



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN INCREMENTAL EN CHAPAS DE ALUMINIO AA 1200 H14”

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

MAIGUA BARRENO CHRISTIAN ANDRÉS
christian.maigua@epn.edu.ec

VELASTEGUÍ MASAPUNCHO DARWIN SANTIAGO
darwin.velastegui@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. CARLOS SUNTAXI, M.Sc.
segundo.suntaxi@epn.edu.ec

COORDIRECTOR: ING. WILLAN MONAR, M.Sc.
william.monar@epn.edu.ec

Quito, abril 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CHRISTIAN ANDRÉS MAIGUA BARRENO** y **DARWIN SANTIAGO VELASTEGUI MASAPUNCHO**, bajo mi supervisión.

Ing. Suntaxi Guallichico Segundo Carlos
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Monar Monar Willan Leopoldo
CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **CHRISTIAN ANDRÉS MAIGUA BARRENO** y **DARWIN SANTIAGO VELASTEGUI MASAPUNCHO**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Christian Maigua

Santiago Velasteguí

DEDICATORIA

Este trabajo final se lo dedico a Dios, a mis padres y mis hermanos que durante todo mi trayecto de formación profesional estuvieron apoyándome incondicionalmente en todo momento. Juntos han sido los pilares de mi vida y mi mayor fortaleza y motivación para alcanzar mis sueños.

Santiago

Dedico este trabajo al Diseñador de diseñadores, Señor Jesús.

Christian

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado durante toda mi etapa universitaria, por ayudarme a superar cada obstáculo, por levantarme en mis momentos de debilidad y hacer de cada día una nueva oportunidad para aprender.

Agradezco a mis padres por apoyarme en todo momento, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación, por haberme brindado la oportunidad de tener una excelente formación académica y por todos los valores que me han inculcado durante todo el transcurso de mi vida. Agradezco especialmente a mi madre por su tiempo, preocupación, consejos, por cuidar de mí en mis momentos de debilidad y por la compañía que semana a semana me supo brindar.

Agradezco a mis hermanos por ser un ejemplo de unidad, profesionalismo y generosidad. Por sus palabras de aliento y el sinnúmero de detalles y atenciones que han tenido conmigo a lo largo de mi vida estudiantil.

A mis amigos por haber hecho de mi etapa universitaria un camino de experiencias que nunca olvidaré. A Christian por ser un excelente compañero de tesis y amigo, por motivarme en los momentos de desesperación y por haberme tenido la paciencia necesaria para desarrollar este proyecto. A mi novia, por ser mi inspiración y motivación para continuar y ayudarme a nunca darme por vencido.

A mis directores de tesis Carlos Suntaxi y Willan Monar, por su directriz y apoyo durante la realización de este proyecto. Por el tiempo brindado y la oportunidad de trabajar conjuntamente. A la Escuela Politécnica Nacional por abrirme las puertas y darme la oportunidad para culminar mi formación profesional como Ingeniero Mecánico.

Santiago

Agradezco a mi Señor Jesús, por la oportunidad de prepararme y a pesar de mis errores. A mis padres que, por su esfuerzo, guía y amor me han permitido culminar esta etapa de mi vida.

A mis hermanas; Lorena, Ligia, Verónica, Alicia, Carmen, Wendy, Mishell, María José, que en todo momento fueron de ayuda en lo estudiantil y en personal sin ustedes tampoco hubiera podido terminar mis estudios.

A mis Tíos Carlos y Alicia que siempre confiaron en mí, considero vitales todos sus consejos y apoyos durante toda mi vida.

A mi compañero y amigo Santiago Velasteguí, que acepto compartir este trayecto muy importante de estudios.

A mi amigo Julio Guamán, él fue quien formo el inicio de mi vida como mecánico y la base práctica para ser un buen profesional.

A los ingenieros, Carlos Suntaxi y Willan Monar, que con su dirección y oportuna ayuda supieron sobrellevar conflictos, también por vivir la alegría de nuestros logros.

A todos los que conforman el laboratorio de máquinas y herramientas de la FIM, en especial al Ingeniero Carlos Jaramillo, Don Miguel, Luis y Diego, gracias por ese esfuerzo.

Al laboratorio LABINTECDIMP, en especial a los ingenieros, Mario Cesén y Javier Valverde gracias por su apoyo.

A todos los que me apoyaron en la Escuela Politécnica Nacional.

Christian

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 17 |
| Pregunta de Investigación..... | 18 |
| Objetivo general..... | 18 |
| Objetivos específicos..... | 18 |
| Alcance..... | 18 |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 19 |
| 1.1. Procesos de deformación en chapas metálicas..... | 19 |
| 1.1.1. Doblado..... | 19 |
| 1.1.2. Embutido..... | 20 |
| 1.1.3. Repujado..... | 20 |
| 1.1.4. Estampado..... | 21 |
| 1.1.5. Estirado..... | 21 |
| 1.1.6. Hidroformado..... | 22 |
| 1.1.7. Conformado incremental..... | 22 |
| 1.2. Procesos de conformado incremental..... | 23 |
| 1.2.1. Control de la trayectoria de la herramienta..... | 24 |
| 1.2.2. Conformado incremental mono punto..... | 25 |
| 1.2.2.1. Consideraciones de la herramienta..... | 26 |
| 1.2.2.2. Consideraciones del soporte..... | 26 |
| 1.2.2.3. Equipos para deformación incremental..... | 27 |
| 1.3. Propiedades y aplicaciones del aluminio AA 1200 H14..... | 28 |
| 1.4. Estudio de la deformación plástica..... | 28 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 34 |
| 2.1. Diseño y selección de los elementos mecánicos del banco de pruebas..... | 34 |
| 2.1.1. Identificación de la necesidad o reconocimiento de la oportunidad..... | 34 |
| 2.1.2. Planteamiento del problema..... | 34 |
| 2.1.3. Determinación de las especificaciones técnicas..... | 34 |
| 2.2. Diseño conceptual..... | 38 |
| 2.2.1. Estructura funcional..... | 38 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.2. | Análisis modular de alternativas de diseño | 41 |
| 2.2.3. | Módulo 1: Sujetar la chapa | 41 |
| 2.2.4. | Módulo 2: Deformar la chapa..... | 46 |
| 2.2.5. | Módulo 3: Medir cargas verticales | 51 |
| 2.2.6. | Matriz morfológica | 55 |
| 2.2.7. | Simulación del proceso..... | 55 |
| 2.3. | Diseño de detalle de los componentes..... | 58 |
| 2.3.1. | Cálculo del espesor de la mordaza superior | 59 |
| 2.3.2. | Cálculo de la placa base de la mordaza inferior..... | 61 |
| 2.3.3. | Cálculo de la junta atornillada de la mordaza..... | 63 |
| 2.3.4. | Cálculo de las columnas..... | 67 |
| 2.3.5. | Cálculo de la base de la estructura..... | 71 |
| 2.3.6. | Selección de la celda de carga | 73 |
| 2.3.7. | Cálculo de los separadores de la celda | 73 |
| 2.3.8. | Cálculo de los pasadores guía..... | 76 |
| 2.3.9. | Cálculo de la placa de anclaje | 77 |
| 2.3.10. | Cálculo de las herramientas..... | 78 |
| 2.4. | Elaboración de planos..... | 82 |
| 2.5. | Construcción del prototipo..... | 82 |
| 2.5.1. | Construcción del soporte..... | 82 |
| 2.5.2. | Construcción del vástago | 83 |
| 2.5.3. | Ensamble del soporte..... | 84 |
| 2.5.4. | Montaje del banco de pruebas | 85 |
| 2.6. | Proceso para realizar la experimentación..... | 86 |
| 2.6.1. | Nombre del proceso: Protocolo de pruebas | 86 |
| 2.7. | Análisis de costos de fabricación | 87 |
| 2.7.1. | Costos de mano de obra | 88 |
| 2.7.2. | Costos de materia prima | 88 |
| 2.7.3. | Costos indirectos de fabricación..... | 90 |
| 2.7.4. | Costo total del banco de pruebas..... | 90 |
| 2.8. | Definición de variables del proceso..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| 2.8.1. Diámetro de la herramienta D | 91 |
| 2.8.2. Velocidad de avance v | 91 |
| 2.8.3. Profundidad de penetración Δz | 91 |
| 2.8.4. Espesor de la chapa t_0 | 92 |
| 2.9. Fabricación de una pieza modelo | 92 |
| 2.10. Medidas de la deformación plástica | 94 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 96 |
| 3.1. Resultados obtenidos de la simulación de la chapa | 96 |
| 3.2. Resultados obtenidos mediante ensayos en SPIF | 96 |
| 3.2.1. Curvas de carga vs tiempo para las tres herramientas | 97 |
| 3.2.3. Curvas de carga vs distancia recorrida por las tres herramientas | 98 |
| 3.2.4. Piezas modelo realizadas experimentalmente mediante proceso SPIF y sus deformaciones principales | 99 |
| 3.3. Discusión de resultados | 99 |
| 4. CONCLUSIONES | 103 |
| Referencias Bibliográficas | 105 |
| Anexos | 107 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Esquema del proceso de doblado. | 19 |
| Figura 1. 2. Esquema del proceso de embutido. | 20 |
| Figura 1. 3. Esquema del proceso de repujado. | 20 |
| Figura 1. 4. Esquema del proceso de estampado. | 21 |
| Figura 1. 5. Esquema del proceso de estirado. | 22 |
| Figura 1. 6. Esquema del proceso de hidroconformado. | 22 |
| Figura 1. 7. Esquema del proceso de deformación incremental. | 23 |
| Figura 1. 8. Variantes del proceso de deformación incremental. | 24 |
| Figura 1. 9. Esquema del conformado incremental. | 25 |
| Figura 1. 10. Herramienta de conformado incremental. | 26 |
| Figura 1. 11. Utillaje de sujeción de la chapa. | 27 |
| Figura 1. 12. Maquinaria para desarrollar SPIF (Amino y brazo robótico). | 27 |
| Figura 1. 13. Región de chapa que muestra: (a) el estado no deformado con patrón de círculos; (b) el estado deformado y (c) las fuerzas transmitidas por unidad de ancho. | 29 |
| Figura 1. 14. Modos de deformación de diferentes relaciones de deformación. | 31 |
| Figura 1. 15. Modo de deformación cuando $\beta = 1$ | 31 |
| Figura 1. 16. Modo de deformación cuando $\beta = 0$ | 32 |
| Figura 1. 17. Modo de deformación cuando $\beta = -1/2$ | 32 |
| Figura 1. 18. Modo de deformación cuando $\beta = -1$ | 32 |
| Figura 1. 19. Modo de deformación cuando $\beta = -2$ | 33 |
| Figura 2. 1. Esquema de la estructura funcional global de un producto. | 39 |
| Figura 2. 2. Nivel 0 de la estructura funcional del banco. | 39 |
| Figura 2. 3. Nivel 1 de la estructura funcional del banco. | 39 |
| Figura 2. 4. Nivel 2 de la estructura funcional del banco. | 40 |
| Figura 2. 5. Mordaza con prensa de palanca. | 42 |
| Figura 2. 6. Mordaza de ranura empernada. | 43 |
| Figura 2. 7. Mordaza moleteada y empernada. | 44 |
| Figura 2. 8. Herramienta de sección circular continua y punta esférica. | 47 |
| Figura 2. 9. Herramienta de punta esférica rotativa. | 48 |
| Figura 2. 10. Herramienta cónica con punta esférica. | 49 |
| Figura 2. 11. Celda de carga. | 52 |
| Figura 2.12. Galga extensiométrica. | 52 |
| Figura 2.13. Puente Wheatstone. | 53 |
| Figura 2. 14. Carga aplicada por la herramienta en el eje Z. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 2. 15. Condiciones de borde..... | 57 |
| Figura 2. 16. Configuración del material respecto al endurecimiento por deformación en el entorno de simulación..... | 57 |
| Figura 2. 17. Configuración de la ruta de la herramienta..... | 58 |
| Figura 2. 18. Diagrama de cuerpo libre de la mordaza..... | 59 |
| Figura 2. 19. Distribución de esfuerzos de Von Mises para la mordaza..... | 59 |
| Figura 2. 20. Deformaciones en la mordaza..... | 60 |
| Figura 2. 21. Factor de seguridad para la mordaza..... | 60 |
| Figura 2. 22. Diagrama de cuerpo libre de la base de la mordaza..... | 61 |
| Figura 2. 23. Diagrama de momento flector para la base de la mordaza..... | 61 |
| Figura 2. 24. Junta atornillada de la mordaza..... | 63 |
| Figura 2. 25. Diagrama de cuerpo libre de la mordaza superior..... | 64 |
| Figura 2. 26. Diagrama de cuerpo libre de las columnas..... | 67 |
| Figura 2. 27. Valores de K para obtener longitud efectiva, $Le = KL$ para distintas conexiones en los extremos..... | 68 |
| Figura 2. 28. Diagrama de cuerpo libre para la base del banco de pruebas..... | 71 |
| Figura 2. 29. Distribución de esfuerzos de Von Mises para la base del banco..... | 72 |
| Figura 2. 30. Deformación en la base del banco..... | 72 |
| Figura 2. 31. Factor de seguridad para la base del banco..... | 73 |
| Figura 2. 32. Ubicación de los separadores..... | 74 |
| Figura 2. 33. Diagrama de cuerpo libre de los separadores..... | 74 |
| Figura 2. 34. Esfuerzo equivalente máximo de Von Mises para el separador..... | 75 |
| Figura 2. 35. Deformación total del separador..... | 75 |
| Figura 2. 36. Factor de seguridad para el separador..... | 75 |
| Figura 2. 37. Diagrama de cuerpo libre de los pasadores..... | 76 |
| Figura 2. 38. Diagrama de cuerpo libre de la placa de anclaje..... | 77 |
| Figura 2. 39. Diagrama de momento flector de la placa de anclaje..... | 77 |
| Figura 2. 40. Herramienta de punta hemisférica, con sus respectivas cargas..... | 79 |
| Figura 2. 41. Diagrama de cuerpo libre para la herramienta de punta hemisférica..... | 79 |
| Figura 2. 42. Diagrama de momento flector para la herramienta en estado estático..... | 80 |
| Figura 2. 43. Montaje del banco de pruebas..... | 86 |
| Figura 2. 44. Banco de pruebas experimental SPIF montado en una fresadora CNC Viwa..... | 92 |
| Figura 2. 45. Geometría y dimensiones escogidas para la pieza modelo..... | 93 |
| Figura 2. 46. Fabricación de pieza modelo mediante SPIF..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figura 2. 47. Pieza modelo de forma irregular mediante SPIF. | 94 |
| Figura 2. 48. Chapa con patrón de círculos en estado deformado y no deformado. | 95 |
| Figura 2. 49. Patrón de círculos antes y después de la deformación mediante SPIF. | 95 |
| Figura 2. 50. Criterios para esfuerzos de diseño. | 115 |
| Figura 2. 51. Clases métricas de las propiedades mecánicas de los pernos. | 116 |
| Figura 2. 52. Diámetros y área de roscas métricas de paso grueso y fino. | 116 |
| Figura 2. 53. Longitud roscada para tornillos métricos con sujetadores roscados. | 117 |
| Figura 2. 54. Compresión de un elemento representadas por un tronco hueco. | 117 |
| Figura 2. 55. Factores de confiabilidad aproximados. | 118 |
| Figura 2. 56. Factor de tamaño. | 119 |
| Figura 2. 57. Factor de concentración de esfuerzos. | 119 |
| Figura 3. 1. Predicción de la carga aplicada por medio de un software de elementos finitos. | 96 |
| Figura 3. 2. Gráfica de carga vs tiempo con herramientas de 3,5 y 7 mm. | 97 |
| Figura 3. 3. Comparación de la carga entre la simulación del proceso y la experimentación. | 98 |
| Figura 3. 4. Gráfica carga vs distancia recorrida por la herramienta de 3, 5 y 7 mm. | 98 |
| Figura 3. 5. Piezas cónicas realizadas mediante SPIF con herramientas de diámetro: (a) 3 mm; (b) 5 mm; y (c) 7 mm. | 99 |
| Figura 3. 6. Normas de embutido en forma de cono truncado. | 101 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2. 1. Voz del usuario vs voz del ingeniero. | 36 |
| Tabla 2. 2. Conflictos existentes en la matriz de compromisos. | 37 |
| Tabla 2. 3. Especificaciones técnicas para el banco de pruebas. | 38 |
| Tabla 2. 4. Módulos determinados para el banco de pruebas. | 41 |
| Tabla 2. 5. Valores asignados para la evaluación de los criterios. | 41 |
| Tabla 2. 6. Ventajas y desventajas de la solución A del módulo 1. | 42 |
| Tabla 2. 7. Ventajas y desventajas de la solución B del módulo 1. | 43 |
| Tabla 2. 8. Ventajas y desventajas de la solución C del módulo 1. | 44 |
| Tabla 2. 9. Evaluación de los pesos específicos para las alternativas del módulo 1. ... | 45 |
| Tabla 2. 10. Evaluación del criterio Volumen del módulo 1. | 45 |
| Tabla 2. 11. Evaluación del criterio Fuerza del módulo 1. | 45 |
| Tabla 2. 12. Evaluación del criterio Espesores del módulo 1. | 45 |
| Tabla 2. 13. Evaluación del criterio Costos del módulo 1. | 46 |
| Tabla 2. 14. Conclusiones de prioridad de solución del módulo 1. | 46 |
| Tabla 2. 15. Ventajas y desventajas de la solución A módulo 2. | 47 |
| Tabla 2. 16. Ventajas y desventajas de la solución B módulo 3. | 48 |
| Tabla 2. 17. Ventajas y desventajas de la solución C módulo 2. | 49 |
| Tabla 2. 18. Evaluación de los pesos específicos para los criterios del módulo 3. | 50 |
| Tabla 2. 19. Evaluación del criterio Acople del módulo 2. | 50 |
| Tabla 2. 20. Evaluación del criterio Resistencia del módulo 2. | 50 |
| Tabla 2. 21. Evaluación del criterio Configuración del módulo 2. | 50 |
| Tabla 2. 22. Evaluación del criterio Costo del módulo 2. | 51 |
| Tabla 2. 23. Conclusiones de prioridad de solución del módulo 2. | 51 |
| Tabla 2. 24. Ventajas y desventajas de la solución A del módulo 3. | 52 |
| Tabla 2. 25. Ventajas y desventajas de la solución B del módulo 3. | 53 |
| Tabla 2. 26. Evaluación de los pesos específicos para los criterios del módulo 3. | 53 |
| Tabla 2. 27. Evaluación del criterio Señal del módulo 3. | 54 |
| Tabla 2. 28. Evaluación del criterio Modificación del módulo 3. | 54 |
| Tabla 2. 29. Evaluación del criterio Costos del módulo 3. | 54 |
| Tabla 2. 30. Evaluación del criterio Aplicación del módulo 3. | 54 |
| Tabla 2. 31. Conclusiones de prioridad de solución del módulo 3. | 55 |
| Tabla 2. 32. Matriz morfológica para decisión del diseño del banco de pruebas. | 55 |
| Tabla 2. 33. Materiales y maquinaria utilizada por elemento construido. | 83 |
| Tabla 2. 34. Orden de ensamble del soporte. | 84 |
| Tabla 2. 35. Costos de mano de obra. | 88 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 2. 36. Costos de materiales..... | 88 |
| Tabla 2. 37. Costos de elementos normalizados..... | 89 |
| Tabla 2. 38. Costos del circuito para celda de carga..... | 89 |
| Tabla 2. 39. Costos de materia prima. | 90 |
| Tabla 2. 40. Costos indirectos de fabricación..... | 90 |
| Tabla 2. 41. Costo total de banco. | 90 |
| Tabla 2. 42. Combinación de parámetros para las piezas modelos realizadas. | 93 |
| | |
| Tabla 3. 1. Deformaciones principales para cada herramienta..... | 99 |
| Tabla 3. 2. Cargas máximas obtenidas experimentalmente. | 100 |
| Tabla 3. 3. Coeficientes de embutición dependientes de d/D..... | 102 |
| Tabla 3. 4. Comparación de carga máxima necesaria para estampado y proceso SPIF..... | 102 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|-----|
| Ec. 1. 1. Estados de deformaciones en función de los diámetros de patrón y espesores de la chapa..... | 29 |
| Ec. 1. 2. Relación de deformación en función de los estados de deformación. | 30 |
| Ec. 1. 3. Estado de deformación del espesor de la chapa..... | 30 |
| Ec. 1. 4. Espesor final de la chapa..... | 30 |
| Ec. 1. 5. Deformaciones principales para una chapa. | 30 |
| Ec. 2. 1. Método del factor de diseño o el método clásico de diseño. | 62 |
| Ec. 2. 2. Fórmula para la flexión en vigas. | 62 |
| Ec. 2. 3. Inercia en una sección rectangular. | 62 |
| Ec. 2. 4. Distancia al eje neutro de la viga rectangular..... | 62 |
| Ec. 2. 5. Espesor de la placa en función del momento flector, ancho de placa y el esfuerzo de diseño. | 63 |
| Ec. 2. 6. Sumatorio de fuerzas en el eje x de la mordaza superior..... | 64 |
| Ec. 2. 7. Factor de seguridad a la fluencia estática de los pernos. | 65 |
| Ec. 2. 8. Factor de carga de los pernos..... | 65 |
| Ec. 2. 9. Factor de seguridad contra la separación. | 65 |
| Ec. 2. 10. Rigidez del perno. | 66 |
| Ec. 2. 11. Inverso de la rigidez total de la junta. | 66 |
| Ec. 2. 12. Rigidez de cada elemento..... | 66 |
| Ec. 2. 13. Fracción de la carga soportada por cada perno. | 66 |
| Ec. 2. 14. Precarga en función de la resistencia de prueba..... | 67 |
| Ec. 2. 15. Longitud efectiva de la columna..... | 68 |
| Ec. 2. 16. Diámetro de la columna de sección circular, para una columna larga. | 69 |
| Ec. 2. 17. Radio de giro de la columna. | 69 |
| Ec. 2. 18. Radio de giro de la columna en función del diámetro. | 69 |
| Ec. 2. 19. Relación de esbeltez..... | 70 |
| Ec. 2. 20. Constante de columna. | 70 |
| Ec. 2. 21. Carga crítica de pandeo..... | 70 |
| Ec. 2. 22. Fórmula para la flexión en secciones circulares..... | 80 |
| Ec. 2. 23. Fórmula para el diseño de ejes a flexión y torsión..... | 81 |
| Ec. 2. 24. Resistencia a la fatiga modificada. | 81 |
| Ec. 3. 1. Fuerza de embutido. | 102 |

