de (K) y (n) se procede a graficar de los esfuerzos mediante la aproximación de Hollomon; la figura 39 nos permite verificar la aproximación de la Ecuación de Hollomon con los valores de la gráfica Esfuerzo – Deformación real.

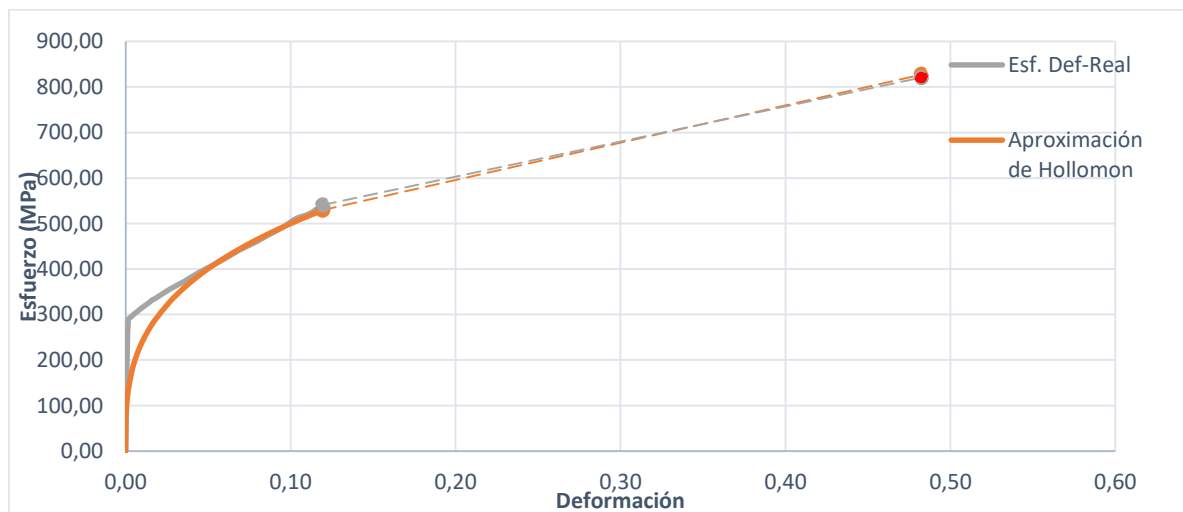


Figura 40 Gráfica Esfuerzo – Deformación, Real y Aproximación de Hollomon

Al observar las curvas de la figura 40 se puede notar que las gráficas Esfuerzo – Deformación Real y de Hollomon, tienden a ser iguales dentro del rango plástico, lo cual indica que es factible el uso de los datos encontrados de (K) y (n) para los procedimientos a realizar en el presente trabajo.

b. Ensayo Probeta 2

- **Datos Iniciales**

Sección Inicial: 0.96 x 12.61 mm

Longitud Inicial de marcas: 50 mm

$$\text{Área Inicial} = 12,11 \text{ mm}^2$$

- **Resultados**

Para obtener los diferentes resultados de la Probeta 2, se procede a realizar el mismo procedimiento de la probeta 1.

Tabla 8

Valores de Fuerza y Deformación obtenidos de ensayo a tensión de Probeta 2

Voltaje Strain (V)	Voltaje Fuerza (V)	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Desplazamiento Corregido (mm)
0	0	25,109	0	25
0,015	0,04	25,116	196,2	25,0068
0,016	0,05	25,116	245,25	25,0073
0,019	0,07	25,118	343,35	25,0086
0,0234	0,13	25,120	637,65	25,0106
0,033	0,21	25,124	1030,05	25,0150
0,0486	0,3	25,131	1471,5	25,0220
0,0572	0,39	25,135	1912,95	25,0259
0,0755	0,52	25,143	2550,6	25,0342
0,1484	0,61	25,176	2992,05	25,0673
0,5442	0,7	25,356	3433,5	25,2467
1,3345	0,8	25,714	3924	25,6049
2,44	0,9	26,215	4414,5	26,1061

CONTINÚA



3,9901	1	26,918	4905	26,8087
5,836	1,1	27,754	5395,5	27,6455
6,273	1,12	27,953	5493,6	27,8436
6,788	1,14	28,186	5591,7	28,0770
7,14	1,16	28,346	5689,8	28,2366
7,616	1,18	28,561	5787,9	28,4523

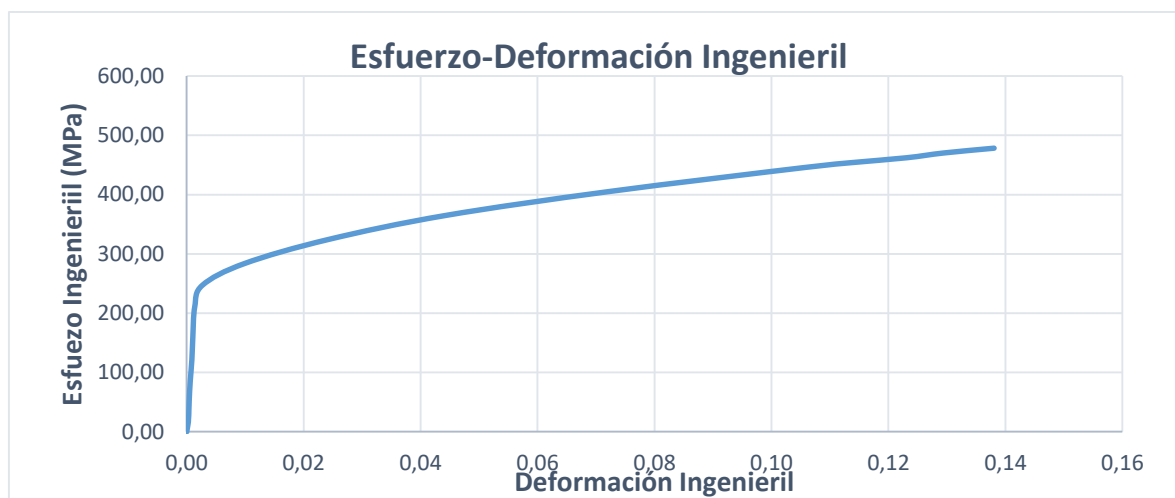


Figura 41 Gráfica Esfuerzo – Deformación Ingenieril Probeta 2

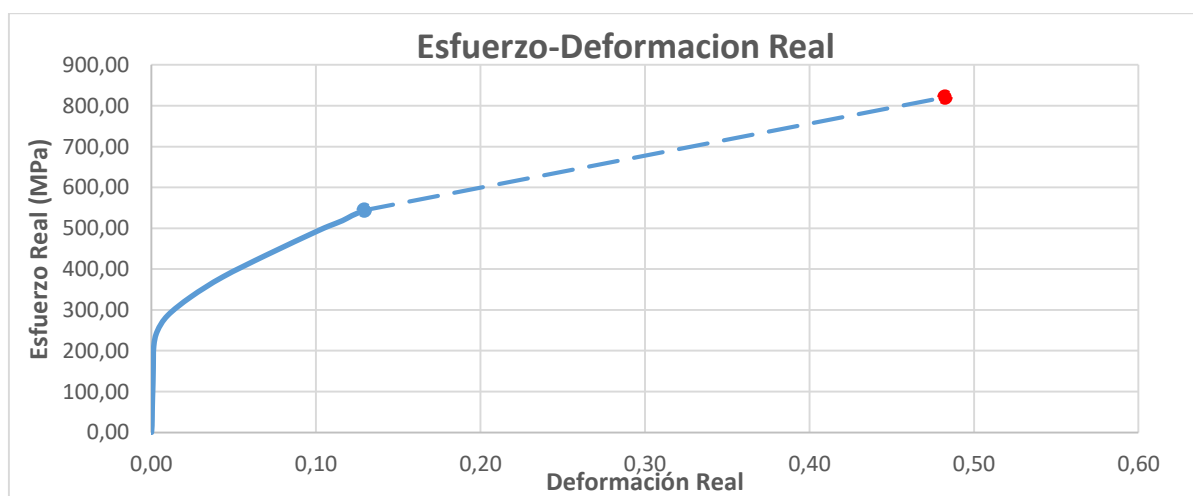


Figura 42 Gráfica Esfuerzo – Deformación Real Probeta 2

En la gráfica Esfuerzo – Deformación Real, el punto marcado de color rojo representa el punto de rotura de la probeta, el cual se obtuvo a partir del voltaje final (1,84V) antes de que éste cambie a cero; la deformación se obtuvo al medir la longitud entre marcas al terminar el ensayo. En la figura 43 se observa la probeta después del ensayo a tensión.



Figura 43 Probeta 2 acero inoxidable AISI 304 después de ensayo a tensión

Para el cálculo del Módulo de Elasticidad, se calculó la pendiente de la parte elástica de la curva Esfuerzo – Deformación Real, obteniéndose un resultado de 211283 MPa.

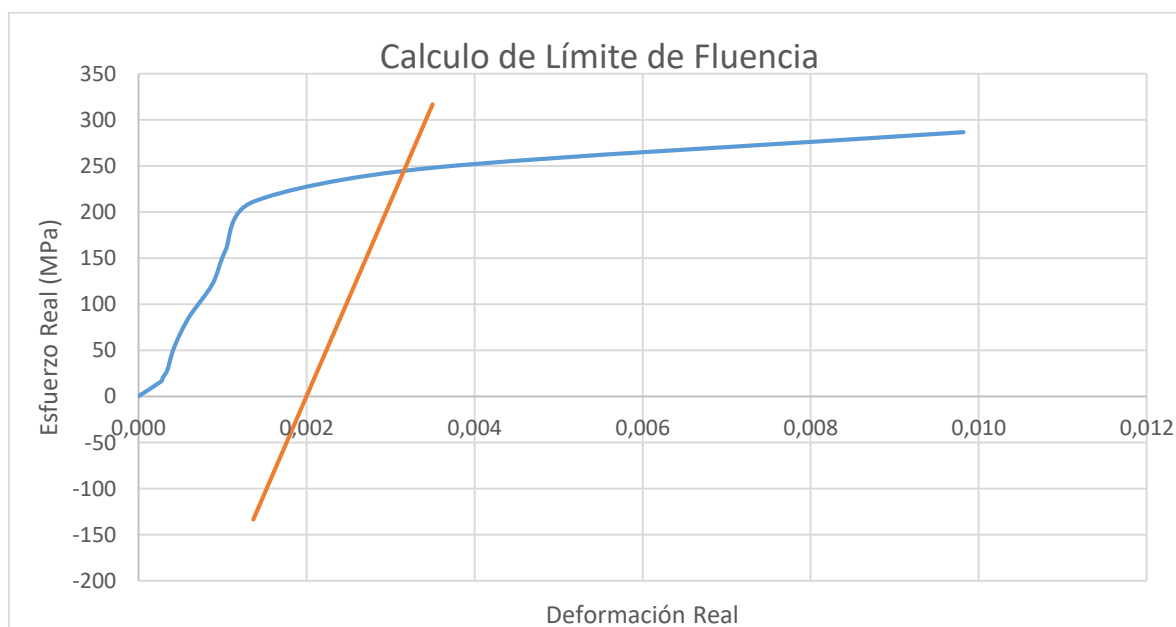


Figura 44 Cálculo gráfico Límite de Fluencia Probeta 2

Por lo tanto el límite de fluencia es 280 MPa, comparando este valor con el referido por (Kalpakjan & Schmid, 2008) entre 290 MPa, existe un porcentaje de diferencia de 3%.

Para el cálculo de coeficiente de resistencia (K) y exponente de endurecimiento (n) se utilizó la aproximación de Hollomon, obteniéndose como resultado de (K) y (n), 1047 MPa y 0.326 respectivamente, la figura 44 muestra la linealización de los puntos de la probeta 2.

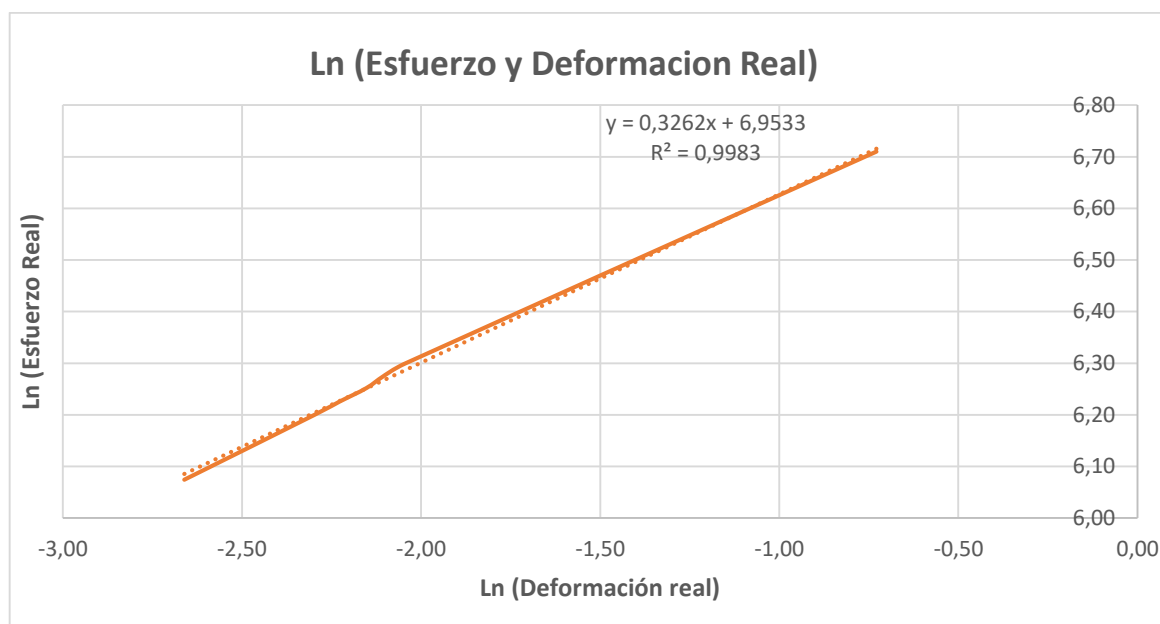


Figura 45 Gráfica de ajuste de Hollomon Probeta 2

Con los valores de (K) y (n) se grafican los esfuerzos mediante la aproximación de Hollomon; la figura 45 nos permite verificar la aproximación de la Ecuación de Hollomon con los valores de la gráfica Esfuerzo – Deformación real.

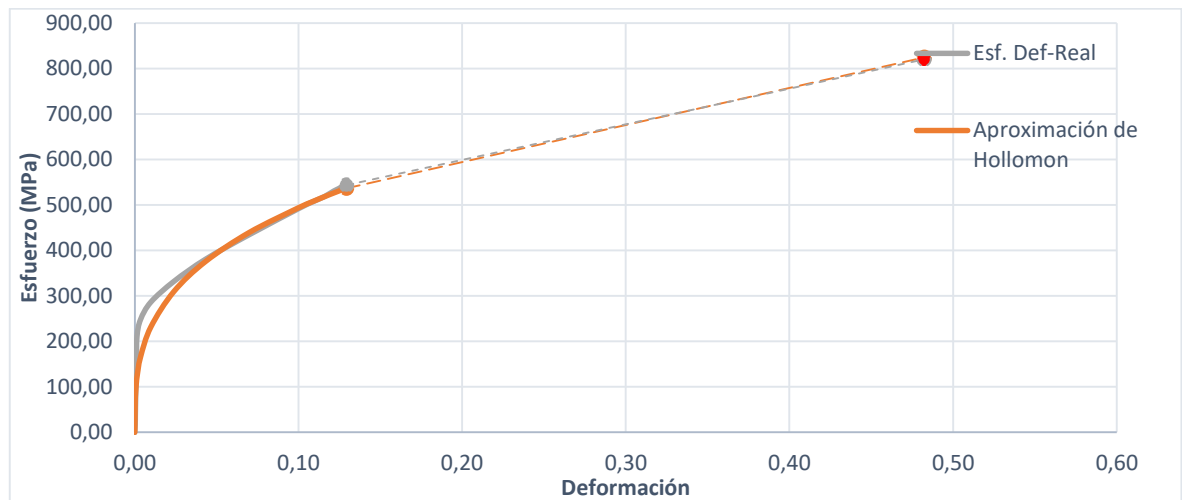


Figura 46 Gráfica Esfuerzo – Deformación, Real y Aproximación de Hollomon Probeta 2

Al observar las curvas de la figura 45 se puede notar que las gráficas Esfuerzo – Deformación Real y de Hollomon, tienden a ser iguales dentro del rango plástico, lo cual indica que es factible el uso de los datos encontrados de (K) y (n) para los procedimientos a realizar en el presente trabajo.

4.2. Ensayo de embutido

Procedimiento

Dentro de la experimentación del proceso de embutido se siguió el siguiente procedimiento:

1. Preparar el equipo.
2. Preparar el material, quitar las rebabas existentes en los bordes (figura 47).
3. Lubricar (de ser necesario) el blanco, el punzón o la matriz de acuerdo al detalle de ensayos mostrados en la tabla 11.



Figura 47 Blanco. Diámetro 50mm



Figura 48 Ejemplo de copas obtenidas después de ensayo B-M. Lubricante: Grasa Multipropósito

4. Ubicar el blanco en el centro de la matriz, tomando como referencia la línea guía marcada.
5. Iniciar el programa de control del proceso e ingresar los datos respectivos.
6. Seleccionar el botón “proceso” en la pantalla e ingresar el nombre del ensayo.
7. Presionar el botón “encerar” y colocar la fuerza máxima como protección para la celda de carga; en este caso es de 35000 [N].
8. Iniciar el proceso de embutido.
9. Al terminar el proceso guardar el nombre del ensayo y presionar el botón “subir” para que el punzón regrese a su posición inicial.

10. Regresar al menú principal dentro del programa y presionar el botón “histórico”.

11. Copiar el nombre del ensayo y guardar los datos correspondientes.

El procedimiento descrito anteriormente fue realizado según lo detallado en la siguiente tabla:

Tabla 9

Detalle de ensayos a realizar

DETALLE DE ENSAYOS										
<i>Lubricante</i>	Sin Lubricante	Aceite Vegetal			Aceite Mineral			Grasa		
<i>Disposición</i>	P-B-M	P-B	B-M	P-B-M	P-B	B-M	P-B-M	P-B	B-M	P-B-M
<i># de muestras</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Donde:

- *P-B-M: Representa en el caso de Sin Lubricante que no existe ningún tipo de lubricante entre el punzón, blanco y matriz; por otro lado, para el Aceite vegetal, mineral y grasa si existe lubricante entre punzón, blanco y matriz.*
- *P-B: Representa la existencia de lubricante ya sea Aceite vegetal, mineral o grasa entre punzón - blanco, mientras que entre el blanco y la matriz no existe lubricante.*
- *B-M: Representa la existencia de lubricante ya sea Aceite vegetal, mineral o grasa entre blanco - matriz, mientras que entre el punzón y el blanco no existe lubricante.*

Lubricantes utilizados

- **Aceite de origen mineral**

LUBRAL. Aceite lubricante a base de aceite mineral.

- **Aceite de origen vegetal**

Husqvana. VegOil, Vegetable oil - Industrial use.

- **Grasa lubricante multipropósito**

John Deere. Multi-Purpose – SD Polyurea Grease.

4.3.Resultados del ensayo

4.3.1. Ensayo Sin Lubricante

Tabla 10

Ensayo Sin Lubricante

ENSAYO SIN LUBRICANTE					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
0,06	107,43	0,5	625,18	0,47	896,86
0,3	590,91	1,78	2235,25	1,81	2623,15
1,47	1396,41	2,64	3253,71	2,69	3913,16
2,42	2264,12	3,85	4913,81	4,19	6321,24
3,8	4267,67	5,13	8013,67	5,18	9643,31
5,26	7721,36	6,39	12045,8	6,28	12708
5,82	9139,11	7,57	15195,9	7,52	15900,9
7,77	14736,2	8,45	18122,2	8,92	18834,7
8,43	17182,7	9,49	20810,3	9,56	21474,7
9,87	22842,1	10,98	25299,6	10,58	24151,4
10,58	24800,4	11,99	27281,9	11,96	27454,1
11,51	26936,1	13,12	28220,7	12,7	28441,7
13,01	28377,4	14,37	26543,4	13,9	27662,5
14,23	27495,3	15,01	25471,9	15,1	26065,2
15,25	25797,6	16,71	23022,9	16,98	23091,8
16,92	22222,9	18,26	18903,5	17,78	19157,1
18,25	17602,3	19,43	15313,7	19,52	15431,6
19,5	14578,2	20,77	9909,86	21,18	9995,13
20,6	10159,9	22,23	7892,77	21,84	9162,2
22,2	8657,98	23,21	4780,15	23,25	4050,66
23,58	4376,58	24,89	3172,43	24,72	3072,07
24,58	3120,26	26,18	3031,03	25,74	3318,41

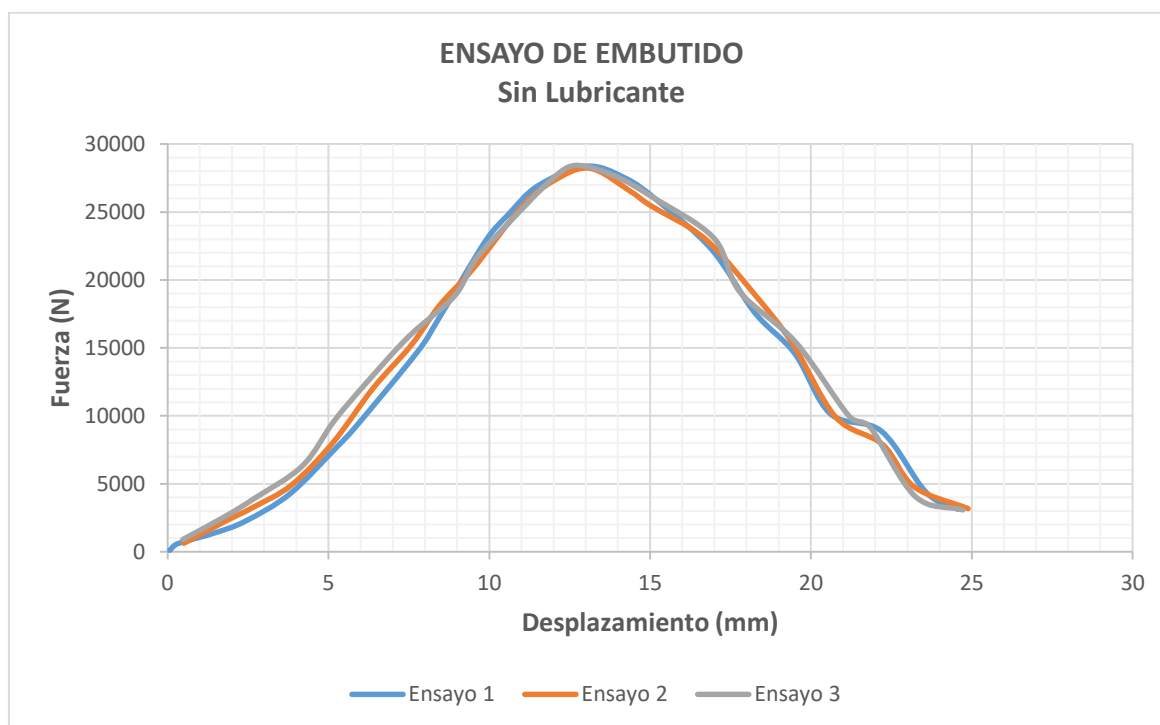


Figura 49 Gráfica Ensayos de embutido – Sin lubricante

Tabla 11

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Sin Lubricante

ENSAYO DE EMBUTIDO Sin Lubricante					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,01	28377,4	13,12	28220,69	12,7	28441,68

4.3.2. Ensayo Aceite de origen mineral

4.3.2.1. Fricción Punzón – Blanco – Matriz

Tabla 12

Ensayo Aceite Origen mineral. Fricción Punzón – Blanco – Matriz

ENSAYO ACEITE DE ORIGEN MINERAL FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO - MATRIZ					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Distancia (mm)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Fuerza (N)
0,81	624,86	0,87	541,37	1,12	728,26
1,43	1068,33	1,68	1662,35	2,34	2346,19
2,42	2828,36	3,36	3562,94	3,12	4388,64
4,46	4945,5	3,92	4512,48	4,93	6674,24
4,89	7276,5	5,44	8194,45	6,2	9261,83
6,18	9961,02	6,41	11006,63	6,82	12192,3
6,83	12489,8	7,41	14154,72	8,24	14922,8
8,46	15106,8	9,01	18505,89	9,29	18159,2
9,58	21116,5	10,5	23818,50	10,43	22787
11,08	24196,4	12,13	25590,83	11,26	24190,8
12,36	25529,7	12,54	26053,07	12,85	26706,2
13,16	27270,2	13,58	28270,2	14,07	28762,7
14,24	28269,3	14,01	28469,3	15,06	25622,3
15,96	21916,2	15,89	24320,00	15,97	23375,1
17,08	20175,6	16,00	23963,00	16,57	21959,2
18,1	18140,8	17,00	20511,00	18,8	17354,9
18,5	17929,2	18,00	18619,00	19,44	15685,1
20,7	10992,2	19,00	17473,00	21,39	11743,4
22,58	7967,06	20,00	13874,00	22,82	8333,67
24,33	4281,4	22,00	8995,50	24,16	4886,01

