

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:
ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE CORTE DE CHAPA
METÁLICA EN MATRICERÍA CON PRENSAS MECÁNICAS MEDIANTE
SIMULACIÓN EN SOFTWARE ANSYS.**

**AUTOR:
JONATHAN SEBASTIÁN YÉPEZ LÓPEZ**

**TUTOR:
VÍCTOR HUGO CABRERA MORETA**

Quito, diciembre del 2017

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Jonathan Sebastián Yépez López, con documento de identificación N°1718122433, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “Análisis y mejoramiento del proceso de corte de chapa metálica en matricería con prensas mecánicas mediante simulación en software Ansys”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Jonathan Sebastián Yépez López

CI: 1718122433

Quito, diciembre del 2017

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto técnico de titulación: “Análisis y mejoramiento del proceso de corte de chapa metálica en matricería con prensas mecánicas mediante simulación en software Ansys”, realizado por Jonathan Sebastián Yépez López, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre del 2017



.....

Ing. Víctor Hugo Cabrera Moreta. Mg.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

A Dios

Por brindarme la salud a lo largo del camino, permitirme no decaer a ningún momento y llegar a cumplir el objetivo.

A mis Padres y hermano

El presente proyecto y logro ha sido gracias a ustedes, se los dedico con mucho cariño por ser el eje principal en el transcurso de mi vida, siendo un apoyo incondicional, los autores de cada uno de mis valores y de la persona que soy.

Familiares y amigos

En gratitud por ser un ejemplo para mí, por el apoyo y cada uno de los consejos.

A ti

Mi compañera en todo el transcurso de la carrera, por ser una mujer que perseveró, confió y supo apoyarme y que pese a las dificultades siempre apostó el todo por mí.

Jonathan Sebastián Yépez.

ÍNDICE

RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	19
CAPÍTULO I.....	20
MARCO TEÓRICO.....	20
1.1. Matricería	20
1.2. Prensa mecánica	20
1.3. Punzonadoras.....	21
1.4. Troquel	21
1.5. Componentes básicos de un troquel	21
1.5.1. Punzón.....	21
1.5.2. Matriz	22
1.5.3. Guías o columnas	23
1.5.4. Placas.....	23
1.6. Operaciones o procesos de corte	24
1.6.1. Punzonado	24
1.6.2. Corte - punzonado	24
1.7. Holgura de corte	24

1.8.	Clasificación según su holgura	25
1.8.1.	Grupo 1.....	25
1.8.2.	Grupo 2.....	25
1.8.3.	Grupo 3.....	26
1.9.	Principales fenómenos que se manifiestan durante el corte de material	26
1.9.1.	Etapa 1.....	26
1.9.2.	Etapa 2.....	26
1.9.3.	Etapa 3.....	27
1.10.	Variación según la holgura de corte	28
1.10.1.	Holgura escasa.....	28
1.10.2.	Holgura correcta	28
1.10.3.	Holgura excesiva	28
1.10.4.	Holgura nula	29
1.11.	Límite elástico.....	29
1.12.	Esfuerzo que interviene en la solución	30
1.13.	Detalle de matriz.....	30
1.13.1.	Pieza de detalle	30
1.13.2.	Troquel para fabricación de arandelas.....	32
CAPÍTULO II		33
CÁLCULOS DE MATRICERÍA		33
2.1.	Materiales	33

2.2.	Fuerzas.....	34
2.2.1.	Fuerza de corte	34
2.2.2.	Fuerza de extracción	36
2.2.3.	Fuerza de expulsión.....	37
2.3.	Ángulo de escape de la matriz.....	38
2.4.	Juego punzón y matriz.....	39
2.4.1.	Valores que se adopta para el juego:.....	39
2.5.	Distancia de separación entre piezas	40
2.6.	Selección de prensa	41
CAPÍTULO III.....		43
DISEÑO EN SOFTWARE		43
3.1.	Software ANSYS.....	43
3.2.	Módulo de trabajo relacionado a corte de chapa metálica	43
3.2.1.	Explicit Dynamics	43
3.3.	Simulación.....	44
3.3.1.	Posibles formas de geometría para simular ‘Geometry’	44
3.3.2.	Opciones de geometría.....	46
3.3.3.	Geometría eliminando macho de corte	46
3.3.4.	Generación del mallado ‘Mesh’	47
3.3.5.	Refinamiento de malla	48
3.3.6.	Selección de las partes de contacto ‘Contact región’	49

3.3.7.	Determinar parámetro de fuerza ‘Force’	50
3.3.8.	Determinar parámetro de velocidad ‘Velocity’	51
3.3.9.	Determinar parámetro de desplazamiento ‘Displacement’	52
3.3.10.	Selección de soportes fijos ‘Fixed support’	52
3.3.11.	Resultados inesperados en la simulación	53
3.3.12.	Desprendimiento del diámetro interior o residuo	57
3.4.	Simulación con diferentes materiales.....	59
3.4.1.	Simulación 1.....	60
3.4.2.	Simulación 2.....	63
3.4.3.	Simulación 3.....	66
3.5.	Validación de coeficientes y resultados	69
3.5.1.	Simulación con diferentes holguras	69
3.6.	Validación de etapas con respecto al espesor del material.....	81
CAPÍTULO IV.....		82
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS		82
4.1.	Análisis de resultados.....	82
4.1.1.	Simulación con variación de material	82
4.1.2.	Simulación con variación de holgura.....	83
4.1.3.	Resultados de pruebas físicas.....	83
4.2.	Análisis de costos	86
CONCLUSIONES		88

RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Prensa mecánica.....	20
Figura 2. Troquel para fabricación de arandelas.....	21
Figura 3. Macho de corte	22
Figura 4. Matriz o hembra de corte.....	22
Figura 5. Columna y buje.....	23
Figura 6. Placa superior.....	23
Figura 7. Placa inferior.....	24
Figura 8. Proceso de punzonado	25
Figura 9. Deformación elástica	26
Figura 10. Deformación plástica	27
Figura 11. Fractura	27
Figura 12. Gráfica esfuerzo – deformación.....	29
Figura 13. Arandelas de varios diámetros.....	31
Figura 14. Arandela en acero galvanizado.....	31
Figura 15. Diámetros y espesor de arandela	31
Figura 16. Troquel para fabricación de arandelas.....	32
Figura 17. Fuerza de corte.....	34
Figura 18. Aplicación de fuerza de extracción.....	36
Figura 19. Aplicación de fuerza de expulsión.....	37
Figura 20. Ángulo de escape.....	38
Figura 21. Proceso de corte detallando el ángulo para la expulsión	38
Figura 22. Juego punzón y matriz	39
Figura 23. Prensa mecánica.....	42

Figura 24. Placa del motor	42
Figura 25. Geometría en Design Modeler.....	45
Figura 26. Vista frontal de la geometría en Design Modeler.....	45
Figura 27. Geometría en SpaceClaim	46
Figura 28. Macho interno y de corte con chapa metálica	46
Figura 29. Troquel sin macho de corte.....	47
Figura 30. Mallado de geometría automática.....	48
Figura 31. Sección para refinamiento de malla.....	49
Figura 32. Mallado refinado.....	49
Figura 33. Condiciones de contacto	50
Figura 34. Asignación de fuerza	51
Figura 35. Asignación de velocidad.....	51
Figura 36. Asignación de desplazamiento	52
Figura 37. Parámetro seleccionado Fixed Support	53
Figura 38. Chapa con soporte fijo.....	53
Figura 39. Punzón sin parámetro en los ejes x, y.....	54
Figura 40. Chapa simulada con sobre esfuerzo.....	54
Figura 41. Deformación unitaria equivalente de la chapa.....	55
Figura 42. Deformación en el área de corte	55
Figura 43. Esfuerzo en la chapa metálica.....	56
Figura 44. Esfuerzo mínimo en chapa.....	56
Figura 45. Pandeo del fleje.....	57
Figura 46. Deformación unitaria máxima y mínima del área de corte.....	57
Figura 47. Fuerza vs tiempo.....	58
Figura 48. Corte de arandela por cada golpe.....	58

Figura 49. Esfuerzo equivalente.....	59
Figura 50. Deformación total	60
Figura 51. Deformación direccional	61
Figura 52. Deformación unitaria equivalente.....	61
Figura 53. Esfuerzo equivalente Von Misses.....	61
Figura 54. Gráfica esfuerzo vs tiempo	62
Figura 55. Tabulación de datos	62
Figura 56. Deformación total	63
Figura 57. Deformación direccional	64
Figura 58. Deformación unitaria equivalente.....	64
Figura 59. Esfuerzo equivalente.....	64
Figura 60. Gráfica esfuerzo vs tiempo	65
Figura 61. Tabulación de datos	65
Figura 62. Deformación total	66
Figura 63. Deformación direccional	67
Figura 64. Esfuerzo equivalente.....	67
Figura 65. Esfuerzo normal.....	67
Figura 66. Gráfica esfuerzo vs tiempo	68
Figura 67. Tabulación de datos	68
Figura 68. Esfuerzo Equivalente Von Misses	70
Figura 69. Corte - punzonado.....	70
Figura 70. Arandela defectuosa vista superior	71
Figura 71. Arandela defectuosa vista inferior	71
Figura 72. Material embutido.....	71
Figura 73. Esfuerzo Equivalente	72

Figura 74. Material cortado visto desde la base	72
Figura 75. Vista lateral	73
Figura 76. Esfuerzo Equivalente	73
Figura 77. Corte - punzonado.....	74
Figura 78. Material cortado.....	74
Figura 79. Esfuerzo Equivalente	75
Figura 80. Arandela vista superior	75
Figura 81. Arandela vista inferior	75
Figura 82. Material cortado.....	76
Figura 83. Esfuerzo Equivalente	76
Figura 84. Corte - punzonado.....	77
Figura 85. Residuos de material cortado.....	77
Figura 86. Vista inferior.....	78
Figura 87. Esfuerzo Equivalente	78
Figura 88. Corte - punzonado.....	79
Figura 89. Vista lateral	79
Figura 90. Esfuerzo Equivalente	80
Figura 91. Corte - punzonado.....	80
Figura 92. Vista lateral	80
Figura 93. Etapas de deformación.....	81
Figura 94. Etapas en la simulación	81
Figura 95. Material punzonado	84
Figura 96. Vista del espesor	84
Figura 97. Material punzonado	85
Figura 98. Vista del espesor	85

Figura 99. Material punzonado	85
Figura 100. Vista del espesor	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales de simulación	59
Tabla 2. Resultados con variación de material.....	82
Tabla 3. Resultados con variación de holguras	83
Tabla 4. Costos directos	86
Tabla 5. Costos Indirectos.....	87
Tabla 6. Costo total	87
Tabla 7. Resistencia al corte y rotura de aceros laminados.....	91

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fuerza de corte	35
Ecuación 2: Perímetro del corte	35
Ecuación 3: Fuerza de extracción	37
Ecuación 4: Fuerza de expulsión.....	37
Ecuación 5: Juego punzón y matriz	39
Ecuación 6: Diámetro interior de la matriz	40
Ecuación 7: Diámetro exterior de la matriz	40
Ecuación 8: Distancia de separación entre piezas.....	41

RESUMEN

El presente proyecto técnico tiene la finalidad de estudiar el campo de la matricería tanto teórica como matemática a través del diseño de un troquel con prensas mecánicas para corte por punzonado con una fuerza de cinco toneladas, posteriormente un análisis del proceso de corte por medio de simulación en Software ANSYS con módulo de trabajo en Explicit Dynamics.

El primer capítulo se basa en el estudio de matricería con sus respectivas definiciones tanto como son sus partes, componentes principales de un troquel, procesos de corte y detalle del elemento a cortar tomado de la necesidad de la empresa propuesta a trabajar.

En el segundo capítulo se detalla factores que intervienen para los cálculos del diseño de la matriz como son los esfuerzos tanto de la prensa mecánica como del corte, se menciona materiales en el cálculo del esfuerzo necesario, juego punzón matriz y las respectivas ecuaciones.

En el tercer capítulo se muestra una breve introducción al Software ANSYS y al módulo de trabajo necesario para el análisis de corte de chapa metálica, diferentes simulaciones obtenidas con la variación de elementos como materiales y parámetros de trabajo que ofrece el Software.

El capítulo cuatro se fundamenta en el análisis y comparación de resultados obtenidos, así como también se detalla un breve análisis de los costos de diseño.

Palabras clave: diseño, punzonado, corte de chapa, esfuerzos, módulo de trabajo, simulación, parámetros de software.

ABSTRACT

The present technical project has the purpose of studying the field of matricería both theoretical and mathematical through the design of a die with mechanical presses for cutting by punching with a force of five tons, later an analysis of the cutting process by means of simulation In ANSYS Software with work module in Explicit Dynamics.

The first chapter is based on the study of die-stamping with their respective definitions as are their parts, main components of a die, cutting processes and detail of the element to cut taken from the need of the proposed company to work.

The second chapter details factors involved in matrix design calculations such as the efforts of both the mechanical and cutting press, mentioning materials in the calculation of the necessary effort, punch matrix game and the respective equations.

The third chapter shows a brief introduction to the ANSYS Software and the work module required for sheet metal cutting analysis, different simulations obtained with the variation of elements such as materials and work parameters offered by the Software.

Chapter four is based on the analysis and comparison of results obtained, as well as a brief analysis of design costs.

Key words: design, punching, sheet cutting, stress, work module, simulation, software parameter

INTRODUCCIÓN

La matricería ‘al ser una rama de la mecánica y su uso muy amplio dentro de la industria con su manufactura’ lleva a un estudio específico para cada aplicación que se requiera en una determinada empresa. El presente trabajo se basa específicamente en el análisis y mejoramiento del proceso de corte de chapa metálica por medio de prensas mecánicas cubriendo la necesidad de optimización en una fábrica con respecto a su producción, dando lugar a una mejora en tiempos de construcción y reducción de costos.

El detalle principal que tiene la presente es la relación del proceso de corte práctico con el teórico basándose en simulación en software ANSYS que tiene como objetivo brindar varias opciones como verificación de usos, esfuerzos, ahorro de materiales y una mayor eficiencia en cuanto a utilidad en el proceso.

Para el análisis de este tema es necesario mencionar las causas. Una y la más importante es que pese a que en la actualidad la matricería ha avanzado tanto en su tecnología que permite simular procedimientos sigue siendo empírica en muchos aspectos y por tanto se da el sobredimensionamiento para el desarrollo de matrices viéndose reflejado en los costos de los elementos o piezas obtenidas.

En cuanto a la metodología de trabajo interviene un análisis cualitativo que hace énfasis en la validez de los coeficientes a través de la proximidad a la realidad empírica que brinda esta metodología, un análisis matemático tanto para la geometría del corte como para la prensa mecánica basados en tablas y un análisis de simulación basado en diseño asistido por computador.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

OBJETIVO GENERAL

Análisis, validación y simulación del comportamiento del proceso de corte de chapa metálica en matricería mediante prensas mecánicas, por medio de software ANSYS.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el corte de chapa metálica mediante matricería tanto teórica como matemática para una mejora en el proceso.
- Diseñar las diferentes matrices de corte por medio de software para pruebas posteriores.
- Simular el proceso de corte del material utilizando software Ansys para una clara visión del comportamiento y los resultados tanto del material como de las matrices.
- Evaluar y comparar los datos obtenidos de la simulación con las pruebas en la práctica generadas de las diferentes matrices proporcionadas por la empresa a trabajar.
- Definir los coeficientes de la comparación de resultados para una demostración mediante ventajas y desventajas.
- Determinar la viabilidad del análisis de corte de chapa metálica en cuanto al costo y su rentabilidad productiva.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Matricería

Rama de la ingeniería mecánica que estudia y desarrolla técnicas de fabricación de utillajes denominados matrices o troqueles, adecuados para la obtención de piezas generalmente en chapa metálica con un proceso sin arranque de viruta [1].

1.2. Prensa mecánica

Dispositivo mecánico que tiene la capacidad de transmitir energía por vía neumática o mecánica a una matriz o un troquel, utilizada para la mayoría de las operaciones de trabajo en frío como el troquelado [1].

La mayoría de operaciones de trabajo se pueden efectuar en cualquier prensa como la de la figura a continuación si se usan matrices y punzones adecuados.



Figura 1. Prensa mecánica

1.3. Punzonadoras

A diferencia de la prensa mecánica las punzonadoras son iguales que las cizallas de brazo, pero más potentes porque para accionarlas se usa un sistema hidráulico movido por un motor eléctrico. Además de añade un sistema de punzonado capaz de hacer agujeros redondos y cuadrados [2].

1.4. Troquel

Herramienta empleada en la operación de corte de chapa o lámina metálica. El elemento móvil o punzón comprime el material contra la parte fija del troquel llamada matriz [3].

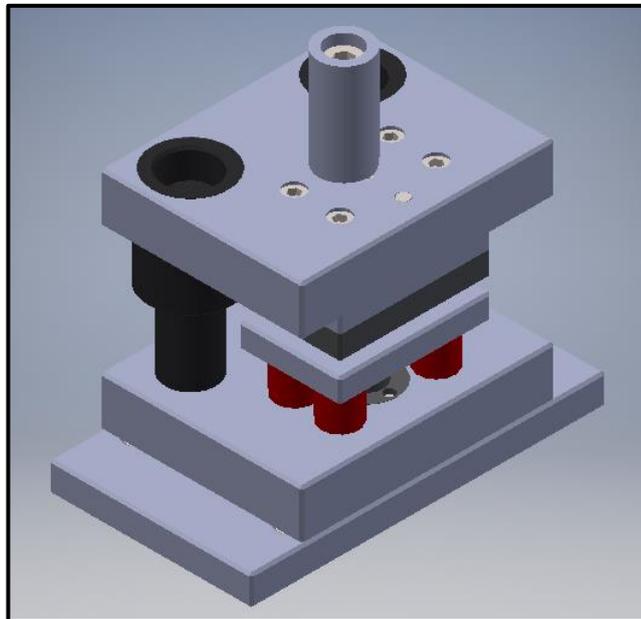


Figura 2. Troquel para fabricación de arandelas

1.5. Componentes básicos de un troquel

1.5.1. Punzón

Es una herramienta de acero de alta resistencia al golpe y desgaste, puede tener forma cilíndrica o prismática, Puede tener varios tipos de punta en función de su uso. El

punzón es una de las partes más importantes del troquel, ya que es esta pieza la que realiza el trabajo más significativo del proceso.

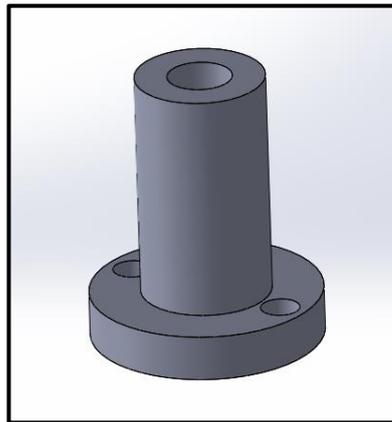


Figura 3. Macho de corte

1.5.2. Matriz

Utillaje mecánico no autónomo capaz de cortar o conformar chapa metálica según una geometría específica definida por los elementos que la componen.

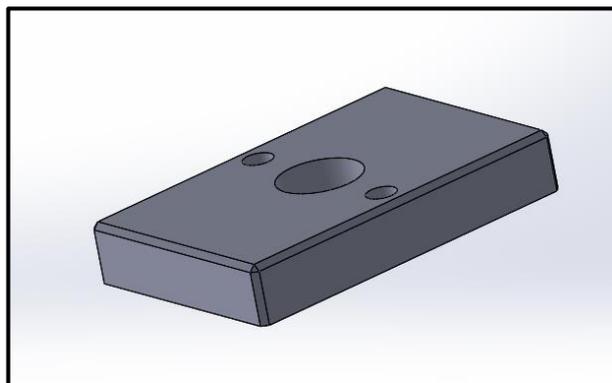


Figura 4. Matriz o hembra de corte

1.5.3. Guías o columnas

Son pasadores de forma cilíndrica que sirve de medio de alineamiento al juego del troquel.