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo el diseño y construcción de un banco de pruebas para estudio de deformación incremental en chapas de aluminio, y con esto equipar de un nuevo proceso de conformado en chapas metálicas al laboratorio de conformado mecánico de la FIM, además de que se pueda transferir conceptos innovadores que ayuden a mejorar los procesos convencionales referentes a la deformación en chapas que actualmente dispone el sector productivo del país.

Para el diseño y construcción del banco se utilizó como punto de partida la simulación del proceso donde el estudio del comportamiento de la chapa respecto a la carga vertical permitió dimensionar acertadamente sus componentes, se utilizó la metodología del diseño concurrente, esto englobó; la voz del usuario e ingeniero, la casa de la calidad, las especificaciones técnicas, los módulos de diseño, el análisis de soluciones, el cálculo y selección de los componentes, los costos de producción, la elaboración de planos, el protocolo de pruebas, y se construyó un prototipo. El banco de pruebas construido se acopló al centro de maquinado del laboratorio de máquinas y herramientas de la FIM, donde se realizaron varias pruebas experimentales en chapas de aluminio de 1 mm de espesor, utilizando herramientas de distinto diámetro. Finalmente se discutió y comparó los resultados obtenidos de la simulación y el proceso experimental, también el estado de deformación y el espesor final de las chapas ensayadas fueron analizados.

De esta manera se concluyó que las chapas ensayadas tienen una configuración de deformación plana, donde la carga aplicada se incrementó proporcionalmente al diámetro de la herramienta utilizada, también la capacidad de conformabilidad de las chapas mediante conformado incremental mono punto, fue afectada por diversos factores como el diámetro de la herramienta, profundidad de penetración, velocidad de avance y la velocidad angular del husillo.

Palabras clave: Banco de pruebas, aluminio AA 1200 H14, deformación incremental, diseño concurrente, cargas en SPIF, estudio de la deformación incremental.

ABSTRACT

The present investigation has like objective design and build a test bench for the study of incremental deformation in aluminum sheets and with this, to equip the metal forming laboratory of the FIM with a new sheet metal forming process, in addition to transferring innovative concepts that help improve the conventional processes currently available in the country's productive sector. For the design and construction of the test bench, the simulation of the process was used as a guide to study the behavior of the sheet and the methodology of the concurrent design that takes into account the voice of the user and engineer, development of the house of quality, determination of technical specifications, design modules, solution analysis, calculation and selection of elements, costs, preparation of plans, test protocol and construction of the prototype. Subsequently, several experimental tests were carried out on 1 mm thick aluminum sheets using tools of different diameter. Subsequent to this, the built test bench was coupled to the machining center of the FIM machine and tool laboratory where the experiments were carried out. Finally, the results obtained from the simulation and the experimental process were analyzed and compared analyzing the state of deformation and thickness of the tested sheets. In this way it was concluded that the tested sheets had a flat deformation configuration where the applied load was increased proportionally to the diameter of the tool used and that the formability of the sheets by single point incremental forming were affected by various factors such as tool diameter, penetration depth, feed speed and spindle angular velocity.

Keywords: Test bench, aluminum AA 1200 H14, incremental deformation, concurrent design, loads in SPIF, study of incremental deformation.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN INCREMENTAL EN CHAPAS DE ALUMINIO AA 1200-H14

INTRODUCCIÓN

Los procesos de deformación en chapas metálicas son tradicionales y conocidos comúnmente, en la actualidad los procesos de deformación en chapas metálicas con el avance de la tecnología han tomado nuevas direcciones, entre ellas el uso de maquinaria CNC, esto es la utilización de procesos de producción CAD/CAM y con ello la producción de elementos de geometría irregular. Los trabajos investigativos acerca del tema se orientan hacia el estudio del comportamiento de los materiales deformados por este proceso, que mayormente son metales.

El material en estudio es aluminio AA 1200 H14 para lo cual se diseña y construye un banco de pruebas para estudio de deformación incremental que se acople al centro de maquinado Viva de 3 ejes existente en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Se desarrolla el proceso de deformación utilizando herramientas propias para conformado incremental, el estudio del comportamiento del material durante y después del proceso de deformación, esto es, la toma de datos de carga, medición de estado de la deformación, espesores finales y ángulo de pared obtenido.

Como inicio de esta técnica en nuestro entorno se podrá implementar y estudiar este proceso a nivel del laboratorio de conformado de la FIM, también con este estudio, se conocerá los parámetros óptimos para realizar la deformación incremental en chapas de aluminio y posterior a esto la transferencia de conocimientos mediante la aplicación de este proceso a nivel industrial. Es importante mencionar, para estudios posteriores, la utilización de esta técnica de deformación para el desarrollo de elementos biomecánicos como prótesis personalizadas y cubiertas craneales, así como en la producción de prototipos funcionales sin la necesidad de emplear altos costos de inversión en la fabricación del herramental, matrices y prensas como los que se requiere en otros procesos análogos como el embutido o estampado.

Pregunta de Investigación

¿Se puede diseñar y construir un banco de pruebas para estudiar el proceso de deformación incremental en chapas de aluminio?

Objetivo general

Diseñar y construir un banco de pruebas para el estudio del proceso de deformación incremental en chapas de aluminio AA 1200 H-14.

Objetivos específicos

- Definir las variables que intervienen en el diseño de los elementos mecánicos implícitos en el proceso de deformación incremental.
- Diseñar el banco de pruebas del proceso.
- Construir y ensamblar el banco de pruebas.
- Estudiar la deformación plástica en chapas de aluminio.
- Realizar pruebas de funcionamiento del banco.

Alcance

Se diseñará y construirá un banco de pruebas para estudio de deformación incremental en chapas de aluminio AA 1200 H14 de 1 mm de espesor seleccionando la mejor alternativa de diseño y planteando componentes que faciliten el manejo y operación del banco. Específicamente, se estudiará el estado de deformación en las chapas a través del proceso de deformación incremental mono punto SPIF, por sus siglas en inglés (Single Point Incremental Forming), donde se analizarán los parámetros y variables que hacen que la capacidad de conformabilidad de la chapa de aluminio aumente o disminuya. Este estudio contempla el análisis de deformación para una pieza modelo de geometría irregular.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Procesos de deformación en chapas metálicas

El conformado de chapas metálicas es uno de los procesos de manufactura de más uso, debido a los beneficios que se pueden obtener tales como: bajo costo, facilidad de automatizar procesos, alta precisión dimensional, posibilidad de trabajo en frío, buen acabado superficial, alta resistencia respecto a su peso.

En los procesos de conformado mecánico en chapas metálicas, los esfuerzos de flexión predominan como parámetro común, incluyendo a la deformación incremental, que es un proceso emergente en los procesos de manufactura. Entre los procesos de deformación convencional se tiene: el estampado, embutido, plegado, hidroconformado, estirado, repujado y el doblado.

1.1.1. Doblado

En este proceso la deformación plástica se da únicamente por fuerzas de flexión y alrededor de un eje dado como se indica en la figura 1.1, se tiene un ángulo de doblado, no se produce ningún cambio de espesor en la chapa, en la micro estructura del material de la chapa se tiene un sector que se encuentra a compresión y otro en estado de tensión, a partir de un eje neutro. Se debe tomar en cuenta que el plegado, rolado, perfilado, embutido, repujado, son procesos que engloba el doblado [1].

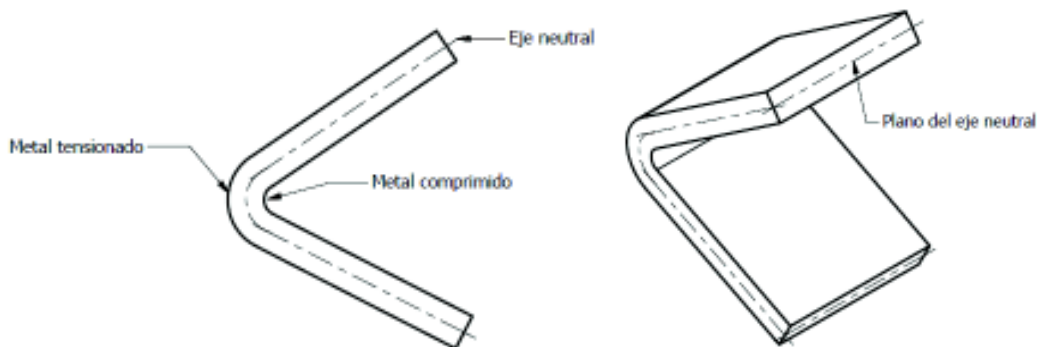


Figura 1.1. Esquema del proceso de doblado.
(Fuente: Elaboración propia, tomado de [1])

El plegado es semejante al doblado, difiere en que la forma de la matriz y el embolo, darán a la chapa una forma determinada con un ángulo no muy cerrado.

