



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR, PRIMERA PROMOCIÓN CICLO 2014-2016**

**TEMA: EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE
EMBUTICIÓN EN CALIENTE Y EN FRÍO MEDIANTE EL
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN ALEACIONES DE
ALUMINIO Y ALEACIONES DE COBRE**

AUTORES:

CRUZ ARCOS, GUILLERMO MAURICIO

MENA PALACIOS, JORGE STALIN

DIRECTOR: ING. CULQUI CULQUI, BORYS HERNÁN MSC.

SANGOLQUÍ

2017



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN EN CALIENTE Y EN FRÍO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN ALEACIONES DE ALUMINIO Y ALEACIONES DE COBRE**” realizado por los señores **GUILLERMO MAURICIO CRUZ ARCOS** y **JORGE STALIN MENA PALACIOS**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **GUILLERMO MAURICIO CRUZ ARCOS** y **JORGE STALIN MENA PALACIOS** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de agosto de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Borys Culqui'.

.....
ING. CULQUI CULQUI BORYS HERNAN MSC.
DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **GUILLERMO MAURICIO CRUZ ARCOS**, con cédula de identidad N° 05030105555 y **JORGE STALIN MENA PALACIOS**, con cédula de identidad N° 1803725900 declaramos que este trabajo de titulación “**EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN EN CALIENTE Y EN FRÍO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN ALEACIONES DE ALUMINIO Y ALEACIONES DE COBRE**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ellos nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionado.

Sangolquí, 21 de agosto de 2017

CRUZ A. GUILLERMO M.

MENA P. JORGE S.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **GUILLERMO MAURICIO CRUZ ARCOS**, y **JORGE STALIN MENA PALACIOS**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN EN CALIENTE Y EN FRÍO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN ALEACIONES DE ALUMINIO Y ALEACIONES DE COBRE”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 21 de agosto de 2017

CRUZ A. GUILLERMO M.

MENA P. JORGE S.



DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios, por haberme dado la fortaleza, el valor y la salud para lograr este objetivo tan importante en mi formación profesional.

A mi esposa Marcela, a mis hijos Mauro y Martin que son mi orgullo, mi gran motivación los que me impulsan cada día a superarme.

A mis padres César y Martha; y a mi hermano Santiago, por estar junto a mí brindándome su amor, apoyo, comprensión y consejos en los momentos difíciles.

A toda mi familia por ser el pilar de mi vida, por demostrarme siempre su cariño, por estar siempre dispuestos a escucharme y apoyarme a cada momento.

Guillermo Mauricio Cruz Arcos



DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación va dedicado primeramente a Dios que ha puesto en mi camino a las personas adecuadas para llevar a cabo su propósito, y darme una gran familia y guía para nunca rendirme.

A mis queridos padres Luis Mena y Angelita Palacios, quienes han sido un ejemplo de vida, humildad, trabajo, amor y demás virtudes que me han guiado durante toda mi vida.

A mis hermanos por brindarme su apoyo incondicional para seguir adelante en los momentos difíciles y creer en mí, A toda mi familia que ha depositado un granito de arena para culminar otra etapa de mi vida profesional.

A mi mejor amigo y compañero de aula Mauricio Cruz, ejemplo de lucha y esfuerzo, por el apoyo durante esta etapa en nuestras vidas, lo cual me ha motivado para ser un buen profesional.

Jorge Stalin Mena Palacios



AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por protegerme en todo el camino de mi vida y darme las fuerzas para superar los obstáculos y dificultades a lo largo de la vida.

A mi esposa Marcela y a mis hijos Mauro y Martin, por haberme apoyado en los buenos y malos momentos, sobre todo por su paciencia y amor incondicional.

A mis padres César y Martha, por los valores que me han inculcado y sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mi compañero de tesis y amigo Stalin, porque sin su ayuda no habríamos logrado desarrollar con éxito este trabajo de grado.

A todos los profesionales que me apoyaron en la realización y culminación de este proyecto, por su tiempo, amistad y por los conocimientos transmitidos.

Guillermo Mauricio Cruz Arcos



AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Dios por permitirme culminar otra etapa en mi vida académica y por darme todo lo necesario para ser un buen profesional.

A mis padres Luis y Angelita por ser mi apoyo incondicional, en los momentos difíciles de mi vida, brindándome consejos que son mi guía para ser mejor día a día.

A mi mejor amigo y compañero de Investigación el Ing. Mauricio Cruz, por la colaboración en el proyecto de titulación, gracias a su aporte se ha podido culminar este proyecto de manera satisfactoria.

A las personas allegadas que de una u otra manera fueron parte de este proyecto y pusieron un granito de arena para que el mismo sea elaborado exitosamente.

Jorge Stalin Mena Palacios

| | |
|---|--------------|
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | |
| CERTIFICACIÓN | ii |
| AUTORIA DE RESPONSABILIDAD | iii |
| AUTORIZACIÓN | iv |
| DEDICATORIA | v |
| DEDICATORIA | vi |
| AGRADECIMIENTO | vii |
| AGRADECIMIENTO | viii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiii |
| RESUMEN | xviii |
| ABSTRACT | xix |
| | |
| CAPÍTULO I | 1 |
| GENERALIDADES | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Definición del problema | 2 |
| 1.3 Objetivos..... | 2 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 2 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.4 Justificación e importancia | 3 |
| | |
| CAPÍTULO II | 4 |
| PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA CHAPA | 4 |
| 2.1 Tipos de materiales | 4 |
| 2.1.1 Aleaciones de Aluminio..... | 5 |
| 2.2 Selección y justificación de los materiales | 9 |
| 2.2.1 Aleación de Aluminio serie 3000 para Embutición | 9 |
| 2.2.2. Aleación de Cobre serie C20000 | 10 |
| 2.3 Caracterización del material..... | 12 |
| 2.3.1 Ensayo de tracción | 12 |
| 2.3.2 Preparación de muestras | 13 |
| 2.3.3 Resultados..... | 13 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.4 Determinación de factor de endurecimiento | x 15 |
| CAPÍTULO III | 17 |
| EL PROCESO DE EMBUTIDO | 17 |
| 3.1 El proceso de embutido | 17 |
| 3.2 Tipos de embutido | 20 |
| 3.3 Normas ASTM E 643-84 para el ensayo del proceso de embutido | 21 |
| 3.4 Herramental del proceso de embutido | 22 |
| a. Punzón | 23 |
| b. Matriz..... | 23 |
| c. Prensa chapas | 23 |
| d. Botador | 24 |
| e. Guías cilíndricas | 24 |
| 3.5 Parámetros del proceso de embutido | 24 |
| 3.5.1 Parámetros de embutición | 24 |
| 3.5.2 Fuerzas de embutido | 25 |
| 3.5.3 Tolerancia entre punzón y matriz (c) | 28 |
| 3.5.4 Radio del punzón y de la matriz | 29 |
| a. Radio de la matriz “R” | 29 |
| b. Radio del punzón “r” | 30 |
| 3.5.5 Altura de embutición | 30 |
| 3.5.6 Velocidad de embutición | 31 |
| 3.5.7 Lubricación | 32 |
| 3.6 Defectos en el embutido | 33 |
| CAPÍTULO IV | 35 |
| EQUIPOS DE ENSAYO DE EMBUTICIÓN | 35 |
| 4.1 Equipos de embutición..... | 35 |
| 4.1.1 Prensa hidráulica | 36 |
| 4.2. Requerimientos del equipo de embutición | 36 |
| 4.3. Cálculo de la fuerza de la Prensa Hidráulica..... | 37 |
| 4.4 Diseño del sistema herramental..... | 37 |
| 4.4.1 Materiales para los componentes | 37 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 4.4.2 | Parámetros de embutición | 37 |
| a. | Diseño de Punzón | 38 |
| 4.4.3 | Fuerzas de embutido | 39 |
| a. | Fuerza del Punzón..... | 39 |
| b. | Fuerza de Sujeción..... | 40 |
| 4.4.4 | Tolerancia entre punzón y matriz | 40 |
| 4.4.5 | Radio del punzón y de la matriz..... | 40 |
| a. | Radio de la matriz “R” | 40 |
| b. | Radio del punzón “r” | 41 |
| 4.4.6 | Altura de embutición | 41 |
| 4.4.7 | Velocidad de embutición | 41 |
| 4.5 | Implementación del herramental en el equipo..... | 41 |
| 4.5.1 | Construcción de la matriz y punzón | 42 |
| 4.5.2 | Construcción del prensa chapas..... | 43 |
| 4.5.3 | Construcción del sistema de botador | 44 |
| 4.6 | Sistema de operación | 44 |
| 4.6.1 | Sistema de medición..... | 45 |
| a. | Celda de carga | 45 |
| b. | Sensor de desplazamiento | 46 |
| 4.6.2 | Sistema de control | 46 |
| CAPÍTULO V | | 48 |
| EXPERIMENTACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTIDO | | 48 |
| 5.1 | Procedimiento del ensayo de embutido | 48 |
| 5.2 | Ensayos de embutición | 49 |
| 5.2.1 | Ensayos disco 80 mm, aleación de aluminio 3003..... | 49 |
| 5.2.2 | Ensayos disco 100 mm de aleación de aluminio 3003..... | 52 |
| 5.2.3 | Ensayos disco 80 mm de la aleación de cobre C24000 | 54 |
| 5.2.4 | Ensayo disco 100 mm de aleación de cobre C24000..... | 57 |
| 5.3 | Tabulación de datos..... | 59 |
| CAPÍTULO VI | | 61 |
| SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTIDO | | 61 |

| | |
|--|-----------|
| | xii |
| 6.1 Herramientas de simulación..... | 61 |
| 6.2 Definición de parámetros para la simulación..... | 61 |
| 6.3 Simulación del embutido en frío y caliente | 62 |
| 6.3.1 Simulación de la aleación de aluminio 3003 | 62 |
| 6.3.2 Simulación de la aleación de cobre C24000 | 65 |
| 6.4 Tabulación de datos..... | 68 |
| | |
| CAPÍTULO VII..... | 70 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y | |
| EXPERIMENTACIÓN | 70 |
| 7.1 Análisis de resultados de la simulación..... | 70 |
| 7.2 Análisis de resultados de los ensayos | 71 |
| 7.3 Comparación de simulación y ensayos..... | 72 |
| | |
| CAPÍTULO VIII..... | 84 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 84 |
| 8.1 Conclusiones | 84 |
| 8.2 Recomendaciones | 85 |
| ANEXOS | 89 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Principales aleantes utilizados en aleaciones de aluminio | 5 |
| Tabla 2. Estados de entrega y tratamientos térmicos | 6 |
| Tabla 3. Descripción de aplicaciones de algunas aleaciones de aluminio | 7 |
| Tabla 4. Nomenclatura de aleaciones de cobre. | 8 |
| Tabla 5. Aleaciones de aluminio 3003,3004, 3105..... | 9 |
| Tabla 6. Composición Química aleación de aluminio 3003..... | 10 |
| Tabla 7. Propiedades mecánicas de la aleación 3003 | 10 |
| Tabla 8. Latones | 11 |
| Tabla 9. Composición Química aleación C24000 | 12 |
| Tabla 10. Propiedades mecánicas de la aleación C24000..... | 12 |
| Tabla 11. Valores del ensayo de tracción de la aleación de Aluminio 3003 | 13 |
| Tabla 12 Valores del ensayo de tracción de la aleación de Cobre C24000 | 14 |
| Tabla 13. Valores de n y K para las aleaciones | 16 |
| Tabla 14. Tolerancias entre punzón y matriz | 28 |
| Tabla 15. Tipos de prensa..... | 35 |
| Tabla 16. Diámetros de punzón y disco para la prensa. | 38 |
| Tabla 17. Metodología del ensayo de embutido..... | 48 |
| Tabla 18. Ensayos aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80mm..... | 49 |
| Tabla 19. Ensayos aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80mm..... | 51 |
| Tabla 20. Ensayos de aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm. | 52 |
| Tabla 21. Ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm..... | 54 |
| Tabla 22. Ensayos aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm..... | 56 |
| Tabla 23. Ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm..... | 57 |
| Tabla 24. Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 80 mm..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Tabla 25. Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco 100 mm..... | 59 |
| Tabla 26. Fuerza y altura máximo, aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 80 mm..... | 60 |
| Tabla 27. Fuerza y altura máxima, aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm..... | 60 |
| Tabla 28. Parámetros para la simulación del proceso de embutido | 61 |
| Tabla 29. Simulación de la aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 80 mm..... | 62 |
| Tabla 30. Simulación de la aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 100 mm..... | 64 |
| Tabla 31. Simulación de la aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 80 mm..... | 65 |
| Tabla 32. Simulación de la aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm..... | 67 |
| Tabla 33. Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 80 mm.Simulación | 69 |
| Tabla 34. Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 100 mm.Simulación | 69 |
| Tabla 35. Fuerza y altura máxima aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 80 mm.Simulación | 69 |
| Tabla 36. Fuerza y altura máxima aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm.Simulación | 69 |
| Tabla 37. Fuerzas máximas y alturas máximas para la aleación de aluminio 3003. Simulación..... | 70 |
| Tabla 38. Fuerzas máximas y alturas máximas para la aleación de cobre C24000. Simulación | 71 |
| Tabla 39. Promedios de fuerzas máximas y alturas máximas, aleación de aluminio 3003 | 71 |
| Tabla 40. Promedio de fuerzas máximas y alturas máximas aleación de cobre C24000 | 72 |
| Tabla 41. Cálculo del error para la aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80mm..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Tabla 42. Cálculo del error para la aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80mm. | 75 |
| Tabla 43. Cálculo del error para la aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100mm. | 77 |
| Tabla 44. Cálculo del error para la aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80mm | 78 |
| Tabla 45. Cálculo del error para la aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80mm | 80 |
| Tabla 46. Cálculo del error para la aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100mm. | 82 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama de los materiales de ingeniería | 4 |
| Figura 2. Estados de entrega y tratamientos térmicos | 6 |
| Figura 3. Probeta de aleación de aluminio 3003..... | 13 |
| Figura 4. Probeta de aleación de cobre C24000..... | 13 |
| Figura 5. Diagrama esfuerzo vs deformación aleación de aluminio 3003 ... | 14 |
| Figura 6. Diagrama esfuerzo vs deformación aleación de cobre C24000... | 15 |
| Figura 7. Curvas de regresión lineal para la determinación del coeficiente de endurecimiento aleación de aluminio 3003..... | 16 |
| Figura 8. Curvas de regresión lineal para la determinación del coeficiente de endurecimiento aleación de cobre C24000 | 16 |
| Figura 9. Embutido sin prensa chapas | 17 |
| Figura 10. Mecánica básica del embutido. | 18 |
| Figura 11. Secuencia del embutido. | 19 |
| Figura 12. Herramental de embutición | 22 |
| Figura 13. Fuerzas básicas involucradas en el embutido. | 25 |
| Figura 14. Fuerza del punzón vs movimiento del punzón en embutido profundo..... | 26 |
| Figura 15. Gráfica para el cálculo del radio de la matriz | 29 |
| Figura 16. Problemas de la chapa por radios inadecuados | 30 |
| Figura 17. Fórmulas para el cálculo del número de embuticiones | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 18. Lubricantes comunes y coeficientes de fricción en la deformación plástica | 32 |
| Figura 19. Defectos del Embutido | 34 |
| Figura 20. Esquema de los principios de diversas máquinas de forjado. | 36 |
| Figura 21. Esquema del bastidor con los elementos | 42 |
| Figura 22. Matriz para embutición | 42 |
| Figura 23. Punzón para embutición | 42 |
| Figura 24. Prensa chapas fijo | 43 |
| Figura 25. Prensa chapas de presión | 43 |
| Figura 26. Botador | 44 |
| Figura 27. Secuencia de operación | 45 |
| Figura 28. Celda de carga | 45 |
| Figura 29. Ecuación de ajuste de la celda de carga | 46 |
| Figura 30. Sensor de desplazamiento..... | 46 |
| Figura 31. MyDAQ | 46 |
| Figura 32. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm..... | 50 |
| Figura 33. Muestras de ensayos, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm..... | 50 |
| Figura 34. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm..... | 52 |
| Figura 35. Muestras de ensayos, aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm..... | 52 |
| Figura 36. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm..... | 53 |
| Figura 37. Muestras de ensayos, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm..... | 53 |
| Figura 38. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm..... | 55 |
| Figura 39. Muestras de ensayos, aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm..... | 55 |
| Figura 40. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 41. Muestras de ensayos, aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm | 57 |
| Figura 42. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm | 58 |
| Figura 43. Muestras de ensayos, aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm | 58 |
| Figura 44. Simulación aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm..... | 63 |
| Figura 45. Simulación aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm | 64 |
| Figura 46. Simulación aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 100 mm..... | 65 |
| Figura 47. Simulación aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm..... | 66 |
| Figura 48. Simulación aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm | 67 |
| Figura 49. Simulación aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm..... | 68 |
| Figura 50. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm. .. | 74 |
| Figura 51. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm..... | 76 |
| Figura 52. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm. .. | 77 |
| Figura 53. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm. .. | 79 |
| Figura 54. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm. .. | 81 |
| Figura 55. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm. | 82 |

RESUMEN

El presente trabajo muestra una investigación realizada para el proceso de embutición en frío y en caliente para la Aleación de Aluminio 3003 y Aleación de Cobre C24000, así como también la implementación del herramental en el equipo de embutición de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. En la primera parte se desarrolla la caracterización de los materiales utilizados, determinando las curvas esfuerzo-deformación de cada uno de estos. Posterior a esto, se realiza el estudio para la manufactura del herramental para el ensayo de embutido. Se tiene que analizar la capacidad de la prensa y la estructura de todo el equipo para el diseño correcto del punzón y matriz. Continuando con la implementación de los equipos de medición de desplazamiento y carga; por último la programación del control electrónico del equipo para la adquisición de datos. La segunda parte se basa en el desarrollo del ensayo experimental de la aleación 3003 y C24000 en frío y en caliente. Además se realiza la simulación en un software CAE con el fin de realizar un análisis y cálculo del error porcentual con los resultados obtenidos en los ensayos.

PALABRAS CLAVE:

- **EMBUTICIÓN**
- **PUNZON**
- **MATRIZ**
- **SIMULACIÓN**

ABSTRACT

The present work shows an investigation achieved by the cold and hot drawing process for the Aluminum Alloy 3003 and Copper Alloy C24000, as well as the implementation of the tooling in the drawing equipment of the "Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE". Characterization of the materials used, determining the stress-strain curves of each one is developed in the first part. After that, the study is made by the manufacture of the tooling for the sausage test. It is necessary to analyze the capacity of the press and the structure of the whole equipment for the correct design of the punch and matrix. Then, the implementation of displacement and load measurement equipment and finally the programming of the equipment electronic control for data acquisition were carried out. The second part is based on the development of the cold and hot alloy test 3003 and C24000. In addition, the simulation is performed in CAE software in order to perform an analysis and calculation of the percentage error with the results obtained in the tests.

KEYWORDS:

- **EMBUSTION**
- **AWL**
- **MATRIX**
- **SIMULATION**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El proceso de conformación por embutido es uno de los de mayor utilización en la industria. En los últimos años este tipo de proceso ha alcanzado una gran importancia en el mundo industrial. La chapa metálica se utiliza ampliamente como material base en productos industriales y de consumo a causa de su fácil maleabilidad para poder convertirla en formas complejas. (Gao, Tang, & Sharma, 2000)

En el país existen empresas en el sector metalmecánico en las que se desarrollan procesos de embutido, donde se tiene un gran interés sobre la elaboración de productos, que hasta hoy son importados. Para la fabricación de piezas se manejan procesos, técnicas y teorías tradicionales, que están basadas en la “prueba y error”, por lo que para llegar a producir los componentes se elaboran prototipos físicos a los que se realizan pruebas para comprobar su funcionamiento, las cuales resultan ser costosas y requieren de tiempo.

Desde el ámbito industrial, en donde las propiedades y la forma del producto son aspectos significativos, el tener que realizar ensayos es más costoso, se hace necesario la utilización de técnicas y herramientas de simulación, que permitan conocer la relación de los aspectos físicos, mecánicos y tecnológicos en el proceso de embutido de chapas.

En este trabajo se realizará una caracterización de los materiales utilizados en el proceso de embutido de chapas, se analizará y determinará parámetros permisibles en el embutido utilizando métodos teóricos, numéricos y experimentales que permitan comprobar e identificar las expresiones que predicen con mayor precisión un embutido correcto.

Además para la comprobación de este proceso de manufactura se recurrirán a las herramientas de simulación, las mismas que predicen el comportamiento del sistema antes de su realización física, dentro de estas herramientas está el análisis por el MEF (Método de elementos finitos) con la ayuda del software CAE.

1.2 Definición del problema

La demanda actual de procesos de manufactura en el país se ha visto incrementado en los últimos años debido a la competitividad. Por lo que en la industria metalmeccánica se crea la necesidad de conocer las diferentes variables que intervienen en el proceso de embutido, para evitar fallas que afecten el producto como pueden ser: deformaciones, adelgazamiento del espesor de la chapa, formación de arrugas, grietas y la rotura del material.

Además no es solo conocer las variables de operación sino también el comportamiento y las propiedades de los materiales empleados en dicho proceso.

Debido a esto en el país la fabricación de piezas por embutido se hace de forma empírica, lo que ocupa mucho tiempo y encarece el proceso. Se hace necesario la introducción de técnicas de simulación para optimizar y viabilizar el producto, las que permitan determinar el diseño óptimo de piezas así como los posibles cambios de parámetros.

Así la calidad final del producto, depende del diseño de las herramientas y de los parámetros del proceso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Realizar un estudio de experimentación y simulación del proceso de embutición en caliente y en frío en aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre mediante el Método de Elementos Finitos usando un software CAE.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales utilizados para embutido, mediante la realización de ensayos de tracción.
- Implementar el equipo de ensayo para el proceso de embutido.
- Diseñar el herramental para el proceso de embutición.
- Calibrar el equipo de ensayo de embutición.
- Realizar ensayos de embutición en aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre en el equipo de ensayo.
- Simular el proceso de embutición por el método de elementos finitos con la utilización del software CAE.

- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y en la simulación para su comparación.

1.4 Justificación e importancia

La importancia de los procesos de conformado radica en los múltiples artículos y formas en metal que existen y su fabricación en serie, haciendo que su alta demanda dependa de las buenas características. (Estudiantesmetalografía, 2010)

En el mundo es notable la importancia del uso del proceso de embutido para la producción de piezas tridimensionales, muy usado en la industria automovilística, en la cual los componentes fabricados mediante este tipo de proceso representan un 30% del peso total de un auto, utilizándose hasta 500 elementos elaborados por estirado de chapas. (Carvalho, 2003)

Este proyecto nace de la necesidad de contar con una herramienta apropiada para la descripción del proceso de embutido en caliente y en frío, que permita analizar la variación del procesos a determinados parámetros de operación, para analizar y mejorar las interrelaciones entre diferentes factores, lo que le permita a las empresas a poder anticipar mejor los posibles resultados en el proceso de embutido, ahorrar material, optimizar las velocidades de embutición, disminuir el tiempo de fabricación y costo.

Es por ello que, el principal resultado es un estudio sobre el proceso de embutido en frío y en caliente, donde se pueda caracterizar desde el punto de vista teórico y práctico, los principales elementos que intervienen en una operación típica de embutido, con el fin de posibilitar el empleo de las técnicas de simulación en la optimización del diseño de estos procesos tecnológicos.

Además que la simulación por el método de elementos finitos del proceso de embutido en caliente y en frío, facilita que se puedan minimizar el número de prototipos, el consumo innecesario de material, las horas de ingeniería y fabricación, esto gracias a que con la simulación se podrá realizar modificaciones que sean más fáciles y económicas, en comparación a un prototipo físico.

CAPÍTULO II

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA CHAPA

2.1 Tipos de materiales

Los materiales pueden aplicarse a diferentes situaciones y espacios, pero siempre giran en torno a varios elementos que son importantes y útiles para desempeñar determinada acción, además de que son también objetos que deben ser utilizados de manera conjunta. (Definición ABC, 2017)

Actualmente existe una creciente variedad de materiales (ver figura 1), cada uno con sus características, aplicaciones, ventajas, limitaciones y costos.