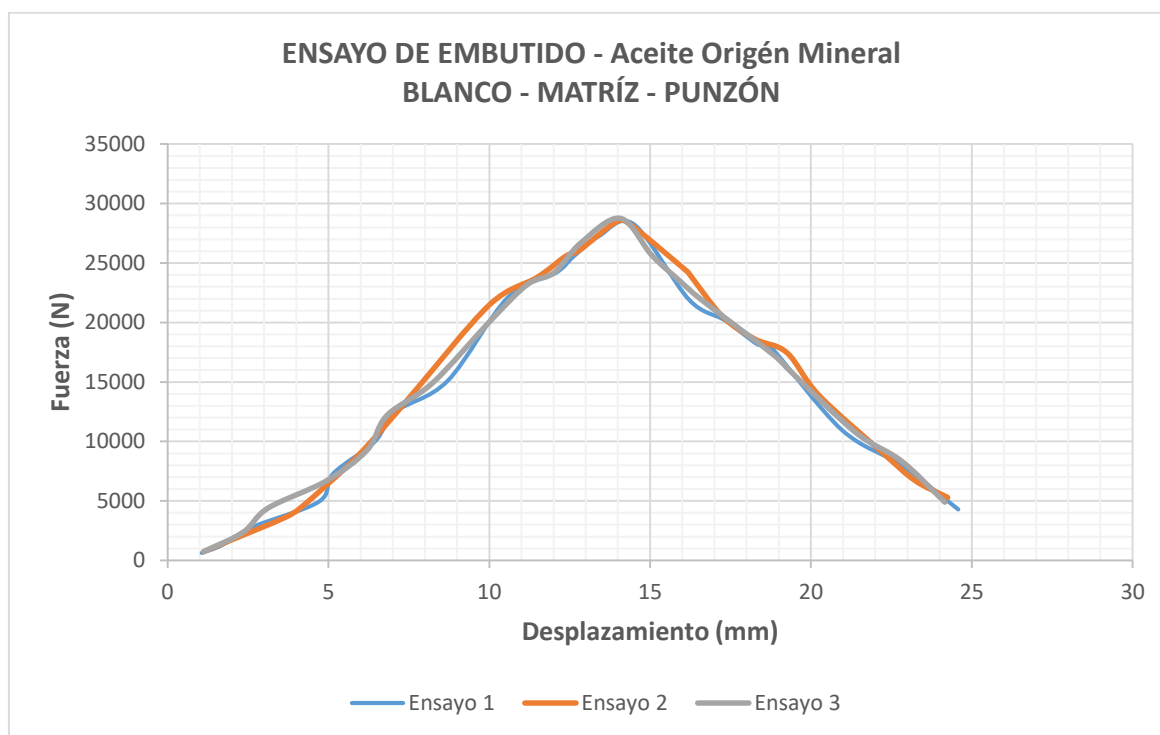


Figura 50 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción P-B-M

Tabla 13

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen mineral. Fricción P-B-M

ENSAYO DE EMBUTIDO – Aceite de origen mineral Fricción Punzón – Blanco - Matriz					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
14,24	28269,29	14,01	28469,29	14,07	28762,67

4.3.2.2.Fricción Punzón – Blanco

Tabla 14

Ensayo Aceite Origen mineral. Fricción Punzón – Blanco

ENSAYO ACEITE DE ORIGEN MINERAL FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
0,94	660,92	0,75	450,12	0,31	135,84
2,29	2247,18	1,57	1873,09	1,21	1024,58
3,7	4213,3	2,76	3199,27	2,66	2716,95
4,49	6098,56	3,93	5296,06	3,89	4732,54
5,85	8982,96	5,2	8417,19	4,89	6590,28
6,82	12323,8	6,68	12324,15	5,84	8603,77
7,87	15287,6	7,33	14362,75	7	11795,9
8,99	19762,9	8,79	18255,10	8,08	14973,8
9,77	22392,8	10,19	22841,63	9,79	20249,9
10,12	23167,4	11,23	26545,25	10,45	23042,2
11,89	27605,5	12,46	28257,61	11,1	24765,9
14,15	30123,8	13,36	29553,9	13,05	28462,3
14,62	28509,8	14	30135,6	14,11	29914,7
16,06	25584,5	14,77	28289,62	15,76	26922,5
16,42	25178,8	15,98	25675,44	16,83	24182,3
18,33	18831,8	16,89	22929,86	18,23	20032,4
19,76	13988,2	18,38	18801,27	19,37	16115,4
21,09	10450,6	19,58	15224,50	20,47	10804,5
21,5	10507,6	20,90	11293,50	21,7	9847,05
24,41	3401,07	21,86	10352,41	23,59	4929,79

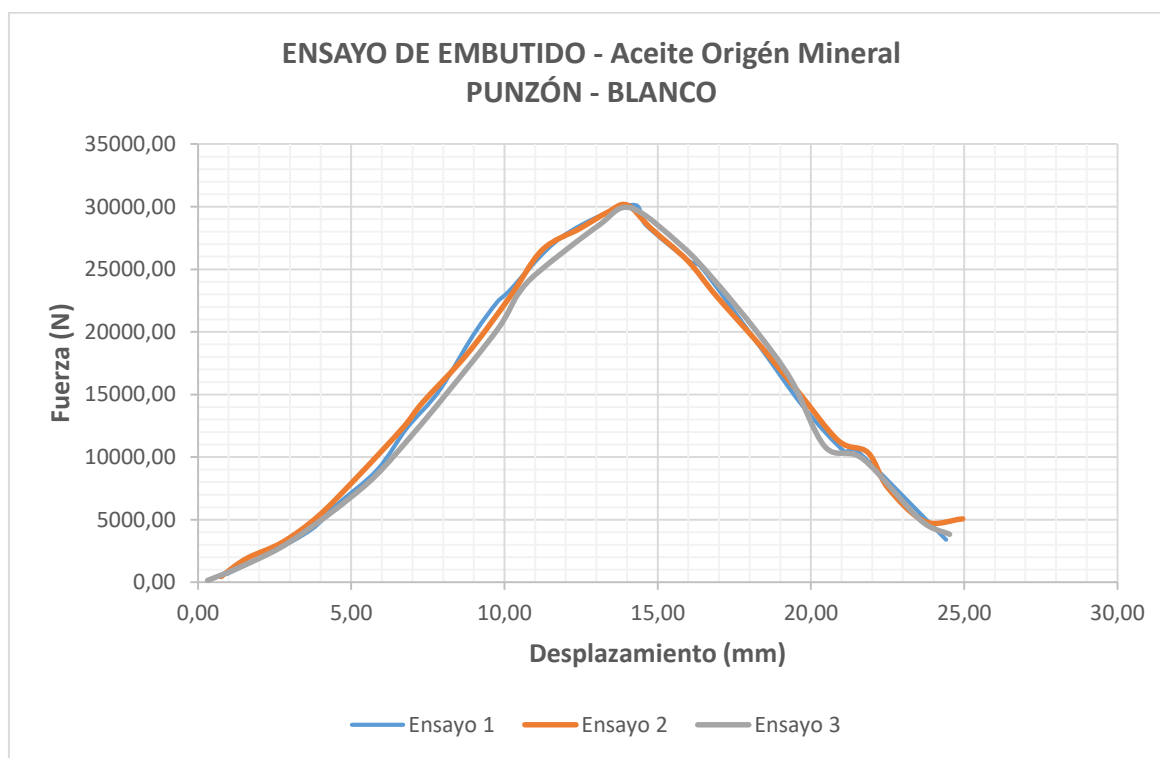


Figura 51 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción P-B

Tabla 15

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen mineral. Fricción P-B

ENSAYO DE EMBUTIDO – Aceite de origen mineral Fricción Punzón – Blanco					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
14,15	30123,79	14,0	30135,62	14,11	29914,65

4.3.2.3.Fricción Blanco – Matriz

Tabla 16

Ensayo Aceite Origen mineral. Fricción Blanco – Matriz

ENSAYO ACEITE DE ORIGEN MINERAL FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
1,21	744,7	0,32	186,06	1,02	484,7
2,09	2388,99	1,14	1173,96	1,53	1914,34
3,19	4450,38	2,44	2953,41	3,24	3800,16
4,37	6744,2	4,08	5068,74	4,41	5953,9
5,83	9319,62	4,79	7391,44	5,65	8331,45
7,05	12284,2	5,99	10084,4	7,09	11173,3
8,14	15421,6	7,27	13071,3	8,01	14184,8
9,12	18294,4	8,55	16106,1	9,32	17997,3
10,39	21965,3	10,01	21177,1	9,94	19595,8
11,28	24492,7	10,39	22452,2	11,28	23886,1
12,7	26847,1	11,95	25584,7	12,7	26647,8
13,27	27693,3	12,9	27395,7	13,71	27981,8
13,91	27911,1	13,63	28193,9	15,29	24229,5
14,53	26841,6	15,32	23925,4	16,11	23072,9
16,01	22834,2	16,24	22388	17,4	18508,3
17,7	18381,8	17,81	18077,3	18,58	17100,3
18,83	16996	19,41	16177	19,37	16139,9
19,96	12024	20,46	12152,7	21,19	10513,2
21,32	9312,91	21,23	8961,62	22,23	7079,99
22,85	5390,1	24,04	3572	24,19	4247,16
24,69	3176,86	24,57	3477,69	25,55	4053,09

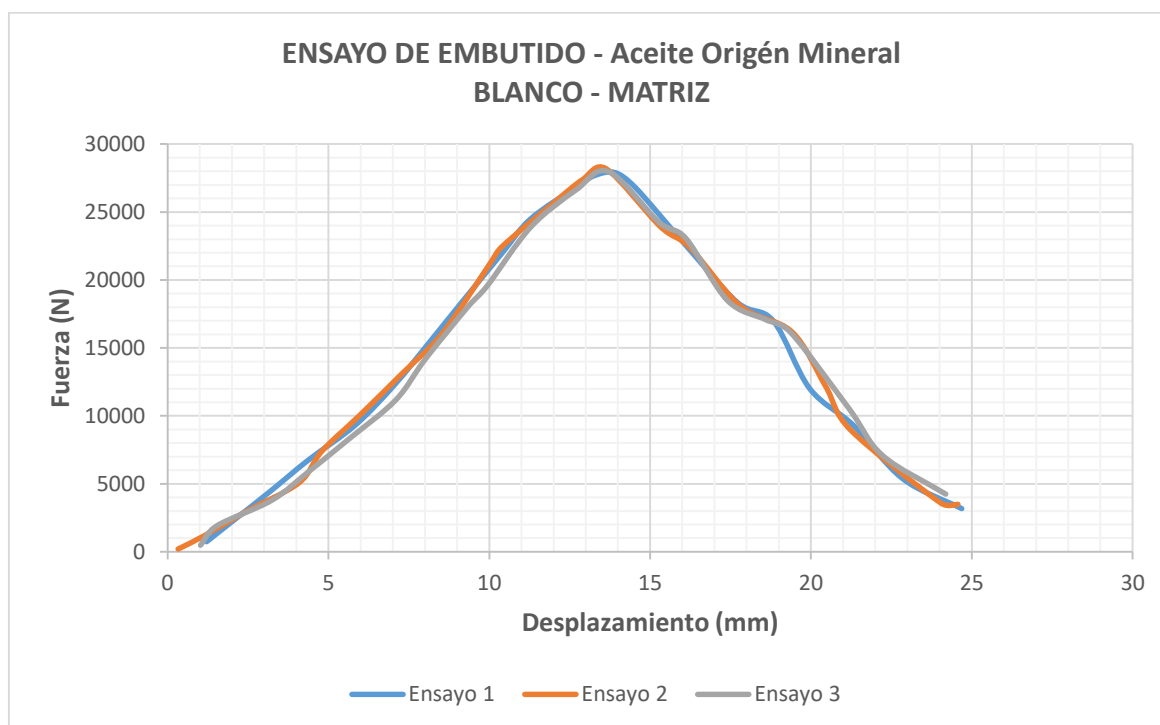


Figura 52 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción B-M

Tabla 17

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen mineral. Fricción B-M

ENSAYO DE EMBUTIDO – Aceite de origen mineral Fricción Blanco - Matriz					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,91	27911,14	13,63	28193,87	13,71	27981,79

4.3.3. Ensayo Aceite de origen vegetal

4.3.3.1. Fricción Punzón – Blanco – Matriz

Tabla 18

Ensayo Aceite Origen vegetal. Fricción Punzón – Blanco – Matriz

ENSAYO ACEITE DE ORIGEN VEGETAL FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO - MATRIZ					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
1	155,97	0,87	173,6	1,43	790,29
1,94	1194,26	1,94	1197,77	2,44	2439,29
2,89	3030,94	2,77	3009,61	3,27	4517,87
4,41	5213,98	4,21	5161,68	4,71	6807,87
5,33	7591,17	5,72	7511,19	6,22	9403,82
6,45	10414,9	6,57	10259,2	7,07	12362,7
7,71	13486,2	7,69	13275,6	8,19	15470,9
8,91	16497,5	8,31	16263	8,81	18297,5
10,02	19279	9,63	19023,6	10,13	20884,5
11,03	21875,2	10,63	21514,3	11,13	23666,4
12,4	25237,5	11,96	24975,7	12,46	27659,9
13,6	27593,5	12,91	26981,7	13,41	28368,4
14,45	27955	14,7	28212,8	15,2	27125,2
15,16	26701	15,64	26511	16,14	24870,4
16,65	24224,7	16,58	24069,2	17,08	22056,2
18,13	20815,1	18,11	20842,4	18,61	18296,4
19,25	16887,7	19,36	16874,7	19,86	14659,8
20,55	13955,6	20,63	13733,3	21,13	11827,4
22,38	10153,9	22,11	9986,78	22,61	6926,37
23,97	4214,44	24,27	4036,55	24,77	3462,48

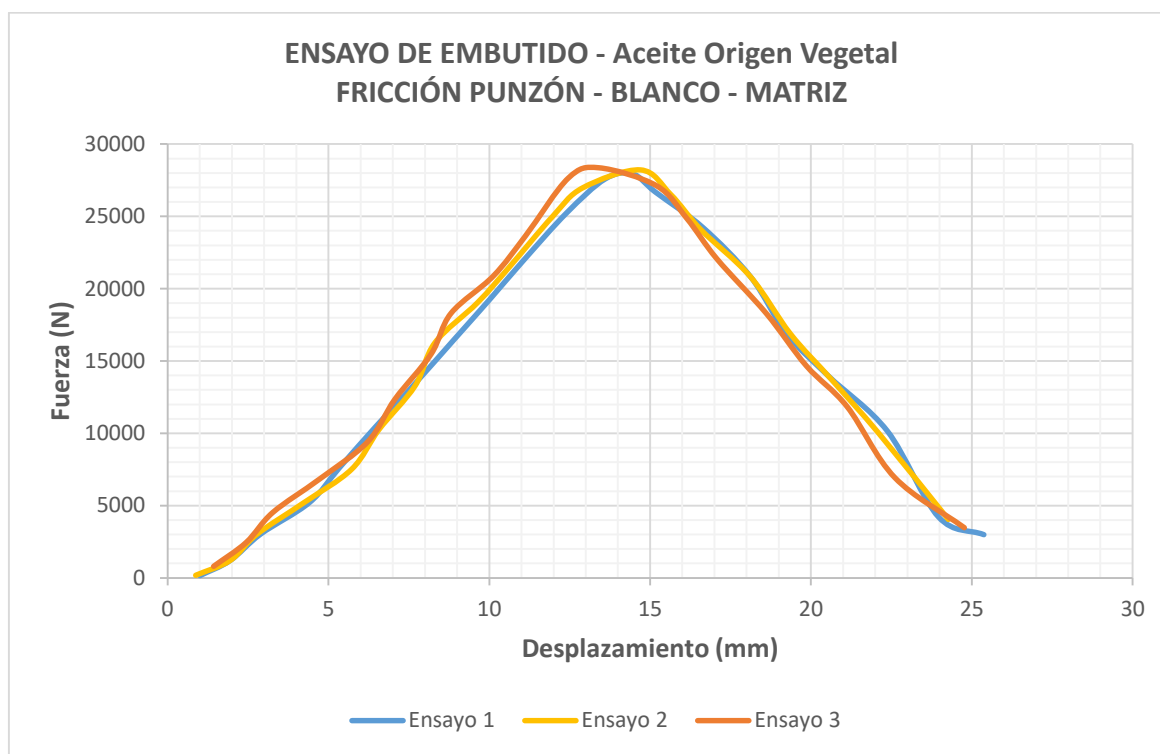


Figura 53 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B-M

Tabla 19

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen vegetal. Fricción P-B-M

ENSAYO DE EMBUTIDO – Aceite de origen vegetal Fricción Punzón – Blanco – Matriz					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
14,4	27955,01	14,7	28212,78	13,72	28368,36

4.3.3.2. Fricción Punzón – Blanco

Tabla 20

Ensayo Aceite Origen vegetal. Fricción Punzón – Blanco

ENSAYO ACEITE DE ORIGEN VEGETAL FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
0,62	506,28	1,26	854,67	1,11	706,77
2,06	2022,06	1,29	2560	1,72	2317,32
2,08	4006,92	2,58	4646,71	2,47	4353,11
3,07	6234,53	3,57	6926,31	3,68	6606,71
4,63	8694,32	5,13	9530,51	4,88	9138,71
5,92	11606,88	6,42	12474,97	5,39	12067,22
6,26	14687,2	6,76	15489,35	6,87	15114,57
7,55	18447,66	8,05	18244,94	7,90	18372,59
8,63	22019,13	9,13	21770,92	8,99	21921,32
9,67	25353,82	10,17	24531,45	10,08	24968,93
11,15	26984,56	11,65	28984,36	11,28	28484,46
12,58	30877,75	13,08	30987,21	12,93	30958,77
14,48	29347,67	14,98	29124,34	14,48	28486,01
15,31	25414,94	15,81	25187,35	15,47	25327,44
15,97	22186,37	16,47	22345,24	16,57	22292,10
17,56	17856,28	18,06	18109,3	17,91	15982,79
18,39	14883,36	18,89	14797,82	18,90	14866,88
20,19	10987,68	20,69	11321,93	20,88	9904,81
21,93	5975,38	22,43	6359,1	22,39	6193,53
23,06	3179,41	23,56	2911,5	23,25	3071,75
24,38	2452,16	24,88	3046,47	24,45	2775,61

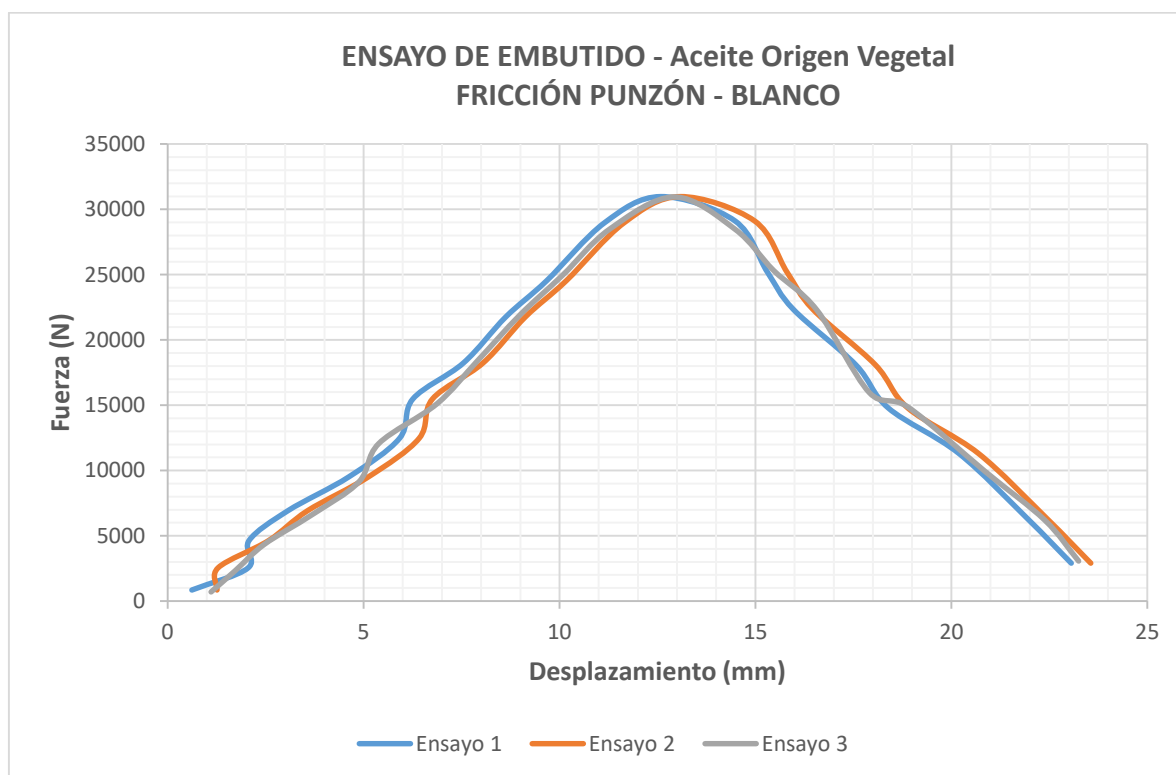


Figura 54 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B

Tabla 21

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen vegetal. Fricción P-B

ENSAYO DE EMBUTIDO – Aceite de origen vegetal Fricción Punzón – Blanco					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Distancia (mm)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Fuerza (N)
12,58	30877,75	13,08	30987,21	12,93	30958,77

4.3.3.3.-Fricción Blanco – Matriz

Tabla 22

Ensayo Aceite Origen vegetal. Fricción Blanco – Matriz

ENSAYO ACEITE DE ORIGEN VEGETAL FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
1,09	2423,2	1,03	2551,8	1,12	2023,33
2,21	3410,65	2,19	3126,57	2,29	3781,97
3,78	4489,75	3,37	4166,21	3,71	4897,32
4,99	6777,65	4,42	6445,85	5,18	7210,73
5,99	9339,94	6,1	8954,86	5,74	9875,63
7,35	12353,59	6,9	11933,12	6,7	12864,15
8,25	15438,12	8,21	15040,88	8,29	15899,26
9,29	18242,28	9,12	17892,21	9,47	18664,43
10,35	20868,3	10,18	20559,32	10,41	21176,96
11,5	23561,36	11,17	23061,23	11,45	24182,09
12,8	26508,45	12,6	26316,32	13,22	27773,84
14,09	28511,14	14,29	28545,57	14,36	28264,95
15,23	27626,02	15,39	26974,56	15,55	26727,18
16,2	25213,91	16,21	24696,42	16,82	24539,86
17,21	22413,39	17,03	22027,99	17,88	21607,09
18,23	18290,06	18,17	18983,54	18,87	17769,86
19,09	15162,77	19,67	16025,38	19,92	14509,4
21,09	11563,37	20,54	14081,63	21,42	11402,63
22	6585,72	22,06	9137,69	22,67	6486,67
25,37	1831,87	24,21	4698,5	24,91	2093,52

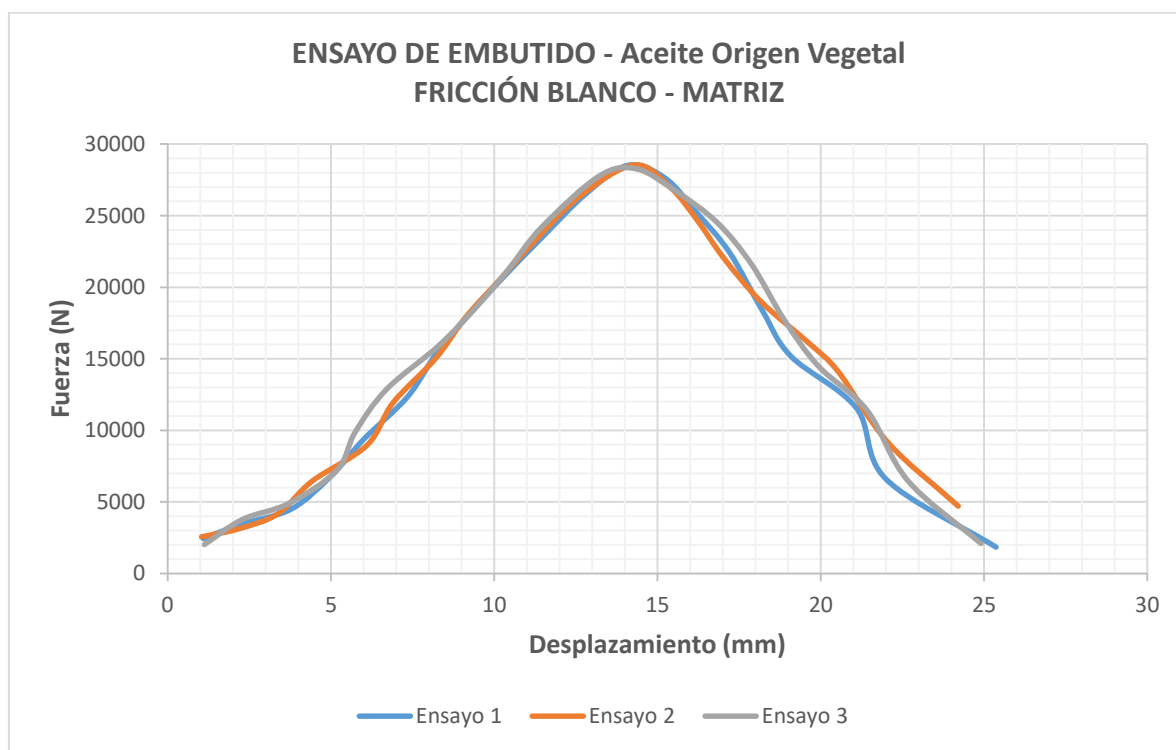


Figura 55 Gráfica Ensayos de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción B-M

Tabla 23

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Aceite origen vegetal. Fricción B-M

ENSAYO DE EMBUTIDO – Aceite de origen vegetal Fricción Blanco – Matriz					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
14,09	28511,14	14,29	28545,57	14,36	28264,95

4.3.4. Ensayo Grasa lubricante multipropósito

4.3.4.1. Fricción Punzón – Blanco – Matriz

Tabla 24

Ensayo grasa lubricante multipropósito. Fricción Punzón - Blanco – Matriz

ENSAYO GRASA MULTIPROPÓSITO FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO - MATRIZ					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
0,59	382,52	0,79	435,37	0,44	246,26
1,5	1614,75	1,48	1787,01	1,34	1262,69
2,52	3517,22	2,66	3687,19	2,47	3028,59
3,88	5724,75	3,83	5870,11	3,46	5122,63
5,34	8115,25	4,99	8225,17	4,5	7383,11
6,09	10981,1	6,03	11054,5	5,64	10021,8
7,14	14018,7	7,52	14046,6	6,89	13034
8,18	16906,9	8,44	16881,5	7,94	15969,5
9,35	19581,9	9,35	19556,5	9,39	18676,4
10,57	22038,3	10,9	21972	10,42	21115,4
11,85	25597,2	11,81	25564,1	11,73	24283,5
12,7	26523,1	13,33	27155,5	12,64	26420,3
13,37	26921	14,47	26061,6	13,66	27519,2
14,31	25672,5	14,95	25077,1	14,64	25794,1
15,51	22988	16,01	22724,1	15,55	23439,4
16,95	19427,6	17,1	19146,4	17,29	18429
18,54	15621,2	18,27	15324,9	18,25	16434,8
19,49	12816	19,18	12678,4	19,5	13213,4
21,8	8839,92	21,5	8774,34	20,55	10102,7
23,06	3958,46	23,09	4216,2	22,98	5543,94
24,34	3135,44	24,43	3129,2	23,82	2854,47
24,45	3223,32				

