



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

**TEMA: EVALUACIÓN DE LA FORMABILIDAD DEL ACERO AISI 304
MEDIANTE EL ENSAYO DE EXPANSIÓN DE AGUJERO:
EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN**

AUTOR: CAIZA LLUMIQUINGA, LUIS ESTEBAN

BARRERA FLORES, ANDRÉS ISMAEL

DIRECTOR: MSC: RIOFRÍO VILLENA, PATRICIO GUSTAVO

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “EVALUACIÓN DE LA FORMABILIDAD DEL ACERO AISI 304 MEDIANTE EL ENSAYO DE EXPANSIÓN DE AGUJERO: EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN” fue realizado por los señores **Barrera Flores, Andrés Ismael** y **Caiza Llumiquina, Luis Esteban** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de agosto del 2018

MSC. Riofrío Villena, Patricio Gustavo

C. C. 1707512545

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Barrera Flores, Andrés Ismael** y **Caiza Llumiquinga, Luis Esteban**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Evaluación de la formabilidad del acero AISI 304 mediante el ensayo de expansión de agujero: experimentación y simulación** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de agosto del 2018

Barrera Flores, Andrés Ismael

C. C. 1719774802

Caiza Llumiquinga, Luis Esteban

C. C. 1721128468



DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Barrera Flores, Andrés Ismael** y **Caiza Llumiquinga, Luis Esteban** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Evaluación de la formabilidad del acero AISI 304 mediante el ensayo de expansión de agujero: experimentación y simulación** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 17 de agosto del 2018



.....
Barrera Flores, Andrés Ismael

C. C. 1719774802



.....
Caiza Llumiquinga, Luis Esteban

C. C. 1721128468

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi madre Miriam y a mi padre Luis que me han brindado su amor y apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, a mis abuelos Fausto y Erminia por cuidar de mí día a día, a mi hermano Pablo por el cual trato de ser un buen hombre y quien me inspira a perseguir lo que siempre he soñado y a mi tío Mario por estar pendiente de mí desde el día en que nací, juntos son las personas más importantes que existen en mi vida y por las cuales seguiré luchando hasta alcanzar lo que siempre he querido.

Luis Esteban Caiza Llumiyinga

Dedico este trabajo de titulación principalmente a mis padres, por ser un pilar fundamental en mi formación y por demostrarme su cariño y apoyo incondicional en cada etapa, a mis hermanos que siempre se preocuparon por mis estudios y por los cuales intento ser una mejor persona y finalmente dedico esta tesis a mis abuelas que fueron unas madres para mí y en toda mi vida estuvieron animándome y brindándome su consejo.

Andrés Ismael Barrera Flores

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, a mis abuelos, a mi hermano y mi tío y al resto de mi familia por estar siempre conmigo en todos los momentos buenos y malos de mi vida y por ser mi apoyo incondicional, además tengo que agradecer a todos mis amigos que formaron parte de esta etapa de mi vida los cuales sin duda alguna hicieron que mi permanencia en la universidad se más llevadera y con los que compartí momentos inolvidables, por ultimo agradecer al Ing. Patricio Riofrío director de este proyecto de titulación por su ayuda y consejos en el desarrollo de este trabajo.

Luis Esteban Caiza Llumiyinga

Agradezco a mis padres, a mis hermanos y abuelos que siempre estuvieron conmigo en cada etapa de mi vida universitaria y de los cuales nunca faltaron unas palabras de apoyo y aliento, agradezco también a mis compañeros y amigos que de una u otra forma me brindaron su ayuda y apoyo en las diferentes actividades de la universidad y con los cuales compartí buenos momentos. Finalmente agradezco al ingeniero Patricio Riofrio director de este proyecto de titulación por confiarnos este proyecto y brindarnos la información pertinente para llevarlo a cabo.

Andrés Ismael Barrera Flores

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN.....	xv
ABSTRAC	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Definición del problema.....	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
1.5. Alcance del proyecto.....	8
1.6. Justificación del proyecto.....	9
CAPÍTULO II	10
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Aceros inoxidable	10
2.2. Clasificación.....	11
2.2.1 Aceros inoxidable austeníticos	12
2.2.2 Acero AISI 304	13
2.3 Conformado de chapa metálica	14
2.3.1 Formabilidad	16

2.4	Ensayos para la evaluación de la formabilidad de chapas de acero	17
2.4.1	Diagramas límite de conformado (Forming limit diagrams, FLD)	17
2.4.2	Relación de estirado límite (Limiting Draw Rati, LDR)	18
2.4.3	Ensayo de expansión de agujero	19
2.5	Ensayos realizados de la prueba de expansión de agujero	20
2.6	Simulación.....	36
CAPÍTULO III		40
3	EXPERIMENTACIÓN	40
3.1	Metodología de trabajo.....	40
3.1.1	Etapas 1: Caracterización del material.....	40
3.1.2	Etapas 2: Elaboración de probetas de acero inoxidable AISI 304	47
3.1.3	Etapas 3: Construcción de punzones.....	48
3.1.4	Etapas 4: Adecuación y montaje de la prensa hidráulica.....	51
3.1.5	Etapas 5: Ejecución del ensayo	55
3.1.6	Etapas 6: Medición de HER en las probetas	60
3.1.7	Etapas 7: Morfología de la fractura	60
CAPÍTULO IV		62
4	SIMULACIÓN.....	62
4.1	Introducción	62
4.2	Simulación del ensayo de expansión de agujero	63
4.3	Análisis paramétrico.....	74
CAPÍTULO V		79
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	79
5.1	Introducción	79
5.2	Resultados experimentación.....	79
5.3	Resultados simulación.....	83
5.4	Comparación de resultados experimentales vs simulación	85
5.5	Expansión de agujero (Hole Expansion Ratio, HER)	88
5.5.1	Comparación de resultados experimentales vs simulación de HER	92
5.6	Análisis de la morfología de la fractura	95

5.7	Análisis de la curva de triaxialidad	100
5.8	Discusión de resultados	105
CAPÍTULO VI.....		108
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
6.1	Conclusiones	108
6.2	Recomendaciones.....	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de los aceros inoxidable según la AISI</i>	11
Tabla 2 <i>Composición química del acero AISI 304</i>	14
Tabla 3 <i>Propiedades mecánicas y físicas del acero AISI 304</i>	14
Tabla 4 <i>Clasificación de los procesos de conformado por deformación plástica</i>	15
Tabla 5 <i>Propiedades mecánicas de cinco aceros AHSS</i>	30
Tabla 6 <i>Tamaño de elementos de la malla</i>	38
Tabla 7 <i>Metodología de trabajo</i>	40
Tabla 8 <i>Resultados de ensayo de tracción</i>	42
Tabla 9 <i>Valores de K y n del acero AISI 304</i>	44
Tabla 10 <i>Composición química del acero AISI 304</i>	45
Tabla 11 <i>Reactivo químico utilizado para el acero AISI 304</i>	46
Tabla 12 <i>Reactivo químico utilizado en acero inoxidable austenítico</i>	47
Tabla 13 <i>Características de la matriz</i>	49
Tabla 14 <i>Características del punzón cónico</i>	49
Tabla 15. <i>Características del punzón elíptico</i>	50
Tabla 16 <i>Características de punzón y matriz</i>	55
Tabla 17 <i>Propiedades mecánicas del acero AISI 304</i>	68
Tabla 18 <i>Parámetros seleccionados de simulación</i>	78
Tabla 19 <i>Resultados experimental de fuerza y desplazamiento punzón cónico</i>	79
Tabla 20 <i>Resultados experimental de fuerza y desplazamiento punzón elíptico</i>	81
Tabla 21 <i>Resultados de simulación de fuerza y desplazamiento punzón cónico</i>	83
Tabla 22 <i>Resultados de simulación de fuerza y desplazamiento punzón elíptico</i>	84
Tabla 23 <i>Porcentajes de error entre el ensayo experimental y simulación del punzón cónico</i>	87
Tabla 24 <i>Porcentajes de error entre el ensayo experimental y simulación del punzón elíptico</i> ...	87
Tabla 25 <i>Valores de HER experimental para el punzón cónico</i>	88
Tabla 26 <i>Valores de HER experimental para el punzón elíptico</i>	89
Tabla 27 <i>Porcentajes de variación de los valores de HER entre punzón cónico y elíptico</i>	90
Tabla 28 <i>Valores de HER simulación, punzón cónico</i>	93

Tabla 29 <i>Valores de HER simulación, punzón elíptico</i>	93
Tabla 30 <i>Error de simulación en comparación con los resultados de % HER Experimentales...</i>	94
Tabla 31 <i>Factor de triaxialidad y deformación efectiva en el momento de la rotura.....</i>	103
Tabla 32 <i>Factor de triaxialidad y deformación efectiva en el momento de la rotura.....</i>	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reconstrucción de la capa pasiva en presencia del oxígeno del acero inoxidable	10
Figura 2. Familia de aceros inoxidable en función de a) el contenido de cromo y níquel, b) contenido de cromo y carbono Fuente: (Leal , 2011)	12
Figura 3. Estructura del acero inoxidable AISI 304 en estado de recocido	13
Figura 4. Procesos de conformado de chapa metálica: a) doblado, b) embutido, c) corte	16
Figura 5. Diagrama FLD típico	18
Figura 6. Esquema del ensayo para determinar LRD.....	19
Figura 7. Esquema del ensayo de expansión de agujero HET	20
Figura 8. Conformación del borde del orificio en diferentes muestras observadas por estéreo microscopio. a) grieta parcialmente penetrada, b) grieta excesivamente expandida c) grieta penetrando a través del espesor de la muestra	21
Figura 9. Equipo de trabajo montado en una maquina universal de compresión y tracción, b) modelado del ensayo mediante elementos finitos.....	23
Figura 10. Carga vs desplazamiento del punzón para diferentes Rc.....	24
Figura 11. Dispositivo de Hole Expansion instrumentado montado en la máquina de pruebas de tracción universal tipo W+B 600	26
Figura 12. Prueba de expansión de agujero valida; ruptura a través del espesor de la placa.....	28
Figura 13. Porcentaje de HER en función del diámetro del agujero y la geometría del punzón	28
Figura 14. Valores de HER obtenido con diferentes tolerancias en el proceso de punzonado (burr out).....	31
Figura 15. Valores de HER obtenido con diferentes tolerancias en el proceso de punzonado (burr int).....	31
Figura 16. Máquina de prueba universal (MTS G45) y herramienta de sujeción de las muestras utilizadas en el ensayo.....	33
Figura 17. a) Esquema del posicionamiento de la cámara durante el ensayo de expansión de agujero, b) imagen capturada de una muestra después de sufrir la fractura en el borde del agujero.....	35

Figura 18. Evolución de la fuerza axial para diferentes densidades de malla, utilizando elementos homogéneos de mallado de 0.07, 0.128 y 0.3 en la zona de trabajo	38
Figura 19. Evolución de la fuerza axial para los 2 mallados con densidad variable en la zona de trabajo y mallado homogéneo con tamaño de elementos de 0.07 mm	39
Figura 20. Probetas de acero inoxidable AISI 304	41
Figura 21. Diagrama esfuerzo vs deformación de la probeta del acero AISI 304	43
Figura 22. Curva de regresión lineal para la determinación del coeficiente de endurecimiento del acero inoxidable AISI 304	43
Figura 23. Probeta para el ensayo de espectrometría	45
Figura 24. Fotomicrografía del acero inoxidable AISI 304 con magnificación de 20X	46
Figura 25. Fotomicrografía del acero inoxidable, magnificación 200 X	47
Figura 26. Placas de acero inoxidable para la elaboración del ensayo	48
Figura 27. a) Vista superior, b) vista frontal de la matriz	49
Figura 28. Punzón Cónico	50
Figura 29. Punzón Elíptico	50
Figura 30. Base de acoplamiento de la celda de carga	52
Figura 31. Base cilíndrica	52
Figura 32. Iluminación del interior de la matriz	53
Figura 33. Campo visual de los ensayos	53
Figura 34. Sistema de prensa chapas (pisador) tipo fijo-plano	54
Figura 35. Acoplamiento de punzones	54
Figura 36. Adecuación de la prensa hidráulica finalizada	55
Figura 37. Celda de carga RL90000 capacidad 10000 lb.	56
Figura 38. Censor de desplazamiento	56
Figura 39. Posicionamiento de los punzones a) cónico b) elíptico	57
Figura 40. Interfaz de trabajo	58
Figura 41. Aparición de grieta en el borde del agujero	58
Figura 42. Agujero de 4 mm expandido con punzón cónico	59
Figura 43. Prensa Hidráulica y equipo de trabajo	59
Figura 44. Ruptura de la placa en el borde del agujero perforado	60

Figura 45. Muestra cortada para el análisis en el SEM.....	61
Figura 46. Pantalla inicial pre-procesador.....	63
Figura 47. Diseño del punzón en programa CAD.....	64
Figura 48. Piezas importadas y posicionadas.....	64
Figura 49. Blanco o workpiece	65
Figura 50. Mallado general del blanco un mallado general del blanco.....	66
Figura 51. Mallado Fino cerca de las superficies de contacto	67
Figura 52. Malla a) Mallado fino localizado, tamaño 0.2, b) malla menos densa en los alrededores del blanco.....	67
Figura 53. Ingreso de propiedades (Ley de Potencia), acero AISI 304	69
Figura 54. Ingreso de propiedades del material caracterizado	69
Figura 55. Condición de contacto entre elementos	71
Figura 56. Tolerancia de contacto entre elementos y tipo de fricción	72
Figura 57. Ingreso de parámetros de simulación	73
Figura 58. Verificación de parámetros de trabajo (Database generation).....	73
Figura 59. Influencia del mallado, curva fuerza vs desplazamiento del punzón	74
Figura 60. Influencia de la fricción, curva fuerza vs desplazamiento del punzón	76
Figura 61. Influencia del daño, curva fuerza vs desplazamiento del punzón.....	77
Figura 62. Diagrama del ensayo experimenta punzón cónico, curva fuerza vs desplazamiento .80	
Figura 63. Diagrama del ensayo experimenta punzón elíptico, fuerza vs desplazamiento.....	81
Figura 64. Diagrama de la simulación punzón cónico, fuerza vs desplazamiento.....	83
Figura 65. Diagrama de la simulación punzón elíptico, fuerza vs desplazamiento	85
Figura 66. Diagrama fuerza vs desplazamiento del punzón cónico, datos experimentales vs simulación en agujero de 4 mm.....	86
Figura 67. Diagrama fuerza vs desplazamiento del punzón elíptico, datos experimentales vs simulación en agujero de 4 mm.....	86
Figura 68. Diagrama de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón cónico y elíptico.....	90
Figura 69. Tensiones que provocan el agrietamiento.....	92
Figura 70. Medición de expansión de agujero.	92

Figura 71. Diagrama de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón elíptico experimentación y simulación.....	93
Figura 72. Diagrama de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón cónico experimentación y simulación.	94
Figura 73. Puntos seleccionados y analizados en el SEM	96
Figura 74. Punto 1 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x	96
Figura 75. Punto 2 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x	97
Figura 76. Punto 2 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x	97
Figura 77. Punto 1 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x	98
Figura 78. Punto 2 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x	98
Figura 79. Punto 3 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x	99
Figura 80. Identificación de caras del blanco para lo obtención de puntos de análisis.....	101
Figura 81. Selección de puntos para general las curvas de triaxialidad en ambos lados del blanco	101
Figura 82: Diagrama de triaxialidad punzón cónico cara arriba.....	102
Figura 83: Diagrama de triaxialidad punzón cónico cara abajo.....	102
Figura 84. Diagrama de triaxialidad punzón elíptico cara arriba.....	103
Figura 85. Diagrama de triaxialidad punzón elíptico cara abajo.....	104

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la formabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el ensayo de expansión de agujero, se realizó el ensayo utilizando dos geometrías de punzones uno cónico y el otro elíptico además de variar el diámetro inicial de los agujeros perforados en la placa de acero con el fin de analizar la influencia que presentan estos parámetros dentro de los resultados finales del ensayo los cuales fueron comparados mediante la utilización de un programa basado en elementos finitos que permitió generara las simulaciones del ensayo. La parte inicial del trabajo se desarrolla en los capítulos 1 y 2 en los cuales se menciona conceptos básicos acerca de los procesos de conformado de chapa metálica, características e importancia del acero AISI 304 y se describen las investigaciones realizadas por diversos autores acerca del ensayo. En la segunda parte, desarrollada en el capítulo 3, se detalla el procedimiento que se utilizó para la elaboración experimental del ensayo en el que se incluye la caracterización del material. En el capítulo 4 se describe la simulación del ensayo además se realiza un proceso de parametrización en el que se explica la influencia que tienen valores como fricción o número de elementos de la malla en los resultados de simulación. En el capítulo 5, se exponen los resultados y el análisis de la experimentación y simulación del ensayo determinando la formabilidad del acero AISI 304. En la parte final del trabajo se presentan conclusiones y recomendaciones útiles para futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVES:

- **FORMABILIDAD**
- **PUNZÓN**
- **PARAMETRIZACIÓN**

ABSTRAC

In the present work, the formability of the AISI 304 stainless steel is analyzed by means of the hole expansion test, the test was carried out using two geometries of punches, one conical and the other elliptical, in addition to varying the initial diameter of the holes drilled in the plate. steel in order to analyze the influence of these parameters within the final results of the test which were compared by using a program based on finite elements that allowed to generate the simulations of the test. The initial part of the work is developed in chapters 1 and 2 in which basic concepts are mentioned about the processes of sheet metal forming, characteristics and importance of AISI 304 steel and the investigations carried out by various authors about the test are described. In the second part, developed in chapter 3, the procedure that was used for the experimental elaboration of the essay in which the characterization of the material is included is detailed. In chapter 4, the simulation of the test is described, and a parameterization process is carried out in which the influence of values such as friction or number of elements of the mesh in the simulation results is explained. In chapter 5, the results and the analysis of the experimentation and simulation of the test are determined determining the formability of the AISI 304 steel. In the final part of the work, conclusions and recommendations useful for future investigations are presented.

KEYWORDS:

- **FORMABILITY**
- **AWL**
- **PARAMETRIZATION**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

La presente investigación se enfoca en la evaluación de la formabilidad del acero AISI 304 mediante el ensayo de expansión de agujero, este ensayo permite caracterizar la formabilidad de chapas metálicas, consiste en expandir un orificio perforado en una chapa metálica por medio de un punzón hasta que se forme un collar alrededor del orificio original y comience a presentar algún tipo de fallo. (Kacem , Jmal , Krichen, & Manach , 2015)

El concepto de formabilidad se refiere a la capacidad que presenta un material para soportar deformaciones plásticas hasta alcanzar una determinada geometría definida sin fallo. El desarrollo de nuevas tecnologías para la realización del conformado de chapas a finales del siglo XIX obligó al estudio de la formabilidad de los materiales, así el poder predecir el fallo en los materiales permitió un gran desarrollo de la industria, ya que tanto el conocimiento del proceso de conformado y del material utilizado ayudó a abaratar los costos debido a la optimización de los procesos, por esta razón se comenzó a generar diversos métodos que permitan la evaluación de la formabilidad de las chapas de acero mediante ensayos experimentales.

Existen varios procesos para el conformado de chapa según sea el tipo de esfuerzo al que se encuentran sometidas las fibras del metal, pueden ser procesos de conformado por flexión y conformado por tracción. En el primero la deformación se debe a la flexión no homogénea de las fibras es decir unas fibras están comprimidas y otras traccionadas, por tanto se produce una mayor

recuperación elástica (springback), que afecta a la forma final de la pieza. Dentro del conformado por flexión tenemos los procesos de plegado, rolado, doblado, embutición y repujado. En el conformado por tracción el material está sometido a un estado fundamental de tracción, alargando todas las fibras y permitiendo que la recuperación elástica sea muy pequeña en este caso se encuentran algunos procesos como el de estampación y estirado dentro del cual se ubica el ensayo de expansión de agujero. (Martín Sanz, 2013)

Para poder caracterizar la formabilidad de los materiales laminares se han diseñado varios métodos de análisis, uno de los más utilizados dentro de la industria es el ensayo de expansión de orificio (Hole Expansion Test, HET). Este ensayo es el que más se asemeja a los procesos reales de conformado que parten de agujeros troquelados o punzonados, para evaluar la capacidad de las chapas metálicas frente a la formación de ensanchamiento de orificios o abocardados por lo tanto este ensayo es uno de los más calificados. En este ensayo se mide la relación de expansión de agujero (Hole Expansion Ratio, HER), este valor representa la cantidad de expansión de un agujero circular mecanizado en una chapa metálica cuando un punzón de una geometría determinada de diámetro superior es forzado a pasar por el orificio perforado hasta que se presente una grieta en el borde del agujero y se extienda a través del espesor del material. (Gutiérrez , 2012)

El principal interés por el cual se realiza este trabajo se basa en la inexistencia de investigaciones que se enfoquen en otro tipo de materiales que no sean aceros de ultra alta resistencia (UHSS) u otro tipo de aceros especiales, debido a esta razón se escogió el acero inoxidable AISI 304 ya que presenta características mecánicas diferentes que hacen posible generar una nueva base de estudio acerca del ensayo de expansión de agujero con los equipos tecnológicos

con los que cuenta la universidad y por la aplicabilidad que está presentando este material en industrias como la automotriz.

En este trabajo de investigación se encuentran detallados los métodos, procedimientos y equipos utilizados en el ensayo de expansión de agujero que permitirán generar nuevas conclusiones en un material diferente a lo presentado por diversos investigadores hasta el día de hoy además dichos resultados serán comprobados con las simulaciones que se realizarán en un programa basado en elementos finitos, dicho programa permitirá evaluar también variables como la fricción, o el número de elementos que se utilice en la malla del material y como estos pueden llegar a influir en los valores finales de HER.

1.2. Antecedentes

En varios estudios se han utilizado chapas de acero, aleaciones de aluminio o aceros de alta resistencia para el ensayo de expansión de agujero, siendo la relación de expansión de agujero un método eficiente y fundamental que permite evaluar la formabilidad local de una chapa metálica.

En muchos de los procesos industriales una vez realizado el proceso de estampado el material sobrante es cortado y luego se cumplen trabajos adicionales como el rebordeado o el doblado del acero este tipo de trabajos generan tensiones en los bordes de la chapa. A partir de estos problemas se han generado varios estudios en donde se ha demostrado que la fractura de los bordes en una chapa de acero como es el caso de la expansión de agujero no pueden predecirse con los diagramas de límite de conformado (Forming Limit Diagram, FLD). El diagrama FLD es una de las herramientas utilizadas para el análisis de la conformabilidad de chapas de acero las cuales generan información acerca de la conformabilidad máxima que puede ser capaz de soportar un material, el

cual se representa median la curva límite de conformado (Forming Limit Curve, FLC). (Gutiérrez , 2012)

La formabilidad de una chapa de acero puede determinarse de dos maneras tanto de la hoja a granel así como la formabilidad del borde de la chapa, cuando nos referimos a la hoja a granel la formabilidad se la puede definir como la capacidad que tiene la lámina de acero para deformarse en una pieza sin fracturarse, esto se lo puede determinar mediante la curva límite de conformado FLC, las medidas de ductilidad de las pruebas de tracción y mediante los experimentos de embutición profunda, para determinar la formabilidad del borde de la chapa de acero la cual depende de las características de formabilidad local del material se lo realiza a través de la prueba de expansión de agujero. (Paul , Mukherjee, Kundu, & Chandra, 2014)

Al realizar el proceso de expansión de agujero la chapa de acero sufre dos dobleces la primera se encuentra alrededor de la circunferencia del punzón y el segundo doblez se genera sobre el radio de la matriz, las deformaciones principales que se presentan se generan en los bordes del agujero expandido, la deformación más grande que se obtiene es sobre el agujero inicial de la chapa metálica el cual aumenta el diámetro del mismo mientras se reduce su espesor, la causa principal de fallo por rotura o agrietamiento es debido a la tensión en la dirección circunferencial en el borde del rebordeado del agujero. (Stachowicz, 2008)

Las investigaciones sobre el proceso de rebordeado de orificio han permitido observar que existe un contexto de carga múltiple con tensiones de compresión radiales y tensiones de tracción tangenciales, la deformación en el borde del agujero es una combinación tanto de estiramiento como de flexión, como resultado de las tensiones que se presentan en el proceso de expandir un

agujero tanto las pruebas de tracción convencionales así como la curva límite de formación FLC no son métodos suficientes que permitan determinar las características de expansión de las chapas de acero. (Huang & Chien, 2001)

Diversos autores han desarrollado el ensayo de expansión de agujero modificando parámetros como la geometría de los punzones, el espesor de la chapa, el diámetro de los agujeros, el tipo de proceso con el que se realiza la perforación de los agujeros en la chapa y los efectos que estos tienen sobre el resultado final del ensayo, el material de la chapa de acero, la velocidad de penetración del punzón, el efecto que tiene la holgura entre el punzón y la matriz también han utilizado equipos tecnológicos para realizar un análisis mucho más exacto del fallo de la chapa de acero durante el ensayo.

(Chen, Jiang , Cui , Lian , & Lu , 2014) en su investigación “Hole expansion characteristics of ultra high strength steels” demostraron que existe una correlación entre la resistencia a la tracción y la relación de expansión del agujero, (Kacem , Jmal , Krichen, & Manach , 2015) En su trabajo “Thinning and ironing in hole – flanging process” analizaron el efecto del planchado y observaron la existencia de una relación de separación de espesor crítica, es decir una holgura entre el punzón y la matriz (R_c) que influye para la formación del orificio con y sin planchado, (Thesing , Boff , & Schaeffer , 2016) En su documento “Experimental investigación of the hole expansion capability of a martensitic AHSS steel with two punch geometries and a variety of hole diameters.” investigaron los parámetros que influyen en la capacidad de expansión de agujero, utilizando geometrías diferentes de punzones y una variedad de diámetros de agujeros previamente perforados en la chapa de acero, (Dünckelmeyer, Karelova, Kremaszky, & Werner, 2009) En su investigación denominada “Instrumented hole expansion test” realizaron la prueba de expansión

de agujero mediante la construcción de un dispositivo de prueba instrumentado que les permitió el desarrollo del ensayo y la verificación de los parámetros de trabajo de una forma mucho más exacta que al realizarlo de la forma tradicional, (Stachowicz, 2008) en su trabajo “Estimation of hole-flange ability for deep drawing steel sheetsinvestigo” analizo la influencia que tiene la geometría de los punzones en el límite de expansión del agujero.

1.3. Definición del problema

La necesidad de predecir el fallo en los diferentes materiales de las chapas de acero ha hecho que en los últimos tiempos se desarrollen nuevas investigaciones que permitan el análisis de la formabilidad de estos materiales, la industria automotriz se ha enfocado en investigar aceros especiales, aceros de ultra alta resistencia (UHSS), aceros con calidad de embutición profunda (DDQ), chapas de acero de bajo carbono, aceros de baja aleación de alta resistencia (HSLA), los cuales permiten obtener estructuras de vehículos más ligeros y resistentes, en la industria térmica se utilizan diferentes aceros especiales para los tubos de transferencia de calor, tubos antifricción etc., sin embargo estos aceros presentan dificultades relacionadas a la formabilidad uno de los mayores problemas es la predicción de la formabilidad local de estos materiales.

En la actualidad principalmente en la industria automotriz se ha planteado utilizar cierta variedad de aceros inoxidables para reducir el peso, mejorar la resistencia del chasis y la seguridad como resultado de las excelentes propiedades mecánicas del material.

Para determinar la formabilidad local de una lámina de acero uno de los métodos más confiables que se han desarrollado es el ensayo de expansión de agujero sin embrago y a pesar de la existencia de datos sobre el ensayo realizados en diferentes aceros ha sido escaso el desarrollo

del ensayo de expansión de agujero sobre chapas de acero inoxidable que permita evaluar la formabilidad local del material.

Al ser el acero inoxidable uno de los materiales en el cual se está poniendo énfasis para el desarrollo de determinados componentes en la industria especialmente la automotriz surge la necesidad de conocer la formabilidad de este acero, este trabajo plantea analizar la formabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el ensayo de expansión de agujero cuya medición se la conoce como la relación de expansión de agujero (HER).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar la formabilidad del acero AISI 304 mediante ensayo de expansión de agujero y su correspondiente simulación, para ajustar los datos obtenidos de la parte práctica con la simulación.

1.4.2. Objetivos específicos

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

- Ejecutar los ensayos de expansión de agujero por embutición a fin de obtener las curvas Fuerza – Desplazamiento y sus puntos de rotura.
- Simular mediante el método de elementos finitos con software comercial el ensayo de expansión de agujero.
- Alcanzar una adecuada correlación entre resultados experimentales y de simulación

1.5. Alcance del proyecto

El presente proyecto de investigación contempla como punto de partida la caracterización del material que se utilizará en el proceso de conformado por embutición. Se procederá a realizar los cambios y ajustes pertinentes en la prensa hidráulica la que se encuentra en el Laboratorio de Ciencias de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Posterior a lo mencionado se procederá al diseño y construcción del conjunto matriz – punzón los cuales deben ser adaptables al equipo con el que se cuenta en el laboratorio de la universidad.

Los ensayos se realizarán variando la geometría de los punzón y el diámetro de los agujeros circular concéntricos perforados en placas de acero y serán deformados mediante los punzones, aumentando el diámetro de dichos agujero hasta el punto del agrietamiento o falla. La relación de diámetros más conocido como (HER) será tomada como índice de la formabilidad de la chapa metálica. Los valores experimentales serán comprobados con los obtenidos en la simulación realiza, para poder alcanzar una adecuada concordancia entre lo experimental y la simulación.

1.6. Justificación del proyecto

En los últimos años las industrias a nivel mundial han desarrollado diversos procesos de fabricación dentro del cual se encuentra el conformado por deformación plástica siendo uno de los procesos más importantes por la variedad de componentes que permite fabricar sin que se de ningún tipo de fallo en el material, para poder realizar este tipo de procedimiento es fundamental el análisis de los elementos de fallo que se presentan en los diferentes procesos de conformado, siendo el ensayo de expansión de agujero uno de los procedimientos más eficaces que permiten determinar la formabilidad de una chapa de acero.