La gran mayoría de avances tecnológicos logrados en la sociedad moderna, se han apoyado en el descubrimiento y desarrollo de materiales de ingeniería y proceso de fabricación usados en su obtención. (González & Mesa, 2004)

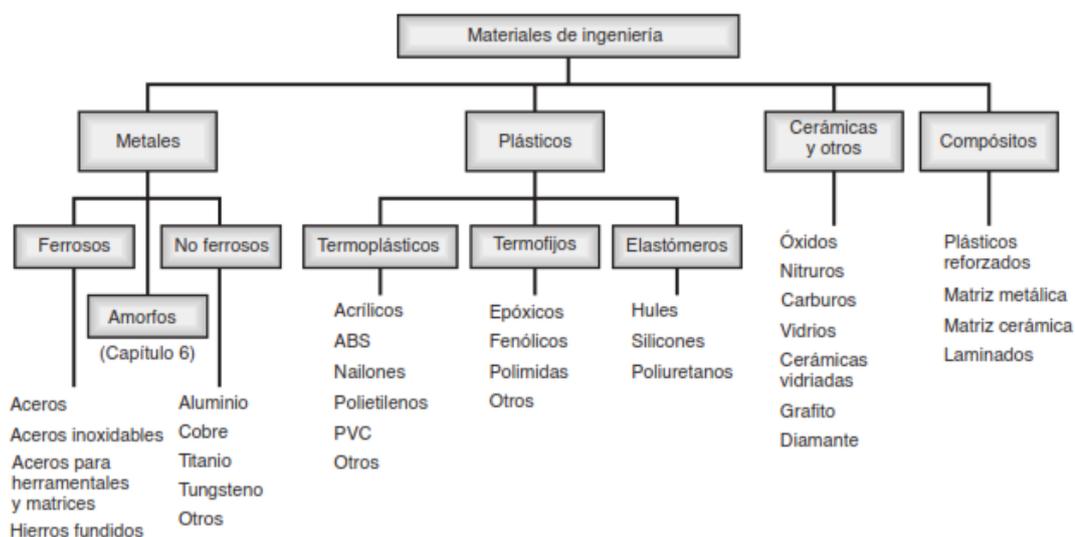


Figura 1. Diagrama de los materiales de ingeniería

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Sea en aleación o puros, los metales se emplean en numerosas industrias como la metalmecánica, la aeronáutica, la biomedicina, la electrónica, estructuras civiles y del transporte entre otras. (Lefevre, 2014)

Una adecuada selección de materiales y procesos, garantiza a los diseñadores de partes mecánicas su correcto funcionamiento de los componentes diseñados. (González & Mesa, 2004)

2.1.1 Aleaciones de Aluminio

Las aleaciones de aluminio son obtenidas a partir de la combinación de este metal con otros elementos que permiten que el aluminio mejore sus propiedades mecánicas. Los principales elementos que se agregan al aluminio son cobre, manganeso, silicio, magnesio y zinc; para fines metalúrgicos también se añaden otros elementos en menor cantidad. En virtud de que se han elaborado literalmente cientos de aleaciones de aluminio para uso comercial, la Aluminum Association formuló sistemas especiales de designación para distinguir y clasificar las aleaciones de una manera sinóptica. (Kutz, 1990) (ver tabla1).

Tabla 1.

Principales aleantes utilizados en aleaciones de aluminio

| Elemento | Característica |
|-----------|---|
| Zn | Resistencia y dureza aumentadas. Posibilidad de corrosión bajo tensión. Combinado con Mg produce una aleación tratable térmicamente |
| Cu | Produce una aleación tratable térmicamente. Resistencia y dureza aumentadas. |
| Mn | Reduce la resistencia a la corrosión |
| Si | Combinado con Mg produce una aleación tratable térmicamente. Buena resistencia a la corrosión. |
| Mg | Resistencia aumentada. Dureza aumentada. Buena resistencia a la corrosión. Soldabilidad aumentada. |

Fuente: (Ibars, 2007)

Para el estudio de las aleaciones de aluminio se ha dividido en dos grupos:

- Aleaciones de aluminio para moldeo
- Aleaciones de aluminio para conformado

Según la Aluminum Association, establece la designación de las aleaciones de aluminio (ver tabla 2), para lo que se utiliza sistemas numéricos de cuatro dígitos, donde: el primer dígito indica el grupo de aleación y los dos

últimos identifican la aleación de aluminio o la pureza del mismo, el segundo dígito indica modificaciones realizadas sobre la aleación original o límites de impurezas. Además se puede encontrar los estados de tratamientos que pueden tener las aleaciones. (Maffia, 2013) (ver figura 2)

Tabla 2.

Sistema de designación

| Aleación | Designación |
|--------------------------|-------------|
| Aluminio puro 99% mínimo | 1XXX |
| Cobre | 2XXX |
| Manganeso | 3XXX |
| Silicio | 4XXX |
| Magnesio | 5XXX |
| Magnesio – Silicio | 6XXX |
| Zinc | 7XXX |
| Otros elementos | 8XXX |

Fuente: (Maffia, 2013)

Heat treatment and temper nomenclature for aluminum alloys.^a

| Suffix letter (indicates basic treatment or condition) | First suffix digit (indicates secondary treatment) | Second suffix digit (indicates residual hardening) |
|--|---|---|
| F, as fabricated | | |
| O, annealed/wrought products only | | |
| H, cold-worked/work-hardened | 1, cold-worked only 2, cold-worked and partially annealed 3, cold-worked and stabilized | 2, 1/4 hard 4, 1/2 hard 6, 3/4 hard 8, hard 9, extra hard |
| W, solution heat-treated | | |
| T, heat-treated/stable | 1, partial solution plus natural aging 2, annealed cast products only 3, solution plus cold work 4, solution plus natural aging 5, artificially aged only 6, solution plus artificial aging 7, solution plus stabilizing 8, solution plus cold work and artificial aging 9, solution plus artificial, aging and cold work | |

^a Added as suffix letters and digits to the alloy number.

Figura 2. Estados de entrega y tratamientos térmicos

Fuente: (Maffia, 2013)

Algunas de las aplicaciones de las aleaciones de aluminio se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.

Descripción de aplicaciones de algunas aleaciones de aluminio

| Aleación | Descripción y aplicaciones seleccionadas |
|-----------------|---|
| 1100 | Aluminio comercialmente puro altamente resistente al ataque químico y a la intemperie. De bajo costo, dúctil para embutición profunda, y fácil de soldar. Se utiliza para aplicaciones de alta pureza, como equipos de procesamiento químico. También para las aspas del ventilador, guarnición de tubo, trabajo de chapa y orfebrería hecha girar. |
| 3003 | Aleación de propósito general más popular. Más de 100 con la misma buena conformabilidad y soldabilidad. Para uso general incluyendo trabajo de chapa, estampado, tanques de combustible, equipo químico, contenedores, gabinetes, trazadores de líneas del congelador, utensilios de cocina, recipientes a presión, tanques de almacenamiento, aplicaciones agrícolas. |
| 3105 | Para revestimiento de lluvia en residencias, casas rodantes, transporte de mercancía, trabajo de chapa, piezas de la estufa y piezas de acabado, automotrices, productos, electrónica, muebles, hospital y equipo médico, vehículos de recreación, camiones y remolques de construcción |

Fuente: (Nunes, et al., 1991)

2.1.2 Aleaciones de cobre

Las aleaciones de cobre están constituidas por el cobre como constituyente principal, más algún tipo de elemento químico que le da el nombre a la aleación. (Maffia, 2013)

Tienen mayor resistencia a la fatiga, a la termo fluencia y al desgaste abrasivo, presentando una excelente ductilidad, resistencia a la corrosión, muy buena conductividad eléctrica y electrónica, y responden muy bien al

endurecimiento por deformación.

Existen más de 400 aleaciones de cobre, cada una con una combinación única de propiedades, que se adaptan a un gran número de aplicaciones, procesos de fabricación y entornos. (Cobre, 2017)

Las especificaciones de aleaciones de cobre se basan en el UNS (United Numbering System For Metal and Alloys), el cual usa un número de 5 dígitos precedidos de la letra C. Las aleaciones de cobre se clasifican de acuerdo a un sistema de designación que comprende los números C10100 al C79900 para las aleaciones conformables y los números C80000 al C99900 para designar las aleaciones de fundición. Las normas ASTM B 601, "Standard Practice for Temper Designations for Copper and Copper Alloys--Wrought and Cast" establece un código alfa-numérico que se relaciona con cada estado de entrega (temper). (Maffia, 2013)

En la tabla 4 se muestran algunas de aleaciones de cobre con sus componentes.

Tabla 4.

Nomenclatura de aleaciones de cobre.

| Designación | Aleación |
|-------------|---|
| C1xxxx | (cobre >99.3) y cobre alto (99.3>CU>96) |
| C2xxxx | Aleado con Zn (Latones) |
| C3xxxx | Aleado con Zn y Pb (Latones de plomo) |
| C4xxxx | Aleado con Zn y Sn (Latones de estaño) |
| C5xxxx | Aleado con Sn (bronces fosforados) |
| C6xxxx | Aleado con Al (bronce al aluminio) |
| | Aleado con Si (bronce al silicio) |
| C7xxxx | Aleado con Ni y Ni-Zn (Plata de níquel) |

Fuente: (Aguilar, 2010)

Con el cobre y sus aleaciones se pueden conformar piezas con una amplia variación de formas y dimensiones. Para esto, se utilizan distintos procesos de fabricación, tanto a alta como a baja temperatura, como ser el laminado, la extrusión, la forja, el estampado, el estirado, etc., sin el menor inconveniente. (Maffia, 2013)

2.2 Selección y justificación de los materiales

Al tratarse de una deformación plástica, es decir, una deformación permanente, conviene emplear materiales con las siguientes características:

1. Límite elástico bajo.
2. Elevada capacidad de deformación.
3. Deberán ser dúctiles, maleables, de elevada plasticidad o deformabilidad.

De las diferentes aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre que se encuentran, se realiza la selección de las serie 3000 para aleaciones de aluminio y la serie C2000 para aleaciones de cobre.

2.2.1 Aleación de Aluminio serie 3000 para Embutición

Serie 3xxx. En estas aleaciones el principal elemento aleante es el Manganeso (Mn).

Las aleaciones de aluminio 3003, 3004 y 3105 son muy usados para fabricar botellas para bebidas, utensilios de cocina, intercambiadores de calor, mobiliario, señales de tráfico, tejados y otras aplicaciones arquitectónicas. (Ortolá, 2009) (ver tabla 5)

Tabla 5.

Aleaciones de aluminio 3003,3004, 3105

| Aleación | Característica | Aplicación |
|-----------------|---|---|
| 3003 | Es la aleación de aluminio más utilizada | Amplia gama de uso incluyendo equipo gastronómico |
| 3004 | Composición química similar a la 3003, con adición de magnesio | Tanques de almacenamiento, recipientes a presión y equipo gastronómico. |
| 3105 | Similar al 3003, pero con un espectro de tolerancia mayor para los elementos de aleación de cobre, magnesio, cromo, titanio y zinc. | Material de construcción menos importante, como material para techo, revestimientos, impermeabilización y trabajos de ductos. |

Fuente: (Blanks, 2017)

En base a la información obtenida, a la disponibilidad en el mercado y las aplicaciones que poseen estas aleaciones, se utiliza para el proceso de embutición la aleación de aluminio 3003. Su composición química (ver tabla 6) y algunas de sus propiedades mecánicas (ver tabla 7) se muestran a continuación.

Tabla 6.

Composición Química aleación de aluminio 3003

| | |
|-----------------|-----------|
| Si | 0,6 |
| Fe | 0,7 |
| Cu | 0,05-0,20 |
| Mn | 1,0-1,5 |
| Zn | 0,10 |
| Ti | 0,10 |
| Otros elementos | 0,15 |
| Aluminio | El resto |

Fuente: (ICEI 2017)

Tabla 7.

Propiedades mecánicas de la aleación 3003

| | | |
|---------------------------------|-------------------|------|
| Módulo de Elasticidad | GPa | 68.9 |
| Razón de Poisson | | 0.33 |
| Resistencia máxima a la tensión | MPa | 110 |
| Límite de fluencia | MPa | 41 |
| Densidad | g/cm ³ | 2.73 |
| Elongación | % | 3% |

Fuente: (ICEI 2017)

2.2.2. Aleación de Cobre serie C20000

El latón es una aleación de cobre, cinc (Zn) y, en menor proporción, otros metales. En los latones industriales, el porcentaje de Zn se mantiene siempre inferior a 50%. Su composición influye en las características mecánicas, la fusibilidad y la capacidad de conformación por fundición, forja y mecanizado.

En frío, los lingotes obtenidos se deforman plásticamente produciendo láminas, varillas o se cortan en tiras susceptibles de estirarse para fabricar alambres. El latón es más duro que el cobre, pero fácil de mecanizar, grabar y fundir. Es resistente a la oxidación, a las condiciones salinas y es maleable, por lo que puede laminarse en planchas finas. (Maffia, 2013)

Al tener un color amarillo brillante, con parecido al oro, característica aprovechada en joyería, especialmente en bisutería, y en el galvanizado de elementos decorativos. Las aplicaciones de los latones abarcan otros campos muy diversos, como armamento, soldadura, fabricación de alambres, tubos de condensadores y terminales eléctricos, entre otras. (Kuzu Decolataje, 2014) (ver tabla 8).

Tabla 8.

Latones

| Aleación | %Zn | Aplicación |
|-------------------------------|------------|--|
| Latón dorado | 5 | Imitación de oro, joyerías |
| Bronce comercial | 10 | Bisutería, embutidos, forjados, pequeña ferretería (tornillos, remaches) |
| Latón Rojo (C23000) | 15 | Embutidos, entallas estampados, radiadores de automóviles, tubos. |
| Latón Bajo (C24000) | 20 | Joyería y bienes metálicos · Piezas embutidas profundamente |
| Latón de Cartuchería (C26000) | 30 | Mejor zona para la embutición |
| Latón Alto, Amarillo (C27000) | 35 | Alfileres, roblones, instrumentos musicales, vainas de cartuchos |

Fuente: (Grupo Wieland, 2017)

En general los latones son excelentes para embutición, aunque los destacados son los más empleados para estas operaciones. El M20 (C24000) se emplea para hacer tubos. El M30 (C26000) es conocido por su uso en la fabricación de vainas para munición. Los restantes (M33

(26800) , M36 (C27000) , M37 y M38 (C272000)) se emplean sobre todo para la fabricación de bienes metálicos donde sea necesaria alguna embutición profunda. (Grupo Wieland, 2017)

De las características mencionadas anteriormente, la disponibilidad en el mercado y las aplicaciones que presenta la aleación de cobre, se escoge la aleación C24000, su composición química (ver tabla 9) y algunas de las propiedades mecánicas (ver tabla 10) de esta aleación se muestran a continuación.

Tabla 9.

Composición Química aleación C24000

| | |
|----|----------|
| Cu | 80% |
| Zn | Restante |

Fuente: (Grupo Wieland, 2017)

Tabla 10.

Propiedades mecánicas de la aleación C24000

| | | |
|---------------------------------|-------------------|---------|
| Módulo de Elasticidad | GPa | 119 |
| Razón de Poisson | | 0.34 |
| Resistencia máxima a la tensión | MPa | 270-320 |
| Límite de fluencia | MPa | 76 |
| Densidad | g/cm ³ | 8.67 |
| Elongación | % | ≥20% |

Fuente: (Grupo Wieland, 2017)

2.3 Caracterización del material

En la investigación, se utiliza la aleación de aluminio 3003 y la aleación de cobre C24000, para determinar y comparar sus propiedades mecánicas, se ha elegido una chapa de espesor de 1 mm de cada material, de las que se obtuvieron las probetas.

2.3.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción permite obtener información de las propiedades mecánicas de un material, mide la resistencia de un material a una fuerza

estática o gradualmente aplicada en una probeta.

La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza F , que se conoce como carga. También se mide la elongación del material en la probeta por la aplicación de la fuerza en la longitud calibrada.

2.3.2 Preparación de muestras

Para los ensayos de tracción, se obtuvieron probetas de acuerdo a la norma ASTM E8M, para la aleación de aluminio 3003 (ver figura 3) y para la aleación de cobre C24000 (ver figura 4)



Figura 3. Probeta de aleación de aluminio 3003



Figura 4. Probeta de aleación de cobre C24000

2.3.3 Resultados

En la tabla 11 se presentan los resultados registrados luego del ensayo de tracción de la aleación de aluminio 3003.

Tabla 11.

Valores del ensayo de tracción de la aleación de Aluminio 3003

| Carga (N) | Esfuerzo(N/mm ²) | ϵ | LN Esfuerzo | LN ϵ |
|-----------|------------------------------|------------|-------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | | |
| 98,1 | 11,65083135 | 0,0013 | 2,45537754 | -6,64539101 |
| 196,2 | 23,30166271 | 0,0026 | 3,14852472 | -5,95224383 |
| 294,3 | 34,95249406 | 0,0039 | 3,55398983 | -5,54677873 |
| 392,4 | 46,60332542 | 0,0052 | 3,8416719 | -5,25909665 |
| 490,5 | 58,25415677 | 0,0065 | 4,06481545 | -5,0359531 |
| 588,6 | 69,90498812 | 0,0078 | 4,24713701 | -4,85363155 |
| 686,7 | 81,55581948 | 0,0091 | 4,40128769 | -4,69948087 |
| 784,8 | 93,20665083 | 0,0104 | 4,53481908 | -4,56594947 |
| 882,9 | 104,8574822 | 0,0117 | 4,65260212 | -4,44816644 |

Continua 

| | | | | |
|---------|-------------|--------|------------|-------------|
| 981 | 116,5083135 | 0,013 | 4,75796263 | -4,34280592 |
| 1020,24 | 121,1686461 | 0,014 | 4,79718334 | -4,26869795 |
| 1039,86 | 123,4988124 | 0,015 | 4,81623154 | -4,19970508 |
| 1079,1 | 128,1591449 | 0,0163 | 4,85327281 | -4,11659017 |
| 1098,72 | 130,4893112 | 0,0176 | 4,87129132 | -4,03985638 |
| 1118,34 | 132,8194774 | 0,0189 | 4,88899089 | -3,96859336 |
| 1137,96 | 135,1496437 | 0,0202 | 4,90638264 | -3,90207267 |
| 1157,58 | 137,47981 | 0,0215 | 4,92347707 | -3,83970234 |

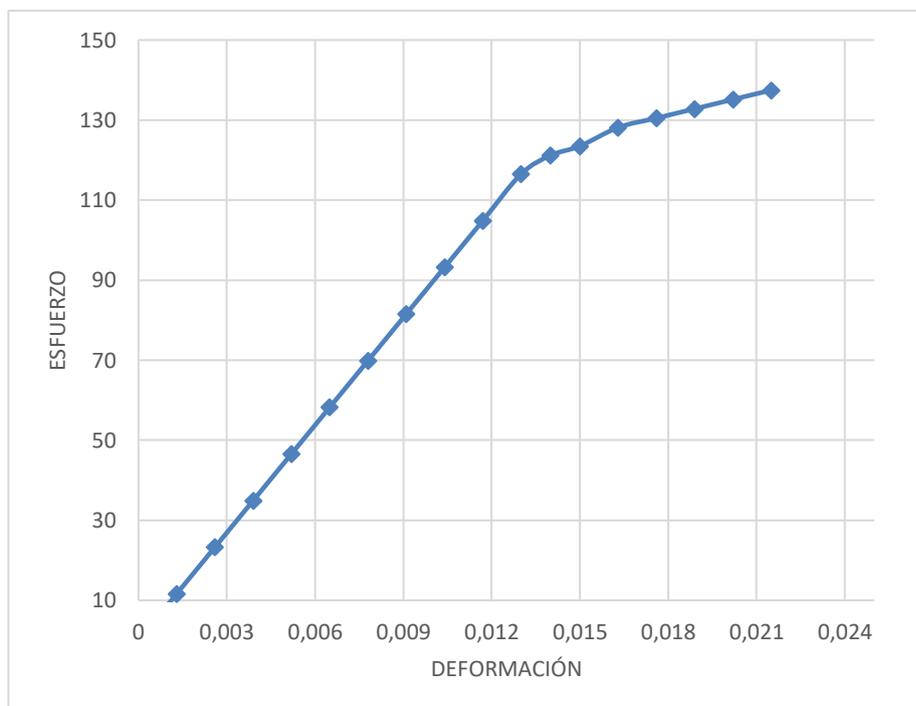


Figura 5. Diagrama esfuerzo vs deformación aleación de aluminio 3003

La tabla 12 presenta los resultados registrados luego del ensayo de tracción de la aleación de cobre C24000).

Tabla 12.

Valores del ensayo de tracción de la aleación de Cobre C24000

| Carga (N) | Esfuerzo(N/mm ²) | ϵ | LN Esfuerzo | LN ϵ |
|-----------|------------------------------|------------|-------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | | |
| 15 | 16,17032967 | 0,0007273 | 2,78317806 | -7,22620901 |
| 65 | 70,07142857 | 0,0021818 | 4,24951513 | -6,12759672 |
| 115 | 123,9725275 | 0,0072727 | 4,82005999 | -4,92362392 |
| 165 | 177,8736264 | 0,0145455 | 5,18107333 | -4,23047674 |
| 215 | 231,7747253 | 0,0218182 | 5,44576589 | -3,82501163 |
| 225 | 242,5549451 | 0,0254545 | 5,49122826 | -3,67086095 |

Continua 

| | | | | |
|-----|-------------|-----------|------------|-------------|
| 235 | 253,3351648 | 0,0305455 | 5,53471337 | -3,48853939 |
| 245 | 264,1153846 | 0,0363636 | 5,57638607 | -3,314186 |
| 255 | 274,8956044 | 0,0436364 | 5,61639141 | -3,13186445 |
| 265 | 285,6758242 | 0,0545455 | 5,65485769 | -2,9087209 |
| 275 | 296,456044 | 0,0727273 | 5,69189896 | -2,62103882 |
| 285 | 307,2362637 | 0,1163636 | 5,72761704 | -2,15103519 |

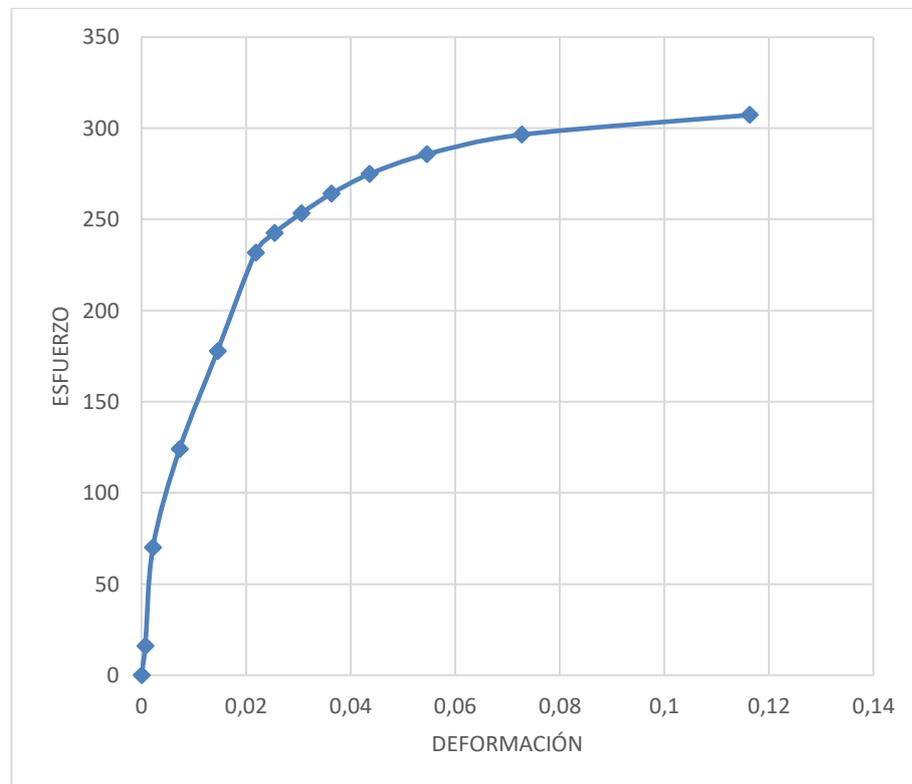


Figura 6. Diagrama esfuerzo vs deformación aleación de cobre C24000

2.3.4 Determinación de factor de endurecimiento

Con los datos del ensayo de tracción, se pudo realizar las gráficas de las curvas de regresión lineal para determinar el coeficiente de endurecimiento “n” de la aleación de aluminio 3003 (ver figura 7) y de la aleación de cobre C24000 (ver figura 8)

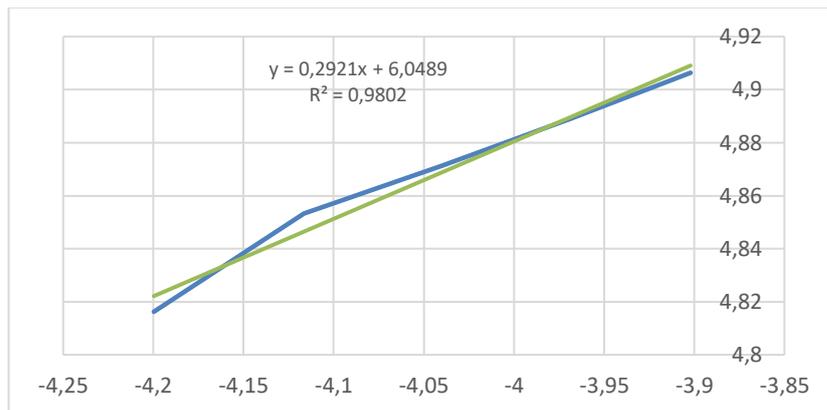


Figura 7. Curvas de regresión lineal para la determinación del coeficiente de endurecimiento aleación de aluminio 3003

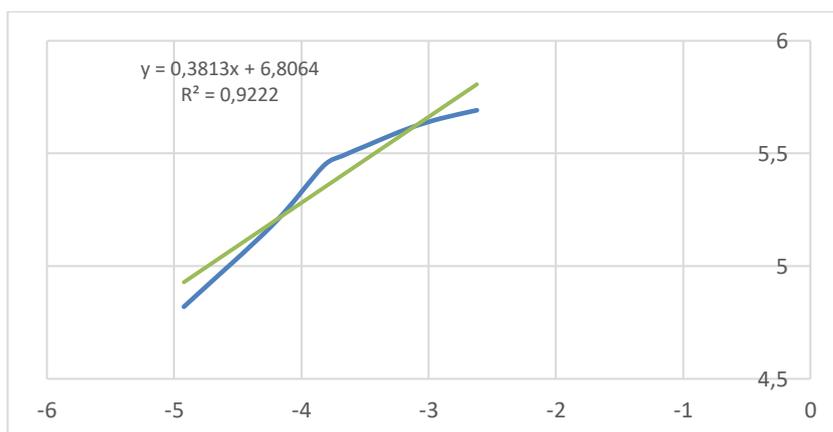


Figura 8. Curvas de regresión lineal para la determinación del coeficiente de endurecimiento aleación de cobre C24000

La tabla 13 muestra los valores del coeficiente n y K para los materiales estudiados.