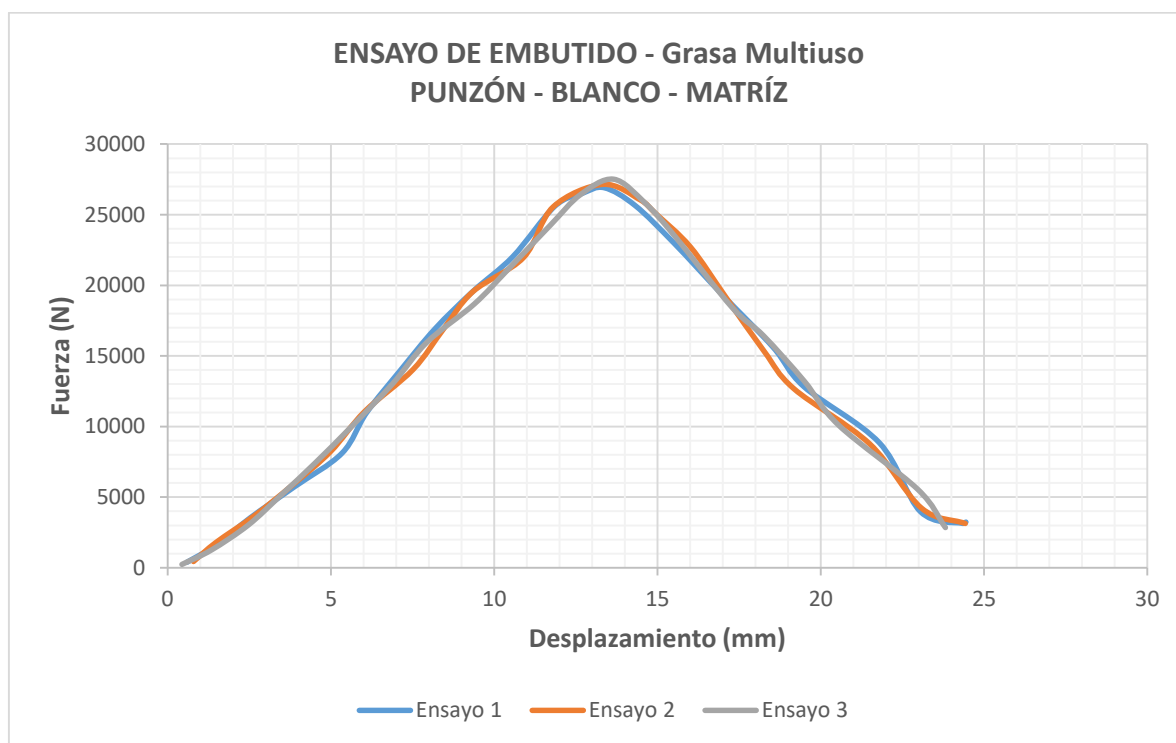


Figura 56 Gráfica Ensayos de embutido – Grasa multiuso - Fricción P-B-M

Tabla 25

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Grasa multipropósito. Fricción P-B-M

ENSAYO DE EMBUTIDO – Grasa multipropósito Fricción Punzón – Blanco - Matriz					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,37	26920,95	13,33	27155,46	13,66	27519,23

4.3.4.2.Fricción Punzón – Blanco

Tabla 26

Ensayo grasa lubricante multipropósito. Fricción Punzón - Blanco

ENSAYO GRASA MULTIPROPÓSITO FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
0,05	1480,57	0,05	1588,61	0,05	1747,09
0,07	1488,35	0,06	1588,52	0,06	1750,94
0,12	1490,87	0,11	1591,8	0,11	1753,84
1,99	3107,83	0,66	1895,15	0,73	1907,67
3,63	5110,98	1,94	3180,5	1,96	3356,67
4,8	7347,32	3,41	5080,01	3,37	5308
5,45	9832,67	4,48	7283,09	4,54	7527,71
6,92	12788,5	5,6	9665,7	5,52	9961,69
7,79	15816	6,56	12545,1	6,54	12879,3
8,9	18555,1	7,51	15527,6	7,65	15884,3
10,12	22823,3	8,25	18396,3	8,45	18688,2
10,5	23653,6	9,49	21081,3	9,80	22164,8
12,21	28545,9	10,32	23479	10,64	23778,8
13,46	29223,8	11,34	27068,8	11,57	28298,4
14,37	28386,3	13,1	29474,7	13,20	29978,4
15,85	26062,3	14,09	29006,7	14,23	28509
16,84	22203,1	15,36	26747,1	15,60	26117,2
18,49	18816	16,22	24263,4	16,53	23445,7
19,78	16205,5	17,91	20769,5	18,20	20005,2
20,39	14486,7	19,27	16984,8	19,52	16807,6
22,17	10815,6	20,51	14542,6	20,3	14727,2
23,71	6658,43	21,74	10432,7	22,104	10836,7
24,44	6220,84	23,53	6081,81	23,619	6582,62
				24,919	5476,4

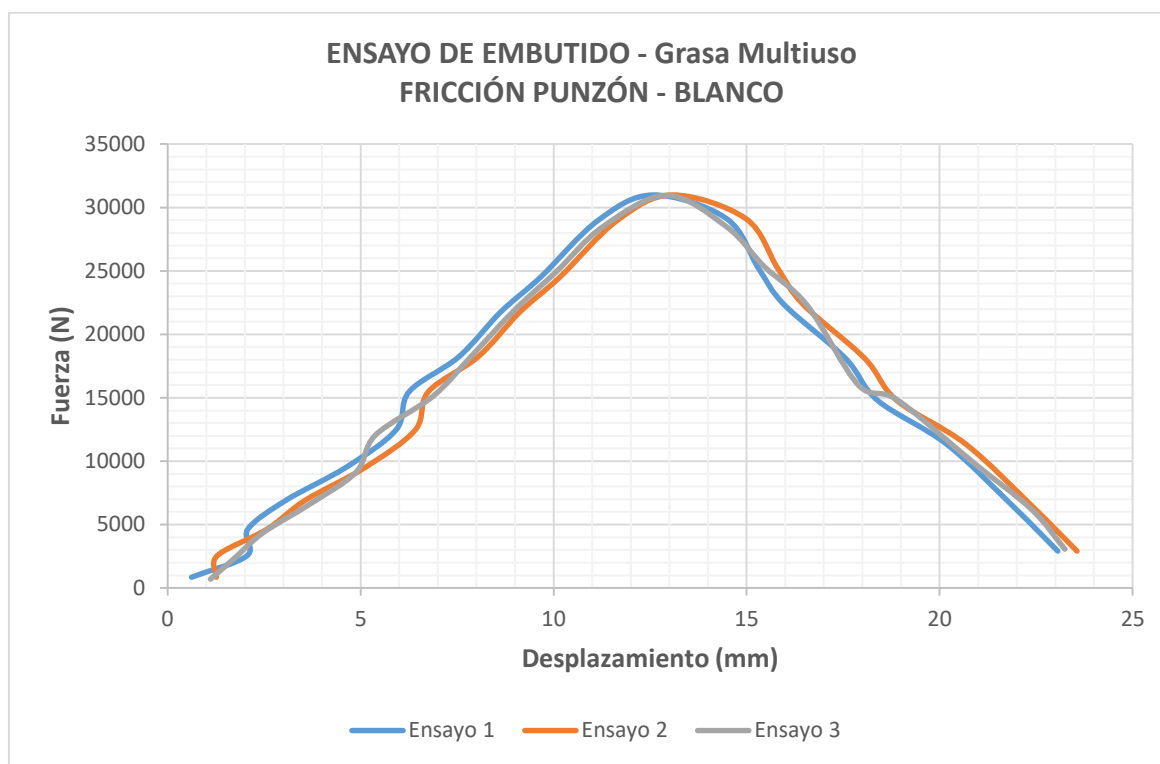


Figura 57 Gráfica Ensayos de embutido – Grasa Multiuso - Fricción P-B

Tabla 27

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Grasa multipropósito. Fricción P-B

ENSAYO DE EMBUTIDO – Grasa multipropósito Fricción Punzón – Blanco					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,46	29223,81	13,10	29474,66	13,20	29978,36

4.3.4.3.Fricción Blanco – Matriz

Tabla 28

Ensayo grasa lubricante multipropósito. Fricción Blanco – Matriz

ENSAYO GRASA MULTIPROPÓSITO FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
0,05	1130,18	0,05	1323,3	0,05	1368,65
1,11	2199,28	0,1	1337,2	0,1	1373,07
3,24	3954,69	1,64	2905,66	1,1	2013,16
4,44	6006,25	3,33	4741,39	3,885	5373,82
5,32	8251,09	4,47	6846,9	4,895	7549
6,03	10868,2	5,35	9128,61	5,69	9998,42
6,93	13898,5	6,26	11873,9	6,595	12886,2
8,00	16892,7	7,4	14925,8	7,7	15909,2
9,34	19594	8,33	17793,4	8,835	18693,7
10,58	21941,6	9,54	20459	10,06	21200,3
11,63	25021,1	10,78	22690	11,205	23855,6
12,68	26922,3	11,73	25390,5	12,205	26156,4
13,80	27956,8	12,68	27009,1	13,24	27482,9
14,59	26875,4	14,23	27976,7	14,41	27426,1
15,54	24025,8	14,89	25812,2	15,215	24919
15,99	22551	15,46	24089,2	15,725	23320,1
17,42	18481,7	16,5	20915,2	16,96	19698,5
18,74	15288,8	18,19	17196,6	18,465	16242,7
19,94	11554,6	19,29	14397,4	19,615	12976
22,03	7958,57	20,33	10440,9	21,18	9199,73
23,04	5909,42	22,01	7664,21	22,53	6786,81
24,26	4724,20	23,57	5076,70	23,92	4900,45

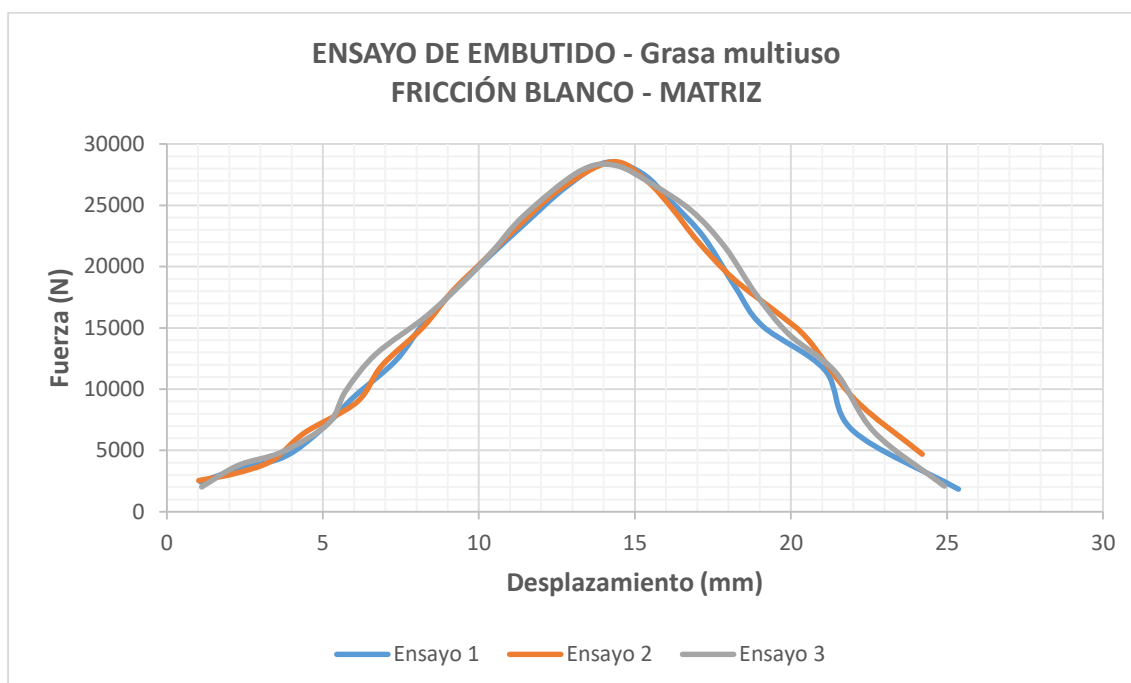


Figura 58 Gráfica Ensayos de embutido – Grasa Multiuso - Fricción B-M

Tabla 29

Fuerza máxima. Ensayos de embutido Grasa multipropósito. Fricción B-M

ENSAYO DE EMBUTIDO – Grasa multipropósito Fricción Blanco - Matriz					
Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,80	27956,78	14,23	27976,74	13,24	27482,93

CAPÍTULO V. SIMULACIÓN

5.1. Objetivo de la simulación

El proceso de embutido es ampliamente utilizado dentro de la industria manufacturera, es por ello que resulta necesario la utilización de un Software de Simulación FEM, para así aproximar los resultados posibles a obtener en el proceso real, ahorrando así recursos de tiempo y dinero.

En el desarrollo de este trabajo se utilizó el Software DEFORM, el cual es un sistema diseñado para analizar procesos complejos de conformado de metales basándose en el método de elementos finitos.

5.2. Parámetros de simulación

Para la simulación del proceso de embutido de la chapa de acero inoxidable AISI 304 de 1mm de espesor, se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla 30

Parámetros de simulación

	Parámetros de Simulación			
	<i>Sin Lubricante</i>	<i>Aceite</i>	<i>Mineral</i>	<i>Grasa</i>
<i>Elementos de malla</i>	175000	175000	175000	175000
<i>Fricción (u)</i>	0,12	0,078	0,062	0,027
<i>Velocidad (mm/s)</i>	21,75	21,75	21,75	21,75
<i>Critical value (Damage)</i>	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>Fractura</i>	Normalizado C & L	Normalizado C & L	Normalizado C & L	Normalizado C & L
<i>K (MPa)</i>	1045	1045	1045	1045
<i>n</i>	0,32	0,32	0,32	0,32
<i>Regla de endurecimiento</i>	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica
<i>Función de tensión</i>	Von Mises	Von Mises	Von Mises	Von Mises
<i>Número de pasos</i>	100	100	100	100

Los valores correspondientes a la fricción se variaron dentro de los límites establecidos para cada lubricante descrito en el Capítulo 2.

La velocidad del punzón dentro de la simulación fue dada por la velocidad de la máquina de embutido en donde se realizaron los ensayos.

El coeficiente de resistencia (K) y de endurecimiento (n), son los obtenidos en el Capítulo 4.

Para determinar el número de elementos de malla, se realizó una convergencia de malla, la cual consiste en realizar la simulación con un número mínimo de elementos posibles, en este caso se utilizaron 50000 elementos, seguido a esto se incrementó el número de elementos a 100000 y se lo comparó con la primera simulación, se continuó incrementando la densidad de la malla hasta que los resultados converjan satisfactoriamente, llegando así a un número de 175000 elementos para todas las simulaciones.

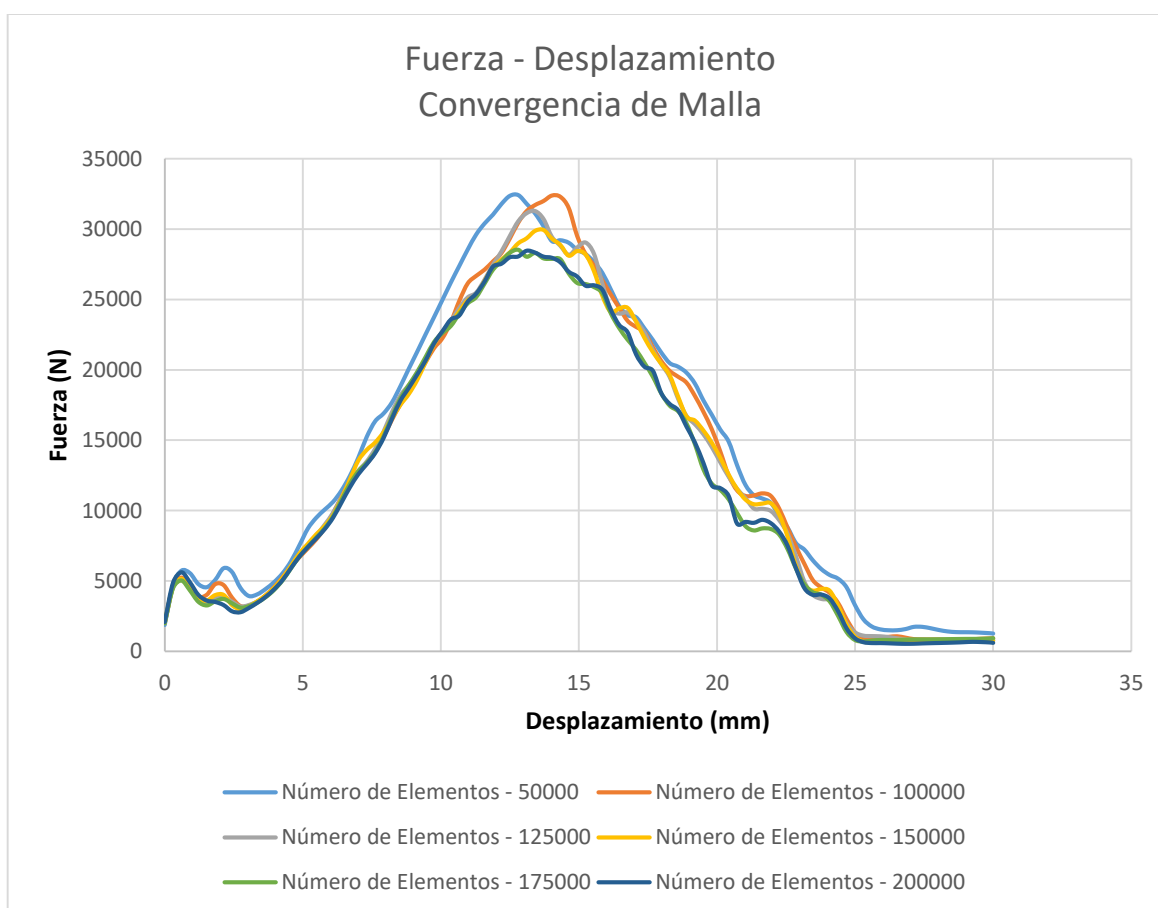


Figura 59 Gráfica Esfuerzo – Deformación (convergencia de malla)

En la figura 58 se puede observar como la gráfica de la simulación correspondiente a 200000 elementos converge con la correspondiente a los 175000 elementos.

5.3. Construcción del modelo de simulación

La simulación del proceso de embutido fue realizada en un software de manufactura, según las condiciones establecidas en la tabla 32; a continuación, se detallará el procedimiento dentro del software para la simulación del proceso de embutido en la combinación blanco-matriz, con grasa multipropósito como lubricante.

1. Abrir el software de manufactura y crear un nuevo documento.

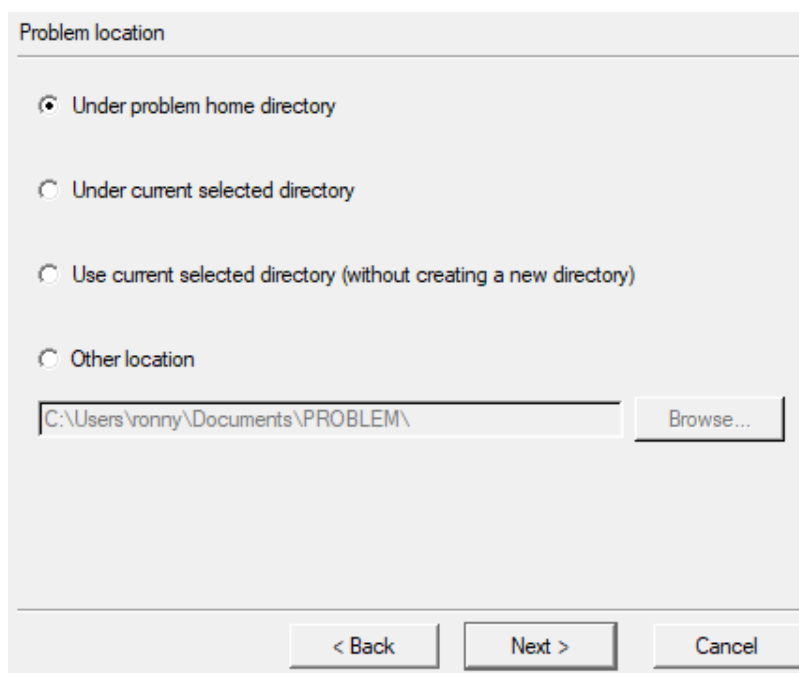


Figura 60 Creación nuevo documento

2. Dentro de la ventana de pre-procesado, insertar la geometría del conjunto punzón – matriz – blanco, y ubicar cada pieza de forma correcta.

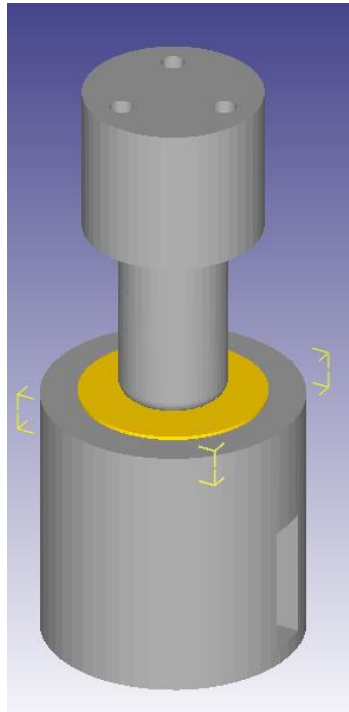


Figura 61 Geometría
Conjunto P-B-M

3. Insertada la geometría de cada componente se procede a seleccionar el material del blanco, con las condiciones establecidas en la Tabla 30

Flow Stress Data

$$\bar{\sigma} = c \bar{\epsilon}^n \dot{\bar{\epsilon}}^m + y$$

Constant (c)

Strain exponent (n)

Strain rate exponent (m)

Constant (y)

OK

Cancel

Graph >>

Figura 62 Condiciones material

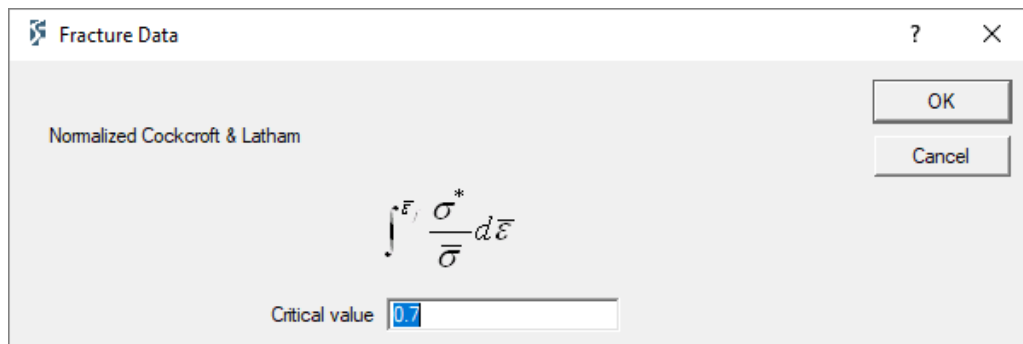


Figura 63 Valor crítico material

4. Seguido a esto, ingresar los valores de fricción para cada una de las combinaciones determinadas en la tabla, para este caso se utilizó los valores de fricción de 0.12 y 0.027 para las combinaciones Punzón - blanco y Blanco – Matriz respectivamente.

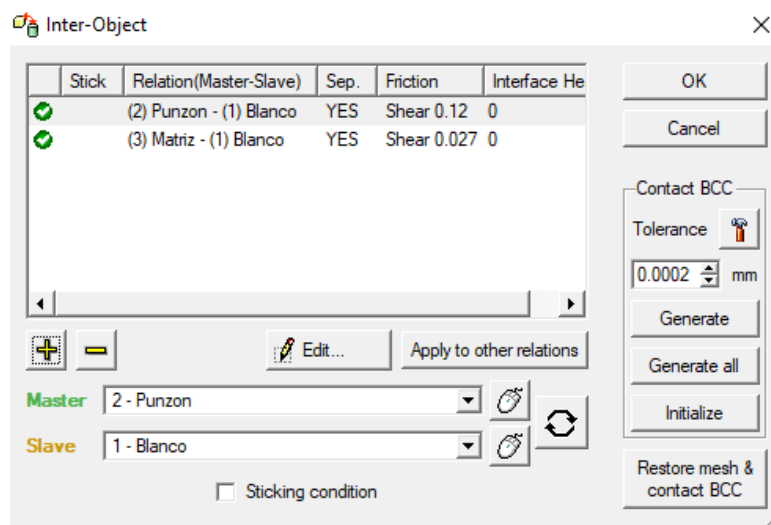


Figura 64 Ventana selección de fricción

5. Ingresar los valores de número de pasos e incremento, según Tabla 30

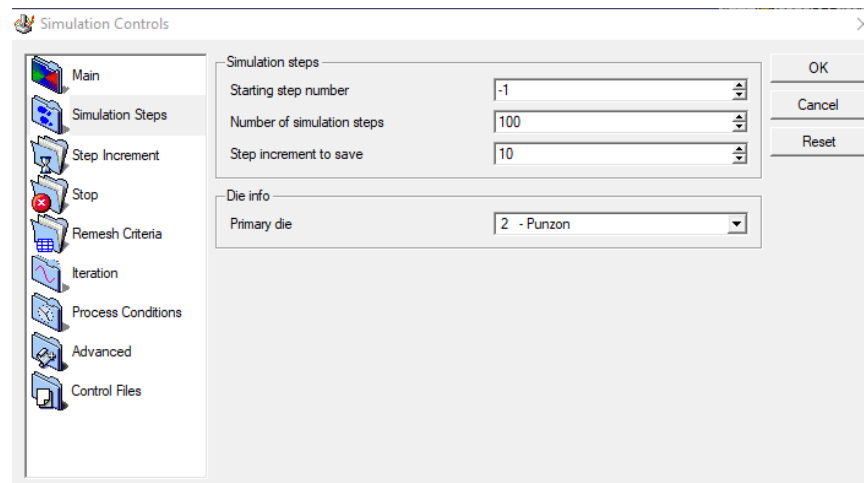


Figura 65 Ventana Controles de Simulación

6. Medir la longitud de cada elemento de mallado y dividirlo para 3, esta distancia será aquella que debe recorrer el punzón por cada paso dentro de la simulación.