1.1.2. Embutido

En este proceso se trata de dar una forma cóncava hueca sin alterar de manera considerable el espesor de la chapa, puede haber embutidos cilíndricos como por ejemplo para cilindros de gas, esféricos y de formas no cilíndricas. Existen también los subprocesos del mismo tales como: el reembutado y el embutido inverso [2]. Este proceso se lleva a cabo por medio de un pisador que sujeta la chapa, un pistón que genera la deformación y una matriz ya sea cilíndrica o de diferente forma como se ilustra en la figura 1.2.

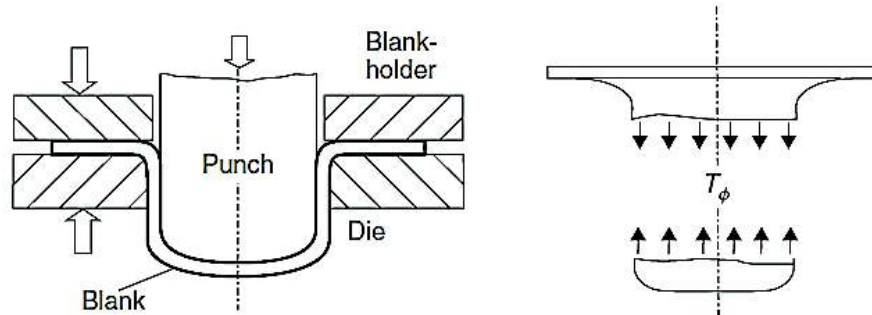


Figura 1. 2. Esquema del proceso de embutido.
(Fuente: [2])

1.1.3. Repujado

También conocido como embutido en torno, del cual se obtienen piezas de revolución de simetría axial, a partir de discos de chapas metálicas, el proceso inicia desde una chapa circular centrada en un torno, dotado de un mandril de metal, madera o plástico, con la forma del elemento a producirse, para posteriormente dar forma con una herramienta apoyada en el torno que genera la flexión en el material a conformar [1]. La figura 1.3 muestra el proceso de repujado.

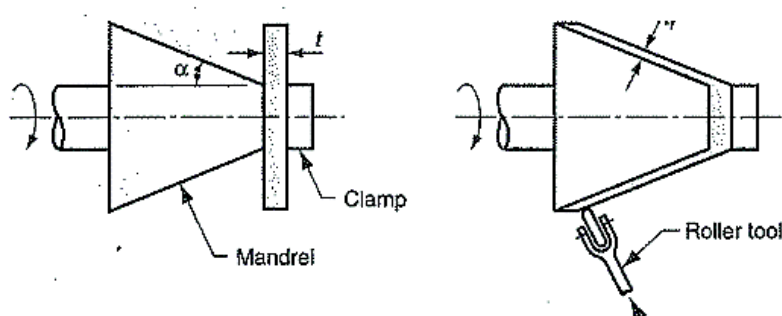


Figura 1. 3. Esquema del proceso de repujado.
(Fuente: [1])

1.1.4. Estampado

En este proceso destaca el estampado en frío cuando se realiza el proceso bajo la temperatura de recristalización del material y el estampado en caliente cuando se lo utiliza sobre la temperatura de recristalización en piezas de mayor espesor. El proceso consiste en deformar plásticamente a la chapa mediante la compresión de dos matrices, la inferior o estampa inferior y la estampa superior o la estampa superior móvil donde la presión aplicada es progresiva o de percusión mediante martinetes como se indican en la figura 1.4. Las piezas obtenidas mediante este proceso tienen una dureza relativamente alta, los materiales son dúctiles y maleables. Una complicación para este proceso es el tamaño y forma de la pieza a fabricar [2].

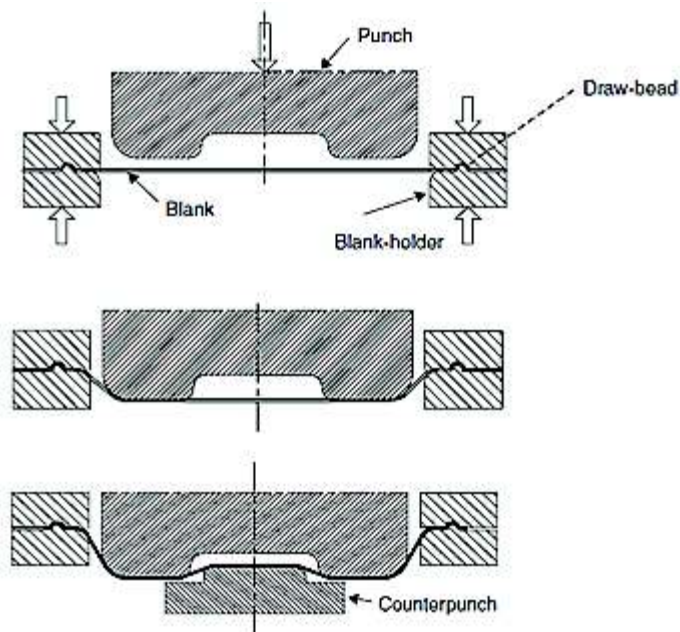


Figura 1. 4. Esquema del proceso de estampado.
(Fuente: [2])

1.1.5. Estirado

Este proceso consiste en estirar la chapa metálica que se encuentra sujeta a una mordaza que impide el flujo del material hacia la zona que está siendo deformada por una herramienta, la chapa se recupera muy poco elásticamente, en este proceso se tienen el estirado y doblado de la chapa de manera simultánea. Además, este proceso de manufactura se lo utiliza mayormente en la industria aeronáutica para el conformado de grandes piezas en lotes pequeños de producción [3]. La figura 1.5 muestra el proceso de estirado.

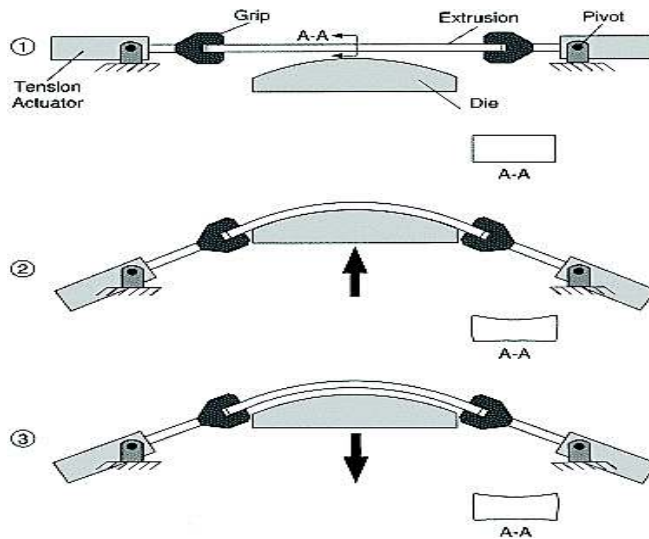


Figura 1. 5. Esquema del proceso de estirado.
(Fuente: [4])

1.1.6. Hidroformado

En el proceso de hidroformado se trata de dar forma a la chapa metálica por medio de la presión ejercida por un fluido líquido, que aplica la carga mediante un diafragma a la chapa, está dotado de una matriz inferior de la cual tomará la forma. Obsérvese la figura 1.6. Una ventaja del proceso está en el bajo costo de fabricación de pequeños lotes de piezas y una desventaja notable en la necesidad de aplicar grandes presiones [2].

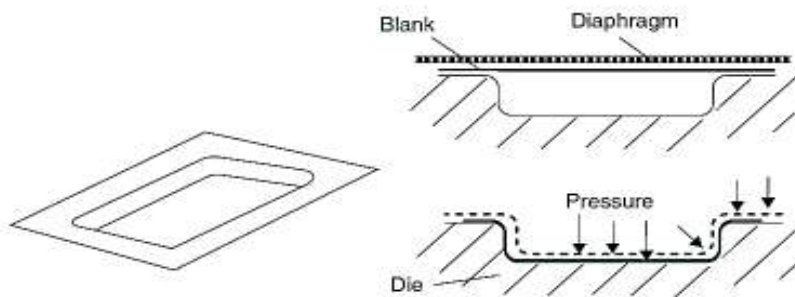


Figura 1. 6. Esquema del proceso de hidroformado.
(Fuente: [2])

1.1.7. Conformado incremental

Este es un proceso de manufactura que surge aproximadamente en el año 2001 [5], y consiste en dar forma a la chapa metálica de manera puntual mediante una herramienta tipo indentador instalada en una máquina fresadora CNC que sigue una trayectoria definida, la chapa es sujeta a la maquinaria mediante un pisador. La figura 1.7 muestra el proceso de conformado incremental.

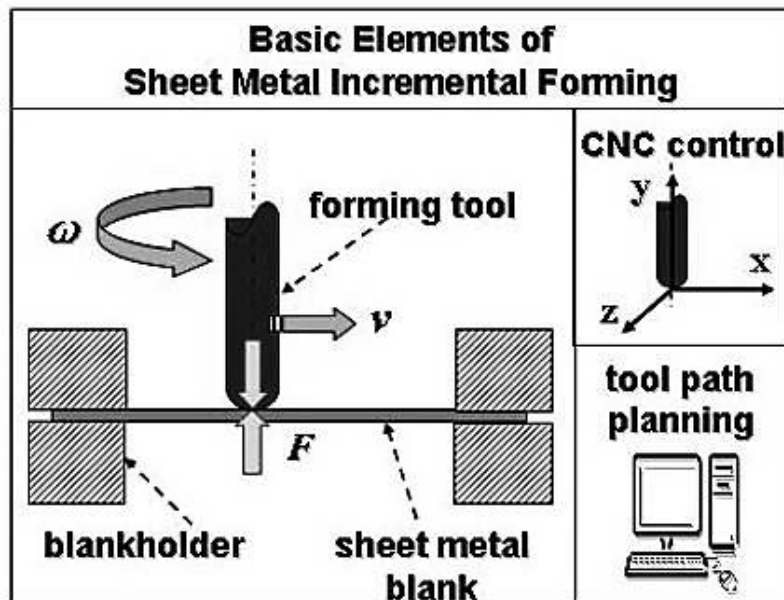


Figura 1. 7. Esquema del proceso de deformación incremental.
(Fuente: [5])

1.2. Procesos de conformado incremental

A través de estos procesos, se trata de deformar una chapa metálica gradualmente y por niveles tomando en cuenta el área de contacto puntual entre la herramienta y el material, donde se dará la deformación plástica.

La deformación es generada por una herramienta tipo indentador hemisférico de un material resistente que sigue una trayectoria posible gracias a la flexibilidad que se ha alcanzado con el control numérico de las maquinarias CNC, con lo que también se asegura poder realizar geometrías complejas.

Es importante resaltar que este proceso permite el desarrollo de prototipos rápidos en chapas metálicas y también en láminas poliméricas, lo que lo convierte en una herramienta para el prototipado rápido, disminuyendo sustancialmente el tiempo entre diseño y construcción de un producto de este tipo, en un tiempo estimado menor a un día, pudiéndose realizar pequeños lotes de productos en tiempos de entrega cortos [6].

En el conformado incremental en chapas, existen algunas variantes entre las más conocidas se tienen; deformación incremental mono punto, doble-punto y matriz parcial como se observa en la figura 1.8, de las cuales la más demandada y versátil es la deformación incremental mono punto.

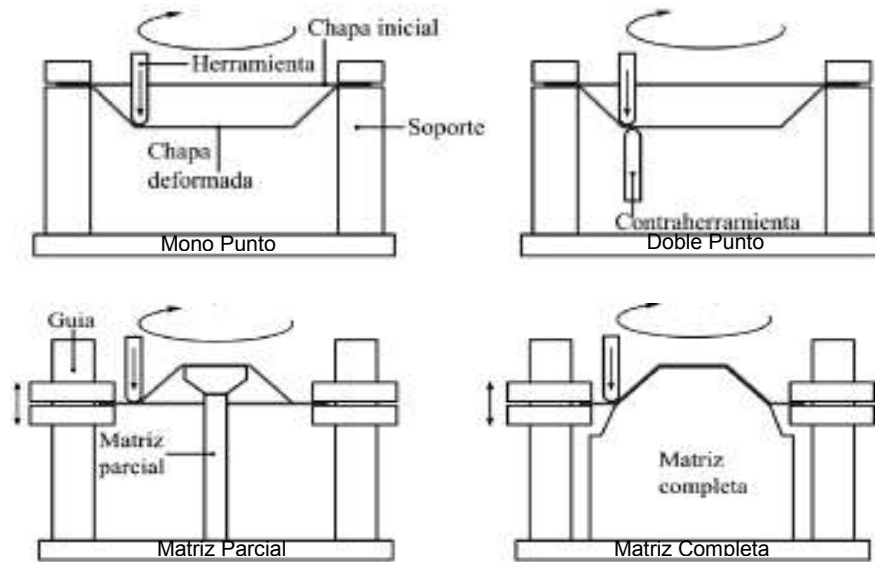


Figura 1. 8. Variantes del proceso de deformación incremental.
(Fuente: [6])

Otra de las aplicaciones ventajosas del proceso de deformación incremental está en el hecho de poder realizar estudios de la conformabilidad de un producto diseñado en chapa metálica con el fin de afinar el proceso de producción de este producto en masa, es decir, poder luego diseñar una matriz de estampado o algún otro proceso, de manera óptima reduciendo costos y mejorando la calidad de los nuevos productos desarrollados.

1.2.1. Control de la trayectoria de la herramienta

Las trayectorias más comunes en el proceso de deformación incremental son contornos pudiendo ser: circulares, poligonales, simétricos, o asimétricos y para cada nivel se incrementa la profundidad, lo que da una trayectoria final tipo espiral cónica. El hecho de conocer como la trayectoria se dará en este proceso es de vital importancia para realizar la respectiva programación de la maquinaria CNC, pudiendo ser un centro de maquinado o una fresadora, que este caso deberá tener como un mínimo de tres ejes de acción [5].

Hay que tomar en cuenta que tanto para el diseño de la herramienta como para el soporte se necesita saber hasta dónde se extenderá el área de trabajo de la herramienta, esto está limitado por la trayectoria de la misma.

El hecho de que el proceso de deformación sea puntual disminuye la fricción generada, aun así, es necesario disminuirla aún más por cuestiones de incremento de temperatura y desgaste de la herramienta. Una solución para esto es el agregar un lubricante a la superficie del material a deformar, pero se tiene el inconveniente que los lubricantes

líquidos se quemen por la tendencia a elevarse la temperatura, pero se tiene una alternativa con lubricantes de tipo sólido, por ello es importante el giro de la herramienta, con lo que la fricción disminuirá, aparte de que las superficies deformadas tendrán un acabado aceptable. La fricción generada entre la herramienta y la superficie es directamente proporcional al diámetro hemisférico de la punta de contacto de la herramienta por lo que también se la considera [6].

1.2.2. Conformado incremental mono punto

Es una variante del proceso de deformación incremental, por sus siglas en inglés es más conocido como (Single Point Incremental Forming, *SPIF*), en el cual la deformación se lleva a cabo sin la necesidad de una matriz, contra herramienta, o algún tipo de aditamento cercano a la herramienta. El pisador es el único utillaje necesario de acople a la maquinaria CNC, que puede ser un centro de maquinado o una fresadora de 3 ejes. La figura 1.9 muestra el esquema básico del conformado incremental mono punto.