Tabla 13.

Valores de n y K para las aleaciones

| Material | Exponente de endurecimiento por deformación (n) | Coficiente de resistencia (k) (Mpa) |
|---------------------------|---|---|
| Aleación de aluminio 3003 | 0.29 | 419 |
| Aleación de cobre C24000 | 0.38 | 897 |

CAPÍTULO III

EL PROCESO DE EMBUTIDO

3.1 El proceso de embutido

El proceso de embutido es una operación que tiene como principio la deformación plástica de lámina metálica y se emplea para hacer piezas de geometría acopada, de caja y de una gran variedad de formas huecas. El embutido se realiza colocando una lámina de metal aprisionada por un sujetador y un dado empujando el metal hacia la cavidad inferior de éste con la presión ejercida por un punzón. (Academia, 2017) (ver figura 9)

Piezas típicas que se fabrican por embutido son las latas de refresco, utensilios de cocina como cacerolas, partes automotrices etc. En la práctica existen dos posibles métodos para llevar a cabo este proceso: el embutido libre y el embutido con prensa chapas. (Academia, 2017)

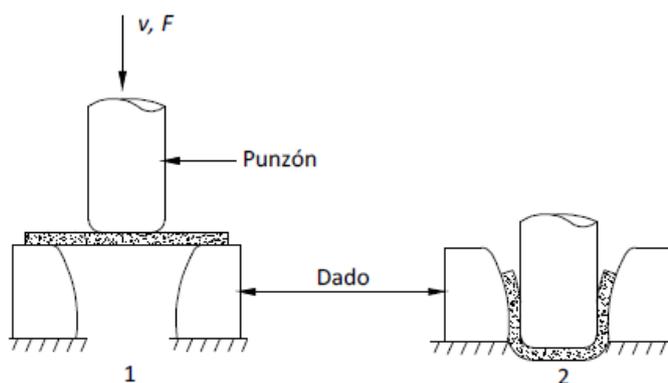


Figura 9. Embutido sin prensa chapas

1) Antes del embutido 2) Después del embutido

Fuente: (Groover, 2012)

La mecánica del embutido se puede explicar a partir de la figura 10.

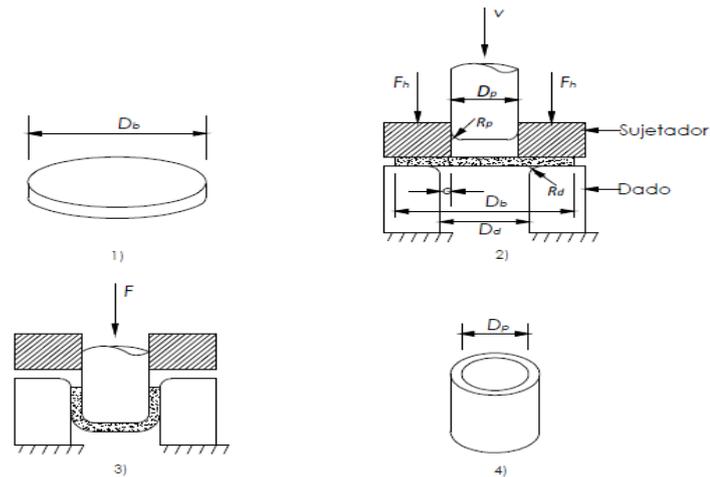


Figura 10. Mecánica básica del embutido.

Fuente: (Groover, 2012)

Se embute un disco, conocido en la industria como 'blank' de diámetro D_b dentro de la cavidad de un dado de diámetro D_d , tanto el punzón como el dado tienen unos redondeos en las esquinas (R_p y R_d) que permiten eliminar errores en las piezas finales puesto que al tener esquinas agudas (R_p y $R_d=0$) ocasionaría la ruptura del material haciéndose una operación de perforado. Es importante señalar que las periferias del punzón y del dado deben estar espaciadas por un claro c . El claro punzón-dado debe ser aproximadamente 10% mayor que el espesor de la placa a embutir. (Groover, 2012)

El punzón presiona con una fuerza F hacia abajo a fin de deformar al material y el prensa chapas ejerce una fuerza de sujeción F_h en la misma dirección que el punzón. Por cada avance del punzón el material comienza a deformarse plásticamente mediante una serie compleja de dobleces. (Groover, 2012)

El proceso típico de embutido se puede apreciar en la figura 11.

- 1) Herramental montado
- 2) Doblado de la forma inicial
- 3) Enderezado en las paredes del dado
- 4) Compresión de la brida o pestaña
- 5) Fin de la carrera del punzón.

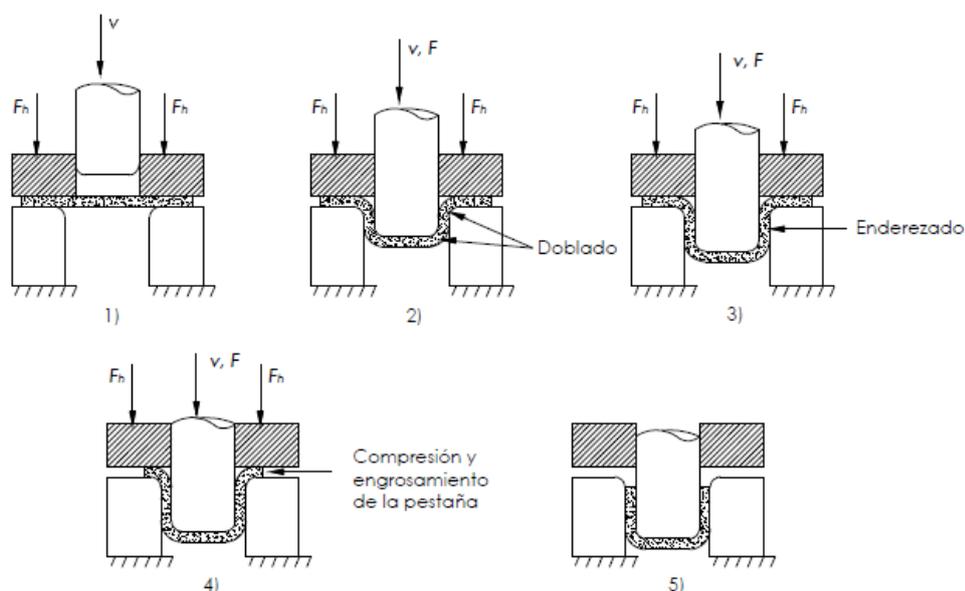


Figura 11. Secuencia del embutido.

Fuente: (Groover, 2012)

En los instantes en el que el punzón comienza a descender, el material de la chapa, debe superar la fricción que existe entre el prensa chapas y el dado que la aprisionan para comenzar a moverse hacia la abertura del propio dado. Existe un momento en que la fricción estática domina el proceso, sin embargo, en el instante en que el metal comienza a desplazarse la fricción dinámica es la única presente. Por ello, parte del éxito del proceso depende en gran medida de la correcta aplicación de las fuerzas de sujeción y de las fuerzas asociadas con la fricción entre las interfaces de la prensa chapas-lámina y de la lámina-dado, como consecuencia, este proceso de conformado demanda la aplicación de lubricantes adecuados para disminuir tales fricciones. (Groover, 2012)

Además de la fricción, se presenta un fenómeno asociado al instante en el que el material comienza a desplazarse por el claro. En la parte llamada de las pestañas (chapa), que es una zona exterior a la forma, existe una compresión. Esta compresión aparece en el momento en el que el metal se estira hacia el centro ocasionando que el perímetro exterior se haga menor, como el volumen del material a embutir permanece constante el metal se comprime y se hace más grueso al reducirse el perímetro. En buena cantidad de ocasiones el fenómeno anterior ocasiona que la chapa remanente se

arrugue, particularmente cuando la fuerza de sujeción es baja. Se aprecia pues, que la fuerza de sujeción es uno de los parámetros claves del proceso ya que una mala elección de ella puede ocasionar, en el caso de ser muy pequeña, pliegues, si es muy grande puede ocurrir que el metal no fluya como es debido y se presenten desgarramientos y estiramientos indeseables. (Groover, 2012)

Los factores más importantes que condicionan la calidad de las embuticiones vienen determinados por:

1. Las características del material (propiedades, tamaño del grano, acritud, coeficiente de anisotropía)
2. Variaciones en espesor del material
3. Tipo de embutición (simple efecto, doble o triple efecto)
4. Tamaño de la embutición (profundidad, velocidad, lubricación)
5. Grado de reducciones o cantidad de pasos (una embutición, dos embuticiones, varias embuticiones)
6. Geometría de la embutición (cilíndrica, cuadrada, irregular)
7. Calidad superficial de las herramientas (acabados, radios)
8. Juego de embutido
9. Uso de lubricación

La embutición en frío se lo realiza a la temperatura ambiente y la embutición en caliente se calienta a temperaturas de forja. Es factible utilizar la embutición en caliente cuando:

- El metal o la aleación no se pueden conformar en frío.
- La embutición en frío requiere una fuerza superior a la capacidad de la prensa disponible debido al espesor y a las características de la superficie de la chapa.

3.2 Tipos de embutido

Existen piezas cuya geometría final requiere de más de un paso de embutido. Podemos citar varios tipos de embutido como:

- Reembutido
- Embutido Inverso
- Embutido de formas

- **Reembutido.-** Si el cambio de forma que requiere el diseño de la pieza es demasiado severo (relación de embutido demasiado alta), el formado completo puede requerir más de un paso de embutido. Al segundo paso de embutido y a cualquier otro posterior, si se necesita, se le llama reembutido. (Groover, 2012)
- **Embutido Inverso.-** En esta operación en el cual se coloca una pieza embutida hacia abajo en el troquel y una segunda operación de embutido produce una configuración. Aunque puede parecer que el embutido inverso podría producir una deformación más severa que el reembutido, en realidad es más fácil en el metal. La razón es que en el embutido inverso la lámina de metal se dobla en la misma dirección en las esquinas interior y exteriores de la matriz, mientras que en el reembutido el metal se dobla en direcciones opuestas en las dos esquinas. Debido a esta diferencia, el metal experimenta menos endurecimiento por deformación en el embutido inverso y, por tanto la fuerza de embutido es menor. (Groover, 2012)
- **Embutido de formas o cilíndricas.-** Muchos productos requieren el embutido de forma no cilíndrica. La variedad de formas embutidas incluyen formas cuadradas, cajas rectangulares (lavabos), copas escalonadas, conos, copas con bases esféricas más bien que planas y formas curvas irregulares como en los paneles de las carrocerías de los automóviles. Cada una de estas formas representa un problema técnico único en embutido (Groover, 2012)

3.3 Normas ASTM E 643-84 para el ensayo del proceso de embutido

La norma ASTM 643-84 presenta las siguientes exigencias hacia el ensayo de embutido:

- Aplicar un mínimo de fuerza de 9800 N.
- La magnitud de la fuerza de sujeción debe ser suficiente para no permitir flujo de metal de la probeta hacia el área de ensayo.
- Debe poseer un dispositivo para la medición de la copa formada por el punzón.
- El desplazamiento (altura de copa) debe poderse medir con una precisión de $\pm 0.05\text{mm}$.

- El penetrador debe ser suficientemente rígido, no se debe deformar, ni girar, ni moverse lateralmente durante el ensayo. Su cabeza debe ser esférica.
- El penetrador debe moverse en dirección axial perpendicular a la superficie de la probeta.
- La superficie del penetrador debe estar pulida y tener una dureza de al menos 62 HRC.

Probetas:

- Deben ensayarse al menos 3 probetas.
- Las probetas pueden ser rectangulares o circulares, su diámetro o anchura mínimo es de 90 mm.

3.4 Herramental del proceso de embutido

En la figura 12, se puede observar las herramientas necesarias para el proceso de embutición, donde:

- M: matriz
- P: punzón,
- C: guías cilíndricas
- E: expulsor o botador
- SF: prensa chapas

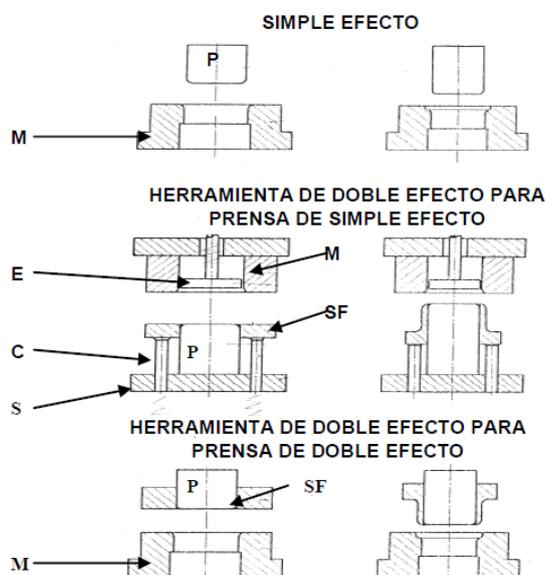


Figura 12. Herramental de embutición

Fuente: (Groover M. , 2007)

Las herramientas de embutición pueden clasificarse según:

- La forma de trabajo y la prensa utilizada: Herramienta de simple efecto para prensa de doble efecto y herramienta de doble efecto para prensa de simple efecto.
- La operación a realizar: Herramienta para primer paso y herramientas para pasos siguientes.

a. Punzón

Los materiales empleados para punzones, dados y sujetadores para embutido de placa metálica dependen de la composición de la misma, de su tamaño, capacidad de embutido, cantidad de las piezas a embutir, tolerancias y acabados superficiales. (Guzmán, 2010)

Para las embuticiones de pequeñas dimensiones. Los punzones se construyen de una sola pieza. Para las de dimensiones medianas o grandes, de dos piezas. Una placa desmontable de acero duro templado va fijada con tornillos y pasadores al porta-punzón de acero semiduro. Las superficies de contacto deben estar bien pulidas con los radios correspondientes. Los agujeros, los torillos y los sujetadores no deberán alcanzar las superficies de deslizamiento. (Villamar, 2008)

Las partes superiores de los punzones, para piezas a ejecutar en varias etapas serán achaflanadas a 38° y 40°. Este chaflán permite repartir la presión del sujetador sobre una superficie y no sobre una línea, como ocurriría en un redondeado. (Villamar, 2008)

b. Matriz

La construcción es análoga a los punzones, las partes que trabajan deben estar bien pulidas y ha de verificarse bien el valor de los radios. En caso de una embutición de simple efecto, una inclinación de 60° da mejores resultados que un radio sencillo. (Villamar, 2008)

c. Prensa chapas

El prensa chapas se construye de acero duro templado o bien de fundición. Por razones de deformación pueden estudiarse piezas desmontables, pero en este caso hay que cuidar especialmente las uniones. (Villamar, 2008)

d. Botador

Es de acero semiduro o duro, se emplee sólo para expulsar o también para formar el fondo del embutido. (Villamar, 2008)

e. Guías cilíndricas

Las guías cilíndricas son de acero semi-duro, sirven para transmitir el esfuerzo del colchón al sujetador. (Villamar, 2008)

3.5 Parámetros del proceso de embutido

3.5.1 Parámetros de embutición

El diámetro del punzón se determina en función al diámetro del disco con la siguiente fórmula:

$$D_p = 0.6 D_b$$

Una medida de la severidad de una operación de embutido profundo es la relación de embutido DR. Esta se define más fácilmente para una forma cilíndrica como la relación entre el diámetro de la forma inicial D_b y diámetro del punzón D_p . En forma de ecuación: (Groover, 2012)

$$DR = \frac{D_b}{D_p}$$

Dónde:

D_b = diámetro del disco a embutir.

D_p = diámetro del punzón.

DR = relación límite de embutido.

La relación de embutido proporciona un indicativo, aunque crudo, de la severidad de una determinada operación de embutido. A mayor relación, mayor severidad de la operación un límite superior aproximado de la relación de embutido es un valor de 2.0. El valor límite real para una operación depende del radio de las esquinas en el punzón y la matriz (R_p y R_d), de las condiciones de fricción, de la profundidad de embutido y de las características de la lámina de metal. (Groover, 2012)

Cuando $DR=2$ es un valor límite superior para embutido con prensa chapas. Aunque en ocasiones se pueden llegar a valores mayores. Con $DR<1.2$ es para embutido sin pisador.

Otra forma de caracterizar una operación dada de embutido es por la reducción r , donde:

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b}$$

- Si $r < 0,4$ la embutición cilíndrica puede hacerse en una sola fase y sin pisador.
- Si $r > 0,4$ la embutición cilíndrica puede hacerse en una sola fase, pero con pisador.
- Si $r > 0,6$ la embutición debe hacerse con pisador y en varias fases

Está vinculada muy estrechamente con la relación de embutido. Consiste con el límite previo de DR ($DR \leq 2.0$), el valor de la reducción r debe ser menor que 0.50. (Groover, 2012)

Una tercera medida en el embutido profundo es la relación de espesor al diámetro t/D_b (espesor de la forma inicial t dividido entre el diámetro de la forma D_b), cuyo valor en porcentaje es recomendable que sea mayor que 1%. Conforme decrece t/D_b , aumenta la tendencia al arrugamiento. En los casos en que el diseño de la pieza embutida exceda los límites de la relación de embutido DR, la reducción r y la relación t/D_b , la forma debe ser embutida en dos o más pasos algunas veces con recocido entre los pasos. (Groover, 2012)

3.5.2 Fuerzas de embutido

Las fuerzas que intervienen en el proceso son fundamentalmente dos, la fuerza del punzón y la fuerza de sujeción. (ver figura 13)

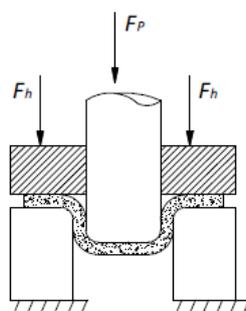


Figura 13. Fuerzas básicas involucradas en el embutido.

Fuente: (Groover M. P., 2012)

La fuerza total de embutido puede expresarse como:

$$F_T = F_p + F_h$$

Dónde:

F_T = Fuerza total.

F_p = Fuerza del punzón.

F_h = Fuerza de sujeción.

La fuerza que requiere el punzón para producir la copa es la suma de la fuerza ideal de deformación, fuerzas de fricción. La figura 14 ilustra la manera en que los componentes de la fuerza total del punzón varían con el movimiento del mismo. (Groover, 2012)

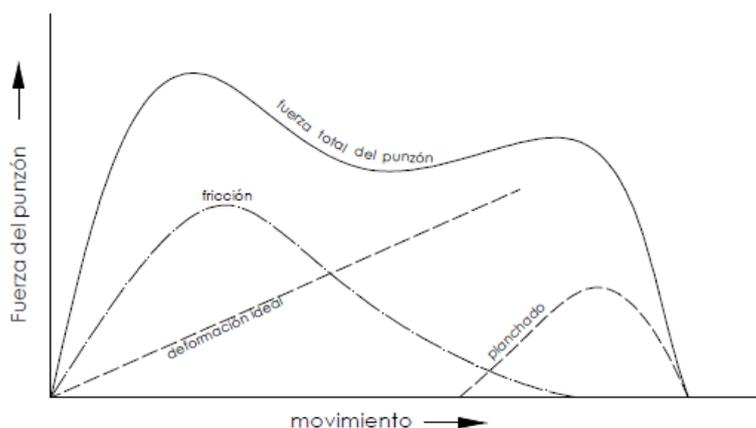


Figura 14. Fuerza del punzón vs movimiento del punzón en embutido profundo.

Fuente: (Dieter, 1970)

Haciendo un análisis de las fuerzas en equilibrio durante el embutido profundo de una forma acopada, se tiene la siguiente ecuación aproximada para la fuerza total del punzón, que depende del diámetro del disco a embutir D_b para cualquier instante en el proceso. (Groover, 2012)

$$F_p = \left[\pi D_p t (1.1 \sigma_0) \ln \frac{D_b}{D_p} + \mu \left(2 F_h \frac{D_p}{D_0} \right) e^{\left(\frac{\mu \pi}{2} \right)} + B \right]$$

Dónde:

F_p = fuerza del punzón.

D_p = diámetro del punzón.

σ_0 = promedio del flujo de esfuerzos.

D_b = diámetro del disco a embutir.

F_h = fuerza de sujeción.

t = espesor del material

B = fuerza para doblar y desdoblar el disco a embutir.

μ = coeficiente de fricción.

Una ecuación bastante empleada y que la literatura marca como muy aproximada a la fuerza de embutido:

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

Donde:

TS = esfuerzo de tensión.

F_p = fuerza del pistón.