Figura 66 Longitud de elemento de mallado

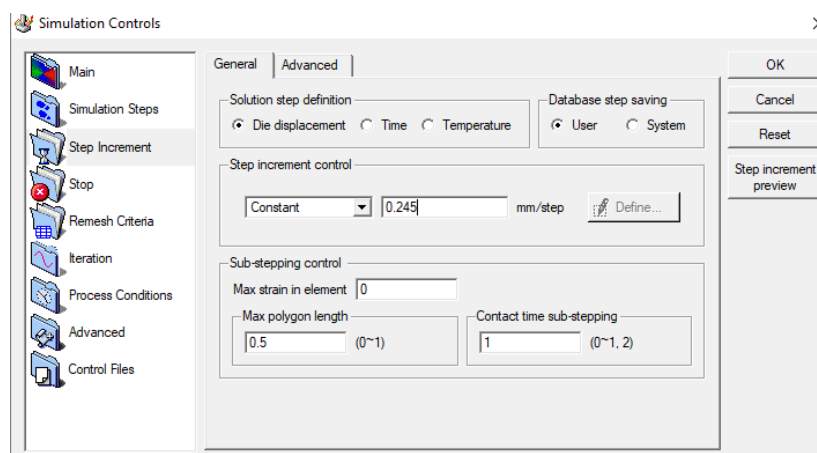


Figura 67 Controles de simulación

7. Generar el modelo de simulación dando clic en el botón “Generate”, seguidamente correr el programa desde la ventana principal y esperar a que el software presente los resultados de la simulación.

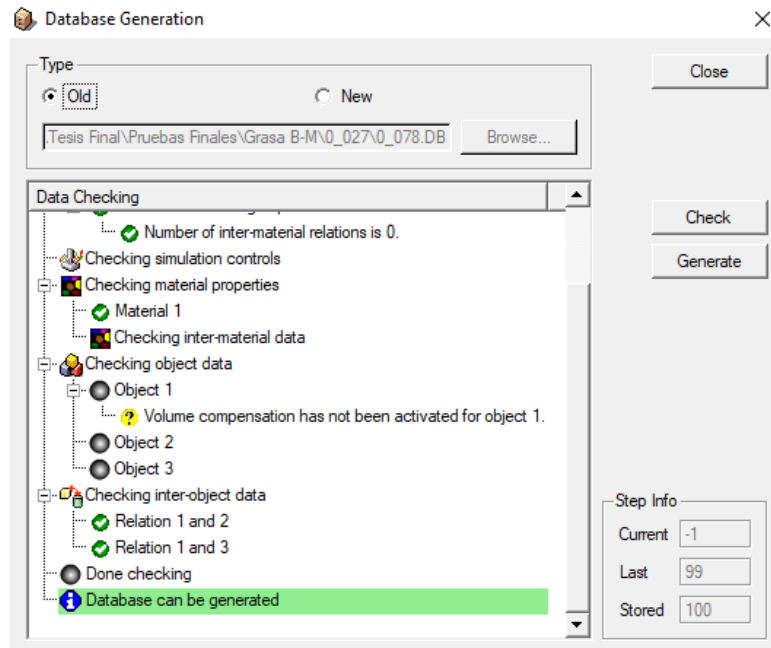


Figura 68 Generación de simulación

5.4.Resultados de Simulación

5.4.1. Simulación Sin Lubricante

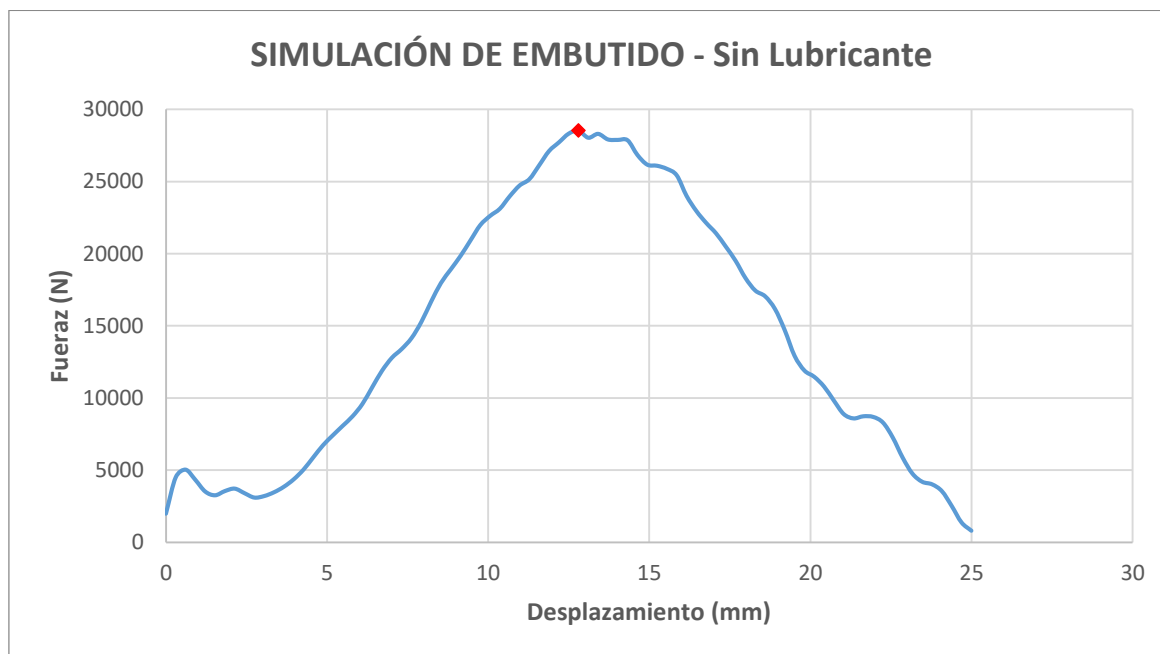


Figura 69 Gráfica Simulación de embutido Sin Lubricante

Tabla 31

Fuerza máxima. Simulación Sin Lubricante

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO	
Sin Lubricante	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
12,80	28535,26

5.4.2. Simulación Aceite de origen mineral

5.4.2.1. Fricción Punzón – Blanco –Matriz

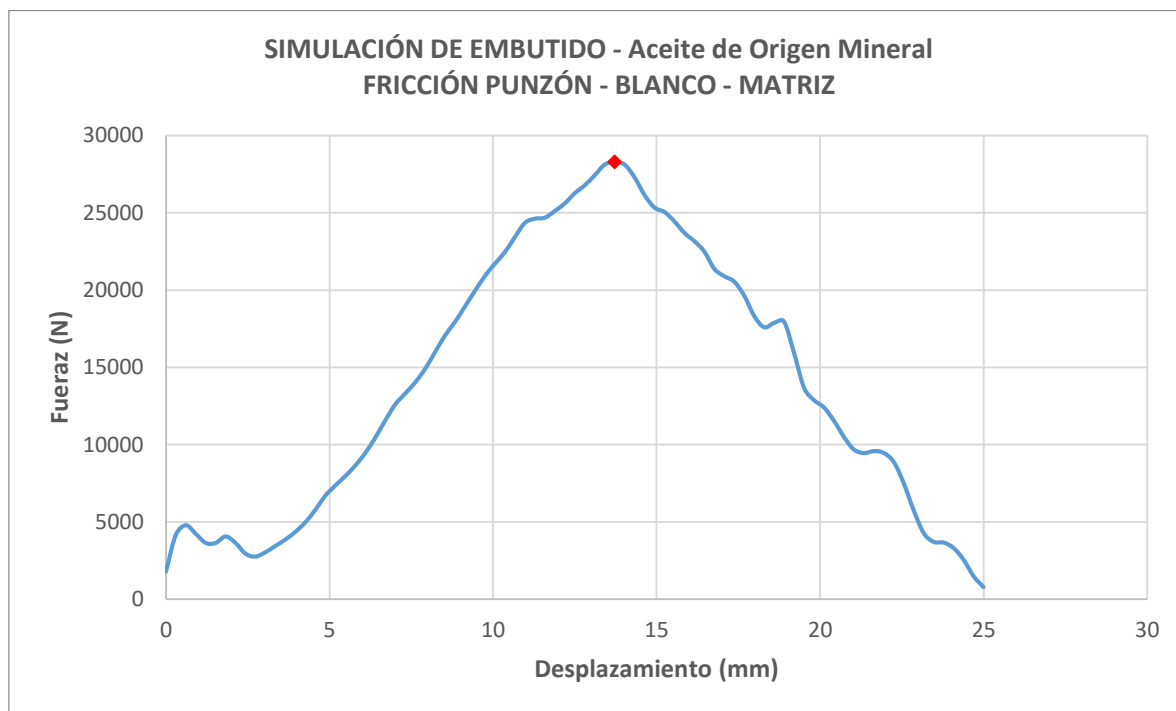


Figura 70 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción P-B-M

Tabla 32

Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen mineral P-B-M

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO	
Aceite mineral	
P-B-M	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,71	28280,80

5.4.2.2.Fricción Punzón – Blanco

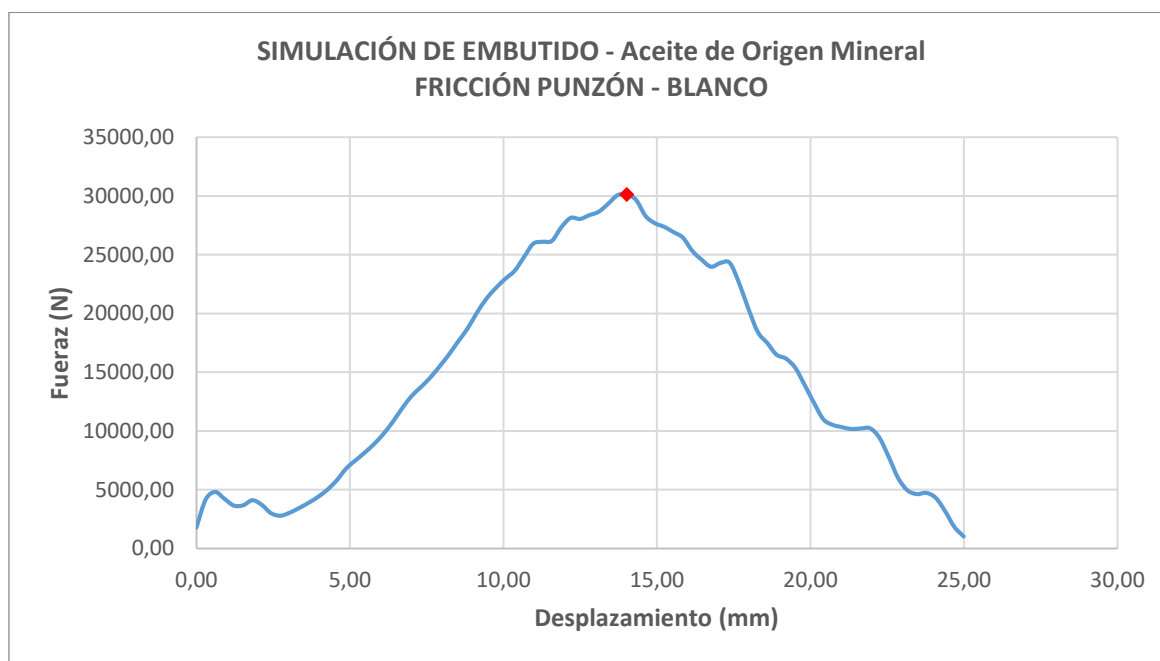


Figura 71 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción P-B

Tabla 33

Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen mineral P-B

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Aceite mineral P-B	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
14,02	30127,04

5.4.2.3. Fricción Blanco – Matriz

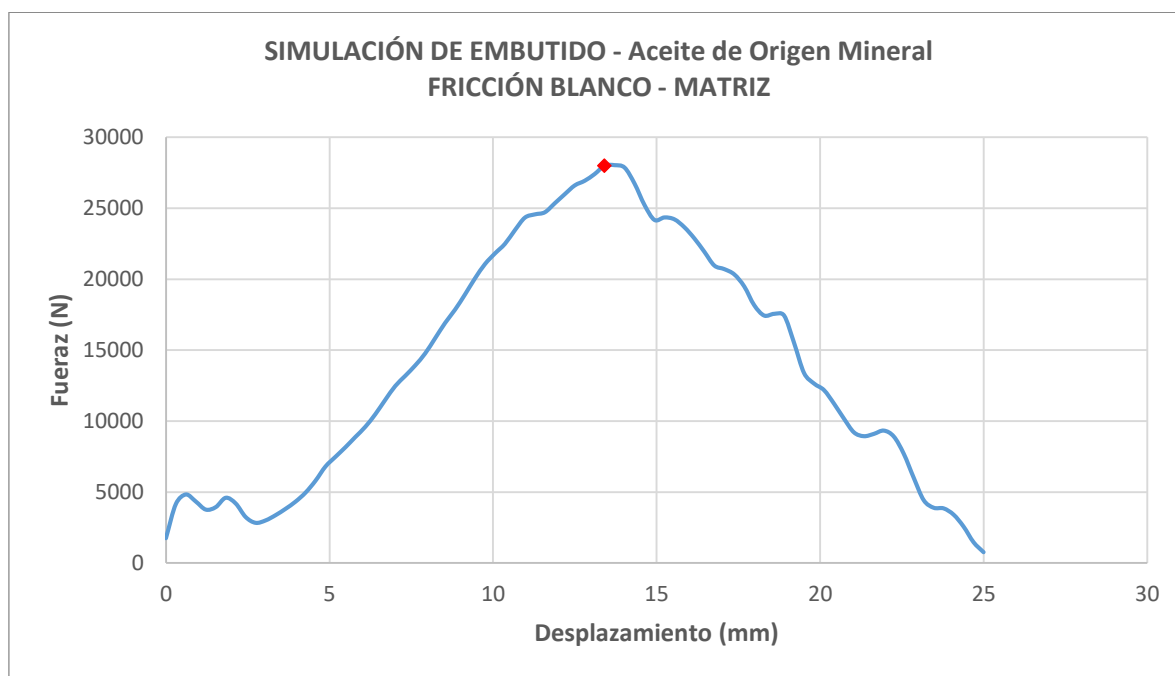


Figura 72 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen mineral - Fricción B-M

Tabla 34

Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen mineral B-M

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Aceite mineral B-M	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,71	28024,74

5.4.3. Simulación Aceite de origen vegetal

5.4.3.1. Fricción Punzón – Blanco – Matriz

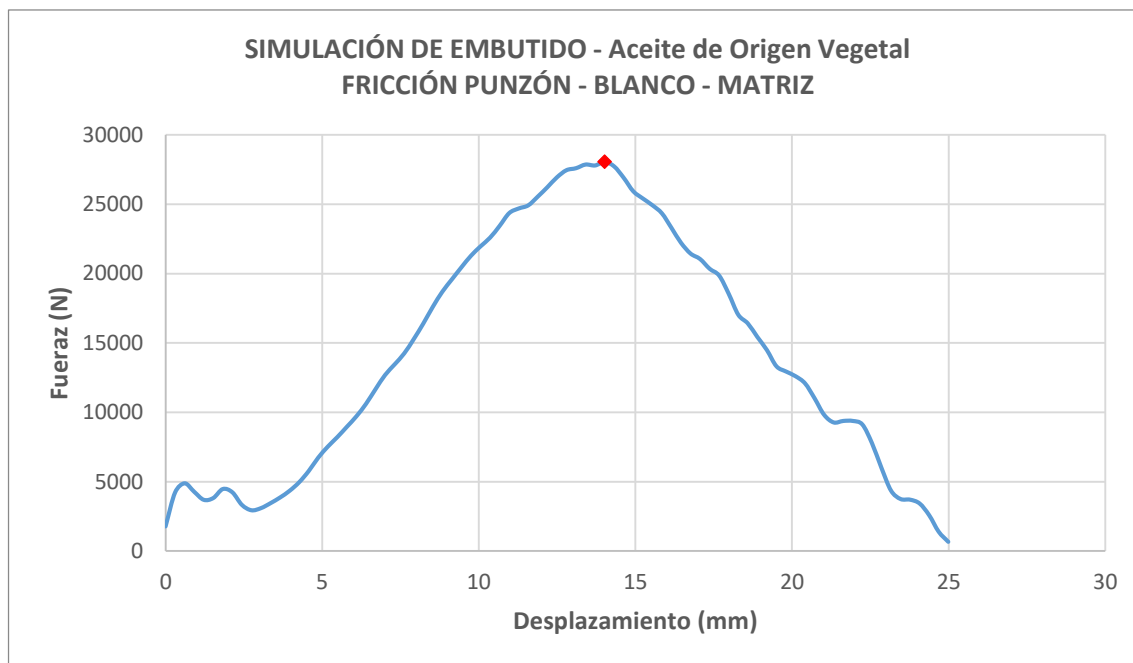


Figura 73 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B-M

Tabla 35

Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen vegetal P-B-M

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Aceite vegetal P-B-M	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
14,02	28044,04

5.4.3.2.Fricción Punzón – Blanco

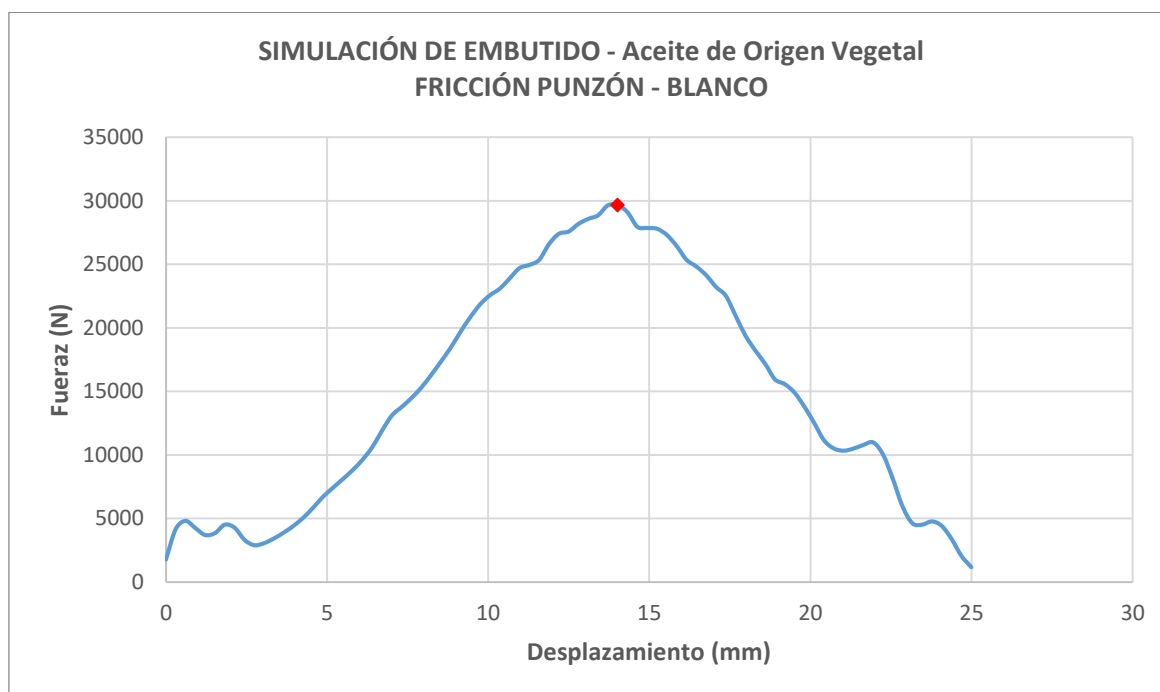


Figura 74 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción P-B

Tabla 36

Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen vegetal P-B

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Aceite vegetal P-B	
Distancia (mm)	Fuerza (N)
14,02	29658,44

5.4.3.3.Fricción Blanco – Matriz

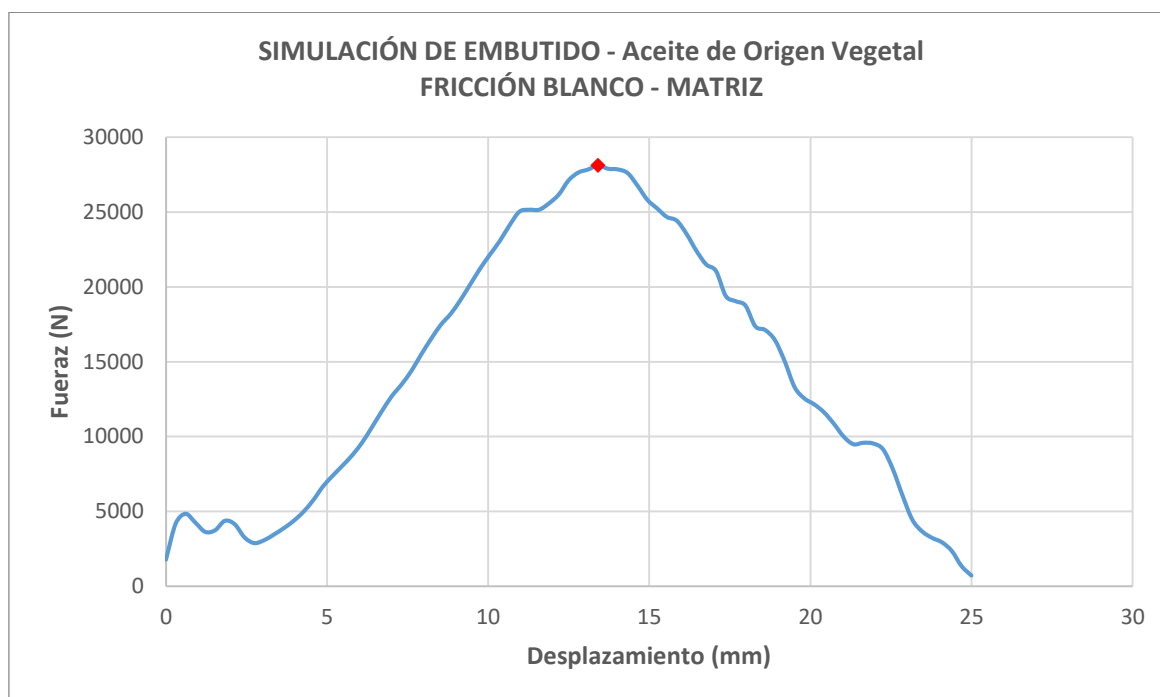


Figura 75 Gráfica Simulación de embutido - Aceite de origen vegetal - Fricción B-M

Tabla 37

Fuerza máxima. Simulación Aceite de origen vegetal B-M

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Aceite vegetal B-M	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,41	28118,84

5.4.4. Simulación Grasa lubricante multipropósito

5.4.4.1. Fricción Punzón – Blanco – Matriz

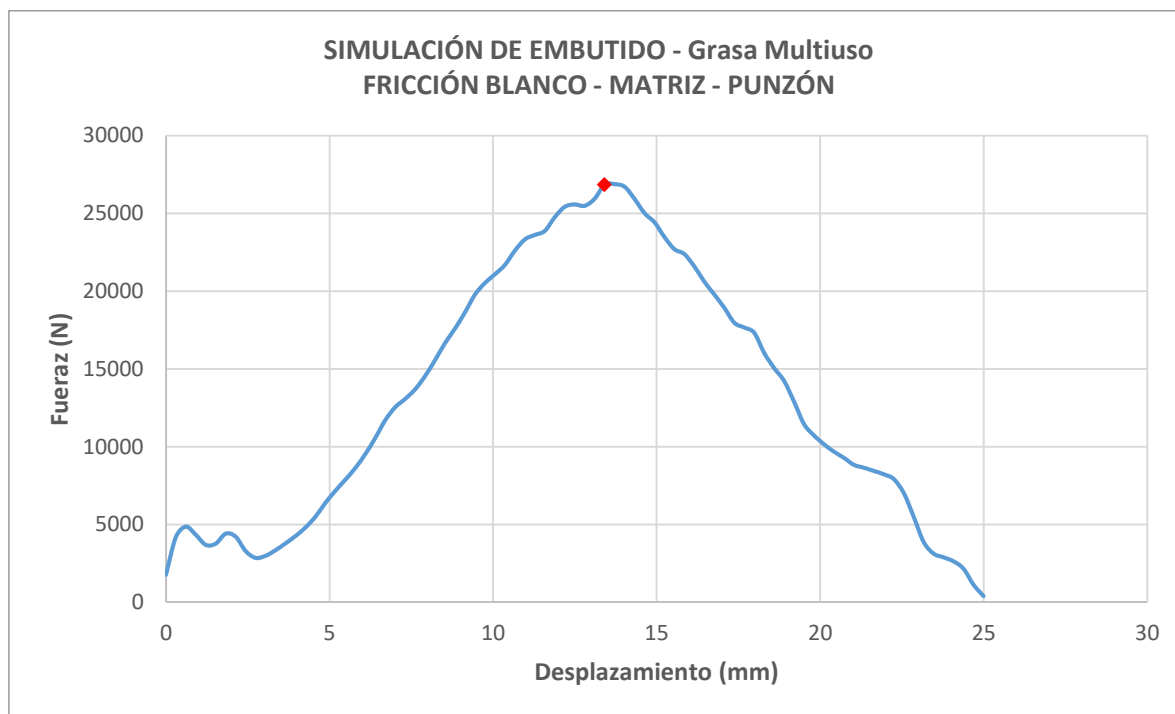


Figura 76 Gráfica Simulación de embutido – Grasa multiuso - Fricción P-B-M

Tabla 38

Fuerza máxima. Simulación Grasa multipropósito P-B-M

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Grasa multiuso P-B-M	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
13,71	26873,17