La industria automotriz ha trabajado arduamente en la investigación de ciertos acero especiales, como los aceros de alta resistencia los cuales permiten disminuir el peso del vehículo y obtener estructuras más resistentes dando como resultado una disminución en el consumo de combustible pero estos aceros han presentado problemas en los procesos de conformado, una alternativa que ha surgido en los últimos años ha sido la utilización de ciertos grados de acero inoxidable como es el caso del acero AISI 304 ya que presenta excelentes propiedades mecánicas que permitirían diseños de gran complejidad, en la industria automotriz especialmente expandir los agujeros mecanizados en el transcurso de las operaciones de conformado es común, estas operaciones de rebordado estiran el material que previamente ya estuvo sujeto a deformaciones plásticas por lo que generan problemas durante la producción o el diseño de las piezas es por esta razón que debido a la inexistencia de investigaciones enfocadas en evaluar la formabilidad de chapas de acero inoxidable a través del ensayo de expansión de agujero se ha generado la necesidad del estudio de la formabilidad de este tipo de material utilizando el ensayo mencionado.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Aceros inoxidables

El acero inoxidable es una aleación formada a base de hierro, posee un bajo contenido de carbono en su constitución y un porcentaje mínimo de cromo del 11%. Los aceros comerciales en su mayoría contienen al menos 11% de cromo y máximo un 0.8% de carbono. Si su composición supera aproximadamente el 50%, se designa como “resistente al calor”. Posee como característica principal una elevada resistencia a la corrosión.

Esta particularidad se debe a la formación de una lámina de óxido de cromo sobre la superficie del acero. La capa protectora en una amplia gama de medios corrosivos es extremadamente fina y está firmemente adherida al acero. La capa de óxido se auto repara en presencia de oxígeno, por lo cual ciertos daños por fricción o mecanizados son restaurados por el mismo acero, en la figura 1 se presenta un esquema del proceso de reconstrucción de la capa de óxido ante cierto daño del acero inoxidable.



Figura 1: Reconstrucción de la capa pasiva en presencia del oxígeno del acero inoxidable

Fuente: (Limpieza, decapado y pasivado del acero inoxidable en aplicaciones industriales, 2017)

La resistencia a la corrosión es una propiedad que puede aumentar según los requerimientos de fabricación que se necesiten, el contenido de cromo puede incrementar y se pueden añadir elementos tales como molibdeno o níquel. Con el 11% de cromo, la capa protectora soporta un ambiente agresivo como el interior de una vivienda. Si el material fuera expuesto a la intemperie, con el tiempo se corroería. El porcentaje de contenido de cromo del 18% proporciona al material una resistencia a la corrosión tal que pueda soportar las más difíciles condiciones atmosféricas. La capacidad de soportar la corrosión de la lámina de óxido depende de la composición de la aleación, del medio en el que se encuentra, de la temperatura y de la concentración del elemento corrosivo (Eduardo, 2010).

2.2. Clasificación

Los tres principales tipos de aceros inoxidable que se utilizan en la industria son: Martensíticos, Ferríticos, Austeníticos, nombres otorgados por la fase dominante en el que se encuentra su microestructura a temperatura ambiente. Un tipo adicional de aceros inoxidables son los PH (Precipitation Hardening) o endurecimiento por precipitación, y por último tenemos la clase dúplex que ha alcanzado un alto interés en los últimos años. En la tabla 1 observamos que según la AISI (American Iron and Steel Institute) los aceros inoxidables se subdividen en las familias siguientes:

Tabla 1

Clasificación de los aceros inoxidables según la AISI

Clasificación de los aceros inoxidables según la AISI	
Designación de la serie	Grupos
2XX	Cr-Ni-Mn; no endurecibles, austeníticos, no magnéticos
3XX	Cr-Ni; no endurecibles, austeníticos, no magnéticos
4XX	Cr; endurecibles, martensíticos, magnéticos
4XX	Cr; no endurecibles, ferríticos, magnéticos

Fuente: (Leal, 2011)

Como hemos visto el acero inoxidable se caracteriza por llevar como mínimo un 11% de cromo, el incremento de este porcentaje y la combinación con el níquel direccionan tanto la naturaleza como las fases presentes, definiendo a si el tipo de acero inoxidable. En la figura 2 observamos un esquema del tipo de familias de aceros inoxidables según el contenido de cromo-níquel y cromo-carbono

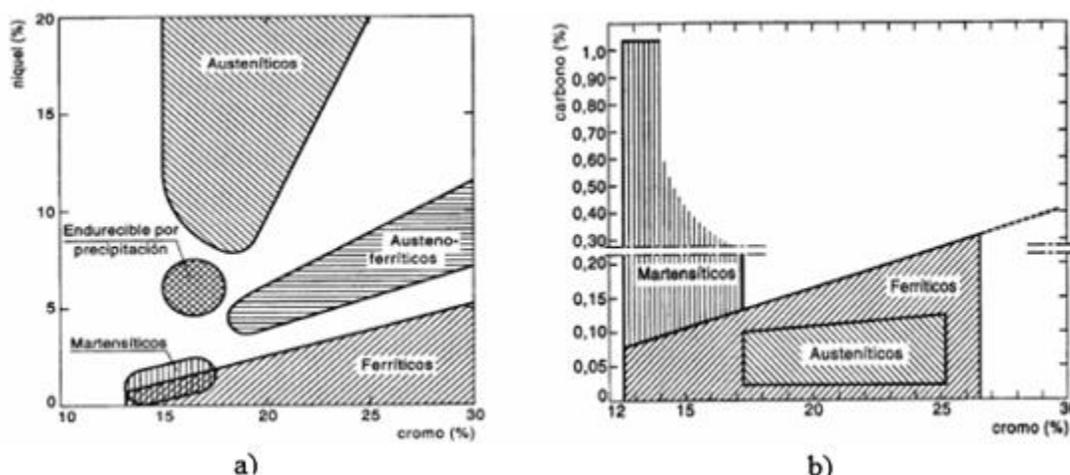


Figura 2: Familia de aceros inoxidables en función de a) el contenido de cromo y níquel, b) contenido de cromo y carbono

Fuente: (Leal , 2011)

2.2.1 Aceros inoxidables austeníticos

Estos aceros presentan una estructura cubica centrada en las caras formada en su mayoría por austenita a temperatura ambiente, no son ferromagnéticos en su condición de recocido, poseen una excelente formabilidad y una buena resistencia a la corrosión en diferentes medios o condiciones, mantienen su elevada resistencia mecánica en un gran rango de temperaturas, al añadir a este material elementos como manganeso, molibdeno o cobre brindan propiedades adicionales que lo hacen eficiente para proceso de fabricación como la soldadura y el conformado. (Parrado , 2013)

La familia de los aceros austeníticos se divide en dos grupos:

- a) **Aceros austeníticos al cromo – manganeso – níquel:** conocidos como la serie 200, las dos últimas cifras dependen de la adición de otros elementos, estos aceros se caracterizan por su alta resistencia mecánica como consecuencia del manganeso y el azufre
- b) **Aceros austeníticos al cromo – níquel:** conocidos como la serie 300 los cuales tienen un contenido de cromo que varía desde (15 – 32%) y contienen níquel desde (8 – 37%) y hasta un 2% de manganeso, es la variedad de acero con más éxito a nivel comercial estos aceros solo pueden ser endurecidos por trabajo en frío. El acero austenítico más representativo es el acero AISI 304. (Leal , 2011)

2.2.2 Acero AISI 304

Estos aceros no son magnéticos y no pueden lograr ser endurecidos mediante algún tratamiento térmico, presentan una gran ductilidad y excelentes propiedades mecánicas que lo hacen idóneo para la utilización en la industria automotriz con el objetivo de reducir el espesor de piezas estructurales en el chasis, tiene una gran aplicación en industrias como la farmacéuticas, aeronáuticas, alimenticia, naval y arquitectónica. En la figura 3 apreciamos la microestructura del acero inoxidable AISI 304 en estado de recocido.

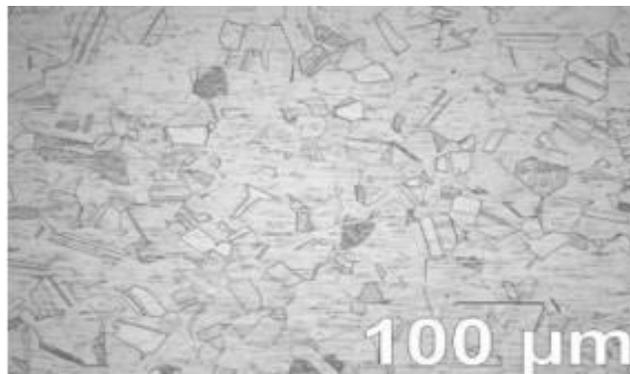


Figura 3. Estructura del acero inoxidable AISI 304 en estado de recocido
Fuente: (Parrado , 2013)

- **Composición química**

Tabla 2*Composición química del acero AISI 304*

Carbono (C) Máx. [%]	Manganeso (Mn) Máx. [%]	Azufre (S) Max [%]	Silicio (Si) Máx. [%]	Cromo (Cr) [%]	Níquel (Ni) [%]
0.08	2	0.03	1	18 - 20	8 – 11

Fuente: (Cia. General de Aceros S.A , 2008)

- **Propiedades mecánicas y físicas**

Tabla 3*Propiedades mecánicas y físicas del acero AISI 304*

Elongación (% en 50 mm)	Dureza Brinell (Máx.)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Módulo de Poisson	Densidad (g/cm ³)
40	202	193	515	205	0.26	7.9

Fuente: (Cia. General de Aceros S.A , 2008)

2.3 Conformado de chapa metálica

En la industria existe una variedad de procesos de fabricación para la elaboración de diferentes componentes como carrocerías de automóviles, electrodomésticos, construcción, envases etc., siendo uno de los más utilizados el conformado por deformación plástica, este proceso ha otorgado a las diferentes industrias grandes beneficios como por ejemplo un ahorro de dinero ya que la fabricación de las piezas de chapa metálica por estampación en frío para piezas en serie no necesita de grandes inversiones tanto en maquinaria como en equipos tecnológicos, otras de las ventajas que aporta el conformado por deformación plástica es que se genera un excelente acabado superficial de las piezas realizadas, existe una excelente relación resistencia – peso, no hay eliminación de material y se presenta una elevada resistencia mecánica.

El proceso de conformado tradicional se basa en sujetar la chapa metálica a través de algún mecanismo (matriz) y llevarlo a un estado de deformación plástica mediante la aplicación de fuerza generada por una herramienta (punzón), (Martín Sanz, 2013), como sabemos los aceros tienen diversas aplicaciones dentro de las diferentes industrias para ello se han desarrollado varios procesos para el conformado de los metales, los cuales se clasifican , tabla 4, en función de las fuerzas aplicadas a la chapa metálica en el proceso de darle la forma final al acero

Tabla 4

Clasificación de los procesos de conformado por deformación plástica

Clasificación de los procesos de conformado por deformación plástica		
Procesos de compresión directa	La fuerza es aplicada a la superficie de la pieza en la que se trabaja y el metal fluye formando un ángulo recto con la dirección de la compresión	Ej: laminación y forja
Proceso de compresión indirecta	Se generan fuerzas de compresión elevadas por la interacción entre la pieza a trabajar y la matriz	Ej: embutición profunda, extrusión
Proceso de tracción	Por la aplicación de fuerzas de tracción el material se adapta al contorno de una matriz	Ej: estirado
Procesos de flexión	Supone la aplicación de momentos de flexión a la chapa metálica	Ej: plegado, doblado
Proceso de cizallamiento	Se presentan grandes fuerzas por cizalladura que generan el corte del metal en un plano de cizalla	Ej: punzonado

Fuente: (Fundamentos generales del conformado por deformación plástica , 2008)

En la figura 4 se puede observar ejemplos de procesos de conformado de chapa metálica

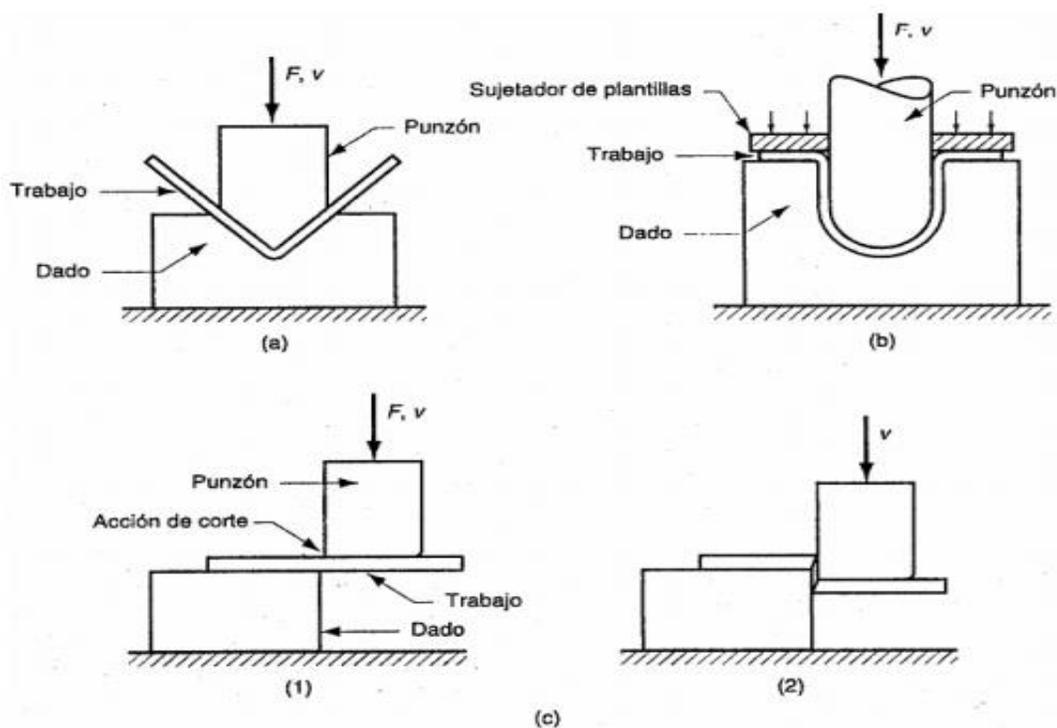


Figura 4. Procesos de conformado de chapa metálica: a) doblado, b) embutido, c) corte

Fuente: (Conformado mecánico de los metales)

2.3.1 Formabilidad

Cuando hablamos de formabilidad nos referimos a la capacidad que presenta un material a ser deformado a través de ciertos procesos como flexión, laminación o embutición profunda, la capacidad del material a ser deformado es mayor cuanto menor sea el límite elástico y cuanto mayor sea su capacidad de deformación plástica sin presentar ningún tipo de fractura. (Gutiérrez , 2012)

Las operaciones de conformado pueden realizarse de dos maneras la primera en función de la temperatura el cual se divide en proceso de conformado en caliente en donde el material soporta una deformación plástica a una temperatura mayor que la de recristalización y el conformado en frío que se da por un esfuerzo mayor al esfuerzo de fluencia original a temperatura ambiente, la segunda forma de conformado es en función de la geometría del material que se subdivide en dos,

la primera es la conformación masiva en donde materiales de enormes tamaños soportan un aumento en la relación superficie - volumen mediante operaciones de extrusión o forja y el segundo es el conformado de chapa en donde se genera la deformación plástica del material a través de operaciones como la embutición o el estirado. (Parrado , 2013)

2.4 Ensayos para la evaluación de la formabilidad de chapas de acero

Para garantizar el comportamiento óptimo de un material ante las diversas operaciones de conformación existe una variedad de ensayos que generan información para el estudio de la formabilidad de un material, los ensayos más utilizados y que determinan la formabilidad de un material son:

2.4.1 Diagramas límite de conformado (Forming limit diagrams, FLD)

El diagrama límite de conformado (Forming limit diagrams, FLD) figura 5, permite definir las componentes principales de deformación en el plano de la chapa los cuales son la deformación mayor ϵ_1 y la deformación menor ϵ_2 , dividiendo la gráfica en dos zonas la primera es la región segura (zona inferior) y la región de fallo que es la zona superior estas regiones se encuentren separadas por la curva límite de conformado (Forming Limit Curve, FLC), dependiendo en que zona se encuentren dichos puntos se puede predecir el fallo de la chapa.

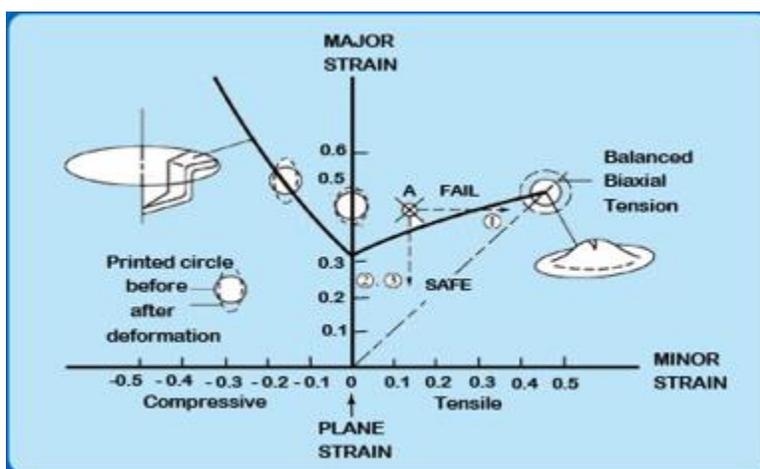


Figura 5. Diagrama FLD típico

Fuente: (Design for Sheet Metal Forming Processes, 2008)

En resumen estos diagramas son una representación de los límites de las deformaciones principales unitarias en donde puede generarse el fallo en deformación plástica mediante cualquier proceso de conformado. (Martín Sanz, 2013)

2.4.2 Relación de estirado límite (Limiting Draw Rati, LDR)

Este parámetro de análisis se obtiene de un proceso de embutición profunda, es de vital importancia la información acerca de la capacidad de estiramiento de una chapa de acero para poder evitar fallas en las piezas y realizar un correcto diseño tanto de las herramientas a utilizar y de las condiciones de formación durante el proceso de estampación, sin embargo no existe una forma adecuada que permita determinar la capacidad de embutición del material especialmente para aleaciones de alta resistencia,

Uno de los procesos más utilizados para poder determinar la capacidad de embutición de un acero es la prueba de relación de estirado límite o límite de embutibilidad (LDR), es la relación entre el diámetro de un punzón prefijado y el diámetro máximo de la pieza en bruto, este ensayo proporciona información sobre el efecto de la anisotropía plástica, esta relación puede determinarse

mediante método analítico, pruebas experimentales o simulación de elementos finitos. (Tingting & Taylan , 2014). En la figura 6 observamos el esquema del ensayo para determinar el límite de embutibilidad.

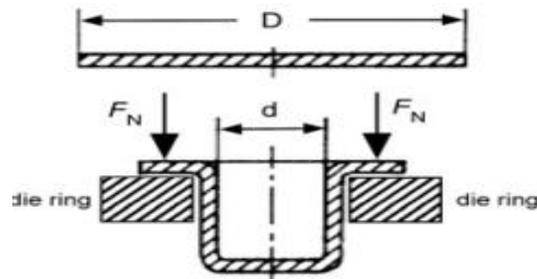


Figura 6. Esquema del ensayo para determinar LRD
Fuente: (Gutiérrez , 2012)

2.4.3 Ensayo de expansión de agujero

Una de las formas de fallo durante las operaciones de estampado son las grietas que se originan en los bordes que previamente han sido troquelados, la determinación de la resistencia de los bordes cortados se la realiza mediante el ensayo de expansión de agujero (Hole Expansion Test, HET), la medición de este ensayo se conoce como la relación de expansión de agujero (Hole Expansion Ratio, HER) cuya fórmula es:

$$\lambda(\%) = \left(\frac{D_f - D_o}{D_o} \right) \times 100$$

En donde:

λ = límite de expansión del agujero, %

D_f = diámetro promedio del agujero después de la ruptura

D_o = diámetro original del agujero

El valor de HER representa la cantidad de expansión de un agujero circular perforado en una chapa metálica cuando ha sido perforado mediante un punzón con una determinada geometría y de diámetro superior al agujero de la chapa hasta que está presente algún tipo de fallo en sus bordes, en la figura 7 se presenta el esquema general de trabajo de este ensayo.

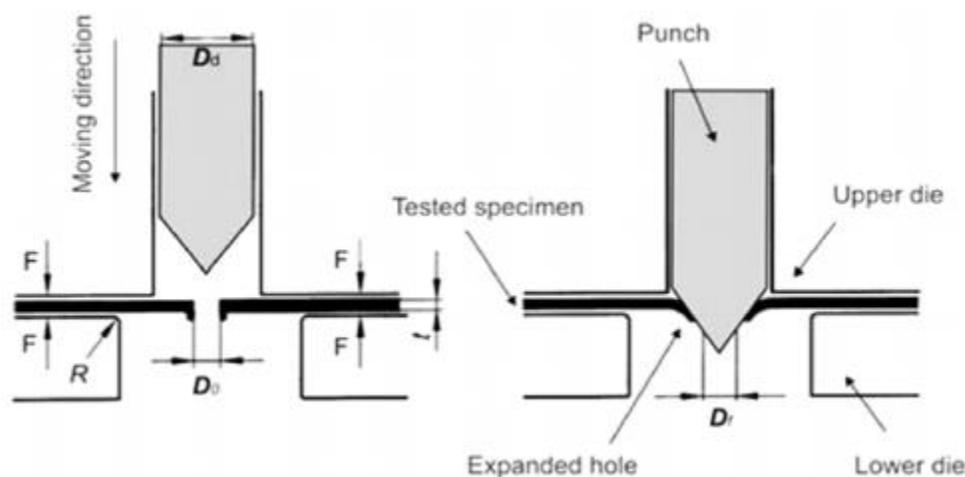


Figura 7. Esquema del ensayo de expansión de agujero HET

Fuente: (Gutiérrez , 2012)

Este ensayo tiene una variedad de parámetros de trabajo como la velocidad de penetración, fuerza de sujeción de la chapa de acero, diámetro del dado etc. que serán especificados en el capítulo 3 de este trabajo, es el ensayo más adecuado para determinar la formabilidad local de un material.

2.5 Ensayos realizados de la prueba de expansión de agujero

En los últimos años las investigaciones que se han desarrollado acerca del ensayo de expansión de agujero han permitido analizar varios factores que influyen en los resultados finales de la prueba como la microestructura del material, la calidad del borde del orificio antes de la prueba o las diferentes formas de punzón que se utilicen, el objetivo final de este ensayo es determinar la

capacidad de un material ha no fallar durante la prueba de expansión de agujero. (Dünckelmeyer, Karelova, Krempaszky, & Werner, 2009)

(Chen, Jiang , Cui , Lian , & Lu , 2014) Realizaron el artículo “Hole expansion characteristics of ultra high strength steels” en donde analizaron el ensayo de expansión de agujero en 15 diferentes chapas de acero, chapas laminadas en frio y en caliente con una variedad de espesores y un orificio perforado en el centro de 10 mm, se utilizó un punzón cónico con un ángulo de 60° y una velocidad de penetración de 0.3 mm/s , los resultados que se obtuvieron demostraron que existe una correlación entre la resistencia a la tracción y la relación de expansión del agujero.

Se observó que si la resistencia a la tracción de los aceros ensayados es inferior a 700 Mpa, la relación de expansión del agujero en el acero analizado disminuye de forma lineal al incrementar la resistencia a la tracción del acero, si por el contrario la resistencia a la tracción del acero es mayor a 700 Mpa la relación de expansión del agujero tiende hacia un valor constante el cual se encuentra alrededor del 30 al 40 % de deformación. En la figura 8 observamos la aparición de fallas en el borde del orificio en diferentes materiales después del ensayo de expansión de agujero observadas mediante un estéreo microscopio.

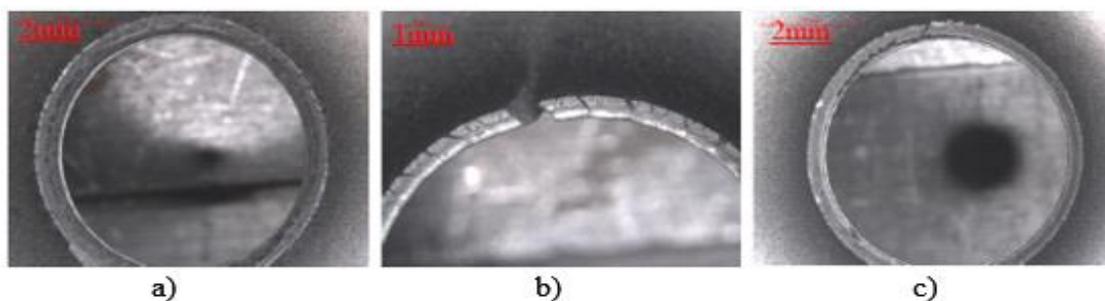


Figura 8. Conformación del borde del orificio en diferentes muestras observadas por estéreo microscopio. a) grieta parcialmente penetrada, b) grieta excesivamente expandida c) grieta penetrando a través del espesor de la muestra

Fuente: (Chen, Jiang , Cui , Lian , & Lu , 2014)

(Mori, Abe , & Suzui , 2010) Citados en Chen et al. Investigaron en láminas de acero de alta resistencia la periferia del agujero perforado y analizaron el resultado que tiene la calidad del borde cortado del agujero sobre la capacidad de estiramiento de la chapa de acero comparándolo a partir de la expansión de agujero de una perforación cortada con un punzón cónico, de esta forma determinaron que la relación límite de expansión de la lámina de acero depende de la dureza del borde cortado, de la irregularidad macroscópica y no depende de la rugosidad microscópica, de esta forma uno de los métodos más efectivos para mejorar la capacidad de estiramiento de la lámina de acero es el alisado de los bordes.

(Kacem , Jmal , Krichen, & Manach , 2015) En su investigación “Thinning and ironing in hole – flanging process” se basaron en pronosticar la ocurrencia del planchado en el proceso de rebordeado de orificio, para ello usaron un modelo basado en elementos finitos elastoplástico, para poder verificar los resultados el ensayo fue elaborado de forma práctica utilizando una lámina de aleación de aluminio de 2 mm de espesor, módulo de Young de 70 Gpa., y coeficiente de Poisson de 0.3, con un orificio perforado de diámetro 6 mm, un rango de valores de relación de separación de espesor (RC) entre 0,4 y 1,5 dicho valor indica si el proceso de rebordeado de orificio se realizó con o sin planchado y una variación en el diámetro del dado entre 6,8 a 9 mm. Este proceso se llevó acabo en una máquina universal de pruebas de compresión y tracción con una capacidad de carga de 50 KN, la muestra fue asegurada por medio de 2 resortes y una fuerza precargada proporcionando una fuerza máxima de retención de la muestra de aproximadamente 3700N y una velocidad de desplazamiento del punzón de 5 mm/min. En la figura 9 se observa el equipo de trabajo utilizado durante el ensayo y el modelado del ensayo mediante elementos finitos

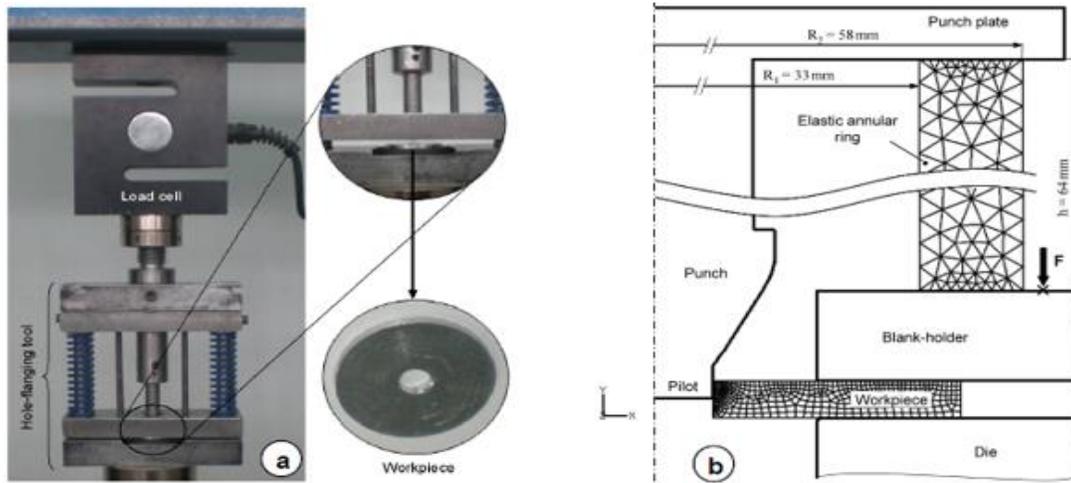


Figura 9. Equipo de trabajo montado en una maquina universal de compresión y tracción, b) modelado del ensayo mediante elementos finitos

Fuente: (Dewang , Purohit , & Tenguria , 2017)

Para el modelo de elementos finitos elastoplástico tanto las cargas como la geometría de las herramientas son axisimétricas adoptando un modelo axisimétrico 2D los resortes que permitieron la retención de la muestra se los modelaron utilizando un anillo anular elástico que se ubicó entre el soporte de la pieza en bruto y la placa de perforación, las herramientas como el punzón, la matriz y el pisador se modelaron como superficies rígidas mientras que el anillo anular elástico y la muestra a ser deformada se los modelaron como cuerpos deformables.

Para engranar el anillo anular elástico se usó un elemento híbrido de presión constante de triangulo lineal asimétrico de tres nodos de igual manera se usó un elemento cuadrilátero axisimétrico bilineal de 4 nodos para la pieza de trabajo, la malla en la muestra a deformar se la realizo automáticamente, los elementos de la malla en la periferia del agujero fueron refinados, para el efecto de fricción entre las herramientas fue elegida la ley de fricción de Coulomb y para describir unas condiciones de contacto moderadas entra la piza de trabajo y las herramientas se eligió un coeficiente de fricción de 0,2.

Se determinó que independientemente del valor de RC el adelgazamiento de la brida se presenta durante el proceso de rebordeado de orificio también se observó que el área de contacto entre la superficie exterior de la brida y la superficie interna de la matriz se encuentra ubicada en la parte exterior de la matriz para un valor de RC mayor a uno, a medida que el valor de RC disminuye la superficie de contacto entre ambas superficies incrementa esto genera la aparición del planchado y se obtiene una brida más larga.