D_b = diámetro inicial

D_p = Diámetro del punzón

t = Espesor del material

El término de 0.7 se considera un factor de ajuste por fricción, su origen se basa en que la relación límite de embutido puede aproximarse de la siguiente manera: (Groover M. P., 2012)

$$RLE = \left(\frac{D_b}{D_p} \right)_{max} = e^\eta$$

Donde, η es un término de eficiencia asociado a las pérdidas por fricción. Si $e^\eta = 1$, entonces la relación de embutido es 2.7, mientras que si establecemos el límite de la RLE en el valor de 2.0, $\eta = 0.7$. Esto de acuerdo a la experiencia que demuestra que incluso con metales dúctiles, es complicado obtener formas acopadas en donde la altura es mucho mayor que su diámetro. (Groover M. P., 2012)

La fuerza de sujeción también tiene asignada una ecuación que permite aproximar su valor a una cantidad necesaria para que la operación de embutido se lleve a cabo con éxito evitando errores en las piezas finales cuyo origen se debe a un ajuste deficiente en dicha fuerza, tales defectos se

manifiestan en forma de pliegues o arrugamientos, desgarres etc. La fuerza de sujeción se puede calcular de la siguiente manera: (Groover M. P., 2012)

$$F_h = 0.015Y\pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right]$$

Donde:

F_h= Fuerza de Sujeción

Y = Esfuerzo de fluencia.

t= Espesor inicial del material

R_d= Radio de la esquina del dado

La fuerza de sujeción es alrededor de una tercera parte de la fuerza de embutido:

$$F_h = \left(\frac{1}{3} \right) F_p$$

3.5.3 Tolerancia entre punzón y matriz (c)

La elección del juego o tolerancia entre punzón y matriz depende de los requerimientos de la pieza que debe embutirse y del metal que la constituye. Debido a que existe una disminución y después un gradual incremento del espesor del metal a medida que se lo embute sobre el radio de la matriz, el juego por lado se toma de 7 a 12% más que el espesor de la chapa (1,07 a 1,15t) para prevenir el bruñido de la pared lateral y la rotura del fondo de la cápsula. (Oehler, 1977) (ver tabla 14)

Tabla 14.

Tolerancias entre punzón y matriz

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

Fuente: (Oehler, 1977)

3.5.4 Radio del punzón y de la matriz

Un aspecto fundamental a tener en cuenta en el dimensionamiento del punzón es la arista de este, ya que si se hace un radio R muy grande en la matriz, a poco que la pieza sea embutida, la acción del prensa chapas será nula y se producirán ondulaciones y arrugas en el disco; y si el redondeo es demasiado pequeño este puede cortar el material. (Abascal-Escribano, 2014)

a. Radio de la matriz "R"

Teniendo en cuenta el espesor de material también se puede adoptar los siguientes valores:

$$t < 1\text{mm} \quad R = 6 \text{ a } 8 \cdot t$$

$$1 < t < 3\text{mm} \quad R = 4 \text{ a } 6 \cdot t$$

$$3 < t < 4\text{mm} \quad R = 2 \text{ a } 4 \cdot t$$

En casos especiales de embuticiones poco profundas, nos podemos encontrar que si damos al radio el valor hallado, el sujetador perderá rápidamente su eficacia y podrán aparecer arrugas o roturas en la pieza. En este caso, se puede intentar disminuir ligeramente el valor del radio hallado o bien buscar otras alternativas, como reducir la velocidad de embutición, cambiar de material, modificar la pieza, etc. (Abascal-Escribano, 2014)

En la figura 15 se muestra un diagrama para determinar el radio que debe hacerse en la boca de la matriz, para conseguir una embutición suave, sin roturas ni arrugas.

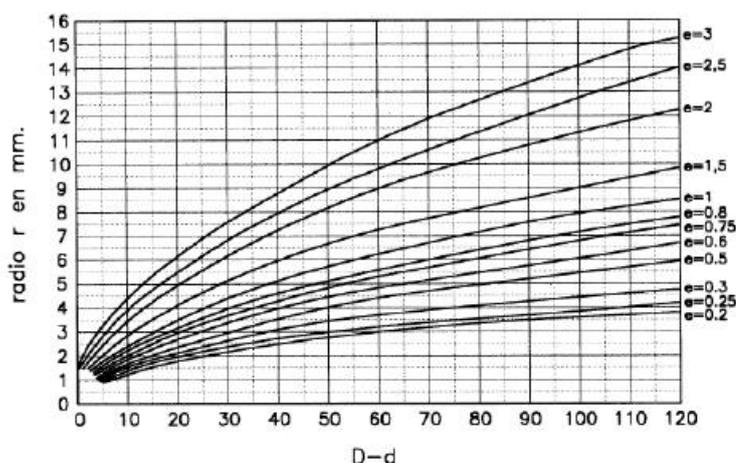


Figura 15. Gráfica para el cálculo del radio de la matriz

Fuente: (Abascal-Escribano, 2014)

b. Radio del punzón "r"

La experiencia ha marcado una relación entre los radios de la matriz y del punzón. El radio del punzón r debe adaptarse progresivamente a la forma del recipiente embutido, pero en todo caso no es prudente que el valor sea menor al espesor de la chapa. Experimentalmente se ha hallado que por lo general: (Abascal-Escribano, 2014)

$$3t \leq r \leq 5t$$

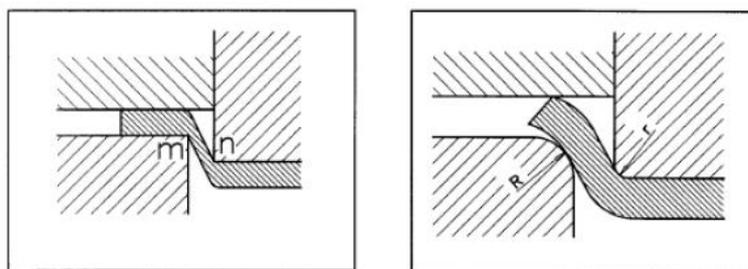


Figura 16. Problemas de la chapa por radios inadecuados

Fuente: (Abascal-Escribano, 2014)

Bajo ningún concepto, el redondeado de la arista del punzón puede ser extremadamente pequeño o muy diferente al de la matriz provocaría la rotura del material o lo cortaría como si se tratara de una cizalladura.

3.5.5 Altura de embutición

Con matrices de embutir normales (sin pisador de chapa), solamente se pueden embutir piezas que tengan poca profundidad, es decir, con una pequeña relación de embutición $D - d = < 20 \cdot t$; como por ejemplo botes de crema para los zapatos y sus tapas, que se obtienen en prensas alternativas partiendo de chapas que llevan ya un dibujo y un texto impresos. La altura de pared lateral h que puede conseguirse sin prensa chapas está en función del espesor de la chapa t y del diámetro de embutición d , y cumple con la siguiente igualdad empírica: (Abascal-Escribano, 2014)

$$h \leq 0.3 \sqrt[3]{d^2} \cdot \sqrt{5}$$

Para embutición en varias etapas con prensa chapas se determina de la siguiente manera. (ver figura 17)

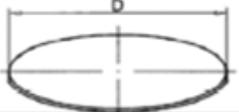
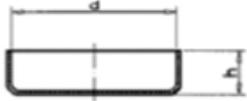
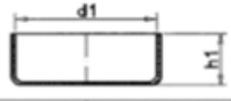
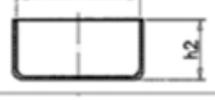
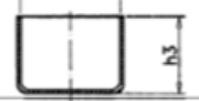
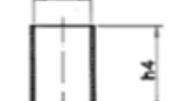
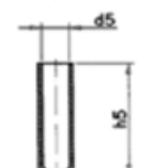
| FASE N° | PASOS FORMA CILÍNDRICA | DIMENSIONES DEL VASO | |
|--------------|---|------------------------|-----------------|
| | | DIÁMETRO | ALTURA |
| CORTAR DISCO |  | $D = \sqrt{d^2 + 4dh}$ | |
| 1ª |  | $d = 0,6 D$ | $h = 0,266 D$ |
| 2ª |  | $d_1 = 0,48 D$ | $h_1 = 0,401 D$ |
| 3ª |  | $d_2 = 0,384 D$ | $h_2 = 0,555 D$ |
| 4ª |  | $d_3 = 0,307 D$ | $h_3 = 0,737 D$ |
| 5ª |  | $d_4 = 0,245 D$ | $h_4 = 0,959 D$ |
| 6ª |  | $d_5 = 0,196 D$ | $h_5 = 1,225 D$ |

Figura 17. Fórmulas para el cálculo del número de embuticiones

Fuente: (Abascal-Escribano, 2014)

3.5.6 Velocidad de embutición

Por velocidad de embutición (mm/s) se entiende la velocidad que tiene el carro de la prensa en el momento de entrar el punzón en contacto con el material, es decir, cuando empieza la operación de embutición. (Abascal-Escribano, 2014)

En formas difíciles, especialmente no cilíndricas, una disminución notable de la velocidad puede evitar la debilidad del material en los puntos críticos y eliminar el peligro de formación de resquebrajaduras. Por lo que una velocidad óptima se puede determinar con la siguiente fórmula: (Abascal-Escribano, 2014)

$$v = 1 + \frac{d}{D} \sqrt{D + d} \quad \left(\frac{mm}{s}\right)$$

3.5.7 Lubricación

La lubricación de los blancos y piezas a ser embutidos tienen un doble propósito:

1. Proteger la pieza contra rozamiento, lo que origina rayaduras y grietas.
2. Proteger el útil del embutido para así aumentar su vida.

La lubricación es esencial en esta operación y el orden de eficacia de mejor a peor, de las diferentes formas de lubricar es el siguiente: (Abascal-Escribano, 2014)

- Lubricación de la plancha sólo por el lado de la matriz.
- Lubricación de los dos lados de la plancha procurando no lubricar la parte correspondiente a la base del punzón.
- Ninguna lubricación.
- Lubricación de la plancha en toda la superficie sólo por el lado del punzón.

Otro factor importante en el proceso de embutición, es el factor de fricción, se han definido distintos rangos en función al proceso que se va a realizar y al material a utilizar, como se lo puede observar en la figura 18.

| Material de la pieza de trabajo | Trabajo | Forjado | | Lubricante para extrusión † | Estirado de alambre | | Laminado | | Trabajo de lámina de metálica | |
|-----------------------------------|------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------|-------------|-------------------------------|----------|
| | | Lubricante | μ | | Lubricante | μ | Lubricante | μ | Lubricante | μ |
| Aleaciones de Sn, Pb, Zn | | FO-MO | 0.05 | FO o jabón | FO | 0.05 | FA-MO o MO-EM | 0.05 | FO-MO | 0.05 |
| Aleaciones de Mg | Caliente o tibio | GR y/o MoS ₂ | 0.1-0.2 | Ninguno | | | MO-FA-EM | 0.2 | GR en MO o jabón seco | 0.1-0.2 |
| Aleaciones de Al | Caliente | GR o MoS ₂ | 0.1-0.2 | Ninguno | | | MO-FA-EM | 0.2 | | |
| | Frío | FA-MO o jabón seco | 0.1 | Lanolina o jabón sobre PH | FA-MO-EM, FA-MO | 0.1 0.03 | 1-5% FA en MO(1-3) | 0.03 | FO, lanolina, o FA-MO-EM | 0.05-0.1 |
| Aleaciones de Cu | Caliente | GR | 0.1-0.2 | Ninguno (o GR) | | | MO-EM | 0.2 | | |
| | Frío | Jabón seco, cera o sebo | 0.1 | Jabón seco, cera o sebo | FO-jabón-EM, MO | 0.1 0.03 | MO-EM | 0.1 | FO-jabón-EM o FO-jabón | 0.05-0.1 |
| Aceros | Caliente | GR | 0.1-0.2 | GL (100-300), GR | | | Ninguno o GR-EM | ST ‡ 0.2 | GR | 0.2 |
| | Frío | EP-MO o jabón sobre PH | 0.1 0.05 | Jabón sobre PH | Jabón seco o jabón sobre PH | 0.05 0.03 | 10% FO-EM | 0.05 | EP-MO, EM, jabón, o polímero | 0.05-0.1 |
| Acero inoxidable, Ni y aleaciones | Caliente | GR | 0.1-0.2 | GL (100-300) | | | Ninguno | ST ‡ | GR | 0.2 |
| | Frío | CL-MO o jabón sobre PH | 0.1 0.05 | CL-MO o jabón sobre PH | Jabón sobre PH o CL-MO | 0.03 0.05 | FO-CL-EM o CL-MO | 0.1 0.05 | CL-MO, jabón, o polímero | 0.1 |
| Aleaciones de Ti | Caliente | GL o GR | 0.2 | GL (100-300) | | | | | GR, GL, | 0.2 |
| | Frío | Jabón o MO | 0.1 | Jabón sobre PH | Polímero | 0.1 | MO | 0.1 | Jabón, o polímero | 0.1 |

Figura 18. Lubricantes comunes y coeficientes de fricción en la deformación plástica

Fuente: (Schey, 1983)

3.6 Defectos en el embutido

Las bondades del proceso son extensas ya que permite el formado de placa metálica de manera rápida y con costos relativamente bajos. Las prensas y equipo necesario son de larga vida por lo que únicamente se requiere de una inversión inicial para echar andar este proceso. (Groover, 2012)

El embutido es una operación que tiene más variantes que otros procesos de trabajo en lámina metálica como el doblado y el cizallado, razón por la cual los defectos son mayores (ver figura 19). (Groover, 2012)

Los defectos del embutido más comunes son los siguientes:

- Arrugamiento en la brida o pestaña.
- Arrugamiento en la pared
- Desgarramiento
- Orejeado
- Rayados superficiales
- **Arrugamiento en la brida o pestaña.-** El arrugamiento en una pieza embutida consiste en una serie de pliegues que se forman radialmente en la brida no embutida de la pieza de trabajo, debido al pandeo por compresión. Una correcta fuerza de sujeción entre el sujetador y el dado pueden reducir estos defectos en gran porcentaje así como el uso correcto de un lubricante. (Groover, 2012)
- **Arrugamiento en la pared.-** Si la brida arrugada se embute en el cilindro, estos pliegues aparecen en la pared vertical del cilindro.
- **Desgarramiento.-** Este defecto es una grieta que se abre en la pared vertical, usualmente cerca de la base de la copa embutida, debido a altos esfuerzos a la tensión que causan adelgazamiento y rotura del metal en esta región. Este tipo de falla puede también ocurrir cuando el metal se estira sobre una esquina afilada de la matriz. (Groover, 2012)
- **Orejeado.-** El orejeado es un defecto atribuible a la anisotropía del material. Las irregularidades que se forman en la parte superior de la pieza se pueden eliminar en el caso de tener un material isotrópico. En cuanto al desgarrado, éste normalmente se manifiesta como una grieta formada en las paredes de la pieza en las cercanías de la base embutida. El

desgarrado es propio del adelgazamiento no controlado de la lámina debido a los efectos de la tensión y a defectos del punzón como pueden ser partes afiladas. (Groover, 2012)

- **Rayados Superficiales.**- El rayado superficial ocurre cuando el punzón y la matriz no son lisos o si la lubricación es insuficiente.

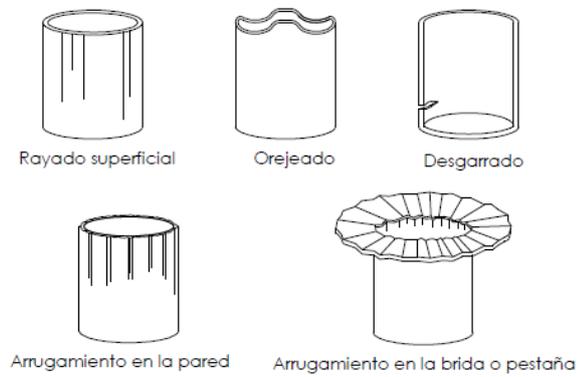


Figura 19. Defectos del Embutido

Fuente: (Groover M. , 2007)

CAPÍTULO IV

EQUIPOS DE ENSAYO DE EMBUTICIÓN

4.1 Equipos de embutición

Las máquinas utilizadas para las operaciones de trabajo en frío y algunos casos en caliente, se conoce como prensa.

La prensa es una máquina herramienta cuya característica es la entrega de grandes cantidades de energía (fuerza x recorrido) de forma controlada. (Lobecor, 2016)

La prensa es una máquina herramienta que tiene como finalidad lograr la deformación permanente o incluso cortar un determinado material, mediante la aplicación de una carga. Son empleadas prácticamente en todas las industrias, y utilizadas para actuar sobre distintos materiales ya sea en frío o en caliente, en cualquier operación que se requiera una fuerte presión, por ejemplo: forjar, estampar, extruir, laminar, etc.

Una prensa debe estar equipada con matrices y punzones diseñados para ciertas operaciones específicas. La mayoría de operaciones de Formado, Doblado, Punzonado, Embutido y Cizallado, se pueden efectuar en cualquier prensa normal si se usan matrices y punzones adecuados. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

La gran variedad de prensas permite diferentes sistemas de clasificación, Atendiendo a la forma de entregar energía las prensas pueden ser mecánicas o hidráulicas. (Lobecor, 2016) (ver tabla 15)

Tabla 15.

Tipos de prensa

| Tipos | Aplicación |
|-------------------|--|
| Prensa mecánica | <ul style="list-style-type: none"> • Corte • Estampación • Forja • Embuticiones pequeñas |
| Prensa hidráulica | <ul style="list-style-type: none"> • Embutición profunda • Procesos de altas sollicitaciones como acuñado |

4.1.1 Prensa hidráulica

Las prensas hidráulicas consisten, normalmente en un marco de carga de 2 a 4 columnas, pistones, cilindros, arietes y bombas hidráulicas impulsadas por motores eléctricos. Se puede variar la velocidad del ariete durante la carrera, las capacidades de prensado llegan hasta 450MN (50000 toneladas), para el conformado. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Una prensa hidráulica se detiene si la carga requerida excede su capacidad. Se pueden transmitir grandes cantidades de energía a una pieza de trabajo por medio de una carga constante a través de un recorrido, cuya velocidad se puede controlar. En comparación con las prensas mecánicas, las prensas hidráulicas son más lentas y tienen costos iniciales más altos, pero requieren menor mantenimiento. Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008) (Ver Figura 20)

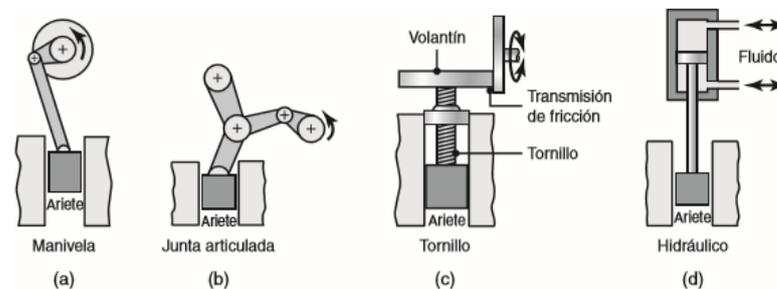


Figura 20. Esquema de los principios de diversas máquinas de forjado.

(a) Prensa mecánica con accionamiento excéntrico. (b) Prensa de junta articulada. (c) Prensa de tornillo. (d) Prensa hidráulica

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

4.2. Requerimientos del equipo de embutición

La prensa tiene las siguientes características:

Cilindro hidráulico

- Diámetro del pistón: 80 mm
- Diámetro del vástago: 35 mm
- Velocidad máxima (salida del pistón): 10 mm/s
- Recorrido: 170 mm

Motor WEG Steel motor monofásico

- Potencia: 0.5 HP

- Frecuencia; 60Hz
- Amperaje: 8.40/4.20 amperes
- Revoluciones por minuto: 1720 rpm
- Voltaje: 110/220 v

Bomba GP1-0013

- Cilindrada: 1.3 cm³/vuelta
- Caudal: 2 lt/min
- Presión máxima: 220 bars
- Velocidad de rotación: 1500 rpm

4.3. Cálculo de la fuerza de la Prensa Hidráulica

La presión máxima que alcanza la máquina es de 3000 psi. Para determinar la fuerza de la prensa se utilizará la presión de trabajo que es de 2500 psi.

$$P_s = 2500 \text{ psi} \left(175.73 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}\right);$$

$$A = 50.26 \text{ cm}^2$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = P * A$$

$$F = 175.73 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} * 50.26 \text{ cm}^2$$

$$F = 8832.18 \text{ Kg} = \mathbf{8.83Ton}$$

4.4 Diseño del sistema herramental

4.4.1 Materiales para los componentes

Para construir el punzón, la matriz, el prensa chapas y el botador utilizaremos acero SAE 1045. Para las guías, pernos y demás implementos mecánicos se utilizará SAE 1040.

4.4.2 Parámetros de embutición

Para realizar una embutición satisfactoria es necesario conocer los requerimientos que el usuario desea para el funcionamiento del equipo, los que se mencionan a continuación:

- El equipo de embutición se lo implementará en la prensa hidráulica del laboratorio del Departamento de Energía y Mecánica.

- Realizar el embutido de aleaciones de aluminio 3003 que tiene una resistencia a la tensión de 11.27 Kg/mm² y un límite de fluencia de 4.22 Kg/mm².
- Realizar el embutido de aleaciones de cobre C24000 que tiene una resistencia a la tensión de 26.07 Kg/mm² y un límite de fluencia de 7.05 Kg/mm².
- Embutir discos de 80 mm de diámetros con espesor de 1 mm.
- Diseñado para una carga mínima de 37000N.
- Disponer de un equipo de medición con una apreciación de ±0.05 mm.
- Tener un desplazamiento mínimo de 30 mm.

a. Diseño de Punzón

Para determinar el diámetro del punzón, se tomará en cuenta la fuerza requerida para embutición, la misma que no debe ser superior a la de la máquina.

Tabla 16.

Diámetros de punzón y disco para la prensa.

| Diámetro requerido punzón (mm) | Diámetro del disco (mm) | Altura calculada (mm) | Fuerza punzón (kg) aleación de aluminio 3003 | Fuerza prensa chapas (kg) aleación de aluminio 3003 | Fuerza punzón (kg) aleación de cobre c24000 | Fuerza prensa chapas (kg) aleación de cobre C24000 |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|--|---|---|--|
| 36 | 60 | 16,0 | 1232,1 | 326,0 | 2850,2 | 546,6 |
| 42 | 70 | 18,6 | 1437,5 | 471,2 | 3325,2 | 790,1 |
| 48 | 80 | 21,3 | 1642,8 | 641,8 | 3800,2 | 1076,2 |
| 54 | 90 | 23,9 | 1848,2 | 837,8 | 4275,3 | 1404,7 |
| 60 | 100 | 26,6 | 2053,5 | 1059,1 | 4750,3 | 1775,8 |
| 66 | 110 | 29,3 | 2258,9 | 1305,7 | 5225,3 | 2189,3 |
| 72 | 120 | 31,9 | 2464,2 | 1577,7 | 5700,3 | 2645,4 |
| 78 | 130 | 34,6 | 2669,6 | 1875,0 | 6175,4 | 3143,9 |
| 84 | 140 | 37,2 | 2875,0 | 2197,6 | 6650,4 | 3684,9 |
| 90 | 150 | 39,9 | 3080,3 | 2545,6 | 7125,4 | 4268,4 |
| 96 | 160 | 42,6 | 3285,7 | 2919,0 | 7600,5 | 4894,5 |
| 102 | 170 | 45,2 | 3491,0 | 3317,7 | 8075,5 | 5563,0 |
| 108 | 180 | 47,9 | 3696,4 | 3741,7 | 8550,5 | 6274,0 |

Para la selección del diámetro del disco se tomará en cuenta que se deben realizar ensayos de embutición en frío y caliente. El horno para calentar la chapa tiene un espacio interior de 85 mm, razón por la cual se seleccionó un diámetro de disco de 80 mm para los dos materiales a embutir.

$$D_b = 80 \text{ mm}$$

$$D_p = 48 \text{ mm}$$

Los demás parámetros se determinan de la siguiente manera:

$$DR = \frac{D_b}{D_p} = \frac{80}{48} = 1.6$$

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} = \frac{80 - 48}{80} = 0.4 \rightarrow 40\%$$

$$\frac{t}{D_b} = \frac{1}{80} = 0.0125 \rightarrow 1.2\%$$

De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que, el ensayo de embutido es factible ya que la relación de embutido es menor a 2, la reducción es menor del 50% y la relación espesor diámetro es mayor al 1%, los cuales son los lineamientos generales para indicar la factibilidad técnica.

Como r es 0,4 la embutición cilíndrica puede hacerse en una sola fase, pero con prensa chapas.