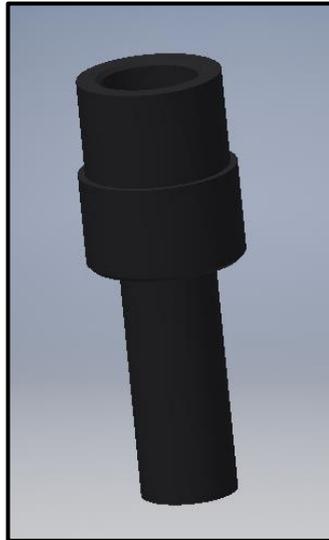


Figura 5. Columna y buje

1.5.4. Placas

También conocidas como porta matriz y porta punzón, son las bases del juego del troquel. A continuación, se muestra las dos placas:

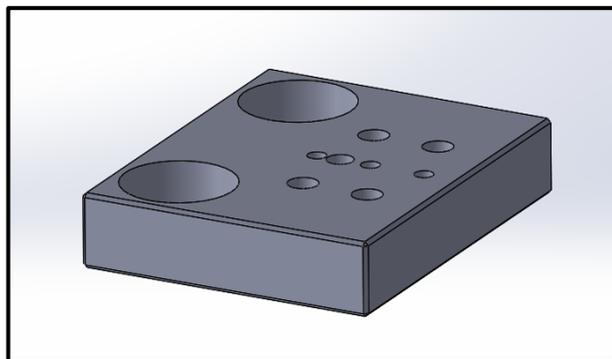


Figura 6. Placa superior

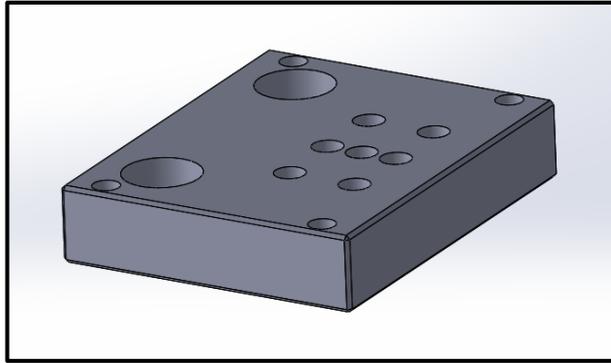


Figura 7. Placa inferior

1.6. Operaciones o procesos de corte

1.6.1. Punzonado

Se denomina así al corte de chapa metálica, a la operación mecánica que por medio de herramientas se obtiene la separación en dos piezas mecánicas, obteniendo como resultado otra pieza diferente [4].

1.6.2. Corte - punzonado

Al perforar usando un punzón, el borde superior del orificio se redondea en la zona que el material es cortado hacia abajo, formando una porción de material denominada rebaba en la parte inferior por efecto del material removido.

Los elementos básicos del sistema de corte son: el punzón, porta punzón, la estructura que soportará los elementos anteriores y el mecanismo que permita que estos elementos realicen su función.

1.7. Holgura de corte

La holgura es el espacio o distancia entre los elementos de ajuste de un equipo de troquelado. La holgura entre los bordes cortantes permite que se unan las fracturas y la porción fracturada del borde cortado obteniendo una apariencia limpia [4].

En el proceso de troquelado, la separación existente entre dos elementos de corte depende del espesor y naturaleza del material a trabajar para la cual la holgura de corte puede variar.

Para un acabado óptimo de un borde cortado, es necesario una holgura apropiada. A continuación, se muestra un esquema de los elementos que intervienen en el corte, así como también la holgura de corte.

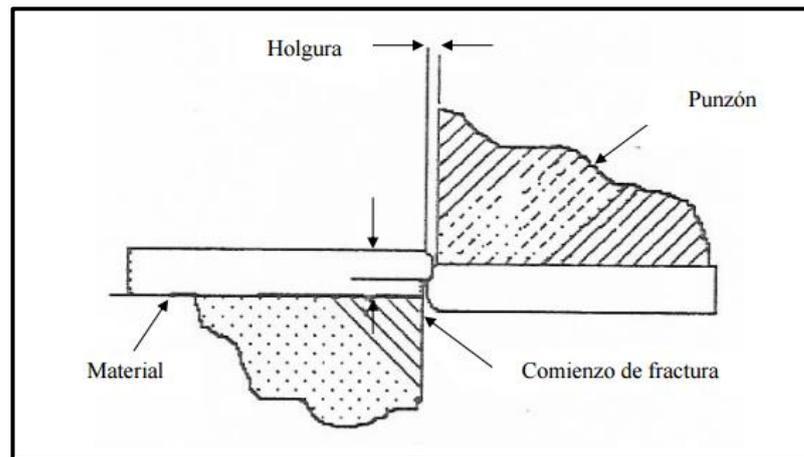


Figura 8. Proceso de punzonado [4].

1.8. Clasificación según su holgura

1.8.1. Grupo 1

Aleaciones de aluminio en todas sus durezas. Se considera una holgura promedio de 4,5% del espesor del material para realizar corte y perforación [4].

1.8.2. Grupo 2

Aleaciones de aluminio, latón, todas las durezas, aceros laminados en frío, completamente recocidos; aceros inoxidable blandos. Se utiliza una holgura promedio del 6% del espesor del material para el corte y perforado normal [4].

1.8.3. Grupo 3

Aceros laminados en frío, medio duro, acero inoxidable, medio duro y duro. Se trabaja con una holgura promedio de 7,5% para el corte y perforado del material [4].

1.9. Principales fenómenos que se manifiestan durante el corte de material

1.9.1. Etapa 1

Deformación elástica, el punzón entra en contacto y a su vez ejerce presión sobre la lámina metálica donde los esfuerzos empiezan a sobrepasar el límite elástico llegando a la deformación [4].

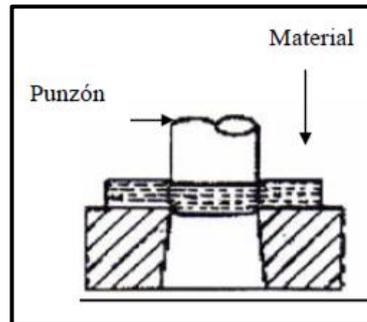


Figura 9. Deformación elástica [4].

1.9.2. Etapa 2

Deformación plástica, el punzón penetra forzosamente en la materia prima ejerciendo una acción, produciéndose grietas en el material debido a la concentración de tensiones, esto hace que se provoque el corte o bocado al desplazarse dentro del troquel y obteniendo como resultado el cizallamiento, de esta etapa se origina el nombre de corte por cizallamiento [4].

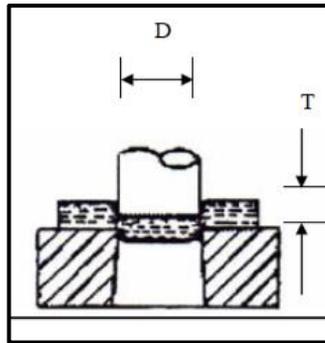


Figura 10. Deformación plástica [4].

1.9.3. Etapa 3

Fractura, la presión ejercida por el punzonado continúa de manera constante presentando fracturas iniciadas en los bordes del corte del punzón y el troquel, estos son los puntos de mayor concentración de esfuerzos. Las fracturas van extendiéndose, de esta manera el corte se completa y el bocado es separado de la materia prima original [4].

El punzón entra en la abertura de la matriz empujando ligeramente el bocado o pieza de corte por debajo del borde del troquel.

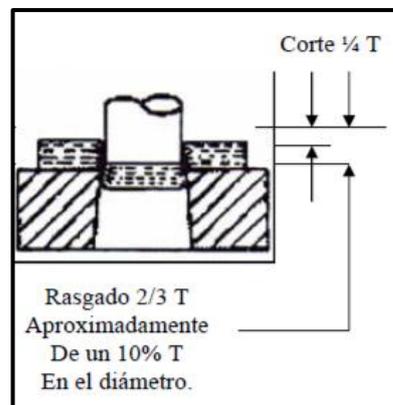


Figura 11. Fractura [4].

1.10. Variación según la holgura de corte

1.10.1. Holgura escasa

En el caso de que la holgura entre matriz y punzón sea escasa predominará una zona lisa presentando una superficie similar al mecanizado de pulido o rectificado, en este caso se presenta un perímetro de rebaba muy exagerado y poco uniforme alcanzando valores de 0,5 a 0,8 mm de altura por 0,1 mm de espesor en chapas de acero dulce con resistencia de 40 kg/mm² [4].

Por tal motivo la operación de corte se realiza más de prisa que en casos posteriores, precisando más fuerza de corte. Las paredes sufren erosión y también rozamiento de la chapa cortada.

1.10.2. Holgura correcta

Presenta la zona lisa una superficie similar al mecanizado fino, pero casi nada de brillo. Existe desaparición de generación de rebabas cortantes que no alcanza a 0,1 mm de altura y para lo cual los datos prácticos nos indican que para cortar chapas de acero dulce es necesario un 5 a 12% de material, y para acero semi dulce, o de bajo carbono hasta 20%, para espesores de 0,6 a 1mm [5].

1.10.3. Holgura excesiva

Este caso se presenta como un defecto en el corte por la falta de material en este caso la chapa metálica en el macho de corte y la matriz. Se da por el sobre uso de las herramientas reflejándose en el producto como defecto de marcado sobre el elemento más débil o también por un mal montaje de las mismas [5].

1.10.4. Holgura nula

La holgura de los elementos es muy reducida, de orden 1% del espesor del material, esto quiere decir diez veces menor de la holgura de un troquel normal, con este caso se obtiene precisión y cortes limpios [4].

1.11. Límite elástico

El criterio de límite elástico en cuanto a los diferentes estados de carga, un material puede estar en diferentes estados mecánicos, se llama estado límite a aquel que delimita dos zonas en las que las propiedades del material son diferentes.

Estas propiedades o límites de comportamiento se determinan en laboratorios mediante ensayos, de esta forma se definen estados límite como son de fatiga, elasticidad, rotura [6].

En el esquema siguiente se muestran las zonas o etapas que pasa un material dependiendo de sus propiedades mecánicas.

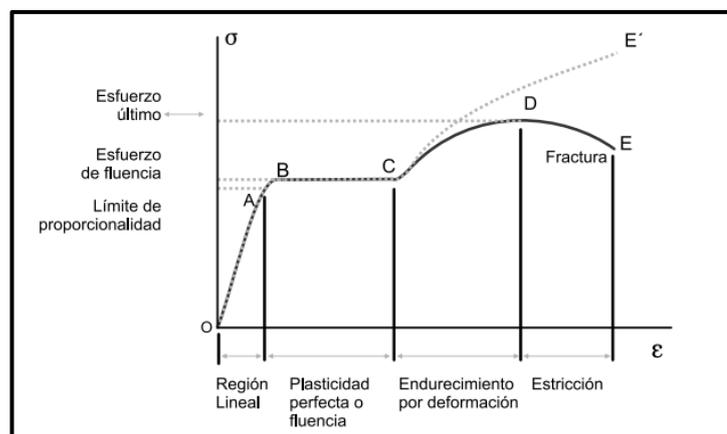


Figura 12. Gráfica esfuerzo – deformación [6].

1.12. Esfuerzo que interviene en la solución

El esfuerzo equivalente Von Misses o teoría de la energía de distorsión o deformación máxima predice que la falla por fluencia da lugar cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en compresión o tensión del mismo material [7].

Si existe caso de tensión simple (σ), entonces la fluencia puede ocurrir cuando $\sigma \geq S_y$. Por lo tanto, se puede considerar como un esfuerzo sencillo, equivalente o efectivo del estado general total del esfuerzo dado. Este esfuerzo efectivo se denomina esfuerzo de Von Misses, (σ') [7].

Este método de distorsión es el mejor estimador de falla para materiales que están sometidos a carga estática o para esfuerzos normales, cortantes o combinados totalmente reversibles. Este método puede calcular por medio de los esfuerzos máximo y mínimo los esfuerzos biaxiales [8].

1.13. Detalle de matriz

1.13.1. Pieza de detalle

El grupo más común en el que se pueden dividir estas piezas denominadas arandelas planas es dependiendo de su función, la forma puede ser redonda, cuadrada, hexagonal, rectangular [9].

En la figura siguiente se muestra arandelas redondas:



Figura 13. Arandelas de varios diámetros [9].

Detalle y medidas de arandela redonda plana:

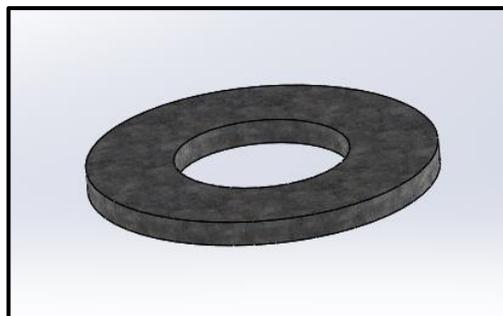


Figura 14. Arandela en acero galvanizado

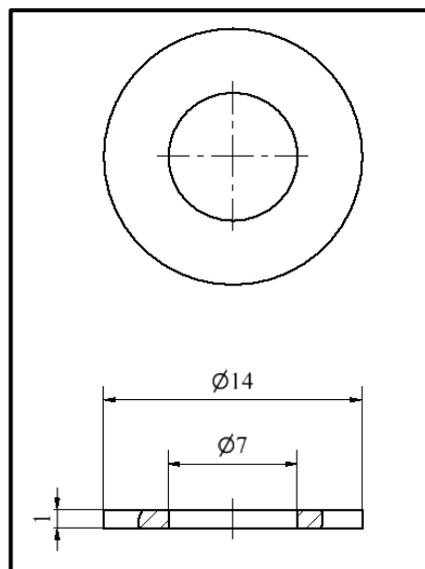


Figura 15. Diámetros y espesor de arandela

1.13.2. Troquel para fabricación de arandelas

Vista de ensamble de troquel modelado en Software SolidWorks basado en características de matricería construida previamente por la empresa.

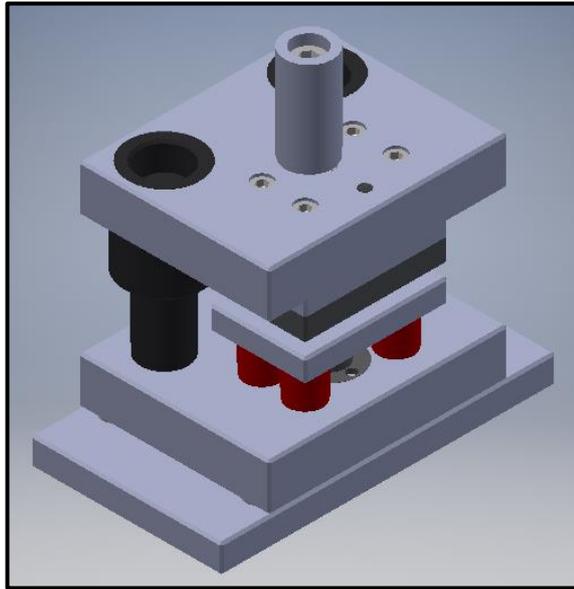


Figura 16. Troquel para fabricación de arandelas

CAPÍTULO II

CÁLCULOS DE MATRICERÍA

2.1. Materiales

Las arandelas planas pueden ser fabricadas en diferentes tipos de materiales incluyendo los siguientes:

Acero al carbono, acero inoxidable, cobre, titanio, aluminio, caucho, plásticos, teflón, nylon, teflón, zinc [9].

El presente estudio trata sobre el acero al carbono.

Se define como una aleación o combinación de hierro y carbono, es altamente refinado, su fabricación comienza con la reducción del hierro puro.

De acuerdo con los porcentajes de carbono se pueden clasificar:

- de 0,05% a 0,15% se llama acero muy dulce
- de 0,25% a 0,40% acero dulce o de bajo carbono
- de 0,55% a 0,65% acero de alto carbono
- de 0,65% a 0,75% acero para resortes
- de 0,80 a 0,90% acero perlítico
- de 1,1% a 1,3% acero muy duro

El aumento en porcentaje de carbono en el acero incrementa su resistencia mecánica y dureza, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que se reduzca la tenacidad y la ductilidad. Ver anexo 1

Resistencia a la rotura y al corte de los aceros laminados

La tabla del anexo 1 proporciona algunos valores de resistencia a la rotura K_c correspondientes al acero laminado.

2.2. Fuerzas

2.2.1. Fuerza de corte

El cálculo de la fuerza de corte sirve para determinar la potencia necesaria para realizar la operación siendo esta la que se debe vencer para cortar una pieza y seleccionar la máquina óptima para el trabajo.

El punzón de corte, en el momento que baja y entra en contacto con la chapa metálica, inicia el esfuerzo de compresión, seguida del punzonado que origina el corte. En el contorno generado por el macho interno y la matriz permanece una presión continua, y una reacción que se opone por parte de la chapa. El punzón mantiene la presión hasta que supera la resistencia a la cizalladura del material de la chapa dando lugar a fibras las cuales permiten el corte del material.

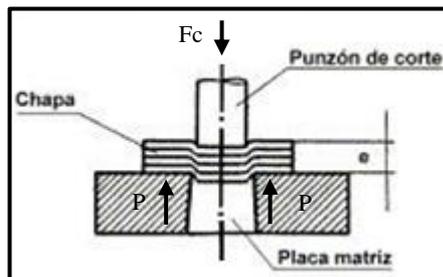


Figura 17. Fuerza de corte

Este esfuerzo es directamente proporcional al perímetro que se requiere cortar, al espesor de la chapa y depende también de la dureza del material en tanto su resistencia K_c o σ al cizallamiento [4].

Datos:

Material: Acero galvanizado

Espesor = 1mm

Esfuerzo al corte = $\sigma = 70 \text{ kg/mm}^2$

Ecuación siguiente [1]:

$$F_c = p \cdot e \cdot \sigma \quad \text{Ec. 1}$$

F_c = Fuerza necesaria para el corte en Kgf

p = perímetro

e = espesor de chapa metálica en mm

σ = Esfuerzo al corte kg/mm^2

Se tiene:

Diámetro exterior de 14mm

Mediante software de cálculo o manualmente se calculan valores de perímetro y fuerza de corte descritos a continuación de acuerdo a los diámetros requeridos [10].

Donde el perímetro es [1]:

$$p = \pi \cdot D \quad \text{Ec. 2}$$

p = perímetro

D = diámetro

$$p = \pi \cdot (14)$$

$$p = 43,982 \text{ mm}$$

Reemplazar en ecuación 1:

$$F_c = p \cdot e \cdot \sigma$$

$$F_c = (43,982) \cdot (1) \cdot (70)$$

$$F_c = 3078,76 \text{ kgf}$$

2.2.2. Fuerza de extracción

Esta fuerza es necesaria para extraer del punzón el material cortado de la chapa o fleje, depende además de las características anteriores como es el ancho del recorte adherido al punzón [11].

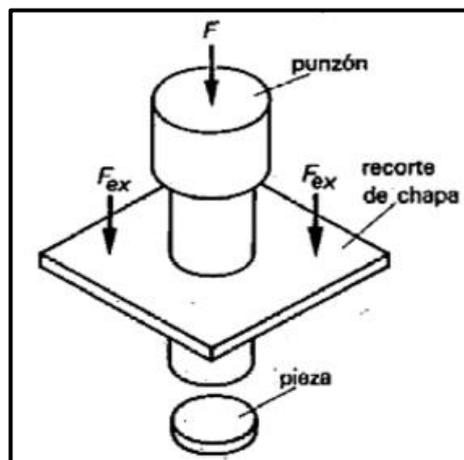


Figura 18. Aplicación de fuerza de extracción [11].

El valor por calcular está en función de la fuerza de corte en porcentajes [11].

- 7% del valor de la fuerza de corte.
- 3 a 4%, si el corte presenta entrantes o solo es importante en algunos determinados lados.
- 2% cuando el recorte adherido mide los anchos mínimos normales.