5.4.4.2.Fricción Punzón – Blanco

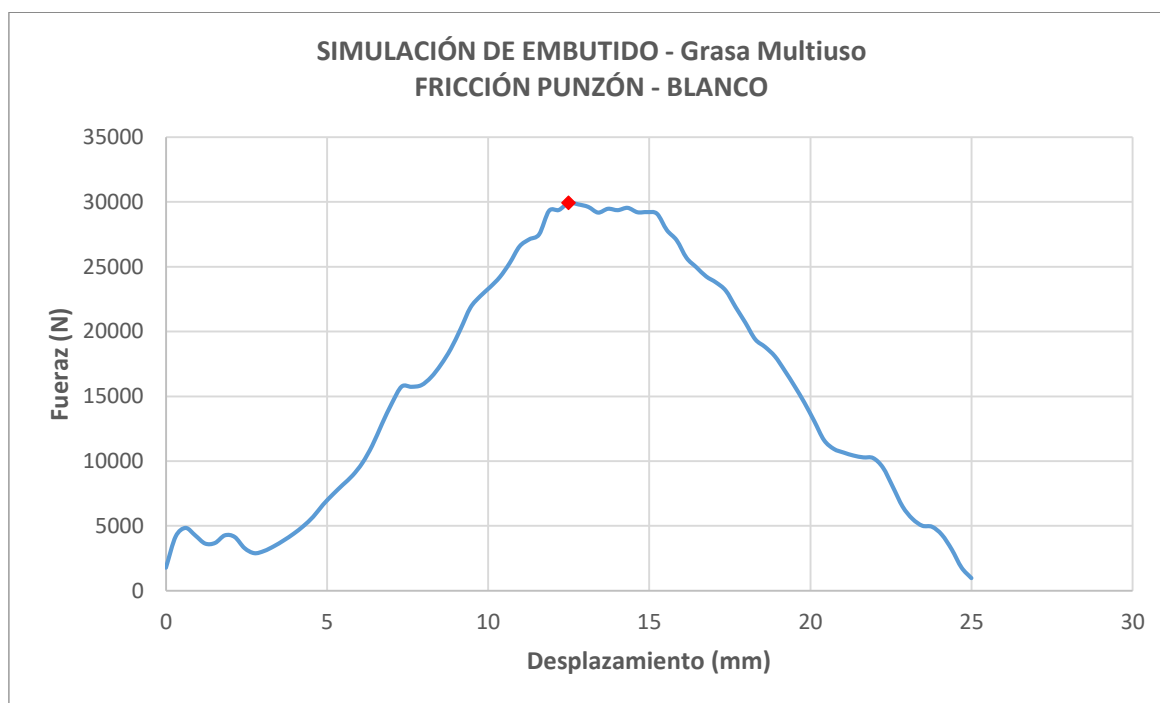


Figura 77 Gráfica Simulación de embutido – Grasa Multiuso - Fricción P-B

Tabla 39

Fuerza máxima. Simulación Grasa multipropósito P-B

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Grasa multiuso P-B	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
12,49	29933,47

5.4.4.3.Fricción Blanco – Matriz

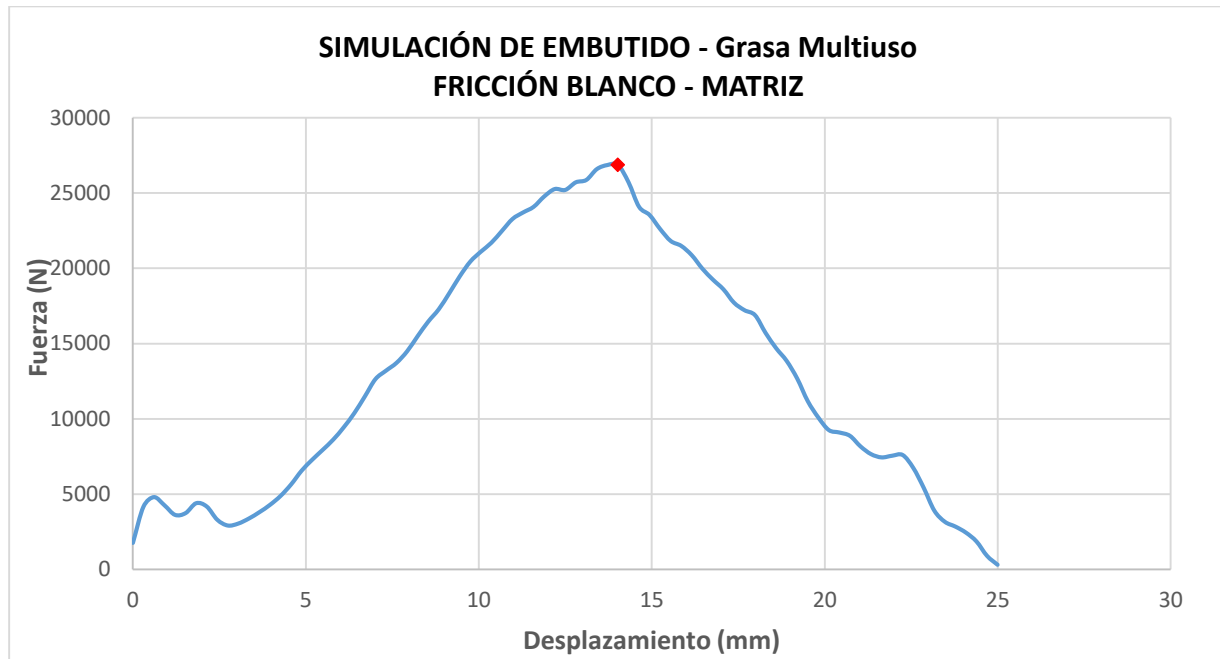


Figura 78 Gráfica Simulación de embutido – Grasa Multiuso - Fricción B-M

Tabla 40

Fuerza máxima. Simulación Grasa multipropósito B-M

SIMULACIÓN DE EMBUTIDO Grasa multiuso B-M	
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>
14,02	26860,77

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Análisis de resultados del ensayo

La Tabla 41 indica los valores de fuerza máxima y distancia de cada uno de los ensayos con diferente lubricante, de la cual se observa que la combinación Punzón – Blanco posee los valores más altos de fuerza comparados con las demás combinaciones, incluyendo el ensayo sin uso de lubricante, por lo que se determina que el uso de lubricante en esta combinación no es una práctica adecuada dentro del proceso de embutido, corroborando lo dicho en (Schey, 2000) que indica que es necesaria la fricción en el punzón y la copa, un punzón rugoso o una pieza lubricada sobre el área de la matriz, proporciona una fuerza óptima de embutido.

Tabla 41

Fuerza máxima y distancia. Ensayos de embutido

COMBINACIÓN	SIN LUBRICANTE f=0.10 – 0.50		ACEITE DE ORIGEN VEGETAL f=0.07 – 0.08		ACEITE DE ORIGEN MINERAL f=0.06 – 0.07		GRASA MULTIPROPÓSITO f=0.025 – 0.030	
	<i>Fuerza</i>	<i>Distancia</i>	<i>Fuerza</i>	<i>Distancia</i>	<i>Fuerza</i>	<i>Distancia</i>	<i>Fuerza</i>	<i>Distancia</i>
	P - B - M	28442	12,7	28368	13,72	28763	14,07	27519
P - B	-	-	30987	13,08	30136	14	29978	13,2
B - M	-	-	28546	14,29	28194	13,63	27977	14,23

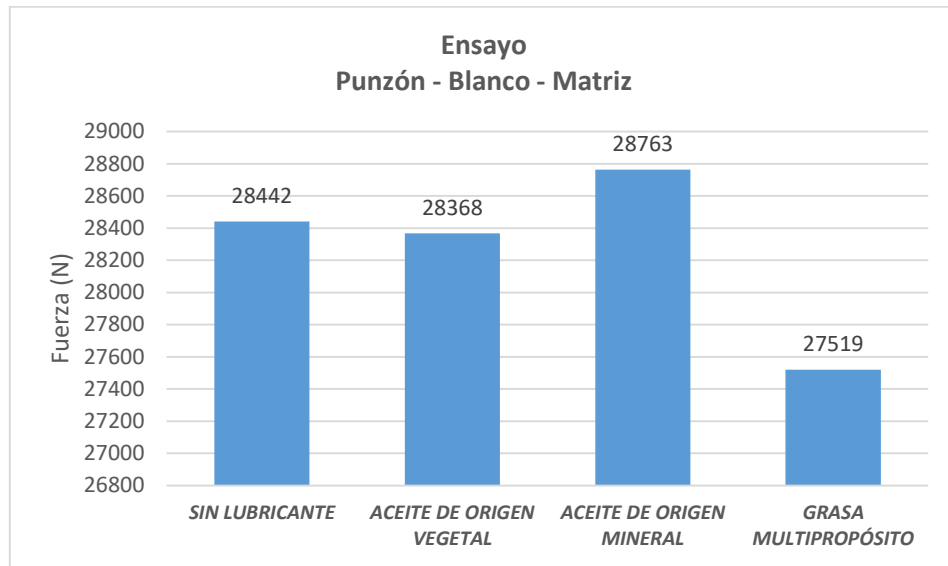


Figura 79 Gráfica Comparativa Ensayos Combinación P-B-M

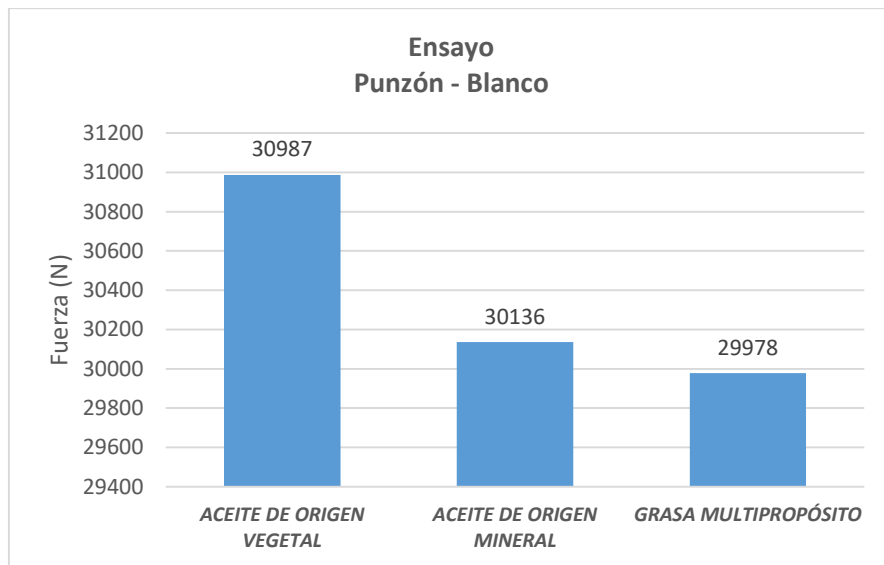


Figura 80 Gráfica Comparativa Ensayos Combinación P-B

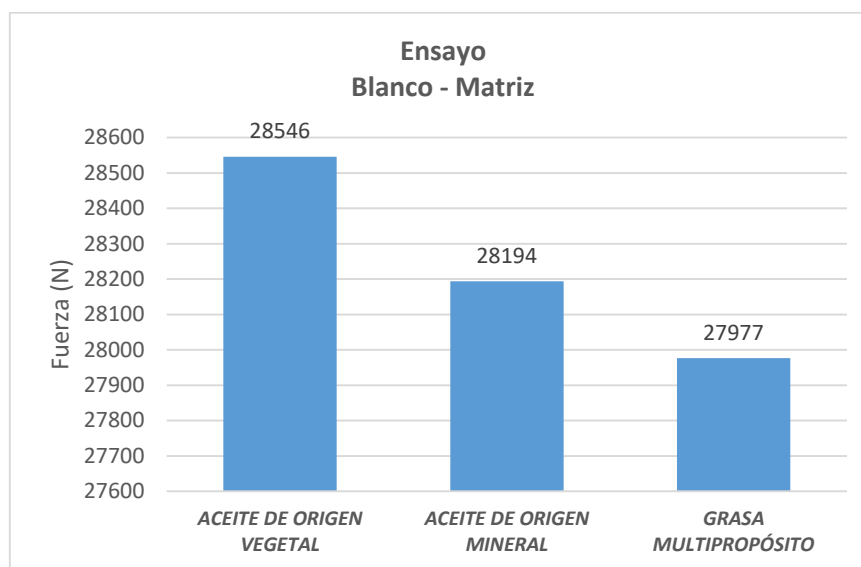


Figura 81 Gráfica Comparativa Ensayos Combinación B-M

En la combinación Blanco – Matriz se puede evidenciar la influencia del lubricante dentro del proceso (Figura 81), ya que a medida que disminuye el coeficiente de fricción, la fuerza máxima de embutido también disminuye; esta tendencia no se evidencia en la combinación Punzón – Blanco – Matriz (Figura 79), lo cual nos indica que no se puede garantizar el comportamiento de cualquier tipo de lubricante dentro de esta última combinación, a pesar que en ésta se encuentra el valor de menor fuerza con el uso de grasa multipropósito como lubricante, no se lo considera dentro del análisis debido al comportamiento explicado anteriormente; por lo cual se toma como valor de mínima fuerza a la combinación Blanco – Matriz con grasa multipropósito como lubricante.

En la figura 82 se observa el arrugamiento de la pared de la copa, lo cual sucede al utilizar lubricante entre el punzón y el blanco, mientras que en la figura 83 se observa una copa sin defectos utilizando lubricante entre el blanco y la matriz.



Figura 82 Copa embutida Lubricación Punzón – Blanco. De izq a der: Lubricante aceite vegetal, Lubricante aceite mineral, grasa multipropósito.



Figura 83 Copa embutida Lubricación Blanco – Matriz: Lubricante Grasa multipropósito.

6.2. Análisis de resultados de simulación

Los valores presentados en la Tabla 54, representan las fuerzas máximas dentro de la simulación en cada una de las combinaciones, se puede observar que al igual que en la Tabla 42, la combinación Punzón – Blanco, posee los valores más altos de fuerza, siendo mayor a la fuerza sin lubricante, por lo que se corrobora lo dicho en el análisis de los resultados de los ensayos.

Tabla 42

Fuerza máxima. Simulación de proceso de embutido

COMBINACIÓN	SIN LUBRICANTE		ACEITE DE ORIGEN VEGETAL		ACEITE DE ORIGEN MINERAL		GRASA MULTIPROPÓSITO	
	f=0.12		f=0.078		f=0.062		f=0.027	
	Fuerza	Distancia	Fuerza	Distancia	Fuerza	Distancia	Fuerza	Distancia
P - B - M	28535,3	12,8	28044,1	14,02	28280,8	13,71	26873,2	13,72
P - B	-	-	29658,5	14,02	30127	14,02	29934	12,49
B - M	-	-	28118,8	13,41	28024,7	13,71	26860,8	14,02

Así mismo, se puede evidenciar que al igual que los ensayos, en la combinación Blanco – Matriz, a medida que disminuye el coeficiente de fricción, la fuerza de embutido también disminuye; además se constata que el valor mínimo de fuerza corresponde a la simulación con grasa multipropósito como lubricante.

En las figuras 84, 85 y 86 se observa el resultado de la simulación con el uso de los diferentes lubricantes en la combinación óptima Blanco – Matriz.

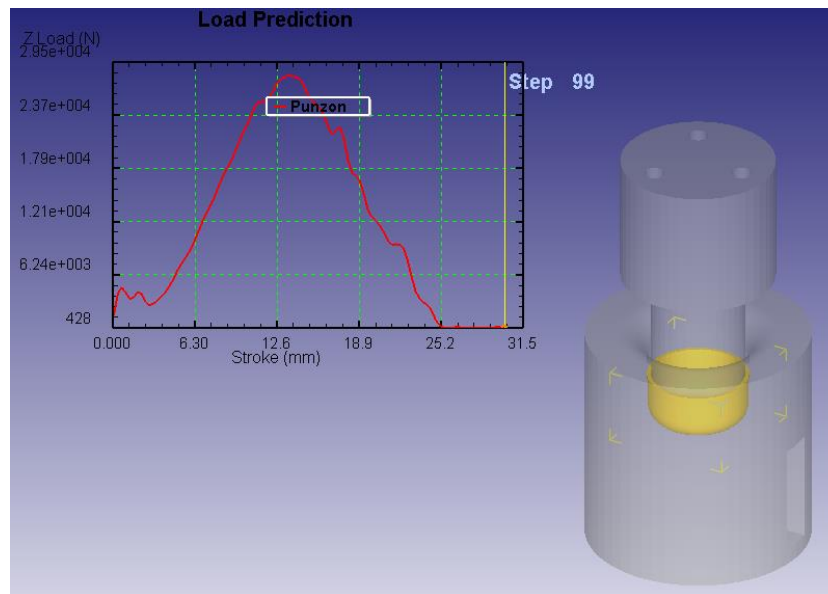


Figura 84 Simulación de embutido. Lubricante de origen vegetal. Blanco – Matriz

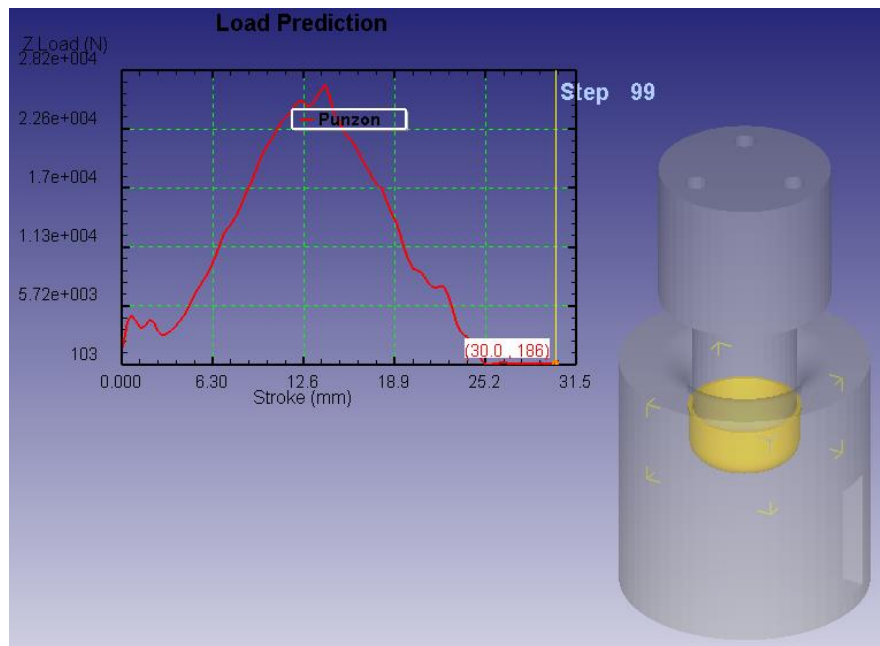


Figura 85 Simulación de embutido. Lubricante grasa multipropósito. Blanco – Matriz

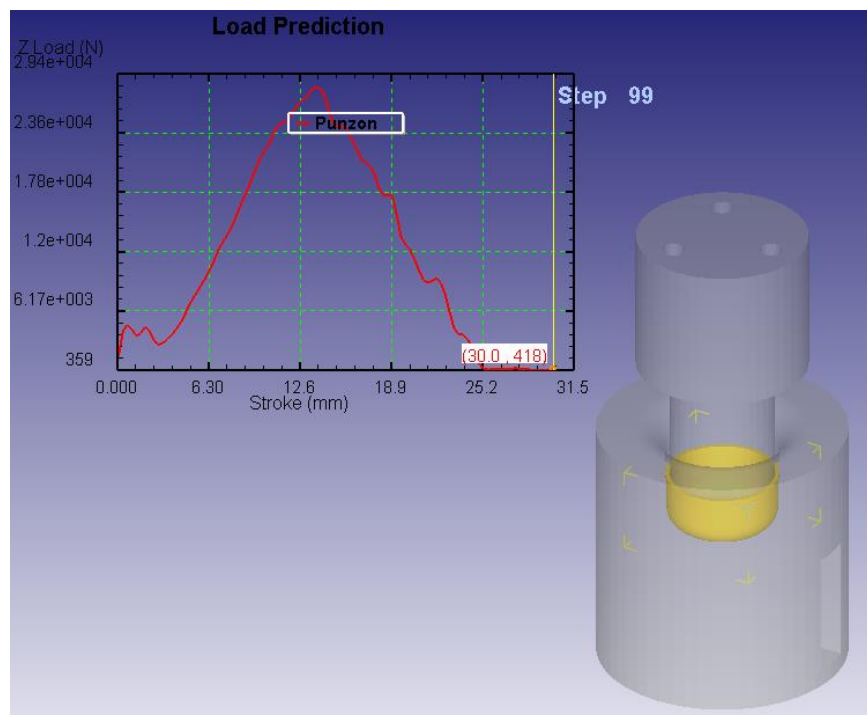


Figura 86 Simulación de embutido. Lubricante aceite de origen mineral. Blanco – Matriz

Los valores de fuerza máxima obtenidos en los ensayos y simulaciones no se asemejan al valor de fuerza máxima obtenida a partir de la fórmula matemática (27), la cual tiene un valor de 4456kgf (30) que equivale a 43668N, esto se debe a que la fórmula mencionada toma en cuenta la fuerza necesaria para el proceso de embutición con pisador, es por ello que el valor de fuerza calculada es mayor que la obtenida en los ensayos.

Se realizó una corrección de la fórmula (27), la cual involucrará valores de coeficiente de fricción para así obtener resultados más aproximados a la realidad de los ensayos y simulaciones.

Tabla 43

Fuerza máxima. Simulación de proceso de embutido

Lubricante	μ	Fuerza Máxima (N)	Fuerza máxima (kgf)	Coefficiente de corrección
Aceite vegetal	0,078	28546	2913	0,654
Aceite mineral	0,062	28194	2877	0,646
Grasa multiuso	0,027	27977	2855	0,641

En la tabla 43, se visualiza el coeficiente de fricción de cada uno de los lubricantes utilizados, y sus respectivos valores de fuerza máxima de los ensayos. El coeficiente de corrección se calculó a partir de la división entre la fuerza máxima de ensayo en kgf y el resultado obtenido a partir de la fórmula matemática (30).

En la figura 87 se observa la ecuación de la recta que aproxima a los puntos de la gráfica Coeficiente de fricción vs Coeficiente de corrección, la cual se utilizará como factor para la corrección de la fórmula matemática original de la siguiente manera:

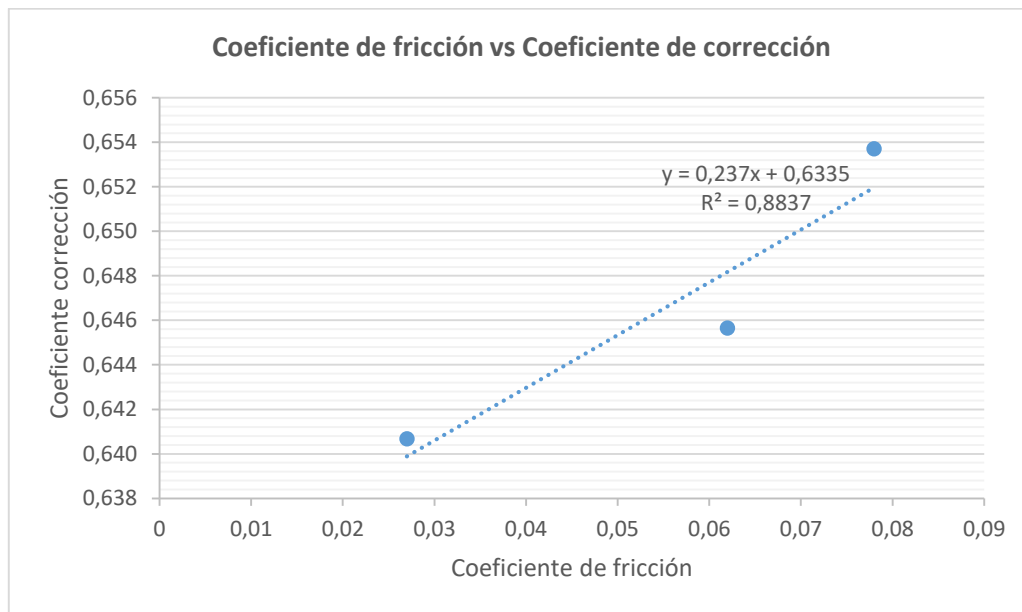


Figura 87 Simulación de embutido. Lubricante aceite de origen mineral. Blanco – Matriz

Ecuación de corrección:

$$C = 0,237 \cdot \mu + 0,6335 \quad (58)$$

Ecuación corregida:

$$F = \pi D_p t (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \cdot C \quad (59)$$

6.3. Comparación de los resultados de ensayo y simulación

Para la comparación de resultados obtenidos tanto en los ensayos como en la simulación, se obtuvo un promedio de los tres ensayos de cada lubricante con su respectiva combinación, para esto se utilizó un método numérico denominado Splin cúbico, el cual se lo utiliza para aproximar formas complicadas a partir de la interpolación entre polinomios de grado 3. Utilizando dicho

método se obtuvieron los valores de fuerza por cada milímetro de desplazamiento; a continuación, se indica el programa utilizado en el Software Matlab.

```
function spline_3(X,Y)

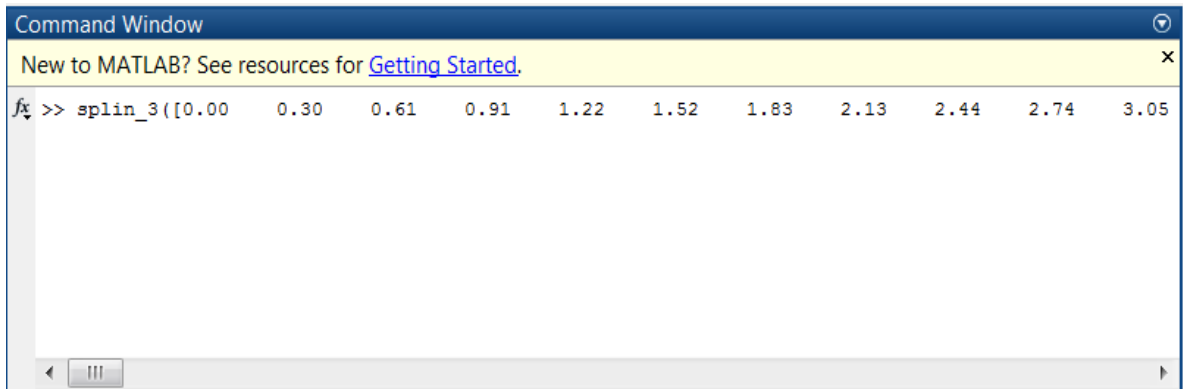
cont=1;
pp=spline(X,Y);
while cont<=30
    z(cont)=ppval(cont,pp);
    cont=cont+1;
end
z
```

Para obtener un resultado comparable entre ensayo - simulación se realizó una interpolación mediante un método numérico, el cual nos retorna un vector de números pertenecientes a la fuerza por cada milímetro de desplazamiento del punzón [1,2, 3, ...], a continuación, se presenta un ejemplo de cálculo para la combinación Blanco - Matriz con grasa multipropósito como lubricante.