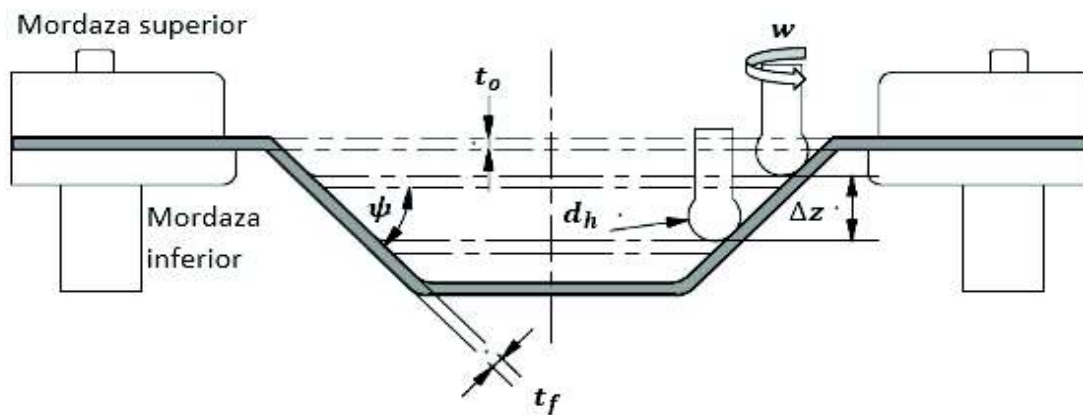


Figura 1. 9. Esquema del conformado incremental mono punto.
(Fuente: Propia)

Dónde:

- t_o : Espesor inicial de la chapa
- t_f : Espesor luego de la deformación
- ψ : Ángulo de pared o empujamiento
- w : Velocidad angular de la herramienta
- d_h : Diámetro de la herramienta
- Δz : Desplazamiento perpendicular de la herramienta

1.2.2.1. Consideraciones de la herramienta

Tomando en cuenta que este tipo de herramientas aún no son comercializadas en el mercado, es común que los usuarios las diseñen y fabriquen de acuerdo a parámetros ya mencionados tales como: materiales, diámetro de punta de la herramienta, ángulo de empinamiento de pared que se genera conforme se da el desplazamiento vertical de la herramienta, este parámetro es clave en el proceso ya que, si este ángulo de pared aumenta, la fricción entre la herramienta y el material aumentará también.

Para la mayoría de aplicaciones, el material elegido comúnmente para la fabricación de la herramienta es un acero para herramientas que puede ser tratado térmicamente con el fin conferirle propiedades al material requeridas para su aplicación final. En el caso de proceso SPIF es necesario aumentar la resistencia al desgaste y tenacidad de la herramienta. La herramienta típica para SPIF tiene una configuración similar a la de la figura 1.10.

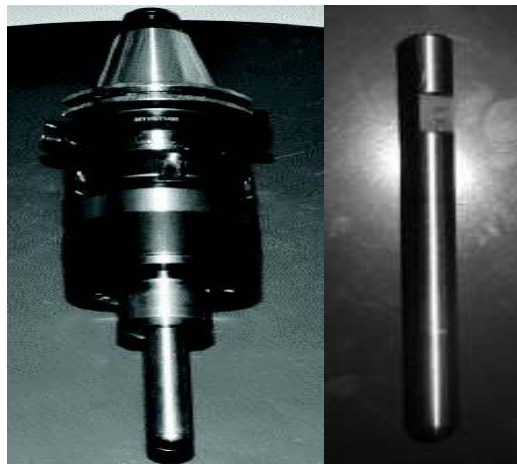


Figura 1. 10. Herramienta de conformado incremental.
(Fuente: [7])

1.2.2.2. Consideraciones del soporte

Se trata del utillaje para la sujeción de la chapa, este implemento tampoco está a disposición en el mercado por lo que se los ha tenido que desarrollar. Consiste en un dispositivo para sujetar la chapa horizontalmente al utillaje y a su vez anclarlo a la mesa de trabajo del centro de maquinado CNC. La función del soporte es evitar los movimientos relativos entre chapa y la meza del centro de maquinado al momento de la deformación, disminuyendo la pérdida de acción de la herramienta. En la figura 1.11 se muestra el soporte comúnmente utilizado para el desarrollo del proceso SPIF.



Figura 1. 11. Utillaje de sujeción de la chapa.
(Fuente: [8])

1.2.2.3. Equipos para deformación incremental

Dentro de las exigencias principales respecto a la maquinaria para llevar a cabo este proceso están: velocidad, volúmenes de trabajo, rigidez de la máquina, carga máxima y al menos estar dotada de tres ejes. Debido a estos requerimientos, las máquinas fresadoras CNC son las más indicadas para estos procesos resaltando el hecho que los nuevos diseños y adaptaciones como fresadoras de seis ejes permiten que se pueda definir geometrías aún más complejas de realizar con los procesos comúnmente conocidos.

Actualmente, existe una marca en desarrollo que fabrica maquinaria específica para deformación incremental, estos diseños están patentados bajo la tecnología de Amino, donde se cuenta con los requerimientos necesarios para desarrollar el proceso de deformación incremental.

Los robots industriales también están dentro de las posibilidades de realizar este proceso debido a su alta versatilidad, robustez, buena precisión y gran volumen de trabajo. Obsérvese figura 1.12. La variante del proceso en este caso radica en que el brazo robótico es el que genera todos los movimientos inclusive los de profundidad, es decir la mordaza o pisador de la chapa esta fija en su totalidad [9].

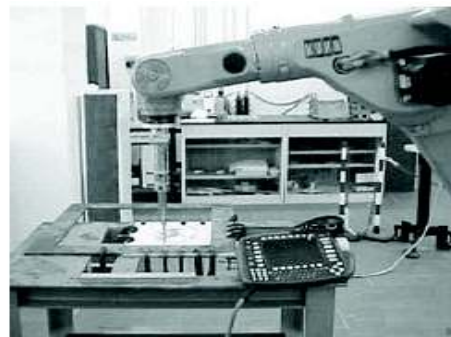


Figura 1. 12. Maquinaria para desarrollar SPIF.
(Fuente: [9])

1.3. Propiedades y aplicaciones del aluminio AA 1200 H14

Con toda la gama de aleaciones de aluminio se obtiene una amplia variedad de combinaciones de resistencia mecánica, ductilidad, conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, por lo que se ha adoptado un sistema en el cual la designación de la aleación se hace con un número de cuatro dígitos. Una de las aleaciones más comunes es el Aluminio 1200-H14, donde:

- 1200: hace referencia a un aluminio con pureza de 99.0% mínimo. Es la aleación más comúnmente usada para la fabricación de utensilios domésticos, envases, piezas decorativas, recubrimientos y en general, aquellas aplicaciones donde no se requiere una resistencia mecánica importante [10].
- H: endurecido por deformación, hace referencia a materiales que tienen sus resistencias incrementadas mediante un endurecimiento por deformación, con o sin tratamientos térmicos suplementarios, para producir una reducción en la resistencia. H-14 corresponde a un aluminio endurecido mediante trabajo mecánico en frío con grado medio duro no recristalizado después del laminado.

Las propiedades que presenta un aluminio AA 1200 H-14 se encuentran descritas en el anexo I.

Además de las aplicaciones ya mencionadas, por su ligereza y resistencia, el aluminio AA 1200 H-14 se utiliza en estructuras de aviones, trenes de alta velocidad, tranvías, automóviles y autobuses. A partir de chapas de aluminio se elaboran piezas por estampación para la industria automovilística (rejillas, bastidores, llantas) y para la aviación (partes del fuselaje, trenes de aterrizaje). En las carrocerías la chapa de aluminio es muy empleada para fabricar chasis, remolques y otros elementos, aligerando el peso total de manera significativa.

1.4. Estudio de la deformación plástica

En los procesos de formado de chapa metálica, la deformación se produce como resultado de fuerzas transmitidas a través de la chapa. Donde la fuerza por unidad de ancho de la chapa es producto del esfuerzo y el espesor.

Para estudiar la deformación, se considera una pequeña región sometida a una deformación proporcional uniforme, como se muestra en la figura 1.13. Inicialmente, la chapa no deformada de espesor inicial t_0 , está marcada con una cuadrícula de círculos de diámetro d_0 . Durante la deformación uniforme, los círculos se deforman a elipses de mayor

d_1 y menor d_2 diámetro respectivamente. Si la cuadrícula está alineada con las direcciones principales, se volverá rectangular como se muestra en la figura 1.13 (b). En el instante que se muestra en la figura 1.13 (b), los esfuerzos de deformación son σ_1 y σ_2 .

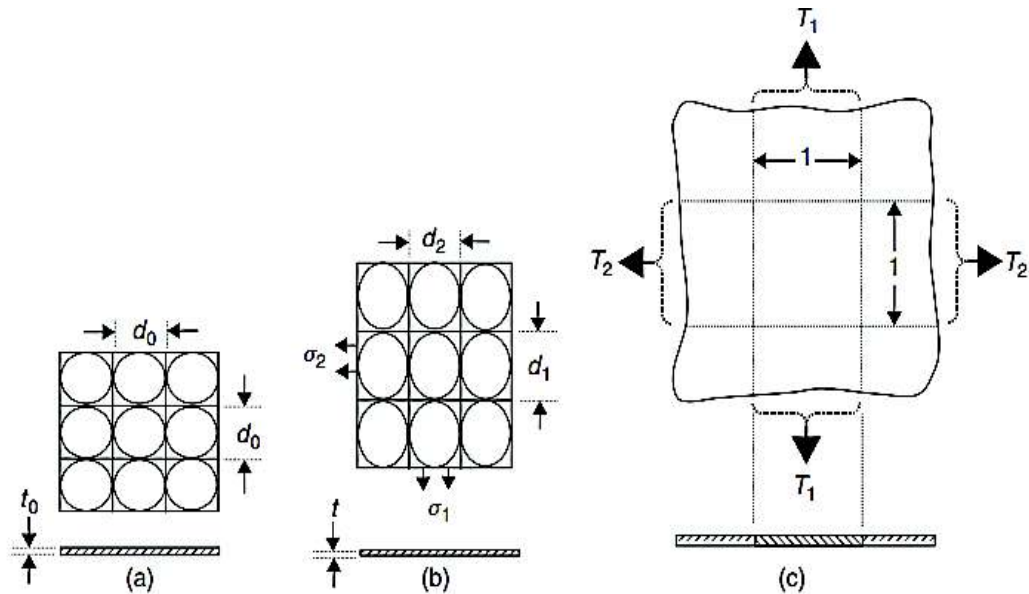


Figura 1. 13. Región de chapa que muestra: (a) el estado no deformado con patrón de círculos; (b) el estado deformado y (c) las fuerzas transmitidas por unidad de ancho.
(Fuente: [2])

Al referirse a conformabilidad de un material, se refiere también al estado de deformaciones en el mismo. El estado de deformaciones es la combinación de las deformaciones principales ε_1 , ε_2 y ε_3 . La suma de estas se asume igual a cero por la conservación del volumen y solamente dos de ellas son requeridas para especificar el estado de deformaciones. Las deformaciones principales al final de un proceso son:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right); \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right); \quad \varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

Ec. 1. 1. Estados de deformaciones en función de los diámetros de patrón y espesores de la chapa.
(Fuente: [2])

Donde:

- d_0 : Diámetro inicial del patrón de círculos
- d_1 : Diámetro final en dirección al primer estado de deformación
- d_2 : Diámetro final en dirección al segundo estado de deformación

t_0 : Espesor inicial de la chapa

t : Espesor final de la chapa

Asumiendo que la función de deformación es lineal, debido a que la relación de deformación β permanece constante y está dada por:

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln(d_2/d_0)}{\ln(d_1/d_0)}$$

Ec. 1. 2. Relación de deformación en función de los estados de deformación.

(Fuente: [2])

A partir de la ecuación 1.1, la deformación del espesor se determina mediante la medición del espesor, o alternativamente de las deformaciones mayor y menor asumiendo una variación de volumen constante, se tiene el estado de deformación de la lámina.

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) = -(1 + \beta)\varepsilon_1 = -(1 + \beta) \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right)$$

Ec. 1. 3. Estado de deformación del espesor de la chapa.

(Fuente: [2])

De la ecuación 1.3, el espesor actual es:

$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) = t_0 \exp[-(1 + \beta)\varepsilon_1]$$

Ec. 1. 4. Espesor final de la chapa.

(Fuente: [2])

O alternativamente, como el volumen $td_1d_2 = t_0d_0^2$ permanece constante,

$$t = t_0 \frac{d_0^2}{d_1d_2}$$

De la ecuación 1.1, se pueden determinar las deformaciones principales y la relación de deformación. El proceso de deformación se describe convenientemente por las principales deformaciones $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$.

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right); \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) = \beta\varepsilon_1; \quad \varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) = -(1 + \beta)\varepsilon_1$$

Ec. 1. 5. Deformaciones principales para una chapa.

(Fuente: [2])

Utilizando diagramas de deformación se pueden determinar los diferentes modos de deformación correspondientes a diferentes relaciones de deformación. En la figura 1.14, se muestra con más detalle el carácter de diferentes trayectorias de deformación. Esta figura, no representa ningún proceso en particular, pero se usa para discutir los diferentes modos de deformación.

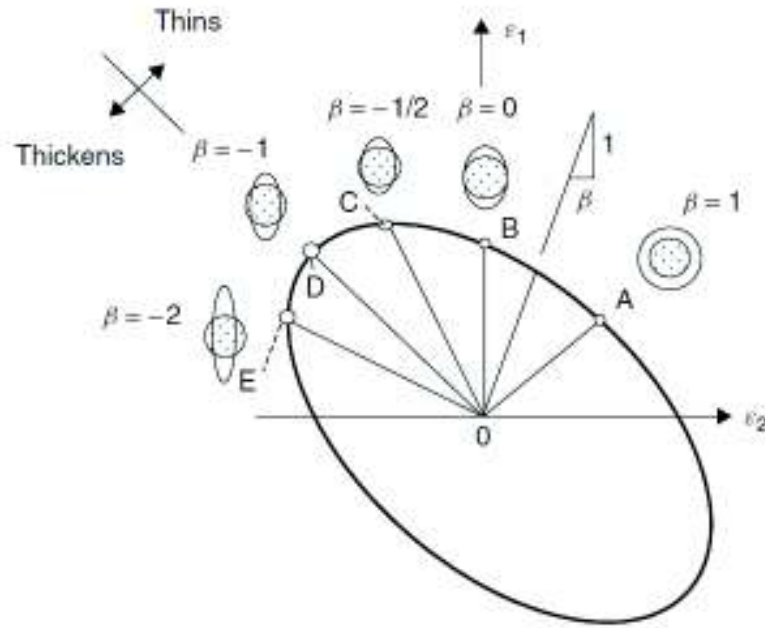


Figura 1. 14. Modos de deformación de diferentes relaciones de deformación.
(Fuente: [2])

De acuerdo al valor que tome β se describe un diferente modo de deformación:

$\beta = 1$, se refiere al estado equi-biaxial. La deformación es constante en todas las direcciones $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ y el círculo patrón se expande, pero permanece circular. Como $\beta = 1$, la deformación del espesor es $\varepsilon_3 = -2\varepsilon_1$, de modo que el espesor disminuye más rápidamente con respecto a ε_1 que en cualquier otro proceso, como se muestra en la figura 1.15.