4.4.3 Fuerzas de embutido

a. Fuerza del Punzón

Se calcula la fuerza del punzón de la siguiente manera:

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

La aleación de aluminio tiene un $TS = 11.27 \text{ Kg/mm}^2$

$$F_p = D_p t (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right)$$

$$F_p = \pi(48)(1)(11.27) \left(\frac{80}{48} - 0.7 \right)$$

$$F_p = 1642.48 \text{ Kg}$$

La aleación de cobre tiene un $TS = 26.07 \text{ Kg/mm}^2$

$$F_p = \pi D_p h (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right)$$

$$F_p = \pi(48)(1)(26.07) \left(\frac{80}{48} - 0.7 \right)$$

$$F_p = 3800.2 \text{ Kg}$$

b. Fuerza de Sujeción

La Fuerza de sujeción se determina de la siguiente manera:

$$F_h = 0.015Y\pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right]$$

La aleación de aluminio tiene un $Y = 4.22 \text{ Kg/mm}^2$

$$F_h = 0.015Y\pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right]$$

$$F_h = 0.015(4.22)(\pi)[80^2 - (48 + 2.2(1) + 2(3))^2]$$

$$F_h = 0.1988(3241.56)$$

$$F_h = 644.42 \text{ Kg.}$$

La aleación de cobre tiene un $Y = 7.05 \text{ Kg/mm}^2$

$$F_h = 0.015Y\pi \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right]$$

$$F_h = 0.015(7.05)(\pi)[80^2 - (48 + 2.2(1) + 2(3))^2]$$

$$F_h = 0.3322(3241.56)$$

$$F_h = 1076.84 \text{ Kg.}$$

4.4.4 Tolerancia entre punzón y matriz

La tolerancia entre punzón y matriz se determina en función a la tabla 15. Ya que el espesor de la chapa es de 1 mm para embutido la tolerancia esta entre 1.08 a 1.10 t.

$$c = 1.1 * t$$

$$c = 1.1 * 1$$

$$c = 1.1 \text{ mm}$$

4.4.5 Radio del punzón y de la matriz

a. Radio de la matriz "R"

Si el espesor de material es 1 mm, se determina que:

$$1 < t < 3\text{mm}$$

$$R = 4 \text{ a } 6 * t$$

$$R = 4 * t$$

$$R = 4 * 1$$

$$R = 4 \text{ mm}$$

b. Radio del punzón "r"

Para el cálculo del radio del punzón se utiliza la fórmula detallada anteriormente:

$$3t \leq r \leq 5t$$

$$r = 3 * t$$

$$r = 3 * t$$

$$r = 3 \text{ mm}$$

4.4.6 Altura de embutición

Ya que la embutición se lo va a realizar en una sola pasada y con prensa chapas la altura queda determinada de la siguiente manera:

$$h = 0.266 * D$$

$$h = 0.266 * 80 \text{ mm}$$

$$h = 21.28 \text{ mm}$$

4.4.7 Velocidad de embutición

Para el proceso de embutición se determina la siguiente velocidad:

$$v = 1 + \frac{d}{D} \sqrt{D + d} \quad \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right)$$

$$v = 1 + \frac{48}{80} \sqrt{80 + 48}$$

$$v = 7.78 \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right)$$

4.5 Implementación del herramental en el equipo

El bastidor de la prensa hidráulica deber soportar la fuerza del sistema hidráulico y servir de base para los elementos necesarios para el proceso de embutición. (ver figura 21)

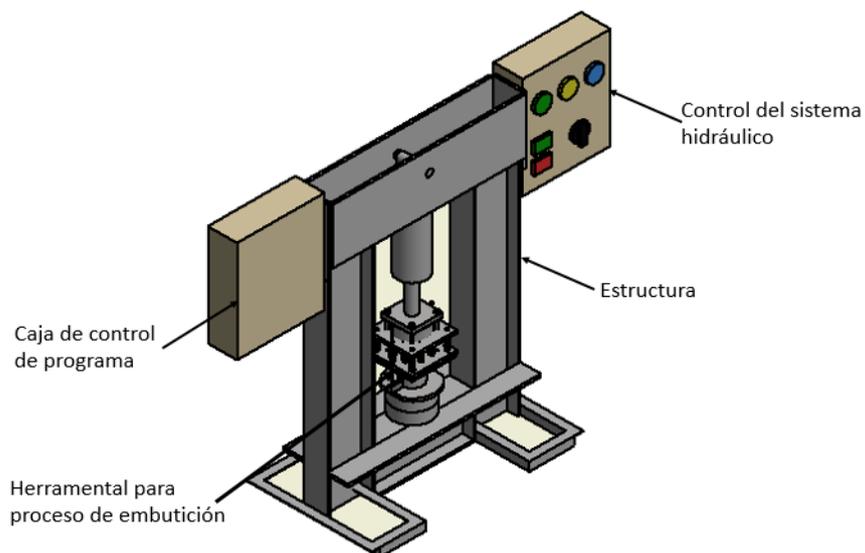


Figura 21. Esquema del bastidor con los elementos

4.5.1 Construcción de la matriz y punzón

Para la construcción de la matriz (ver figura 22) y del punzón (ver figura 23), se utilizan los procesos de arranque de viruta: estos son torno, fresado y taladrado. El material utilizado para su construcción es un acero SAE 1045.

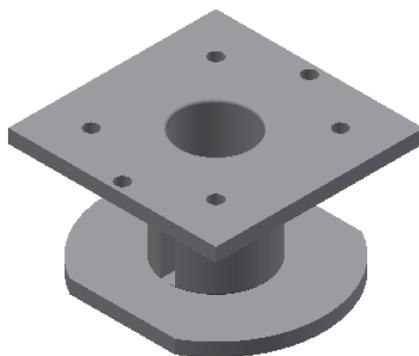


Figura 22. Matriz para embutición

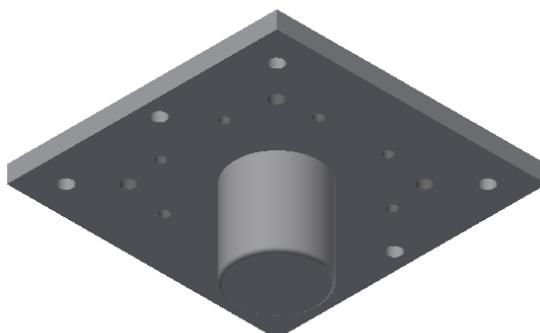


Figura 23. Punzón para embutición

4.5.2 Construcción del prensa chapas

El prensa chapas para el proceso puede ser de tipo fijo plano (ver figura 24) y permite fácilmente el deslizamiento de la chapa impidiendo la aparición de defectos. También se puede colocar como prensa chapas de presión (ver figura 25) por medio de los resortes colocados sobre este y se emplean cuando se quieren obtener espesores de pared más finos que el espesor de la chapa inicial.

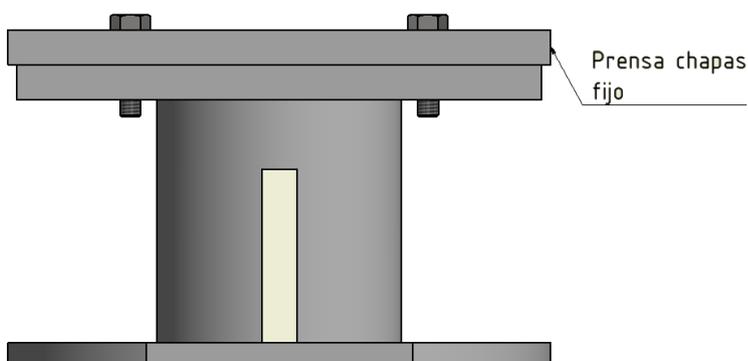


Figura 24. Prensa chapas fijo

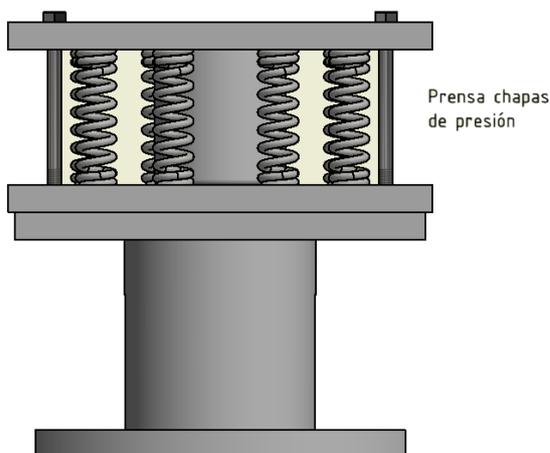


Figura 25. Prensa chapas de presión

Para el prensa chapas de presión, se determinó la fuerza que soporta los resortes que es de 780 N, y se determina la cantidad de resortes mediante lo siguiente:

$$\sum Fy = 0$$

$$n * F_R = F_P$$

$$n * 79.5 \text{ Kgf} = 1076.48 \text{ Kgf}$$

$$n = 13.6 \approx 14$$

4.5.3 Construcción del sistema de botador

El botador es el mecanismo que expulsa la pieza una vez embutida. Esta pieza será parte de los componentes del sistema de embutición, estará ubicado en el interior de la matriz de embutición y será de accionamiento con la misma prensa, está fabricado de un acero SAE 1045. (ver figura 26)

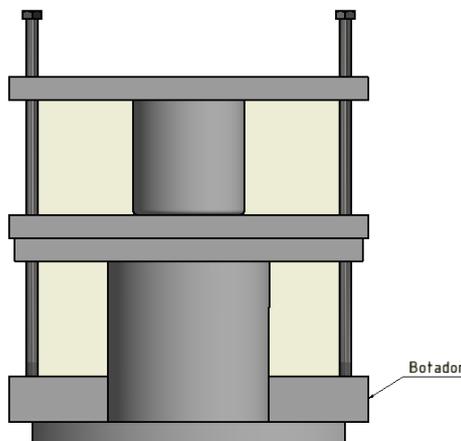


Figura 26. Botador

4.6 Sistema de operación

La secuencia de operación del proceso de embutición inicia con la alimentación del material de la chapa que previamente fue cortado al diámetro determinado, se coloca la chapa en forma manual sobre la matriz, mediante las guías que se encuentran marcadas en esta. Al accionar la máquina, el aceite hidráulico ingresa a la cámara superior del cilindro, forzando al pistón a deslizarse hacia abajo, en cuyo vástago se encuentra ensamblado el punzón, al descender en forma continua el vástago ejerce una carga dinámica sobre el material, conformándolo sobre la matriz.

Se cierra la válvula de admisión y se abre la válvula de retorno de la cámara inferior, con lo que el aceite hidráulico ingresa a la cámara inferior del cilindro para luego restituir el vástago a su posición inicial retirando de esta forma la carga sobre el material y poder retirar el mismo. (ver figura 27)

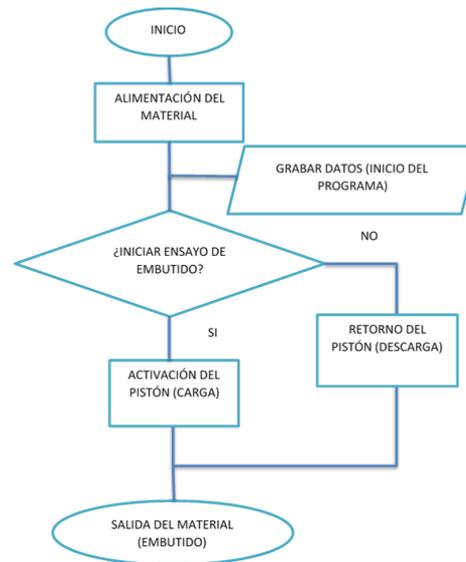


Figura 27. Secuencia de operación

4.6.1 Sistema de medición

Se implementó una celda de carga que permita medir la carga que se realiza durante el proceso de embutición, un sensor de desplazamiento para medir la altura del embutido durante el proceso.

a. Celda de carga

La celda de carga se seleccionó, tomando en cuenta la mayor fuerza de punzón necesaria para poder embutir los dos diferentes materiales. Del cálculo de la fuerza de punzón se puede observar que la aleación de cobre C24000 es la que mayor fuerza de punzón necesita siendo esta de 3800.2 Kg (8360.4 Lb). Por lo que se seleccionó la celda de compresión RL90000, con una capacidad de carga de 10000 Lb. (ver figura 28)



Figura 28. Celda de carga

Fuente: (Rice Lake Weighing Systems, 2016)

Para comprobar que los datos que envía la celda de carga son correctos, esta debe estar calibrada. La calibración de celda nos permite hallar la ecuación de ajuste que se utiliza en el proceso de programación para la adquisición de datos. (ver figura 29)

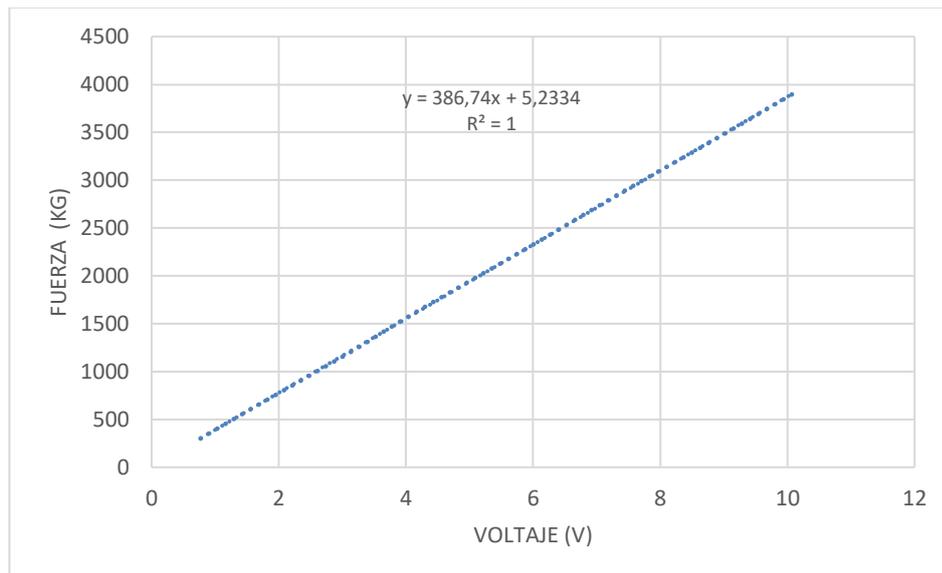


Figura 29. Ecuación de ajuste de la celda de carga

b. Sensor de desplazamiento

El sensor de desplazamiento permite medir la distancia de embutición de la chapa durante el proceso. (ver figura 30)



Figura 30. Sensor de desplazamiento

4.6.2 Sistema de control

El sistema de control está programado en LabVIEW, y consta de una tarjeta Ni myDAQ para la adquisición de datos de la celda de carga y del sensor de desplazamiento. (ver figura 31)



Figura 31. MyDAQ

Fuente: (National Instruments, 2017)

El software para el control del equipo de embutición se compone de los siguientes ambientes de pantalla:

1. Pantalla principal del programa
2. Pantalla de trabajo
3. Pantalla de revisión de datos

Ver anexo A para el detalle del manual de operación del software.

CAPÍTULO V

EXPERIMENTACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTIDO

5.1 Procedimiento del ensayo de embutido

Para realizar el ensayo de embutición seguimos el siguiente procedimiento:

1. Conectar la tarjeta de adquisición de datos al computador.
2. Arrancar el programa de control para el proceso de embutición, este desplegará la pantalla principal del programa.
3. Conectar el equipo de embutición a 110 V.
4. Recortar la chapa al diámetro determinado.
5. Lubricar la chapa.
6. Colocar el disco de chapa correctamente centrado sobre la matriz.
7. Ajustar el prensachapas.
8. Seleccionar de la pantalla principal de programa el icono de proceso para desplegar la pantalla de trabajo.
9. Colocar un nombre para el ensayo de embutición en el software.
10. Iniciar proceso de embutición.
11. Terminado el ensayo de embutición, regresar a la pantalla principal.
12. Seleccionar histórico, para poder revisar el ensayo de embutición.
13. Buscar el nombre con el que se guardó el ensayo, para obtener las curvas correspondientes.

En el ensayo de embutición en caliente, antes de colocar el disco de chapa sobre la matriz, el disco debe ser calentado a la temperatura de trabajo en caliente de acuerdo al material que se utilice.

Los ensayos a realizar son en frío y caliente, con los siguientes parámetros. (ver tabla 17).

Tabla 17.

Metodología del ensayo de embutido

| | Aleación de aluminio | | Aleación de cobre | |
|--------------------|----------------------|----------|-------------------|----------|
| | 3003 | | C24000 | |
| | Frío | Caliente | Frío | Caliente |
| Número de muestras | 3 | 3 | 3 | 3 |

Continua 

| | | | | |
|----------------------------|-----|-----------|-----|-----------|
| Diámetros de disco (mm) | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | 100 | No aplica | 100 | No aplica |
| Temperatura (°C) | 20 | 262 | 20 | 392 |

5.2 Ensayos de embutición

Realizado los ensayos de embutición en frío y en caliente de la aleación de aluminio 3003 y la aleación de cobre C24000, con diámetros de disco de 80 mm y 100 mm se obtuvieron los siguientes resultados.

5.2.1 Ensayos disco 80 mm, aleación de aluminio 3003

En la tabla 18 se muestran los datos obtenidos en el ensayo de embutición en frío para la aleación de aluminio 3003 con un diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 18.

Ensayos aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80mm.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 8378 | 7097 | 1097 |
| 2 | 9406 | 9167 | 1272 |
| 3 | 9917 | 10999 | 3657 |
| 4 | 12241 | 12765 | 4908 |
| 5 | 13982 | 13225 | 6902 |
| 6 | 15167 | 15329 | 9538 |
| 7 | 15591 | 15804 | 11119 |
| 8 | 16017 | 16008 | 12910 |
| 9 | 16147 | 16087 | 13842 |
| 10 | 16696 | 16105 | 15395 |
| 11 | 16727 | 16241 | 15571 |
| 12 | 16821 | 15401 | 15900 |
| 13 | 16752 | 14716 | 16643 |
| 14 | 16560 | 14637 | 17037 |
| 15 | 15932 | 13581 | 17035 |

Continua 

| | | | |
|----|-------|-------|-------|
| 16 | 14864 | 13297 | 15064 |
| 17 | 13906 | 12315 | 12303 |
| 18 | 13306 | 12702 | 8782 |
| 19 | 12337 | 11903 | 8550 |
| 20 | 11801 | 11403 | 6144 |
| 21 | 11770 | 10722 | - |
| 22 | 12964 | 12224 | - |

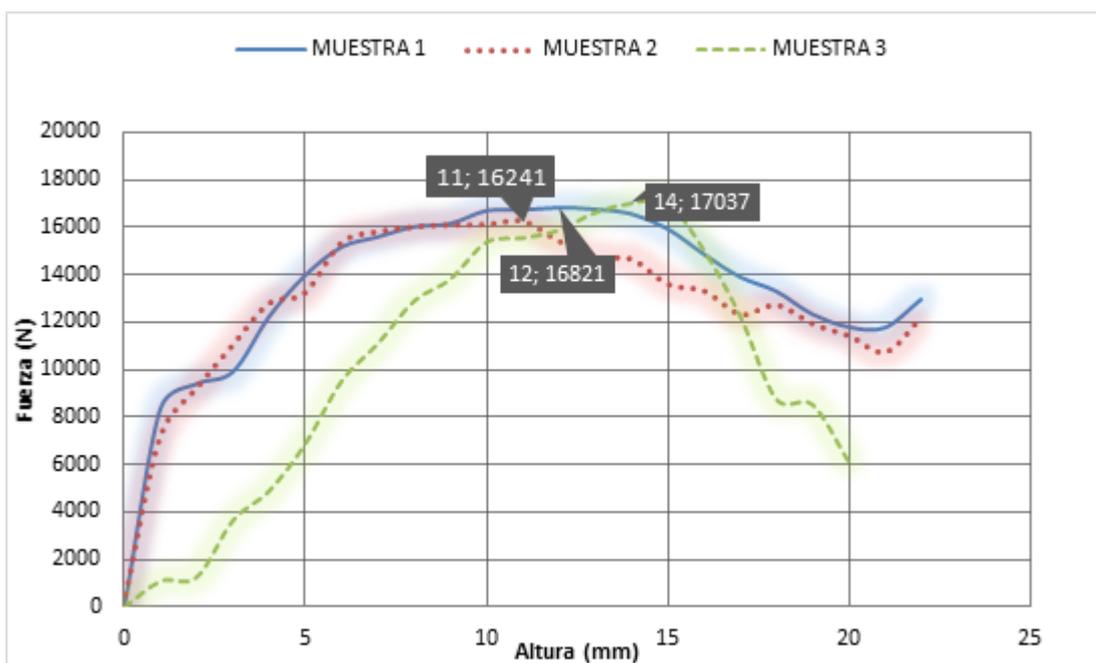


Figura 32. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm



Figura 33. Muestras de ensayos, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm

En la tabla 19 se muestran los datos de los ensayos de embutición de la aleación de aluminio 3003 en caliente con un diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 19.

Ensayos aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80mm.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1730 | 1440 | 1543 |
| 2 | 2078 | 1913 | 1973 |
| 3 | 2525 | 2716 | 2578 |
| 4 | 3523 | 3415 | 3521 |
| 5 | 5050 | 3803 | 3980 |
| 6 | 6532 | 4971 | 4853 |
| 7 | 8098 | 5820 | 5112 |
| 8 | 9284 | 6972 | 5750 |
| 9 | 10569 | 8172 | 7145 |
| 10 | 11047 | 9764 | 7941 |
| 11 | 10999 | 10967 | 8856 |
| 12 | 10835 | 11012 | 9759 |
| 13 | 10575 | 11167 | 10320 |
| 14 | 10770 | 11128 | 10189 |
| 15 | 10401 | 10805 | 10250 |
| 16 | 10382 | 10687 | 10540 |
| 17 | 10045 | 10233 | 10436 |
| 18 | 9498 | 9822 | 9870 |
| 19 | 9215 | 9513 | 9321 |
| 20 | 9374 | 9310 | 9125 |
| 21 | 9001 | 9406 | 9023 |
| 22 | 8926 | 9122 | 9145 |
| 23 | 8718 | 8823 | 8940 |
| 24 | 8423 | 7823 | 8756 |
| 25 | 8926 | 12344 | 10978 |
| 26 | 13456 | 21758 | - |

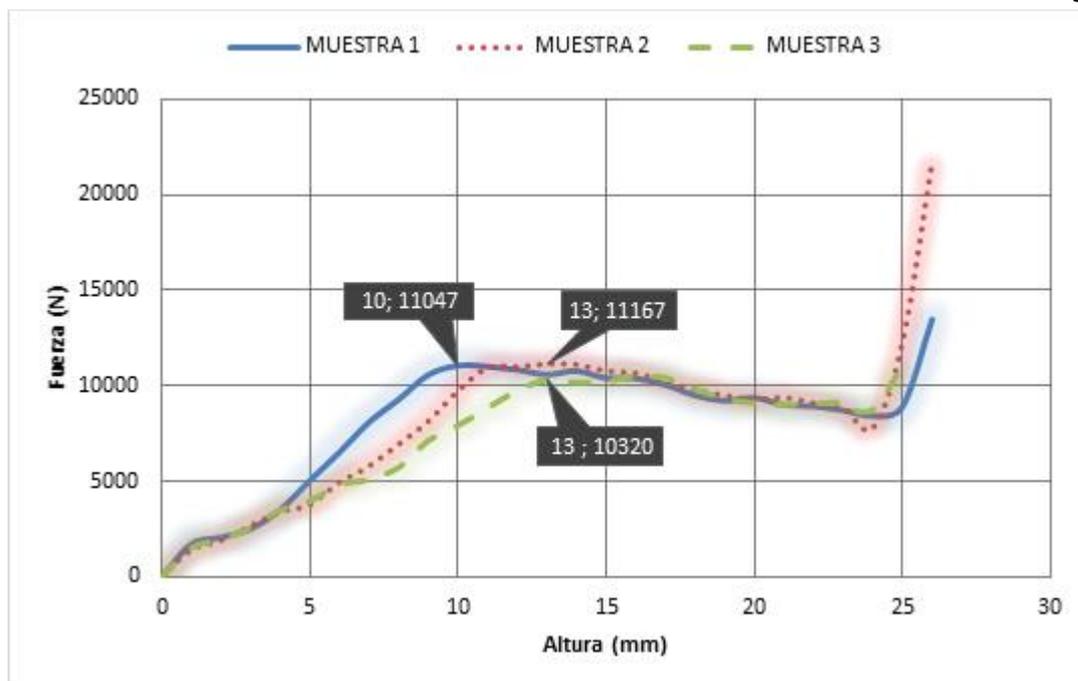


Figura 34. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm



Figura 35. Muestras de ensayos, aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm

5.2.2 Ensayos disco 100 mm de aleación de aluminio 3003

En la tabla 20 se muestran los datos de los ensayos con aleación de aluminio 3003 en frío con un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 20.