1. Ingresar los valores de desplazamiento y fuerza en forma de vector dentro de la ventana de comando.

```
splin3([0.00 0.30 0.61 0.91 1.22 1.52 1.83 2.13 2.44 2.74
3.05 3.35 3.66 3.96 4.27 4.57 4.88 5.18 5.49 5.79
6.10 6.40 6.71 7.01 7.32 7.62 7.92 8.23 8.53 8.84
9.14 9.45 9.75 10.06 10.36 10.67 10.97 11.28 11.58 11.89
12.19 12.50 12.80 13.11 13.41 13.72 14.02 14.33 14.63 14.94
15.24 15.54 15.85 16.15 16.46 16.76 17.07 17.37 17.68 17.98
18.29 18.59 18.90 19.20 19.51 19.81 20.12 20.42 20.73 21.03
21.34 21.64 21.95 22.25 22.56 22.86 23.16 23.47 23.77 24.08
24.38 24.69 24.99 25.30 25.60 25.91 26.21 26.52 26.82 27.13
27.43 27.74 28.04 28.35 28.65 28.96 29.26 29.57 29.87
30.00], [1760.20 2160.08 3799.75 2252.12 2620.70 2739.24 2994.23 2976.31 2298.50
3013.21 3044.66 3377.90 3800.49 4284.32 4877.26 5640.61 6553.70 7280.04 7938.15
8619.65 9440.52 10380.53 11489.27 12634.68 13195.82
13715.88 14477.74 15485.08 16450.88 17270.90
18338.20 19464.98 20442.85 21099.99 21696.30
22481.16 23272.32 23702.49 24077.16 24761.85
25258.17 25199.88 24704.62 24864.09 25585.46
26253.80 26860.78 25712.18 24080.58 23533.85
22603.92 21812.27 21484.05 20865.57 19976.80
19246.27 18600.78 17716.60 17213.00 16882.67
15704.74 14691.64 13843.50 12670.58 11174.54
10088.07 9252.82 9091.06 8869.76 8168.63 7654.78 7438.29 7547.44 7596.33
6745.57 5413.38 3904.00 3161.45 2843.53 2441.69 1856.24 898.66 307.64 102.95
150.87 233.33 298.35 280.02 250.26 228.56 212.64 197.72 195.00 220.21
252.87 269.67 253.20 235.00 207.05 185.55])
```

Figura 88 Datos ingresados en forma de vector



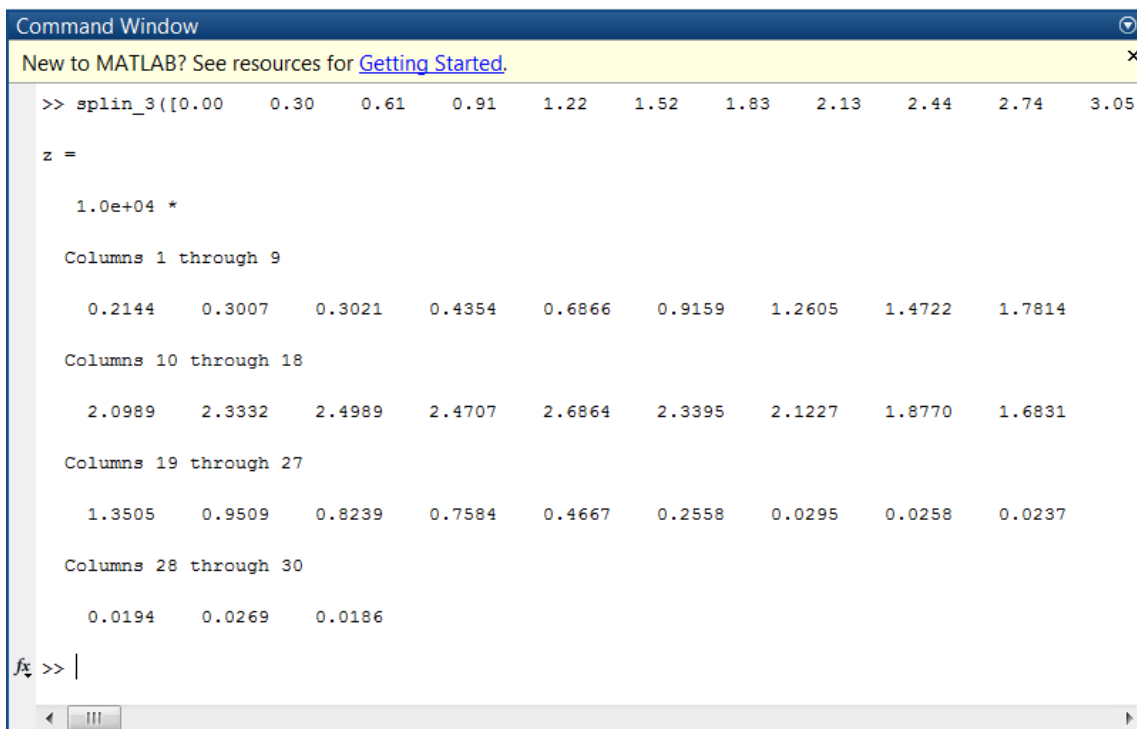
```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
fx >> splin_3([0.00  0.30  0.61  0.91  1.22  1.52  1.83  2.13  2.44  2.74  3.05

```

Figura 89 Ingreso de datos de desplazamiento y fuerza en la ventana de comando - Matlab

2. Correr el programa y copiar los resultados obtenidos a un bloc de notas, para su procesamiento.



```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> splin_3([0.00  0.30  0.61  0.91  1.22  1.52  1.83  2.13  2.44  2.74  3.05
z =
1.0e+04 *
Columns 1 through 9
0.2144    0.3007    0.3021    0.4354    0.6866    0.9159    1.2605    1.4722    1.7814
Columns 10 through 18
2.0989    2.3332    2.4989    2.4707    2.6864    2.3395    2.1227    1.8770    1.6831
Columns 19 through 27
1.3505    0.9509    0.8239    0.7584    0.4667    0.2558    0.0295    0.0258    0.0237
Columns 28 through 30
0.0194    0.0269    0.0186
fx >> |

```

Figura 90 Resultados del programa MatLab

3. Copiar los resultados obtenidos mediante el programa en una tabla de Excel para su posterior análisis con los resultados del ensayo

A continuación, se presentan las tablas de resultados con su respectiva gráfica, en la cual se indica el promedio de fuerza de los tres ensayos y la fuerza obtenida en la simulación por cada milímetro de desplazamiento.

Tabla 44

Comparación Resultados Sin Lubricante Fricción Punzón – Blanco – Matriz

COMPARACIÓN RESULTADOS SIN LUBRICANTE				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	%
1,00	1309,33	1,00	1215,00	7,20
2,00	2176,00	2,00	2148,00	1,29
3,00	3316,67	3,00	3176,00	4,24
4,00	4902,33	4,00	4439,00	9,45
5,00	7239,00	5,00	7028,00	2,91
6,00	9905,00	6,00	9285,00	6,26
7,00	13543,00	7,00	12763,00	5,76
8,00	16297,33	8,00	15606,00	4,24
9,00	20282,00	9,00	19401,00	4,34
10,00	22802,00	10,00	22531,00	1,19
11,00	25451,33	11,00	24771,00	2,67
12,00	27516,33	12,00	27367,00	0,54
13,00	28366,00	13,00	28169,00	0,69
14,00	27505,33	14,00	27878,00	1,35
15,00	25961,33	15,00	26137,00	0,68
16,00	24693,33	16,00	24789,00	0,39
17,00	22447,67	17,00	21596,00	3,79
18,00	18783,33	18,00	18257,00	2,80
19,00	16405,67	19,00	15750,00	4,00
20,00	12820,67	20,00	11633,00	9,26
21,00	9747,67	21,00	8968,00	8,00
22,00	8015,67	22,00	8658,00	8,01
23,00	5520,67	23,00	5307,00	3,87
24,00	3612,00	24,00	3727,00	3,18

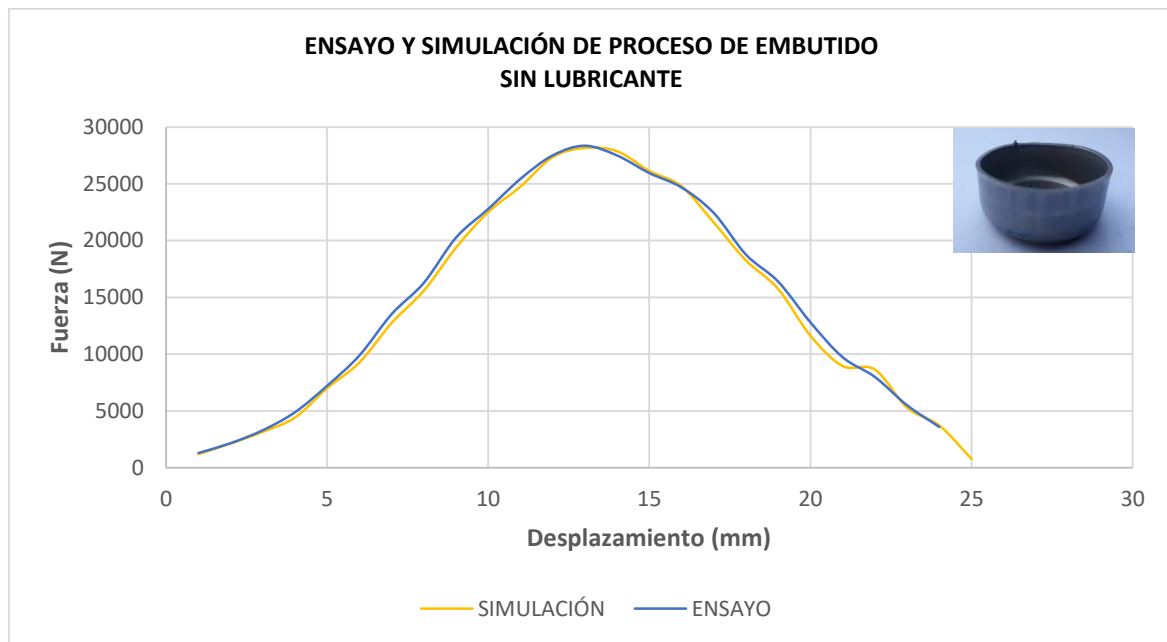


Figura 91 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Sin Lubricante

Tabla 45

Comparación Resultados Aceite de origen vegetal Fricción P-B-M

COMPARACIÓN RESULTADOS ACEITE DE ORIGEN VEGETAL FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO - MATRIZ				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	637,00	1,00	675,00	9,70
2,00	2273,33	2,00	2476,00	8,87
3,00	3319,00	3,00	3056,00	6,57
4,00	4914,33	4,00	4424,00	0,98
5,00	6619,67	5,00	7084,00	5,34
6,00	8834,67	6,00	9470,00	6,84
7,00	11721,00	7,00	12668,00	1,43
8,00	14586,67	8,00	15561,00	1,19
9,00	17918,67	9,00	19185,00	4,50
10,00	19903,00	10,00	21848,00	5,18
11,00	22519,67	11,00	24422,00	4,30
12,00	25306,33	12,00	25801,00	0,63
13,00	27317,67	13,00	27546,00	1,00
14,00	28217,00	14,00	28036,00	0,43
15,00	27440,33	15,00	25803,00	2,76

CONTINÚA



16,00	25361,67	16,00	23856,00	1,96
17,00	23023,67	17,00	21858,00	1,63
18,00	20389,00	18,00	18413,00	6,02
19,00	16798,67	19,00	15133,00	7,09
20,00	14156,33	20,00	12758,00	7,44
21,00	11022,33	21,00	9921,00	4,23
22,00	8846,67	22,00	9379,00	5,18
23,00	5632,00	23,00	5158,00	0,15
24,00	3871,00	24,00	3559,00	2,47

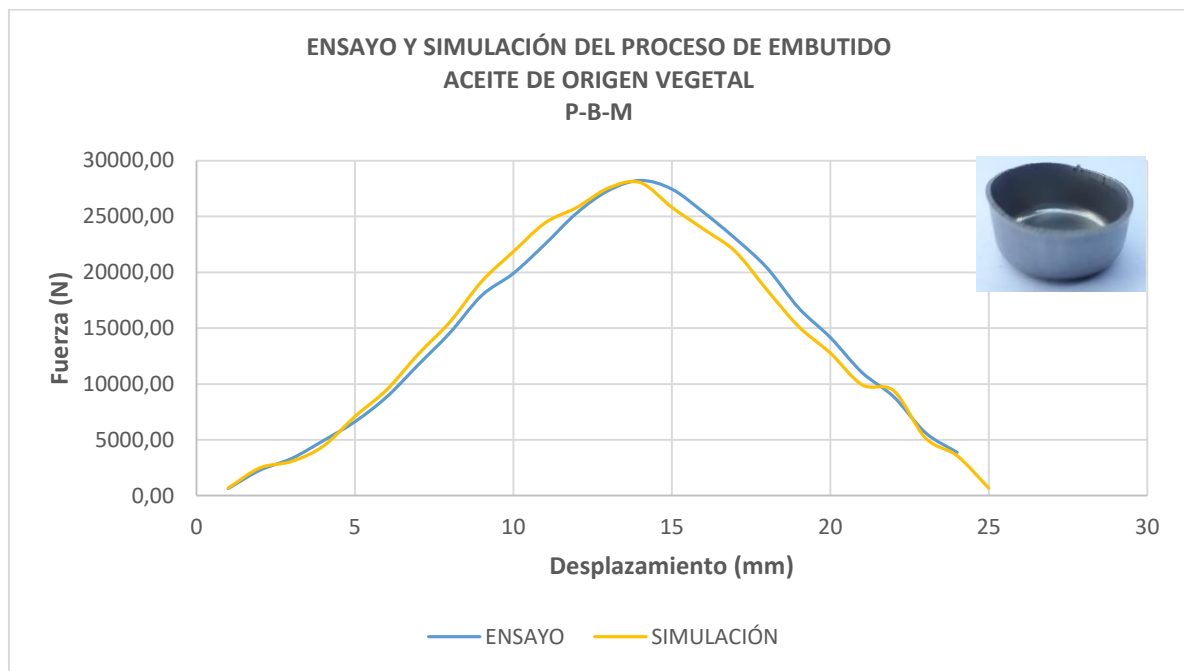


Figura 92 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen vegetal P-B-M

Tabla 46*Comparación Resultados Aceite de origen vegetal Fricción P-B*

COMPARACIÓN RESULTADOS ACEITE DE ORIGEN VEGETAL FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	608,00	1,00	650,00	6,91
2,00	1754,00	2,00	1816,00	3,53
3,00	3355,33	3,00	3137,00	6,51
4,00	5212,67	4,00	4703,00	9,78
5,00	7754,67	5,00	7010,00	9,60
6,00	10238,00	6,00	9371,00	8,47
7,00	13499,00	7,00	12804,00	5,15
8,00	16940,33	8,00	15688,00	7,39
9,00	20069,33	9,00	19252,00	4,07
10,00	23187,67	10,00	22304,00	3,81
11,00	26055,33	11,00	25634,00	1,62
12,00	28514,33	12,00	27710,00	2,82
13,00	30218,67	13,00	30378,00	0,53
14,00	30615,00	14,00	31736,00	3,66
15,00	29017,00	15,00	29477,00	1,59
16,00	25708,67	16,00	27847,00	8,32
17,00	22147,00	17,00	23380,00	5,57
18,00	19033,67	18,00	20736,00	8,94
19,00	16219,33	19,00	16856,00	3,93
20,00	13538,67	20,00	14469,00	6,87
21,00	11561,67	21,00	11846,00	2,46
22,00	9992,33	22,00	10737,00	7,45
23,00	7365,67	23,00	7903,00	7,30
24,00	4386,67	24,00	4586,00	4,80

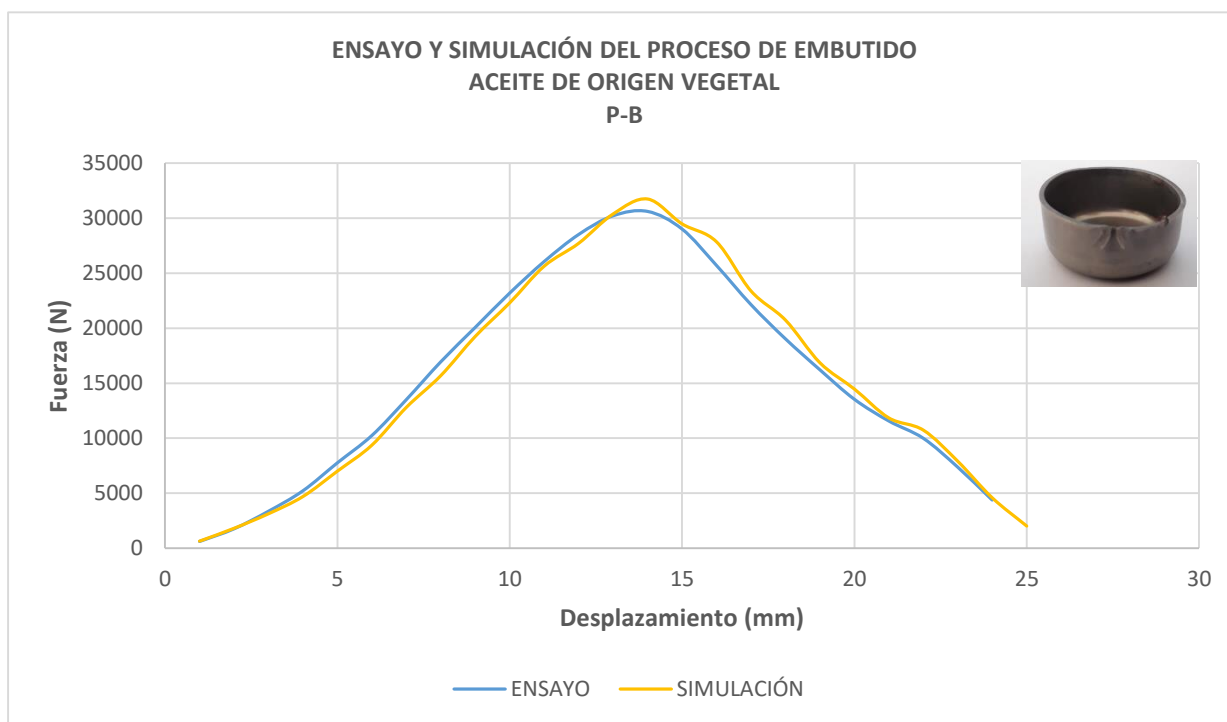


Figura 93 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen vegetal P-B

Tabla 47

Comparación Resultados Aceite de origen vegetal Fricción B-M

COMPARACIÓN RESULTADOS ACEITE DE ORIGEN VEGETAL FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	2241,33	1,00	2100,00	6,31
2,00	3101,33	2,00	3368,00	8,60
3,00	3765,00	3,00	3440,00	8,63
4,00	4652,67	4,00	4436,00	4,66
5,00	7665,00	5,00	6985,00	8,87
6,00	9652,00	6,00	9326,00	3,38
7,00	12391,00	7,00	12671,00	2,26
8,00	14813,00	8,00	15770,00	6,46
9,00	17515,00	9,00	18673,00	6,61
10,00	20061,67	10,00	21992,00	9,62

CONTINÚA



11,00	22843,00	11,00	25075,00	9,77
12,00	25101,33	12,00	25764,00	2,64
13,00	27187,33	13,00	27763,00	2,12
14,00	28432,00	14,00	27847,00	2,06
15,00	27801,00	15,00	25688,00	7,60
16,00	25700,00	16,00	24052,00	6,41
17,00	23115,33	17,00	21870,00	5,39
18,00	19943,33	18,00	18615,00	6,66
19,00	16657,33	19,00	16044,00	3,68
20,00	13447,00	20,00	12302,00	8,51
21,00	10847,00	21,00	10073,00	7,14
22,00	8705,67	22,00	9507,00	9,20
23,00	5196,67	23,00	5208,00	0,22
24,00	3179,00	24,00	3020,00	5,00

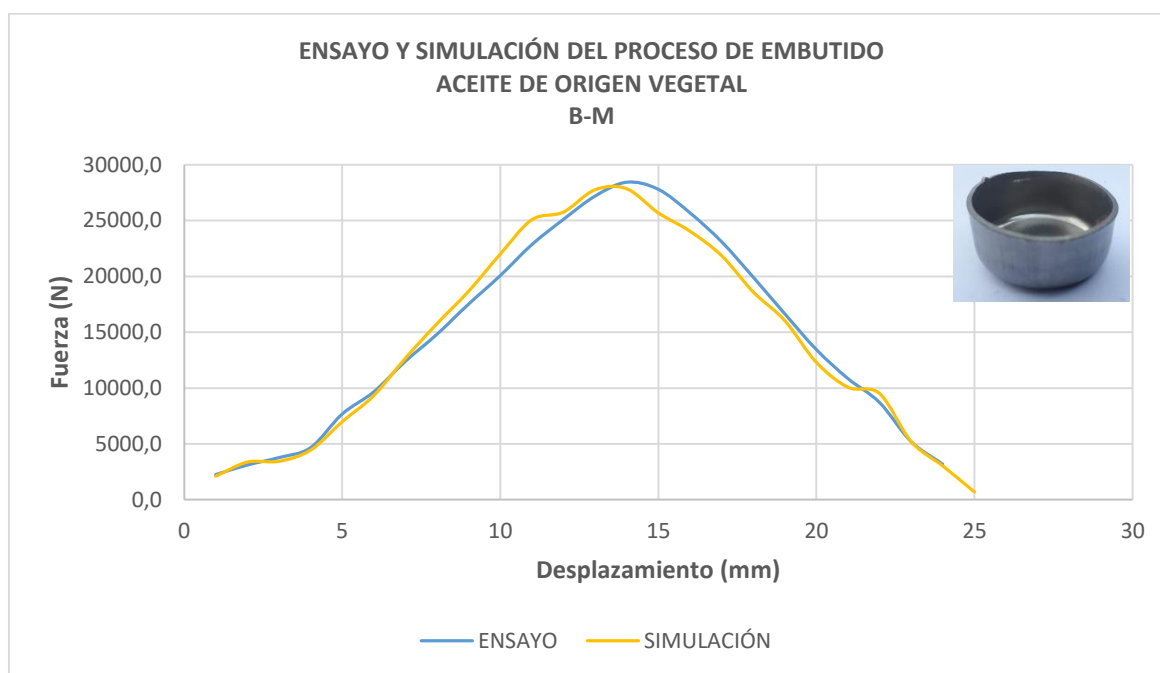


Figura 94 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen vegetal B-M

Tabla 48*Comparación Resultados Aceite de origen mineral Fricción P-B-M*

COMPARACIÓN RESULTADOS ACEITE DE ORIGEN MINERAL FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ - PUNZÓN				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	742,33	1,00	813,00	9,52
2,00	1815,33	2,00	1954,00	7,64
3,00	3287,33	3,00	2982,00	9,29
4,00	4336,00	4,00	4427,00	2,10
5,00	6557,00	5,00	6994,00	6,66
6,00	8900,00	6,00	9188,00	3,24
7,00	12400,67	7,00	12571,00	1,37
8,00	14623,67	8,00	15157,00	3,65
9,00	16969,67	9,00	18458,00	8,77
10,00	20233,67	10,00	21569,00	6,60
11,00	23045,67	11,00	24395,00	5,86
12,00	24404,67	12,00	25283,00	3,60
13,00	26690,33	13,00	27169,00	1,79
14,00	28519,67	14,00	28144,00	1,32
15,00	26745,67	15,00	25255,00	5,57
16,00	23557,33	16,00	23414,00	0,61
17,00	20996,67	17,00	20953,00	0,21
18,00	18901,00	18,00	18256,00	3,41
19,00	17458,67	19,00	17463,00	0,02
20,00	13895,33	20,00	12613,00	9,23
21,00	10707,33	21,00	9739,00	9,04
22,00	8674,67	22,00	9395,00	8,30
23,00	5578,67	23,00	5178,00	7,18
24,00	4560,00	24,00	4819,00	5,68

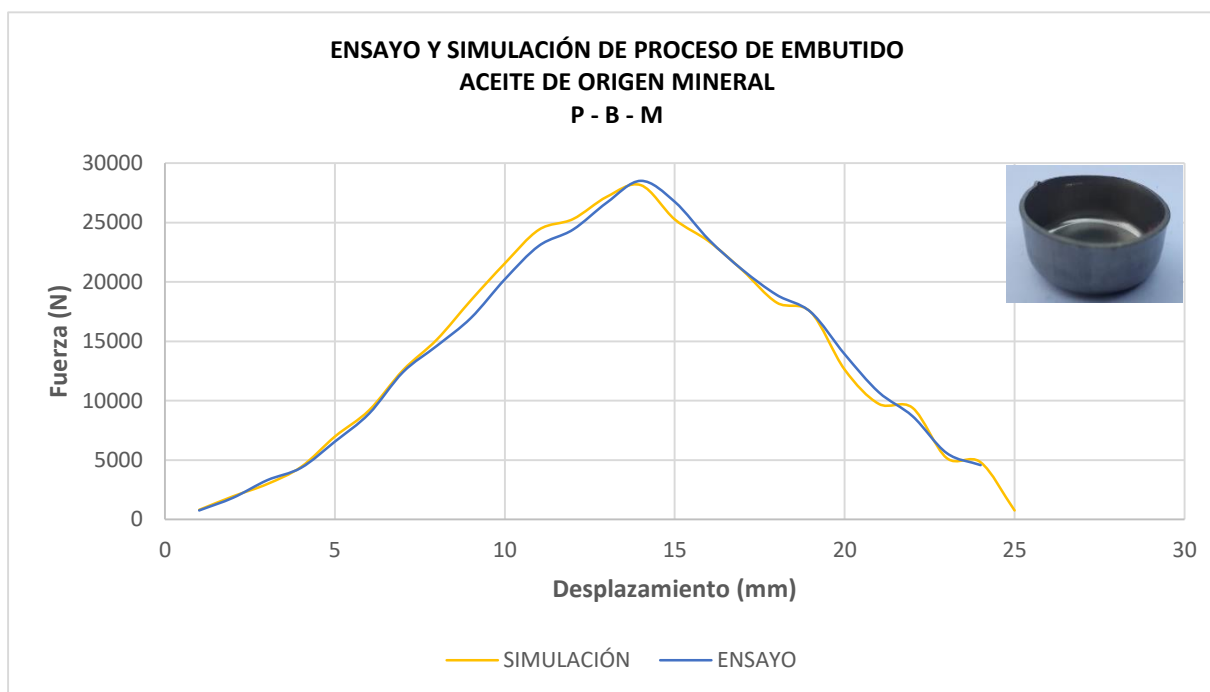


Figura 95 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen mineral P-B.M

Tabla 49

Comparación Resultados Aceite de origen mineral Fricción P-B

COMPARACIÓN RESULTADOS ACEITE DE ORIGEN MINERAL FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	854,67	1,00	828,00	3,12
2,00	2065,67	2,00	2142,00	3,70
3,00	3329,67	3,00	3002,00	9,84
4,00	4950,00	4,00	4466,00	9,78
5,00	7271,00	5,00	7107,00	2,26
6,00	9625,67	6,00	9465,00	1,67
7,00	12662,67	7,00	12944,00	2,22
8,00	15562,67	8,00	15758,00	1,26
9,00	18716,67	9,00	19448,00	3,91
10,00	22068,67	10,00	22809,00	3,35