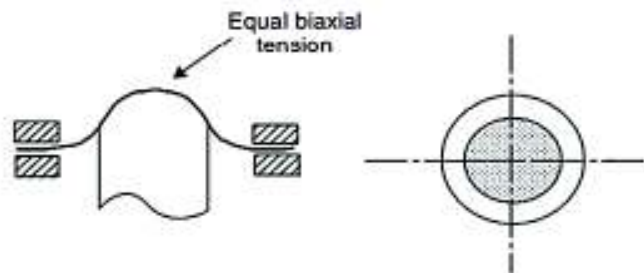


Figura 1. 15. Modo de deformación cuando $\beta = 1$.
(Fuente: [2])

$\beta = 0$, deformación plana (plane-strain). En este caso la chapa se extiende solo en una dirección y el círculo se convierte en una elipse en la que el eje menor no se modifica. No hay deformación en la segunda dirección principal $\varepsilon_2 = 0$. En piezas tipo canal, se observa deformación plana en los lados, como se muestra en la figura 1.16.

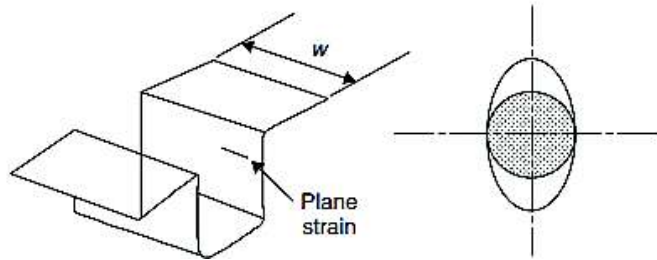


Figura 1. 16. Modo de deformación cuando $\beta = 0$.
(Fuente: [2])

$\beta = -1/2$, tensión uniaxial. Este caso se da en pruebas de tracción en un material isotrópico y ocurre en la chapa cuando el esfuerzo menor es cero, es decir, cuando $\sigma_2 = 0$. La chapa se estira en una dirección y se contrae en la otra. Este proceso ocurrirá siempre que se estire un borde libre como en el caso de la extrusión de orificios en la figura 1.17.

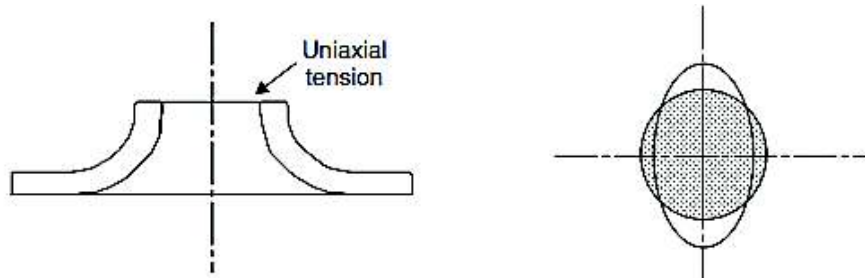


Figura 1. 17. Modo de deformación cuando $\beta = -1/2$.
(Fuente: [2])

, espesor constante. En este caso, las deformaciones son iguales y opuestas y la chapa se deforma sin cambios en el espesor. $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0$ y consecuentemente $\varepsilon_3 = 0$. El proceso también se conoce como cizallamiento puro y ocurre en la brida de una copa embutida como se muestra en la figura 1.18.

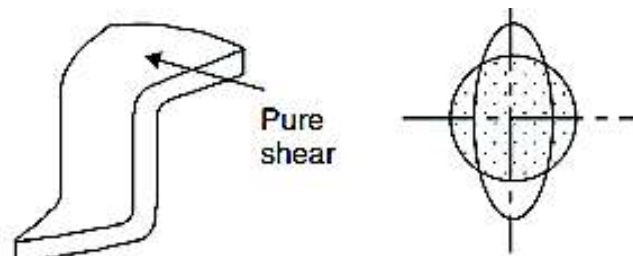


Figura 1. 18. Modo de deformación cuando $\beta = -1$.
(Fuente: [2])

$\beta = -2$, compresión uniaxial. Este es un caso extremo y ocurre cuando el esfuerzo principal σ_1 es cero, como en el borde de una copa embutida, figura 1.19. La deformación efectiva y el esfuerzo son $\varepsilon = -\varepsilon_2$ y $\sigma = -\sigma_2$, respectivamente. En este proceso, la chapa se contrae y es probable que se arrugue.

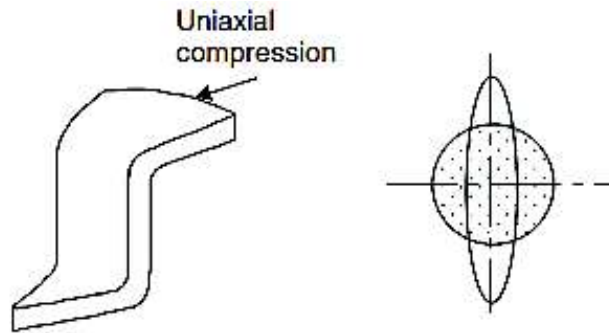


Figura 1. 19. Modo de deformación cuando $\beta = -2$.
(Fuente: [2])

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño y selección de los elementos mecánicos del banco de pruebas

La idea de realizar este proyecto, se debe al hecho de poder aportar tecnología al sector industrial productivo del país, para lo cual se toma en cuenta la capacidad de producción existente y necesaria, como lo son las máquinas de control numérico computarizado CNC, del inglés (Control Numerical Computerized) y el diseño asistido por computadora CAD por sus siglas en inglés (Computer-Aided Design). El potencial de la herramienta a obtenerse permite la capacidad de estudiar el proceso incremental de deformación en chapas de aluminio, con el fin de poder implementarlo de manera eficaz al desarrollo de piezas y prototipos de manera rápida y a bajo costo.

El diseño del utillaje y herramientas para el desarrollo de este proceso se basa en la metodología de diseño, desarrollada en el Diseño Concurrente de Riba [11].

2.1.1. Identificación de la necesidad o reconocimiento de la oportunidad

Los procesos de conformado mecánico en chapa metálica que se posee son los de tipo tradicionales, existe la oportunidad de avanzar tecnológicamente en esta área, sacando el mejor provecho posible a la tecnología ya instalada en el país, en lo que respecta a maquinaria de producción CNC.

2.1.2. Planteamiento del problema

Se desea poder deformar chapas metálicas y transformarlas en productos de geometrías complejas irregulares, de tal manera que se pueda implementar rápidamente en una máquina CNC, sin la utilización de matrices de conformado o algún otro proceso tradicional, con un costo de implementación aceptable. Se ha tomado en cuenta este tipo de tecnología ya que está siendo utilizada en la actualidad por entidades productivas en distintas áreas tales como: automotriz, medicina, alimenticia, etc.

2.1.3. Determinación de las especificaciones técnicas

Para determinar las especificaciones técnicas se toma en cuenta las necesidades del usuario, así como el punto de vista de la ingeniería para el desarrollo de la función de calidad, tomada de la metodología del Diseño Concurrente [11]. Donde por sus siglas en inglés se la presenta como; QFD (Quality Function Deployment). De este proceso depende

que la definición del producto a diseñar sea el más acertado y sirva como preámbulo del diseño conceptual. Si bien es cierto que las especificaciones técnicas son la base del diseño de un producto, se debe tener cuidado de no extremar en sus requerimientos o deseos, por razones de costos elevados injustificadamente, poca robustez del producto, o dificultad de fabricación. Por lo que se convierte en un proceso iterativo.

2.1.3.1. Casa de la calidad

También conocido como la planificación del producto, corresponde a la matriz que traduce los requerimientos del usuario en requerimientos técnicos. Esta matriz está compuesta por seis áreas que son: voz de usuario, análisis de competitividad, voz del ingeniero, correlaciones, comparación técnica y compromisos técnicos.

Voz de usuario: Son las demandas y requerimientos del usuario.

Análisis de competitividad: Es el grado de satisfacción del usuario respecto a los productos similares de la competencia.

Voz del ingeniero: Son los requerimientos técnicos para satisfacer al usuario.

Correlaciones: Relaciona las voces de usuario e ingeniero.

Comparación técnica: Compara el producto de la empresa con la competencia.

Compromisos técnicos: Son los compromisos técnicos entre las características del producto.

Para desarrollar de la casa de la calidad que es la base de la función de la calidad, es importante la voz del usuario, que será llevada a niveles de ingeniería como la voz del ingeniero, que son los criterios necesarios para iniciar el diseño el producto.

2.1.3.2. Voz del usuario

Para el desarrollo de la voz del usuario se toma en cuenta los requerimientos del laboratorio de conformado mecánico de la FIM, de lo cual se obtiene la información necesaria y demandas del producto que se resumen en la tabla 2.1.

2.1.3.3. Voz del ingeniero

Los criterios técnicos obtenidos se originaron en la voz del usuario que son los requerimientos y deseos del usuario, para relacionarlos de la manera más entendible se los tabula conjuntamente con estos.

Tabla 2. 1. Voz del usuario vs voz del ingeniero.

| Voz del usuario | Voz del ingeniero |
|--|-----------------------------|
| Que sirva para varios espesores, en un rango aproximado entre 0,5 a 3 mm | Espesores a deformar |
| Que sea liviano | Peso |
| Que sea de rápido acople a la máquina | Tiempo de acople |
| Que sea fácil de usar | Seguridad y ergonomía |
| Que el tamaño no exceda el 30% de la capacidad de la mesa de trabajo de la máquina | Dimensiones |
| Que sujete fácilmente la chapa | Tiempo de acople |
| Que sea de bajo costo | Costo |
| Que no genere altos ruidos | Niveles de Ruido |
| Que mida la carga aplicada | Medir la carga aplicada |
| Que sea de fácil cambio de herramienta | Tiempo de acople |
| Que tenga varios diámetros de herramienta | Número de herramientas |
| Que tenga rigidez aceptable | Rigidez y estabilidad |
| Que su mantenimiento sea sencillo y no haya que realizarlo muy frecuentemente | Mantenimiento |
| Que no sea peligroso para el usuario | Seguridad y ergonomía |
| Que tenga repuestos accesibles | Mantenimiento |
| Que se acople a varias máquinas CNC | Energía necesaria de la CNC |

(Fuente: Propia)

2.1.3.4. Análisis de la casa de la calidad

La casa de la calidad desarrollada para el diseño de esta máquina tiene como punto de partida la voz del usuario, transformada en la voz del ingeniero, donde se crean las matrices de: correlaciones, análisis de la competencia compromisos y de evaluación técnica. Ver anexo II.

Se realiza la evaluación a partir de las correlaciones existentes entre voces de usuario-ingeniero, ya sean estas de tipo fuerte, media o baja. En el apartado de compromisos se puede ver según la tabla 2.2 que los parámetros más conflictivos son:

Tabla 2. 2. Conflictos existentes en la matriz de compromisos.

| Parámetro 1 | Parámetro 2 | Conflicto |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|
| Medir la carga aplicada | Energía necesaria de la máquina CNC | Si la energía requerida por el proceso excede la permisible de la máquina CNC, existe la probabilidad de daños en la misma. |
| Medir la carga aplicada | Costos | El costo del diseño se incrementa al necesitar la instrumentación adecuada para medir cargas aplicadas. |
| Número de herramientas | Costos | El costo del diseño se incrementa al necesitar la disposición de varias herramientas para realizar estudios comparativos con este banco de pruebas. |
| Rango de espesores a deformar | Energía necesaria de la máquina CNC | Al incrementar el espesor de las chapas, incrementa también la energía desarrollada por la máquina CNC. |

(Fuente: Propia)

Para la evaluación de la competencia, se procede como entidad en inicio, por lo tanto, la cantidad a evaluar es uno para todos los parámetros de la voz de usuario y para la competencia se evalúa conforme a las empresas existentes, hay que resaltar que este tipo de proceso no se desarrolla en el país, pero si en países como España, Estados Unidos, en empresas como: Ford, Amino y desarrollos investigativos. En la ponderación correspondiente se tiene los siguientes parámetros como dominantes o más influyentes: servicio para varios espesores, que mida la carga aplicada, que tenga varios diámetros de herramienta, que sea de bajo costo y que se acople a otras máquinas CNC.

Para la evaluación técnica, tomando en cuenta nuevamente que se trata como si fuese una empresa en inicio, se evalúa con uno, la incidencia observada es más influyente sobre los siguientes parámetros: costos, energía necesaria de la máquina CNC, rango de espesores de chapa a deformar, número de herramientas y medición de carga aplicada.

2.1.3.5. Conclusiones de la casa de la calidad

Por el análisis desarrollado con anterioridad los requerimientos necesarios y más influyentes para este diseño son: que deforme varios espesores, que este dotado de diferentes diámetros de herramienta, que mida la carga aplicada, que la máquina CNC desarrolle la energía necesaria y que su fabricación sea de costo aceptable.

2.1.3.6. Especificaciones técnicas del banco de pruebas

Las especificaciones técnicas del banco de pruebas se determinan a partir de la metodología llevada a cabo en los puntos anteriores y se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Especificaciones técnicas para el banco de pruebas.

| | | | | |
|---|---|--|------------|--|
| Empresa: Escuela Politécnica Nacional | Producto: Banco de pruebas para el proceso de deformación incremental de chapas | Fecha inicial: 01/04/2017 Última revisión: 14/05/2018 | | |
| | | Página 1/1 | | |
| Especificaciones | | | | |
| Concepto | Fecha | Propone | R/D | Descripción |
| Función | 01/04/2017 | C | R | Deformar chapas metálicas |
| Dimensiones | 02/04/2017 | C | R | 30 cm largo 30 cm ancho 25 cm alto |
| Peso | 02/04/2017 | I | D | 10 kg |
| Señales y control | 10/04/2017 | C | D | Medir carga aplicada, Máx. 2 kN |
| Capacidad | 11/04/2017 | I | R | Espesores de chapa de 0,5 a 3 mm |
| Vida útil y mantenimiento | 11/04/2017 | I | D | 10 años, con periodos de mantenimiento de 6 meses |
| Costos | 11/04/2017 | C | R | Oscile los 1000 USD |

(Fuente: Propia)

Proponente: **I**=Ingeniería, **C**: Cliente

Tipo de necesidad: **R**= Requerimiento, **D**=Deseo

2.2. Diseño conceptual

Es la determinación del concepto, parte de las especificaciones técnicas, la cual es un principio de la solución y permiten a su vez dar apertura a la estructura funcional y modular del diseño, siendo la herramienta que más importa para el diseño la determinación de la estructura funcional, en este inciso se determinará el concepto del banco de pruebas.

2.2.1. Estructura funcional

Se organiza en un diagrama de bloques donde indica las funciones que debe realizar el producto, relacionadas por entradas y salidas, así como sus interrelaciones de flujos de material, energía y señal como se indica en la figura 2.1.

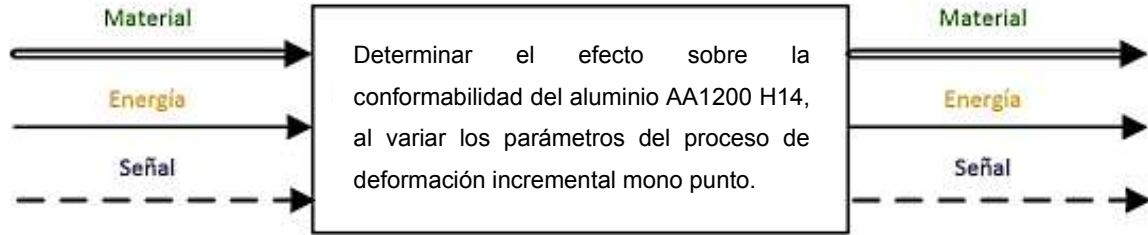


Figura 2. 1. Esquema de la estructura funcional global del producto.
(Fuente: propia)

Esta se puede representar de manera general, o como subdivisión de funciones que tienen tres objetivos: obtener una estructura funcional detallada, facilitar soluciones y facilitar la creación de la estructura modular.