Ensayos de aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3307 | 3566 | 3237 |

Continua 

| | | | |
|---|-------|-------|-------|
| 2 | 6378 | 4909 | 4859 |
| 3 | 9393 | 6977 | 7922 |
| 4 | 12000 | 9850 | 10732 |
| 5 | 13092 | 12330 | 12936 |
| 6 | - | 11873 | 5537 |
| 7 | 2043 | 2770 | - |

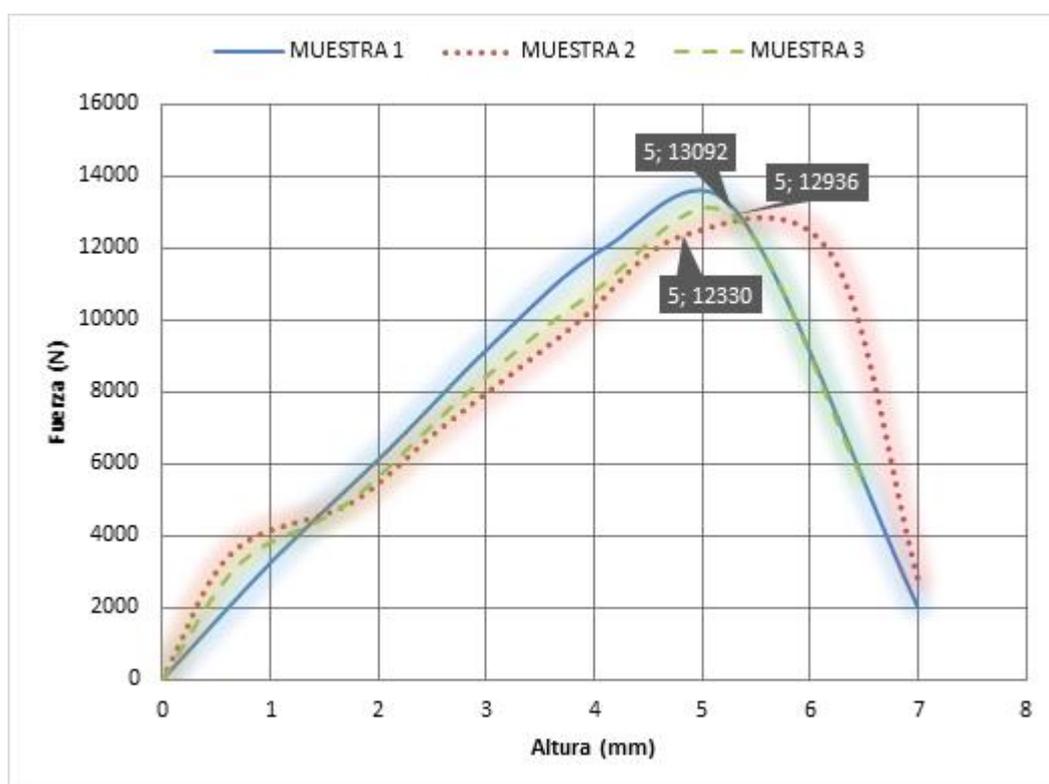


Figura 36. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm



Figura 37. Muestras de ensayos, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm

5.2.3 Ensayos disco 80 mm de la aleación de cobre C24000

En la tabla 21 se observan los datos de los resultados obtenidos de los ensayos de embutición en frío para la aleación de cobre C24000 con diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 21.

Ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 6703 | 6873 | 4989 |
| 2 | 8756 | 9634 | 7265 |
| 3 | 9917 | 13448 | 10528 |
| 4 | 13737 | 15140 | 13960 |
| 5 | 17393 | 21974 | 17341 |
| 6 | 20784 | 25242 | 23209 |
| 7 | 24067 | 28071 | 26327 |
| 8 | 26965 | 30987 | 28613 |
| 9 | 31939 | 32288 | 31174 |
| 10 | 33220 | 33735 | 33189 |
| 11 | 34533 | 34204 | 34586 |
| 12 | 34830 | 33565 | 35567 |
| 13 | 34554 | 35346 | 36126 |
| 14 | 34710 | 35852 | 36096 |
| 15 | 34182 | 36764 | 35525 |
| 16 | 39405 | 38205 | 36150 |
| 17 | 39899 | 35535 | 39889 |
| 18 | 39896 | 26229 | 39896 |
| 19 | 39726 | 24205 | 39896 |
| 20 | 38921 | 22795 | 39896 |
| 21 | 37613 | 22119 | 39896 |
| 22 | 34848 | 21706 | - |

Continua 

| | | | |
|----|---|-------|---|
| 23 | - | 21508 | - |
| 24 | - | 20922 | - |

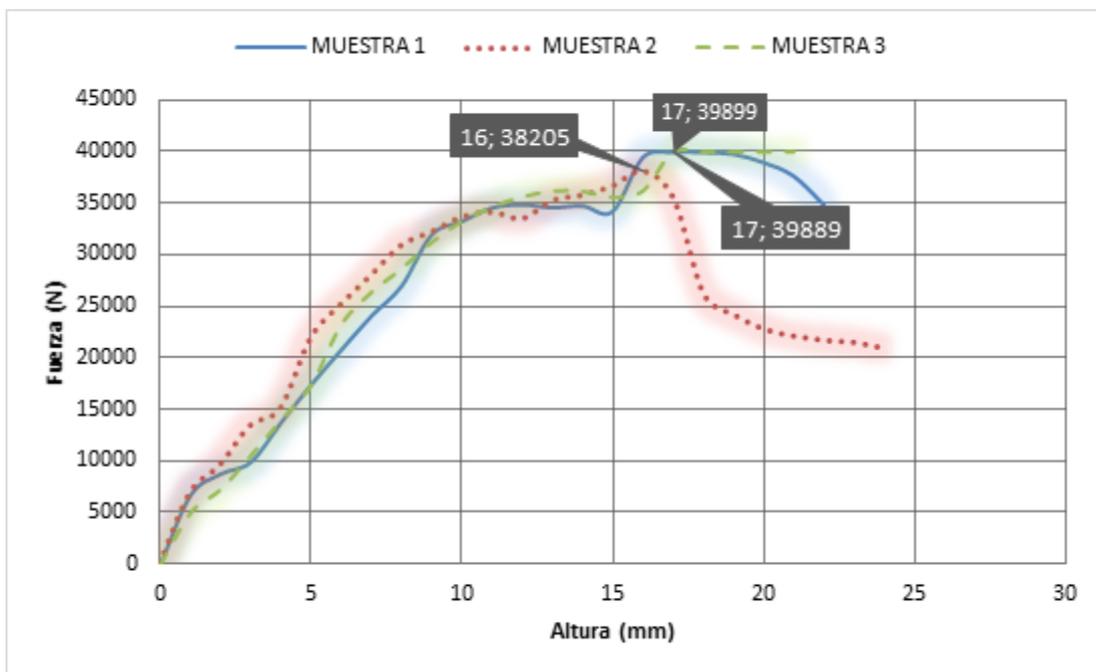


Figura 38. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm



Figura 39. Muestras de ensayos, aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm

En la tabla 22 se muestran los datos de los ensayos de embutición en caliente para la aleación de cobre C24000 con diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 22.

Ensayos aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 6789 | 4437 | 5594 |
| 2 | 8497 | 5608 | 6812 |
| 3 | 9134 | 7597 | 8142 |
| 4 | 10559 | 9856 | 10756 |
| 5 | 13431 | 12831 | 11244 |
| 6 | 16420 | 15821 | 14126 |
| 7 | 19781 | 17918 | 18075 |
| 8 | 21651 | 21509 | 20435 |
| 9 | 22741 | 22061 | 21825 |
| 10 | 23549 | 23858 | 23155 |
| 11 | 24000 | 26769 | 24539 |
| 12 | 24105 | 27164 | 25457 |
| 13 | 23308 | 28149 | 24539 |
| 14 | 23749 | 28831 | 26477 |
| 15 | 23827 | 29354 | 26535 |
| 16 | 24122 | 29047 | 26211 |
| 17 | 23428 | 28011 | 24959 |
| 18 | 23715 | 26259 | 23279 |
| 19 | 23374 | 23845 | 22251 |
| 20 | 21906 | 22283 | 19237 |
| 21 | 20299 | 19205 | 19471 |
| 22 | 18657 | 18218 | 23505 |
| 23 | 17191 | 16943 | 28626 |
| 24 | 19736 | 17447 | 28643 |
| 25 | 28792 | 27348 | - |

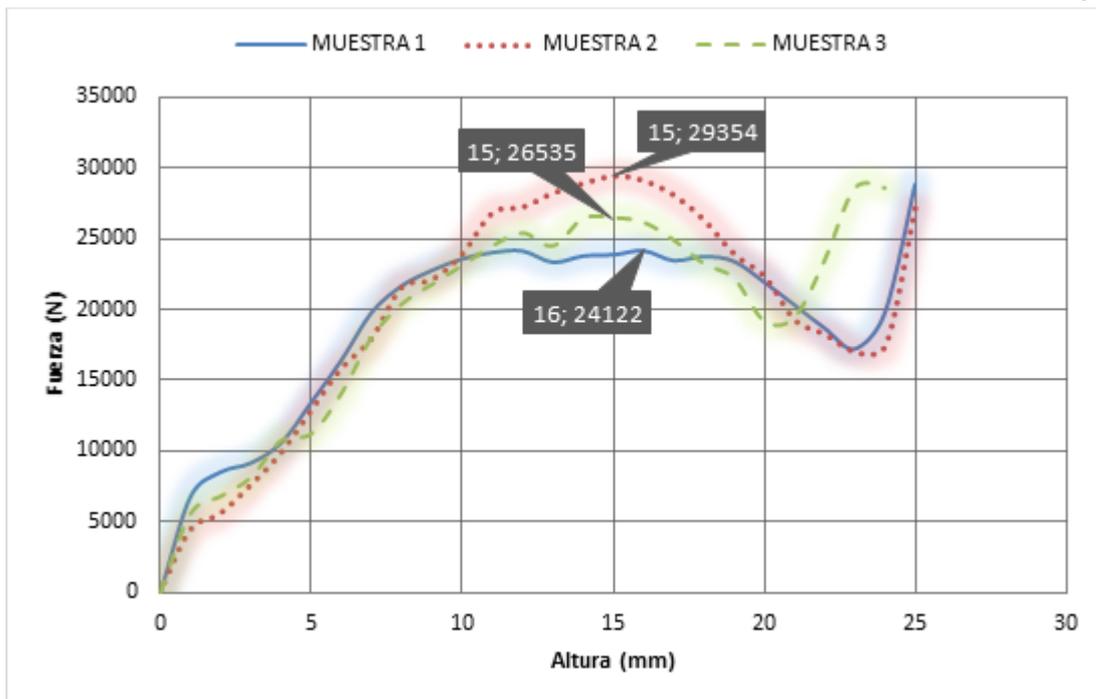


Figura 40. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm



Figura 41. Muestras de ensayos, aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm

5.2.4 Ensayo disco 100 mm de aleación de cobre C24000

En la tabla 23 se muestran los resultados de los ensayos realizados con la aleación de cobre C24000 en frío, para un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 23.

Ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 7211 | 12553 | 11666 |

Continua

| | | | |
|----|---------|-------|-------|
| 2 | 10192 | 15034 | 13843 |
| 3 | 17969 | 18583 | 16660 |
| 4 | 24609 | 24557 | 19048 |
| 5 | 30076 | 29239 | 27221 |
| 6 | - | 15478 | 31276 |
| 7 | 33486 | - | 33783 |
| 8 | 2680 | 5049 | 35357 |
| 9 | 3131 | 3349 | 36215 |
| 10 | 2851,02 | 3126 | 36896 |
| 11 | - | - | 12662 |

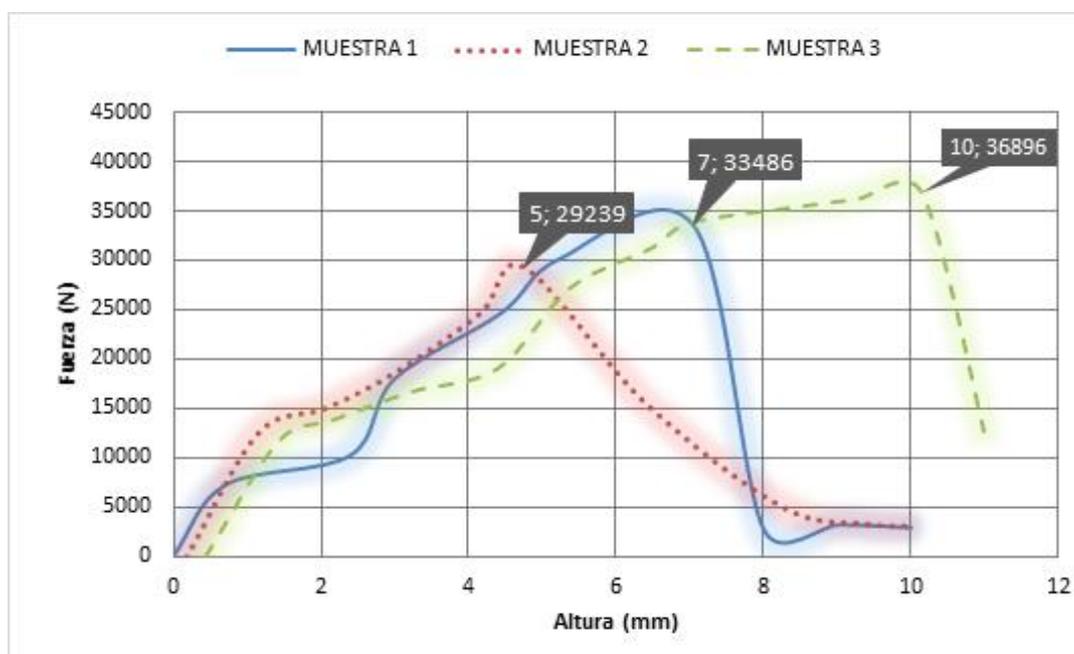


Figura 42. Curvas fuerza vs altura, ensayos aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm



Figura 43. Muestras de ensayos, aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm

5.3 Tabulación de datos

De los ensayos de embutición de la aleación de aluminio 3003 y la aleación de cobre C24000, en frío y en caliente, se obtuvieron la fuerza máxima y altura máxima en las tres muestras, para un diámetro de 80 mm y un diámetro de 100 mm.

En la tabla 24 se muestran los valores de fuerza máxima y altura máxima de los ensayos de la aleación de aluminio 3003 en frío y en caliente, con un diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 24.

Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 80 mm.

| Muestras | Frío | | Caliente | |
|-----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| | Altura (mm) | Fuerza (N) | Altura (mm) | Fuerza (N) |
| 1 | 22 | 16821 | 25 | 11047 |
| 2 | 22 | 16241 | 25 | 11167 |
| 3 | 20 | 17037 | 24 | 10320 |
| Promedio | 21.3 | 16699.7 | 24.7 | 10844.7 |

En la tabla 25 se muestran los valores de fuerza máxima y altura máxima de los ensayos de la aleación de aluminio 3003, con un diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 25.

Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco 100 mm

| Muestras | Altura (mm) | Fuerza (N) |
|-----------------|-------------|--------------|
| 1 | 7 | 13092 |
| 2 | 7 | 12330 |
| 3 | 6 | 12936 |
| Promedio | 6.7 | 12786 |

En la tabla 26 se muestran los valores de fuerza máxima y altura máxima de los ensayos de la aleación de cobre C24000 en frío y en caliente, con un diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 26.

Fuerza y altura máximo, aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 80 mm.

| Muestras | Frío | | Caliente | |
|-----------------|-------------|--------------|-------------|----------------|
| | Altura (mm) | Fuerza (N) | Altura (mm) | Fuerza (N) |
| 1 | 22 | 39899 | 25 | 24122 |
| 2 | 24 | 38205 | 25 | 29354 |
| 3 | 21 | 39889 | 24 | 26535 |
| Promedio | 22.3 | 39331 | 24.7 | 26670.3 |

En la tabla 27 se muestran los valores de fuerza máxima y altura máxima de los ensayos de la aleación de cobre C24000, con un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 27.

Fuerza y altura máxima, aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm.

| Muestras | Altura (mm) | Fuerza máxima (N) |
|-----------------|-------------|-------------------|
| 1 | 7 | 33486 |
| 2 | 5 | 29239 |
| 3 | 10 | 36896 |
| Promedio | 7.3 | 31977.3 |

CAPÍTULO VI

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTIDO

6.1 Herramientas de simulación

En este capítulo se desarrolla el proceso de simulación por elementos finitos para la embutición de la chapa de aleación de aluminio 3003 y la de aleación de cobre C24000.

La embutición es un proceso empleado en la industria de la metalmecánica, por lo que la utilización de un software de simulación CAE se hace necesario cuando no se desea realizar la parte de prueba y error, el software es de gran ayuda ya que permite ahorrar tiempo y dinero, para poder llegar a los resultados deseados.

6.2 Definición de parámetros para la simulación

La definición de los parámetros para la simulación por elementos finitos dentro del software CAE, permite definir el ambiente en el cual va a trabajar el sistema a ser simulado, para poder obtener resultados aproximados a los reales.

Para la simulación del proceso de embutido en frío y caliente, de la aleación 3003 y la aleación C24000, se utilizaron los siguientes parámetros. (ver tabla 28)

Ver anexo B para el detalle del proceso de simulación en el software CAE.

Tabla 28.

Parámetros para la simulación del proceso de embutido

| Parámetros | Aleación de aluminio | | Aleación de cobre | |
|-------------------|----------------------|----------|-------------------|----------|
| | 3003 | | C24000 | |
| | Frío | Caliente | Frío | Caliente |
| Diámetro de disco | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Temperatura | 20 | 262 | 20 | 392 |
| Tamaño de malla | 150000 | 150000 | 150000 | 150000 |
| Fricción | 0.05 | 0 | 0.05 | 0 |

Continua 

| | | | | |
|---|------|------|-------|-------|
| Número de pasos | 30 | 30 | 40 | 40 |
| Incremento de pasos a guardar | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Definición del paso de la solución con el desplazamiento del punzón | 1.2 | 1.2 | 0.5 | 0.5 |
| Desplazamiento del punzón | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Fuerza del prensachapas | 6000 | 6000 | 10000 | 10000 |

6.3 Simulación del embutido en frío y caliente

Se realizó la simulación de la aleación de aluminio 3003 y la aleación de cobre C24000 en frío y caliente, para los diámetros de disco de 80 mm y 100 mm, con los parámetros de la tabla 28.

6.3.1 Simulación de la aleación de aluminio 3003

En la tabla 29 se muestran los resultados obtenidos en la simulación en frío y en caliente, con diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 29.

Simulación de la aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 80 mm.

| | Frío | Caliente |
|-------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 5690 | 3860 |
| 2 | 5760 | 2530 |
| 3 | 7740 | 3100 |
| 4 | 8430 | 4000 |
| 5 | 10500 | 5520 |
| 6 | 12500 | 6800 |
| 7 | 14600 | 8200 |

Continua 

| | | |
|----|-------|-------|
| 8 | 15200 | 9200 |
| 9 | 15700 | 9910 |
| 10 | 16500 | 10500 |
| 11 | 16400 | 10600 |
| 12 | 16500 | 10600 |
| 13 | 16300 | 10500 |
| 14 | 16500 | 10300 |
| 15 | 15900 | 10100 |
| 16 | 15100 | 9670 |
| 17 | 14400 | 9110 |
| 18 | 13600 | 8870 |
| 19 | 12400 | 8560 |
| 20 | 11800 | 7590 |
| 21 | 11500 | 7140 |
| 22 | 10900 | 6450 |
| 23 | 10700 | 5730 |
| 24 | 10600 | 5760 |
| 25 | - | 4750 |
| 26 | - | 5230 |

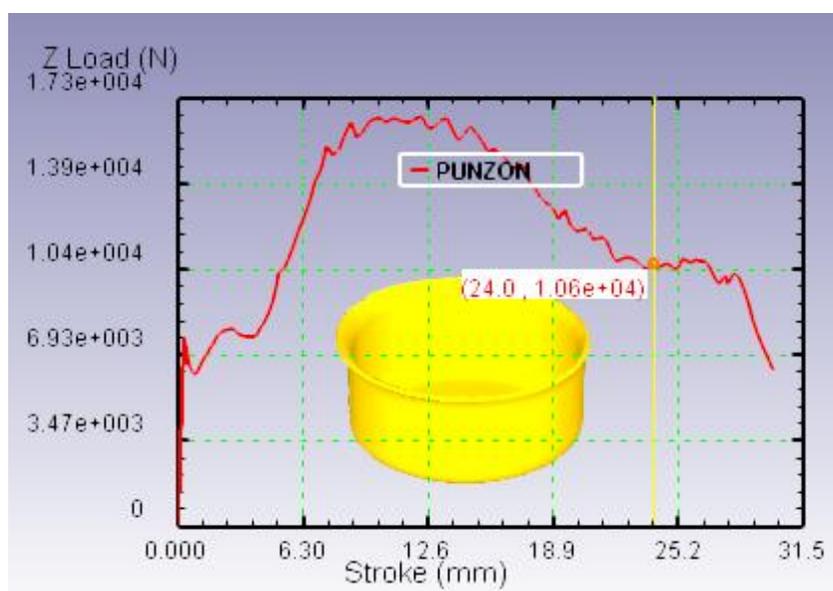


Figura 44. Simulación aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm

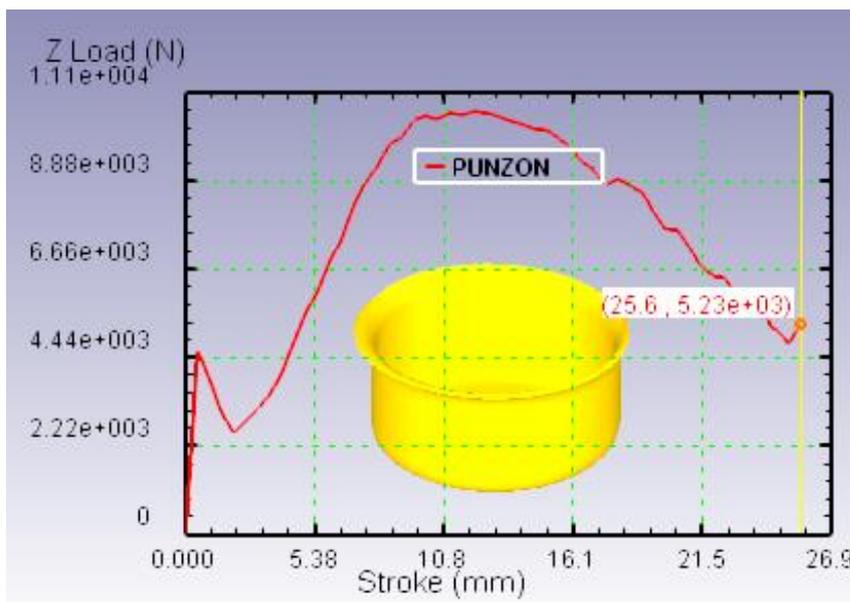


Figura 45. Simulación aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm

En la tabla 30 se observan los resultados de la simulación de la aleación de aluminio 3003, con un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 30.