Punzón cilíndrico [1].

$$F_{ex} = (0,07) \cdot F_c \quad \text{Ec. 3}$$

$$F_{ex} = (0,07) \cdot (3078,76 \text{ kg})$$

$$F_{ex} = 215,513 \text{ kgf}$$

2.2.3. Fuerza de expulsión

Esta fuerza se define como el esfuerzo necesario para expulsar el elemento cortado de la matriz [12].

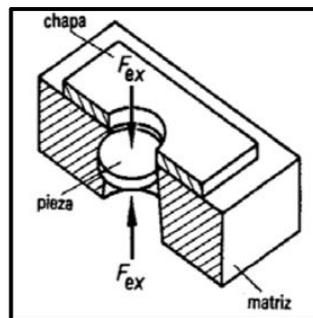


Figura 19. Aplicación de fuerza de expulsión [12].

El valor se estima en 1,5 % de la fuerza de corte como máximo [1].

Por lo tanto:

$$F = (0,015) \cdot F_c \quad \text{Ec. 4}$$

$$F = (0,015) \cdot (5000 \text{ kg})$$

$$F = 75 \text{ kgf}$$

2.3. Ángulo de escape de la matriz

El punzonado genera un corte en la chapa metálica el cual no es vertical, este ángulo formado depende de la naturaleza del material y oscila entre 1° y 6° representado por el signo alfa en la (figura 19), es necesario porque inmediatamente después del proceso de cizalladura al recuperarse elásticamente tiende a quedar atrapado en el agujero de la matriz, esa fricción del elemento cortado con las paredes de la matriz impide una salida rápida generando inconveniente para el siguiente punzonado y resultando un aumento en la energía del corte [13].

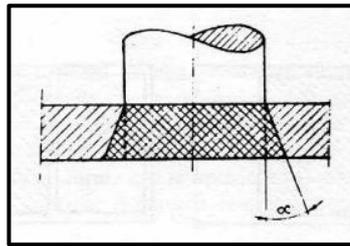


Figura 20. Ángulo de escape [13].

El agujero de la matriz debe incrementar al aumentar el espesor de la placa, de manera que las fuerzas de fricción se reduzcan a medida que el elemento descienda por el agujero con el objetivo de expulsar el material recortado.

El cálculo del ángulo es directamente proporcional al espesor del material a cortar.

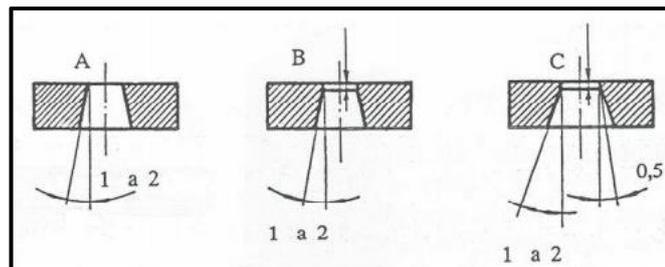


Figura 21. Proceso de corte detallando el ángulo para la expulsión [13].

2.4. Juego punzón y matriz

El punzonado da lugar a que el agujero practicado en el fleje sea más ancho por la cara de salida de la pieza. Este juego facilita el corte, es importante adaptar la matriz al ancho.

El juego depende del ángulo de escape mencionado anteriormente, por ende, depende del material y del espesor de la chapa [11].

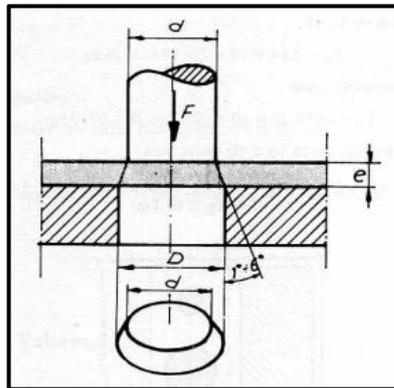


Figura 22. Juego punzón y matriz [11].

2.4.1. Valores que se adopta para el juego:

$D - d = 0,052 \times e$ para latón y acero suave

$D - d = 0,062 \times e$ para acero semiduro

$D - d = 0,072 \times e$ para acero duro

$D - d = 0,1 \times e$ para aluminio [12].

Entonces:

$$D - d = 0,07 \times e$$

Ec. 5

$$D - d = 0,07 \times (1mm)$$

$$D - d = 0,07$$

Diámetro punzonado interior

Diámetro punzón:

$$d_1 = 7 \text{ mm}$$

Diámetro matriz [12]:

$$D_1 = d_1 + 0,07 \quad \text{Ec. 6}$$

$$D_1 = 7 + 0,07$$

$$D_1 = 7,07 \text{ mm}$$

Diámetro punzonado exterior:

Diámetro punzón:

$$d_2 = 14 \text{ mm}$$

Diámetro matriz [12]:

$$D_2 = d_2 + 0,07 \text{ mm} \quad \text{Ec. 7}$$

$$D_2 = 14 + 0,07 \text{ mm}$$

$$D_2 = 14,07 \text{ mm}$$

Con estos valores se logra que la arandela salga con las medidas requeridas, diámetro interior y exterior de 7 y 14 mm respectivamente.

2.5. Distancia de separación entre piezas

La separación S es el valor mínimo que garantice la rigidez de la tira de la chapa, esta condición indispensable evita daños en la matriz, elementos incompletos y por ende

su efecto provoca defectos en el mismo, ahora por otra parte una separación mayor influiría en desperdicio de material [4].

Ecuación de separación entre piezas [4]:

$$S = 1,5 \times e \quad \text{Ec. 8}$$

S = Separación mínima

E = espesor de la chapa

Por lo tanto:

$$S = 1,5 \times (1mm)$$

$$S = 1,5 \text{ mm}$$

2.6. Selección de prensa

De acuerdo con las necesidades de producción y que esta sea de manera óptima, conviene una prensa que supere la fuerza de corte de 3078,76 Kgf obtenida en la sección 2.2.1. la cual permita la elaboración de una pieza por cada golpe, disminuyendo así tiempos de fabricación.

De esta manera y con la fuerza de corte necesaria se utiliza la prensa en operación dentro de la empresa, la cual se muestra en la figura siguiente y que cumple las condiciones con una fuerza de corte de 5000 Kgf.



Figura 23. Prensa mecánica

Datos de la máquina:

Potencia: ¾ HP (0,55 KW)

Fuerza: 5000 Kgf

Altura útil: 13,5 cm

Voltaje: 110/220 (v)

Características del motor:

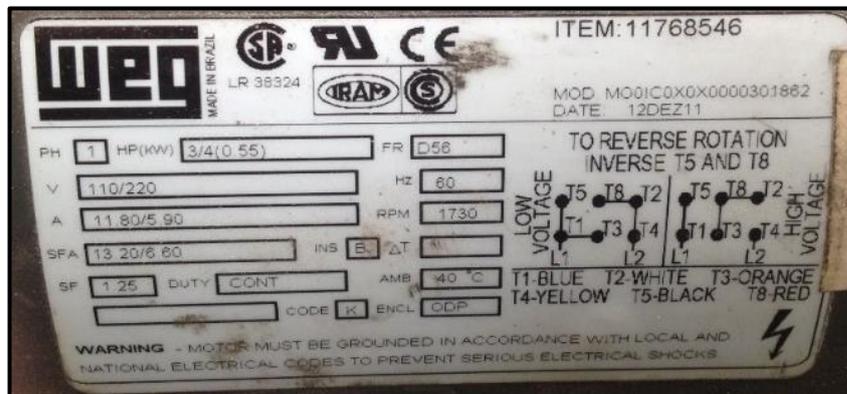


Figura 24. Placa del motor

CAPÍTULO III

DISEÑO EN SOFTWARE

3.1. Software ANSYS

Es un ecosistema de varios programas basados en ingeniería asistida por ordenador CAE (Computer Aided Engineering), para diseño, análisis y simulación de partes por medio de elementos finitos FEA (Finite Element Analysis), incluye fases de generación de mallado, ejecución y post proceso, ANSYS ejecuta análisis de elementos sometidos a fenómenos físicos usados en ingeniería y diseño mecánico, resuelve problemas físicos sometidos a diferentes esfuerzos relacionados a fluidos, vibraciones, térmicos, y aplicaciones específicas [14].

ANSYS Workbench es una plataforma de software donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas, Workbench despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multi física. La plataforma ANSYS Workbench incluye software y componentes para diferentes fenómenos [14].

3.2. Módulo de trabajo relacionado a corte de chapa metálica

3.2.1. Explicit Dynamics

Para la elaboración de este proyecto se escogió el módulo de trabajo de ANSYS, cuya herramienta de simulación ‘Explicit Dynamics’ que es un paquete computacional relacionado con elementos finitos. El análisis por elementos finitos es el método numérico de subdividir un sistema complejo en pequeñas partes de un tamaño seleccionado por el usuario denominados elementos.

Se trata de una herramienta de simulación que permite realizar el proceso de corte en la chapa metálica, y además un entorno virtual muy visual y dinámico.

Este tipo de análisis se utiliza primordialmente para el diseño y optimización, así como para el estudio e investigación de sistemas cuyo nivel de complejidad es tal que su solución manual es prácticamente imposible. Los sistemas que se ajustan a esta descripción presentan niveles de complejidad debido a su geometría y diseño [15].

3.3. Simulación

Para el desarrollo de la simulación y obtención de datos fue necesario variar ciertas características como el material, la geometría, esfuerzos, tiempos y los diferentes parámetros del software que permiten establecer condiciones y restricciones como es la velocidad del punzón, desplazamiento, fuerza, puntos o superficies de contacto. Estos parámetros se detallan más adelante con la respectiva selección en cada uno de los elementos del troquel.

Mediante software de modelado en 3d como ‘Design Modeler’ y ‘Space Claim’ se editó diferentes posibilidades de geometría del punzón para la simulación, partiendo del objetivo que es generar el corte punzonado en la chapa metálica por medio del troquel.

3.3.1. Posibles formas de geometría para simular ‘Geometry’

Una vez realizado el diseño del troquel se puede identificar ciertos elementos específicos que entran en contacto con la chapa para la generación del corte, componentes que permitan fijar parámetros suficientes para la simulación. Este procedimiento se realizó para reducir de alguna manera partes que no son necesarias

para ingresar en la simulación y disminuir tiempo en la generación del mallado y en la solución.

La figura a continuación importada desde SolidWorks a 'Design Modeler' muestra los elementos fijos y móviles.

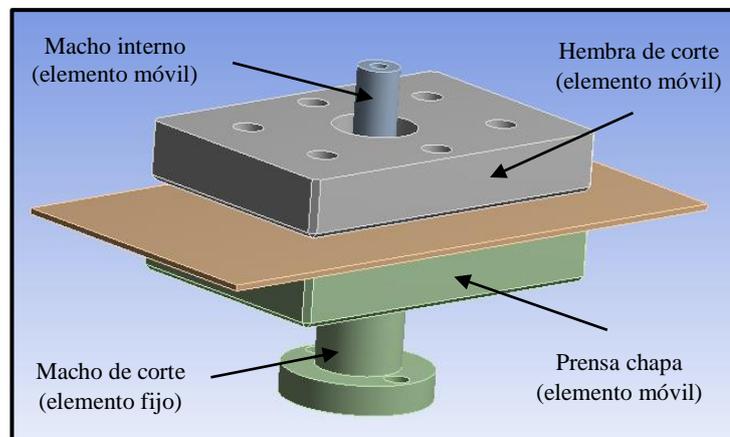


Figura 25. Geometría en Design Modeler

En la (figura 26), se observa el componente macho de corte haciendo contacto con la chapa metálica antes de realizar el corte punzonado.

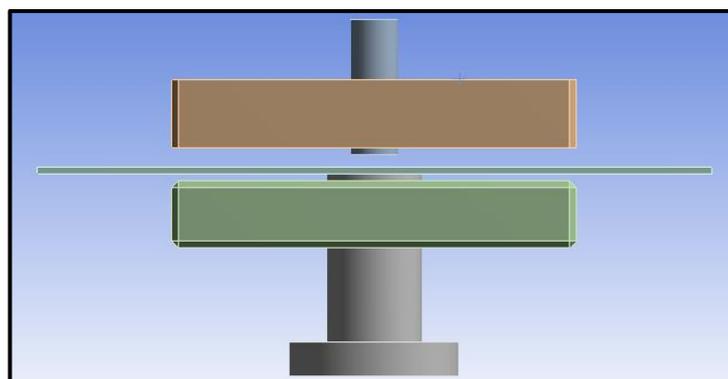


Figura 26. Vista frontal de la geometría en Design Modeler

En el siguiente esquema se muestra el macho interno, la chapa y el elemento prensa chapas del diseño importado en 'Space Claim' para su respectiva edición de variación de holgura con los diferentes diámetros requeridos para la matriz.

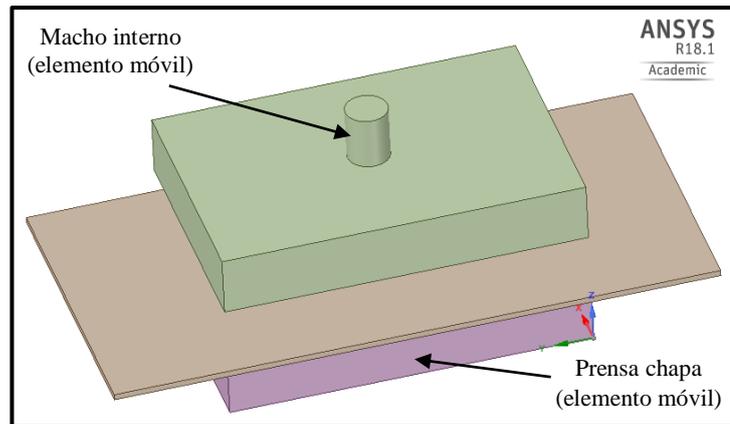


Figura 27. Geometría en SpaceClaim

3.3.2. Opciones de geometría

Ante los diferentes resultados inesperados de simulación donde no se generó el corte deseado con las geometrías anteriores se optó por reducir elementos con el objetivo de lograr el corte punzonado. Se observa en el siguiente esquema la geometría con dos únicos elementos y la respectiva chapa metálica, que al proceder con la simulación se intenta lograr y visualizar el corte por punzonado.

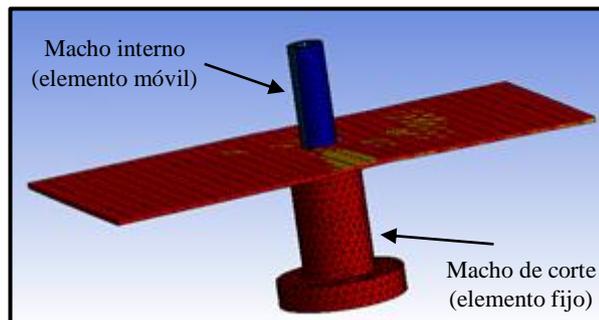


Figura 28. Macho interno y de corte con chapa metálica

3.3.3. Geometría eliminando macho de corte

De acuerdo con los resultados obtenidos se analizó la variación de geometría ingresada en la simulación, se optó por retirar el macho de corte con la idea de generar un único punzonado en la chapa metálica para lograr el desprendimiento del diámetro interior

utilizando el macho interno y prensa chapa como se observa en la figura a continuación.

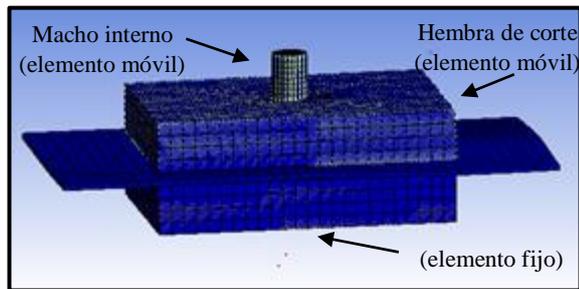


Figura 29. Troquel sin macho de corte

3.3.4. Generación del mallado 'Mesh'

La generación de malla es una herramienta que consiste en la creación de puntos denominados nodos a los cuales se asigna una densidad dependiendo del nivel de tensión mecánica. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos, formando geometrías de diferentes formas como por ejemplo triangulares, tetraedros, cuadrados, hexaedros.

El parámetro de malla utiliza todos los controles de 'mesh' definidos como entrada para generar un mallado [16].

Existen dos tipos de mallado:

- Mallado automático
- Mallado manual

3.3.4.1. Mallado automático

Considera tanto la geometría como la topología del modelo mediante algoritmos.

Este parámetro tiene la opción directa ‘Generate mesh’ que define el software por medio de reconocimiento de cada uno de los elementos, estableciendo un mallado de generado directo el cual permite proceder rápidamente a una solución.

En la (figura 30) se muestra como ejemplo este tipo de mallado.

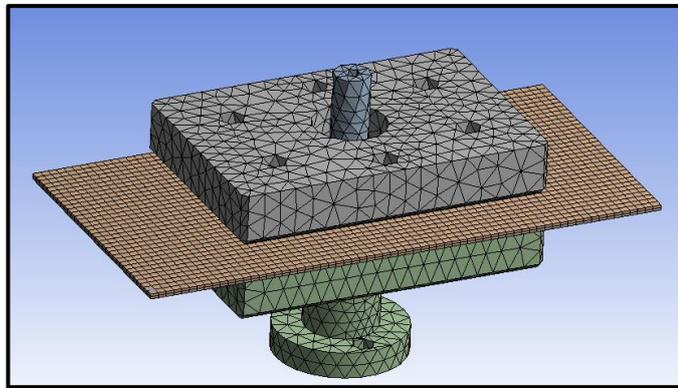


Figura 30. Mallado de geometría automática

3.3.4.2. Mallado manual

Esta opción permite mallar de forma más inteligente identificando lugares donde se requiera mallado más fino o más grueso, denominado también como refinamiento de malla.

3.3.5. Refinamiento de malla

Este procedimiento se utiliza para fines académicos más precisos con el fin de mejorar resultados y visualización, este refinamiento procede a añadir restricciones o características extras en el mallado para mejorar las particiones que van a ser calculadas en la solución, por esta razón es necesario refinar esta malla especialmente en el área de corte de la chapa metálica mediante una separación de sección generada mediante Design Modeler, la cual permita un mallado circular refinado tanto en las superficies como en las aristas de la geometría.

Para este refinamiento se utilizó 31736 nodos, 27794 elementos y los parámetros ‘edge sizing’, ‘body sizing’, ‘patch conforming method’ y ‘multizone’, los cuales permitieron generar una malla más fina.

Área definida para realizar el refinamiento de malla, la cual se somete al corte punzonado como se observa en la imagen siguiente.

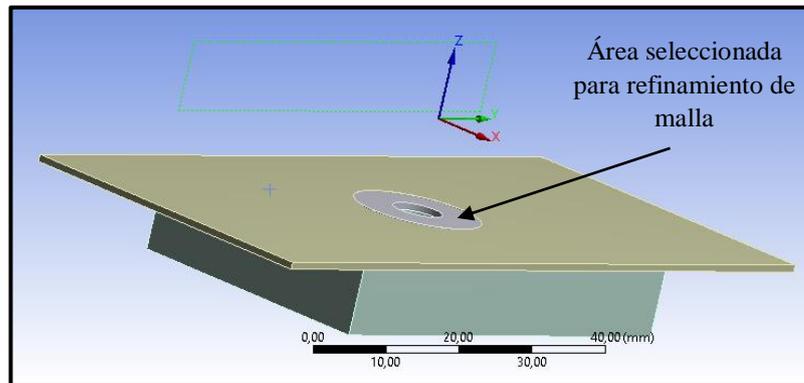


Figura 31. Sección para refinamiento de malla

En la figura a continuación se muestra el resultado del refinamiento de malla en la cual se puede observar las divisiones de las superficies y aristas, así como también en el espesor de la chapa.