En estas funciones caben los modos de operación, los cuales están clasificados en: modos de operación principales, ocasionales y accidentales.

2.2.1.2. Estructura funcional del banco de pruebas

La estructura funcional del banco de pruebas está compuesta de 3 niveles como se indica en las figuras 2.2, 2.3 y 2.4.

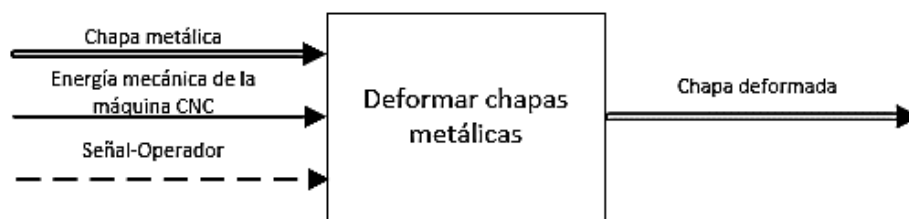


Figura 2. 2. Nivel 0 de la estructura funcional del banco.
(Fuente: Propia)

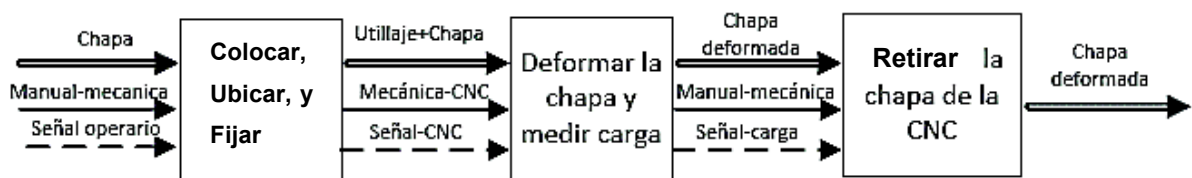


Figura 2. 3. Nivel 1 de la estructura funcional del banco.
(Fuente: Propia)

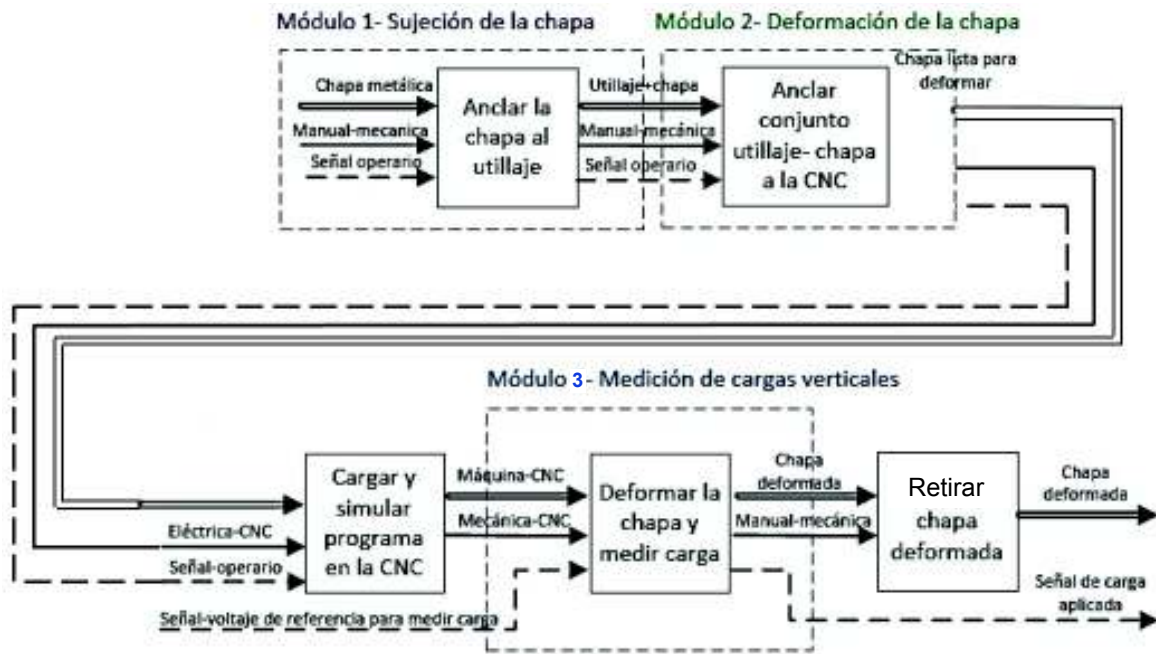


Figura 2. 4. Nivel 2 de la estructura funcional del banco.
(Fuente: Propia)

2.2.1.2. Análisis de los niveles

La función principal de la máquina es deformar chapas en geometrías irregulares, para lo cual se despliegan al menos 3 niveles los cuales son: 0, 1 y 2.

Nivel 0: Este nivel muestra la función principal a ejecutar, colocar la chapa metálica y deformarla mediante la energía mecánica de la máquina CNC.

Nivel 1: En este nivel se muestran resumidas las subfunciones necesarias para poder realizar la deformación de la lámina metálica, se tienen tres subfunciones que son: anclar la lámina a la máquina CNC, deformar la lámina y retirar la lámina de la máquina CNC.

Nivel 2: Aquí se detalla todas las subfunciones necesarias para realizar el proceso completo, inicia desde anclar la chapa al utillaje, instalar la herramienta en la máquina, anclar el conjunto utillaje y chapa a la máquina CNC, deformar la chapa y medir la carga, para luego proceder a extraer el producto deformado en chapa metálica.

2.2.1.3. Determinación de la estructura modular

La estructura funcional del banco de pruebas se determina a partir del análisis del diagrama funcional en el nivel 2 donde constan al menos 3 módulos los cuales se detallan en la tabla 2.4.

Tabla 2. 4. Módulos determinados para el banco de pruebas.

| Módulo | Función |
|---------------|-------------------------|
| 1 | Sujetar la chapa |
| 2 | Deformar la chapa |
| 3 | Medir cargas verticales |

(Fuente: Propia)

Se toma en cuenta que, al tratarse de una máquina en acople con otra, el diagrama funcional de donde se obtienen los módulos, está provista de otros tipos de actividades propios de la máquina a la que se acopla el banco de pruebas, pero que es necesario determinarlos para mejor comprensión del proceso.

2.2.2. Análisis modular de alternativas de diseño

Las alternativas de diseño permiten obtener la mejor opción en el desarrollo de un producto, el método de evaluación de soluciones, trata de obtener la mejor solución a través de la evaluación de las alternativas de diseño mediante los criterios importantes a cumplir en cada módulo. El número mínimo de alternativas de diseño deben ser al menos de dos y máximo de seis, este método es llamado; “Método ordinal corregido de criterios ponderados” [11], en la tabla 2.5 se indica las relaciones de los criterios.

Tabla 2. 5. Valores asignados para la evaluación de los criterios.

| Valor | Características |
|--------------|---|
| 1 | Si el criterio de las filas es superior que el de las columnas. |
| 0,5 | Si el criterio de las filas es igual que el de las columnas. |
| 0 | Si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas. |

(Fuente: Riba, 2012)

2.2.3. Módulo 1: Sujetar la chapa

La función de este módulo es sujetar la chapa metálica al banco de pruebas, de tal manera que cuando se dé el proceso de deformación incremental, no resbale la chapa y se pierda la acción de deformación generada por la herramienta.

2.2.3.1. Módulo 1, alternativa A

Mordaza de ranura con sujetadores de palanca

Esta mordaza está provista de un talón en v para aprisionar la chapa metálica, en inglés más conocida como drawbeads, impide el flujo incorrecto de material en procesos de

deformación. También está dotada de una prensa rápida de palanca en inglés conocida como, Toggle clamp esta permite aplicar presiones en la chapa de manera rápida. En la figura 2.5 se muestra un bosquejo de la mordaza.

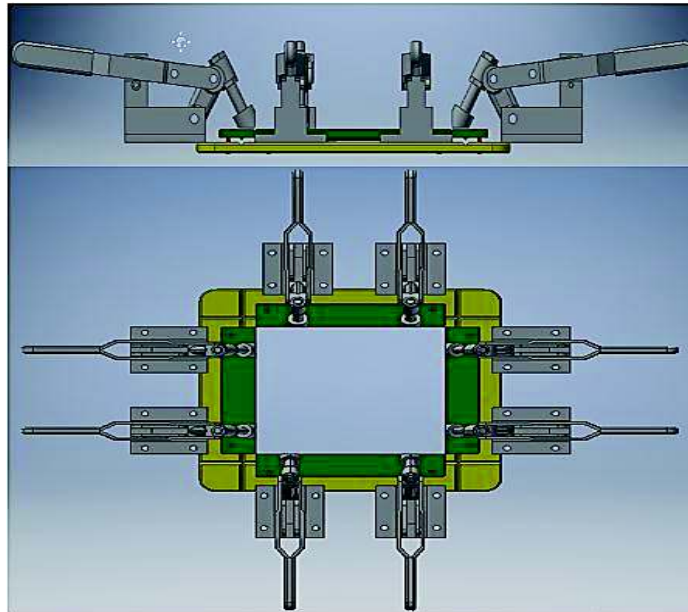


Figura 2. 5. Mordaza con prensa de palanca.
(Fuente: Propia)

Ventajas y desventajas de la alternativa A

La tabla 2.6, presenta las ventajas y desventajas para la alternativa A.

Tabla 2. 6. Ventajas y desventajas de la alternativa A del módulo 1.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Rápido aprisionamiento. • Fácil acople de la prensa rápida de palanca. • El talón de la mordaza permite mejor sujeción que un moleteado. • Fácil recambio de la prensa rápida de palanca. | <ul style="list-style-type: none"> • La fuerza aplicada no es muy segura. • No es muy conocido en nuestro mercado las prensas de palanca. • Ocupa mayor volumen por cuestiones de la prensa rápida de palanca. |

(Fuente: Propia)

2.2.3.2. Módulo 1, alternativa B

Mordaza de ranura empernada

Esta es similar a la anteriormente descrita en lo que respecta al talón en v, con la diferencia de que el aprisionamiento de la chapa se realiza mediante pernos, tiene su base cuadrada y la mordaza es de cuatro piezas. En la figura 2.6 se muestra un bosquejo de la mordaza.

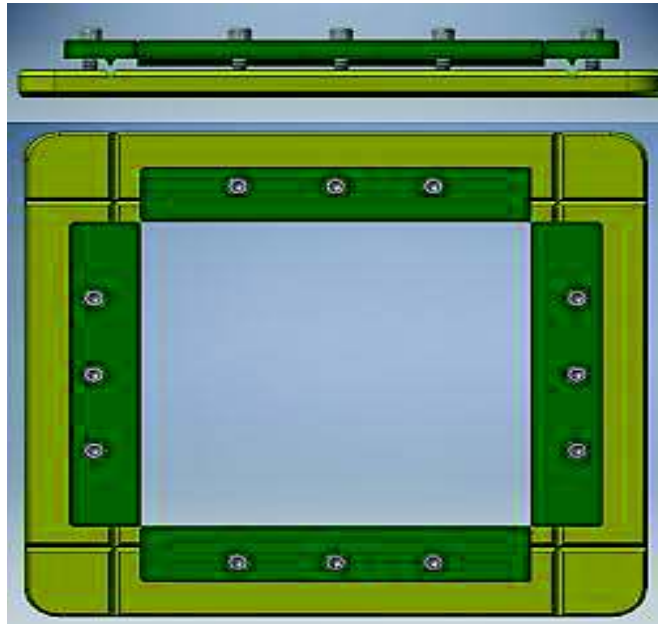


Figura 2. 6. Mordaza de ranura empernada.
(Fuente: Propia)

Ventajas y desventajas de la alternativa B

Tabla 2. 7. Ventajas y desventajas de la alternativa B del módulo 1.

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • La fuerza aplicada es muy segura. • Los pernos y materiales de la mordaza son fáciles de encontrar en el mercado. • El talón de la mordaza permite mejor sujeción de la chapa que un moleteado. • El costo disminuye debido al uso de pernos. | <ul style="list-style-type: none"> • Aprisionamiento lento. • El costo de producción se eleva por la construcción de la mordaza. |

(Fuente: Propia)

2.2.3.3. Módulo 1, alternativa C

Mordaza moleteada empernada

Se diferencia de la anterior por tener un moleteado en vez de una ranura en el área de sujeción de la chapa, de la misma manera se utiliza pernos para el apriete de la chapa. En la figura 2.7 se muestra un bosquejo de la mordaza.

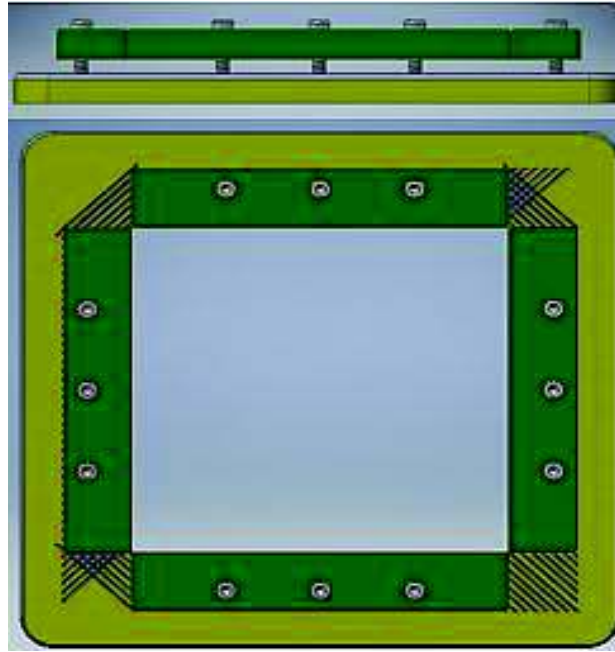


Figura 2. 7. Mordaza moleteada y empernada.
(Fuente: Propia)

Ventajas y desventajas de la alternativa C

Tabla 2. 8. Ventajas y desventajas de la alternativa C del módulo 1.

| Ventajas | Desventajas |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • La fuerza aplicada es aceptable. • Los pernos y materiales de la mordaza son fáciles de encontrar en el mercado. • El costo disminuye debido al uso de pernos normados. | <ul style="list-style-type: none"> • Aprisionamiento lento. |

(Fuente: Propia)

2.2.3.4. Evaluación de alternativas

Las alternativas para la evaluación de esta sección son: volumen, fuerza de apriete, espesores y costo.

Volumen: El banco de pruebas no debe ser demasiado grande para poder moverse con facilidad dentro de la máquina CNC.

Fuerza de apriete: Se necesita que la chapa se sujete de tal manera que se evite movimientos relativos entre la chapa y la mordaza.

Espesores: Se necesita la capacidad de aprisionar varios espesores de chapa.

Costo: Resulta ventajoso que el costo del banco no sea muy excesivo.