CONTINÚA



11,00	25212,00	11,00	25999,00	3,12
12,00	27412,33	12,00	27739,00	1,19
13,00	29257,00	13,00	28537,00	2,46
14,00	30167,00	14,00	30135,00	0,11
15,00	28373,33	15,00	27624,00	2,64
16,00	25861,00	16,00	25908,00	0,18
17,00	23371,67	17,00	24183,00	3,47
18,00	20207,67	18,00	20242,00	0,17
19,00	17086,00	19,00	16340,00	4,37
20,00	13204,33	20,00	12991,00	1,62
21,00	10585,67	21,00	10343,00	2,29
22,00	9246,00	22,00	10160,00	9,89
23,00	6486,00	23,00	6195,00	4,49
24,00	4350,67	24,00	4508,00	3,62

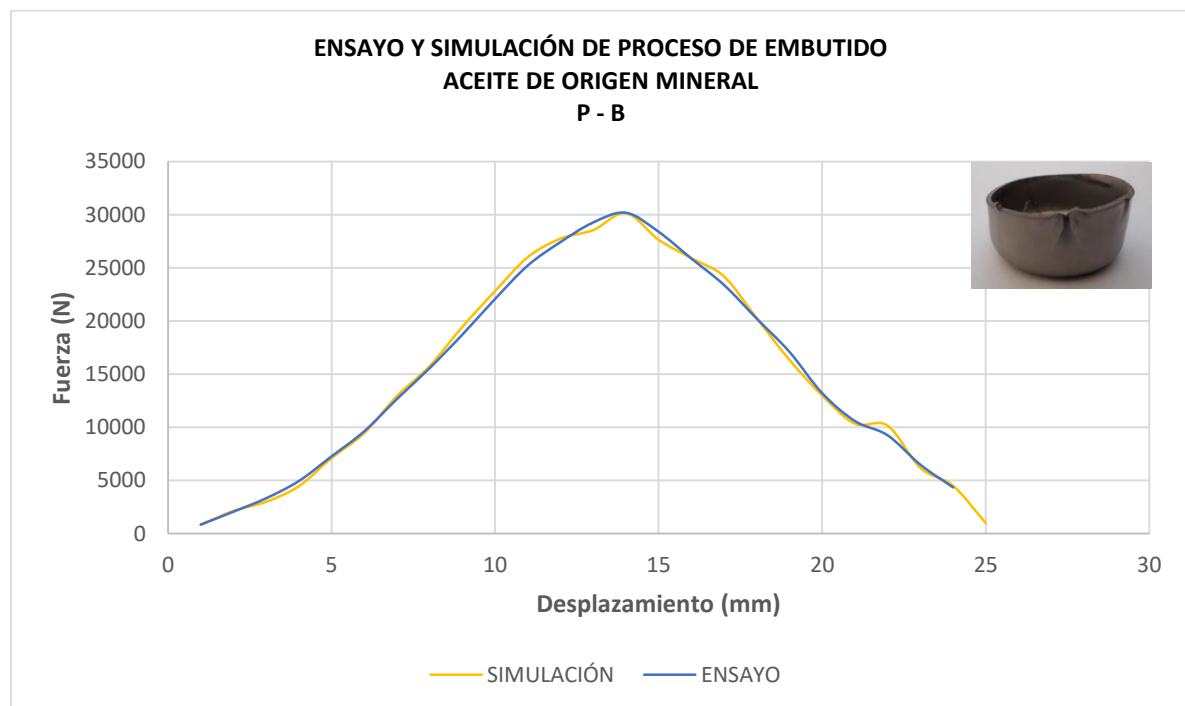


Figura 96 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen mineral P-B

Tabla 50*Comparación Resultados Aceite de origen mineral Fricción B-M*

COMPARACIÓN RESULTADOS ACEITE DE ORIGEN MINERAL FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	381,00	1,00	413,00	8,40
2,00	2438,33	2,00	2442,00	0,15
3,00	3675,67	3,00	3780,00	2,84
4,00	5337,33	4,00	5325,00	0,23
5,00	7649,33	5,00	7104,00	7,13
6,00	9566,00	6,00	9360,00	2,15
7,00	11838,33	7,00	12438,00	5,07
8,00	14619,33	8,00	15010,00	2,67
9,00	17548,33	9,00	18397,00	4,84
10,00	20576,33	10,00	21680,00	5,36
11,00	23594,00	11,00	24374,00	3,31
12,00	25640,00	12,00	25583,00	0,22
13,00	27381,00	13,00	27200,00	0,66
14,00	27736,67	14,00	27889,00	0,55
15,00	25125,00	15,00	24133,00	3,95
16,00	22991,33	16,00	23282,00	1,26
17,00	19978,33	17,00	20735,00	3,79
18,00	17801,33	18,00	18095,00	1,65
19,00	15673,33	19,00	16953,00	8,16
20,00	13542,33	20,00	12400,00	8,44
21,00	10295,33	21,00	9277,00	9,89
22,00	8640,33	22,00	9314,00	7,80
23,00	4979,00	23,00	5194,00	4,32
24,00	3849,33	24,00	3564,00	7,41

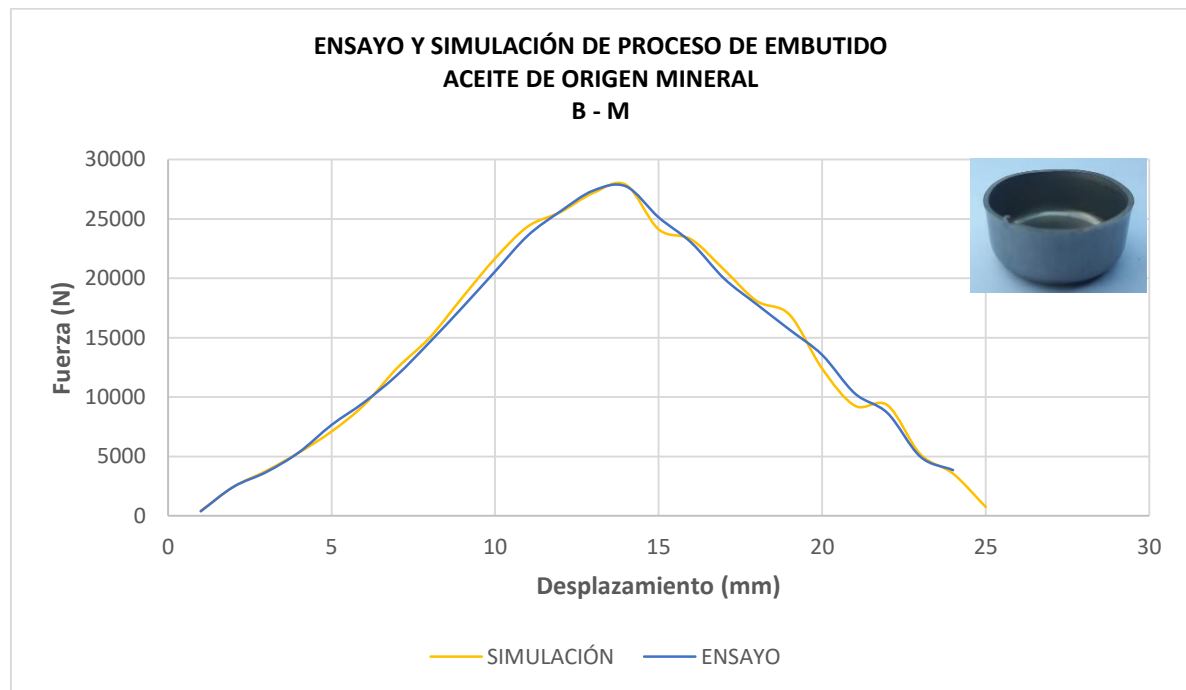


Figura 97 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Aceite de origen mineral B-M

Tabla 51

Comparación Resultados Grasa multipropósito Fricción P-B-M

COMPARACIÓN RESULTADOS GRASA MULTIPROPOSITO FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ - PUNZÓN				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	702,67	1,00	769,00	9,44
2,00	2101,67	2,00	2198,00	4,58
3,00	3892,00	3,00	3742,00	3,85
4,00	4776,67	4,00	4326,00	9,43
5,00	7333,00	5,00	6719,00	8,37
6,00	10156,00	6,00	9220,00	9,22
7,00	13309,67	7,00	12518,00	5,95
8,00	15984,33	8,00	14795,00	7,44
9,00	18507,33	9,00	18129,00	2,04
10,00	20417,33	10,00	20979,00	2,75
11,00	22710,33	11,00	23369,00	2,90
12,00	25640,00	12,00	25049,00	2,30

CONTINÚA



13,00	27028,67	13,00	25678,00	5,00
14,00	26714,67	14,00	26730,00	0,06
15,00	23688,33	15,00	24264,00	2,43
16,00	21210,00	16,00	22038,00	3,90
17,00	18322,33	17,00	19143,00	4,48
18,00	16395,00	18,00	17261,00	5,28
19,00	13655,00	19,00	13836,00	1,33
20,00	11354,33	20,00	10370,00	8,67
21,00	9552,33	21,00	8866,00	7,18
22,00	7711,67	22,00	8190,00	6,20
23,00	5506,67	23,00	5648,00	2,57
24,00	2899,33	24,00	2856,00	1,49

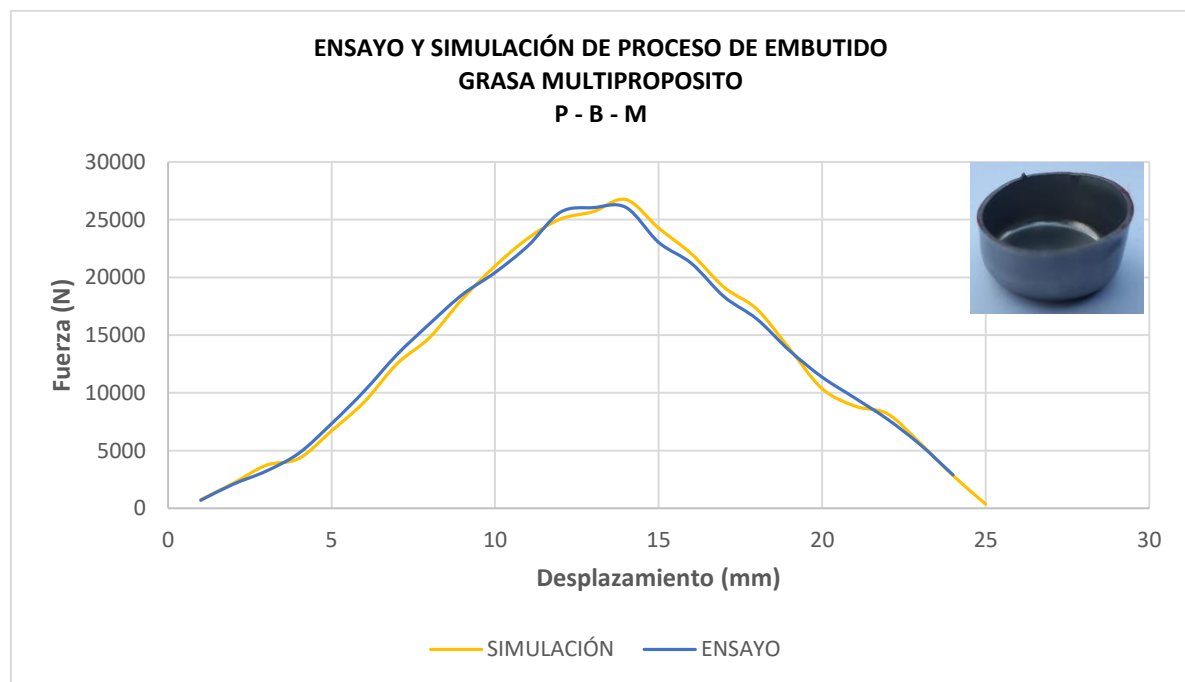


Figura 98 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Grasa multipropósito P-B-M

Tabla 52*Comparación Resultados Grasa multipropósito Fricción P-B*

COMPARACIÓN RESULTADOS GRASA MULTIPROPOSITO FRICCIÓN PUNZÓN - BLANCO				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	%
1,00	2089,00	1,00	1975,00	5,46
2,00	3259,00	2,00	3147,00	3,44
3,00	4515,00	3,00	4223,00	6,47
4,00	4814,00	4,00	5265,00	9,37
5,00	7338,33	5,00	6974,00	4,96
6,00	10420,67	6,00	9505,00	8,79
7,00	13646,00	7,00	14408,00	5,58
8,00	16990,00	8,00	15978,00	5,96
9,00	19811,67	9,00	19441,00	1,87
10,00	22454,67	10,00	23292,00	3,73
11,00	25459,33	11,00	26672,00	4,76
12,00	28777,67	12,00	29478,00	2,43
13,00	29655,33	13,00	29725,00	0,23
14,00	28904,67	14,00	29375,00	1,63
15,00	27578,00	15,00	28261,00	2,48
16,00	25138,67	16,00	26381,00	4,94
17,00	22201,33	17,00	23888,00	7,60
18,00	20160,67	18,00	20589,00	2,12
19,00	17932,33	19,00	17748,00	1,03
20,00	14565,00	20,00	13672,00	6,13
21,00	11726,33	21,00	10683,00	8,90
22,00	10645,00	22,00	10170,00	4,46
23,00	7838,00	23,00	7365,00	6,03
24,00	5932,67	24,00	5382,00	9,28

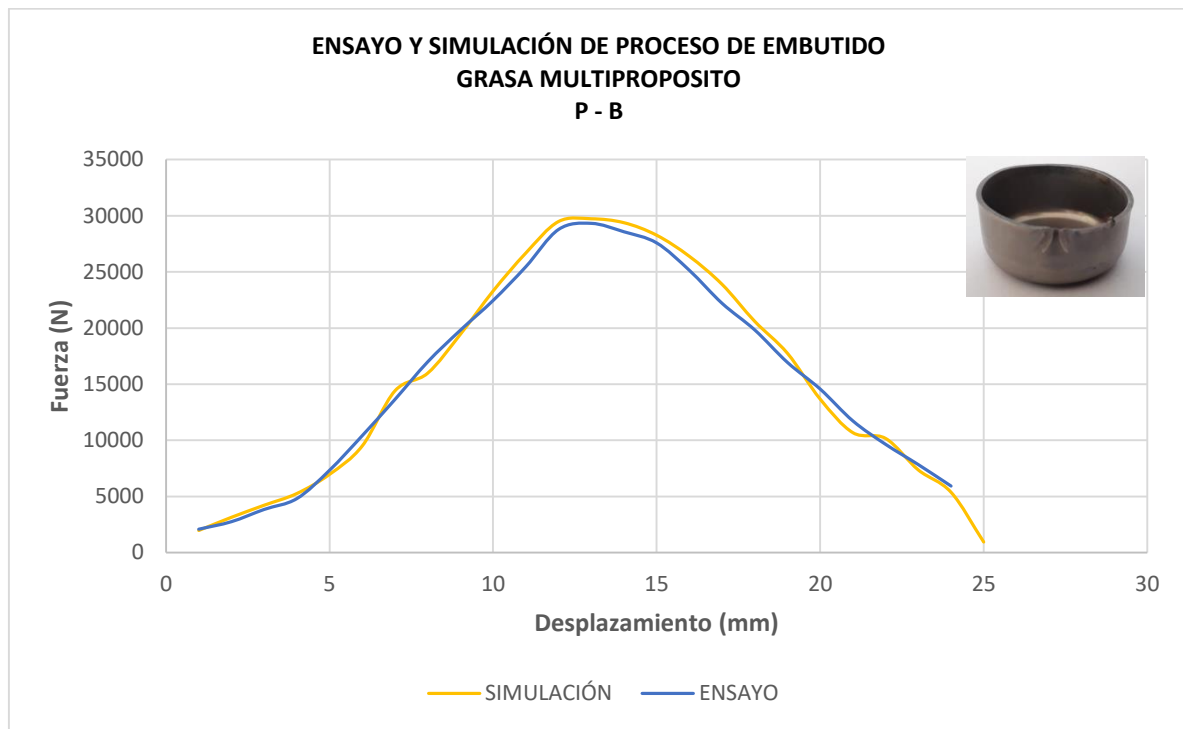


Figura 99 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Grasa multipropósito P-B

Tabla 53

Comparación Resultados Grasa multipropósito Fricción B-M

COMPARACIÓN RESULTADOS GRASA MULTIPROPOSITO FRICCIÓN BLANCO - MATRIZ				
PROMEDIO ENSAYO		DEFORM		ERROR
<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>Distancia (mm)</i>	<i>Fuerza (N)</i>	<i>%</i>
1,00	2050,67	1,00	2144,00	4,55
2,00	2992,33	2,00	3007,00	0,49
3,00	4005,33	3,00	3021,00	9,51
4,00	4624,33	4,00	4354,00	5,85
5,00	7429,00	5,00	6866,00	7,58
6,00	9988,33	6,00	9159,00	8,30
7,00	13326,67	7,00	12605,00	5,42
8,00	15789,33	8,00	14722,00	6,76
9,00	19164,33	9,00	17814,00	7,05
10,00	20981,33	10,00	20989,00	0,04
11,00	23268,00	11,00	23332,00	0,28

CONTINÚA



12,00	25839,00	12,00	24989,00	3,29
13,00	27396,00	13,00	26500,00	3,27
14,00	28019,00	14,00	26864,00	4,12
15,00	25631,33	15,00	23395,00	8,72
16,00	22475,67	16,00	21227,00	5,56
17,00	19599,00	17,00	18770,00	4,23
18,00	17357,67	18,00	16831,00	3,03
19,00	14529,33	19,00	13505,00	7,05
20,00	10384,33	20,00	9509,00	8,43
21,00	9017,00	21,00	8239,00	8,63
22,00	7788,00	22,00	7584,00	2,62
23,00	5997,00	23,00	5878,00	1,98
24,00	4783,33	24,00	4523,00	5,44

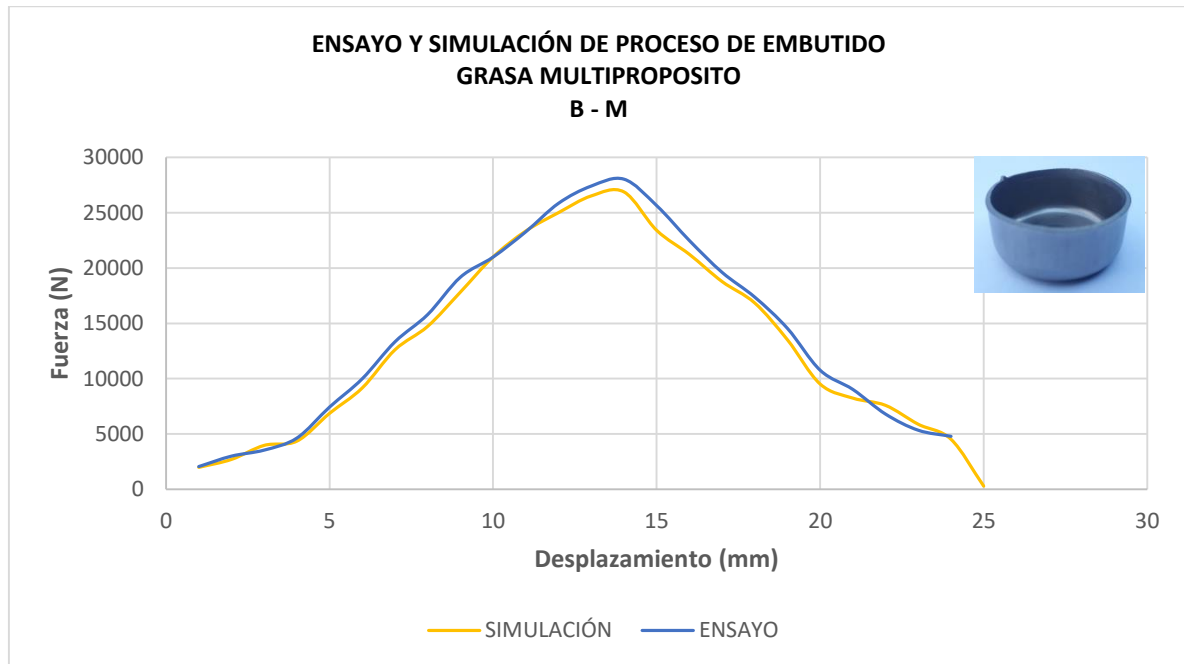


Figura 100 Gráfica Ensayo Promedio y Simulación. Grasa multipropósito B-M

Tabla 54

Comparación resultados fuerza máxima promedio ensayo y simulación

FUERZA MÁXIMA											
	Sin Lubricante			Vegetal $u=0,078$			Mineral $u=0,062$			Grasa $u=0,027$	
	P-B-M	P-B	B-M	P-B-M	P-B	B-M	P-B-M	P-B	B-M	P-B-M	
Simulación (N)	28535	29658	28119	28044	30127	28025	28281	29934	26861	26873	
Ensayo (N)	28442	30987	28545	28368	30135	28193	28763	29978	27976	27519	
Error (%)	0,33	4,29	1,49	1,14	0,03	0,60	1,68	0,15	3,99	2,35	

En la Tabla 54 se observa los valores máximos de fuerza obtenidos en la simulación y el promedio calculado en Matlab de los ensayos en cada combinación. Los errores calculados son menores al 5%, lo que indica que la simulación en el Software de manufactura se acerca a la realidad de los ensayos.

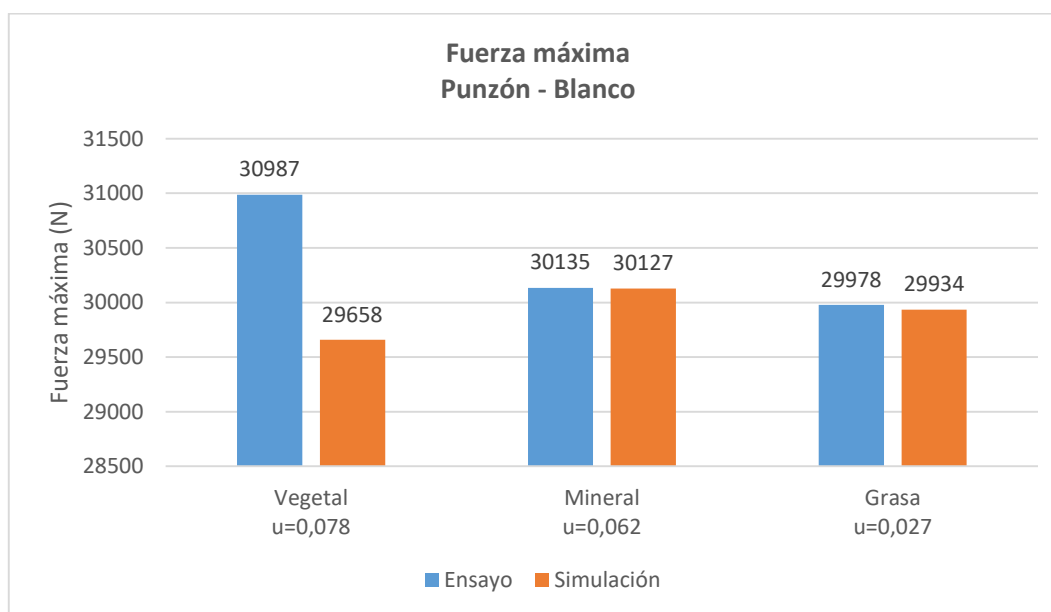


Figura 101 Gráfica comparativa Fuerza Máxima – Punzón Blanco

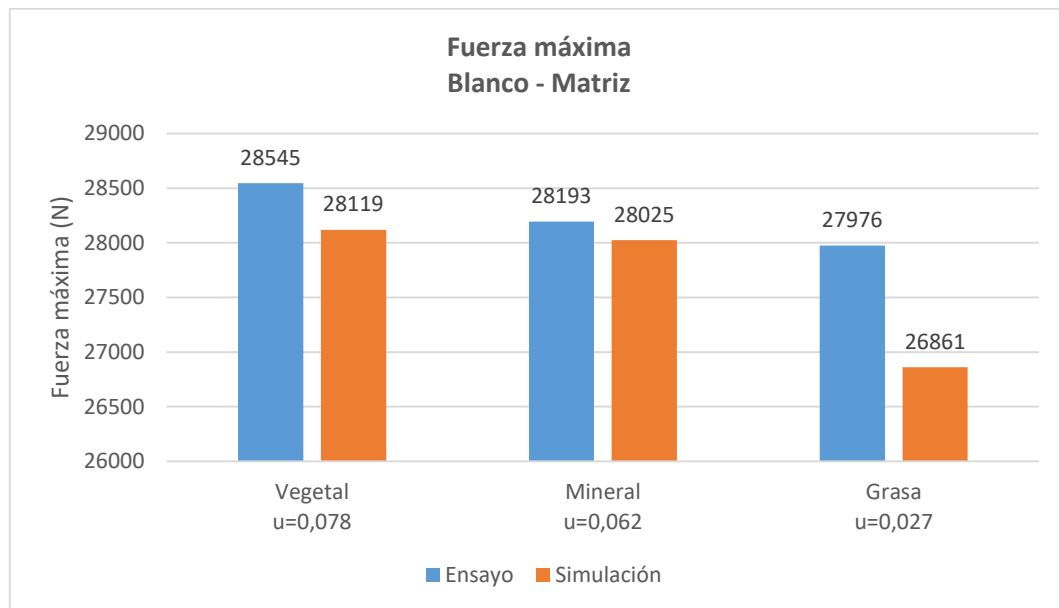


Figura 102 Gráfica comparativa Fuerza Máxima – Blanco Matriz

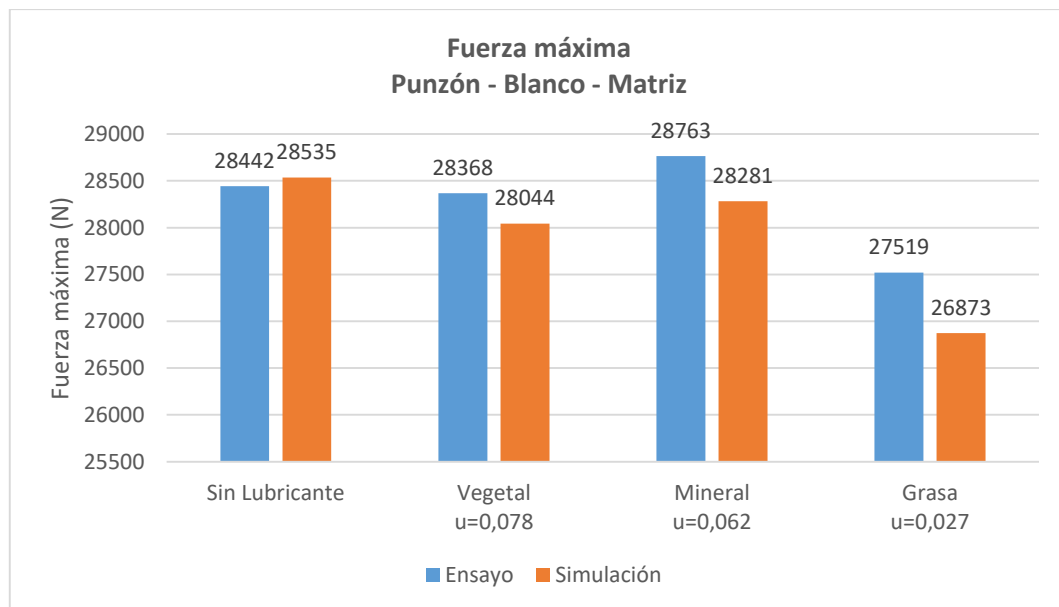


Figura 103 Gráfica comparativa Fuerza Máxima – Blanco Matriz Punzón

Las gráficas anteriormente mostradas indican pequeñas variaciones entre el ensayo y la simulación, se acepta el 10% como error máximo debido a las condiciones pre-establecidas por el software.