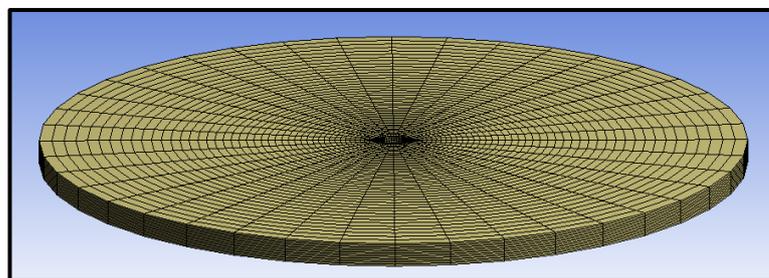


Figura 32. Mallado refinado

3.3.6. Selección de las partes de contacto ‘Contact región’

Dentro del parámetro de conexiones ‘connections’, existe una subdivisión de contactos ‘contacts’, el cual permite seleccionar restricciones a los elementos que entran en

contacto el momento de realizar el proceso de corte. Se asignó cuerpo de contacto ‘contact body’ a la matriz de corte con color rojo ubicado en la parte superior derecha de la siguiente figura y ‘target body’, al macho de corte con color azul en la parte inferior derecha de la misma, elemento el cual hace contacto final con la superficie de la chapa metálica.

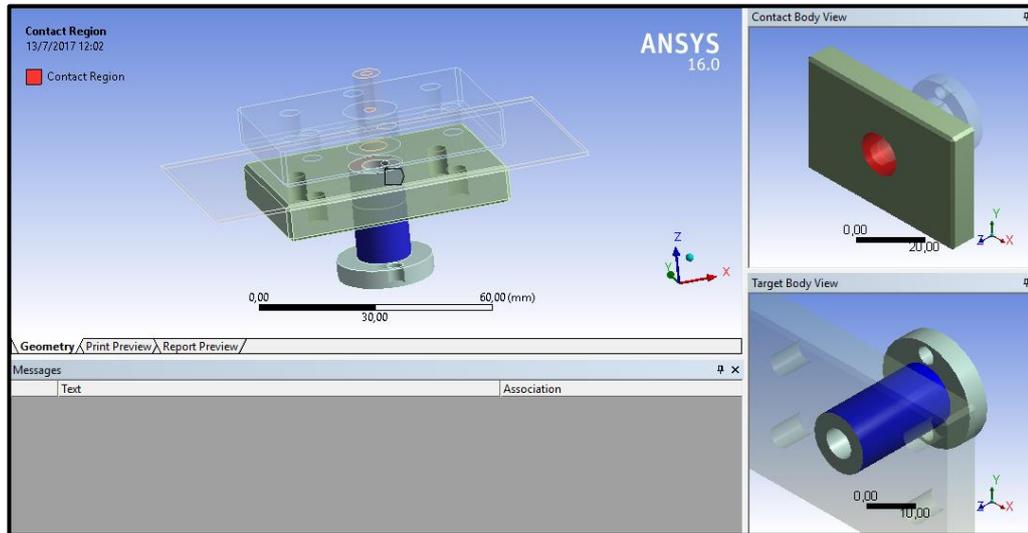


Figura 33. Condiciones de contacto

3.3.7. Determinar parámetro de fuerza ‘Force’

En el campo de la simulación uno de los parámetros más importantes es la fuerza ya que determina la teoría de falla y permite generar la fractura del material.

Dentro de la configuración de análisis ‘Analysis Settings’, se seleccionó el parámetro fuerza que en este caso esta direccionado en el eje z debido a las características de la prensa de cinco toneladas equivalente a un módulo de 49033 N, cuyo valor es asignado al punzón o macho interno.

En el siguiente esquema se observa una flecha, la cual representa el parámetro fuerza asignado al macho interno del troquel.

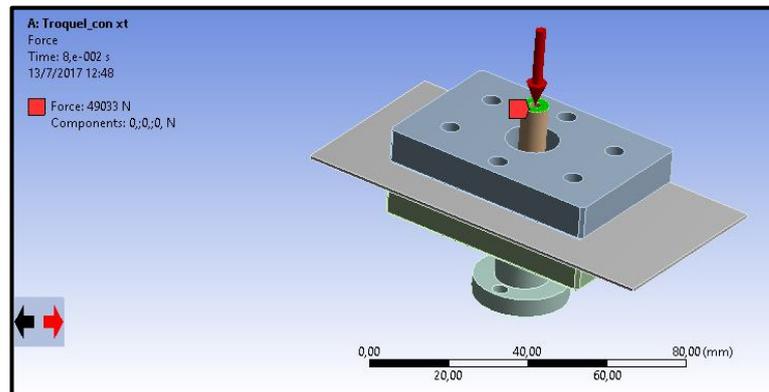


Figura 34. Asignación de fuerza

3.3.8. Determinar parámetro de velocidad 'Velocity'

Dentro de las condiciones iniciales 'Initial Conditions' es seleccionado el parámetro 'velocity' y es asignado a los elementos ubicados en la parte superior que son los que realizan el movimiento en el eje z, se trabaja con una velocidad de -50 mm/s para una prensa con las características mencionadas anteriormente.

En la figura a continuación de color azul se observa los elementos asignados para el parámetro de velocidad.

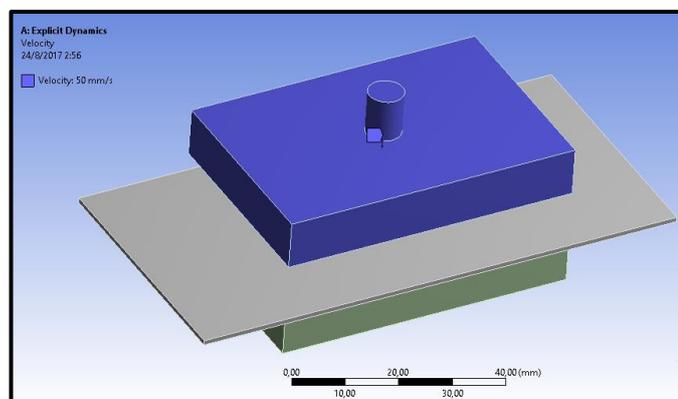


Figura 35. Asignación de velocidad

3.3.9. Determinar parámetro de desplazamiento ‘Displacement’

Se escoge este parámetro como restricción de desplazamiento con el objetivo de restringir movimiento a ciertos elementos, en este caso la restricción en el eje z que es el eje de interés, de esta manera la simulación restringe con un valor de 0 mm a los ejes x, y con posibilidad de movimiento. Este parámetro evita que los elementos seleccionados se dirijan fuera de su eje de coordenadas.

En la siguiente figura se observa en amarillo los elementos seleccionados para la restricción de desplazamiento.

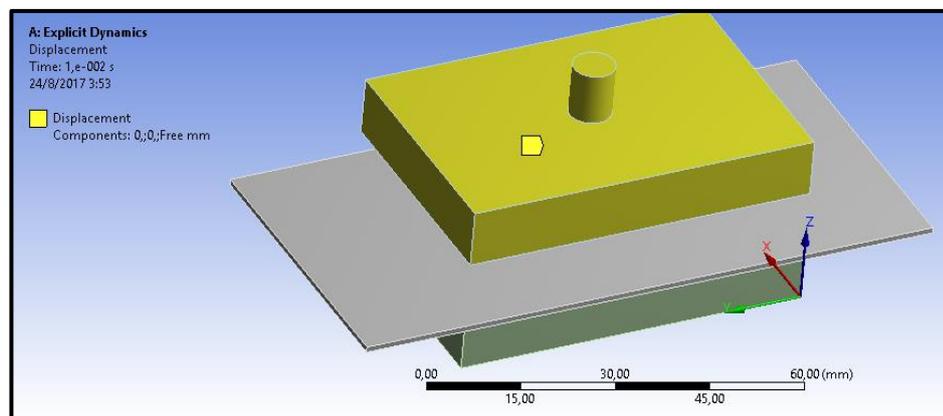


Figura 36. Asignación de desplazamiento

3.3.10. Selección de soportes fijos ‘Fixed support’

Este parámetro es asignado para restringir el movimiento a cualquier elemento asignado, esta opción se puede asignar tanto para las aristas, superficies o sólidos. Se asigna los elementos que dentro de un proceso de matricería van fijos por elementos de sujeción a la mesa de trabajo o base de la prensa.

Se restringe el movimiento con este parámetro a la geometría seleccionada tanto al macho de corte como al sólido prensa chapas mediante la opción de selección cuerpo entero ‘body’ para restringir a todo el elemento, basándose en la realidad del proceso.

Se asignó al elemento prensa chapa la restricción de movimiento de color azul como se observa en la imagen.

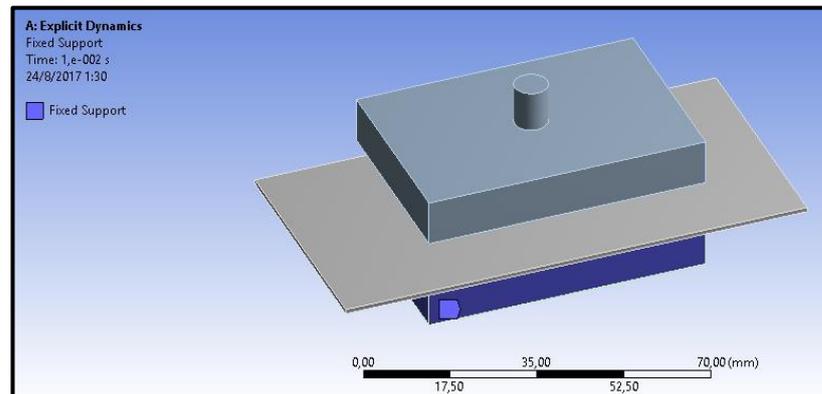


Figura 37. Parámetro seleccionado Fixed Support

3.3.11. Resultados inesperados en la simulación

Dentro de las simulaciones desarrolladas se presentaron varias fallas, esto se produjo por falta de restricciones y conocimiento de los parámetros mencionados anteriormente, esto se fue analizando y mejorando para reunir las condiciones necesarias, así como su aplicación y sus diferencias para simulaciones posteriores.

En el esquema siguiente se muestra la restricción de la superficie posterior de la chapa metálica señalada de color azul.

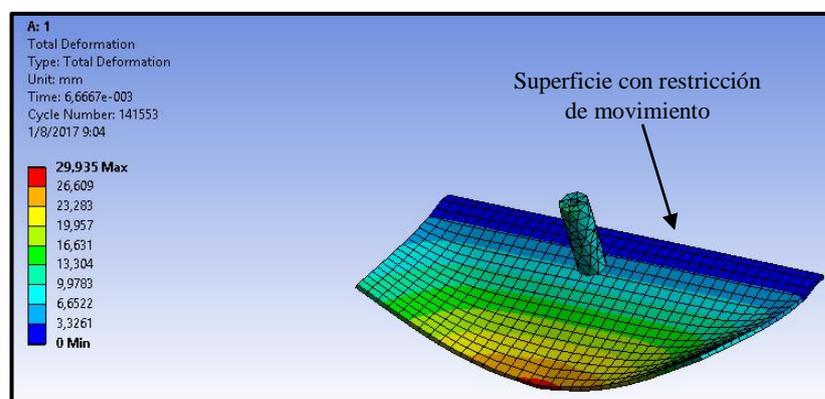


Figura 38. Chapa con soporte fijo

Como resultado de esta simulación se observa que el resto de superficies se encuentran libres de manera que al generar el movimiento se observa como resultado pandeo en el área libre y falta de restricción de desplazamiento en el macho interno.

En la imagen a continuación se observa los resultados de la falta de restricción de movimiento 'displacement' para el macho interno en los ejes diferentes de z, siendo este un resultado negativo por esta razón se observa la inclinación en el macho interno con respecto a la matriz.

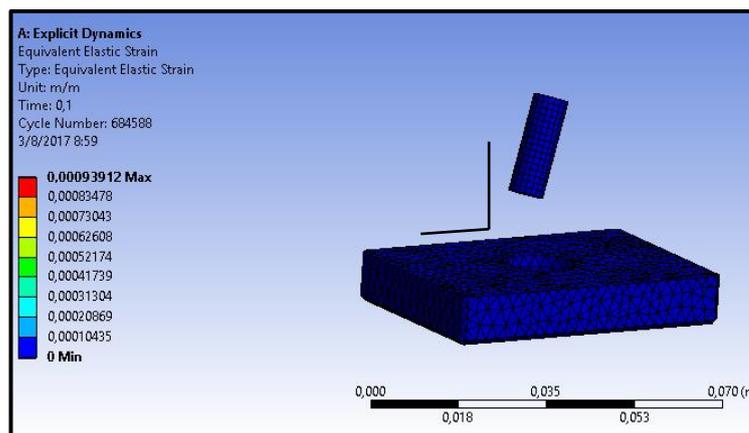


Figura 39. Punzón sin parámetro en los ejes x, y.

A modo de comparación ingresando diferentes fuerzas se puede observar en la (figura 40), la chapa fracturada y se puede atribuir este resultado de simulación a un exceso en el parámetro fuerza, además de mallado incorrecto sin refinamiento.

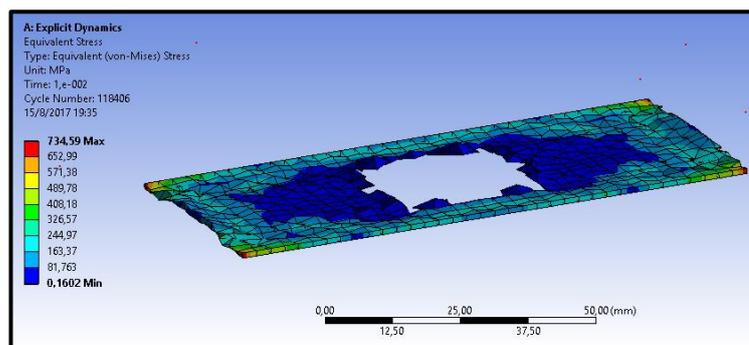


Figura 40. Chapa simulada con sobre esfuerzo

La deformación al contorno del golpe referido al diámetro del punzón ocasionado por la variación del parámetro fuerza muestra una deformación unitaria equivalente de 2,18 m/m. Se observa la deformación de color rojo que no es la suficiente para ocasionar ruptura del material.

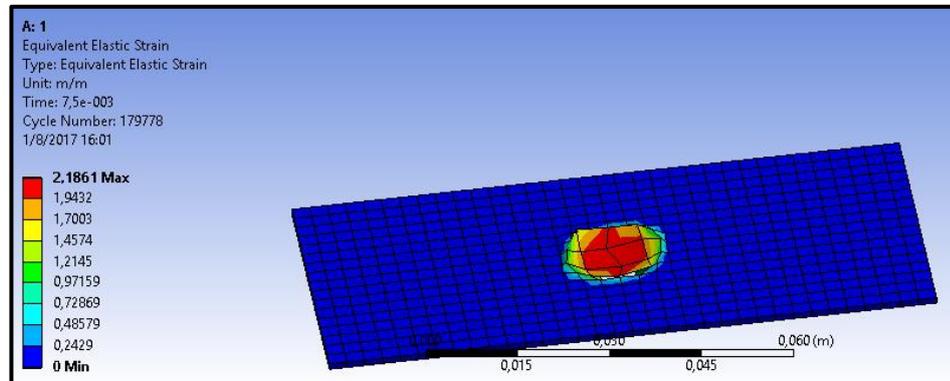


Figura 41. Deformación unitaria equivalente de la chapa

En la siguiente simulación se observa los resultados del aumento de los parámetros fuerza, velocidad y tiempo con relación a la figura anterior, donde se logra una deformación mayor en el contorno del área de corte ocasionados por el macho interno logrando un punzonado que visualmente no es el esperado.

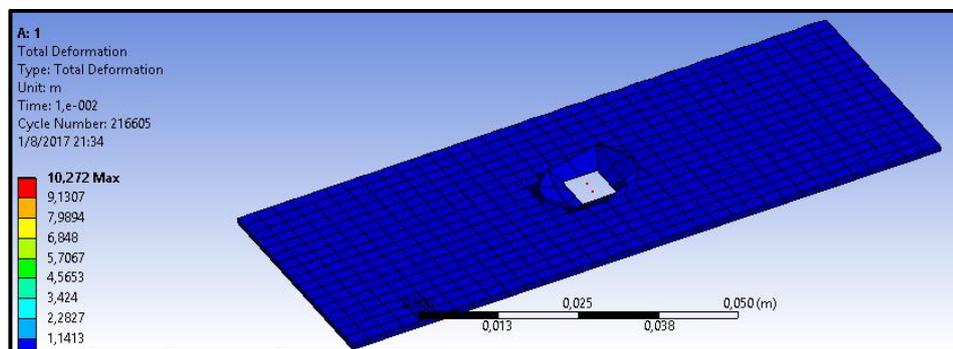


Figura 42. Deformación en el área de corte

Otro ejemplo de corte imperfecto se muestra en la siguiente simulación tomando en cuenta la falta de refinamiento del mallado en las superficies de corte.

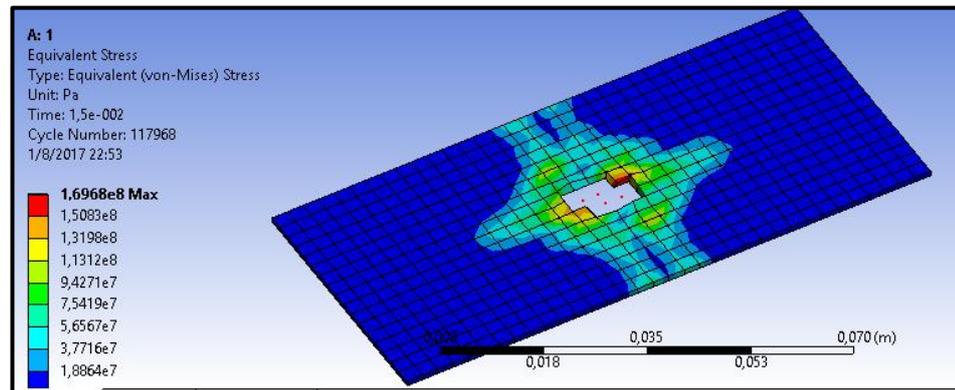


Figura 43. Esfuerzo en la chapa metálica

En el punzonado siguiente se presenta un esfuerzo máximo de 111,78 MPa, el cual no supera el límite elástico del material de 206980,61394 MPa como se puede observar en la gráfica una sección mínima visible de color rojo.

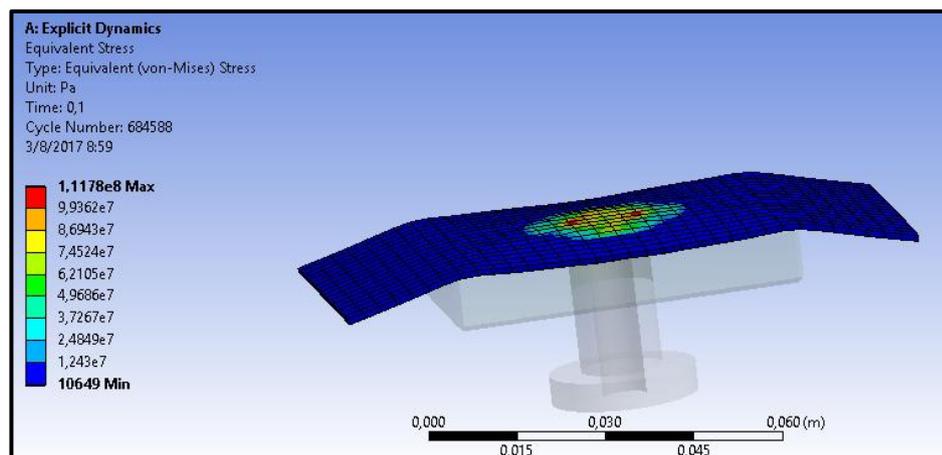


Figura 44. Esfuerzo mínimo en chapa

En la gráfica a continuación se observa que el golpe no tiene la suficiente fuerza para sobrepasar el límite de fluencia por esta razón se obtiene pandeo del material, para corregir este problema se seleccionó una restricción de soporte fijo en una superficie de la chapa metálica.