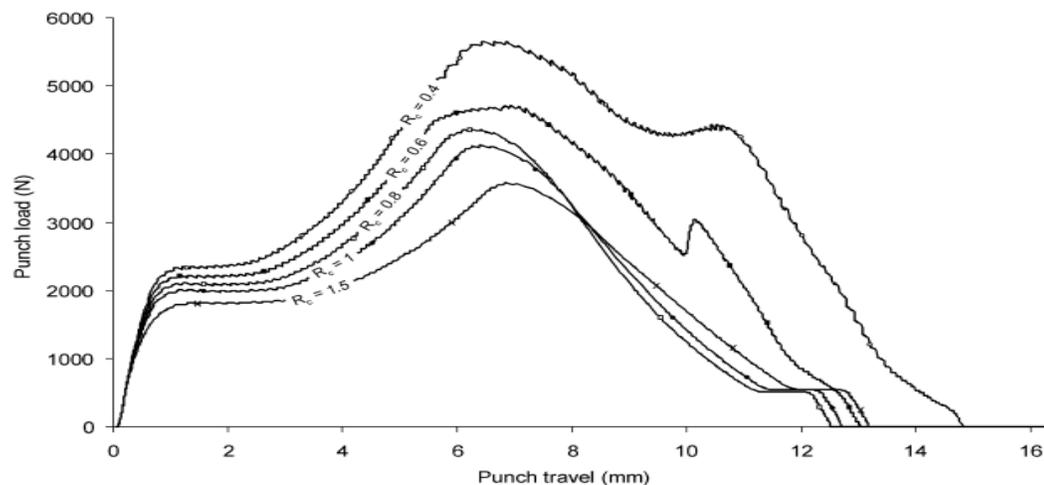


Figura 10. Carga vs desplazamiento del punzón para diferentes R_c .

Fuente: (Dewang , Purohit , & Tenguria , 2017)

Se encontraron que existe una relación de separación de espesor crítica, es decir una holgura entre el punzón y la matriz que influye para la formación del orificio con y sin planchado, de igual manera profundizaron el efecto que tiene el planchado en la carga del punzón y determinaron que la relación de separación (R_c) no afecta la carga del inicio del punzón al comenzar el proceso, después la carga de golpe aumenta, se observa en la figura 10 que mientras menor sea el valor de (R_c) la carga de perforación incrementara.

(Dünckelmeyer, Karelova, Krempaszky, & Werner, 2009) En su trabajo “Instrumented hole expansion test” desarrollaron la prueba de expansión de agujero mediante la construcción de un dispositivo de prueba instrumentado que permitió elaborar el ensayo y verificar los parámetros de trabajo de una forma mucha más exacta que en los métodos convencionales utilizados, ya que durante la prueba convencional el operador observa la formación de la primera grieta en el material y detiene el proceso de forma manual presentando en los resultados un exceso de penetración y un valor de HER más grande debido a que las grietas son muy pequeñas y no son fáciles de observar.

Para ello se creó una herramienta de conformado especial que se adaptó en una máquina de tracción estándar tipo W+B 600, figura 11 , se utilizó un punzón cónico con un ángulo de 60° y diámetro de 62 mm, un diámetro de dado de 69 mm, una dureza superficial del punzón de 55 HRC, una fuerza estática máxima de 600KN y se trabajó en un rango de fuerzas de sujeción entre 50 y 150 KN, presión de sujeción entre 10 Mpa y 30 Mpa con un lubricante de tipo Multidraw KTL N1(Zeller Gemelin).



Figura 11. Dispositivo de Hole Expansion instrumentado montado en la máquina de pruebas de tracción universal tipo W+B 600

Fuente: (Dünckelmeyer, Karellova, Kremaszky, & Werner, 2009)

El material utilizado es un acero IF (Interstitial Free) ya que este material permite desarrollar una alta profundidad de penetración sin presentar grietas, el parámetro de control fue la profundidad de penetración la que se determina como la distancia desde el primer contacto del punzón con la superficie de la muestra, hasta detener el movimiento del punzón esta profundidad máxima fue de 45 mm, tanto la profundidad de penetración y la fuerza se registraron por la máquina de tracción, los parámetros que se analizaron fueron la presión de sujeción, la fiabilidad operativa del ensayo y la velocidad de penetración, para los rangos analizados en el documento se demostraron que los parámetros de trabajo analizados no influyen en los resultados del experimento de manera importante por ende deben ser analizados otro tipo de variables dentro del ensayo de expansión de agujero que puedan afectar a la formabilidad local del material como por ejemplo la geometría de los punzones, el diámetro de los agujeros perforados en la chapa metálica etc.

(Chiriac & Chen , 2008) Citado en Dünckelmeyer et al. Realizo una investigación “Local formability characterization of AHSS-digital camera based hole expansion test development” se enfocaron en determinar el grado de influencia que representan ciertos parámetros de trabajo como la velocidad de penetración del punzón cónico, la fuerza de sujeción del blanco y la alineación de la muestra sobre el ensayo de expansión de orificio. Los resultados que obtuvieron al analizar las muestras de trabajo determinaron que tanto la fuerza de sujeción del blanco así como la velocidad de penetración no influyen en el ensayo pero la alineación de la muestra con respecto al movimiento del punzón tiene una influencia apreciable.

(Thesing , Boff , & Schaeffer , 2016) En su documento “Experimental investigación of the hole expansion capability of a martensitic AHSS steel with two punch geometries and a variety of hole diameters.” Utilizaron una chapa de acero martensítico avanzado de alta resistencia (AHSS) con espesor de 1.2 mm y diámetro externo de 80 mm he investigaron los parámetros que influyen en la capacidad de expansión de agujero.

Utilizaron dos geometrías de punzón, uno cónico con un ángulo de 60° y diámetro de 30 mm y la otra elíptica con radio mayor de 40 mm y radio menor de 14.95 mm, una matriz de diámetro 40 mm y una variedad de agujeros previamente perforados mediante corte por chorro de agua en las chapas de acero en un rango de 5 a 14.7 mm de diámetro para determinar la relación de expansión del agujero (HER), la velocidad de desplazamiento de los punzones fue de 5 mm/min. En la figura 12 se muestra una probeta cuyo fallo en el borde del orificio se creó a través del espesor de la placa.



Figura 12. Prueba de expansión de agujero valida; ruptura a través del espesor de la placa
Fuente: (Thesing , Boff , & Schaeffer , 2016)

Con estas variables establecidas los resultados obtenidos mostraron que la relación de expansión del agujero (HER) depende tanto de la geometría del punzón como también del diámetro inicial del agujero con resultados mucho más favorables para los agujeros de menor diámetro, el agujero de 5 mm obtuvo un valor de HER de 118% con el punzón elíptico siendo 26% mayor al valor de HER con el punzón cónico, en el agujero de 10 mm se presenta una tendencia a la convergencia siendo los valores de expansión de agujero de 57% para el punzón elíptico y 54% para el cónico además para agujeros a partir de 10 mm el valor de HER con el punzón cónico se muestran relativamente más altos que los valores del punzón elíptico en la figura 13 se puede observar la variación de HER de acuerdo al punzón utilizado y al diámetro del agujero perforado.

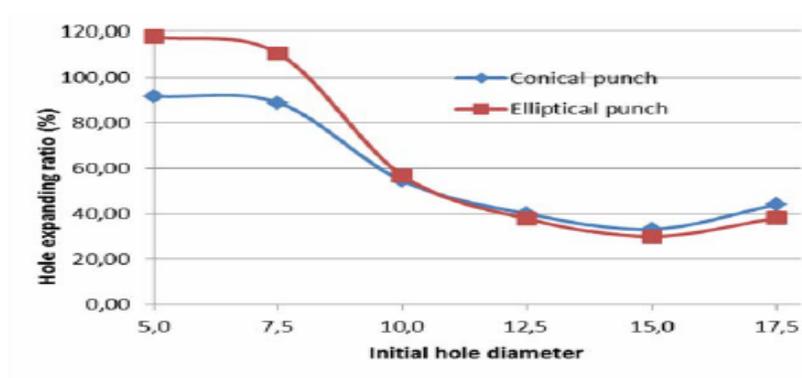


Figura 13. Porcentaje de HER en función del diámetro del agujero y la geometría del punzón
Fuente: (Thesing , Boff , & Schaeffer , 2016)

(Stachowicz, 2008) en su trabajo “Estimation of hole-flange ability for deep drawing steel sheetsinvestigo” analizo la influencia que tiene la geometría de los punzones en el límite de expansión de agujero para ello realizo ensayos con tres geometrías de punzones diferentes, cilíndricos, hemisféricos y cónicos, utilizo una chapa metálica de 80 x 80 mm con un orificio en el centro de la placa de 10 mm de diámetro, uno de los resultados que obtuvo es que de acuerdo al tipo de geometría de punzón utilizado existe una dependencia de la relación máxima de expansión del agujero, se observó que el punzón cilíndrico obtiene la peor tasa de deformación y por el contrario el punzón cónico obtuvo el valor HER más alto.

De igual forma pudo notar que los bordes del orificio están en contacto con la superficie del punzón tanto para la geometría cónica como esférica esto genera una alta fricción en la dirección tangencial lo que reduce el adelgazamiento de la pared y la protección de los bordes del agujero a la fractura. Además el estado de tensión para hacer el rebordado del agujero con la geometría de punzón cónico parece ser más beneficioso, esto genera una altura más pequeña de la brida en comparación con otra geometría de punzones.

Entre la deformación máxima obtenida en la prueba de tracción uniaxial y la deformación máxima en el borde de un agujero expandido existe una gran diferencia llegando la deformación máxima en el borde del agujero a ser tres veces mayor.

(Gutiérrez , 2012) En su tesis doctoral denominada “Aplicación de criterios de conformabilidad en productos planos de aceros de alta resistencia” Realizo la prueba de expansión de agujero mediante la utilización de una prensa hidráulica, se usaron diversos punzones de corte para generar los diámetros perforados en la chapas metálicas los cuales fueron de 23, 21,19 y 17 mm de diámetro

para el ensayo de expansión de agujero se utilizó un punzón cónico de diámetro 30 mm. En el proceso de punzonado se manejaron tolerancias de corte de 5,12 y 20%, se utilizaron cinco aceros AHSS con un espesor de 2 mm descritos en la tabla 5.

Tabla 5

Propiedades mecánicas de cinco aceros AHSS

Material	Límite Elástico (Mpa)	Resistencia Máxima (Mpa)	Elongación (%)	n
DP780	517	757	21	0,163
DP980	730	965	15	0,138
DP1000	785	1045	12	0,134
DOCOL1200	1079	1204	7,7	0,117
MSW1200	1110	1266	6,9	0,102

Fuente: (Gutiérrez , 2012)

El ensayo se lo realizo en la dirección al proceso de corte de los agujeros por punzón y en la dirección contraria. Los resultados del ensayo realizado en la misma dirección del proceso de punzonado (burr out) demostraron que para una tolerancia de 5% la relación de expansión de agujero (HER) no supera el 30% en los 5 aceros analizados, con una tolerancia de 12% la relación aumenta en la mayoría de los aceros pero con una tolerancia del 12 y 20% el acero MSW1200 obtuvo valores de HER superiores al 55% como se muestra en la figura 14 en este tipo de aceros se puede decir que el valor de HER aumenta al aumentar la resistencia mecánica del acero.

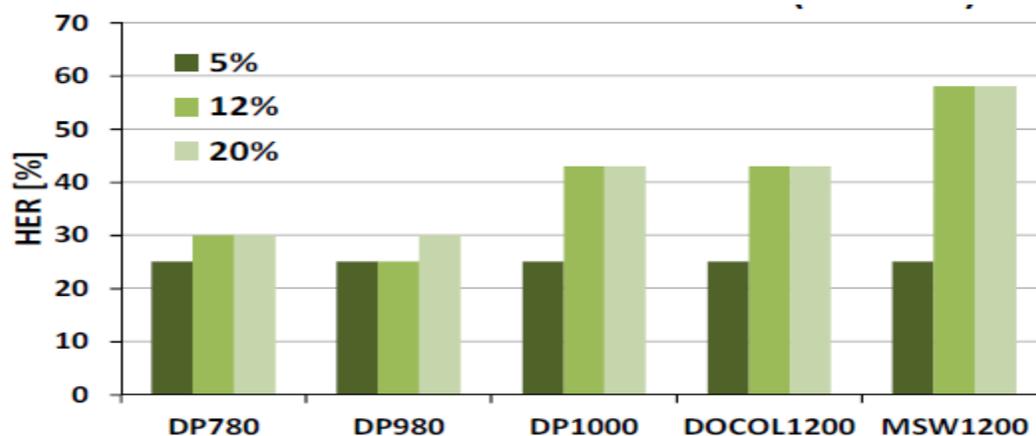


Figura 14. Valores de HER obtenido con diferentes tolerancias en el proceso de punzonado (burr out)
Fuente: (Gutiérrez , 2012)

De igual forma en la figura 15 se muestran los resultados de HER obtenidos en la dirección opuesta al proceso de punzando (burr in).

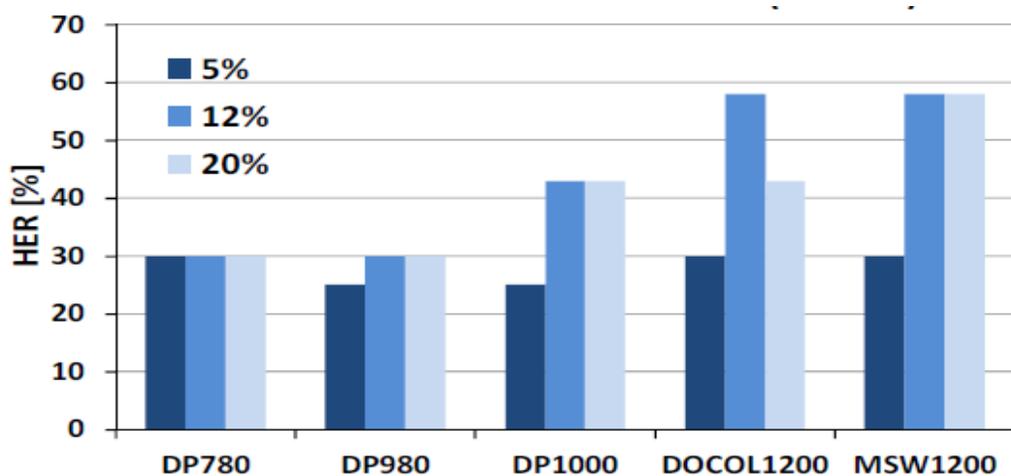


Figura 15. Valores de HER obtenido con diferentes tolerancias en el proceso de punzonado (burr int)
Fuente: (Gutiérrez , 2012)

En diversas investigación se ha demostrado que la conformabilidad de un material está ligada al coeficiente de endurecimiento (n) es por esta razón que cuando (n) aumenta, la conformabilidad lo hace de igual manera, esto significa que los aceros con un mayor valor de (n) deben presentar

una mayor valor de HER durante el ensayo de expansión de agujero este tipo de conclusiones se han analizado en su mayoría en aceros microaleados de bajo carbono, al contrario al analizar aceros AHSS los resultados son opuestos es decir el valor de la expansión del agujero aumenta cuando disminuye el coeficiente de endurecimiento.

En esta investigación se describió que la causa de estos resultados podría estar relacionado con la microestructura del material, los aceros DP tienen una buena conformabilidad debido al contenido de ferrita la cual es excesivamente dúctil y con elevados valores de coeficiente de endurecimiento, a hora bien una disminución del valor de HER debería ser por un aumento en la fracción de volumen de la martensita, pero en el caso en los aceros MSW1200 y DOCOL1200 los cuales tienen un menor contenido de ferrita y un menor coeficiente de endurecimiento que los aceros DP el valor que obtuvieron de HER fue mayor, siendo una de las causas que estos materiales poseen una combinación de propiedades mecánicas que evitan la nucleación de las grietas, lo que también implicaría una mayor tenacidad del material.

(Wang, Luo , & Wierzbicki, 2014) En su trabajo “Experiments and modeling of edge fracture for an AHSS sheet” realizaron el ensayo de expansión de agujero utilizando un acero de alta resistencia Dual Phase (DP), específicamente el acero DP780 de 1,6 mm de espesor, un punzón cónico con un ángulo de 60° y un diámetro de vástago de 28 mm, un dado de 50 mm de diámetro con un radio de borde de 1 mm, las muestras fueron cortadas en forma de disco las cuales se sujetaron a la matriz por medio de un anillo de metal de 25 mm de grosor sujeta por medio de 16 pernos M10.

Para evitar que se presente algún tipo de deslizamiento de la muestra durante el ensayo cada perno fue apretado con un par de 65 NM asegurando la fijación de la muestra a la matriz, el ensayo se lo realiza en una máquina de prueba universal (MTS G45) con una velocidad de recorrido del punzón de 2 mm/min. En la figura 16 se observa la máquina de prueba universal y la herramienta de sujeción de las muestras utilizadas en el ensayo.

En las probetas se realizaron los agujeros mediante tres técnicas de perforación diferentes, fresado, punzonado/supresión y corte por chorro de agua, el perforado por fresado permite mantener las propiedades reales del material, mientras que el corte por chorro de agua proporciona una superficie rugosa ya que es una técnica de corte abrasiva, el punzonado es ampliamente utilizado en la industria pero los bordes que son fabricados de esta forma presentan tensiones residuales, uno de los parámetros importantes que se tomó en cuenta fue la holgura existente entre el punzón y la matriz (CL) para la perforación del agujero en la placa los valores fueron 5%, 10% y 20%.

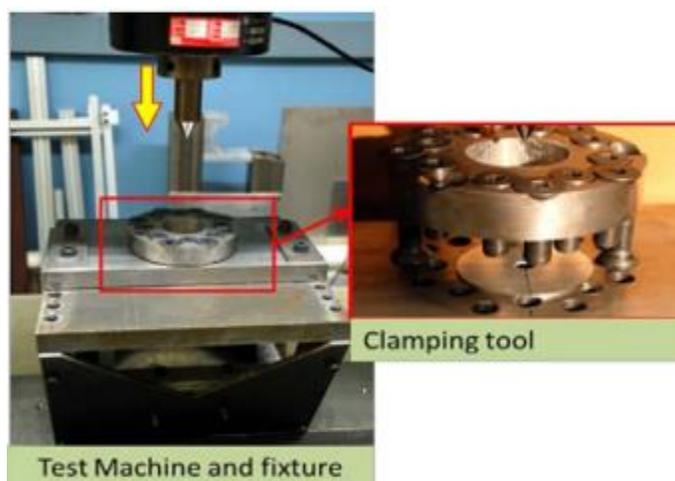


Figura 16. Máquina de prueba universal (MTS G45) y herramienta de sujeción de las muestras utilizadas en el ensayo.

Fuente: (Wang, Luo , & Wierzbicki, 2014)

En la forma tradicional del ensayo de expansión de agujero el operador observa la aparición de las grietas de forma visual deteniendo el ensayo cuando las fallas en el material son bastante obvias lo que genera un valor de HER excesivo, para superar este problema fue utilizado un método de medición 3D sin contacto DIC, se requirieron 2 cámaras para grabar imágenes y poder monitorear las muestras, debido al poco espacio debajo de los accesorios de la máquina se utilizó un espejo con una capa plateada en la parte superior del cristal que permita reflejar la muestra en las cámaras.

El 3D DIC brinda al ensayo ventajas como por ejemplo, la utilización de las cámaras permitió ampliar la periferia del orificio más de 10 veces en el monitor permitiendo observar de una manera mucho más clara cuando se produce la primera grieta en el espesor de la chapa, otra de las ventajas es que se obtuvo la deformación en la superficie de las muestras a pesar de que ésta se presenta en un espacio tridimensional es por esa razón que 3D DIC puede verificar imágenes fotograma a fotograma y permite comprobar el momento exacto en el que falla el material y calcular en HER en ese instante. En la figura 17 observamos un esquema de la posición de la cámara durante el ensayo y la imagen capturada de una muestra después de sufrir la fractura.

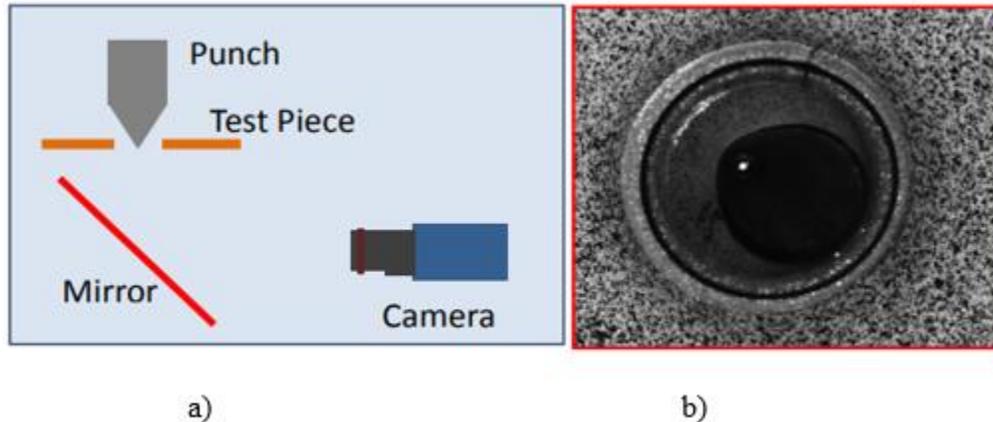


Figura 17. a) Esquema del posicionamiento de la cámara durante el ensayo de expansión de agujero, b) imagen capturada de una muestra después de sufrir la fractura en el borde del agujero.

Fuente: (Wang, Luo , & Wierzbicki, 2014)

El ensayo también fue realizado a través de una simulación de elementos finitos para esto se supuso un estado virgen del material correspondiente a una probeta perforada mediante el proceso de fresado, la simulación se la realiza con una densidad del material y una velocidad de carga que permitan completar por lo menos 500.000 pasos de tiempo. Se ha modelado solo un cuarto del ensayo de expansión de agujero que permitirá aprovechar la simetría geométrica, y de carga del material, la muestra se discretiza mediante la utilización de elementos solidos de 8 nodos de integración reducida, cerca del borde del agujero es decir donde existirá la deformación o el estiramiento máximo se genera una malla cuyos elementos tienen una relación de aspecto 1:1:1 y una longitud de borde de 0,1 mm.

La forma de sujeción de la muestra en la matriz representada en la figura 16 permite elegir una condición de limite completamente fija al perímetro de la muestra, se modela como un cuerpo rígido la cabeza del punzón cónico y para expandir el orificio se lo limita a moverse solo en una dirección axial por último el contacto entre la muestra y la cabeza del punzón se lo establece que es sin fricción. Los resultados que se obtuvieron tanto en la simulación utilizando un programa

basado en elementos finitos y la realización practica presentaron resultados similares, mostrando que en las probetas fresadas y las cortadas con chorro de agua pueden llegarse a obtener valores de HER de hasta un 40% antes de que presenten algún tipo de fallo mientras que las muestras que fueron perforadas con un punzón pueden estirarse hasta un 15%, la muestra cortada con chorro de agua tiene un estiramiento del 35% mientras que la fresada presenta un estiramiento del 37,5%. Para la muestra perforada, la separación de la matriz y el punzón (CL) en el momento de la realización del agujero producen un límite de estiramiento diferente siendo el valor de 20% de holgura el que presenta mayor deformación con un valor de HER de 15%, el CL de 10% presenta un valor de HER de 14% y el CL 5% tiene un valor de HER de 12%.

2.6 Simulación

El desarrollo tecnológico ha permitido disponer de una amplia variedad de técnicas adaptativas para la predicción de un proceso de conformado. Los programas AEF (análisis por elementos finitos) son herramientas que permiten obtener soluciones aproximadas en la solución de problemas que sean susceptibles a ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales.

2.6.2 Método de elementos finitos

Un proceso de conformado de materiales es un sistema de infinitas incógnitas, este método consiste en la transformación del sistema de infinitas incógnitas a uno con un número finito de incógnitas que se relacionan entre sí por elementos de un tamaño finito, por medio de un mallado en la superficie de trabajo.

El método de elementos finitos está adaptado para su manejo en diferentes softwares, las cuales resuelvan ecuaciones diferenciales para dar solución a problemas físicos de gran complejidad. En un sistema de elementos finitos, el conjunto de grados de libertad incluye tres traslaciones y tres rotaciones. La información es pasada por cada elemento entre sí por medio de nodos comunes.

(De la Cruz, Cantero, Díaz, & Miguélez) En su trabajo denominado “Análisis de estrategias de mallado para modelizar en 3D procesos de taladrado en Ti6Al4V” Investigaron los efectos que tiene el número de elementos de la malla en un material de Ti6Al4V en un proceso de taladrado, para esto utilizaron el programa basado en elementos finitos denominado Deform 3DTMv6.1 el cual realiza un remallado automático y se basa en una formulación lagrangiana, para ejecutar este proceso de taladrado utilizaron una broca de 6 mm de diámetro con ángulo de punta 140° y un ángulo de la hélice de 30°. El material fue modelizado como plástico además utilizaron un coeficiente de fricción de 0.6, para valorar la influencia del número de elementos de la malla desarrollaron un modelo inicial con una velocidad de corte de 50 m/min y avance de 0.07 mm/rev realizando las simulaciones con una profundidad de taladrado de 0.4 mm. Para el análisis del mallado se consideró un área de 6.5 mm alrededor del lugar de perforación, se analizaron 5 tipos de mallados, en tres de ellos se trabajó con una densidad homogénea y en dos con una densidad variable de malla en el área a trabajar. En la tabla 6 se describe las características del tamaño de las mallas utilizadas:

Tabla 6*Tamaño de elementos de la malla*

Mallado con elementos de tamaño homogéneo			Mallado con densidad variable en la zona de corte	
Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5
0.07 mm	0.128	0.3	0.02 – 0.128 mm	0.02 – 0.3 mm

Fuente: (De la Cruz, Cantero, Díaz, & Miguélez)

La pieza primero fue mallada con un número de elementos entre 100.000 y 190.000, luego generando el mallado local. Notaron que al utilizar un mallado superior a los 200.000 elementos y un tamaño menor de malla de 0.07 mm en la zona de trabajo el programa deja de funcionar adecuadamente. Los resultados de la influencia del número de elementos de la malla se muestran en la figura 18 y 19.

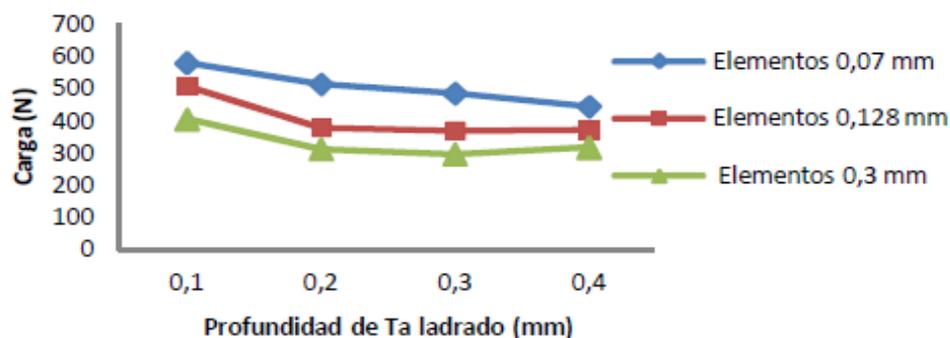


Figura 18. Evolución de la fuerza axial para diferentes densidades de malla, utilizando elementos homogéneos de mallado de 0.07, 0.128 y 0.3 en la zona de trabajo

Fuente: (De la Cruz, Cantero, Díaz, & Miguélez)

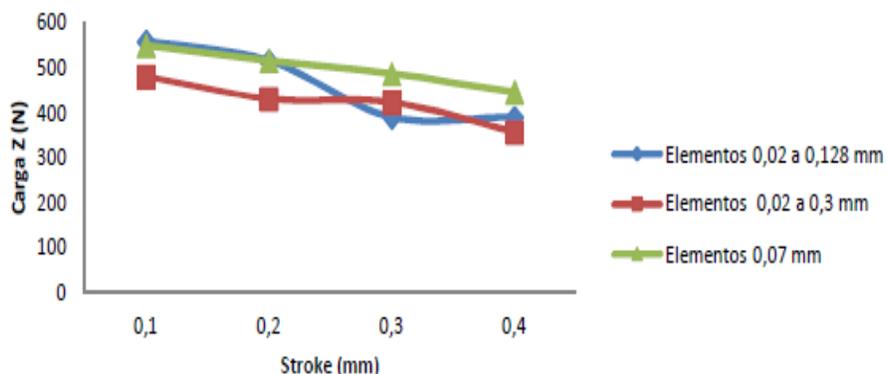


Figura 19. Evolución de la fuerza axial para los 2 mallados con densidad variable en la zona de trabajo y mallado homogéneo con tamaño de elementos de 0.07 mm

Fuente: (De la Cruz, Cantero, Díaz, & Miguélez)

En la figura 18 se puede observar que existe una forma de evolución temporal de las fuerzas similares pero las magnitudes cambian drásticamente existiendo una variación de 19% para elementos de 0.128 mm y una variación de 35% para elementos de 0.3 mm respecto al mallado con elementos menores a 0.07 mm.

En la figura 19 se aprecia que existe un similar comportamiento en la evolución temporal de la fuerza sin embargo en las magnitudes se presenta una variación de 9% y 26% para mallado con densidad variable respecto al mallado homogéneo de tamaño 0.07 mm, de acuerdo a esto determinaron que mientras más densa sea la malla los resultados de simulación serán mucho más precisos pero el tiempo de simulación aumentará exponencialmente además se debe tomar en cuenta que existe un límite en el número de elementos de la malla general, en el que los ordenadores dejan de funcionar adecuadamente. Cabe mencionar que en ésta investigación se profundizó acerca de la variación en parámetros como la velocidad de corte y avance y se observaron los efectos en la morfología de la viruta como resultado de la perforación del material que no son pertinentes al alcance de esta tesis.