Simulación de la aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 100 mm.

| Altura (mm) | Fuerza (N) |
|-------------|------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 6460 |
| 2 | 6090 |
| 3 | 8000 |
| 4 | 10000 |
| 5 | 13200 |
| 6 | 15900 |
| 7 | 17400 |
| 8 | 19100 |
| 9 | 21600 |
| 10 | 21100 |

Continua 

| | |
|----|-------|
| 11 | 22000 |
| 12 | 23500 |
| 13 | 23500 |
| 14 | 22200 |
| 15 | 22700 |
| 16 | 21500 |

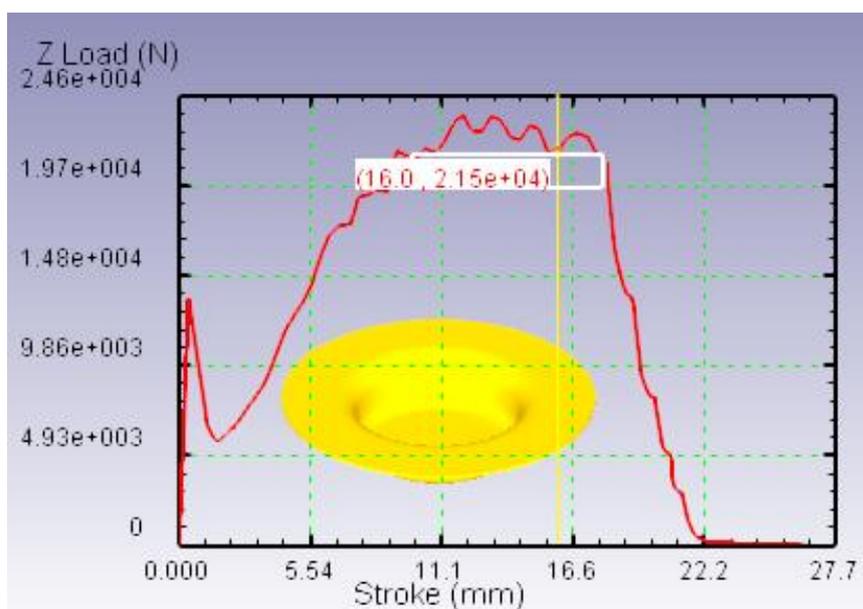


Figura 46. Simulación aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 100 mm

6.3.2 Simulación de la aleación de cobre C24000

En la tabla 31, se muestran los resultados obtenidos de la simulación de la aleación de cobre, con un diámetro de disco de 80 mm.

Tabla 31.

Simulación de la aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 80 mm.

| | Frío | Caliente |
|-------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 14700 | 11800 |
| 2 | 10500 | 8180 |
| 3 | 10600 | 8090 |

Continua

| | | |
|----|-------|-------|
| 4 | 13100 | 9850 |
| 5 | 17200 | 12300 |
| 6 | 23100 | 16800 |
| 7 | 28900 | 20900 |
| 8 | 32600 | 24100 |
| 9 | 37200 | 25800 |
| 10 | 39900 | 27100 |
| 11 | 41000 | 28400 |
| 12 | 40500 | 26900 |
| 13 | 38600 | 27100 |
| 14 | 38000 | 27600 |
| 15 | 38400 | 27900 |
| 16 | 38000 | 28000 |
| 17 | 38400 | 28000 |
| 18 | 37900 | 26800 |
| 19 | 37200 | 25900 |
| 20 | 35400 | 24400 |

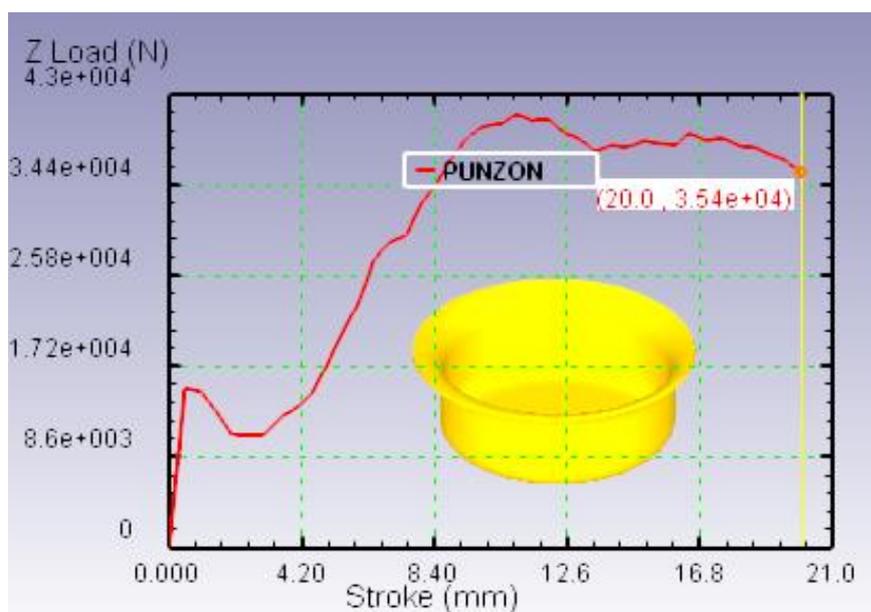


Figura 47. Simulación aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm

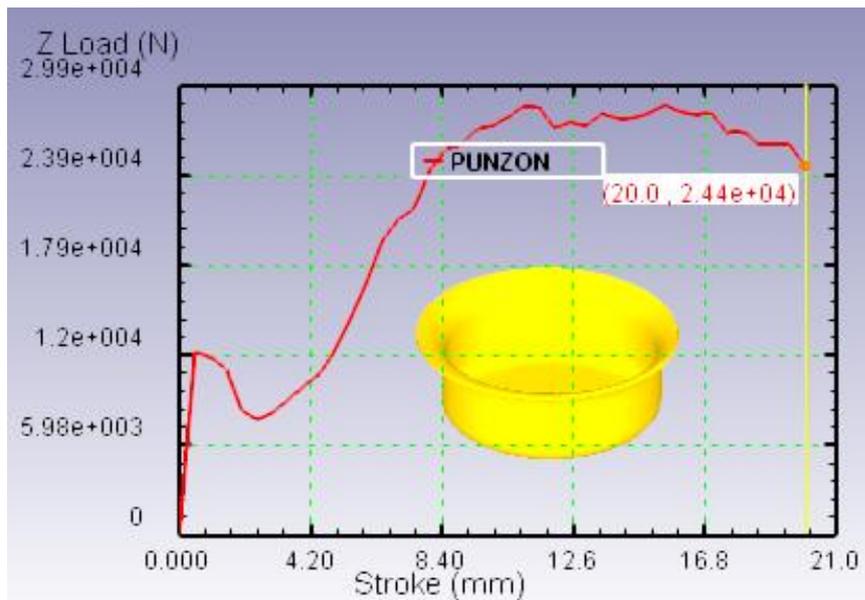


Figura 48. Simulación aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm

En la tabla 32 se pueden observar los datos de los resultados obtenidos para la simulación de la aleación de cobre C24000 con un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 32.

Simulación de la aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm.

| Altura (mm) | Fuerza (N) |
|-------------|------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 15700 |
| 2 | 11000 |
| 3 | 16900 |
| 4 | 22000 |
| 5 | 30000 |
| 6 | 35600 |
| 7 | 42600 |
| 8 | 47200 |
| 9 | 50900 |
| 10 | 53400 |

Continua 

| | |
|----|-------|
| 11 | 56200 |
| 12 | 58600 |
| 13 | 61500 |
| 14 | 60200 |
| 15 | 61800 |
| 16 | 63400 |

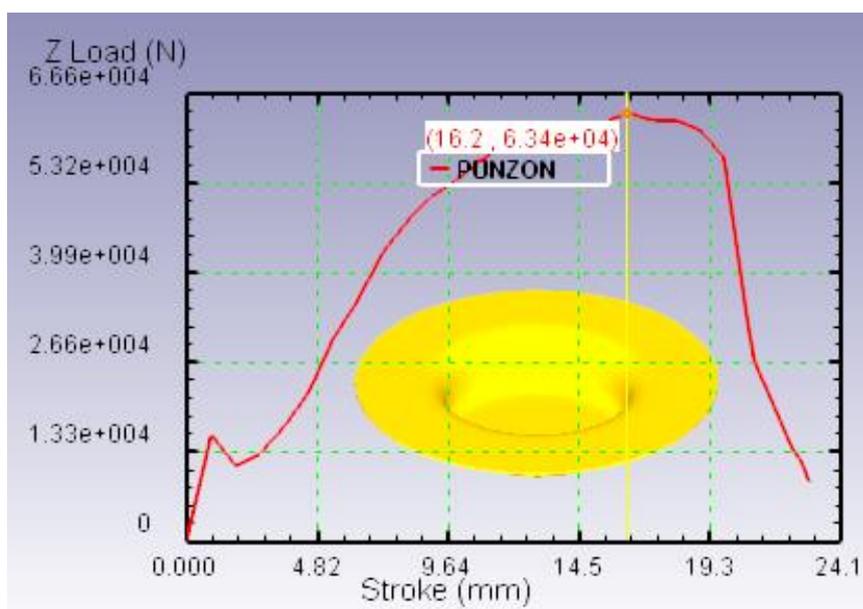


Figura 49. Simulación aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm

6.4 Tabulación de datos

De las simulaciones de embutido, para la aleación de aluminio 3003 y la aleación de cobre C24000, en frío y en caliente con diámetros de disco de 80 mm y 100 mm, se obtuvieron los datos de fuerza y altura máxima

La tabla 33 se muestra los valores de fuerza y altura máxima obtenidos en la simulación en frío y en caliente para la aleación de aluminio 3003, con diámetro de disco de 80 mm. Y en la tabla 34 los datos para la simulación en frío para un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 33.

Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 80 mm.Simulación

| Frío | | Caliente | |
|-------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Atura (mm) | Fuerza (N) |
| 24 | 16500 | 25.6 | 10600 |

Tabla 34.

Fuerza y altura máxima, aleación de aluminio 3003, diámetro de disco de 100 mm.Simulación

| Altura (mm) | Fuerza (N) |
|-------------|------------|
| 16 | 23500 |

La tabla 35 se muestra los valores de fuerza y altura máxima obtenidos en la simulación en frío y en caliente para la aleación de cobre C24000, con diámetro de disco de 80 mm. Y en la tabla 37 los datos para la simulación en frío para un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 35.

Fuerza y altura máxima aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 80 mm.Simulación

| Frío | | Caliente | |
|-------------|------------|-------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Altura (mm) | Fuerza (N) |
| 20 | 41000 | 20 | 28400 |

Tabla 36.

Fuerza y altura máxima aleación de cobre C24000, diámetro de disco de 100 mm.Simulación

| Altura (mm) | Fuerza máxima (N) |
|-------------|-------------------|
| 16 | 63400 |

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN

7.1 Análisis de resultados de la simulación

De la simulación de embutido de la aleación de aluminio 3003 en caliente y en frío, con diámetros de disco de 80 mm y 100 mm se obtuvieron las cargas y alturas máximas. (ver tabla 37)

Tabla 37.

Fuerzas máximas y alturas máximas para la aleación de aluminio 3003.

Simulación

| Diámetro de disco (mm) | Condición | Altura máxima (mm) | Fuerza máxima (N) |
|---------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 80 | Frío | 24 | 16500 |
| 80 | Caliente | 25.6 | 10600 |
| 100 | Frío | 16 | 23500 |

- La fuerza máxima de embutición en caliente para la aleación de aluminio 3003 con diámetro de disco de 80 mm, disminuyó en un 35.8% respecto a la fuerza máxima para la embutición en frío, facilitando el proceso de conformado plástico del material.
- Al aumentar el diámetro de disco a 100 mm, la fuerza máxima para el embutido en frío de la aleación de aluminio 3003 aumentó en un 42.4% respecto a la fuerza máxima necesaria para un diámetro de disco de 80 mm.

En la simulación de embutido de la aleación de cobre C24000 en frío y en caliente, con diámetros de disco de 80 mm y 100 mm se obtuvieron las cargas y alturas máximas. (ver tabla 38)

Tabla 38.**Fuerzas máximas y alturas máximas para la aleación de cobre C24000.****Simulación**

| Diámetro de disco (mm) | Condición | Altura máxima (mm) | Fuerza máxima (N) |
|---------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 80 | Frío | 20 | 41000 |
| 80 | Caliente | 20 | 28500 |
| 100 | Frío | 20 | 63400 |

- La fuerza máxima de embutición en caliente para la aleación de cobre C24000 con diámetro de disco de 80 mm, disminuyó en un 30.5% respecto a la fuerza máxima para la embutición en frío.
- En un diámetro de disco de 100 mm, la fuerza máxima para el embutido de la aleación de cobre C24000 aumentó en un 54.6%, respecto a la fuerza máxima en frío para un diámetro de disco de 80 mm.

7.2 Análisis de resultados de los ensayos

El análisis de resultados del ensayo de embutición en frío y en caliente, para la aleación de aluminio 3003 se lo realiza con el promedio de las cargas máximas y desplazamientos, para cada diámetro ensayado. (ver tabla 39)

Tabla 39.**Promedios de fuerzas máximas y alturas máximas, aleación de aluminio 3003**

| Diámetro de disco (mm) | Condición | Altura máxima (mm) | Fuerza máxima (N) |
|---------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 80 | Frío | 21.3 | 16699.7 |
| 80 | Caliente | 24.7 | 10844.7 |
| 100 | Frío | 6.7 | 12786 |

- La fuerza máxima promedio de los ensayos de embutición en caliente para la aleación de aluminio 3003 con diámetro de disco de 80 mm, disminuyó en un 35.06% con respecto a la fuerza máxima para el ensayo en frío.

- Para el aluminio 3003 con diámetro de disco de 100 mm, la fuerza y la altura máxima promedio se reduce, esto se debe a que la carga de sujeción no permanece constante por lo que se generan arrugas produciendo la rotura de la chapa a una altura menor.

El análisis de resultados del ensayo de embutición en frío y en caliente, para la aleación de cobre C24000, se lo realiza con el promedio de las cargas máximas y desplazamientos, para cada diámetro ensayado. (ver tabla 40)

Tabla 40.

Promedio de fuerzas máximas y alturas máximas aleación de cobre C24000

| Diámetro de disco (mm) | Condición | Altura máxima (mm) | Fuerza máxima (N) |
|---------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 80 | Frío | 22.3 | 39331 |
| 80 | Caliente | 24.7 | 26670.3 |
| 100 | Frío | 7.3 | 31977 |

- La carga máxima promedio del ensayo de embutición en caliente para la aleación de cobre C24000 con diámetro de disco 80 mm disminuyó en un 32.2% respecto a la fuerza máxima promedio necesaria para el embutido en frío.
- Existe mayor carga del punzón en diámetro de 100 mm, debido a que se tiene mayor área de retención del prensachapas. Como se puede observar en la tabla 41, que a un desplazamiento menor ya es similar a la carga máxima de un disco de 80 mm de diámetro.

7.3 Comparación de simulación y ensayos

Para comparar los resultados entre la simulación del proceso de embutición y los ensayos realizados, se considera como parámetro principal la fuerza necesaria del punzón para la embutición.

$$e = \frac{\text{Valor CAE} - \text{Valor Nominal}}{\text{Valor CAE}} * 100$$

Para determinar el error se utiliza los valores promedios de las fuerzas de los ensayos y la fuerza obtenida en la simulación.

En la tabla 41 se puede observar el valor del error determinado entre la fuerza promedio de los ensayos de embutición y la fuerza de simulación, para un diámetro de disco de 80 mm. La altura marcada con (*) muestra la fuerza máxima de embutición.

Tabla 41.

Cálculo del error para la aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80mm.

| | Promedio | Simulación | Error |
|-------------|------------|------------|-------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | % |
| 0 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| 1 | 5524,0 | 5690 | 2,9 |
| 2 | 6615,0 | 5760 | 14,8 |
| 3 | 8191,0 | 7740 | 5,8 |
| 4 | 9971,3 | 8430 | 18,3 |
| 5 | 11369,7 | 10500 | 8,3 |
| 6 | 13344,7 | 12500 | 6,8 |
| 7 | 14171,3 | 14600 | 2,9 |
| 8 | 14978,3 | 15200 | 1,5 |
| 9 | 15358,7 | 15700 | 2,2 |
| 10 | 16065,3 | 16500 | 2,6 |
| 11 (*) | 16179,7 | 16400 | 1,3 |
| 12 | 16040,7 | 16500 | 2,8 |
| 13 | 16037,0 | 16300 | 1,6 |
| 14 | 16078,0 | 16500 | 2,6 |
| 15 | 15516,0 | 15900 | 2,4 |
| 16 | 14408,3 | 15100 | 4,6 |
| 17 | 12841,3 | 14400 | 10,8 |
| 18 | 11596,7 | 13600 | 14,7 |

Continua 

| | | | |
|----------------------------------|---------|-------|------------|
| 19 | 10930,0 | 12400 | 11,9 |
| 20 | 9782,7 | 11800 | 17,1 |
| Error porcentual promedio | | | 6.5 |

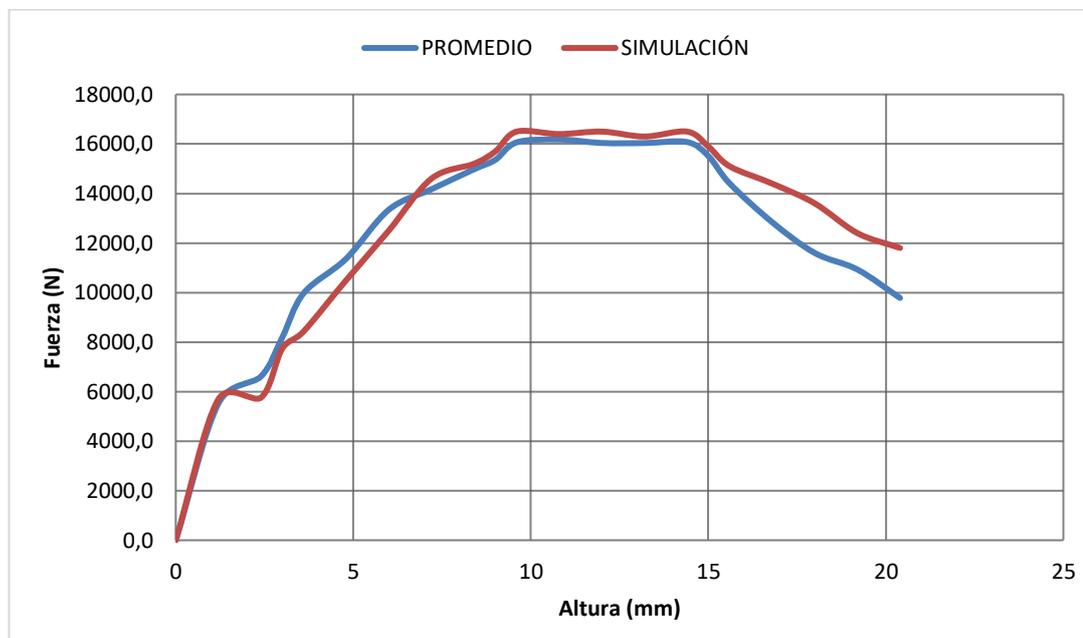


Figura 50. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 80 mm.

- El cálculo del error porcentual promedio para el embutido de la aleación de aluminio 3003 con diámetro de disco de 80 mm en frío es de 6.5%, con lo que se puede concluir que los datos de la simulación y del ensayo son similares.
- El valor del error para la fuerza máxima promedio para la aleación de aluminio 3003 en la embutición en frío es del 1.3%.
- Como se puede observar en la figura 49, la curva promedio de los ensayos y la simulación tienen un comportamiento similar hasta una altura de 16 mm, donde el error promedio hasta esa altura es del 4.8%.

En la tabla 42 se muestran los valores obtenidos para el cálculo del error de la embutición en caliente para la aleación de aluminio 3003, con un

diámetro de disco de 80 mm. La altura marcada con (*) muestra la fuerza máxima de embutición.

Tabla 42.

Cálculo del error para la aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80mm.

| | Promedio | Simulación | Error |
|-------------|------------|------------|-------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | % |
| 0 | 0,0 | 0 | 0 |
| 1 | 1571,0 | 3860 | 59,3 |
| 2 | 1988,0 | 2530 | 21,4 |
| 3 | 2606,3 | 3100 | 15,9 |
| 4 | 3486,3 | 4000 | 12,8 |
| 5 | 4277,7 | 5520 | 22,5 |
| 6 | 5451,9 | 6800 | 19,8 |
| 7 | 6343,3 | 8200 | 22,6 |
| 8 | 7335,3 | 9200 | 20,3 |
| 9 | 8628,7 | 9910 | 12,9 |
| 10 | 9584,1 | 10500 | 8,7 |
| 11 | 10273,9 | 10600 | 3,1 |
| 12 | 10535,4 | 10600 | 0,6 |
| 13 | 10687,3 | 10500 | 1,8 |
| 14 (*) | 10695,7 | 10300 | 3,8 |
| 15 | 10485,2 | 10100 | 3,8 |
| 16 | 10536,3 | 9670 | 9,0 |
| 17 | 10238,0 | 9110 | 12,4 |
| 18 | 9729,8 | 8870 | 9,7 |
| 19 | 9349,6 | 8560 | 9,2 |
| 20 | 9269,8 | 7590 | 22,1 |
| 21 | 9143,3 | 7140 | 28,1 |
| 22 | 9064,3 | 6450 | 40,5 |
| 23 | 8826,9 | 5730 | 54,0 |

Continua 

| | | | |
|----------------------------------|--------|------|-------------|
| 24 | 8334,0 | 5760 | 44,7 |
| Error porcentual promedio | | | 18,4 |

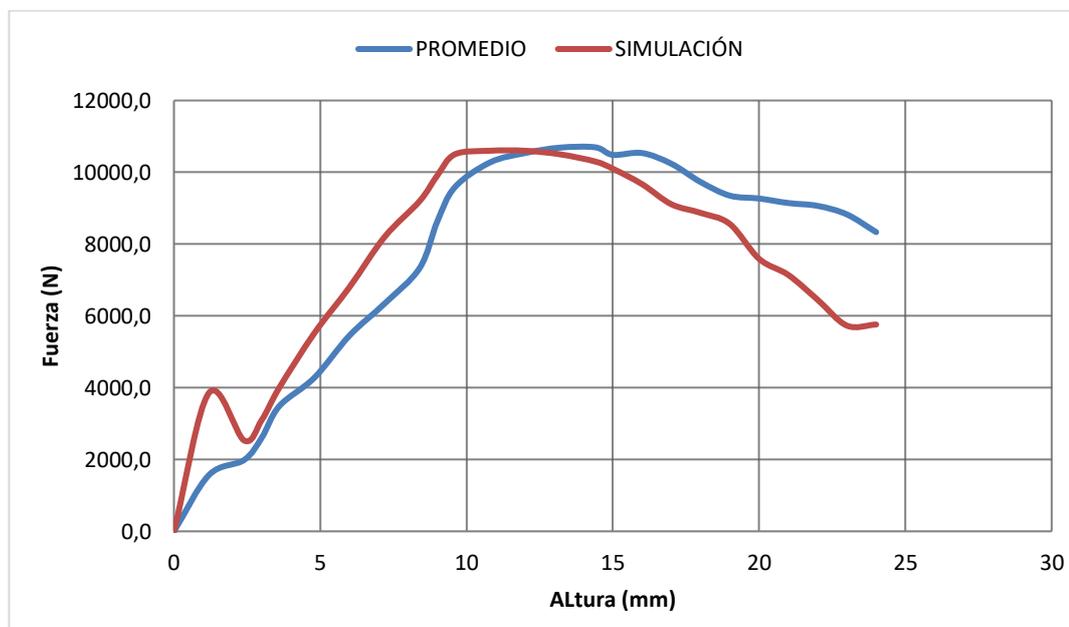


Figura 51. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de aluminio 3003 en caliente, diámetro de disco de 80 mm.

- El error porcentual promedio para el embutido de la aleación de aluminio 3003 con diámetro de disco de 80 mm en caliente es de 18.5%, este porcentaje alto de error se debe a las características del material y al tiempo que dura el ensayo, lo que provoca que el material se enfríe produciendo variaciones en sus datos.
- Si se calcula el error promedio hasta la altura de 15 mm donde el comportamiento de las curvas es similar, y sin considerar el error a la altura de 1 mm en donde la simulación tiende a elevarse y luego desciende, sería del 12.2 %.
- El error para la fuerza máxima promedio para la aleación de aluminio 3003 en caliente es del 3.8%.

En la tabla 43 se muestran los valores obtenidos para el cálculo del error de la embutición en frío para la aleación de aluminio 3003, con un diámetro de disco de 100 mm. La altura marcada con (*) muestra la fuerza que se omite para el cálculo del error promedio porcentual.