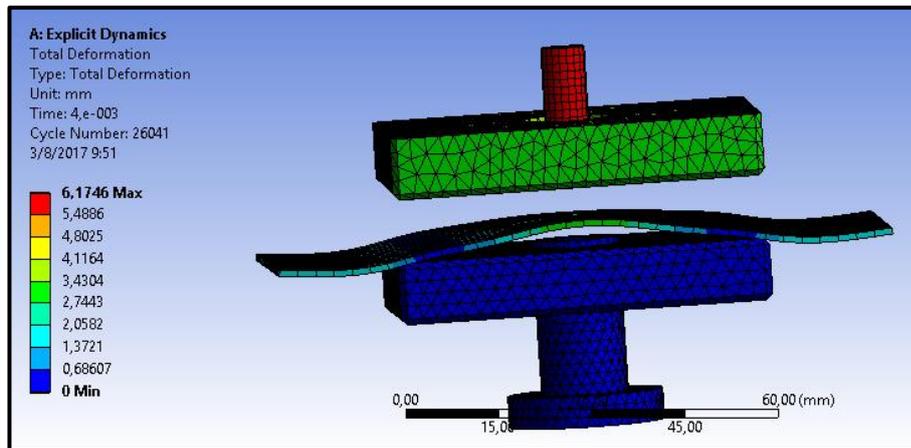


Figura 45. Pandeo del fleje

De color rojo se muestra la concentración de esfuerzo, el cual no es lo suficiente para lograr el corte, sin embargo, en la figura siguiente se observa los resultados del golpe ocasionado por el macho interno que inmediatamente genera una deformación elástica en la base del macho interno al entrar en contacto con la chapa.

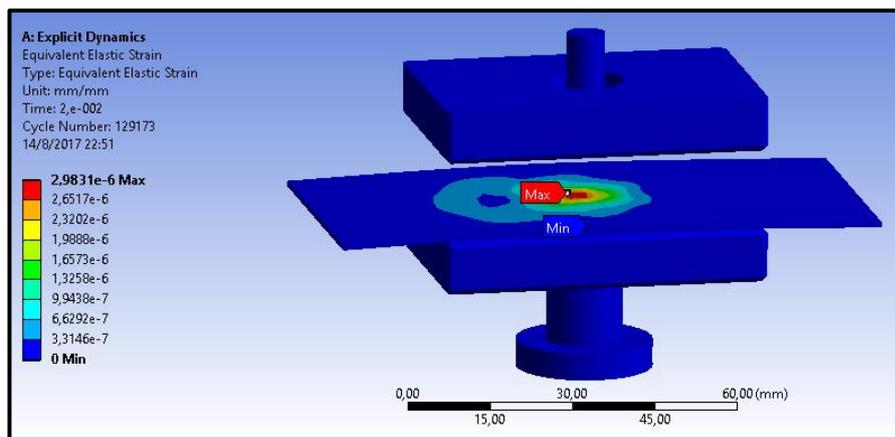


Figura 46. Deformación unitaria máxima y mínima del área de corte

3.3.12. Desprendimiento del diámetro interior o residuo

Al aumentar la fuerza en el macho interno se observa en la imagen a continuación el desprendimiento del material después del punzonado y a su vez la caída del diámetro interior, ocasionado por la fuerza de expulsión calculada anteriormente en el capítulo

dos. Así como también en la parte inferior se muestra la gráfica fuerza vs tiempo con los intervalos para observar una tabulación de datos para cada tiempo.

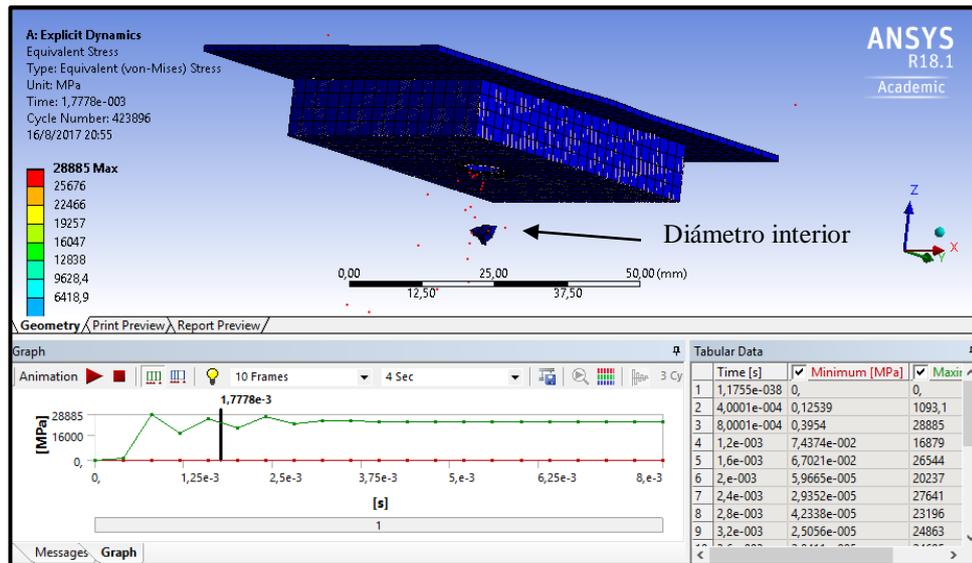


Figura 47. Fuerza vs tiempo

Se observa el corte del material formando la arandela de color azul en la imagen siguiente de las medidas requeridas por medio de un solo golpe con la fuerza y velocidad designada por el fabricante de la prensa mecánica.

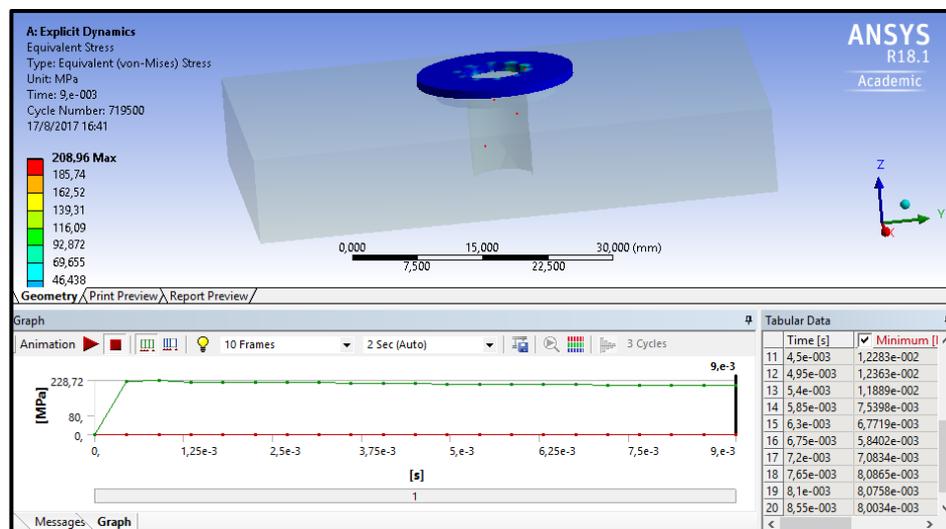


Figura 48. Corte de arandela por cada golpe

En la (figura 49) de la simulación a continuación se observa desprendimiento de material del fleje dando lugar a la formación del diámetro interior por medio del esfuerzo equivalente Von Misses generado del corte punzonado, así como también se observa el refinamiento de malla después del corte.

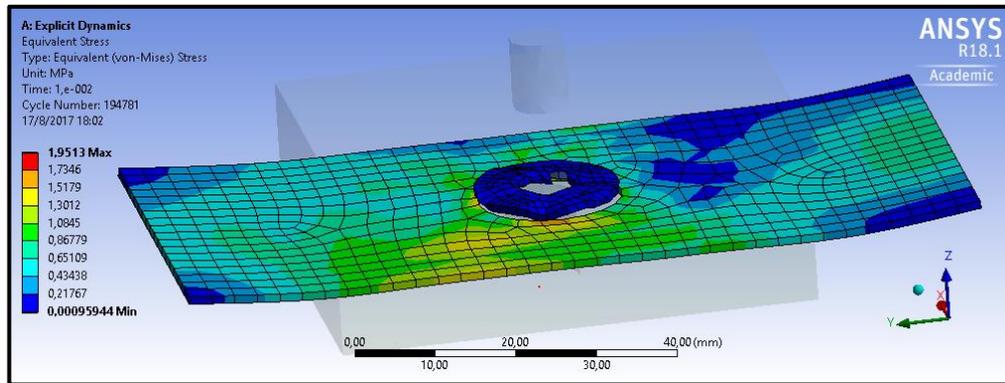


Figura 49. Esfuerzo equivalente

3.4. Simulación con diferentes materiales

A continuación, se busca una comparación de datos por medio de simulaciones a través de la variación de materiales de acuerdo con la resistencia al corte, se utilizó los mismos parámetros y restricciones en el software como es el caso de tiempo, soportes fijos, mismo mallado, restricción de desplazamiento, restricción a la chapa metálica como parte flexible, así como también los parámetros de fuerza con un módulo de 49033 N y velocidad de la prensa con valor de 50mm/s.

Se realizaron tres simulaciones detalladas a continuación:

Tabla 1. Materiales de simulación

rigidez / # de simulación	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3
Parte rígida	Steel 4340	Steel 4340	Structural Steel
Parte flexible	SS 304	Steel 1006	Iron

Se utiliza diferente material tomado de 'Engineering Data' de la biblioteca del software ANSYS tanto para la parte rígida en este caso el macho interno o punzón como para la parte flexible en este caso la chapa metálica.

3.4.1. Simulación 1

En la siguiente simulación se utiliza dos tipos de materiales obtenidos de la biblioteca del software ANSYS, tanto para la parte rígida el punzón como para la parte flexible la chapa metálica.

Parte rígida: Steel 4340

Parte flexible: SS 304

A continuación, se muestra imágenes de los resultados seleccionados de los parámetros de solución del software con el fin de observar y comparar criterios como deformación total, deformación direccional, deformación unitaria equivalente, esfuerzo equivalente Von Misses.

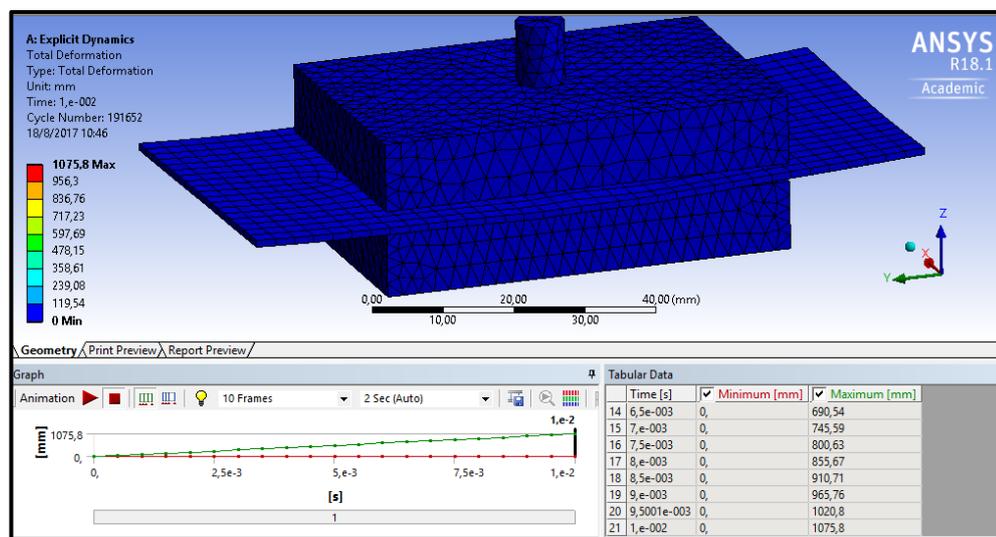


Figura 50. Deformación total

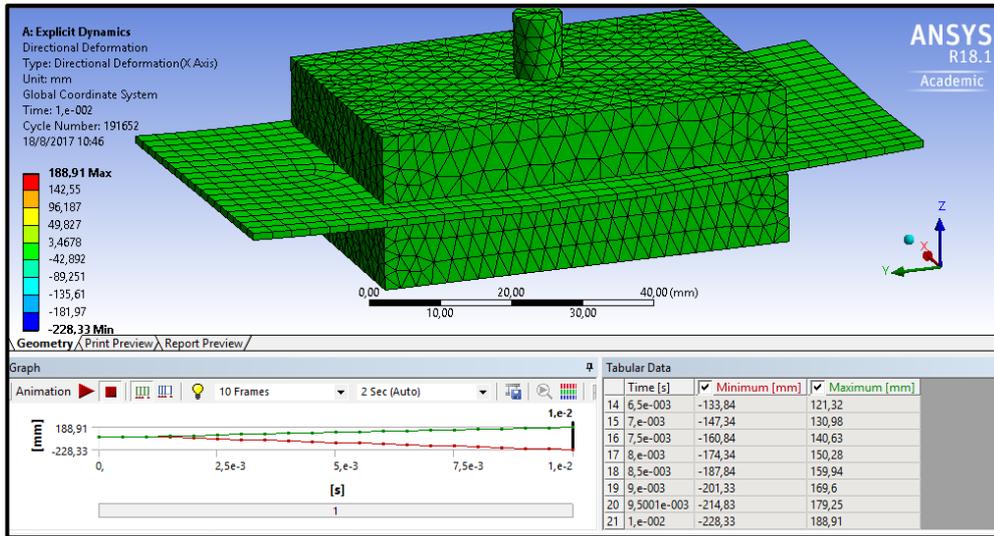


Figura 51. Deformación direccional

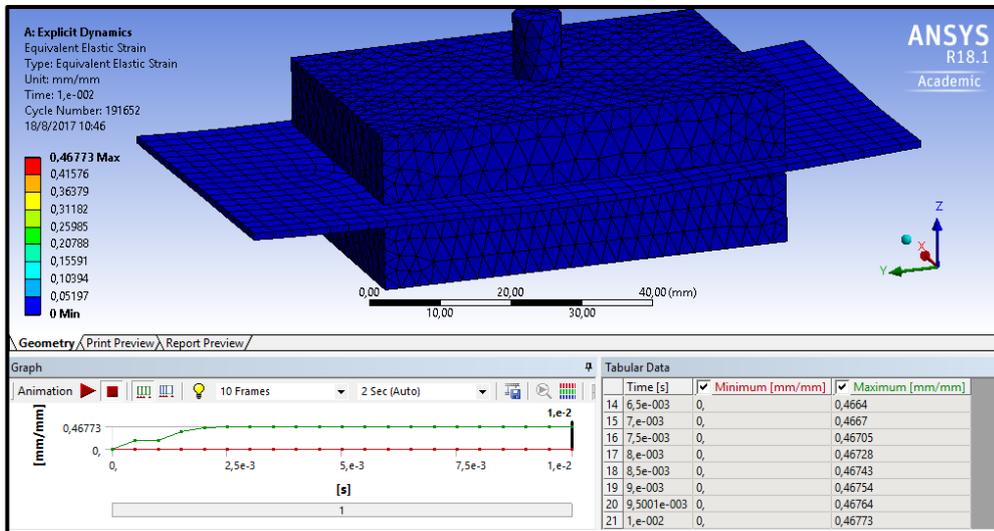


Figura 52. Deformación unitaria equivalente

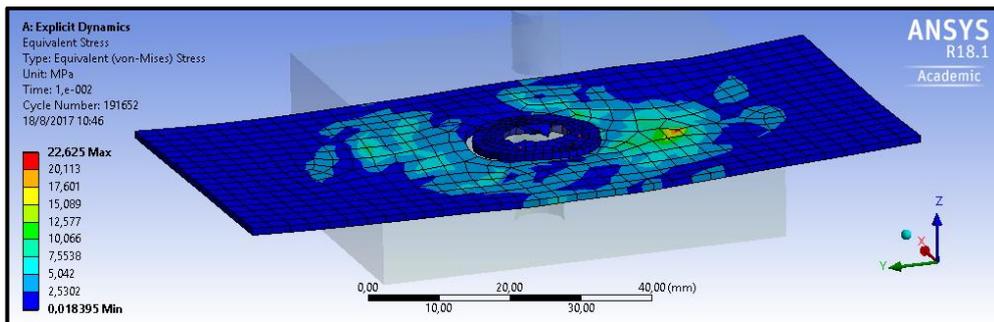


Figura 53. Esfuerzo equivalente Von Mises

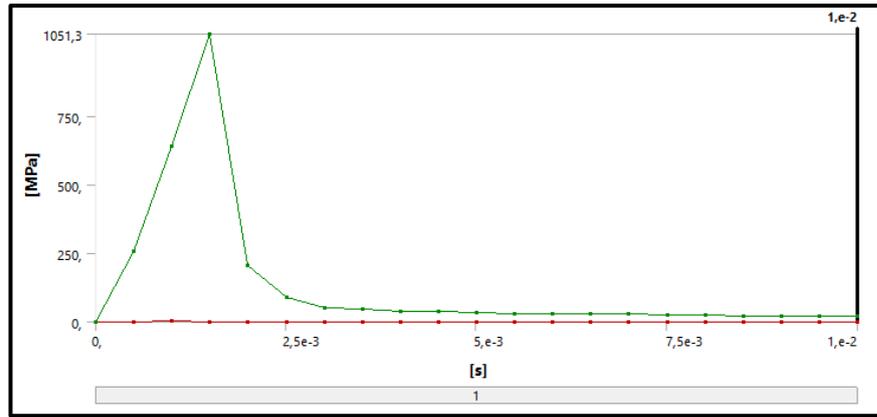


Figura 54. Gráfica esfuerzo vs tiempo

Tabular Data			
	Time [s]	✓ Minimum [MPa]	✓ Maximum [MPa]
1	1,1755e-038	0,	0,
2	5,0005e-004	0,77168	260,
3	1,e-003	2,1721	642,12
4	1,5e-003	1,251	1051,3
5	2,e-003	0,58924	208,32
6	2,5e-003	0,12591	92,258
7	3,e-003	0,74224	52,079
8	3,5e-003	7,4837e-002	45,89
9	4,e-003	0,14668	40,127
10	4,5e-003	0,11601	39,041
11	5,e-003	0,11577	35,849
12	5,5e-003	0,14487	31,065
13	6,e-003	4,2924e-002	28,33
14	6,5e-003	5,606e-002	29,683
15	7,e-003	7,0404e-002	28,389
16	7,5e-003	4,9916e-002	26,783
17	8,e-003	1,4533e-002	24,664
18	8,5e-003	2,7705e-002	22,762
19	9,e-003	2,3912e-002	22,137
20	9,5001e-003	2,1099e-002	22,33
21	1,e-002	1,8395e-002	22,625

Figura 55. Tabulación de datos

De las imágenes observadas anteriormente se observa un esfuerzo equivalente de 22,625 Mpa suficiente para causar la fractura del material flexible, así como también en la (figura 55) un esfuerzo máximo de 1051,3 MPa generado por el punzón.

3.4.2. Simulación 2

En la siguiente simulación se utiliza dos tipos de materiales obtenidos de la biblioteca del software ANSYS, tanto para la parte rígida el punzón como para la parte flexible la chapa metálica.

Parte rígida: Steel 4340

Parte flexible: Steel 1006

A continuación, se muestra imágenes de los resultados seleccionados de los parámetros de solución del software con el fin de observar y comparar criterios como deformación total, direccional, deformación unitaria equivalente, esfuerzo Von Mises.