CAPÍTULO III

3 EXPERIMENTACIÓN

3.1 Metodología de trabajo

Una vez analizadas las investigaciones previas de los diferentes autores se procede a desglosar una metodología de trabajo que permita realizar un correcto procedimiento experimental del ensayo de expansión de agujero, la mayoría de procesos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Para llevar un orden adecuado de las etapas de experimentación del ensayo de expansión de agujero en la tabla 7 se describe cada una de ellas.

Tabla 7

Metodología de trabajo

Etapas de trabajo	Descripción
Etapas 1	Caracterización del material
Etapas 2	Elaboración de probetas de acero inoxidable AISI 304
Etapas 3	Construcción de punzones
Etapas 4	Adecuación y montaje de la prensa hidráulica
Etapas 5	Ejecución del ensayo
Etapas 6	Medición de HER en las probetas
Etapas 7	Morfología de la fractura

A continuación, se procede a describir cada una de las etapas mencionadas

3.1.1 Etapa 1: Caracterización del material

La presente investigación utiliza el acero inoxidable AISI 304 con un espesor de 1 mm, para la caracterización de sus propiedades mecánicas, químicas y microestructurales, para las cuales se obtuvieron sus respectivas probetas.

1) Ensayo de tracción

El ensayo de tracción tiene como objetivo someter una probeta a un esfuerzo axial de tracción dicho esfuerzo incrementará progresivamente hasta que se presente la rotura de la probeta, mediante este ensayo se pueden determinar las propiedades mecánicas de un material como el módulo de elasticidad, límite de fluencia, límite elástico, en síntesis este ensayo mide la resistencia que posee un material a una fuerza estática.

Para este ensayo se utilizó la máquina de tracción universal del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE, que es capaz de:

- Producir la fuerza suficiente para alcanzar la fractura de la probeta de acero inoxidable.
- Controlar el incremento gradual de la fuerza.
- Obtener un registro constante de las fuerzas que se aplican y el alargamiento de la probeta hasta la rotura.

a) Elaboración de las muestras

Las probetas para el ensayo de tracción en chapa metálica figura 20 se obtuvieron de acuerdo con la norma ASTM E8M, la cual cubre el acero inoxidable AISI 304.



Figura 20. Probetas de acero inoxidable AISI 304

b) Resultado del ensayo

La tabla 8 muestra los resultados del ensayo de tracción obtenido de las probetas de acero inoxidable AISI 304.

Tabla 8

Resultados de ensayo de tracción

carga (N)	longitud (mm)	ΔL (mm)	área i	Esfuerzo (Mpa)	deformación real (ϵ)	Ln esfuerzo	Ln de (ϵ)
0.000	25.000	0.000	12.106	0.000	0.000		
467.400	25.005	0.005	12.103	38.620	0.000	3.654	-8.615
1020.200	25.009	0.009	12.101	84.310	0.000	4.434	-7.922
1603.400	25.014	0.014	12.099	132.530	0.001	4.887	-7.517
2046.900	25.018	0.018	12.097	169.210	0.001	5.131	-7.229
2424.100	25.023	0.023	12.095	200.420	0.001	5.300	-7.006
2838.500	25.027	0.027	12.092	234.740	0.001	5.458	-6.824
3163.200	25.032	0.032	12.090	261.640	0.001	5.567	-6.670
3302.500	25.036	0.036	12.088	273.210	0.001	5.610	-6.537
3475.200	25.041	0.041	12.086	287.540	0.002	5.661	-6.419
3508.500	25.045	0.045	12.084	290.350	0.002	5.671	-6.314
3564.500	25.091	0.091	12.062	295.520	0.004	5.689	-5.621
3632.200	25.136	0.136	12.040	301.670	0.005	5.709	-5.217
3684.100	25.181	0.181	12.018	306.540	0.007	5.725	-4.930
3745.500	25.227	0.227	11.997	312.200	0.009	5.744	-4.708
3795.000	25.272	0.272	11.975	316.900	0.011	5.759	-4.526
3847.000	25.317	0.317	11.954	321.820	0.013	5.774	-4.373
3894.100	25.363	0.363	11.933	326.340	0.014	5.788	-4.240
3953.900	25.408	0.408	11.911	331.950	0.016	5.805	-4.124
3983.400	25.453	0.453	11.890	335.020	0.018	5.814	-4.019
4189.900	25.680	0.680	11.785	355.520	0.027	5.874	-3.618
4353.700	25.907	0.907	11.682	372.680	0.036	5.921	-3.335
4537.600	26.133	1.133	11.581	391.830	0.044	5.971	-3.116
4844.700	26.587	1.587	11.383	425.600	0.062	6.053	-2.788
5004.100	26.813	1.813	11.287	443.350	0.070	6.094	-2.659
5127.700	27.040	2.040	11.192	458.140	0.078	6.127	-2.545
5274.800	27.267	2.267	11.099	475.240	0.087	6.164	-2.444
5403.300	27.493	2.493	11.008	490.860	0.095	6.196	-2.353

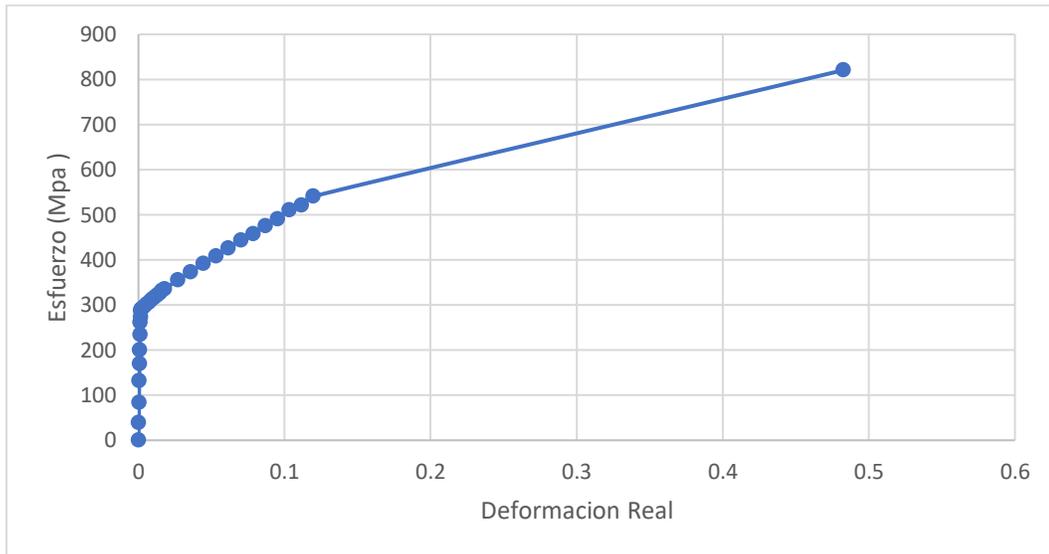


Figura 21. Diagrama esfuerzo vs deformación de la probeta del acero AISI 304

2) Determinación del factor de endurecimiento

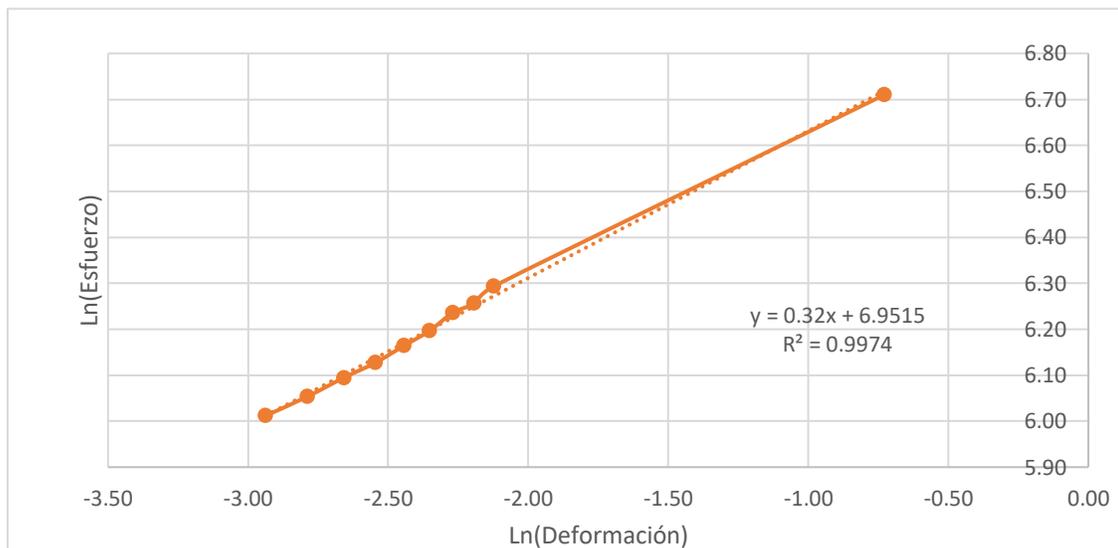


Figura 22. Curva de regresión lineal para la determinación del coeficiente de endurecimiento del acero inoxidable AISI 304

Mediante los datos obtenidos en el ensayo de tracción se realiza la curva de regresión lineal figura 22, que nos permitirán determinar el coeficiente de endurecimiento (n) del acero inoxidable AISI 304

La tabla 9 muestra el coeficiente de endurecimiento por deformación (n) y el coeficiente de resistencia K .

Tabla 9

Valores de K y n del acero AISI 304

Material	Exponente de endurecimiento por deformación (n)	Coefficiente de endurecimiento (K)
Acero inoxidable AISI 304	0.32	1045

Es de suma importancia en diferentes aspectos de estudio elasto-plástico la descripción de la curva esfuerzo vs deformación mediante expresiones matemáticas que se adapten al material con el que se está trabajando, ya que la zona plástica de la curva depende de parámetros que pronostican los mecanismos de deformación y formabilidad del material. Una de las expresiones más utilizadas en materiales que poseen gran ductilidad como es el caso del acero AISI 304 y que permiten predecir el comportamiento plástico es la ecuación de Hollomon la cual establece una ley potencial de la forma:

$$\sigma = K \varepsilon^n$$

En donde:

σ = Esfuerzo real

ε = Deformación real

K = Coeficiente de endurecimiento

n = Exponente de endurecimiento

Uno de los aspectos más importante de esta ecuación es que permite la evaluación de la formabilidad de un acero a través del coeficiente de endurecimiento por deformación, además esta ecuación ajusta de una manera mucho más simple y satisfactoria los esfuerzos y deformaciones (Aparicio, Armas , & Ciaccia, 2007).

3) Ensayo de espectrometría de chispa

El ensayo de espectrometría de chispa permite determinar la composición química de la chapa de acero inoxidable AISI 304. Para la cuantificación de los elementos presentes en las probetas figura 23, se empleó el espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN del departamento de metalurgia de la Escuela Politécnica Nacional, se realizaron dos probetas para dicho ensayo.

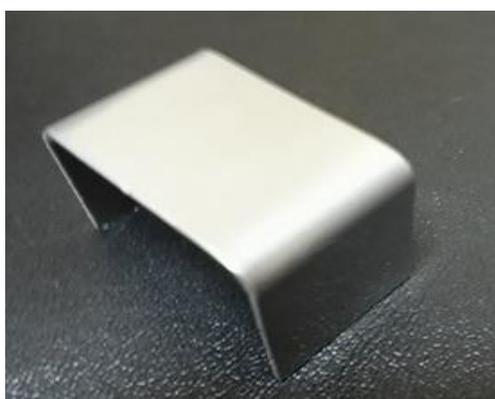


Figura 23. Probeta para el ensayo de espectrometría

Los resultados del ensayo se pueden observar en la tabla 10:

Tabla 10

Composición química del acero AISI 304

<i>Elemento</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Co</i>	<i>V</i>	<i>Fe</i>
<i>Muestra A (%)</i>	0,049	0,324	1,058	0,013	18,36	0,024	7,932	0,138	0,209	0,085	71,76
<i>Muestra B (%)</i>	0,050	0,324	1,062	0,014	18,36	0,024	7,904	0,140	0,208	0,086	71,78

Como podemos observar en la tabla 10 al ser un acero inoxidable de la familia 300 posee un contenido de cromo del 18.36 % y níquel de aproximadamente el 8 % además de un contenido de manganeso de 1%.

4) Micrografía del acero inoxidable AISI 304

Se realizó además un ensayo metalográfico, que permita observar la microestructura del acero inoxidable AISI 304 los componentes con los que fue atacado el acero se presentan en la tabla 11.

Tabla 11

Reactivo químico utilizado para el acero AISI 304

Compuesto	Cantidad
Ácido nítrico (HNO_3)	10 ml
Ácido acético	10 ml
Ácido clorhídrico (HCL)	15 ml
Glicerina	3 gotas

La muestra fue sumergida en el reactivo químico por un tiempo aproximado de 2 minutos. En la figura 24 se puede apreciar la microestructura del acero inoxidable AISI 304 realizada en el laboratorio de ciencia de materiales de la universidad.

En la figura 25 se presenta la micrografía realiza por (Medina , 2016), el reactivo químico que fue utilizado se presenta en la tabla 12.

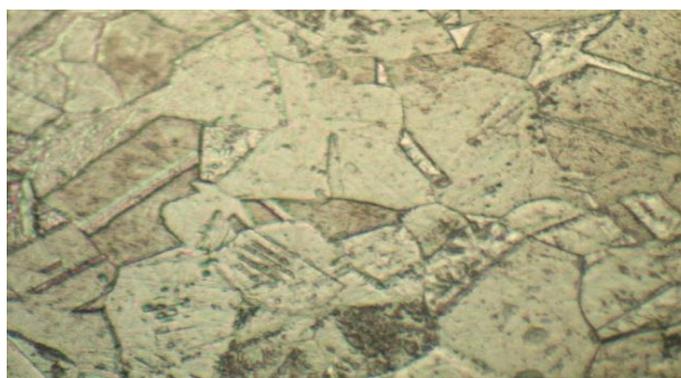
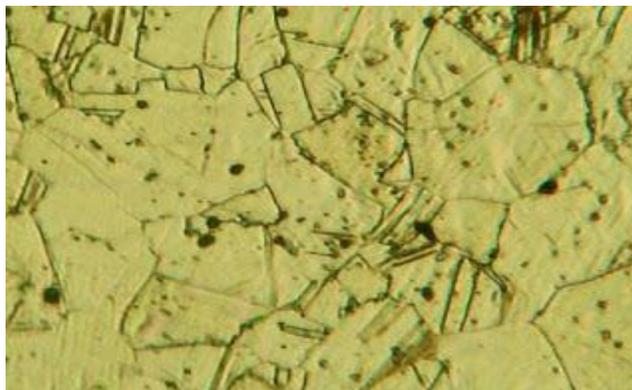


Figura 24. Fotomicrografía del acero inoxidable AISI 304 con magnificación de 20X

Tabla 12*Reactivo químico utilizado en acero inoxidable austenítico*

Compuesto	Cantidad
Ácido nítrico (HNO ₃)	10 ml
H ₂ O	30 ml
Ácido clorhídrico (HCL)	20 ml

Fuente: (Medina , 2016)

**Figura 25.** Fotomicrografía del acero inoxidable, magnificación 200 X

Al comparar ambas graficas de la microestructura del acero inoxidable podemos analizar que efectivamente coinciden en su forma estructural, el acero inoxidable AISI 304 es un acero austenítico estos aceros son aleaciones ternarias Fe-Cr-Ni en la figura 24 y 25 se observa la austenita del acero estabilizada por el contenido en níquel, esta estructura presentada por el acero da como resultado la elevada formabilidad que presenta el material.

3.1.2 Etapa 2: Elaboración de probetas de acero inoxidable AISI 304

Las probetas de acero inoxidable fueron cortadas de una plancha de 1220 mm de ancho x 2440 mm de largo y 1 mm de espesor el procedimiento para obtener las probetas fue el siguiente:

- a) Corte en cizalla manual de la plancha de acero inoxidable en 24 probetas de 155 x 155 mm.

- b) Perforación de 6 agujeros de 10 mm de diámetro en cada placa las cuales servirán para sujetar la probeta en la base de la matriz de la prensa hidráulica.
- c) Se realizó la perforación de los agujeros circular concéntricos de 4, 6,7 y 9 mm de diámetro, cada uno de los agujeros fueron perforados en 6 placas respectivamente dando un total de 24, figura 26, la técnica de perforación que se utilizó fue un perforado por fresado ya que permite mantener las propiedades reales del material, en investigaciones previas como el de (Wang et al., 2014) este tipo de perforación generaron los mejores resultados.
- d) Una vez terminado los agujeros en el centro de las placas se eliminó cualquier tipo de imperfección en el borde de las perforaciones mediante un leve lijado manual.



Figura 26. Placas de acero inoxidable para la elaboración del ensayo

3.1.3 Etapa 3: Construcción de punzones

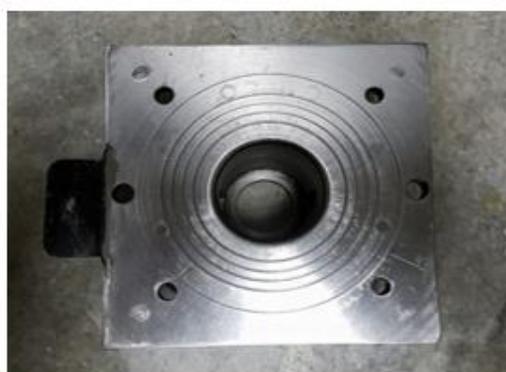
Para este trabajo de investigación se desarrollaron 2 geometrías de punzones uno cónico y otro elíptico dichos punzones se acoplaron a la matriz de 50 mm de diámetro disponible en la prensa hidráulica y a los requerimientos del ensayo.

- a) **Matriz:** Las características de la matriz se detallan en la tabla 13.

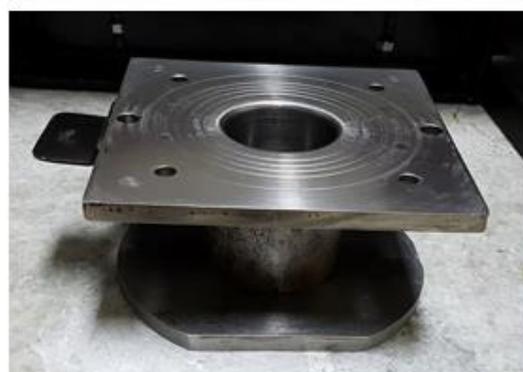
Tabla 13*Características de la matriz*

Matriz	Dimensiones
Largo	80 mm
Diámetro	50 mm
Radio	2 mm
Material	SAE 1045

En la figura 27 observamos las características que presenta la matriz para desarrollar el ensayo



a)



b)

Figura 27. a) Vista superior, b) vista frontal de la matriz

b) Punzón cónico: Las características del punzón se detallan en la tabla 14

Tabla 14*Características del punzón cónico*

Punzón cónico	Dimensiones
Largo	90 mm
Diámetro	46 mm
Ángulo	60 °
Material	K 100

El punzón posee 3 agujeros en la parte superior que servirán para acoplarlo en la máquina, las dimensiones del punzón se encuentran en el (Ver Anexo 1)



Figura 28. Punzón Cónico

c) **Punzón elíptico:** Las características del punzón se detallan en la tabla 15:

Tabla 15.

Características del punzón elíptico

Punzón elíptico	Dimensiones
Largo	92.5
Diámetro mayor	112 mm
Diámetro menor	46 mm
Material	K 100

El punzón posee 3 agujeros en la parte superior que servirán para acoplarlo en la máquina, las dimensiones del punzón se encuentran en el (Ver Anexo 2) dicho punzón fue realizado en un torno CNC.



Figura 29. Punzón Elíptico

Las medidas de los punzones se construyeron en base a simulaciones previas a través de un programa basado en elementos finitos que se describirá en el capítulo 4, dichas simulaciones permitieron observar que la carga máxima del ensayo no sobrepase las 10000lb por las características que presenta la prensa hidráulica uno de los factores que hacen que la carga aumente son el diámetro de los agujeros perforados en la placa y la holgura o claro entre el punzón y la matriz mientras menor sea la holgura mayor será el aumento en la carga de perforación, para este ensayo se trabajó con una holgura del 2%, este valor se lo obtuvo a través de la siguiente formula:

$$Cl = \frac{D_d - P_d}{2t}$$

En donde:

D_d = Diametro de la matriz

P_d = Diametro del punzón

t = Espesor de la placa

3.1.4 Etapa 4: Adecuación y montaje de la prensa hidráulica

Se realizaron ciertas adecuaciones a la prensa hidráulica que permitan desarrollar el ensayo de expansión de agujero y poder alcanzar resultados óptimos de este trabajo, a continuación se detalla el proceso de adecuación:

- a) La prensa hidráulica cuenta con una celda de compresión RL90000, cuya capacidad de carga es de 10000 Lb, para dicha celda se fabricó una base figura 30 que brinde un correcto acoplamiento y una adecuada forma de trabajo entre el pistón de la prensa y la fuerza que ejerce sobre la celda de compresión. Las medidas de esta base se encuentran detalladas (Ver Anexo 3).



Figura 30. Base de acoplamiento de la celda de carga

- b) La matriz se colocará sobre una base cilíndrica figura 31, esta base posee una abertura que permitirá observar el desarrollo del ensayo.



Figura 31. Base cilíndrica

- c) Se observará visualmente el proceso de expansión de agujero, para tener un campo visual mucho más claro se utilizó una lámpara que iluminará el interior de la matriz a través dos aberturas que posee, figura 32, se logrará ver el avance del punzón y como se va deformado el material a través del reflejo proporcionado mediante la utilización de un espejo figura 33.



Figura 32. Iluminación del interior de la matriz

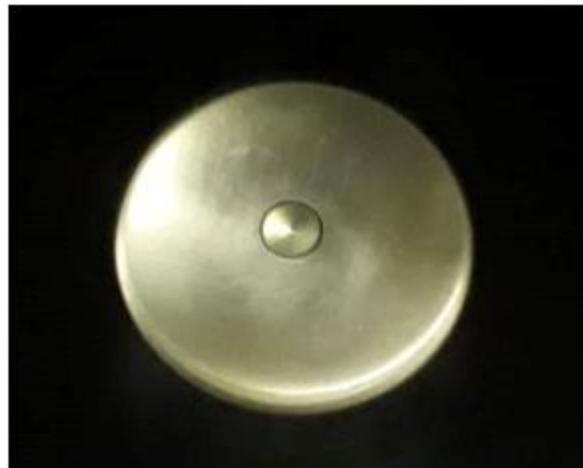


Figura 33. Campo visual de los ensayos

- d) La máquina posee un sistema de prensa chapas tipo fijo-plano, las muestras serán sujetas por medio de 6 pernos M 10 figura 34, los cuales ejercen la presión suficiente para asegurar la fijación correcta de las placas a la matriz evitando cualquier tipo de deslizamiento.



Figura 34. Sistema de prensa chapas (pisador) tipo fijo-plano

- e) Los punzones se acoplaron a una base por medio de tres pernos figura 35, que permitieron la fijación correcta para el desempeño de un adecuado trabajo.



Figura 35. Acoplamiento de punzones

Una vez realizadas todas las adecuaciones a la prensa hidráulica, la máquina esta lista para operar figura 36.



Figura 36. Adecuación de la prensa hidráulica finalizada

3.1.5 Etapa 5: Ejecución del ensayo

El ensayo se realizara con dos tipos de punzones y una sola matriz con una velocidad de recorrido del punzón 3,38 mm/s que es la velocidad más baja a la que puede trabajar la prensa en la tabla 16 se resumen las características del punzón cónico, elíptico y la matriz.

Tabla 16

Características de punzón y matriz

	Punzón cónico		Punzón elíptico		Matriz
Diámetro	46 mm	Diámetro menor	46 mm	Diámetro	50 mm
Angulo	60°	Diámetro mayor	112 mm	Radio	4 mm
Largo	90 mm	Largo	92.5	Largo	80 mm
Material	K 100	Material	K 100	Material	SAE 1045

Como se mencionó anteriormente la prensa hidráulica posee una celda de compresión cuya capacidad de carga es de 10000 Lb figura 37, permitiendo medir la carga durante el ensayo de expansión de agujero.



Figura 37. Celda de carga RL90000 capacidad 10000 lb.

Para medir el desplazamiento del punzón durante el ensayo el equipo consta con un sensor de desplazamiento figura 38.



Figura 38. Censor de desplazamiento

Todos los datos que genera el equipo a través de la celda de carga y el sensor de desplazamiento pasan por un sistema de control programado en LabVIEW.

Procedimiento de trabajo

- a) Una vez listo el equipo se realiza el recorrido del punzón hasta que se presente el contacto entre el punzón ya sea cónico o elíptico y el borde del agujero figura 39, el punzón debe estar correctamente bien posicionado con respecto al centro del orificio perforado, para poder comenzar con el ensayo.

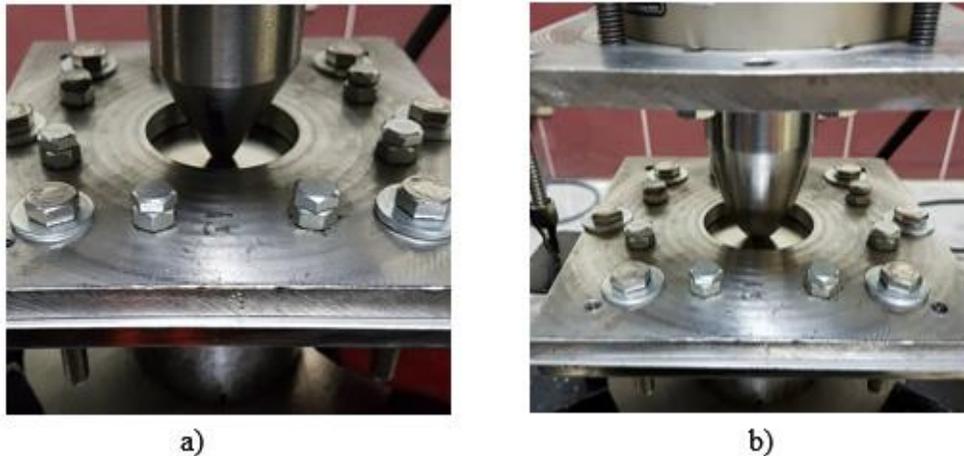


Figura 39. Posicionamiento de los punzones a) cónico b) elíptico

Se debe ingresar a la interfaz del programa que se observa en la figura 40 en la que podemos colocar la carga máxima de la prensa hidráulica para realizar el ensayo, además se podrá observar la distancia de recorrido del punzón y la fuerza que se está ejerciendo sobre la placa a analizar. Mediante esta interfaz podemos controlar el movimiento de subida, bajada y paro del punzón en el instante en el que el operador observe la grieta en el borde del agujero.

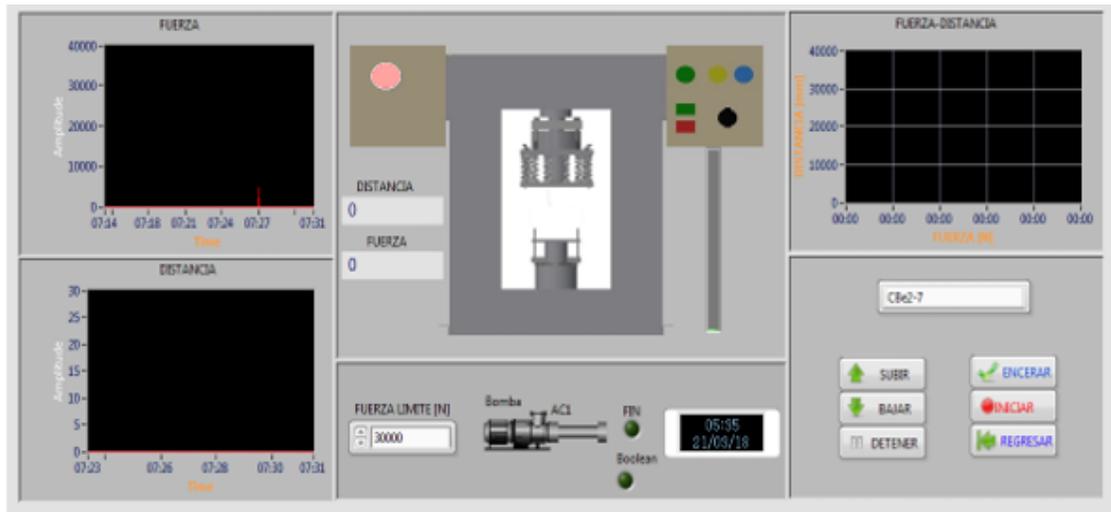


Figura 40. Interfaz de trabajo

El ensayo se detiene cuando se observa la formación de la primera grieta en el borde del agujero de la placa en análisis como se presenta en la figura 41.



Figura 41. Aparición de grieta en el borde del agujero

b) Una vez terminado el proceso el programa desplegará una ventana en la que se generara la curva de Fuerza vs Desplazamiento del punzón.

Se muestra en la figura 42, una probeta con un agujero perforado en el centro de la placa de 4 mm de diámetro a la que se le realizo el ensayo de expansión de agujero con punzón cónico



Figura 42. Agujero de 4 mm expandido con punzón cónico

En la figura 43 se muestra el equipo completo en el que se trabajará el ensayo de expansión de agujero.



Figura 43. Prensa Hidráulica y equipo de trabajo

Como se mencionó anteriormente en investigaciones previas como las de (Chirian, 2008; Dünckelmeyer , 2009) en las que se analizó la fuerza de presión de sujeción de las placas, la fiabilidad operativa del ensayo y la velocidad de penetración estas no influyeron en los resultados finales, por esta razón este trabajo se enfoca en analizar la formabilidad del acero AISI 304 mediante la expansión de agujero a través del cambio de geometría de los punzones y el diámetro

de los agujeros perforados en las placas ya que son parámetros a tomar en cuenta como lo menciona en la investigación de (Thesing et al., 2016).

3.1.6 Etapa 6: Medición de HER en las probetas

Una vez terminado los ensayos tanto para el punzón cónico como para el punzón elíptico se procede a tomar la medición de los agujeros expandidos por medio de cuatro mediciones tomadas a 60° entre sí y permitiéndonos sacar un promedio entre estas medidas, para determinar el límite de expansión de agujero se estableció un criterio de validación en el que se considera que la falla debe ser a través de todo el espesor de la placa figura 44 como lo menciona (Thesing et al., 2016).