Tabla 43.

Cálculo del error para la aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100mm.

| | Promedio | Simulación | Error |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | % |
| 0 | 0,0 | 0 | 0 |
| 1 (*) | 3370,1 | 6460 | 47,8 |
| 2 | 5382,0 | 6090 | 11,6 |
| 3 | 8097,4 | 8000 | 1,2 |
| 4 | 10860,6 | 10000 | 8,6 |
| 5 | 12786,0 | 13200 | 3,1 |
| Error porcentual promedio | | | 6.1 |

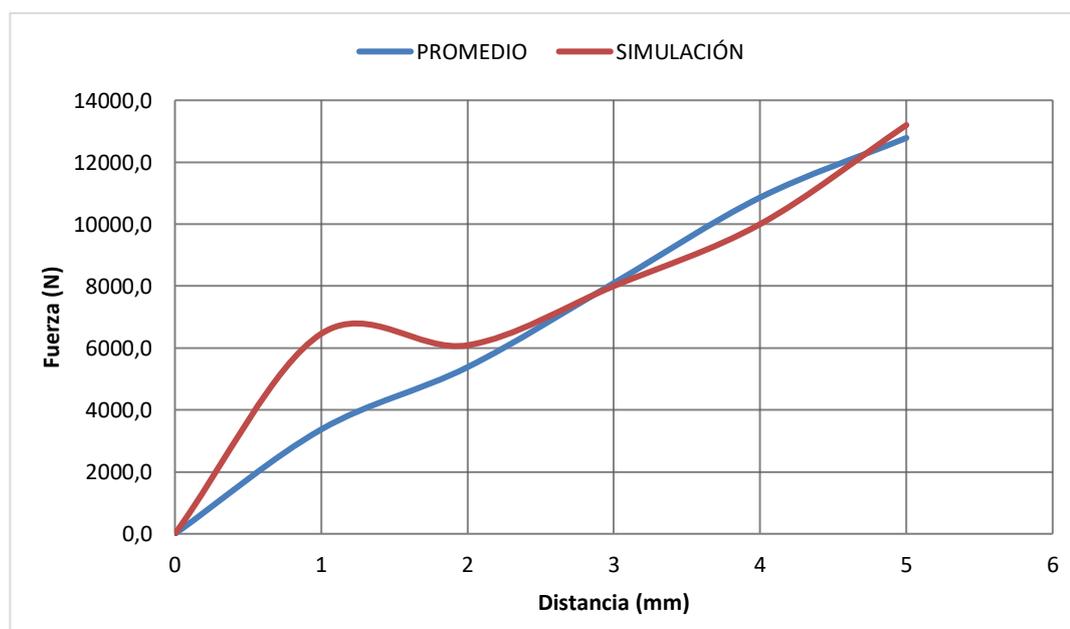


Figura 52. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de aluminio 3003 en frío, diámetro de disco de 100 mm.

- En la aleación de aluminio 3003 con un diámetro de disco de 100 mm, podemos concluir que el error porcentual promedio es de 6.1%, sin considerar el error porcentual a un altura de 1 mm en donde el error es muy elevado, debido a que la fuerza del prensachapas no es constante durante el ensayo de embutido al momento que la chapa fluye plásticamente al interior de la matriz.
- En un diámetro de disco de 100 mm, no se pudo realizar el cálculo del error porcentual de la carga máxima de embutido, debido a que en el ensayo el material se fractura a una altura promedio de 6.7 mm.

En la tabla 44 se muestran los valores obtenidos para el cálculo del error de la embutición en frío para la aleación de cobre C24000, con un diámetro de disco de 80 mm. La altura marcada con (*) muestra la fuerza máxima de embutición.

Tabla 44.

Cálculo del error para la aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80mm.

| | Promedio | Simulación | Error |
|-------------|------------|------------|-------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | % |
| 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 1 | 6188,3 | 14700 | 57,9 |
| 2 | 8551,7 | 10500 | 18,6 |
| 3 | 11297,7 | 10600 | 6,6 |
| 4 | 14279,0 | 13100 | 9,0 |
| 5 | 18902,7 | 17200 | 9,9 |
| 6 | 23078,3 | 23100 | 0,1 |
| 7 | 26155,0 | 28900 | 9,5 |
| 8 | 28855,0 | 32600 | 11,5 |
| 9 | 31800,3 | 37200 | 14,5 |
| 10 | 33381,3 | 39900 | 16,3 |

Continua 

| | | | |
|----------------------------------|---------|-------|-------------|
| 11 | 34441,0 | 41000 | 16,0 |
| 12 | 34654,0 | 40500 | 14,4 |
| 13 | 35342,0 | 38600 | 8,4 |
| 14 | 35552,7 | 38000 | 6,4 |
| 15 | 35490,3 | 38400 | 7,6 |
| 16 | 37920,0 | 38000 | 0,2 |
| 17 (*) | 38441,0 | 38400 | 0,1 |
| 18 | 35340,3 | 37900 | 6,8 |
| 19 | 34609,0 | 37200 | 7,0 |
| 20 | 33870,7 | 35400 | 4,3 |
| Error porcentual promedio | | | 10,7 |

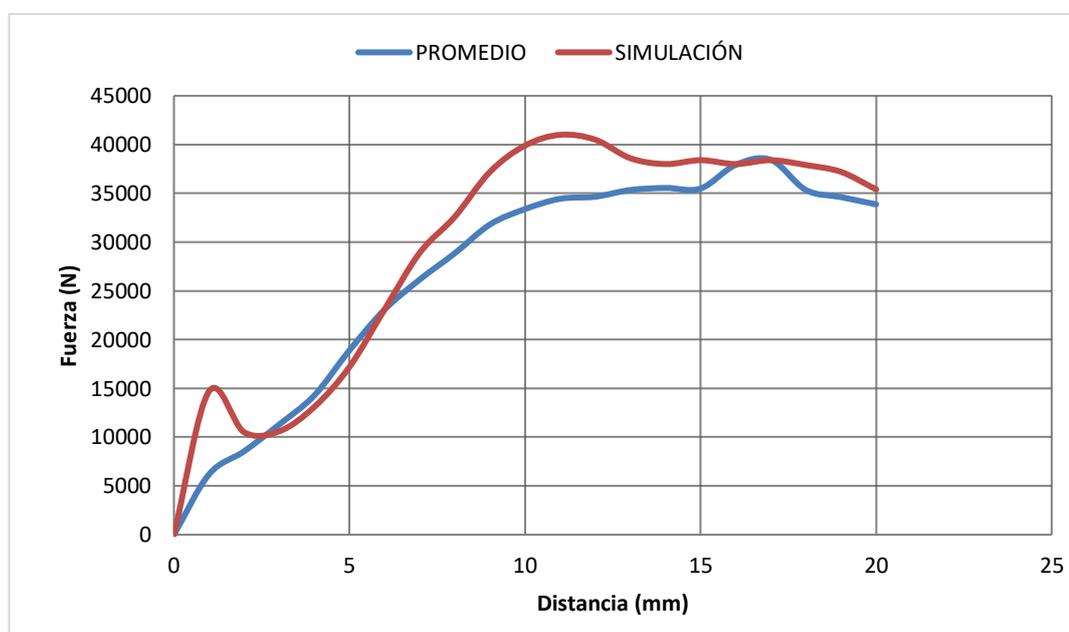


Figura 53. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 80 mm.

- El cálculo del error porcentual promedio para el embutido de la aleación de cobre C24000 con diámetro de disco de 80 mm en frío, es de 10.7%.
- El valor del error para la fuerza máxima promedio para la aleación de cobre C24000 en la embutición en frío es del 0.1%.

- Si se determina el error promedio en la región donde las curvas tienen un comportamiento similar, este sería del 8.4%.

La tabla 45 muestra los valores obtenidos para el cálculo del error de la embutición en caliente para la aleación de cobre C24000, con un diámetro de disco de 80 mm. La altura marcada con (*) muestra la fuerza máxima de embutición.

Tabla 45.

Cálculo del error para la aleación de cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80mm.

| | Promedio | Simulación | Error |
|-------------|------------|------------|-------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | % |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 5607 | 11800 | 52,5 |
| 2 | 6972 | 8180 | 14,8 |
| 3 | 8291 | 8090 | 2,5 |
| 4 | 10390 | 9850 | 5,5 |
| 5 | 12502 | 12300 | 1,6 |
| 6 | 15456 | 16800 | 8,0 |
| 7 | 18591 | 20900 | 11,0 |
| 8 | 21198 | 24100 | 12,0 |
| 9 | 22209 | 25800 | 13,9 |
| 10 | 23521 | 27100 | 13,2 |
| 11 | 25103 | 28400 | 11,6 |
| 12 | 25575 | 26900 | 4,9 |
| 13 | 25332 | 27100 | 6,5 |
| 14 | 26352 | 27600 | 4,5 |
| 15 (*) | 26572 | 27900 | 4,8 |
| 16 | 26460 | 28000 | 5,5 |
| 17 | 25466 | 28000 | 9,1 |
| 18 | 24418 | 26800 | 8,9 |

Continua 

| | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------------|
| 19 | 23157 | 25900 | 10,6 |
| 20 | 21142 | 24400 | 13,4 |
| Error porcentual promedio | | | 10,2 |

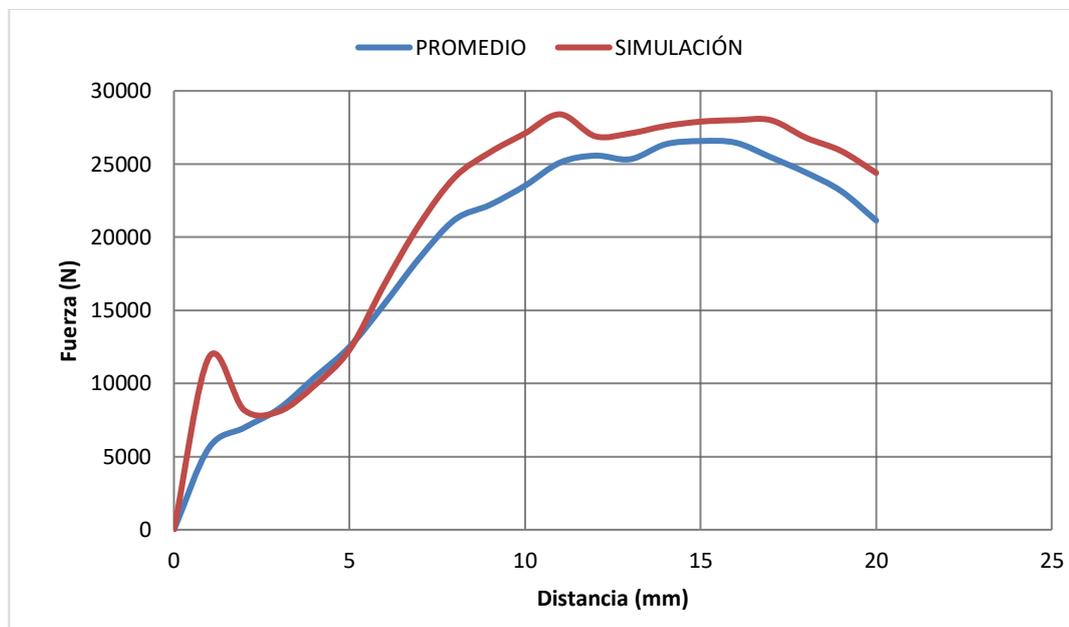


Figura 54. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación cobre C24000 en caliente, diámetro de disco de 80 mm.

- El cálculo del error porcentual promedio para el embutido de la aleación de cobre C24000 con diámetro de disco de 80 mm en caliente, es de 10.2%.
- Si se determina el error promedio en la región donde las curvas tienen un comportamiento similar, este sería del 8.12%.
- El error para la fuerza máxima promedio para la aleación de cobre C24000 en caliente es del 4.8%.

La tabla 46 muestra los valores obtenidos para el cálculo del error de la embutición en frío para la aleación de cobre C24000, con un diámetro de disco de 100 mm.

Tabla 46.

Cálculo del error para la aleación de cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100mm.

| | Promedio | Simulación | Error |
|----------------------------------|------------|------------|-------------|
| Altura (mm) | Fuerza (N) | Fuerza (N) | % |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 10477 | 15700 | 33,2 |
| 2 | 13023 | 11000 | 18,3 |
| 3 | 17737 | 16900 | 4,95 |
| 4 | 22738 | 22000 | 3,36 |
| 5 | 28845 | 30000 | 3,85 |
| Error porcentual promedio | | | 10,6 |

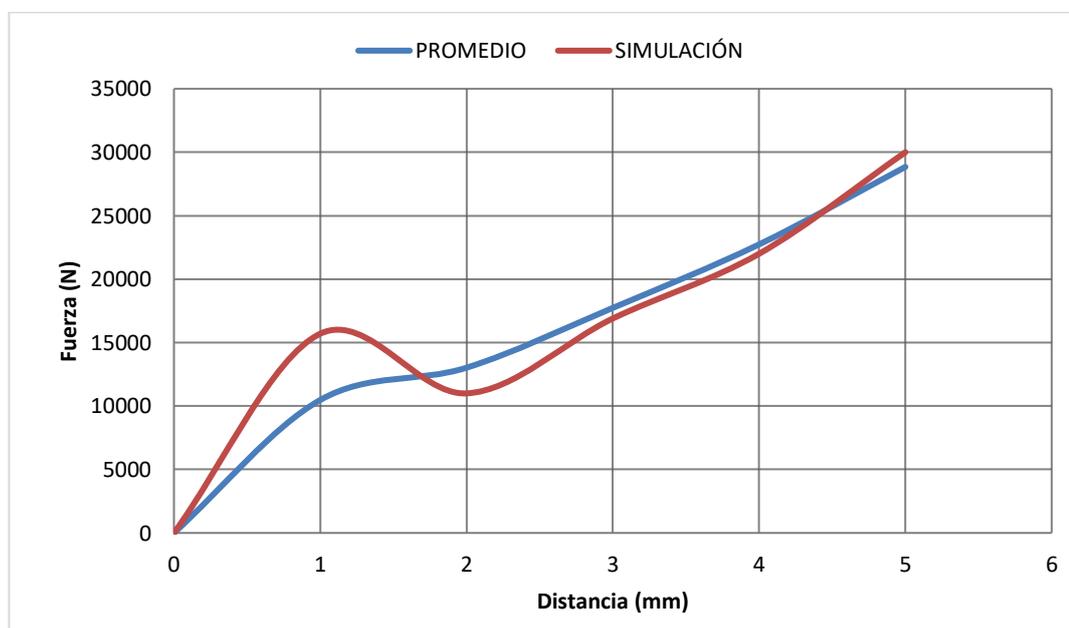


Figura 55. Curvas fuerza vs altura, promedio ensayos y simulación, aleación cobre C24000 en frío, diámetro de disco de 100 mm.

- En la aleación de cobre C24000 con un diámetro de disco de 100 mm, podemos concluir que el error porcentual promedio es de 10.6%, debido a que la fuerza del prensachapas no es constante durante el ensayo.

- En un diámetro de disco de 100 mm, no se pudo realizar el cálculo del error porcentual de la carga máxima de embutido, debido a que en el ensayo el material se fractura a una altura promedio de 7.3 mm.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- Se realizó la manufactura e implementación del herramental del equipo de embutición, para aleaciones de aluminio 3003 y aleaciones de cobre C24000 de 1 mm de espesor, con diámetro de disco de 80 mm, para una profundidad de 25 mm.
- La prensa hidráulica tenía una carga de 3.5 toneladas, en donde se realizó el cambio del cilindro hidráulica llegando a obtener una carga de 8.83 toneladas.
- El tiempo de procesamiento de la solución de la simulación del embutido en el software CAE, fue de 5 horas 16 minutos 42 segundos.
- Con la simulación en el software CAE, por el método de elementos finitos, se pudo analizar el comportamiento del material sometido al proceso de embutición en frío y en caliente, para compararlo con el ensayo.
- Al comparar los datos promedios de fuerza de los ensayos con los datos de la simulación de la aleación de aluminio 3003 con un disco de diámetro 80mm en donde las curvas tienen un comportamiento similar, en frío obtuvimos un error porcentual promedio de 6.5%, y en caliente de 12.2% y para un diámetro 100 mm un error promedio de 6.1 %.
- Al comparar los datos promedio de carga de los ensayos con los datos de la simulación de la aleación de cobre C24000 con un disco de diámetro 80mm, en frío obtuvimos un error porcentual promedio de 10.7 %, y en caliente de 10.2% y para un diámetro 100 mm un error de 10.6%.
- La fuerza máxima para la embutición en caliente es menor que la de embutición en frío, para la aleación de aluminio 3003 disminuyo en un 35.8% y para la aleación de cobre C24000 en 32.2%.

- Para un diámetro de 100 mm y un espesor de 1 mm, se necesita mayor carga del punzón, y una fuerza del prensachapas constante.

8.2 Recomendaciones

- Para la manufactura de la matriz y de punzón considerar la holgura que debe existir entre estos componentes, para evitar que se produzcan defectos de corte al momento de realizar los ensayos.
- Se recomienda tener un ajuste correcto de los pernos guías hacia las placas bases de la celda, del punzón y de la matriz, para impedir que exista descentramiento entre los elementos.
- No alimentar la prensa hidráulica, sin antes haber conectado el cable USB de la tarjeta de adquisición de datos al computador, puede provocar una sobre carga en la tarjeta.
- Es recomendable tomar en cuenta la fuerza de sujeción del prensa chapas para los ensayos de embutición, puesto que puede afectar en la calidad final del producto.
- Es necesario conocer con mayor profundidad el proceso que se quiere simular así como del software CAE a emplear, para poder definir el modelo con el que se va a trabajar, aplicar cargas, desplazamientos, establecer contactos entre los elementos y la fricción que existe entre estos, para ejecutar de forma más fiel al proceso real.
- No sobrecargar la celda de carga en los ensayos de embutido, ésta puede llegar a sobresaturarse y empezar a enviar valores incorrectos durante el proceso.
- En el ensayo de embutido en caliente tomar las medidas correspondientes para los tiempos de trabajo y considerar las propiedades de los materiales a utilizar para evitar su enfriamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Abascal-Escribano. (2014). *Documentación y análisis: Conformado de productos sin arranque de viruta*. Recuperado el 15 de noviembre del 2016, de <http://de-duce-tu.blogspot.com/p/embuticion-2.html>
- Academia. (2017). *Ensayo prensas, troquelado, embutido de metales*. Recuperado el 10 de noviembre del 2016, de https://www.academia.edu/20440776/Ensayo_prensas_troquelado_embutido_de_metales
- Aguilar, J. (2010). *Cobre y sus aleaciones. Valparaíso - Chile: Universidad Técnica Federico Santa María*.
- Blanks, M. A. (2017). *Información técnica Aleaciones de aluminio*. Recuperado el 16 de octubre del 2016, de <http://www.meyer-mab.com/es/technical-information/>
- Carvalho, J. (2003). *Simulación Numérica de Procesos de estampado de Chapas Metálicas*. Brasil: Universidad de Minho.
- Cobre, I. E. (2017). *El cobre*. Recuperado el 12 de octubre del 2016, de <http://www.copperalliance.es/el-cobre/aleaciones>
- Definición ABC. (2017). Definición ABC. *Los materiales*. Recuperado el 10 de octubre del 2016, de <https://www.definicionabc.com/general/materiales.php>
- Dieter, G. (1970). *Mechanical Metallurgy*. E.U.A.: McGraw-Hill.
- Estudiantesmetalografia. (2010). Metalografía-Universidad Tecnológica de Pereira. *Procesos de conformado plástico de metales*. Recuperado el 12 de septiembre de 2016, de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/8-procesos-de-conformado-plastico-de-metales/>
- Gallegos, C. (2013). *Metalurgia y Materiales*. Recuperado el 23 de noviembre del 2016, de <http://cesarmetalugista.blogspot.com/p/aleaciones-de-aluminio.html?view=timeslide>
- Gao, J., Tang, Y., & Sharma, R. (2000). A feature model editor and process planning system for sheet metal products. *Journal of Materials Processing Technology*, 88-95.
- González, H., & Mesa, D. (2004). *La importancia del método en la selección de materiales. Scientia et Technica Año X*, 175-180
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México: Mc Graw Hill.
- Groover, M. P. (2012). *Introducción a los Procesos de Manufactura*. Mexico: Alafi Impresores S.A. de C.V.

- Grupo Wieland. (2017). *Productos Laminados c24000*. Recuperado el 26 de octubre del 2016, de http://www.cimsaww.com/internet/media/fichas_t_cnicas_aleaciones/m_z/M20_E.pdf
- Grupo Wieland. (2017). *La embutición*. Recuperado el 25 de octubre del 2016, de http://www.cimsaww.com/internet/es/cupropedia/industrias/la_embuticion.jsp#content
- Guzmán, J. (2010). *Rediseño de un herramental de embutido y su implementación para la ejecución del Ensayo Erichsen*. México: UNAM
- Ibars, J. (2007). *Aluminio y Aleaciones de aluminio*. Recuperado el 10 de octubre del 2016, de <http://studyres.es/doc/3309270/tema-2.23-aluminio-y-aleaciones-de-aluminio>
- ICEI. (2017). *Aluminio Inoxidable*. Recuperado el 20 de octubre del 2016, de <http://icei.es/wp-content/uploads/2015/06/ALEACION-3003.pdf>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Monterrey-México: Pearson Educación.
- Kienzle, O. (1963). Classes and Characteristics of Plastic-Deformation Processes. *Machine Design*, 200-207.
- Kutz, M. (1990). *Enciclopedia de la Mecánica Ingeniería y Técnica*. Barcelona-España: Océano.
- Kuzu, Decolataje. (2014). *El latón y su mecanizado*. Recuperado el 20 de octubre del 2016, de <http://kuzudecolataje.es/el-laton-y-su-mecanizado/>
- Lefevre, R. (2014). Estructura Materiales. *Conocimiento de Materiales*. Recuperado el 10 de octubre del 2016, de <http://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/3076/20501-14%20Conocimientos%20de%20materiales.pdf?sequence=1>.
- Lobecor. (2016). Lobecor. Recuperado el 20 de noviembre del 2016, de <http://www.lobecor.es/servicios/prensas/>
- Maffia, E. (2013). *Estructura y propiedades de las aleaciones, Aluminio y sus aleaciones*. La Plata-Argentina: Universidad Nacional de la Plata
- Maffia, E. (2013). *Estructura y propiedades de las aleaciones, Cobre y sus aleaciones*. La Plata-Argentina: Universidad Nacional de la Plata
- National Instruments. (2017). *My DAQ*. Recuperado el 15 de enero del 2017, de <http://www.ni.com/mydaq/esa/>
- Novoa, A., & Villanueva, V. (2013). *Diseño y construcción de un equipo semiautomático para recalcado en caliente para el laboratorio de Procesos de Manufactura II de la Escuela Politécnica del Ejército*. Sangolquí-Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.

- Nunes, et al. (1991). *Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*. United States of America. ASM
- Oehler, G. (1977). *Herramienta de Troquelar, Estampar y Embutir*. Barcelona-España: Gustavo Gili.
- Ortolá, S. (17 de Abril de 2009). *Manual del Aluminio y sus Aleaciones*. Recuperado el 16 de octubre del 2016, de <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>
- Rice Lake Weighing Systems. (2016). *Load Cells*. Recuperado el 10 de enero del 2017, de <https://www.ricelake.com/en-us/products/load-cells-weigh-modules/load-cells>
- Rodríguez, J., & Castro, L. (2006). *Procesos Industriales para materiales metálicos*. Madrid: Editorial Visión.
- Romero, M., Hodalgo, B., & Velandia, M. (2009). Caracterización microestructural de la aleación AA-3003 con temple H14. *Revista COPÉRNICO*, 60-66.
- Schey, J. (1983). *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear*. Ohio - Estados Unidos: Metals Park.
- Timings, R. (2002). *Tecnología de la Fabricación: Procesos y Materiales de Taller*. México: DF: Alfa-Omega.
- Villamar, V. (2008). *Diseño de una prensa hidráulica para elaborar pocetas de acero inoxidable*. Gauayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Wick, C. (1983-1992). *Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians. (V.II Forming)*. Society of Manufacturing Engineers.