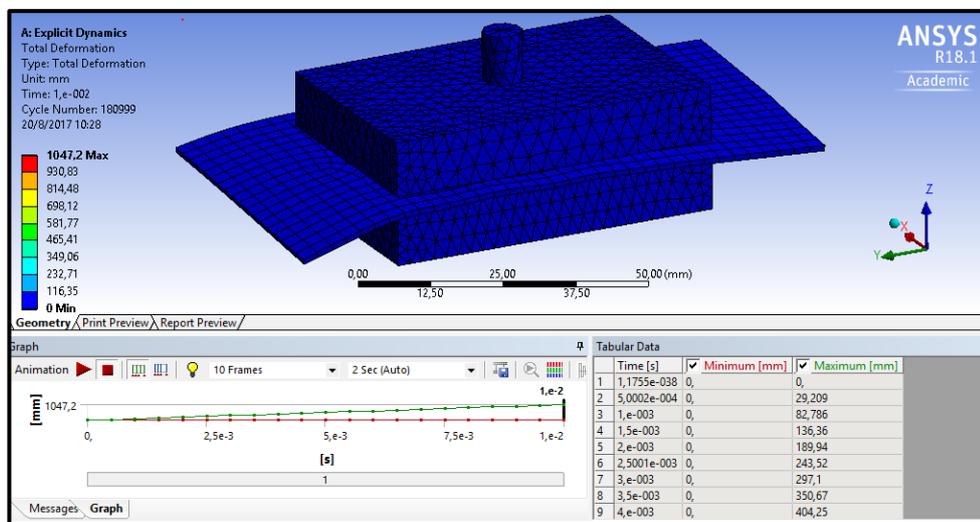


Figura 56. Deformación total

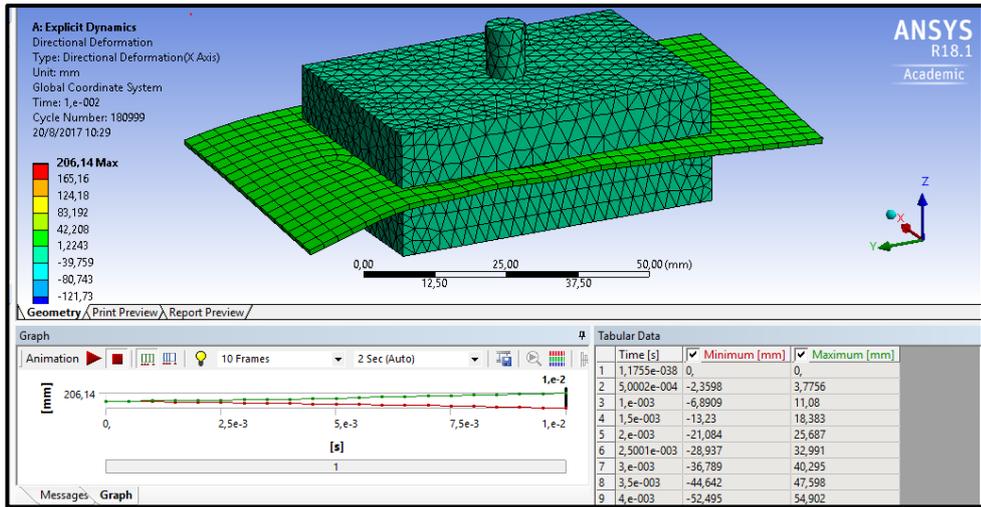


Figura 57. Deformación direccional

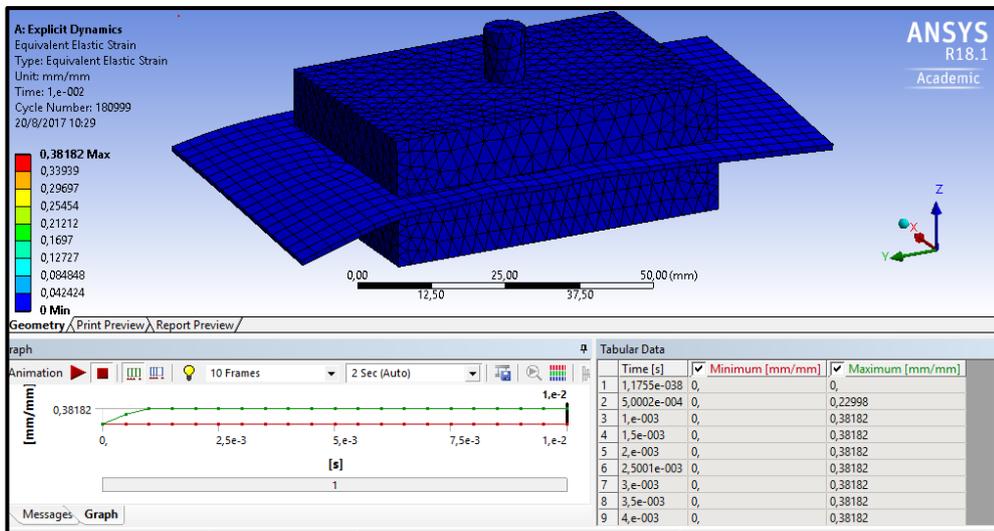


Figura 58. Deformación unitaria equivalente

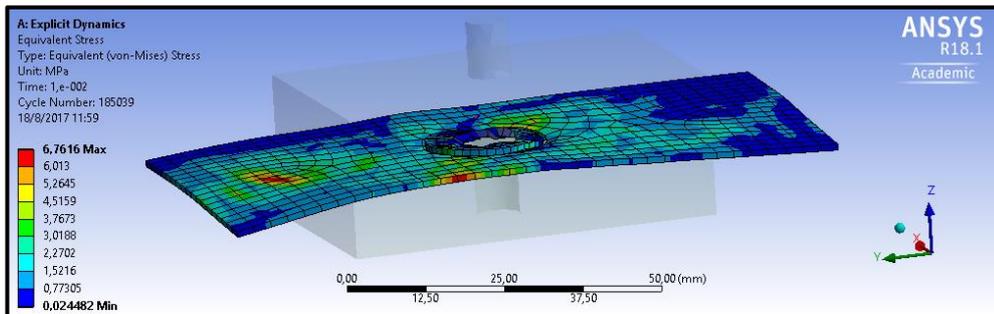


Figura 59. Esfuerzo equivalente

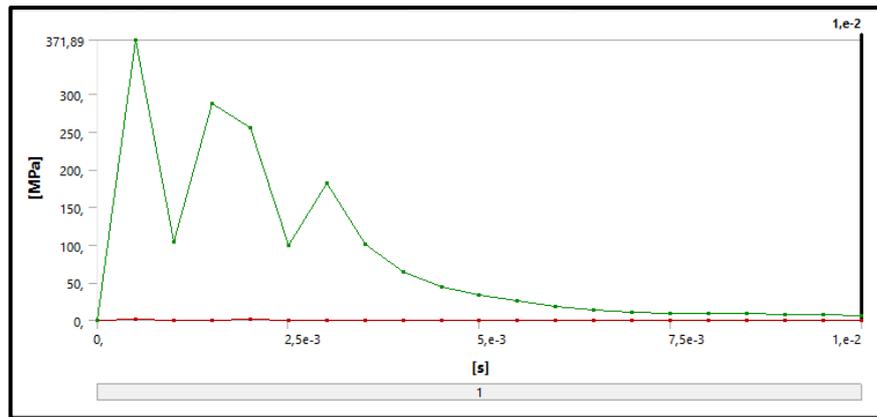


Figura 60. Gráfica esfuerzo vs tiempo

Tabular Data			
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1	1,1755e-038	0,	0,
2	5,0004e-004	1,5518	371,89
3	1,e-003	0,47309	104,28
4	1,5e-003	0,65936	287,68
5	2,e-003	1,0336	254,91
6	2,5e-003	0,33437	99,285
7	3,e-003	0,34049	181,36
8	3,5e-003	0,25768	101,53
9	4,e-003	0,45508	64,215
10	4,5e-003	0,11939	44,697
11	5,e-003	0,10027	34,404
12	5,5e-003	0,19351	25,784
13	6,e-003	2,1733e-002	18,536
14	6,5e-003	2,5626e-002	14,024
15	7,e-003	1,591e-002	10,502
16	7,5e-003	9,1559e-003	9,1988
17	8,e-003	4,6448e-002	8,6629
18	8,5e-003	9,4006e-002	8,8696
19	9,e-003	4,0144e-002	7,9891
20	9,5e-003	4,8422e-002	7,3856
21	1,e-002	2,4482e-002	6,7616

Figura 61. Tabulación de datos

En las imágenes observadas anteriormente se genera un esfuerzo Von Misses de 6,7616 Mpa el cual permite llegar a la fractura y a manera de comparación se concluye la disminución de esfuerzo equivalente con respecto a la simulación 1, por otra parte, se obtiene un esfuerzo máximo de 371,89 MPa generado por el punzón.

3.4.3. Simulación 3

En la siguiente simulación se utiliza dos tipos de materiales obtenidos de la biblioteca del software ANSYS, tanto para la parte rígida el punzón como para la parte flexible la chapa metálica.

Parte rígida: Structural Steel

Parte flexible: Iron

A continuación, se muestra imágenes de los resultados seleccionados de los parámetros de solución del software con el fin de observar y comparar criterios como deformación total, direccional, deformación unitaria equivalente, esfuerzo, esfuerzo Von Mises.

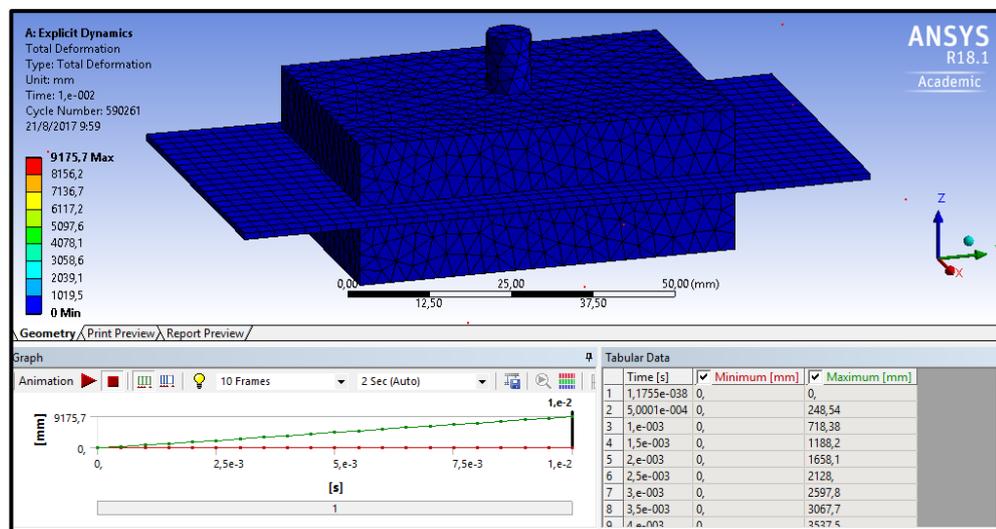


Figura 62. Deformación total

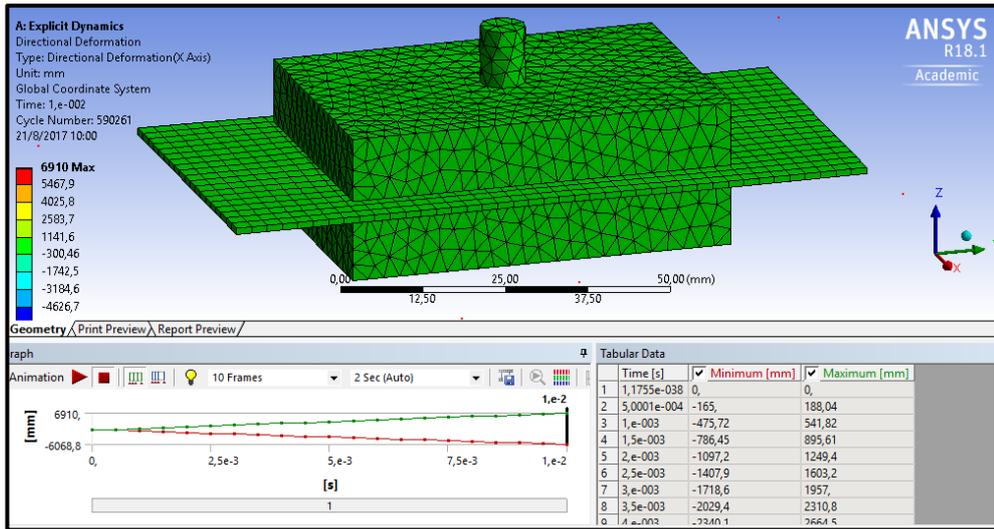


Figura 63. Deformación direccional

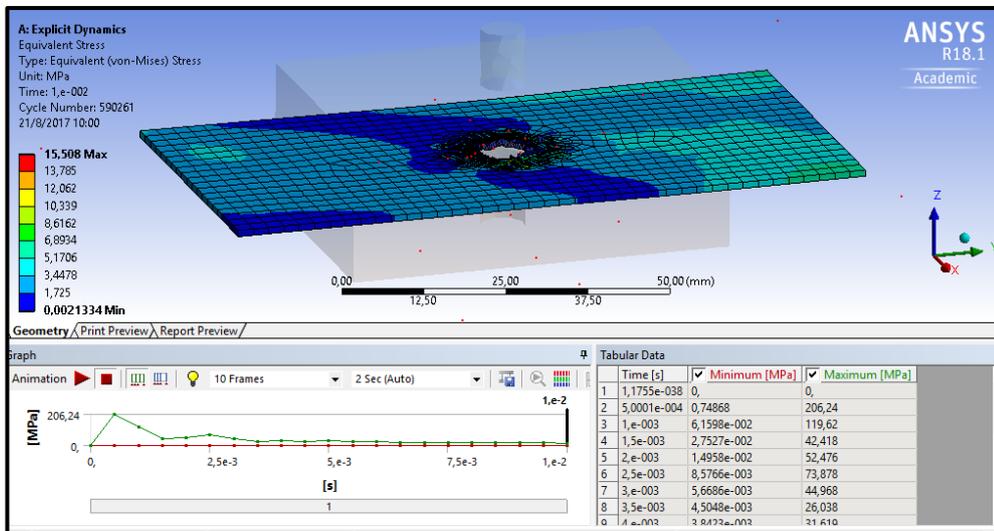


Figura 64. Esfuerzo equivalente

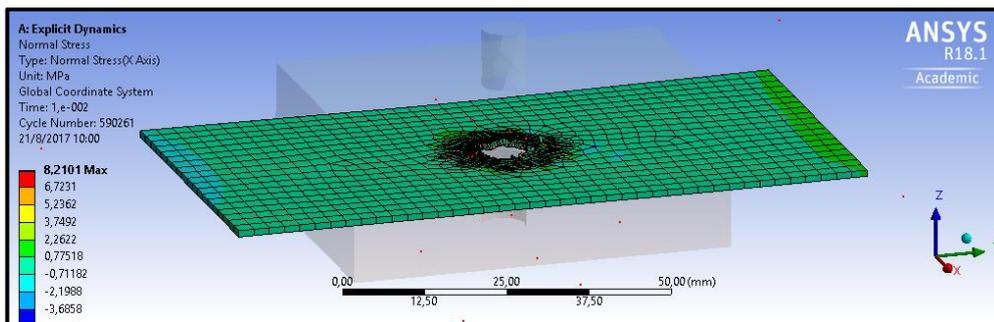


Figura 65. Esfuerzo normal

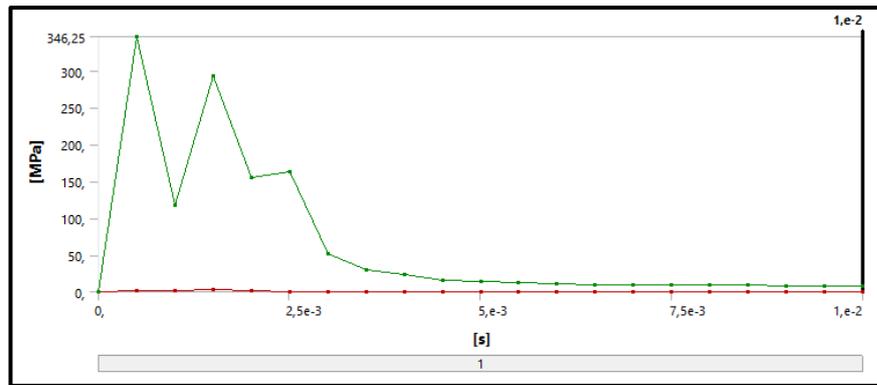


Figura 66. Gráfica esfuerzo vs tiempo

Tabular Data			
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1	1,1755e-038	0,	0,
2	5,0002e-004	1,3062	346,25
3	1,e-003	0,89232	117,22
4	1,5e-003	2,9688	292,6
5	2,e-003	0,95558	155,76
6	2,5001e-003	0,45245	162,76
7	3,e-003	0,40193	51,835
8	3,5e-003	7,1795e-002	30,446
9	4,e-003	5,3036e-002	23,937
10	4,5e-003	0,11971	16,347
11	5,e-003	1,8324e-002	14,452
12	5,5001e-003	2,4328e-002	12,819
13	6,e-003	5,1594e-003	10,296
14	6,5001e-003	5,0062e-003	9,3172
15	7,e-003	6,9851e-002	9,072
16	7,5e-003	3,9768e-002	8,8795
17	8,e-003	3,6514e-002	8,8078
18	8,5e-003	2,121e-002	8,7089
19	9,e-003	1,4904e-002	8,5032
20	9,5e-003	2,1805e-002	8,2606
21	1,e-002	1,1114e-002	8,0932

Figura 67. Tabulación de datos

De las imágenes observadas para la simulación 3 se observa un valor de 15,508 Mpa el cual genera un punzonado del diámetro interior, pero a modo de comparación con respecto a las otras dos simulaciones se observa que no existe total desprendimiento de la arandela como tal, esto quiere decir que no hubo suficiente fuerza para el punzonado. Con respecto al esfuerzo máximo se obtiene un valor de 346,25 MPa generado por el punzón.

3.5. Validación de coeficientes y resultados

La validación a continuación refiere a la distancia de holgura de acuerdo con la designación del juego punzón - matriz obtenidos en los cálculos del capítulo dos y haciendo referencia a fuentes de información [1], [4], se validan dichos coeficientes y porcentajes.

3.5.1. Simulación con diferentes holguras

A continuación, se busca una comparación de datos por medio de simulaciones a través de la variación de holguras en el juego punzón - matriz en un rango entre el 7,2% al 20% del espesor del material, plancha de acero galvanizado de 1mm de espesor, de la misma manera se utilizó los mismos parámetros y restricciones en el software como es el caso de tiempo, soportes fijos, igual mallado, restricción de desplazamiento, así como también los parámetros de fuerza con un módulo de 49033 N y velocidad de la prensa con valor de 50mm/s.

Se realizó siete simulaciones detalladas a continuación:

Matriz con diámetro 8 mm

Matriz con diámetro 7,2 mm

Matriz con diámetro 7,1 mm

Matriz con diámetro 7,07 mm

Matriz con diámetro 7 mm

Matriz con diámetro 6,8 mm

Matriz con diámetro 6 mm

3.5.1.1. Matriz con diámetro 8 mm

A continuación, se muestra imágenes de los resultados de la simulación obtenidos del proceso de corte para la holgura correspondiente, así como también imágenes de los ensayos realizados.

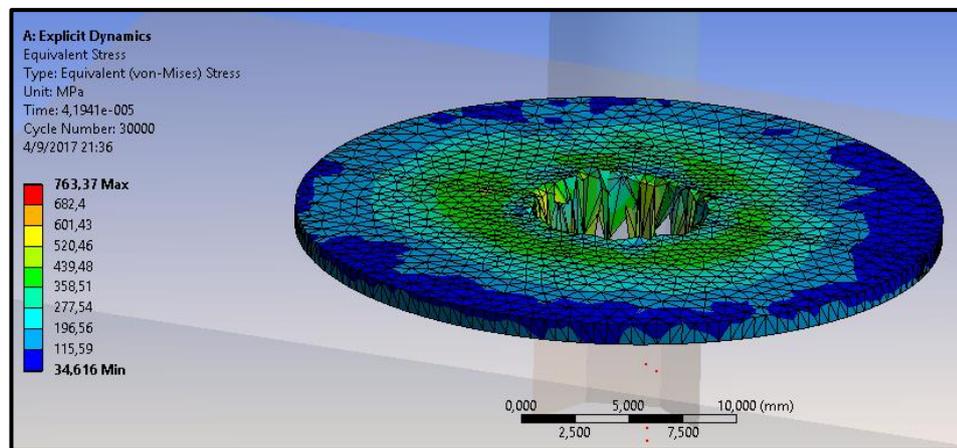


Figura 68. Esfuerzo Equivalente Von Misses

El desprendimiento del material prolongándose por el agujero de la matriz generando un proceso de embutido se muestra en la siguiente imagen, hasta fracturarlo conforme avance o se desplace el macho interno a lo largo de su eje z.