Figura 44. Ruptura de la placa en el borde del agujero perforado

3.1.7 Etapa 7: Morfología de la fractura

Luego de realizar el ensayo y obtener las medidas de HER procedemos a cortar cuidadosamente el área en donde se produce la falla del material que nos permitan analizar mediante un microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscope, SEM) el tipo de fractura que sufre el material durante el proceso de expansión de agujero. El microscopio electrónico de barrido genera imágenes de una superficie con una alta resolución y una apariencia tridimensional lo que permite un fácil estudio topográfico de la fractura que se presenta en el material por lo que se pueden establecer los mecanismos microscópicos de fractura. En la figura 45 se presentan las muestras

que fueron cortadas del lugar de fallo del material en el reborde del agujero para observar el tipo de fractura que se genera.

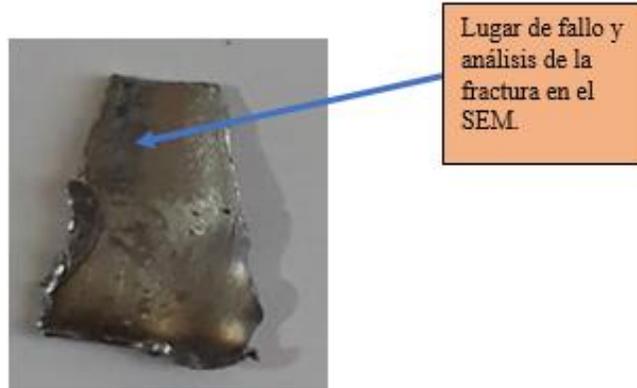


Figura 45. Muestra cortada para el análisis en el SEM.

CAPÍTULO IV

4 SIMULACIÓN

4.1 Introducción

El programa utilizado para realizar el proceso de simulación del ensayo de expansión de agujero tiene como característica el poder analizar flujos tridimensionales que ocurren en los procesos de conformado de metales, en operaciones de conformado industrial permite predecir el flujo de material de una forma eficiente y práctica, el método de elementos finitos (Finite Element Method, FEM) en el que se basa el programa predice el fallo por fractura de los distintos procesos que se pueden trabajar como punzonado, trefilado, taladrado, laminación, doblado etc.

Posee un generador de malla automático (Automatic Mesh Generator, AMG) el cual produce y optimiza la generación de malla de acuerdo a los requerimientos del proceso, brinda además una alternativa que permite generar la malla con una densidad mucho mayor en donde el proceso así lo requiera es decir genera un mallado variable reduciendo el tamaño de dicha malla en los lugares específicos en donde se van a generar los mayores esfuerzos de trabajo además de poseer un remallado automático.

El programa permite elegir variables como la fricción, velocidad de trabajo, número de pasos en los que se quiere efectuar el proceso, posee una amplia librería de materiales y la opción de generar e ingresar los datos de algún material que no se encuentre dentro de la librería.

4.2 Simulación del ensayo de expansión de agujero

- 1) La interfaz de trabajo que presenta el programa se puede observar en la figura 46 dicha ventana nos brinda un sin número de posibilidad, en la que se prepara todo el proceso de simulación ingresando los parámetro de trabajo como la velocidad de avance, tipo de material con el que se trabajará, fricción etc.

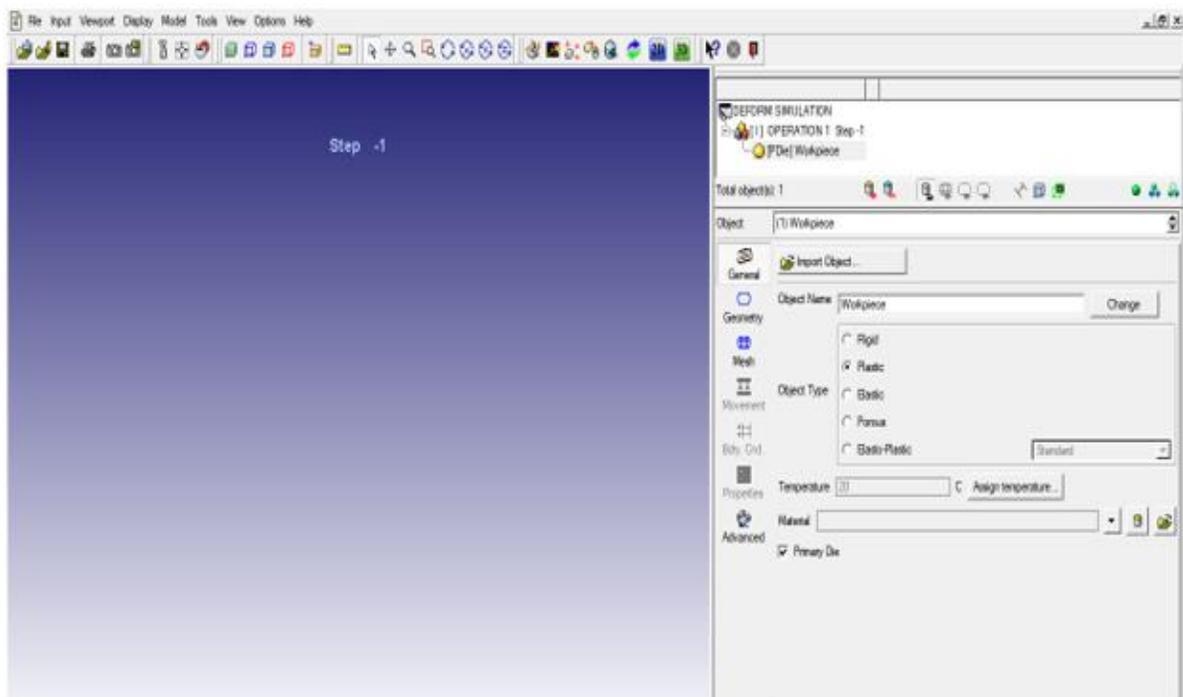


Figura 46. Pantalla inicial pre-procesador

- 2) Las piezas son dibujadas de acuerdo a las dimensiones especificadas en el capítulo 3, estas piezas se las elaboró en un programa CAD para modelado mecánico 2D y 3D, para ser utilizadas en el programa de simulación deben poseer una extensión de archivo STL (Standard Triangle Language) esta extensión es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora el cual define la geometría de objetos 3D y excluye información como la textura o el color de las piezas. En la figura 47 se muestra el diseño del punzón

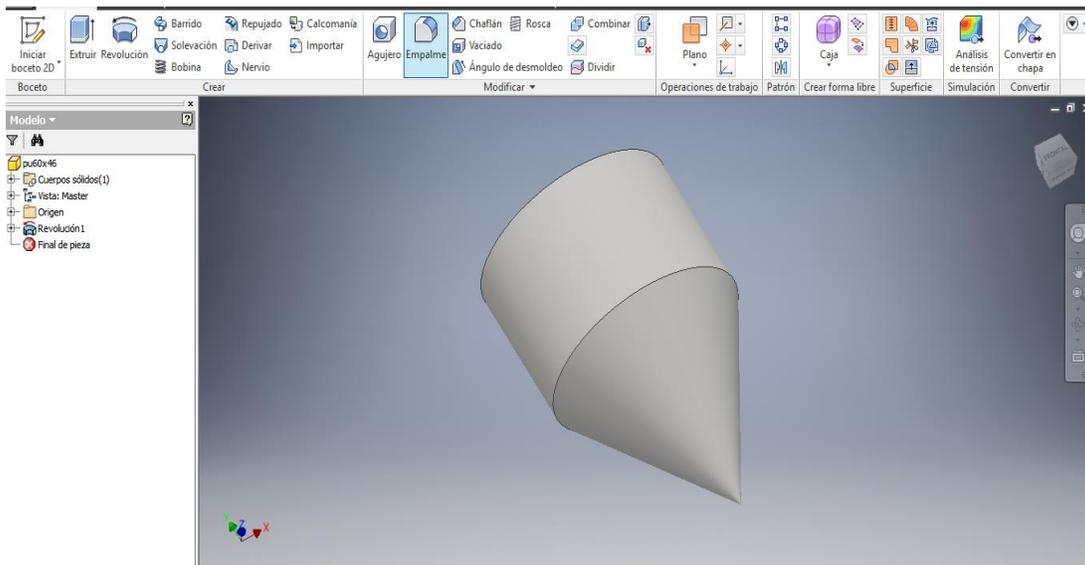


Figura 47. Diseño del punzón en programa CAD

- 3) Importamos las geometrías de las piezas como se muestra en la figura 48. El blanco se trabajó como un elemento plástico con espesor de 1 mm y con el diámetro de los orificios de 4, 6, 7,9 mm respectivamente para cada simulación., y se modelaron como cuerpos rígidos el punzón, la matriz y el prensa chapas.

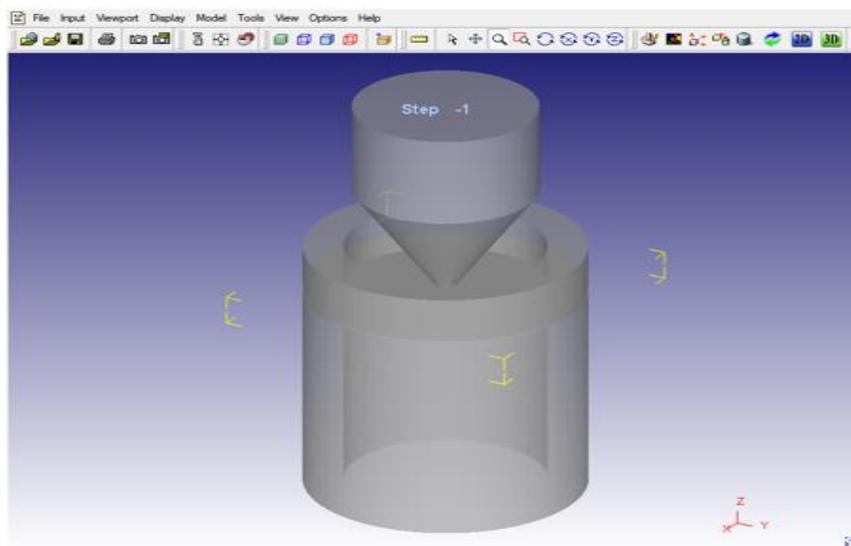


Figura 48. Piezas importadas y posicionadas

- 4) El blanco como se observar en la figura 49 tiene una forma circular diferente a la forma cuadrangular en la que fueron cortadas las placas para el ensayo experimental, el ensayo de expansión de agujero analiza la formabilidad local de un materia es por eso que la forma general de la probeta no influye en los resultados del trabajo, la forma en que se cortaron las placas para el procedimiento experimental fue resultado del fácil acoplamiento que presentaban para poder trabajar sobre el diseño de la matriz de la prensa hidráulica.

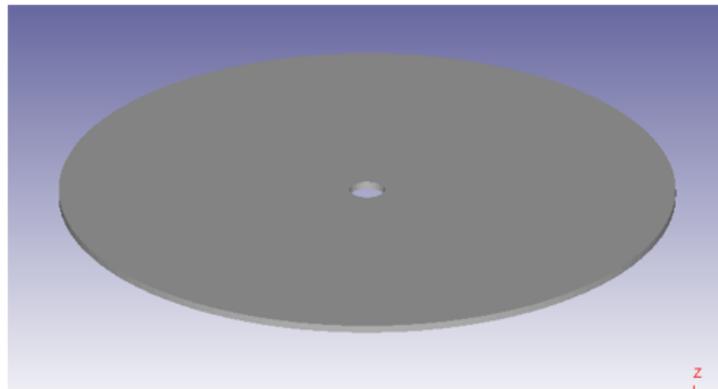


Figura 49. Blanco o workpiece

Cabe mencionar que para la selección de los valores adecuados como el número de elementos de la malla, la fricción y el damage descritos en este apartado, se realizó un proceso de parametrización que se explicará en la sección 4.3 de este capítulo.

- 5) El proceso de elegir el número de elementos de la malla en el blanco es de suma importancia ya que cuantos más elementos posea la malla los resultados serán más precisos, sin embargo una malla con una gran cantidad de elementos hace que el procesos de simulación se realice en una elevada cantidad de tiempo es decir crece exponencialmente.

Como lo menciona (De la Cruz, Cantero, Díaz, & Miguélez) los modelos de simulación no son capaces de trabajar de forma adecuada cuando los elementos de la malla superan los 250.000

elementos. El programa de simulación en el que se desarrolló este trabajo posee un sistema de mallado automático el cual distribuye la malla en función de la geometría del blanco, y realiza una forma automática de mallado de elementos de menor o mayor tamaño dependiendo del lugar en donde se generarán las mayores deformaciones.

Las simulaciones en este trabajo fueron desarrolladas con una malla de 100.000 elementos y con un tipo de malla tetraédrico de 4 nodos, en la figura 50 se observa el mallado general.

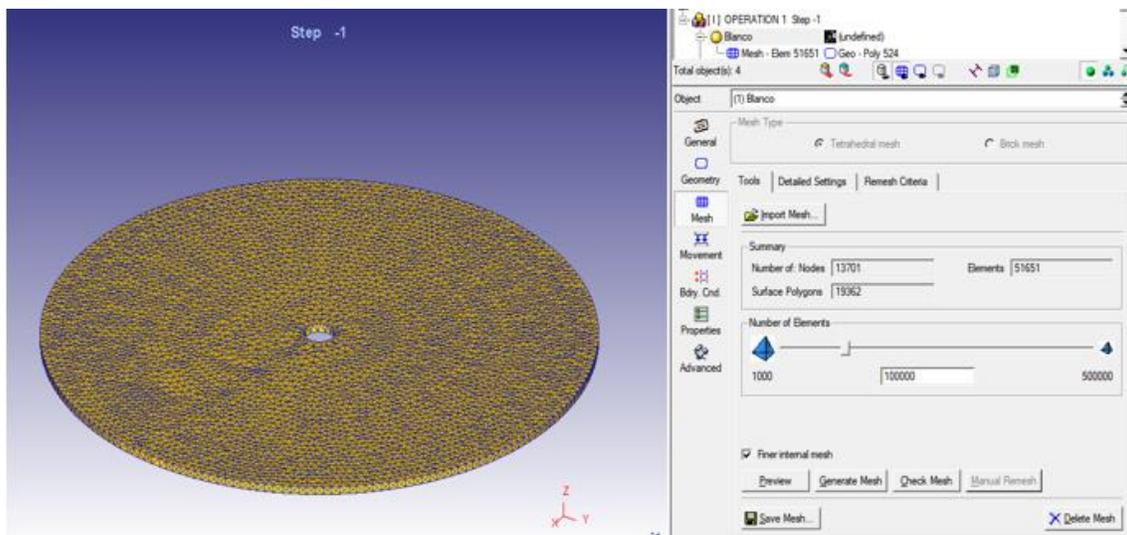


Figura 50. Mallado general del blanco un mallado general del blanco

En la zona central del blanco se realizó un proceso de refinación de la malla con elementos mucho más pequeños con una relación de tamaño de la malla de 0.2 alrededor del centro del agujero del blanco, en la figura 51 se muestra la zona elegida de refinación de la malla.

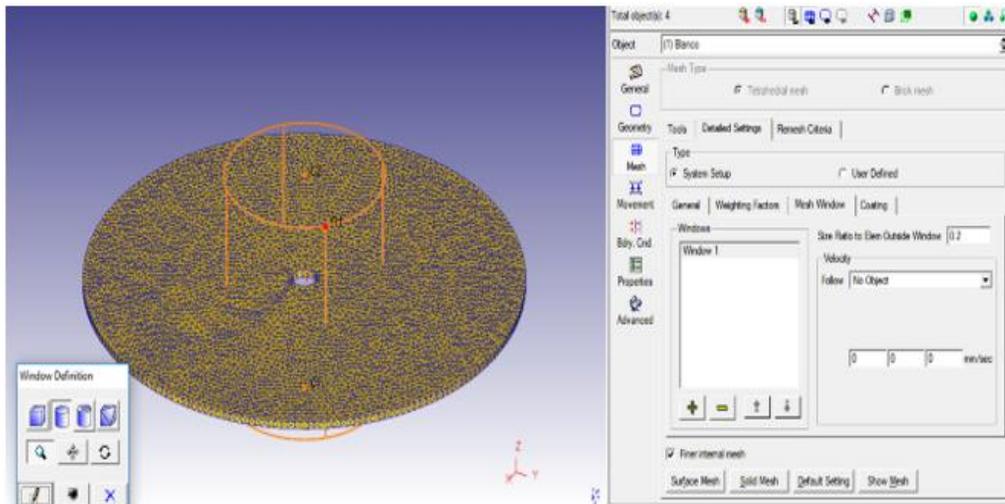


Figura 51. Mallado Fino cerca de las superficies de contacto

En la figura 52, se observa la diferencia que existe entre el tamaño de elementos de la malla en el centro y alrededor del blanco.

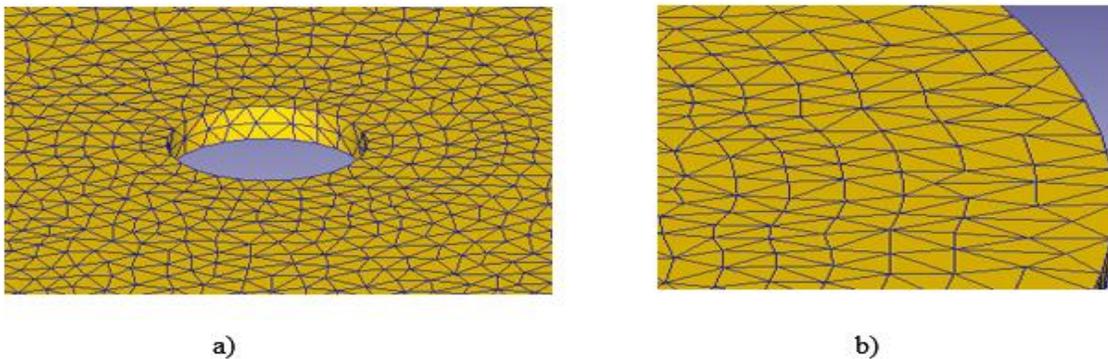


Figura 52. Malla a) Mallado fino localizado, tamaño 0.2, b) malla menos densa en los alrededores del blanco

Como se mencionó el programa posee una extensa librería de materiales sin embargo en este trabajo se realizó la caracterización del Acero AISI 304 descrita en el capítulo 3, cuyas propiedades mecánicas se resumen en la tabla 17.

Tabla 17
Propiedades mecánicas del acero AISI 304

Propiedades Mecánicas	
Módulo de Elasticidad E (Mpa)	205140
Coefficiente de endurecimiento (n)	0,32
Coefficiente de resistencia a la deformación (K)	1045
% de elongación	62
Sy (Mpa)	300

El material del blanco se regirá por el criterio de fluencia de Von-Mises conocido también como criterio de la máxima energía de distorsión el cual toma al material como isótropo, es un criterio de resistencia estática que se aplica a materiales dúctiles, existe otra alternativa que presenta el programa, el criterio cuadrático de Hill el cual toma en cuenta la anisotropía del material dando como resultado que el tiempo de simulación aumente, también ayuda a reducir los tiempos de cálculo al elegir el tipo de endurecimiento del material como isotrópico tal como lo menciona (Candel , 2015).

En la figura 53 se muestra la interfaz que nos permite ingresar el criterio de fluencia bajo el cual se regirá el material (Yield Function Type) y la regla de endurecimiento del material (Hardening rule).

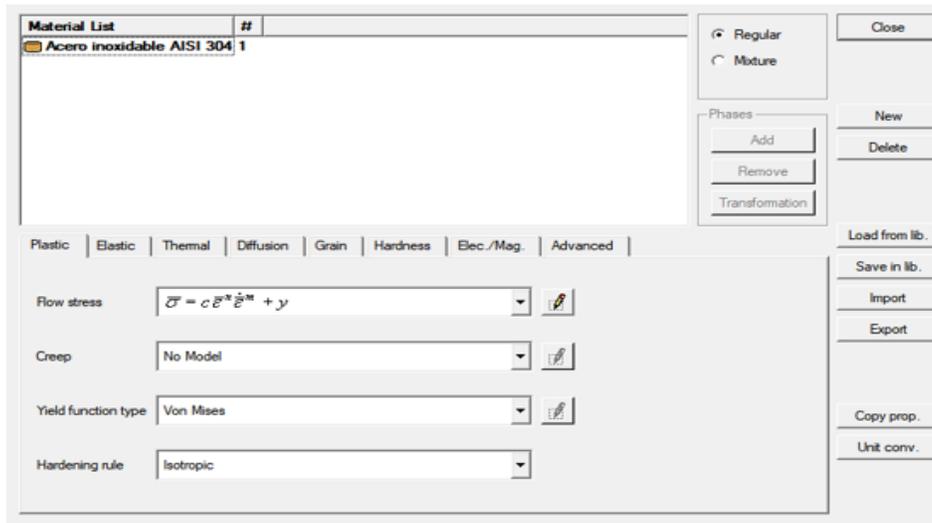


Figura 53. Ingreso de propiedades (Ley de Potencia), acero AISI 304

El acero AISI 304 se registrará por la ecuación de Hollomon descrita en el capítulo 3 la cual describe el comportamiento plástico de un acero, esta ecuación ajusta de manera simple y eficaz los esfuerzos y deformaciones del material y además determina la formabilidad de un material al considerar la magnitud del exponente de endurecimiento n , en el programa se anulan los términos que no influyen en la ecuación figura 54

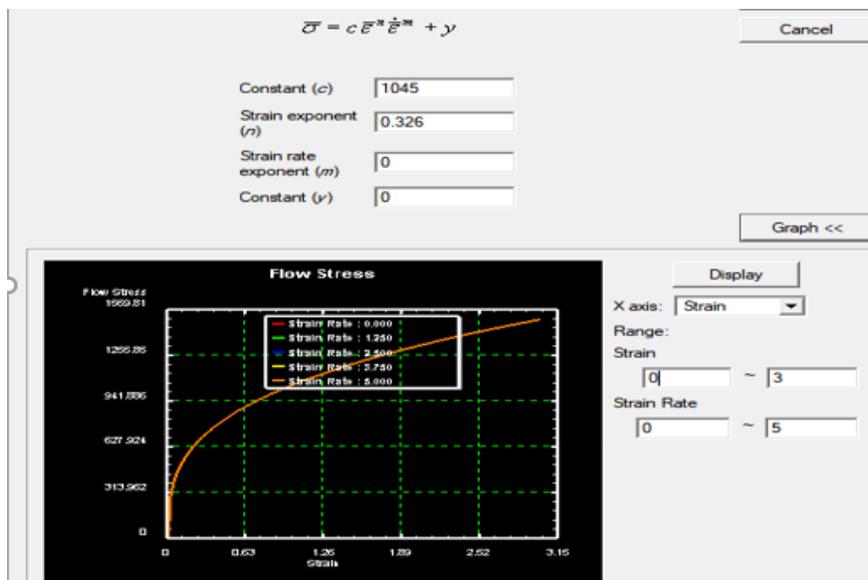


Figura 54. Ingreso de propiedades del material caracterizado

El programa permite elegir el modelo de daño acumulado que se presentará en el material, para este trabajo se utilizó el criterio normalizado de fractura de Crockroft y Latham en el que el programa realiza el cálculo por defecto además es un criterio bastante utilizado en operaciones de conformado metálicos ya que ha sido eficiente para predecir la fractura en el borde de la grieta en procesos de conformado en frío.

En este criterio se considera que la fractura está controlada esencialmente por el trabajo plástico ejecutada por la tensión principal máxima a lo largo de la historia de la carga del material (Vallellano , Erce , & García , 2005). Dicho criterio se basa en la siguiente ecuación:

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}} \left(\frac{\sigma^{*max}}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon}$$

En donde:

C = Valor de daño instantáneo

$\bar{\epsilon}$ = Deformación efectiva

σ^{*max} = Esfuerzo principal máximo

$\bar{\sigma}$ = Esfuerzo efectivo

El valor crítico, el cual es una propiedad de cada material, con el que se trabajó es de 0.75 para el punzón cónico y 0.70 para el punzón elíptico dichos valores se escogieron de acuerdo a la parametrización que se explicará en el apartado 4.3 y a criterios generados en investigaciones anteriores por diferentes autores.

- 6) Ubicados todos los elementos con los que se realizará la simulación procedemos a colocar las condiciones de contacto es decir las relaciones entre las piezas, la matriz y el prensa-chapa

(pizador) tendrán una condición de adherencia (sticking condition), con respecto al blanco, en la figura 55, se observa las interacciones elegidas entre piezas.

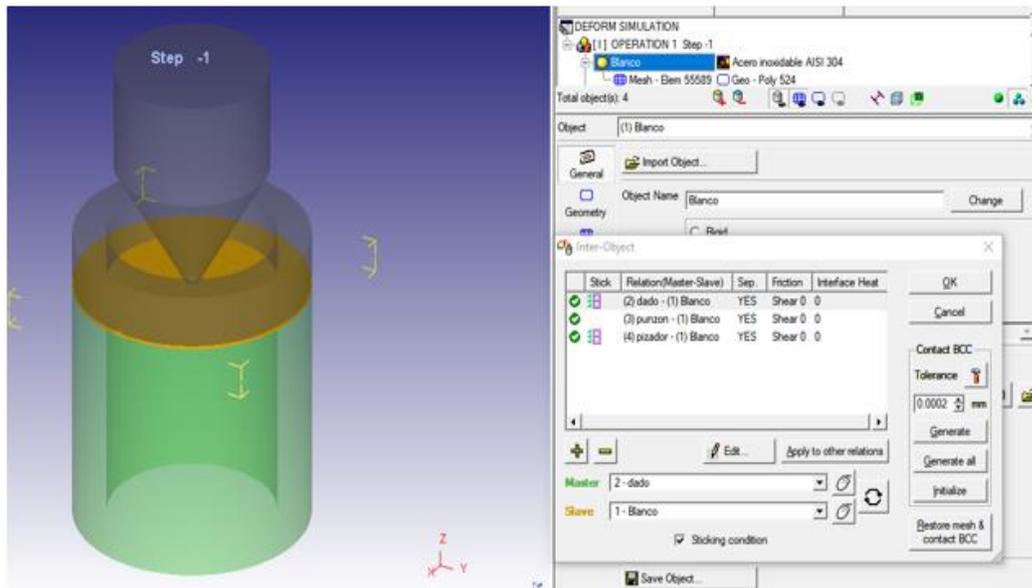


Figura 55. Condición de contacto entre elementos

Para el conformado de chapa metálica es habitual trabajar con una fricción entre las superficies que siga el modelo de Coulomb, en el capítulo 2 se describieron investigaciones como la de (Dewang et al., 2017) que trabajan con una fricción de Coulomb de 0.2. En su investigación (Wang et al., 2014) no utiliza fricción entre la muestra y la cabeza del punzón para el ensayo de expansión de agujero, otros autores como (Moreno , Reyes , & Cabriales , 2018) utilizan un valor de fricción de 0.12, (Vallellano , Erce , & García , 2005) en su investigación para predecir el fallo en los procesos de conformado plástico de chapa utiliza una fricción de Coulomb de 0.1.

Existe información que describe un valor recomendado de fricción de deslizamiento de 0.16 entre aceros (Sevilla, 2013). En este trabajo no se utilizó ningún tipo de lubricante y se efectuó la simulación con un valor de fricción de Coulomb de 0.15. Debido a los diferentes criterios de los autores mencionados el valor de 0.15 fue elegido de acuerdo al análisis paramétrico de la sección

4.3. Para establecer los puntos de contacto entre los elementos el programa tiene una opción de tolerancia que asigna de forma automática la tolerancia mínima entre objetos, a través de la opción Generate all se genera todos los puntos de contacto como se puede apreciar en la figura 56.

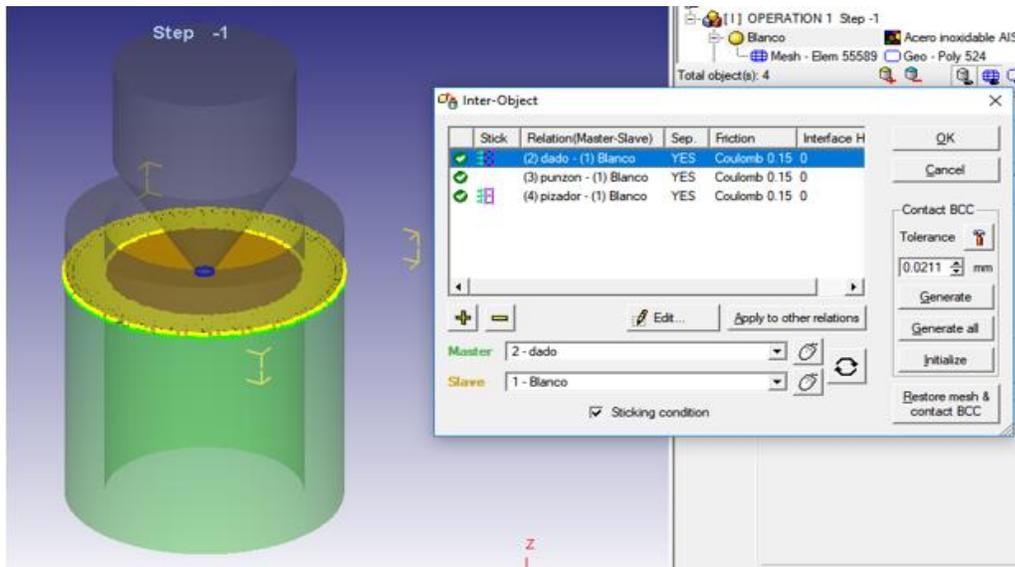


Figura 56. Tolerancia de contacto entre elementos y tipo de fricción

7) Se procede a introducir los parámetros de la simulación, cabe mencionar que las unidades se encuentran en SI, las tensiones están en mega pascales y las longitudes en milímetros, el modelo numérico elegido ha sido el lagrangiano incremental, se establecen 100 pasos esto representa los elementos en los que el programa divide la simulación. Las otras variables que se pueden apreciar en la figura 57, permiten controlar criterios de remallado, temperatura ambiente etc, que no son consideradas para este caso de estudio.