Tabla 2. 9. Evaluación de los pesos específicos para las alternativas del módulo 1.

| Volumen > Fuerza > Espesores > Costos | | | | | | |
|---|----------------|---------------|------------------|---------------|------------------------------|--------------------|
| Criterio | Volumen | Fuerza | Espesores | Costos | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Volumen | | 1 | 1 | 1 | 4 | 0,4 |
| Fuerza | 0 | | 1 | 1 | 3 | 0,3 |
| Espesores | 0 | 0 | | 1 | 2 | 0,2 |
| Costos | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0,1 |
| Suma | | | | | 10 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 10. Evaluación del criterio Volumen del módulo 1.

| Alternativa C = Alternativa B > Alternativa A | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Volumen | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 0 | 0 | 1 | 0,16 |
| Solución B | 1 | | 0,5 | 2,5 | 0,41 |
| Solución C | 1 | 0,5 | | 2,5 | 0,41 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 11. Evaluación del criterio Fuerza del módulo 1.

| Alternativa B > Alternativa C > Alternativa A | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Fuerza | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 0 | 0 | 1 | 0,16 |
| Solución B | 1 | | 0,5 | 2,5 | 0,42 |
| Solución C | 1 | 0,5 | | 2,5 | 0,42 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 12. Evaluación del criterio Espesores del módulo 1.

| Alternativa C > Alternativa B > Alternativa A | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Espesores | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 0 | 0 | 1 | 0,16 |
| Solución B | 1 | | 0 | 2 | 0,33 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,5 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 13. Evaluación del criterio Costos del módulo 1.

| Alternativa C > Alternativa B > Alternativa A | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Costos | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 0 | 0 | 1 | 0,16 |
| Solución B | 1 | | 0 | 2 | 0,33 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,5 |
| | | | Suma | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Conclusiones de la evaluación de alternativas

En este caso la alternativa C puede ser aplicada, esto se debe a la facilidad de construcción a menor costo con la aplicación de la misma fuerza.

Tabla 2. 14. Conclusiones de prioridad de solución del módulo 1.

| Conclusión | Volumen | Fuerza | Espesores | Costos | Σ | Prioridad |
|-------------------|---------|--------|-----------|--------|----------|-----------|
| Solución A | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,17 | 3 |
| Solución B | 0,17 | 0,13 | 0,07 | 0,03 | 0,39 | 2 |
| Solución C | 0,17 | 0,13 | 0,10 | 0,05 | 0,44 | 1 |

(Fuente: Propia)

2.2.4. Módulo 2: Deformar la chapa

La herramienta de deformación es muy importante en el proceso de deformación incremental puesto que del diámetro hemisférico de la punta depende parámetros como: la potencia necesaria a aplicar, la ejecución de radios cóncavos en la chapa, la calidad de la superficie, así como el tiempo de fabricación. Un parámetro importante es, si la punta de la herramienta será de tipo esférica, con el fin de realizar deformaciones pronunciadas. Los materiales a utilizar para construir esta herramienta deben ser lo más resistentes al desgaste y fatiga superficial.

2.2.4.1. Módulo 2, alternativa A

Vástago con punta esférica

Se trata de un eje de un solo diámetro de sección circular y una punta esférica como se indica en la figura 2.6. La punta esférica de esta herramienta permite que se realicen

deformaciones cóncavas de radios pequeños, o deformaciones profundas con ángulos de pared pronunciados, se toma en cuenta que el proceso requerirá un poco más de potencia debido por cuestiones de la fricción entre metales.



Figura 2. 8. Herramienta de sección circular continua y punta esférica.
(Fuente: Propia)

Ventajas y desventajas de la alternativa A

Tabla 2. 15. Ventajas y desventajas de la alternativa A módulo 2.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Fácil fabricación en torno CNC. • Fácil acople a la máquina. • Permite deformaciones con ángulos de pared apreciables. | <ul style="list-style-type: none"> • Procesos de fabricación costosa. • Tendencia a calentarse por la fricción. |

(Fuente: Propia)

2.2.4.2. Módulo 2, alternativa B

Vástago con punta esférica rotativa

La punta esférica rotativa de esta herramienta permite que se realicen deformaciones eliminando prácticamente la fricción en el proceso, su configuración mecánica es similar a la de un bolígrafo como se indica en la figura 2.9, se toma en cuenta que con esta herramienta el proceso de deformación requerirá menos potencia.

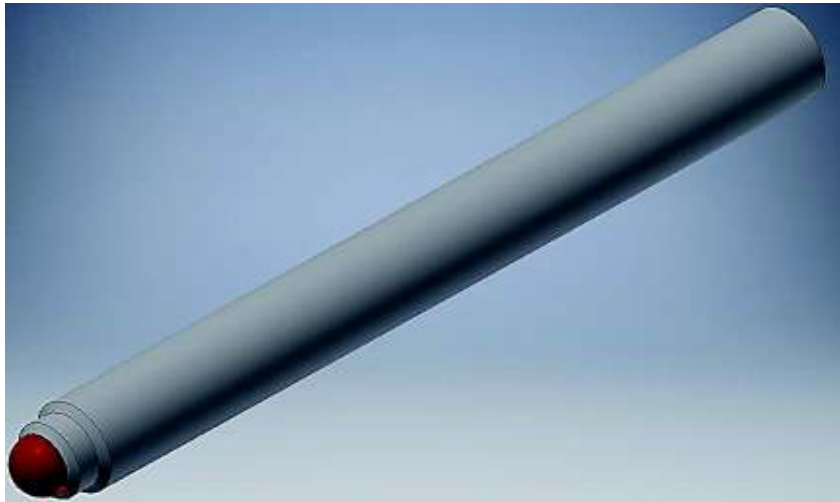


Figura 2. 9. Herramienta de punta esférica rotativa.
(Fuente: Propia)

Ventajas y desventajas de la alternativa B

Tabla 2. 16. Ventajas y desventajas de la alternativa B módulo 3.

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Fácil acople a la máquina. • No genera fricción, por lo tanto, necesita menor cantidad de energía para deformar. | <ul style="list-style-type: none"> • Procesos de fabricación costosa. • Necesita lubricación. • Ángulo de pared pequeño. |

(Fuente: Propia)

2.2.4.3. Módulo 2, alternativa C

Vástago cónico con punta esférica

La parte cónica de la herramienta permite que ésta tenga una mejor resistencia a la compresión y a los esfuerzos generados en la herramienta por el contacto con las paredes de la chapa deformada o esfuerzos radiales de la misma, también la punta esférica permite realizar deformaciones con ángulos de pared pronunciados, evitando roces directos de las paredes con la herramienta. Obsérvese la figura 2.10.



Figura 2. 10. Herramienta cónica con punta esférica.
(Fuente: Propia)

Ventajas y desventajas de la alternativa C

Tabla 2. 17. Ventajas y desventajas de la alternativa C módulo 2.

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Fácil fabricación en torno CNC. • Robusta. • Fácil acople a la máquina. • Permite deformaciones con ángulos de pared apreciables. • Permite deformación en materiales tenaces. | <ul style="list-style-type: none"> • Procesos de fabricación costosa. • Tendencia a calentarse por mayor área de contacto. |

(Fuente: Propia)

2.2.4.4. Evaluación de alternativas

Las alternativas para la evaluación de esta sección son: acople, resistencia, configuración de punta y costo.

Acople: Debe poder acoplarse de manera rápida y fácil.

Resistencia: Debido a esfuerzos cíclicos a los que estará sometida.

Configuración de la punta: La herramienta se puede deformar con mayor facilidad dependiendo de la configuración de la punta.

Costo: El elevado costo de la herramienta puede hacer que el proceso no sea rentable.

Tabla 2. 18. Evaluación de los pesos específicos para los criterios del módulo 3.

| Acople > Resistencia > Configuración > Costo | | | | | | |
|--|--------|-------------|---------------|-------|------------|-------------|
| Criterio | Acople | Resistencia | Configuración | Costo | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Acople | | 1 | 1 | 1 | 4 | 0,4 |
| Resistencia | 0 | | 1 | 1 | 3 | 0,3 |
| Configuración | 0 | 0 | | 1 | 2 | 0,2 |
| Costo | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0,1 |
| | | | | Suma | 10 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 19. Evaluación del criterio Acople del módulo 2.

| Alternativa A = Alternativa B = Alternativa C | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|-------------|---|
| Acople | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación | |
| Solución A | | 0,5 | 0,5 | 2 | 0,33 | |
| Solución B | 0,5 | | 0,5 | 2 | 0,33 | |
| Solución C | 0,5 | 0,5 | | 2 | 0,33 | |
| | | | | Suma | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 20. Evaluación del criterio Resistencia del módulo 2.

| Alternativa C > Alternativa B > Alternativa A | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|-------------|---|
| Resistencia | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación | |
| Solución A | | 0 | 0 | 1 | 0,17 | |
| Solución B | 1 | | 0 | 2 | 0,33 | |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,50 | |
| | | | | Suma | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 21. Evaluación del criterio Configuración del módulo 2.

| Alternativa A > Alternativa B > Alternativa C | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|-------------|---|
| Configuración | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación | |
| Solución A | | 1 | 1 | 3 | 0,50 | |
| Solución B | 0 | | 1 | 2 | 0,33 | |
| Solución C | 0 | 0 | | 1 | 0,17 | |
| | | | | Suma | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 22. Evaluación del criterio Costo del módulo 2.

| Alternativa A > Alternativa B = Alternativa C | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Costo | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 1 | 1 | 3 | 0,50 |
| Solución B | 0 | | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución C | 0 | 1 | | 2 | 0,33 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

(Fuente: Propia)

Conclusiones de la evaluación de alternativas

En este caso la alternativa C puede ser aplicada, esto se debe a la facilidad de construcción con un anclaje sencillo similar al de una fresa sencilla, gran resistencia y con una configuración geométrica que permite mayor aplicación de fuerza.

Tabla 2. 23. Conclusiones de prioridad de solución del módulo 2.

| Conclusión | Acople | Resistencia | Configuración | Costo | Σ | Prioridad |
|-------------------|--------|-------------|---------------|-------|----------|-----------|
| Solución A | 0,13 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 0,33 | 2 |
| Solución B | 0,13 | 0,10 | 0,07 | 0,02 | 0,32 | 3 |
| Solución C | 0,13 | 0,15 | 0,03 | 0,03 | 0,35 | 1 |

(Fuente: Propia)

2.2.5. Módulo 3: Medir cargas verticales

Al tratarse de un banco de pruebas del proceso de deformación incremental, uno de los parámetros físicos de éste debe ser registrado para una posterior evaluación del mismo, en este caso se trata de la carga aplicada a la chapa la cual deberá ser registrada desde un inicio, con esto se podrá apreciar el comportamiento de la chapa según las deformaciones continuas en el proceso, respecto del aumento o disminución de la carga aplicada.

2.2.5.1. Módulo 3, alternativa A

Celda de carga

Permite el registro de carga, para lo cual se debe acoplar a una tarjeta para ampliar la señal, posteriormente esta señal será tratada por un software para la obtención de la curva de la carga aplicada en el proceso. La celda de carga se ancla por medio de 4 pernos como se indica en la figura 2.11 y tiene una configuración de viga en voladizo.

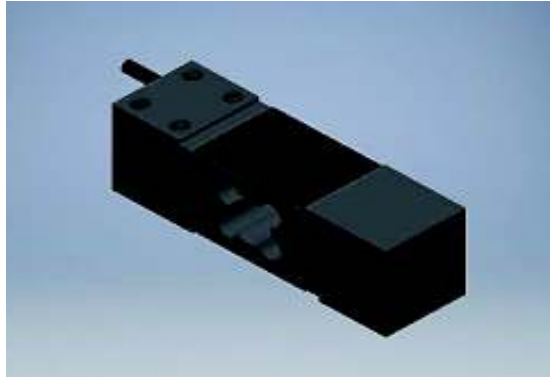


Figura 2. 11. Celda de carga.
(Fuente: Propia)

Ventajas y desventajas de la alternativa A

Tabla 2. 24. Ventajas y desventajas de la alternativa A del módulo 3.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Fácil obtención de señal de carga. • Fácil aplicación al banco de pruebas. • Volumen reducido. | <ul style="list-style-type: none"> • Costo relativamente alto. • Aplicación en un solo punto. • Se debe construir bases para acople. |

(Fuente: Propia)

2.2.5.2. Módulo 3, alternativa B

Galgas extensiométricas

Una galga extensiométrica figura 2.12, es un sensor capaz de medir deformaciones mediante el cambio de resistencia en su estructura al aplicar una carga. Para su utilización es necesario encontrar un punto donde se pueda medir la deformación para obtener la carga aplicada, en el caso del banco deberían colocarse en las columnas para posteriormente conectarlas en una configuración conocida como puente de Wheatstone como se indica en la figura 2.13. La señal obtenida se la amplifica y procesa con una tarjeta y un software, con esto se obtendría la curva de la carga del proceso.

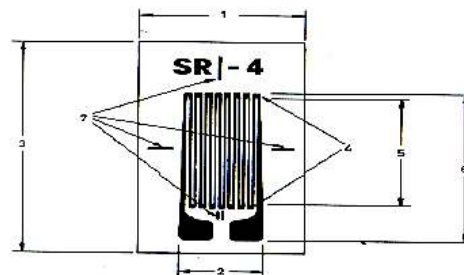


Figura 2.12. Galga extensiométrica.
(Fuente: [12])

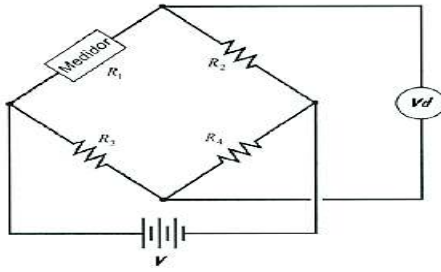


Figura 2.13. Puente Wheatstone.
(Fuente: Alzate, [12])

Ventajas y desventajas de la alternativa B

Tabla 2. 25. Ventajas y desventajas de la alternativa B del módulo 3.

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. • No ocupa espacio. • No se debe construir bases. | <ul style="list-style-type: none"> • Difícil implementación en el banco. • Se debe modificar la estructura del banco. |

(Fuente: Propia)

2.2.5.3. Evaluación de alternativas

Las alternativas para la evaluación de esta sección son: señal de carga, necesidad de modificaciones en la estructura, costo y facilidad de aplicación.

Señal de carga: Se necesita que la información adquirida de la carga sea exacta.

Necesidad de modificaciones en la estructura: No es conveniente tener que realizar modificaciones en los componentes del banco de pruebas de manera drástica.

Costo: Este implemento no debe encarecer demasiado al diseño general del banco de pruebas.

Facilidad de aplicación: Si incrementa la dificultad para implementarlo, incrementa la probabilidad de errores de medición de carga.

Tabla 2. 26. Evaluación de los pesos específicos para los criterios del módulo 3.

| Señal > Modificaciones > Costo > Aplicación | | | | | | |
|---|-------|----------------|--------|------------|------------|-------------|
| Criterio | Señal | Modificaciones | Costos | Aplicación | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Señal | | 1 | 1 | 1 | 4 | 0,4 |
| Modificaciones | 0 | | 1 | 1 | 3 | 0,3 |
| Costos | 0 | 0 | | 1 | 2 | 0,2 |
| Aplicación | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0,1 |
| | | | | Suma | 10 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 27. Evaluación del criterio Señal del módulo 3.

| Alternativa A > Alternativa B | | | | |
|---|------------|------------|------------|-------------|
| Señal | Solución A | Solución B | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 1 | 2 | 0,66 |
| Solución B | 0 | | 1 | 0,33 |
| Suma | | | 3 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 28. Evaluación del criterio Modificación del módulo 3.

| Alternativa A > Alternativa B | | | | |
|---|------------|------------|------------|-------------|
| Modificación | Solución A | Solución B | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 1 | 2 | 0,66 |
| Solución B | 0 | | 1 | 0,33 |
| Suma | | | 3 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 29. Evaluación del criterio Costos del módulo 3.

| Alternativa B > Alternativa A | | | | |
|---|------------|------------|------------|-------------|
| Costos | Solución A | Solución B | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 0 | 1 | 0,33 |
| Solución B | 1 | | 2 | 0,66 |
| Suma | | | 3 | 1 |

(Fuente: Propia)

Tabla 2. 30. Evaluación del criterio Aplicación del módulo 3.

| Alternativa A > Alternativa B | | | | |
|---|------------|------------|------------|-------------|
| Aplicación | Solución A | Solución B | $\Sigma+1$ | Ponderación |
| Solución A | | 1 | 2 | 0,66 |
| Solución B | 0 | | 1 | 0,33 |
| Suma | | | 3 | 1 |

(Fuente: Propia)

Conclusiones de la evaluación de alternativas

En este caso la alternativa A puede ser aplicada, esto se debe a la facilidad de aplicación dentro del stock que ofrece este tipo de componente, respecto a la obtención de señal; es de sencilla conexión a sus tarjetas amplificadoras y de control, así como la obtención de datos mediante software, no necesita demasiadas modificaciones el diseño, y su costo no difiere en mucho a la aplicación de galgas.