6.4. Triaxialidad

Para el análisis de la triaxialidad, se realizaron dos gráficas de la combinación Blanco – Matriz, utilizando grasa multipropósito como lubricante. La primera gráfica corresponde a 4 puntos seleccionados de la cara interior de la copa deformada, mientras que la segunda gráfica corresponde a 4 puntos seleccionados de la cara exterior, simétricos al eje Y.

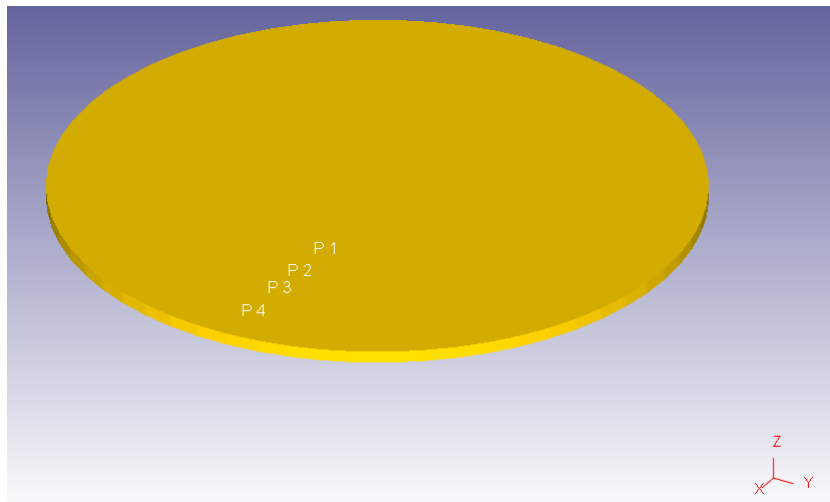


Figura 104 Ejemplo puntos seleccionados

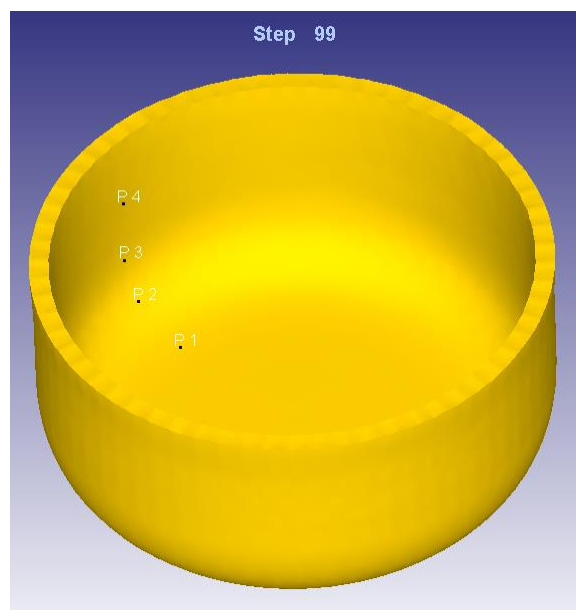


Figura 105 Ejemplo puntos seleccionados

Tabla 55*Coordenadas de puntos seleccionados – Triaxialidad*

COORDENADAS DE PUNTOS SELECCIONADOS						
Punto	Cara interior			Cara exterior		
	X	Y	Z	X	Y	Z
P1	35	-25,0	0.95	35	-25,0	0.95
P2	39	-25,0	0.95	39	-25,0	0.95
P3	42	-25,0	0.95	42	-25,0	0.95
P4	46	-25,0	0.95	46	-25,0	0.95

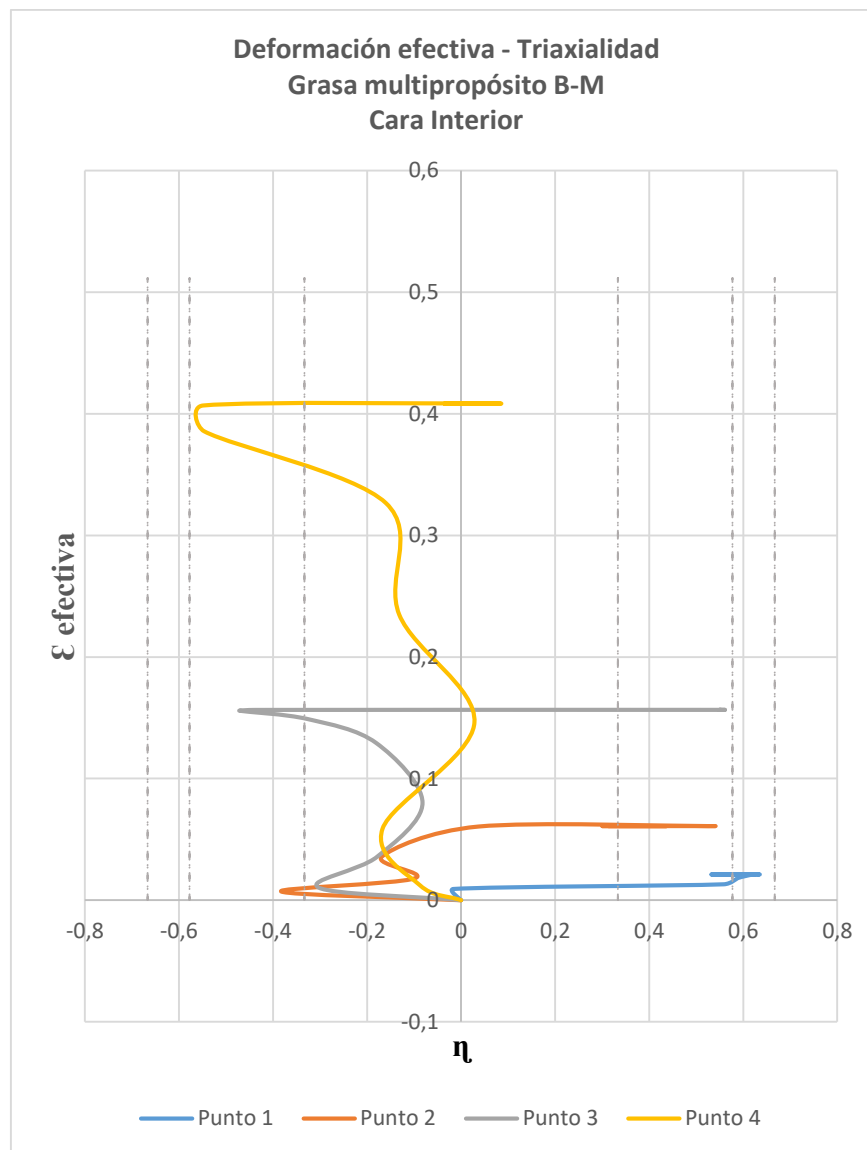


Figura 106 Deformación efectiva – Triaxialidad.
Grasa multipropósito – Cara interior

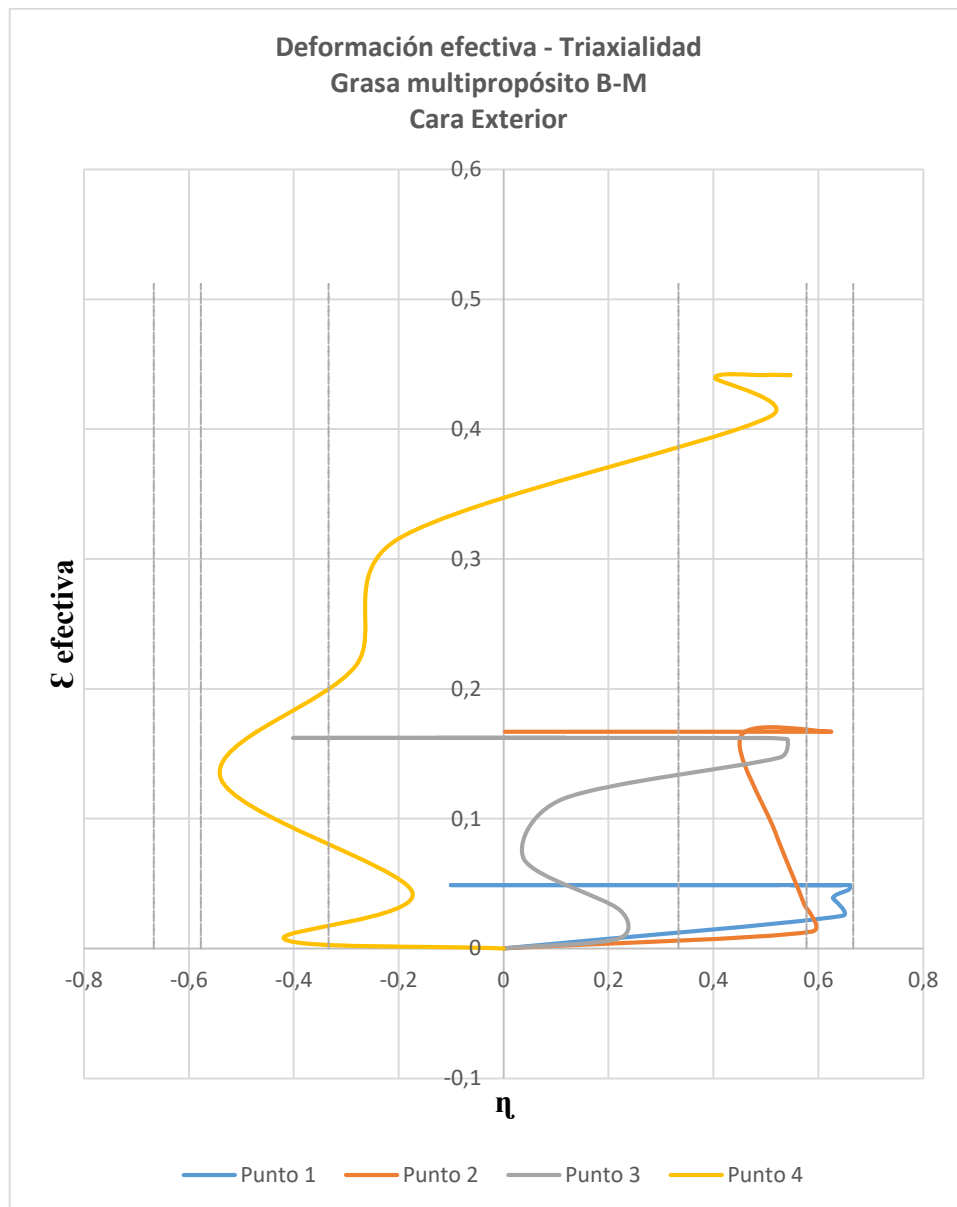


Figura 107 Deformación efectiva – Triaxialidad.
Grasa multipropósito– Cara exterior

El punto 1 de la cara interior y exterior llega al estado de tensión biaxial, debido a que se deforma en ambos ejes para acoplarse a la base del punzón, por otro lado, la deformación de la cara interior es menor a la de la cara exterior ya que punto interior es el que primero entra en contacto con el punzón.

Se puede observar que el punto 2 de la cara interior del blanco inicia en compresión hasta que entra en contacto con el punzón llegando a un estado de tensión mientras fluye el material; por otro lado, el punto 2 al exterior de la copa se encuentra siempre en estado de tensión, ya que es éste el que sufre un estiramiento hasta adaptarse a las paredes de la matriz.

El punto 3 ubicado en la parte inferior de la pared de la copa, se deforma en una cantidad similar tanto dentro como fuera de la copa, pero en diferentes sentidos, mientras el uno está a tensión, el otro se encuentra a compresión, debido a que el material debe fluir sufre un estiramiento al entrar en contacto con las paredes de la matriz, obligando a la pared interior a comprimirse.

Por último, el punto 4 sufre un incremento de espesor, al absorber la deformación de los puntos anteriores, por lo tanto, se encuentra en estado de compresión hasta entrar en contacto con las paredes de la matriz y el punzón, en donde cambia su estado de esfuerzos a tensión.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Se caracterizaron las probetas utilizadas en el ensayo de embutido, a partir de un ensayo de chispa en el cual se determinó su composición química verificando que se trata de un acero inoxidable AISI 304. Se realizó un ensayo de tensión según la Norma ASTM E8 obteniendo los valores de los coeficientes de resistencia (K) y endurecimiento (n), siendo estos 1045 MPa y 0.32, respectivamente. Finalmente se obtuvo la microestructura del acero y se la comparó bajo la ASM (American Society of Metals), resultando similares.
- Se obtuvo una adecuada correlación entre los ensayos de embutido y las simulaciones realizadas en el software de simulación para proceso de conformado mecánico sobre el acero inoxidable AISI 304, variando las condiciones de lubricación las cuales son: sin lubricante, aceite de origen vegetal, aceite de origen mineral y grasa multipropósito, en diferentes combinaciones entre el punzón, blanco y matriz. El máximo error obtenido sin el uso de lubricante fue 9.26%, con el uso de aceite vegetal fue 9.77%, con el uso de aceite de origen mineral fue 9.84% y con el uso de grasa multipropósito fue 9.44%. Determinando así que el uso de un software de simulación para proceso de conformado mecánico disminuye el tiempo y el uso de recursos económicos empleados dentro de un proceso de embutido.
- En el ensayo y la simulación del proceso de embutido, se encontró que la combinación más óptima para el uso de cualquier lubricante es entre el Blanco y la Matriz, ya que a medida que disminuye el coeficiente de fricción, disminuye la

fuerza de embutido, determinando así que el uso de grasa multipropósito como lubricante es la mejor opción, ya que alcanzó una fuerza máxima de 27976,74 N en el ensayo y en la simulación se obtuvo un valor de 26860,78 N.

- Se diseñó el conjunto matriz – punzón, cumpliendo los límites establecidos por la capacidad de la máquina para embutir un disco de 50mm de diámetro y 1mm de espesor. El punzón tiene un diámetro de 30mm y un radio de 3mm, mientras que la matriz tiene un diámetro de 32,2mm y un radio de 6mm. El conjunto matriz – punzón fue construido en acero AISI D2 y endurecido bajo tratamiento térmico obteniendo una dureza de 64 HRC.
- Se realizaron un total de 30 ensayos, variando las condiciones de lubricación en diferentes combinaciones entre el punzón, el blanco y la matriz; obteniendo así los valores de fuerza máxima en cada uno de estos, siendo el valor máximo de 30987,21N, correspondiente a la combinación Punzón – Blanco utilizando aceite de origen vegetal como lubricante, esta combinación no es aceptada debido a que la fuerza es mayor a la obtenido sin el uso de lubricante.
- Se realizó una simulación por cada combinación Punzón – Blanco – Matriz con diferente lubricante en el software de simulación para proceso de conformado mecánico. Mediante un proceso de convergencia de malla se obtuvo el número de elementos de malla equivalente a 175000; los valores de fricción se variaron dentro de los límites establecidos en la bibliografía. Los coeficientes de resistencia (K) y endurecimiento (n) fueron los calculados en la caracterización del material. Por otro lado, la velocidad de simulación fue la misma a la que se realizaron los ensayos.

- Los valores de fuerza máxima obtenidos en los ensayos y simulaciones no se asemejan al valor de fuerza máxima obtenida a partir de la fórmula matemática presentada en la bibliografía del proceso de embutido, esto se debe a que la fórmula mencionada toma en cuenta la fuerza necesaria para el proceso de embutición con pisador.

7.2.Recomendaciones

- Para un ensayo de embutido exitoso, se recomienda el uso de lubricante entre el blanco y la matriz, así también verificar que el blanco se encuentre en el centro de la matriz, para evitar su desplazamiento y defectos en la pieza final.
- El uso de otro tipo de lubricante como el teflón (PTFE), funcionaria de mejor manera dentro del proceso, disminuyendo la fuerza de embutido. Este tipo de lubricantes son de difícil adquisición en el mercado nacional.
- Con el fin de ahorrar recursos de tiempo y dinero, se recomienda el uso de un software de simulación para proceso de conformado mecánico, para predecir posibles problemas en la fase de construcción y funcionamiento de la máquina y así evitar gastos innecesarios.
- Dentro de la caracterización del material, para la obtención de la microestructura, los químicos utilizados deben ser correctamente preparados y se los debe mantener en condiciones óptimas de almacenamiento; de esta manera se obtienen resultados confiables.
- Se debe tomar en cuenta la holgura entre el punzón y la matriz, respetando los parámetros de diseño, ya que podrían existir complicaciones durante el ensayo como es el atrapamiento del blanco en la matriz o defectos de corte en la pieza.

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Altan, T., & Tekkaya, E. (2012). *Sheet Metal Forming*. United States of America: ASM International.
- American Society for Metals. (1982). *Engineering Properties of Steels*. Ohio: Philip D. Harvey.
- American Society for Metals. (2004). *Metals Handbook Ninth Edition - Volumen 9 Metallography and Microstructures*. ASM International.
- Aparicio, G., Heber, D., & Ciaccia, M. (2007). Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. *Revista Ingeniería UC*, 57-63.
- Aranzabe, E., & Adolfo, M. (2016). Lubrication management. IK4-TEKNIKER.
- ArcelorMittal. (s.f.). *ArcelorMittal*. Recuperado el 27 de Enero de 2018, de http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/K_ES.html
- Arteaga, L. (2013). Planeación de procesos de embutido de chapas mediante herramientas numéricas. *Revista Centro Azúcar*.
- Bejarano, O. (2013). Diseño de una Máquina experimental para la deformación en frío en una dirección de láminas no ferrosas, mediante fuerzas de compresión. Lima.
- Bin, A. (2013). Prediction of forming defects in Deep Drawing process by Finite Element Simulation. *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, 16-19.
- Cann, P. (1999). Thin-film grease lubrication. *SAGE journals*, 405-416.
- Coello, J., & Ferrer, C. (2009). Caracterización de la deformación de chapa de acero inoxidable AISI 304 bajo tensiones multiaxiales. *Revista de Metalurgia*, 351-364.
- Collieu, A., & Powney, D. (1977). *Propiedades Mecánicas y Térmicas de los Materiales*. Barcelona: Reverté.

- Dalmau, M., & Vilardell, J. (2003). *Análisis plástico de estructuras. Introducción*. Cataluña: Ediciones UPC.
- Delgado, A., & Aperador, W. (2014). Estudio Comparativo del Poder Lubricante y Estabilidad Oxidativa entre el Aceite Vegetal y Aceite Mineral. *Información Tecnológica*, 16-20.
- Escribano, A. . (29 de Enero de 2018). *Documentación y análisis: Conformado de productos sin arranque de viruta*. . Obtenido de <http://de-ducetu.blogspot.com/p/embuticion-2.html>
- Gawrilow, H. (2005). Uso de aceite vegetal en lubricantes. *PALMAS*, 55-61.
- Geels, K. (2007). *Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing*. U.S.A: ASTM International.
- González, J. (2003). *Metalurgia Mecánica*. México D.F.: Limusa.
- González, J. (2003). *Metalurgia Mecánica*. México D.F.: LIMUSA.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, Procesos y Sistemas*. México DF: PEARSON.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna Materiales, Procesos y Sistemas*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall.
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna 3Ed.* México D.F.: McGraw Hill.
- Gutiérrez, J. (2010). Introducción al estudio del método de elementos finitos en los procesos de embutido de chapas (Trabajo de Diploma). Universidad Central de Las Villas, Cuba.
- Iurman, L., Lucaioli, A., Bergé, G., & Insausti, J. (2013). Evolución de los criterios de conformabilidad de chapas metálicas para estampado. *Ciencia e Investigación*, 5-22.
- Jurado, J. Á., & Hernández, S. (2014). *Análisis Estructural de Placas y Láminas*. Santiago de Compostela: Andavira Editora.

- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología 5ta Ed.* México: Prentice Hall.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología.* México D.F.: Pearson Educación.
- Keeler, S. (1977). *Sheet Metal Stamping Technology-Need for Fundamental Understanding - Mechanis of Sheet Metal Forming.* Plenum Pres.
- Kopanathi, K., & Srikanth, M. (2012). Simulation of the effect of die radius on deep drawing process. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, 12-17.
- Körgeaar, M., Remes, H., & Romanoff, J. (2014). Size dependent response of large shell elements under in-plane tensile loading. *ELSEVIER*, 3752-3761.
- Mangonon, P. (2001). *Resistencia de Materiales. Selección y Diseño.* México D.F.: Pearson.
- Mirone, G. (2007). Role of stress triaxiality in elastoplastic characterization and ductile failure prediction. *ELSEVIER*, 1203-1221.
- Molera, P. (1990). *Metales resistentes a la corrosión.* Barcelona: Marcombo S.A.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas.* México D.F.: Pearson Educación.
- Mroginski, J., Di Rado, H., Beneyto, P., & Awruch, A. (2006). Simulación del comportamiento elastoplástico de materiales ductiles. Validación experimental. *Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.*, T-022-T024.
- Oehler, G. (1977). *Herramienta de Troquelar, Estampar y Embutir.* Barcelona: Gustavo Gili.
- Padilla, E. (1999). Aplicaciones de los aceros inoxidables. *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO).*

- Padmanabhan, R., Oliveira, M., Alves, J., & Menezes, L. (2007). Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1062-1067.
- Pajuelo, E. (2014). Métodos Analíticos para la Estimación de los Tensores de Tensión y Deformación Elasto-Plásticos en las Inmediaciones de una Entalla".
- Pavan, J., Uday, R., & Sabitha, K. (2017). A study on effect of process parameters and defects in deep drawing of sheet metals. *International Journal of Advanced Information Science and Technology*, 59-63.
- Quiminet.com. (01 de Noviembre de 2011). *Quiminet.com*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/conozca-los-principales-usos-y-aplicaciones-del-aceite-mineral-2634447.htm>
- Samantaray, D., Kumar, V., Bhaduri, A., & Dutta, P. (2013). Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Type 304L Stainless Steel Processed in Semi-Solid State. *International Journal of Metallurgical Engineering* , 149-153.
- Sánchez, D. (Junio de 2011). Diseño Óptimo de Laminados en Materiales Compuestos. Aplicación del MEF y el Método de las Superficies de Respuesta. Sevilla.
- Schey, J. (2000). *Procesos de Manufactura 3ed*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Shashidhara, Y., & Jayaram, S. (2012). Deep drawing of 304 L Steel Sheet using Vegetable oils as Forming Lubricants. *International Journal of Advancements in Research & Technology*.
- sinc, La ciencia es noticia. (Diciembre de 2015). *sinc, La ciencia es noticia*. Recuperado el 97 de Julio de 2018, de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Un-lubricante-sostenible-se-fabrica-con-aceite-vegetal-y-espesante-no-toxico>

- Stamper, E. (11 de Abril de 2017). *Incorporating the Stress Triaxiality Factor into FEA Simulations*. Obtenido de Engineering Advantage: <https://caeai.com/blog/incorporating-stress-triaxiality-factor-fea-simulations>
- Timoshenko, S. (1970). *Teoría de Placas y Laminas*. Ediciones URMO.
- Vicentini, D. (2008). Análisis 3D elástico y 2D elastoplástico de una esquina bimaterial en uniones adhesivas. Sevilla.
- Wikidot. (5 de Junio de 2014). Recuperado el 28 de Enero de 2018, de <http://mecanicademateriales.wikidot.com/mecanica-de-materiales>

CAPÍTULO IX. ANEXOS