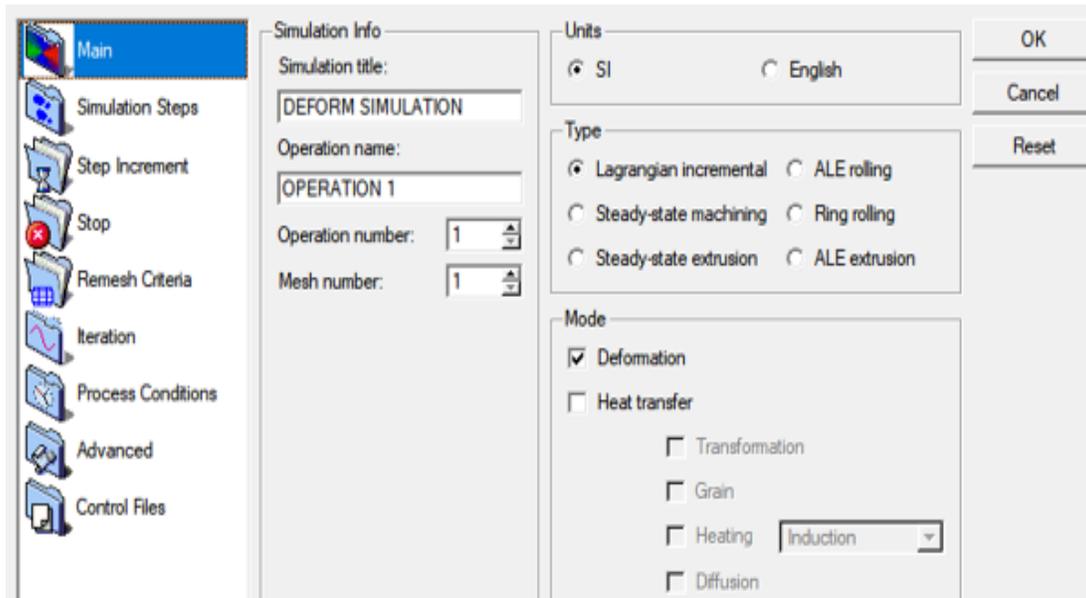


Figura 57. Ingreso de parámetros de simulación

- 8) Finalmente para poder ejecutar la simulación se crea una base de datos en donde se guarda los archivos del trabajo a ejecutar en la figura 58 se muestra la interfaz que permite crear y comprobar que todos los pasos realizados se han hecho correctamente, una vez que el programa verifique que todos los parámetros sean los adecuados la simulación esta lista para ser ejecutada.

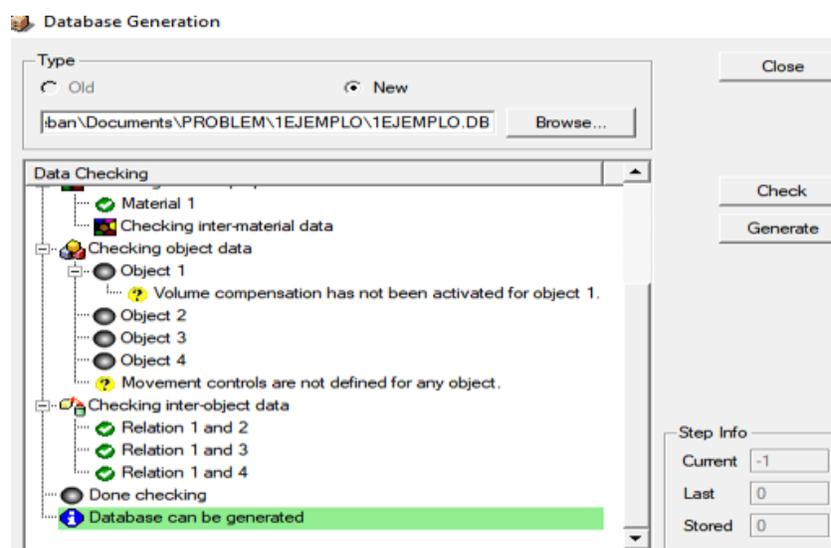


Figura 58. Verificación de parámetros de trabajo (Database generation)

4.3 Análisis paramétrico

a) Mallado

El parámetro inicial en el software por elementos finitos es el mallado y su influencia en la simulación, mientras mayor sea el número de elementos de la malla, mayor será la exactitud de la simulación pero el tiempo de simulación crecerá exponencialmente. Este análisis tiene como finalidad encontrar un número de elementos adecuado tanto en tiempo como en exactitud y verificar cual es el comportamiento que genera en la gráfica fuerza vs desplazamiento del punzón. En la figura 59, se muestra la evolución de la fuerza axial con respecto a la profundidad de penetración del punzón para un número de elementos de malla de 50.000, 100.000 y 150.000.

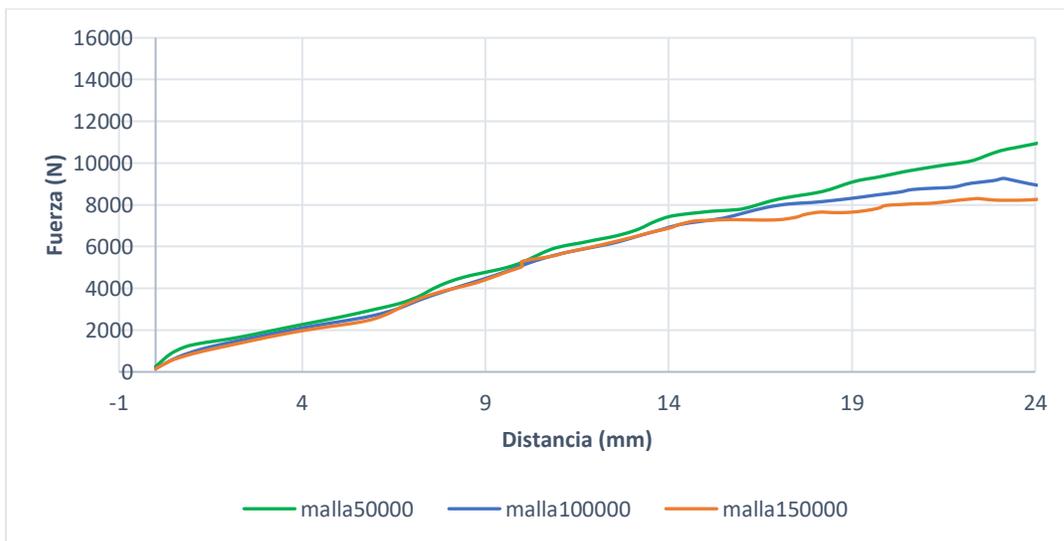


Figura 59. Influencia del mallado, curva fuerza vs desplazamiento del punzón

Como se puede observar en la figura 59, la forma de evolución temporal de las fuerzas son similares pero las magnitudes cambian drásticamente entre ellas, al ser más densa la malla de 150.000 elementos conlleva a una aproximación exacta, es decir se asemeja a un material perfecto aproximando los valores de simulación a un trabajo sin defectos, además el tiempo que tarda la

simulación es de aproximadamente 8 horas, el blanco con 50.000 elementos tiende a alejarse demasiado de los valores experimentales que se describirán en el capítulo 5, pero el tiempo de simulación disminuye drásticamente a 2 horas, sin embargo la malla de 100.00 elementos presenta valores de carga que se encuentran en la mitad del rango de valores de 50.000 y 100.000 elementos de malla y su comportamiento se asemeja a los resultados experimentales, permitiendo generar la simulación en un tiempo de 4 horas.

Es por esto que tanto para la simulación del ensayo de expansión de agujero con punzón cónico y elíptico se utilizará un blanco con una malla de 100.00 elementos. Para todos los caso de malla analizados se realizó un proceso de mallado local con un tamaño 0.2 en el centro del agujero del blanco.

b) Fricción

Como se mencionó anteriormente existe una discrepancia en la elección del valor de la fricción en las investigaciones de diferentes autores, es por eso que el valor de la fricción se seleccionó de acuerdo a la bibliografía en la que se recomienda utilizar un rango de valores de fricción para trabajar entre metales que varía entre 0.15 y 0.18 (Schlossorsch, 2004), de acuerdo a este rango se ejecutó el proceso de parametrización. En la figura 60, se muestra la evolución de la fuerza axial con respecto a la profundidad de penetración del punzón utilizando una malla de 100.000 elementos y valores de fricción de 0.15 y 0.18.

En la figura 60, la forma de evolución temporal de las fuerzas son similares al igual que sus magnitudes, sin embargo el resultado de simulación con un valor de fricción de 0.15 genera valores más próximos a los resultados experimentales.

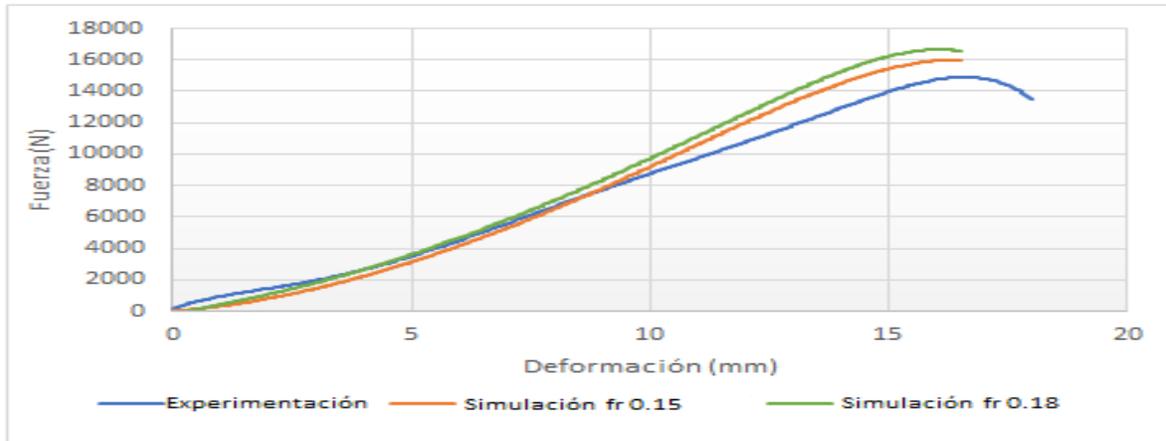


Figura 60. Influencia de la fricción, curva fuerza vs desplazamiento del punzón

c) Daño del material

Debido a la naturaleza de nuestro ensayo el criterio para el daño del material se ajusta a la ecuación de Cockcroft y Latham el cual considera que la fractura de un elemento es controlada por el trabajo plástico que ocurre por la tensión principal máxima. Para dicha ecuación el programa de simulación requiere de un valor crítico, este valor crítico fue seleccionado de acuerdo a los resultados que se generan en el proceso de parametrización con valores de daño de 0.75. En la figura 61, se muestra la evolución de la fuerza axial con respecto a la profundidad de penetración del punzón utilizando una malla de 100.000 elementos, fricción de 0.15 y damage de 0,6, 0,7 y 0,8

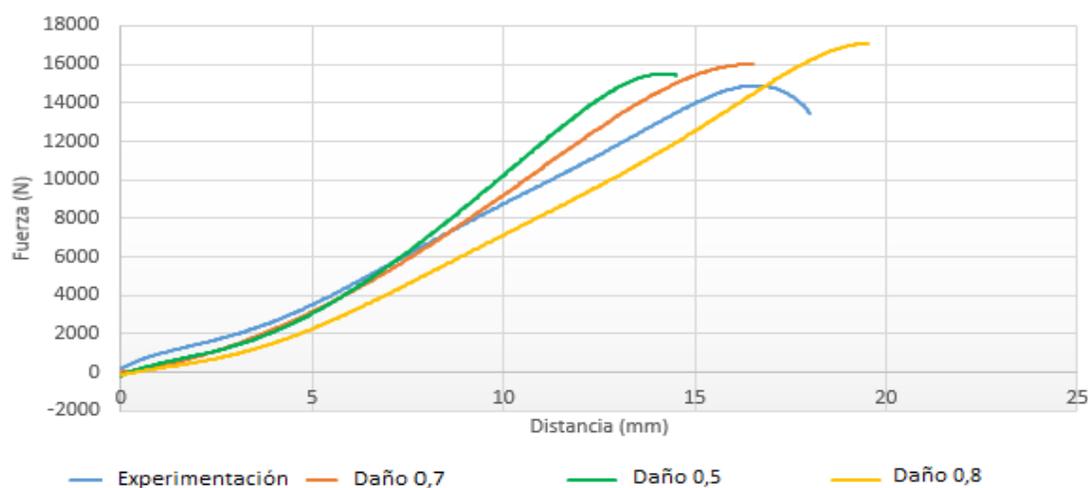


Figura 61. Influencia del daño, curva fuerza vs desplazamiento del punzón

Se realizó el análisis paramétrico para el punzón elíptico presentando que la forma de evolución temporal de las fuerzas y magnitud de carga son similares y se comportan de forma correcta con los mismos valores con los que se trabajó la simulación para el punzón cónico es decir número de elementos de malla de 100.00, fricción de 0.15 y se encontró que el mejor valor de damage es de 0.7, se trabajó con una velocidad de 4 mm/s para ambos punzones coincidiendo con los autores mencionados en este trabajo.

En la tabla 18, se describen los parámetros de simulación elegidos para el ensayo de expansión de agujero.

Tabla 18*Parámetros seleccionados de simulación*

Elementos de la malla	100.000
Fricción	0.15
Criterio de daño	Normalized C&L
Valor de damage punzón cónico	0.75
Valor de damage punzón elíptico	0.7
Numero de pasos de la simulación	100
Velocidad	4 mm/s
Criterio de fluencia del material	Von Mises
Regla de endurecimiento	Isotrópico
Ecuación para describir el comportamiento plástico	$\sigma = K\varepsilon^n$
Coefficiente de endurecimiento (K)	1045
Exponente de endurecimiento (n)	0.32

CAPÍTULO V

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Introducción

En este capítulo se presentarán y analizarán los resultados obtenidos tanto en la experimentación con el punzón cónico y elíptico y la correspondiente simulación para cada uno de ellos. Como se detalló en el capítulo 3, se realizaron 24 probetas para el ensayo de ambos punzones con agujeros perforados en el centro de 4, 6,7 y 9 mm de diámetro, cada agujero fue perforado en 6 placas de acero inoxidable AISI 304, teniendo una repetitividad del ensayo de tres placas por agujero para cada punzón, escogiendo los resultados óptimos de cada ensayo para su correspondiente análisis.

5.2 Resultados experimentación

a) Punzón cónico

En la tabla 19 se describe los resultados experimentales de la fuerza y distancia máxima del punzón cónico.

Tabla 19

Resultados experimental de fuerza y desplazamiento punzón cónico

Punzón cónico		
Diámetro del agujero perforado	Altura máxima (mm)	Fuerza máxima (N)
6	27.4	16000
7	30	17800
9	33	23000

En la figura 62 se muestran la evolución de las curvas experimentales de carga vs desplazamiento del punzón cónico para los agujeros de 4, 6,7 y 9 mm de diámetro

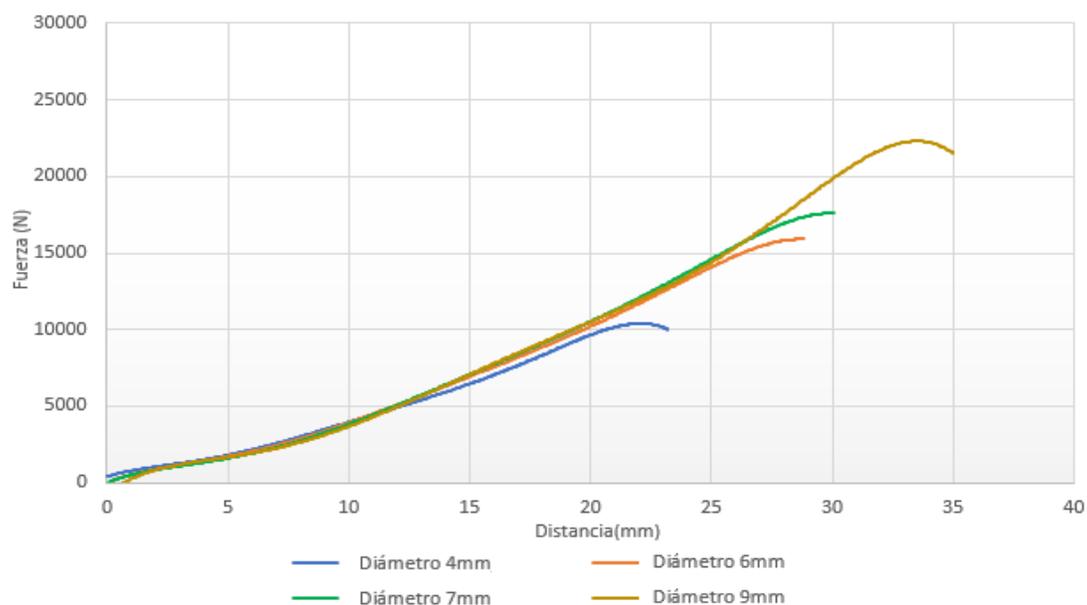


Figura 62. Diagrama del ensayo experimental punzón cónico, curva fuerza vs desplazamiento

Análisis

- Los resultados del ensayo experimental del punzón cónico de la tabla 19 muestran que mientras mayor diámetro tenga el agujero perforado en la placa de acero inoxidable AISI 304 mayor es la altura en la que se presenta la primera grieta en el borde del agujero. De igual manera en el rango de agujeros analizados en este trabajo la fuerza máxima a la que se presenta la primera rotura en el material incrementa de acuerdo al aumento de tamaño del agujero. En la figura 62, se puede observar que la evolución temporal de la fuerza axial y la profundidad de penetración del punzón son similares hasta un cierto punto en donde las magnitudes cambian de acuerdo al agujero perforado.

b) Punzón elíptico

En la tabla 20 se describe los resultados experimentales de la fuerza y la distancia máxima del punzón elíptico.

Tabla 20

Resultados experimental de fuerza y desplazamiento punzón elíptico

Punzón Elíptico		
Diámetro del agujero perforado	Altura máxima (mm)	Fuerza máxima (N)
4	15	14800
6	16	15000
7	21	18000
9	23	17200

En la figura 63 se muestran la evolución de la curvas experimentales de carga vs desplazamiento del punzón cónico para los agujeros de 4, 6,7 y 9 mm de diámetro.

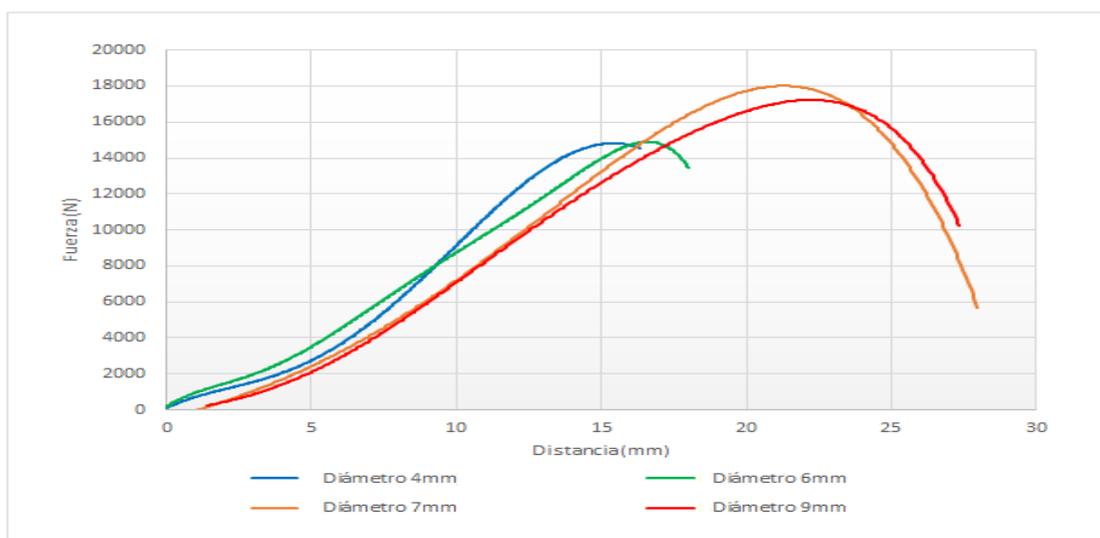


Figura 63. Diagrama del ensayo experimenta punzón elíptico, fuerza vs desplazamiento

Análisis

- En la figura 63 se observa que la forma de evolución temporal de la fuerza axial y la profundidad de penetración del punzón no son idénticas mostrando ligeras diferencias, la fuerza máxima como muestra la tabla 20 a la que se presenta la fractura en el agujero de 4 mm de diámetro es muy similar a la del agujero de 6 mm presentando un 6% de variación al igual que la profundidad de penetración con una variación del 1.35%, sin embargo la fuerza máxima mostrada entre el agujero de 6 y 7 mm presenta un salto importante con un 31.2% de variación así como un 20 % en la profundidad de penetración del punzón, entre el agujero de 7 y 9 mm existe una variación en la fuerza de 9.5% y en la distancia de 4.4% es decir nuevamente se disminuye el porcentaje de variación entre agujero y agujero, los datos en el ensayo experimental con el punzón elíptico muestran que al aumentar el diámetro del agujero la distancia de penetración también lo hace al igual que la fuerza de penetración de los agujeros de 4,6 y 7 mm ya que en el agujero de 9 mm se presenta una pequeña disminución en la fuerza.
- Los datos en este ensayo no incrementa en una forma progresiva como sí fue el caso del punzón cónico, este fenómeno se presenta como resultado de la forma de penetración del punzón elíptico, el punzón cónico en el momento de la penetración ingresa gran parte del ángulo de 60° en el agujero perforado de la placa esto hace que la carga y el desplazamiento aumenten de forma progresiva, mientras que el punzón elíptico al momento de la penetración debe empujar la placa desde el inicio del ensayo haciendo que en ciertos momentos los valores de carga y desplazamiento presenten pequeños saltos.

5.3 Resultados simulación

a) Punzón Cónico

En la tabla 21 se describe los resultados de la simulación de fuerza y distancia máxima del punzón cónico.

Tabla 21

Resultados de simulación de fuerza y desplazamiento punzón cónico

Punzón cónico		
Diámetro del agujero perforado	Altura máxima (mm)	Fuerza máxima (N)
4	22	10000
6	27	14400
7	28	16200
9	33	22800

En la figura 64 se muestran la evolución de las curvas de simulación de carga vs desplazamiento del punzón cónico para los agujeros de 4, 6, 7 y 9 mm de diámetro.

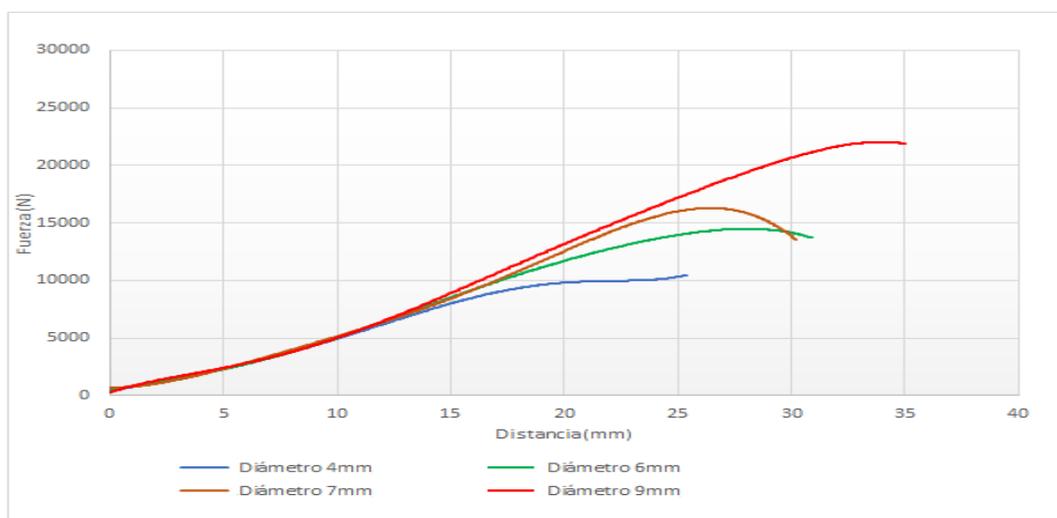


Figura 64. Diagrama de la simulación punzón cónico, fuerza vs desplazamiento

Análisis

- Como se detalló en el capítulo 4 las simulaciones para el punzón cónico se realizaron con una malla de 100.000 elementos, una densidad de malla local de 0.2, fricción de Coulomb de 0.15 y un valor de daño del material de 0.75 dichos valores permitieron ajustar de una forma mucho más exacta la forma de evolución temporal de la fuerza axial y la profundidad de penetración respecto a los resultados del ensayo experimental. En la figura 64, se observa que las curvas de Fuerza vs Desplazamiento del punzón tienen un comportamiento progresivo parecido a los resultados experimentales

b) Punzón elíptico

En la tabla 22 se describe los resultados de la simulación de fuerza y distancia máxima del punzón elíptico.

Tabla 22

Resultados de simulación de fuerza y desplazamiento punzón elíptico

Punzón Elíptico		
Diámetro del agujero perforado	Altura máxima (mm)	Fuerza máxima (N)
4	16	16000
6	15	16100
7	19.5	17700
9	21	17500

En la figura 65, se muestran la evolución de la curvas de simulación de carga vs desplazamiento del punzón elíptico para los agujeros de 4, 6,7 y 9 mm de diámetro.

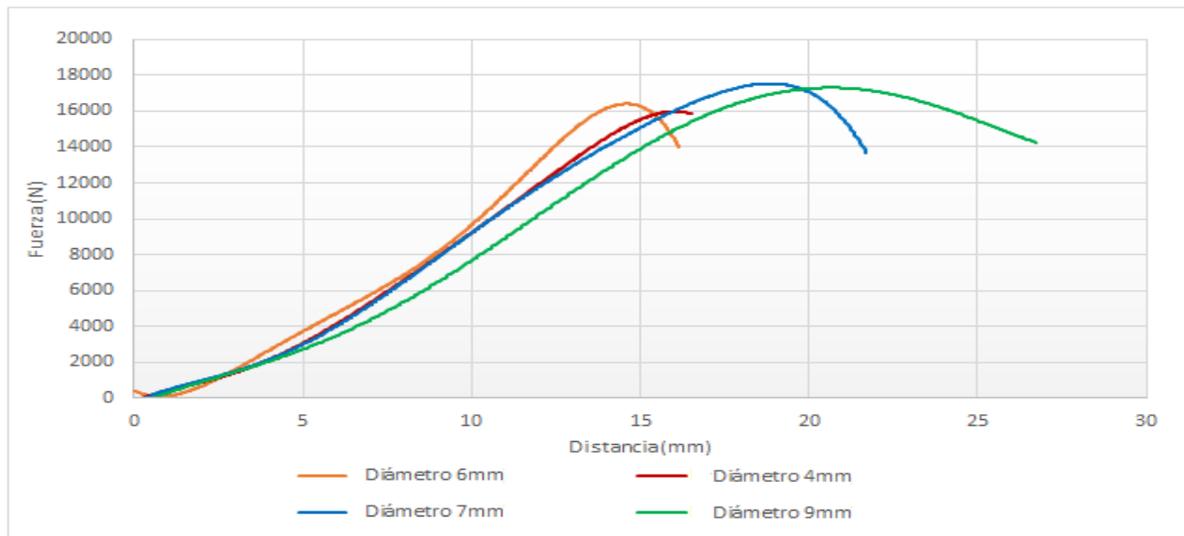


Figura 65. Diagrama de la simulación punzón elíptico, fuerza vs desplazamiento

Análisis

- En el punzón elíptico se utilizó una malla de 100.000 elementos, una densidad de malla local de 0.2, fricción de Coulomb de 0.15 y un valor de daño del material de 0.7 dichos valores permitieron ajustar de una forma mucho más exacta la forma de evolución temporal de la fuerza axial y la profundidad de penetración respecto a los resultados del ensayo experimental como se muestra en la figura 65.

Sin embargo los saltos de variación entre carga y desplazamiento del punzón de los agujeros de 4, 6,7 y 9 mm disminuyeron con respecto a los datos experimentales.

5.4 Comparación de resultados experimentales vs simulación

Cada uno de los resultados en los ensayos experimentales tanto de los agujeros de 4, 6,7 y 9 mm se comparan con los resultados de la fuerza y el desplazamiento máximo del punzón de las simulaciones permitiendo obtener el porcentaje de error. En la figura 66 y 67 se puede observar la

evolución de la carga vs desplazamiento del punzón que resultan del ensayo experimental con punzón cónico y elíptico en agujero de 4 mm con relación a la simulación del mismo agujero.