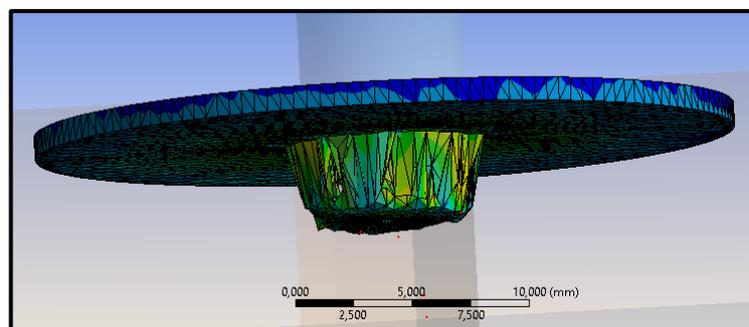


Figura 69. Corte - punzonado

La arandela producto de la tolerancia errónea que genera deficiencia en el corte del punzonado como se puede apreciar en la (figura 70).



Figura 70. Arandela defectuosa vista superior

Se observa y compara el acabado en la superficie inferior de la arandela de acuerdo con los resultados de la simulación, donde se ve el redondeado que ocasiona el diferencial de holgura escogida.



Figura 71. Arandela defectuosa vista inferior

Los rasgos superiores con geometría plana en la figura siguiente se deben a la reducción de material conforme avanza el macho interno en el agujero de la matriz.

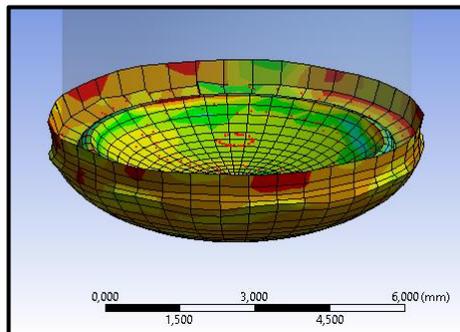


Figura 72. Material embutido

3.5.1.2. Matriz con diámetro 7,2 mm equivalente al 20% del espesor

Con 0,2 mm de holgura se observa en la siguiente figura el desprendimiento del diámetro interior de la arandela a lo largo del agujero de extracción.

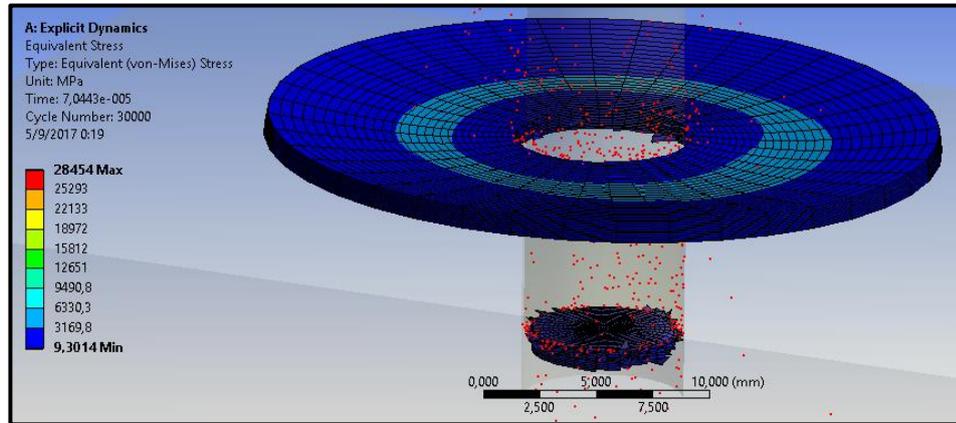


Figura 73. Esfuerzo Equivalente

En la gráfica siguiente se muestra el corte del material desde la vista inferior y el desprendimiento del material en la arista del diámetro interior.

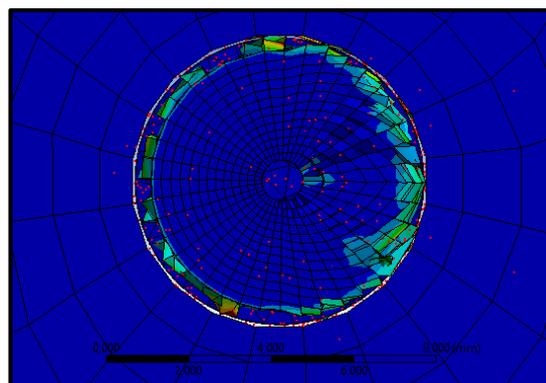


Figura 74. Material cortado visto desde la base

Similar al proceso anterior se observa en la (figura 73) que existe el desplazamiento correcto por el eje efectuando el corte en la chapa metálica y pasando el eje de coordenadas que describe el paso del punzón dentro de la matriz.

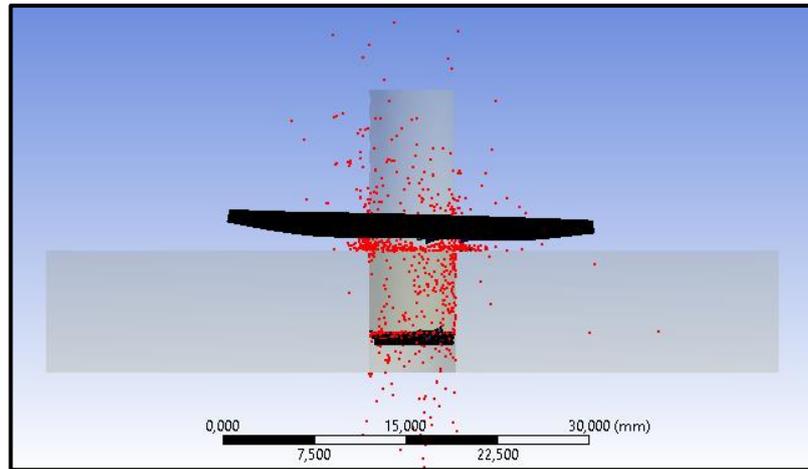


Figura 75. Vista lateral

3.5.1.3. Matriz con diámetro 7,1 mm equivalente al 10% del espesor

En la siguiente simulación con una holgura de 0,1 mm, existe desprendimiento del fleje, el cual se muestra en la imagen a continuación.

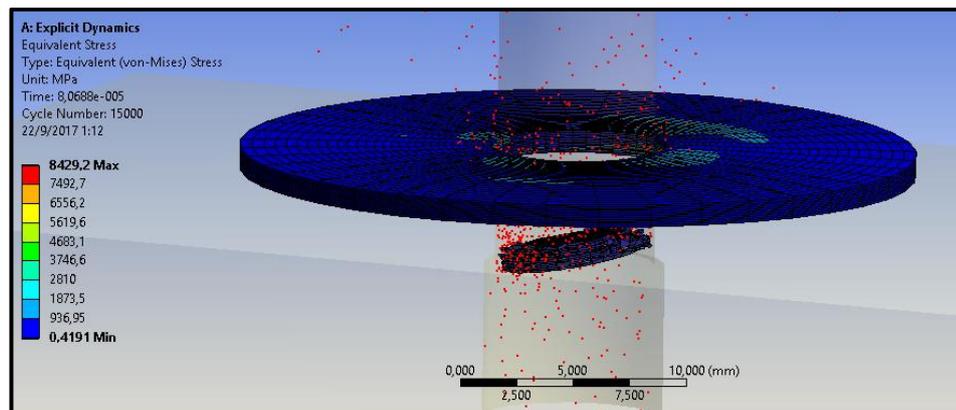


Figura 76. Esfuerzo Equivalente

Se cumple el corte del material con esta holgura y un esfuerzo máximo de 8429,2 Mpa.

En las gráficas siguientes se muestra los resultados del corte del material, así como también las fisuras en el espesor del diámetro interior.

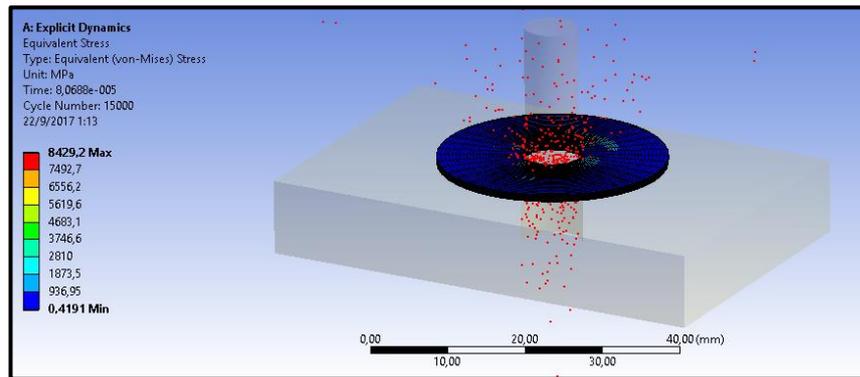


Figura 77. Corte - punzonado

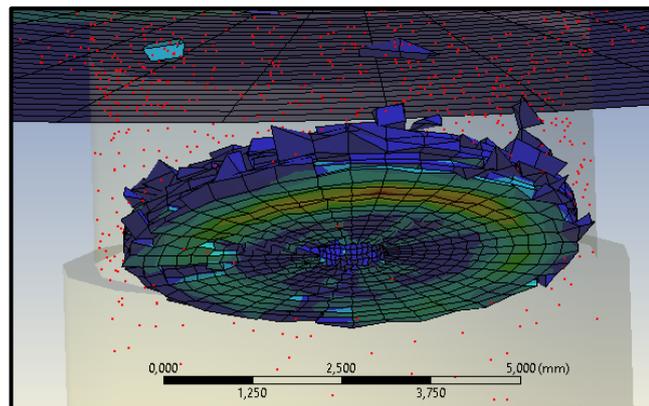


Figura 78. Material cortado

En la (figura 78) se observa pedazos de material y una escasa zona de redondeado en la arista, así como también mal acabado en el espesor después del desprendimiento.

3.5.1.4. Matriz con diámetro 0,07 mm equivalente al 7% del espesor

En el siguiente esquema se muestra el resultado del esfuerzo equivalente Von Misses para la holgura de diseño y su respectivo desprendimiento del material.

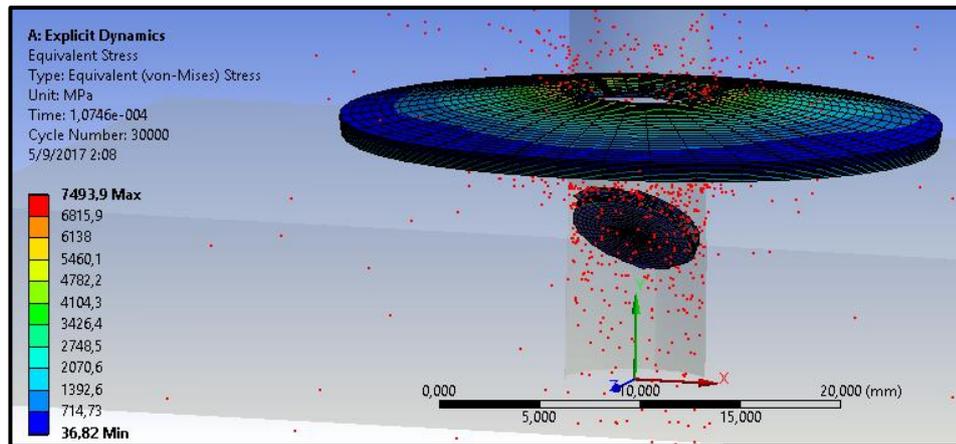


Figura 79. Esfuerzo Equivalente

Se observa la arandela producto de la tolerancia teórica que genera un corte de punzonado limpio y con las medidas correctas como se puede apreciar en la figura.



Figura 80. Arandela vista superior

Con respecto a la parte inferior en la siguiente figura se puede ver los filos de rebaba mínimos tanto al interior como al exterior del corte.



Figura 81. Arandela vista inferior

En la imagen a continuación se puede ver el corte limpio del material, y los filamentos que destacan las dos principales etapas de deformación que es el redondeado y la fractura.

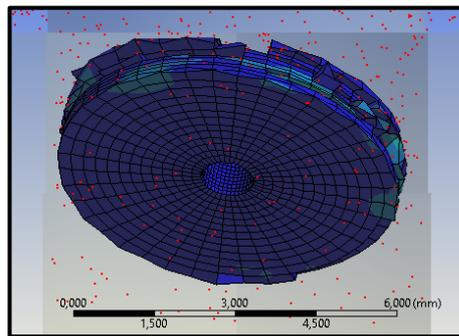


Figura 82. Material cortado

3.5.1.5. Matriz con diámetro 7 mm

Se observa el desprendimiento del material en la superficie del punzón y el prensa chapa, en la imagen a continuación el punzón no ingresa en la matriz debido a la falta de tolerancia en la holgura de corte.

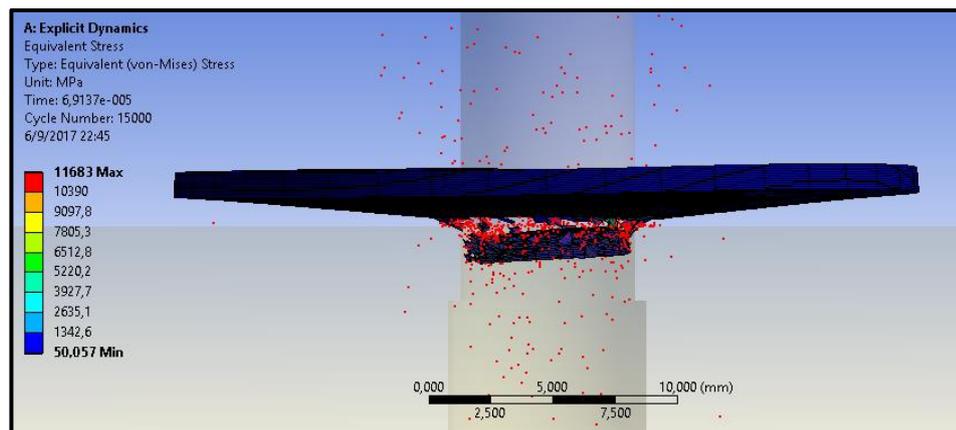


Figura 83. Esfuerzo Equivalente

En la gráfica a continuación se muestra el resultado del proceso de corte donde se observa que al igualar el diámetro del punzón de corte se genera holgura escasa por la cual la operación se realiza más de prisa que en los casos de holgura mayor, obteniendo

como desventaja aumento en la fuerza de corte, aumento en la fuerza de extracción y se crea más rebabas por laminación.

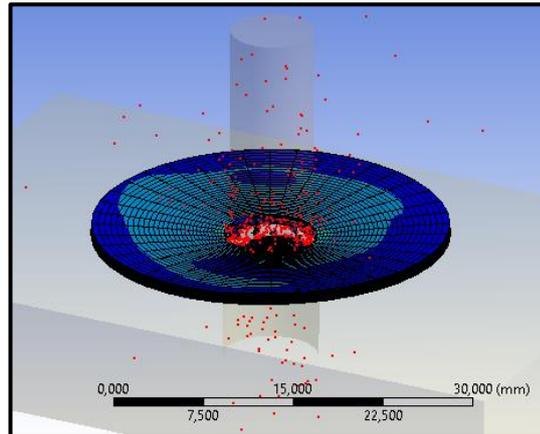


Figura 84. Corte - punzonado

En las siguientes imágenes se observa que no existe un corte limpio, se crea más rebabas que en otras holguras, el esfuerzo de distorsión de Von Mises aumentó considerablemente, y debido a la escasa holgura la fuerza de extracción genera más energía.

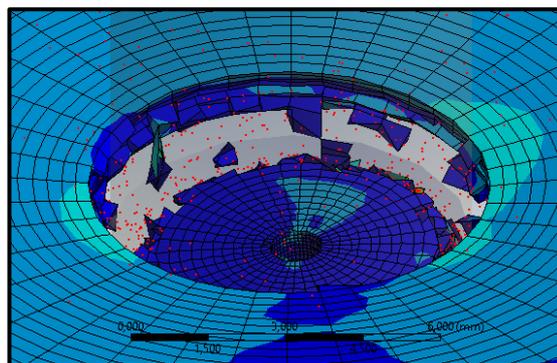


Figura 85. Residuos de material cortado

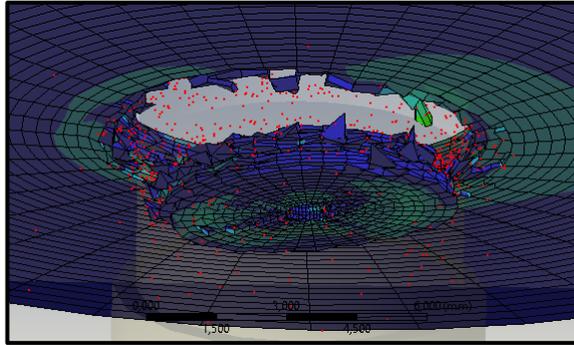


Figura 86. Vista inferior

No existe la etapa de redondeado ni la de bruñido, se concluye un desprendimiento de material por estiramiento.

3.5.1.6. Matriz con diámetro 6,8 mm

La simulación a continuación muestra el resultado del punzonado para esta holgura en la cual se observa desprendimiento del material con un aumento considerable de rebaba por laminación.

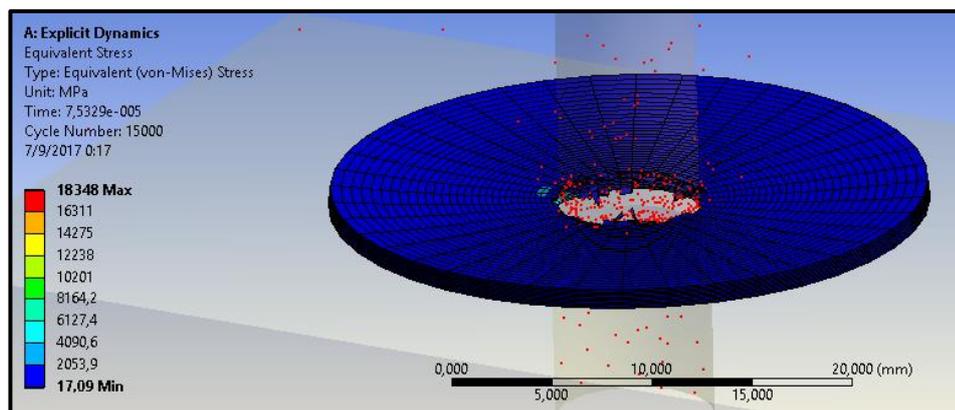


Figura 87. Esfuerzo Equivalente

En la gráfica a continuación se muestra los resultados del proceso de corte donde se observa que al reducir el diámetro del punzón de corte además de perder la holgura la operación se realiza más de prisa que en los casos de holgura mayor, obteniendo como

desventaja aumento notable en la fuerza de corte, aumento en la fuerza de extracción y se crea más rebabas por laminación, perdiendo así las características del punzonado.

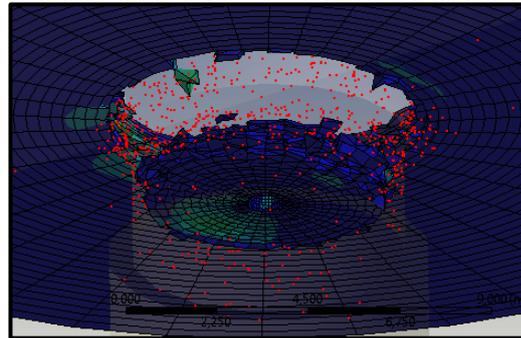


Figura 88. Corte - punzonado

En la vista lateral del proceso de corte se puede observar el choque del macho interno con la matriz por motivo de reducción de diámetro, al igual que en la simulación de la holgura escasa existe un aumento de energía y de esfuerzo equivalente.

En la gráfica se puede observar un corte con residuos en las aristas tanto de la chapa metálica como en el agujero de la matriz.

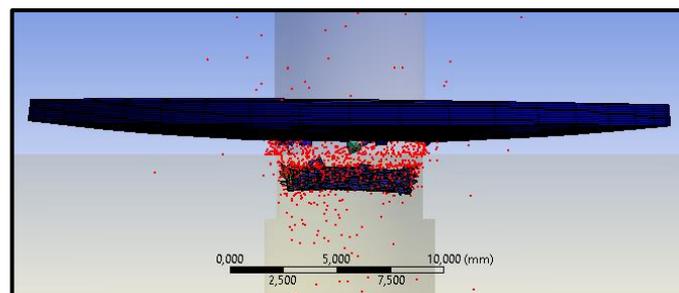


Figura 89. Vista lateral

3.5.1.7. Matriz con diámetro 6 mm

En la figura siguiente se observa el resultado del esfuerzo equivalente Von Mises, además se puede observar que no existe desprendimiento del material.

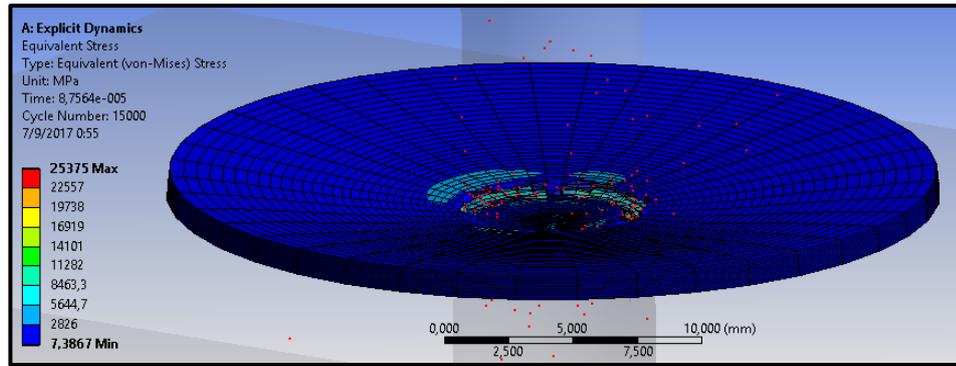


Figura 90. Esfuerzo Equivalente

En las gráficas a continuación se muestra los resultados del proceso de corte desde la vista inferior del troquel.

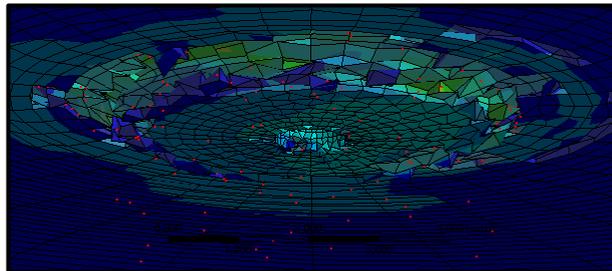


Figura 91. Corte - punzonado

A medida que se reduce el diámetro con fines de visualización del proceso de corte y la validación de coeficiente como es el aumento del esfuerzo equivalente, se observa en la figura a continuación un porcentaje de material pandeado dentro del agujero de la matriz, verificando la inexistencia de corte y mucho menos el punzonado como tal.

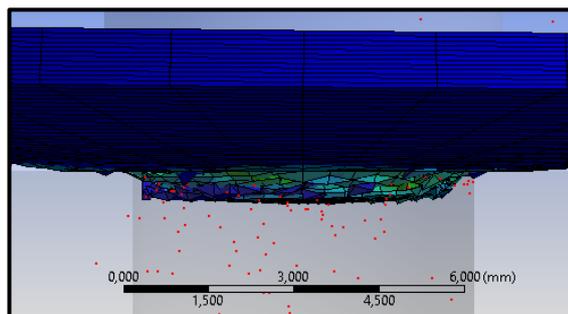


Figura 92. Vista lateral

3.6. Validación de etapas con respecto al espesor del material

Validación de las diferentes etapas de deformación que sufre el espesor del material por cizallamiento, tomando en cuenta la inclinación en la imagen siguiente como redondeado, el segmento recto como bruñido y finalmente un desorden en el diámetro con aristas vivas para la zona de fractura [17].

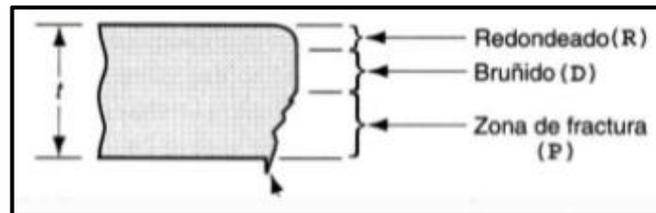


Figura 93. Etapas de deformación [17].

Se muestra las etapas mencionadas en la figura anterior con respecto a los resultados de la simulación en la (figura 94), donde se observa el redondeado del punzonado deseado con las respectivas etapas en el software.

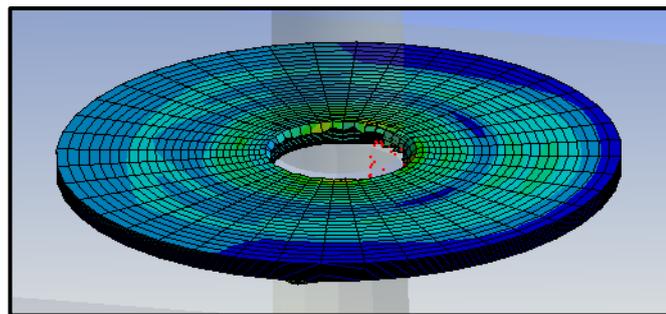


Figura 94. Etapas en la simulación

El resultado con diámetro de 7,07 con un 7% del espesor del material fue el más óptimo porque aumenta la zona de bruñido logrando así superar los 2/3 del espesor para llegar a la fractura, validando así este porcentaje con los ensayos desarrollados en la chapa metálica con el respectivo punzonado.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Simulación con variación de material

Una vez realizado el estudio del troquel y desarrollado el proceso de las simulaciones respectivas se realizó una comparación de datos.

Los datos en la tabla a continuación obtenidos de las simulaciones con variaciones de material, en la cual se detallan los esfuerzos máximos y mínimos con respecto al intervalo de tiempo que se genera en ese instante observados en las gráficas de esfuerzo vs tiempo en el capítulo tres.

Tabla 2. Resultados con variación de material

RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON VARIACIÓN DE MATERIAL			
	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3
Esfuerzo máximo (MPa)	1051,3	371,89	346,25
Esfuerzo mínimo (MPa)	1,251	1,551	1,3062
Esfuerzo en tiempo max (MPa)	22,625	6,761	15,508
Esfuerzo en tiempo min (MPa)	0,018	0,024	0,011
Tiempo final (s)	0,01	0,01	0,01

4.1.2. Simulación con variación de holgura

En la siguiente tabla se detalla los resultados obtenidos en las simulaciones, con los mismos parámetros de mallado, velocidad, fuerza, soporte fijo y tiempo, con la única diferencia o característica variable el diámetro de la matriz que se disminuye y aumenta por motivos o fines de comparación de resultados para una próxima validación con los ensayos físicos.

Tabla 3. Resultados con variación de holguras

RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON VARIACIÓN DE HOLGURAS		
Diámetro (mm)	Esfuerzo equivalente Max (MPa)	Esfuerzo equivalente Min (MPa)
8	763.37	34.616
7.2	28454	9.3014
7.1	8429.2	0.4191
7.07	7493.9	36.82
7	11683	50.057
6.8	18348	17.09
6	25375	7.3867

4.1.3. Resultados de pruebas físicas

Para las pruebas del punzonado se utilizó:

- Un punzón de 7 mm (K100 templado con 62 HRC)
- Tres matrices (K100 templado con 62 HRC)

A continuación, se muestra las imágenes de los resultados del punzonado en los ensayos para las tres diferentes holguras.

Holgura de diseño 0.07 mm

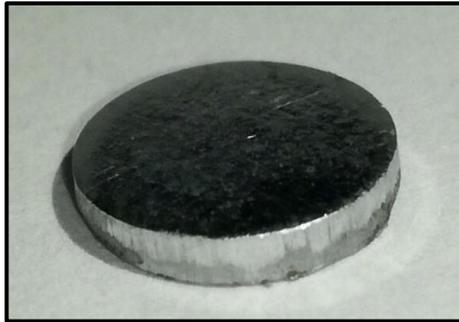


Figura 95. Material punzonado

La aplicación correcta de los valores de tolerancia permite conseguir piezas de perfil correctamente definidos y sin rebabas.

Luego del corte se observa más de las $2/3$ partes del espesor de la chapa un brillo intenso, así como también un porcentaje de rebaba mínimo.

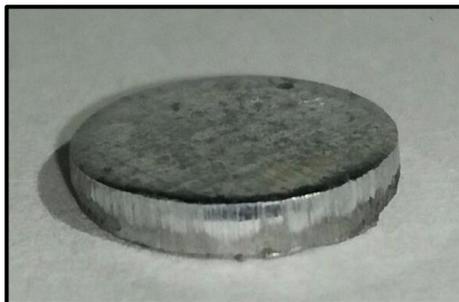


Figura 96. Vista del espesor

Holgura de 0.1 mm

En las figuras a continuación se observa el espesor con un valor menor a las $2/3$ partes del espesor de la chapa un brillo intenso, y solo en el último un ligero detalle de desgarre de material.

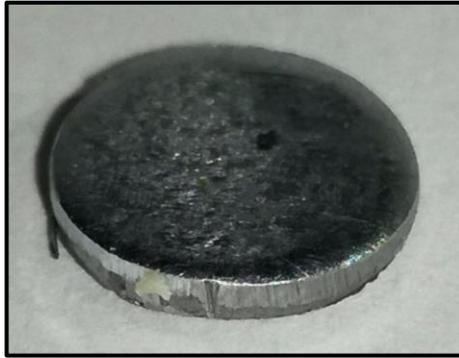


Figura 97. Material punzonado

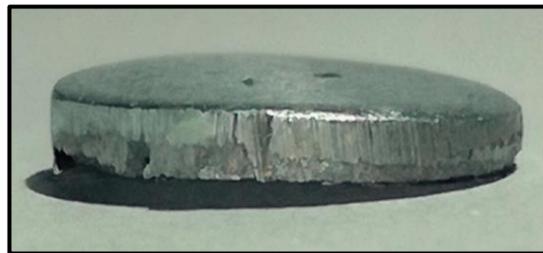


Figura 98. Vista del espesor

Holgura de 0.2 mm

En la figura siguiente se observa menos de las $2/3$ partes del espesor de la chapa un brillo intenso generado por el punzonado el cual ocurre por desgarre de material.

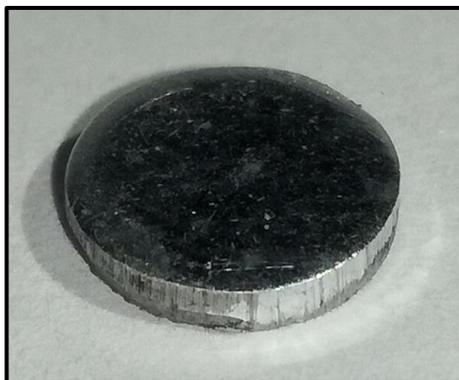


Figura 99. Material punzonado

En la (figura 100) se puede observar que el porcentaje de rebaba aumenta dejando el material cortado con imperfectos tanto en el espesor como en la superficie inferior.

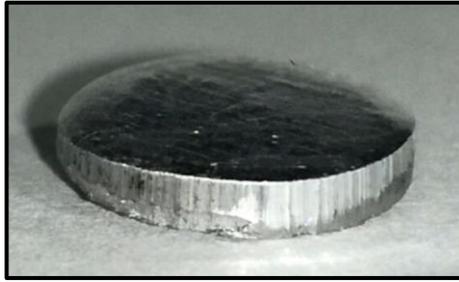


Figura 100. Vista del espesor

4.2. Análisis de costos

El análisis de costos de fundamenta en la siguiente clasificación:

- a) **Costos directos:** Dentro de esta clasificación incluye costos de insumos, materiales, mano de obra, en otras palabras, costos que están directamente relacionados en la producción del elemento fabricado previamente.

Tabla 4. Costos directos

COSTOS DIRECTOS	VALOR
Insumos	50,00
Materiales	300,00
Mano de obra	250,00
SUBTOTAL	\$ 600,00

- b) **Costos Indirectos:** Esta clasificación incluye costos como imprevistos, consumibles, cosas que están relacionadas a la fabricación del elemento sin entrar en contacto con el mismo como es el diseño del elemento.

- **Diseño**

Este costo está relacionado directamente con el costo directo del troquel con un 30%, que corresponde a los conocimientos del diseñador, tiempo y experiencia empleados para la creación del dibujo y detalle para posterior elaboración.

Tabla 5. Costos Indirectos

COSTOS INDIRECTOS	VALOR
Imprevistos	40,00
Diseño	120,00
Consumibles	20,00
SUBTOTAL	\$ 180,00

Tabla 6. Costo total

COMPONENTE DEL COSTO	VALOR
Costos directos	\$ 600,00
Costos Indirectos	\$ 180,00
SUBTOTAL	\$ 780,00

CONCLUSIONES

- Con los datos obtenidos se concluye que con una holgura de 7% del espesor del material correspondiente a 0,07 mm entre la matriz y el punzón permite el corte dejando más de las 2/3 partes de brillo en el espesor con respecto al acabado como indica la teoría.
- Mediante los ensayos realizados con la tolerancia de diseño correspondiente al diámetro de 7,07 mm se verifica que cumple las etapas de deformación por cizallamiento que sufre el espesor del material.
- Se concluye una disminución de esfuerzo equivalente entre la tolerancia sugerida del 10% con un valor de 8429,2 MPa a la tolerancia de diseño con el 7% con un esfuerzo máximo de 7493,9 MPa.
- Se concluye que al reducir la holgura de 0,07 mm se obtiene como desventaja aumento en la fuerza de corte calculada con un valor de 3078,76 kgf, así como también aumento en la fuerza de extracción de 215,513 kgf.
- Con los datos observados se concluye que la holgura entre punzón y matriz de 0,2 mm equivalente al 20% no se puede superar porque se genera proceso de embutido y aumento de rebaba, así como también imperfectos en las superficies del material desprendido debido a la separación.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo con los datos observados en el software se recomienda evitar porcentajes menores al 7% con respecto al espesor del material, para no tener inconvenientes como el aumento de la fuerza de corte y variaciones de energía que este genera en el transcurso del punzonado.
- Dentro de la variación según el tipo de holgura correcta de corte para punzonado en chapa metálica de acero galvanizado con espesor de 1 mm, se recomienda utilizar una holgura de 0,07 mm de juego en función del punzón – matriz.
- Se recomienda no reducir el diámetro de corte del punzón de 7,07 mm equivalente al 7% cuyo valor cercano al 10% permite realizar un corte con mejor acabado superando los 2/3 de las etapas con respecto al espesor.
- Con respecto al software de simulación se recomienda aplicar los parámetros específicamente para evitar errores y tiempos prolongados de solución.
- En cuanto al mallado, seleccionar correctamente los parámetros para las partes que se genera el corte tanto en aristas, superficies y sólidos con el objetivo de mejorar los resultados y visualización del proceso.
- Se recomienda continuar con este estudio mediante de una comparación física con más variaciones en el diámetro de la matriz para comprobar los datos y resultados obtenidos de ANSYS.
- Se recomienda para estudios futuros la validación del proceso con diferentes fuerzas de corte para una posterior visualización de las holguras planteadas, con el objetivo de comparar las etapas de deformación, calidad del corte y la diferencia de diámetro final con las diferentes holguras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Florit, *Fundamentos de matricería*. Barcelona, España: Ceac, 2005.
- [2] F. R. O. ROLDÁN and C. L. GÁLVEZ, *Mecanizado*, 1 a. Madrid, España, 2013.
- [3] L. S. A. Bermudez, "METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE TROQUELES DE CORTE DE CHAPA," Universidad Autónoma de Occidente, 2009.
- [4] E. Hernández Barocio, C. Alvarado Martinez, and A. Montes Mancera, "Tesis curricular," Instituto Politécnico Nacional.
- [5] M. Carlos, "Teoría del punzonado - Deformación y chapa," *Mecos Ibérica, S.L.*, Barcelona, España, 2004.
- [6] M. Kerguignas and G. Caignaert, *Resistencia de materiales*, 1a ed. Bordas, París: Reverté, 1980.
- [7] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, and J. E. Shigley, *Shigley's mechanical engineering design*, 8 a. Mexico: McGraw-Hill, 2008.
- [8] R. L. Mott and V. González y Pozo, *Diseño de elementos de máquinas*, 4a ed. Mexico: Pearson Prentice-Hall, 2006.
- [9] Gestion de compras Industrial Sourcing, "Diseño, desarrollo y fabricación de arandelas." [Online]. Available: <http://www.gestiondecompras.com/es/productos/componentes-mecanicos-y-de-ferreteria/arandelas>. [Accessed: 27-Jun-2017].
- [10] Grupo Geka, "Calculadora de capacidades de punzonado -." Maquinaria Geka, España, p. NA.
- [11] Marcos Ferreiro López, "DISEÑO DE UNA MATRIZ PROGRESIVA PARA CHAPA," Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.
- [12] Abascal - Escribano, "Documentación y análisis: Conformado de productos sin arranque de viruta: 4. CORTE Y PUNZONADO," 2014. [Online]. Available: <http://deduce-tu.blogspot.com/p/4corte-y-punzonado.html>. [Accessed: 06-Jul-2017].
- [13] López Martínez Alejandro, "Complementos teóricos," Universidad de Almería, 2011.
- [14] "ANSYS plataforma de solución CAE," 2017. [Online]. Available: <http://www.3dcadportal.com/ansys.html>.
- [15] Ansys, "ANSYS Dinámica explícitos STR." [Online]. Available: <http://www.ansys.com/products/structures/ansys-explicit-dynamics-str>.
- [16] Sharcnet, "Generating Mesh," *Sas IP, Inc.* [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_msh/ds_Generating_Mesh.html.
- [17] Mipsa, "Deformación por punzonado," 2017. [Online]. Available: <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Procesos/Punzonado>.

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 7. Resistencia al corte y rotura de aceros laminados [9].

MATERIALES	Resistencia a la rotura en Kg/mm ²		Resistencia al corte en Kg/mm ²		Peso específico en Kg/dm ³
	Recocido	Crudo	Recocido	Crudo	
Acero laminado con 0,1% de C.	31	40	25	32	7.8 - 7.9
Acero laminado con 0,2% de C.	40	50	32	40	
Acero laminado con 0,3% de C.	44	60	35	48	
Acero laminado con 0,4% de C.	56	70	45	56	
Acero laminado con 0,6% de C.	70	90	56	72	
Acero laminado con 0,8% de C.	90	110	72	90	
Acero laminado con 1.0% de C.	100	130	80	105	
Acero laminado Inoxidable	65	75	52	60	
Acero laminado al sicilio	56	70	45	56	
Aluminio	7.5 - 9	16 - 18	6 - 7	13 - 15	
Anticorodal	11 - 13	32 - 36	9 - 10	25 - 29	2,8
Avional (Duraluminio)	16 - 20	38 - 45	13 - 16	30 - 36	2,8
Aluminio en aleación (Siluminio)	12 - 15	25	10 - 12	20	2,7
Alpaca laminada	35 - 45	56 - 58	28 - 36	45 - 46	8.3 - 8.45
Bronce	40 - 50	50 - 75	32 - 75	40 - 60	8.4 - 8.9
Cinc	15	25	12	20	7.1 - 7.2
Cobre	22 - 27	31 - 37	18 - 22	25 - 30	8.9 - 9
Estaño	4 - 5		3 - 4		7,4
Fibra			17		
Latón	28 - 37	44 - 50	22 - 30	35 - 40	8.5 - 8.6
Oro			18	30	19.3 - 19.35
Plata laminada	29	29	23,5	23,5	10,5
Plomo	2,5 - 4		2 - 3		11,4

Anexo 2

Planos de detalle