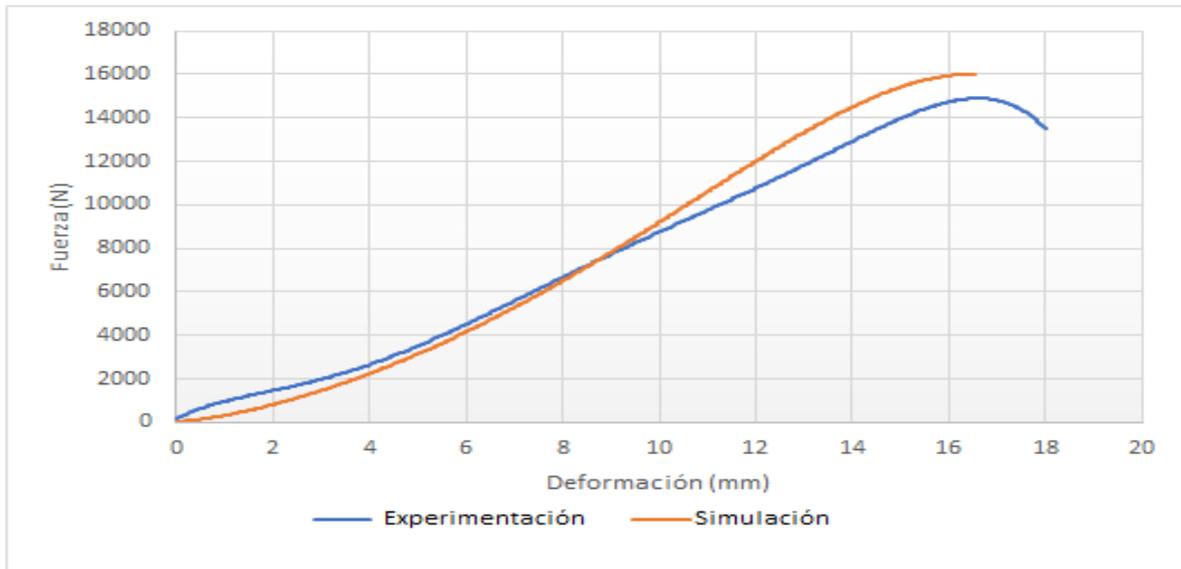


Figura 66. Diagrama fuerza vs desplazamiento del punzón cónico, datos experimentales vs simulación en agujero de 4 mm

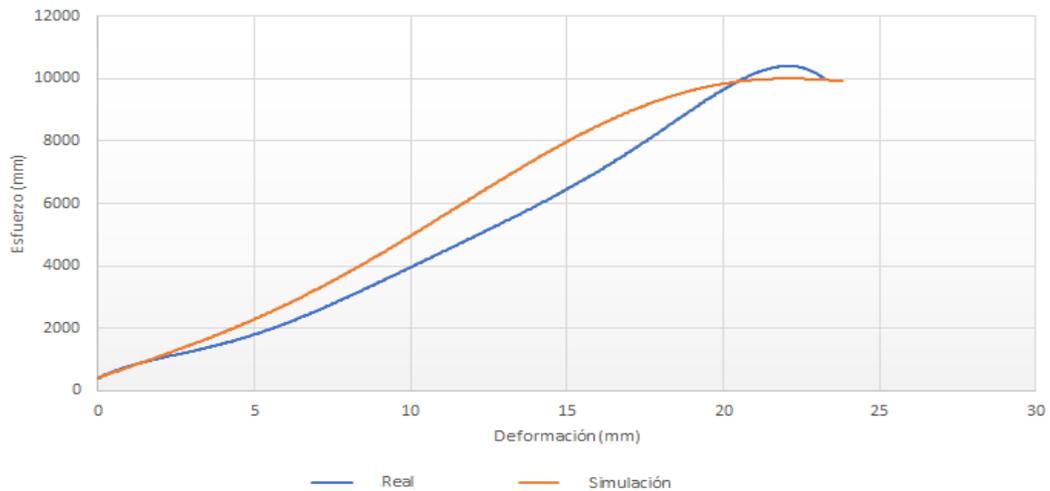


Figura 67. Diagrama fuerza vs desplazamiento del punzón elíptico, datos experimentales vs simulación en agujero de 4 mm

En la tabla 23 y 24 se detalla los valores y porcentajes de errores de fuerza y desplazamiento máximo del punzón, de los ensayos experimentales y simulaciones del punzón cónico y elíptico

Tabla 23

Porcentajes de error entre el ensayo experimental y simulación del punzón cónico

Diámetro	Punzón cónico					
	Experimental		Simulación		% error	
	Altura máx.	Fuerza máx.	Altura máx.	Fuerza máx.	Altura max.	Fuerza max.
4	22	10400	22	10000	0	4
6	27.4	16000	27	14400	1.4	11.1
7	30	17800	28	16200	7.1	9.8
9	33	23000	33	22800	0	0.8

Tabla 24

Porcentajes de error entre el ensayo experimental y simulación del punzón elíptico

Diámetro	Punzón elíptico					
	Experimental		Simulación		% error	
	Altura máx.	Fuerza máx.	Altura máx.	Fuerza máx.	Altura max.	Fuerza max.
4	15	14800	16	16000	6.3	7.5
6	16	15000	15	16100	6.6	6.8
7	21	18000	19.5	17700	7.8	1.7
9	23	17200	21	17500	9.5	1.7

Análisis:

- Los valores de la tabla 23 muestran la fuerza y la altura máxima de penetración del punzón cónico en el instante en el que se presentó la primera grieta en el borde del agujero, como se puede apreciar tanto en los agujeros de 4 y 9 mm el error de la altura máxima entre el procedimiento experimental y la simulación es cero y los errores de fuerzas máximas son mínimos, en el agujero de 6 y 7 mm se presenta un incremento en los errores de altura y fuerza máxima sin embargo son valores aceptables, estas pequeñas variaciones se deben a la forma del centrado entre el punzón y la placa a trabajar en el momento de realizar los ensayos , ya que

se observó el primer contacto entre el punzón y el agujero a expandir de forma visual, haciendo que el centrado de las piezas no tenga la misma exactitud para todos los ensayos, generando como resultado que el efecto de la flexión en la placa no sea el mismo para todos los ensayos.

- Los valores del punzón elíptico presentes en la tabla 24, muestran porcentajes de error aceptables en la fuerza y altura de penetración del punzón, cuya variación se debe de igual manera que en el punzón cónico a la forma de centrado entre la placa y el punzón, ya que como se mencionó anteriormente el centrado en el ensayo de expansión de agujero es una variable importante a tomar en cuenta.

5.5 Expansión de agujero (Hole Expansion Ratio, HER)

Para determinar el HER en las perforaciones de 4, 6, 7 y 9 mm se toman 4 medidas, permitiendo sacar un promedio, para el límite de expansión de agujero se estableció un criterio de validación en el que se considera que la falla debe ser a través de todo el espesor de la placa escogiendo el mejor ensayo para el análisis. En la tabla 25 y 26, se muestra los valores de HER obtenidos tanto para el punzón cónico como para el elíptico.

Tabla 25
Valores de HER experimental para el punzón cónico

Punzón cónico						
Diámetro del agujero	Medida				Promedio	%HER
	1	2	3	4		
4	10.8	10.7	10.5	10.1	10.5	162.5
6	17.4	17.2	17.3	18	17.5	191.6
7	22	21.6	22	21.6	21.8	211.4
9	24.4	24	23.7	23.2	23.8	164.4

Tabla 26
Valores de HER experimental para el punzón elíptico

Punzón elíptico						
Diámetro del agujero	Medida				Promedio	%HER
	1	2	3	4		
4	10	9.6	9.5	9.2	9.6	140
6	16	15.9	15.9	15.7	15.9	165
7	20.8	20.4	20.5	20	20.4	191.4
9	24.2	24.1	24	24.3	24.2	168.8

Para el cálculo de HER se utilizó la siguiente ecuación:

$$\lambda(\%) = \left(\frac{D_f - D_o}{D_o} \right) \times 100$$

En donde:

λ = límite de expansión del agujero, %

D_f = diámetro promedio del agujero después de la ruptura

D_o = diámetro original del agujero

Ejemplo de cálculo para el agujero de 4 mm expandido mediante punzón cónico con un diámetro promedio del agujero después de la ruptura (D_f) de 10.5

$$\lambda(\%) = \left(\frac{10.5 - 4}{4} \right) \times 100 = 162.5\%$$

En la tabla 27, se muestra el porcentaje de variación de expansión de agujero entre punzón cónico y elíptico:

Tabla 27

Porcentajes de variación de los valores de HER entre punzón cónico y elíptico

Diámetro del agujero perforado	Punzón cónico	Punzón elíptico	% de variación entre punzones
	%HER	%HER	
4	162.5	140	13.8
6	191.6	165	13.9
7	211.4	191.4	9.4
9	164.4	168.8	2.6

En la figura 68 se observar la cantidad de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón

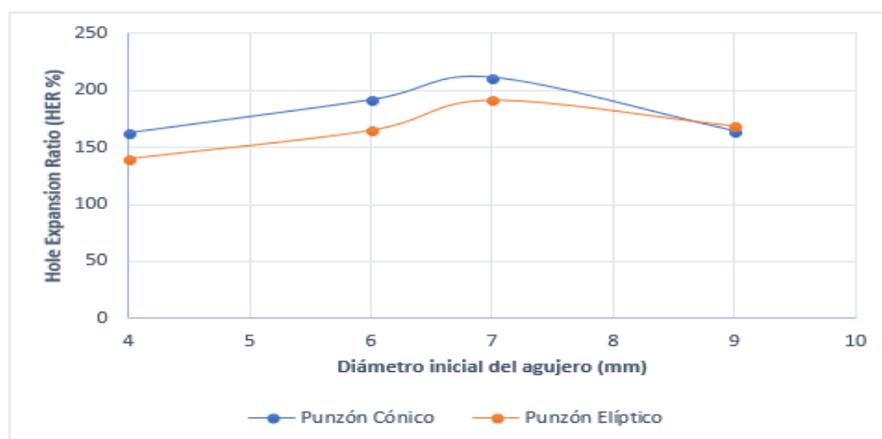


Figura 68. Diagrama de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón cónico y elíptico

Análisis:

- La relación de expansión de agujero como se puede apreciar en la figura 68 muestra resultados diferentes de acuerdo a la forma del punzón y permite observar que existe una gran influencia del diámetro inicial del orificio perforado para el resultado final de HER.
- Como se muestra en la tabla 27 los valores de HER para los agujeros expandidos con el punzón cónico son superiores a los del punzón elíptico, como por ejemplo el agujero de 4 mm

expandido con el punzón cónico alcanza un valor de HER de 162.5% en comparación con un HER de 140% para el elíptico, obteniendo un 13.8% más de expansión el agujero penetrado con el punzón cónico, los valores de HER en la tabla 27 nos muestran que de acuerdo al aumento del diámetro del agujero perforado en la placa los valores de HER aumentan en ambos casos hasta el agujero de 7 mm, para el agujero de 9 mm los resultados de HER disminuyen.

- En el agujero de 9 mm de diámetro el valor de HER fue de 164.4 y 168.8 % para los punzones cónicos y elípticos respectivamente, mostrando una tendencia a la convergencia como muestra la figura 68, sin embargo se presenta una inversión de los resultados de HER donde los valores de la expansión de agujero con el punzón elíptico son ligeramente superiores a los del punzón cónico siendo 2.6% superior el valor de HER del punzón elíptico.
- Claramente se observa en la figura 68, que la forma de geometría del punzón es un aspecto importante para determinar el HER de un material, siendo el punzón cónico el que en general mejores resultados presenta, sin embargo para ambos punzones se presentan valores de HER altos, debido a la geometría de los punzones al momento de realizar el ensayo los bordes de los agujeros perforados en las placas están en contacto con la superficie de los punzones generando una alta fricción en la dirección tangencial esto hace que se reduzca el adelgazamiento de la pared y permita al agujero expandirse en gran medida antes de que se presente algún tipo de falla.

En el ensayo de expansión de agujero la placa se dobla dos veces, la primera se da sobre el radio de la matriz y la segunda alrededor de la circunferencia del punzón, como se puede observar en la figura 69 las principales deformaciones se encuentran alrededor del agujero expandido, cabe mencionar que las tensiones en la dirección circunferencial en el borde del

agujero expandido son las principales causas de falla debido a la rotura o agrietamiento del material (Stachowicz, 2008).

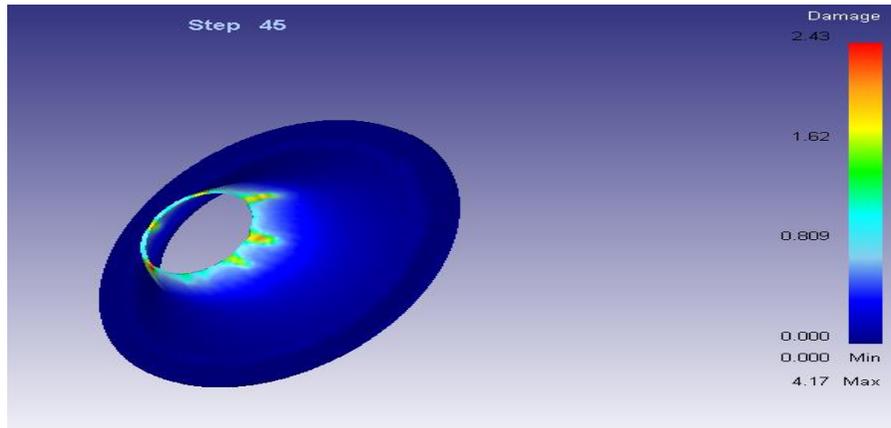


Figura 69. Tensiones que provocan el agrietamiento

5.5.1 Comparación de resultados experimentales vs simulación de HER

Se compararon los resultados de HER experimental con las simulaciones en la figura 70 se muestra un ejemplo de la medición de la expansión de agujero cuando se presentan las máximas deformaciones en el borde del agujero expandido en el agujero de 7 mm con punzón cónico.

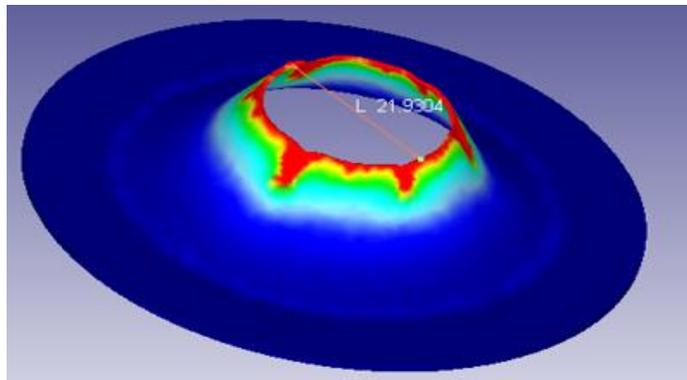


Figura 70. Medición de expansión de agujero.

En la Tabla 28 y 29 se describen los resultados de la simulación del punzón cónico y elíptico

Tabla 28*Valores de HER simulación, punzón cónico*

Diámetro del agujero	Punzón cónico				Promedio	%HER
	Medida					
	1	2	3	4		
4	9.8	10	9.8	10.2	10	150
6	17.4	17.3	17.5	17.4	17.4	190
7	21.7	21.5	22	21.8	21.8	211.4
9	23.5	23.7	23.5	23.7	23.6	162.2

Tabla 29*Valores de HER simulación, punzón elíptico*

Diámetro del agujero	Punzón elíptico				Promedio	%HER
	Medida					
	1	2	3	4		
4	9.6	9.7	9.6	10	9.7	143.1
6	16.7	17.2	16.9	17	17.0	182.5
7	20.1	20	19.8	19.9	20.0	185.0
9	23.9	24.7	23.8	24	24.1	167.8

En la gráfica 71 y 72 se presentan las curvas del ensayo experimental y simulación de la cantidad de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón.

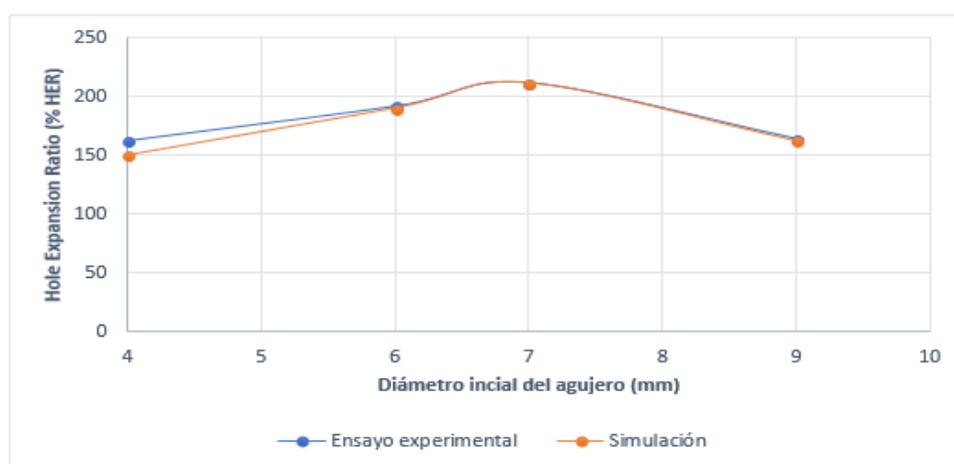


Figura 71. Diagrama de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón elíptico experimentación y simulación

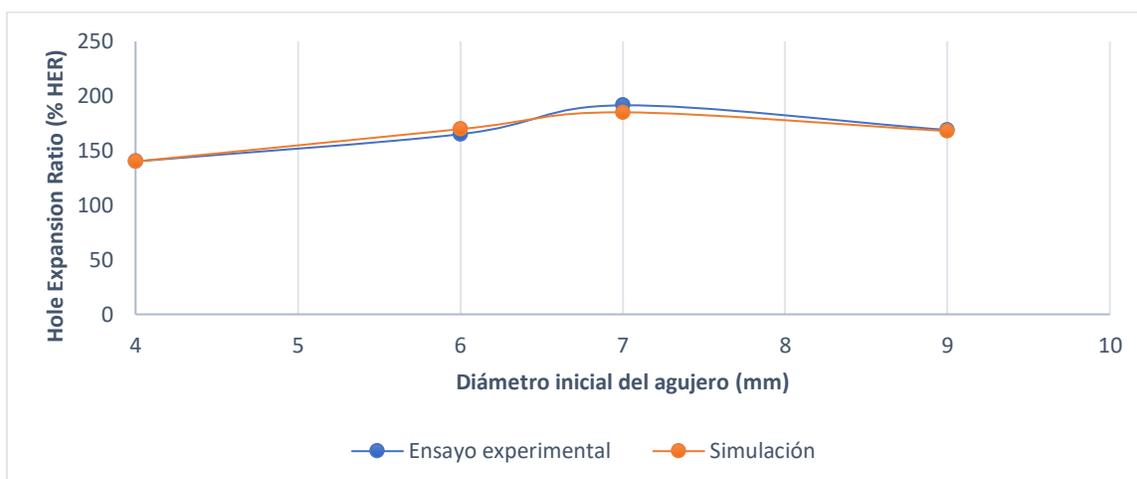


Figura 72. Diagrama de expansión de agujero en función del diámetro del orificio y la geometría del punzón cónico experimentación y simulación.

En la tabla 30 se puede apreciar los errores que existen en la simulación con respecto a los ensayos experimentales

Tabla 30

Error de simulación en comparación con los resultados de % HER Experimentales

HER Simulación		HER Experimentación		% Error	
Cónico	elíptico	Cónico	elíptico	Cónico	elíptico
150	143.1	162.5	140	7.7	2.2
190	182.5	191.6	165	0.8	10.6
211.4	185	211.4	191.4	0.0	3.3
162.2	167.8	164.4	168.8	1.3	0.6

Análisis:

- La variación de expansión de agujero en la simulación y el ensayo real se puede apreciar en la figura 71 y 72, en dichas figuras se puede observar un comportamiento de evolución similar entre los datos experimentales como el de las simulaciones.

- En la tabla 30 se muestra que el error máximo que se presenta entre los valores de experimentación y simulación para el punzón cónico es de 7.7% mientras que para el punzón elíptico se presenta un error de 10.6 siendo porcentajes de error aceptables.

5.6 Análisis de la morfología de la fractura

Una fractura se puede presentar, a niveles microscópicos, por la formación y coalescencia de microvacíos conocida como fractura dúctil o por clivaje que se refiere a una fractura frágil sin embargo un agrietamiento se presenta por corrosión-esfuerzo, fatiga y creep. Las diferentes formas en el que un material puede fallar son motivo de análisis y un aspecto muy importante a evaluar.

La fractura dúctil se presenta después de que un material ha soportado una deformación plástica excesiva, este tipo de fracturas se generan en materiales los cuales poseen una considerable deformación plástica. La fractura dúctil se genera por nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades para formar una macrogrieta. Las nucleaciones se presentan en las inclusiones o partículas de segunda fase y se favorecen si dichas partículas son grandes, frágiles o alargadas. (Anglada, Alcalá, & Llanes, 2002)

Cuando se origina la fractura dúctil se puede observar la presencia de numerosas cavidades, alrededor de inclusiones o partículas y el desgarro se produce cuando se unen dichas partículas. En la figura 73 se muestra los puntos en las que se realizó el análisis mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) que permitirá observar el tipo de fractura que presenta el material.

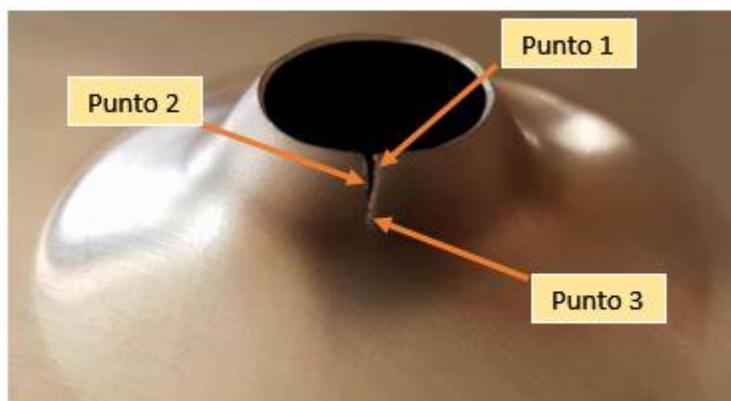


Figura 73. Puntos seleccionados y analizados en el SEM

A continuación se presentan los resultados generados en cada una de los puntos seleccionadas mediante el microscopio electrónico de barrido una vez realizado el ensayo con punzón elíptico y cónico:

Punzón elíptico

- **Punto 1**

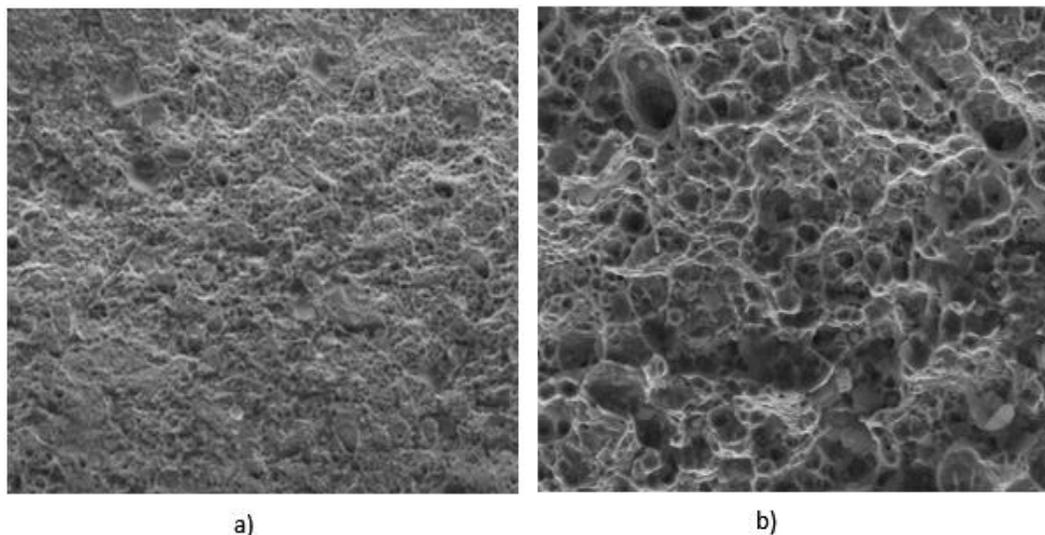
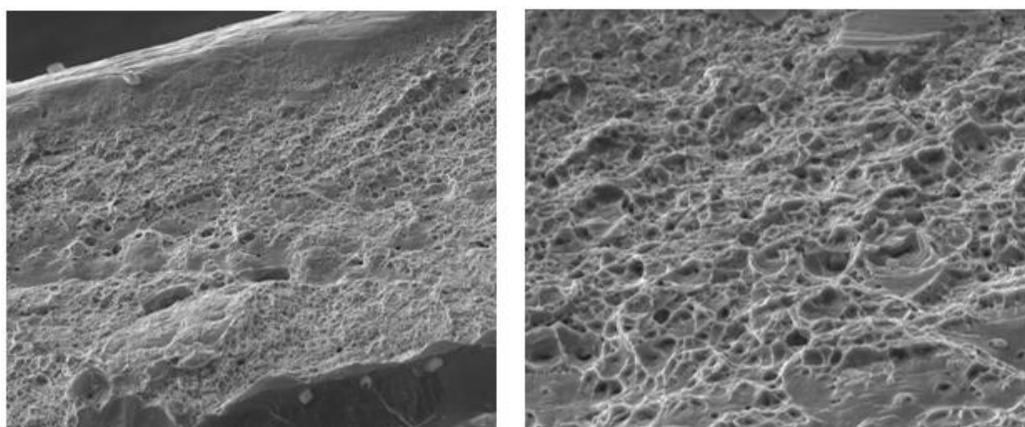


Figura 74. Punto 1 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x

- **Punto 2**

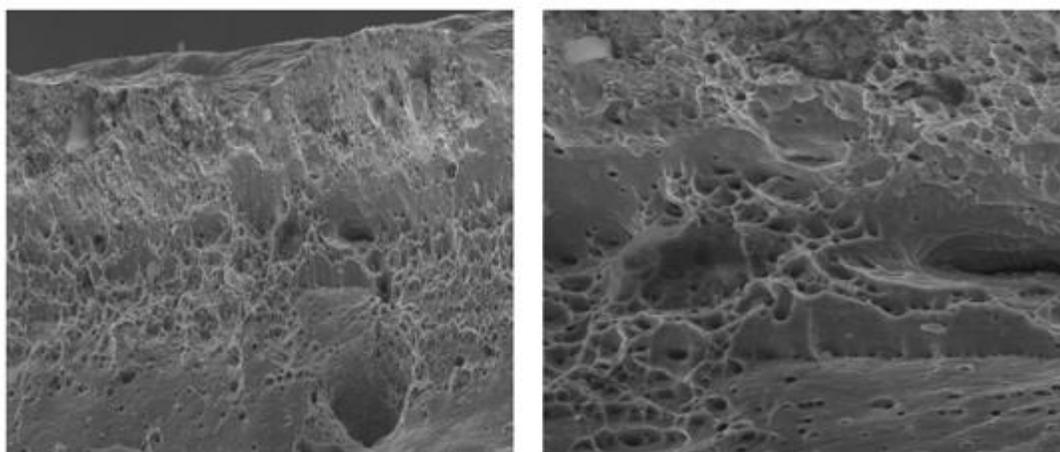


a)

b)

Figura 75. Punto 2 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x

- **Punto 3**



a)

b)

Figura 76. Punto 3 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x

Punzón cónico

- **Punto 1**

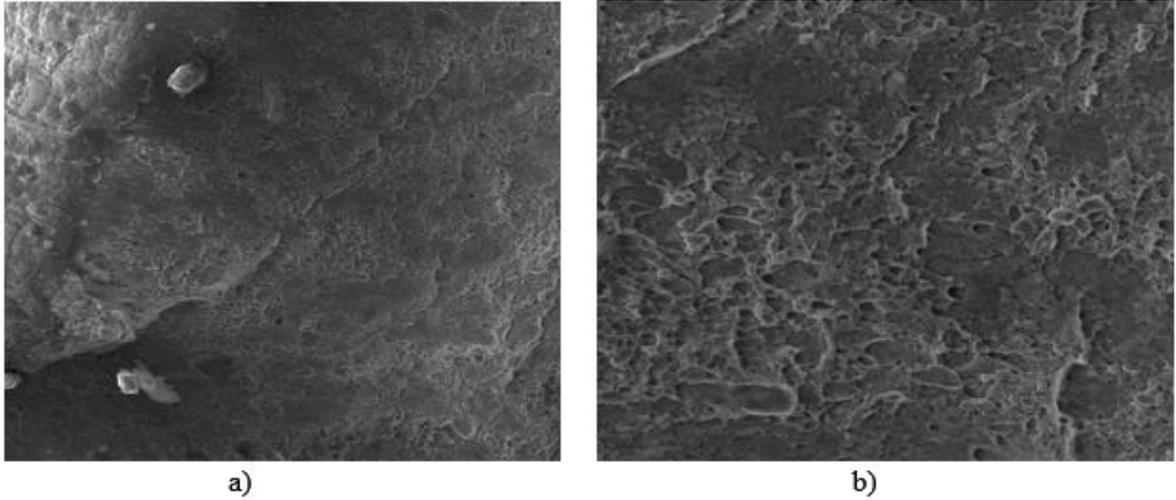


Figura 77. Punto 1 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x

- **Punto 2**

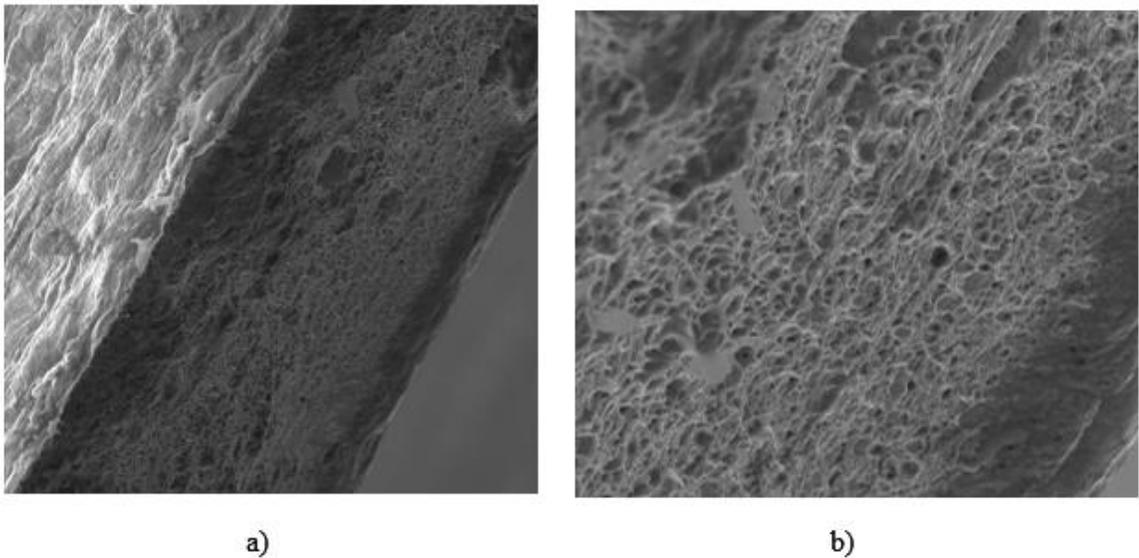


Figura 78. Punto 2 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x

- **Punto 3**

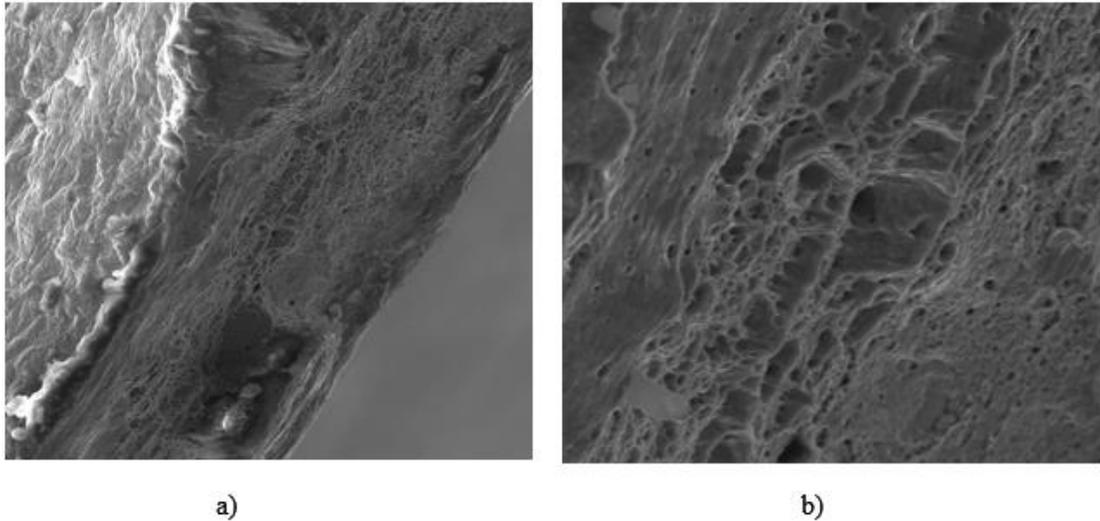


Figura 79. Punto 3 a) SEM magnificación 500x b) SEM magnificación 2000x

Análisis:

En la figura 74 y 77 observamos que el material sufre una fractura dúctil ya que se pueden apreciar pequeñas cavidades conocidas como dimples que se generan como resultado de la coalescencia de microcavidades que se forma alrededor de partículas o discontinuidades que crean una concentración de tensiones y un incremento local de la deformación plástica. Como se muestra en la figura 75 y 78 durante el proceso de la deformación del material estas microcavidades crecen bajo las tensiones existentes en el extremo de la falla del material, por último se rompen las paredes que separan estas microcavidades a las que se les conoce simplemente como cavidades. Podemos decir también que el tamaño y la profundidad de las cavidades dependen de la plasticidad de la matriz que posea el material y del número de sitios donde se inicien las microcavidades originales. En la figura 76 y 79 se aprecia que ya no existe una expansión o deformación del material simplemente este se desgarró como resultado de esto las cavidades ya no son observables, en los puntos 1 y 2 el material sufre una gran deformación ya que el punzón tanto elíptico como cónico

en el momento de realizar el ensayo de expansión de agujero penetran y estiran el material, en el punto 3 es donde simplemente el material se desgarró sin presentar deformación.

5.7 Análisis de la curva de triaxialidad

En procesos de conformado de chapa metálica, las cargas aplicadas en el material inducen en este, esfuerzos triaxiales. Los cuales conforman un factor que influye en la fractura del material.

El diagrama que permite analizar el estado de esfuerzos en la chapa metálica es el que relaciona el factor de triaxialidad η y la deformación efectiva. Donde η es la relación entre el esfuerzo hidrostático (esfuerzo medio σ_m) y el esfuerzo efectivo $\bar{\sigma}$. A continuación, se describe el factor de triaxialidad en función de sus variables y esfuerzos principales.

$$\eta = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + 3I_2}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}}$$

Esta relación permite determinar en función del factor de triaxialidad el estado en el que se encuentra la chapa de acero inoxidable en los puntos de interés antes de que ocurra la falla si $\eta = \frac{1}{3}$ la chapa de acero se encuentra a tensión uniaxial, si $\eta = \frac{2}{3}$ se encuentra a tensión biaxial y si $\eta = \frac{1}{\sqrt{3}}$ el material se encuentra en un estado de tensión plana.

Para el análisis de deformaciones obtenemos las variables necesarias para el diagrama de triaxialidad “cara arriba” y “cara abajo” del blanco con agujero de 4 mm perforado con punzón cónico y elíptico, en la figura 80 se aprecia las caras del blanco en los que se seleccionan los puntos de análisis (Körgesaar, Remes., & Romanoff, 2014)

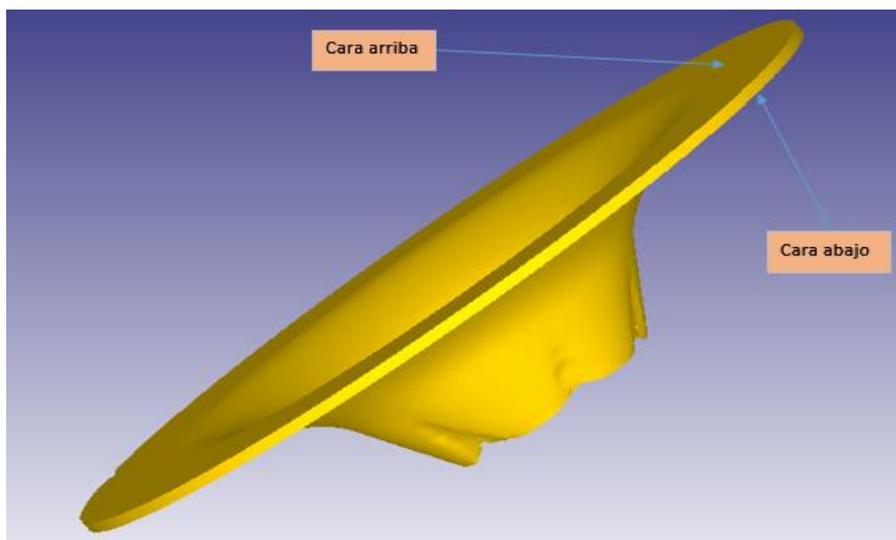


Figura 80. Identificación de caras del blanco para lo obtención de puntos de análisis

En la figura 81 se muestra un ejemplo de la forma de selección de los puntos para el análisis de triaxialidad

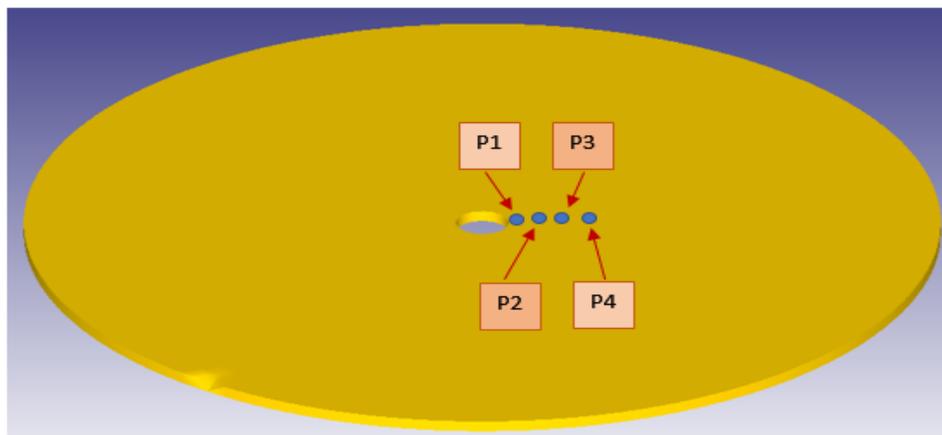


Figura 81. Selección de puntos para general las curvas de triaxialidad en ambos lados del blanco

En la figura 82 y 83 se muestran las curvas de triaxialidad en los puntos seleccionados en un blanco con agujero perforado de 4 mm de diámetro al cual se le realizo la expansión de agujero con punzón cónico

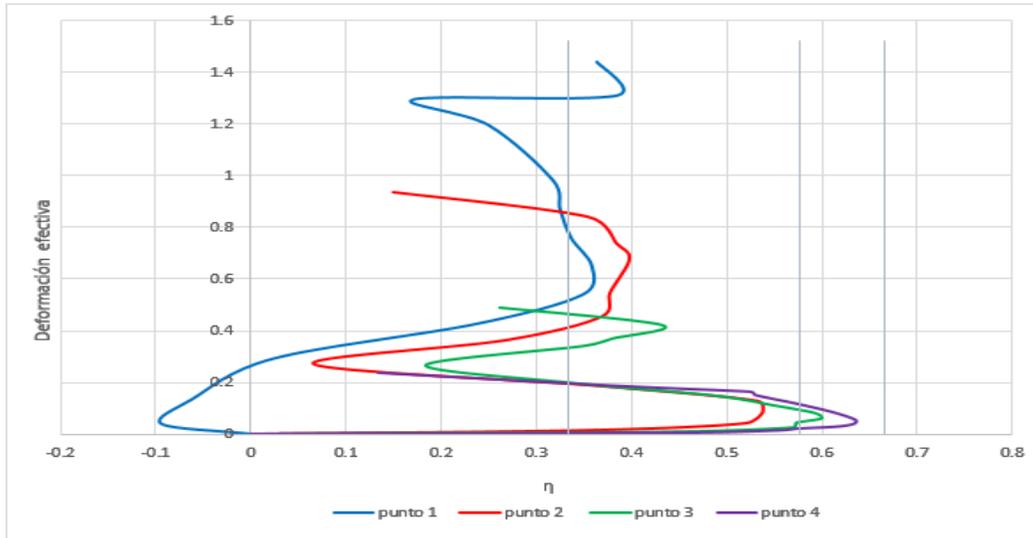


Figura 82: Diagrama de triaxialidad punzón cónico cara arriba

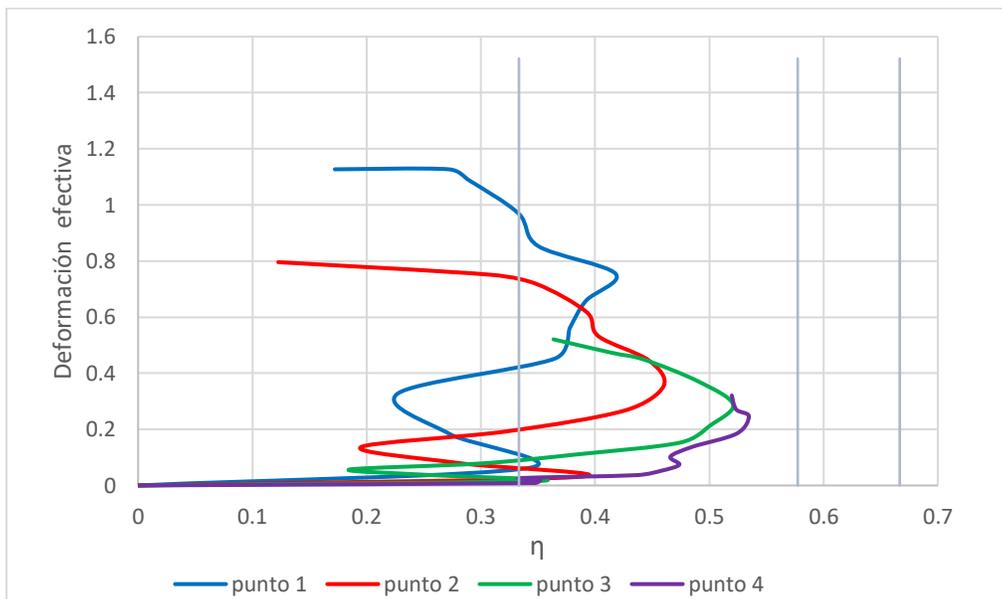


Figura 83: Diagrama de triaxialidad punzón cónico cara abajo

En la tabla 31 se puede apreciar el factor de triaxialidad y la deformación efectiva al momento de la rotura del punto 1 donde inicio el fallo.

Tabla 31

Factor de triaxialidad y deformación efectiva en el momento de la rotura.

	Deformación efectiva	Factor de triaxialidad
Cara arriba	1.2	0.38
Cara abajo	0.98	0.3

Análisis

- En las figuras 82 y 83 se muestra que el punto 1 cara arriba es el que más deformación presenta siendo este el punto más cercano al reborde del agujero expandido este punto entra primero en un estado de compresión en el lado cara arriba al inicio de la curva y luego cambia a un estado de tracción el cual se alarga hasta que se presenta el fallo en el material aproximadamente en un estado de tensión uniaxial, los puntos subsiguientes presentan una menor deformación a medida que estos se alejan del rebordeado de agujero a los dos lados del blanco, alcanzando cara arriba en los puntos 3 y 4 el estado de esfuerzos plano.

En la Figura 84 y 85 se muestran las curvas de triaxialidad en los puntos seleccionados en un blanco con agujero perforado de 4 mm de diámetro al cual se le realizó la expansión de agujero con punzón elíptico.

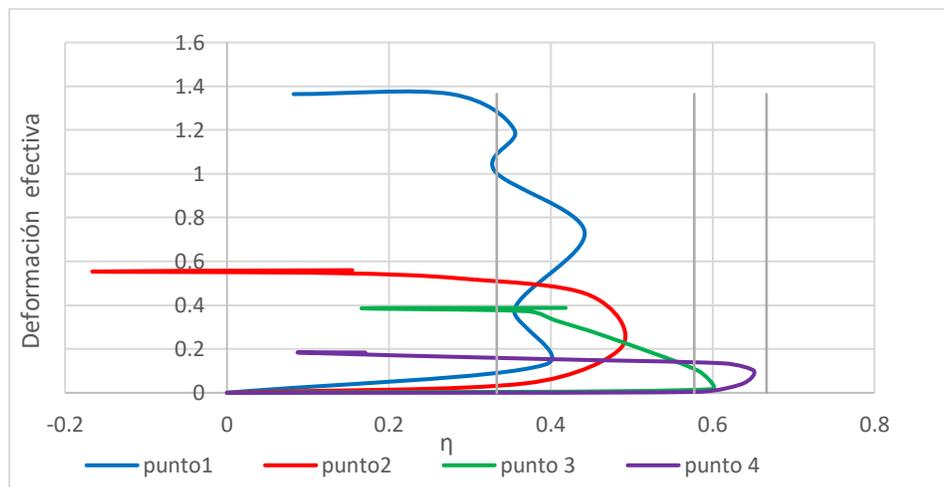


Figura 84. Diagrama de triaxialidad punzón elíptico cara arriba

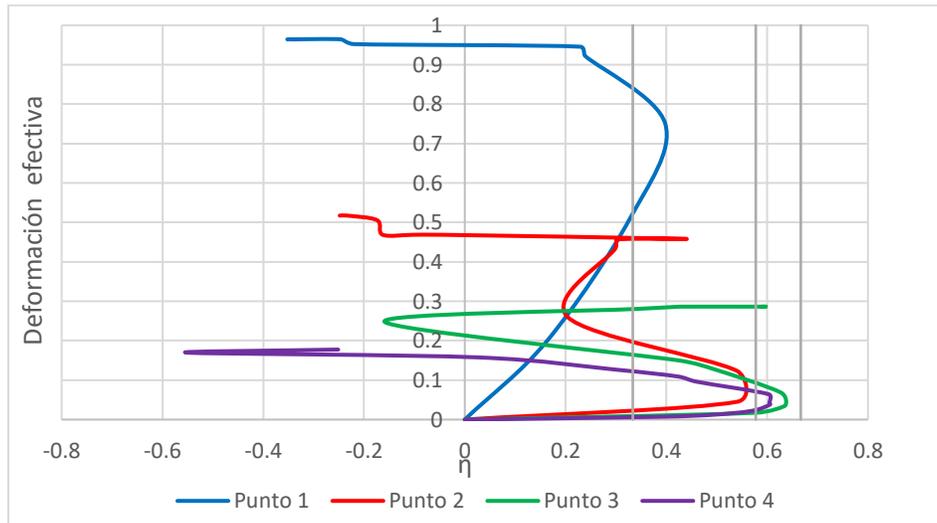


Figura 85. Diagrama de triaxialidad punzón elíptico cara abajo

En la tabla 32 se puede apreciar el factor de triaxialidad y la deformación efectiva al momento de la rotura del punto 1 donde inicio el fallo para el punzón elíptico.

Tabla 32

Factor de triaxialidad y deformación efectiva en el momento de la rotura.

	Deformación efectiva	Factor de triaxialidad
Cara arriba	1.4	0.38
Cara abajo	0.98	0.4

Análisis

- En las figuras 84 y 85 se muestra que el punto 1 cara arriba es el que más deformación presenta siendo este el punto más cercano al reborde del agujero expandido este punto entra en un estado de tensión hasta alcanzar el fallo aproximadamente en un estado de esfuerzos de tensión uniaxial, los puntos subsiguientes presentan una menor deformación a medida que estos se alejan del rebordeado de agujero a los dos lados del blanco, alcanzando en ambos lados del blanco en los puntos 3 y 4 el estado de esfuerzos plano.

5.8 Discusión de resultados

- Para desarrollar el proceso de expansión de agujero existen variables como la fuerza de sujeción de la placa a la matriz, la velocidad de penetración del punzón que han sido estudiadas por autores como (Dünckelmeyer et al., 2009) en las que se demostró que no influyen en los resultados finales del valor de HER sin embargo autores como (Thesing et al., 2016) realizaron el ensayo variando la geometría de los punzones y el diámetro inicial de los agujeros utilizando una chapa de acero martensítico avanzado de alta resistencia (AHSS) con espesor de 1.2 mm encontrando que para los agujeros de entre 5 y 10 mm de diámetro el punzón elíptico tiene los mejores valores de HER para los agujeros superiores a 10 mm el valor de HER aumenta ligeramente utilizando el punzón cónico, además en el agujero de 10 mm se presenta una tendencia a la convergencia sin embargo los resultados del ensayo en el acero inoxidable AISI 304 muestran que el punzón cónico presenta los mejores valores de HER en el rango de 4 a 7 mm de agujero expandido, en el agujero de 9 mm existe un ligero incremento en el valor de HER para el punzón elíptico además se presenta una tendencia a la convergencia en dicho agujero. Se puede mencionar además que el acero inoxidable presentó un valor máximo de HER de 211.4% en comparación con los 120% que alcanzó el acero martensítico obteniendo un 43.24% más de expansión el acero AISI 304.
- En investigaciones como las de (Stachowicz, 2008) se utilizaron tres geometrías de punzones cónico, hemisférico y cilíndrico para realizar el ensayo de expansión en un agujero de 10 mm los resultados mostraron que el punzón cónico obtuvo los mejores valores de HER además dicho autor coincide con lo expuesto por (Thesing et al., 2016) y con los resultados de este

trabajo ya que menciona que el valor de HER está ligado tanto a la geometría de los punzones con los que se realice el ensayo así como al diámetro de los agujeros a perforar.

- Uno de los factores de los cuales más depende la conformabilidad de un material es del coeficiente de endurecimiento (n), por esta razón cuando el valor de (n) aumenta la conformabilidad del material también lo hace, esto quiere decir que materiales con una mayor valor de (n) logran elevados resultados de HER sin embargo en el trabajo de (Gutiérrez , 2012) al analizar cinco acero AHSS con diferentes tolerancias en el proceso de punzonado y diferentes formas de perforación , las características del material se encuentran detalladas en la tabla 5 cuyos rangos de valores de (n) están entre 0.163 y 0.102, muestran resultados opuestos ya que a medida que el valor de (n) disminuyen los resultados de HER aumentan esto como lo explica el autor puede estar relacionado a la microestructura de los aceros , sin embargo el acero AISI 304 poseen un coeficiente de endurecimiento de 0.32 siendo este valor de (n) mucho mayor a los aceros AHSS analizados, mostrando valores de HER elevados ya que el acero MSW1200 con un valor (n) de 0.102 logro aproximadamente un valor de HER de 60% siendo el acero que más se expandió frente a un valor de HER de 211.4% del acero AISI 304 además el acero inoxidable cumple el concepto que mientras mayor sea el valor de (n) de un material mayor conformabilidad logrará, de igual manera los niveles de resistencia mecánica de los aceros austeníticos incrementan con el trabajo en frío esto se debe a la transformación parcial de la austenita en martensita.
- El análisis del número de elementos de la malla en la simulación es de suma importancia tal como lo mencionan en su investigación (De la cruz et al.,) los resultados fueron los más óptimos en las simulaciones donde mayor número de elementos en la malla se utilizó, es por esta razón que en este trabajo se realizó un proceso de parametrización en los cuales se observó el tiempo

que toma la simulación y la forma de evolución temporal que presentan las curvas de carga vs desplazamiento del punzón coincidiendo en que mientras más densa sea la malla mucho más exacto son los resultados de simulación sin embargo los tiempos de simulación crecen exponencialmente es por eso que para elegir el número de elementos de la malla se debe realizar un análisis previo que permita observar la exactitud de los resultados.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se cumplió con el objetivo de analizar la formabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el ensayo de expansión de agujero para ello se construyeron dos geometrías de punzones, cónico y elíptico los cuales expandieron agujeros perforados de 4,6,7 y 9 mm de diámetro hasta que se presente una grieta o fallo en el borde del agujero expandido permitiendo obtener los resultados de HER, además se realizó la simulación del ensayo en un programa basado en elementos finitos que permitió comparar los resultados del proceso experimental con los de la simulación concluyendo que las variables como fricción, holgura entre punzón y matriz, sujeción de la muestra a la matriz, velocidad de penetración del punzón etc., fueron analizadas y utilizadas correctamente tanto en la experimentación como en el proceso de simulación.
- Con los datos obtenidos del ensayo de expansión de agujero HER, se concluye que el valor de HER depende de la geometría de los punzones y del diámetro inicial de los agujeros perforados, los valores más altos de HER los obtuvo el punzón cónico mostrando un valor máximo de HER de 211.4 % en el agujero perforado de 7 mm de diámetro con respecto al valor máximo de 191.4 % para el punzón elíptico en el mismo diámetro de agujero y en general presentando un porcentaje máximo de variación de HER entre punzones del 13.9 % favorable para el punzón cónico.
- El valor de HER además de estar relacionado con la geometría de los punzones lo hace también con el diámetro inicial del agujero perforado en la placa ya que de acuerdo al incremento del tamaño de la perforación inicial el valor de HER aumenta obteniendo resultados favorables

hasta el agujero de 7 mm, sin embargo para el agujero de 9 mm se presenta una tendencia a la convergencia entre ambos punzones y en donde los valores de HER disminuyen presentando una expansión de agujero de 164.4% y 168.8 % para el punzón cónico y elíptico respectivamente, además mostrando que para este agujero existe un porcentaje de variación del 2.6% favorable al punzón elíptico.

- Los resultados de la fuerza vs desplazamiento del punzón de los ensayos experimentales comparados con los de la simulación presentan variaciones aceptables mostrando en el punzón cónico un error de desplazamiento de 7.1 % en el agujero de 7 mm y un error de fuerza máxima del 11.1 % en el agujero de 6 mm, para el punzón elíptico el error máximo de desplazamiento fue de 9.5 % en el agujero de 9 mm y un error de 7.5% de fuerza máxima en el agujero de 4 mm por lo que se concluye que el modelo de simulación estuvo acorde a las variaciones de trabajo con las que se desarrolló el ensayo experimental de expansión de agujero.
- Del análisis paramétrico realizado se concluyó que el número de elemento de la malla es un factor importante que influye drásticamente en los tiempos de simulación y en los valores de desplazamiento y carga además el mallado automático resulta insuficiente y es necesario realizar un mallado local con un número menor de elemento alrededor del agujero a expandir, variables como la fricción son valores a tener en cuenta sin embargo se puede observar en las gráficas una correcta evolución de la fuerza axial con respecto a la profundidad de penetración del punzón que se asemejan al ensayo experimental, los porcentajes de error presentados entre la experimentación y la simulación además de ver con la malla se deben a ciertas hipótesis simplificadoras en el modelo como considera un material isótropo que pueden generar pequeñas discrepancias en los resultados pero que permiten reducir los tiempos de simulación.

- Al analizar y comparar los resultados de investigaciones anteriores realizadas por diferentes autores con este trabajo, se concluye que el acero inoxidable AISI 304 posee una gran formabilidad a diferencia de los aceros especiales observados ya que el máximo valor de HER que se obtuvo al realizar el ensayo en el acero inoxidable fue de 211.4% en comparación con valores máximos que se alcanzaron en el análisis de aceros martensíticos como valores de HER de 120%, esto muestra que el acero AISI 304 posee una gran capacidad de expansión o deformación antes de presentar algún tipo de fallo.

6.2 Recomendaciones

- Para el ensayo experimental es de suma importancia tener un correcto campo visual que permita observar de forma clara la primera aparición de la grieta en el borde del material sin embargo es aun difícil detener el ensayo en el momento justo de falla es por eso que se recomienda para trabajos futuros el utilizar un sistema automatizado que detenga el proceso en el instante en el que se presente el fallo del material en el borde del agujero.
- En este trabajo se evaluó la formabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el ensayo de expansión de agujero variando la geometría de los punzones y el diámetro de los agujeros perforados sin embargo se recomienda realizar un análisis más profundo de otras variables como por ejemplo el claro o juego entre el punzón y la matriz ya que de acuerdo a ciertos autores esta también es una variable que influye en los resultados finales.
- Es necesario realizar un correcto centrado entre el agujero perforado en la placa y el punzón ya que puede ser una variable que influya en los resultados de carga y desplazamiento además debe evitarse la flexión en el ensayo en lo más posible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anglada, M., Alcalá, J., & Llanes, M. (2002). *Fractura de materiales*. Barcelona: Ediciones UPC
- Aparicio, G., Armas, H., & Ciaccia, M. (2007). *Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569*. Revista ingeniería UC. Vol. 14, N° 1, 57-63.
- Ashby, M. F. (2008). *Materiales para ingeniería I*. Mexico: Reverte.
- Candel, Z. (2015). *Análisis numérico de la conformabilidad de chapas de AA2024-T3 en procesos de conformado incremental mo-punto usando DEFORM-3D*. Sevilla, España.
- Chen, X., Jiang, H., Cui, Z., Lian, C., & Lu, C. (2014). *Hole expansion characteristics of ultra high strength steels*. Procedia Engineering 81, 718-723.
- Chiriac, C., & Chen, G. (2008). *Local formability characterization of AHSS-digital camera based hole expansion test development*. International Deep Draw Research Group, IDDRG 2008 International Conference, Olofström, Sweden, 81-91.
- De la Cruz, J., Cantero, J., Díaz, J., & Miguélez, M. (s.f.). *Análisis de estrategias de mallado para modelizar en 3D procesos de taladrado en Ti6Al4V*. Asociación Española de Ingeniería Mecánica: XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2-6.
- Dewang, Y., Purohit, R., & Tenguria, N. (2017). *A study on sheet metal hole-flanging process*. *Materials Today*. Proceedings 4, 5421–5428.

- Dünckelmeyer, M., Karelova, A., Kremaszky, C., & Werner, E. (2009). *Instrumented hole expansion test*. Obtenido de https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/internetovy_casopis/2009/2/dunck.pdf
- Gutiérrez , D. (Septiembre de 2012). *Aplicación de criterios de conformabilidad en productos*. Barcelona , Cataluña, España .
- Huang, Y., & Chien, K. (2001). *The formability limitation of the hole-flanging process*. *Journal of Materials Processing Technology* 117, 43-51.
- Kacem , A., Jmal , M., Krichen, A., & Manach , P. (7 de Mayo de 2015). *Thinning And Ironing In Hole-Flanging Process*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/275955477_Thinning_and_ironing_in_hole-flanging_process
- Körgeaar, M., Remes,, H., & Romanoff, J. (2014). *Size dependent response of large shell elements under in-plane tensile loading* . *International Journal of Solids and Structures* 51, 3752-3761.
- Leal , S. (Junio de 2011). *Caracterización de acero inoxidable y estudio de su resistencia mecánica y conformabilidad*. Monterrey , Nuevo León , México .
- Martín Sanz, M. (2013). *Bases teóricas de la embutición* . Sevilla, España .
- Medina , F. (26 de Septiembre de 2016). *Metlografía, fractografía y analisis*. Obtenido de <http://metalografiainsitu.blogspot.com/2016/09/acero-inoxidable-austenitico.html>

- Moreno , J., Reyes , L., & Cabriaes , R. (2018). *Predicción de fractura dúctil en el formado de terminales automotrices* . Ingenierías, Vol. XXI, No. 78.
- Mori, k., Abe , Y., & Suzui . (2010). *Improvement of stretch flangeability of ultra high strength steel sheet by smoothing of sheared edge*. Journal of Materials Processing Technology 210-4, 653-659.
- Parrado , N. (Junio de 2013). *Aceros inoxidable austeníticos endurecidos por deformación en frío para aplicaciones estructurales: rango de propiedades y comportamientos en operaciones de fabricación*. Andalucía , Cádiz , España .
- Paul , S., Mukherjee, M., Kundu, S., & Chandra, S. (2014). *Prediction of hole expansion ratio for automotive grade steels* . Computational Materials Science 89, 189-197.
- Schlossorsch, F. G. (2004). *Metalotecnica Fundamental*. Mexico : Reverte.
- Serrano, R. (2008). *Fundamentos generales del conformado por deformación plastica*. Obtenido de http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/procesos_confpla_1.pdf
- Sevilla, U. d. (8 de Noviembre de 2013). *Furzas de rozamiento*. Obtenido de [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_(GIE))
- Stachowicz, F. (2008). *Estimation of hole-flange ability for deep drawing steel sheets*. Archives of Civil and Mechanical Engineering 8(2), 167-172.

Thesing , L., Boff , U., & Schaeffer , L. (2016). *Experimental investigation of the hole expansion capability of a martensitic AHSS steel with two punch geometries and a variety of hole diameters*. Pushpa Publishing House, Volume 15, Numbers 2-3, 159-170.

Tingting , M., & Taylan , A. (2014). *Using limiting draw ratio to evaluate material drawability, Part 1* . Stamping Journal .

Vallellano , C., Erce , J., & García , L. (2005). *Predicción del fallo en el conformado plástico de chapa mediante criterios de fractura dúctil*. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 9, N.º 2, 101-111.

Wang, K., Luo , M., & Wierzbicki, T. (2014). *Experiments and modeling of edge fracture for an AHSS sheet*. International Journal of Fracture 187, no. 2, 245-268.