Tabla 2. 31. Conclusiones de prioridad de solución del módulo 3.

| Conclusión | Señal | Modificaciones | Costos | Aplicación | Σ | Prioridad |
|-------------------|-------|----------------|--------|------------|----------|-----------|
| Solución A | 0,27 | 0,20 | 0,07 | 0,07 | 0,60 | 1 |
| Solución B | 0,13 | 0,10 | 0,13 | 0,03 | 0,40 | 2 |

(Fuente: Propia)

2.2.6. Matriz morfológica

Esta matriz se utiliza para la selección de una solución conjunta, es útil para definir la solución de manera más visible y fácil, en este caso se podrían realizar hasta 2 combinaciones prioritarias de posibles soluciones, de las cuales solo una se determinará tomando en cuenta las evaluaciones anteriores de cada módulo según sus prioridades. En la tabla 2.32 se indica la selección de cada módulo, con el fin de definir la solución final del diseño.

Tabla 2. 32. Matriz morfológica para decisión del diseño del banco de pruebas.

| Módulos | Alternativas de diseño | | |
|------------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | Alternativa A | Alternativa B | Alternativa C |
| M1: Sujetar la chapa | Mordaza de ranura con sujetador de palanca | Mordaza de ranura empernada | Mordaza moleteada empernada |
| M2: Deformar la chapa | Vástago con punta esférica | Vástago con punta esférica rotativa | Vástago cónico con punta esférica |
| M3: Medir cargas verticales | Celda de carga | Galgas extensiométricas. | |

(Fuente: Propia)

Resultado de la matriz morfológica

Con la ayuda de la matriz morfológica y la determinación de las prioridades de las alternativas de diseño se define como la solución más viable el diseño de un banco de pruebas para el estudio de la deformación incremental en chapas de aluminio, dotado de:

- Una mordaza moleteada empernada para sujetar la chapa.
- Una herramienta de vástago con punta esférica para realizar la deformación en la chapa.
- Una celda de carga para determinación de cargas aplicadas.

2.2.7. Simulación del proceso

Para empezar a realizar los cálculos y selección de los elementos del banco de pruebas es necesario tener un valor base como referencia para continuar con el diseño. Al tratarse de

un proceso relativamente nuevo de deformación de chapas, es necesario tener una idea de la carga aplicada por la herramienta en el eje Z, figura 2.14. Este parámetro ha sido importante en estudios de la deformación incremental [13]. Razón por la cual se simula el proceso en un software de elementos finitos, obteniéndose una predicción de los valores de carga.

Se toma en cuenta que, debido a las no linealidades de la simulación y el trabajo de deformación en la zona plástica del material, esta se realiza en el entorno Transient Structural de ANSYS. Para un desarrollo adecuado también se toma en cuenta que fue necesario ensayar el material en cuestión debido a la necesidad de configurar su curva esfuerzo deformación, esfuerzo de cedencia, esfuerzo último, módulo de Young y coeficiente de Poisson en dicho entorno. Las propiedades del material incluidas en el software de simulación corresponden al aluminio AA 1200 H14.

Los parámetros importantes para definir el modelo son:

- Angulo de pared de 45°
- Espesor de la chapa de 1 mm
- Diámetro de la herramienta 7 mm
- Herramienta sin rotación
- Trayectoria de la herramienta circular espiral
- Velocidad de avance de la herramienta de 10 mm/s
- Desplazamiento vertical de 0,5 mm por pasada

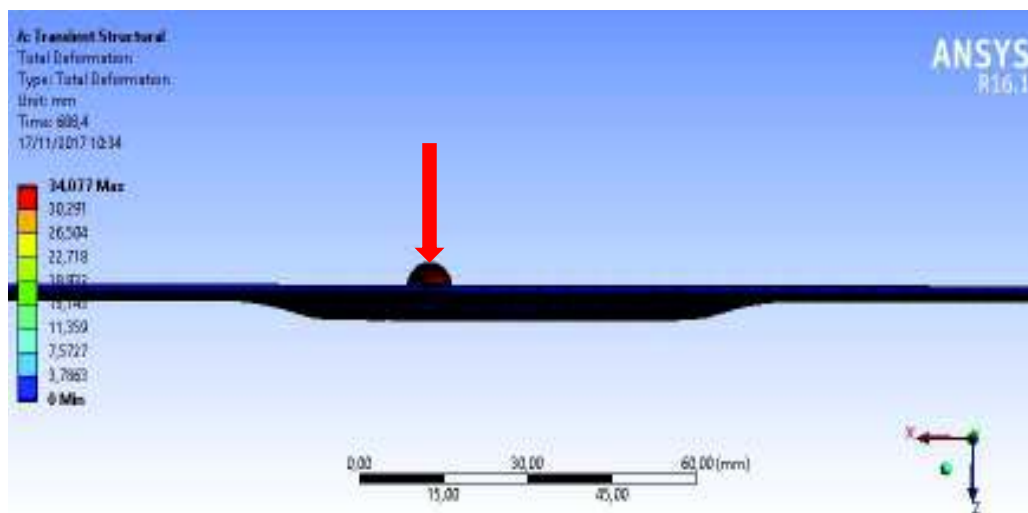


Figura 2. 14. Carga aplicada por la herramienta en el eje Z.
(Fuente: Propia)

Las condiciones externas del material a deformar en el software de simulación se las configura de tal manera que interactúe como si estuviera anclada al utillaje en diseño, es decir se crea sujeciones a los alrededores. En la figura 2.15 se señalan los soportes en los alrededores de la chapa como para que asemeje el ajuste de las mordazas.

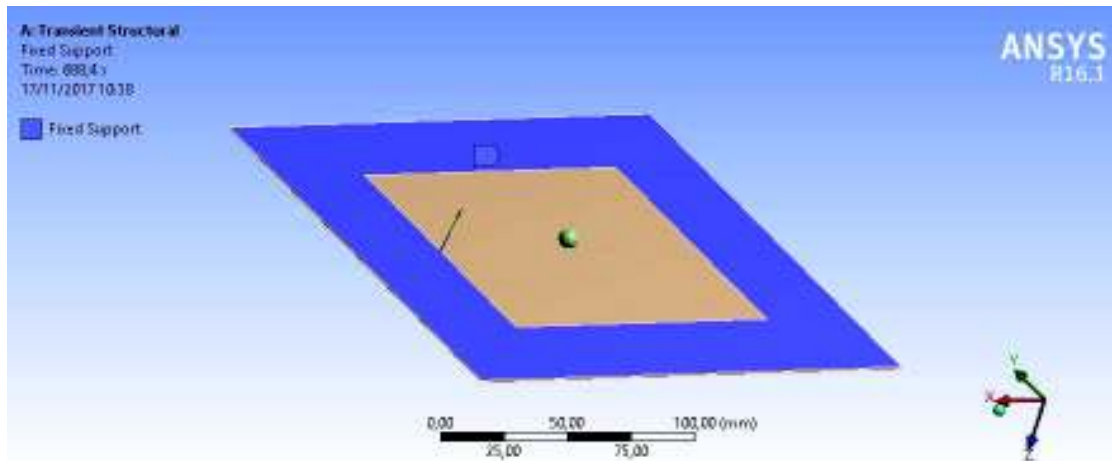


Figura 2. 15. Condiciones de borde.
(Fuente: Propia)

Se configura en el entorno de simulación también uno de los apartados en ANSYS referente al endurecimiento del material por deformación Multilinear Isotropic Hardening, como se indica en la figura 2.16, con el fin de que en la simulación se tome en cuenta el endurecimiento por deformación, mientras el proceso se desarrolla.

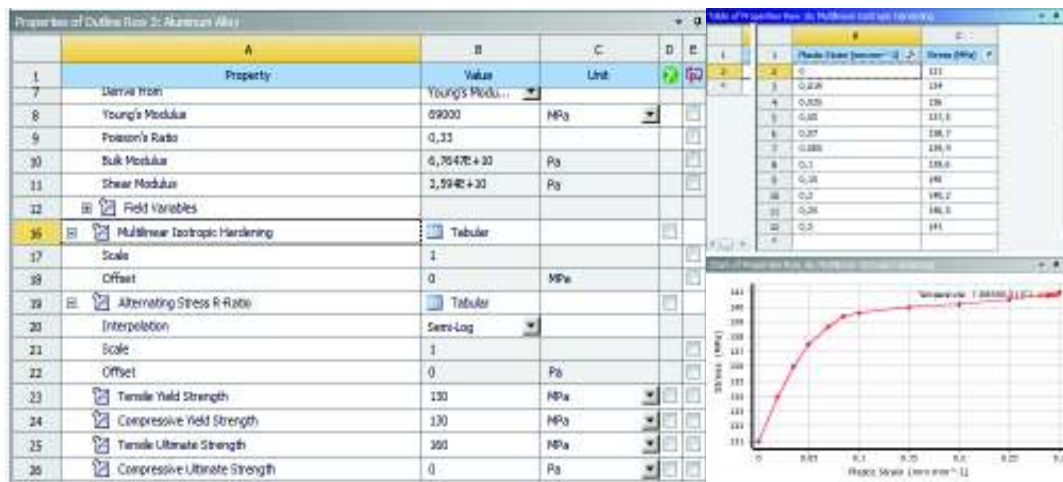


Figura 2. 16. Configuración del material respecto al endurecimiento por deformación en el entorno de simulación.
(Fuente: Propia)

La herramienta configurada en este software consiste en una esfera de diámetro de 7 mm, sus propiedades son las de un acero para herramienta. La trayectoria configurada de la

herramienta es una espiral circular como se indica en la figura 2.17, se toma una velocidad de 10 mm/s dado que esta variable es directamente proporcional a la fuerza necesaria para realizar la deformación, es decir al tomar velocidades mayores aumentara la fuerza necesaria para deformar, también se toma en cuenta por anteriores estudios que es una velocidad recomendable para analizar este proceso [13].

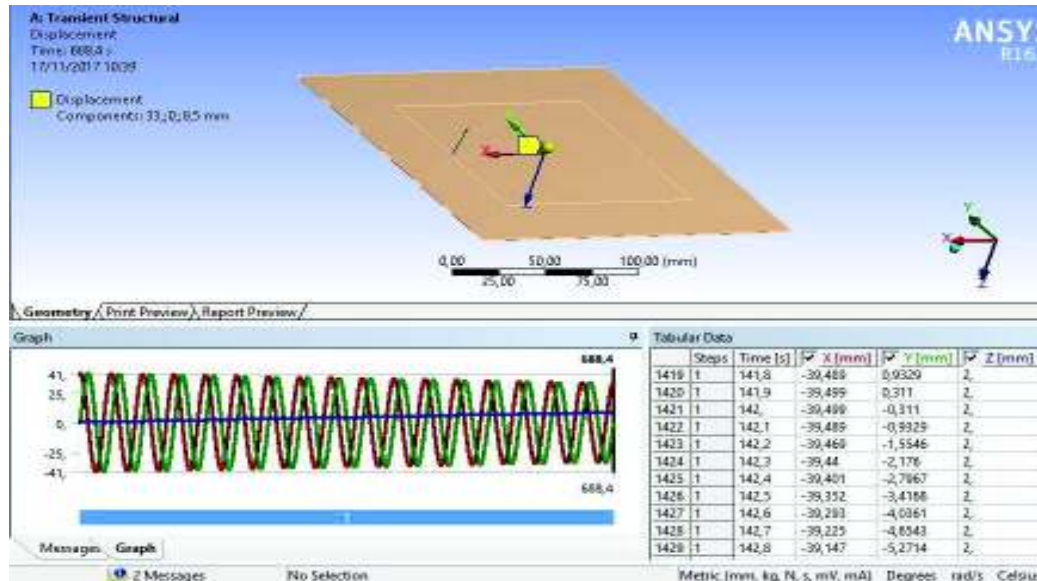


Figura 2. 17. Configuración de la ruta de la herramienta.
(Fuente: Propia)

De la simulación se obtiene los valores importantes del desarrollo de la carga en el eje de aplicación de fuerza máxima ($F_z = 500$ N, ver figura 3.1) para fines de diseño y validación del software con los respectivos valores de su experimentación.

2.3. Diseño de detalle de los componentes

En este apartado se realiza el cálculo de los componentes del banco de pruebas y la selección de los componentes normados, a partir de condiciones de funcionamiento críticas de la máquina. Como punto de partida se utiliza los resultados de carga máxima obtenidos en la simulación del proceso realizado para una chapa de aluminio AA 1200 de 1 mm de espesor en un software de elementos finitos. Hay que resaltar el hecho de haber multiplicado la carga obtenida en la simulación por un factor de seguridad $F.S. = 4$, con el fin de asegurar el diseño de la máquina y la posibilidad de realizar pruebas con otros materiales a futuro. A su vez las cargas a soportar por esta máquina se las toma como cargas estáticas, a excepción de las cargas a las que la herramienta estará sometida las cuales son de tipo repetitivas o dinámicas.

2.3.1. Cálculo del espesor de la mordaza superior

Para el diseño del banco se toma como carga máxima 2000 N, obtenidos del producto de un factor de seguridad de 4, con el valor obtenido mediante la simulación del proceso (ver figura 3.1), que es de 500 N aproximadamente.

En este elemento la carga es de tipo uniforme y distribuida a lo largo de la mordaza. En la figura 2.18 se detalla el diagrama de cuerpo libre respectivo.

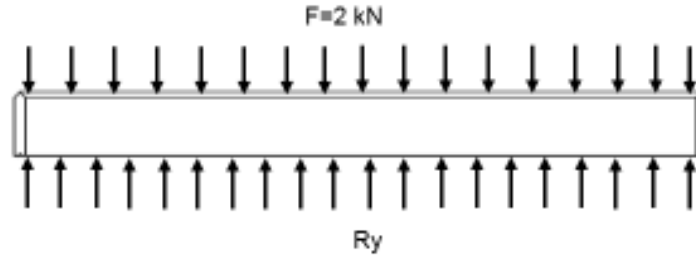


Figura 2. 18. Diagrama de cuerpo libre de la mordaza.
(Fuente: Propia)

Al tratarse de una placa sometida a cargas distribuidas como se indica en la figura 2.19 es necesario determinar este elemento por medio del método de elementos finitos. Se selecciona un acero AISI 1045, con resistencia de cedencia de 310 MPa, configurada para una placa de 12 mm de espesor. Ver especificaciones en el anexo III. Se configura en una superficie de la mordaza un soporte y por la otra en el área de la cabeza de los pernos, se aplica la fuerza obtenida de la simulación del proceso distribuida para cada uno de los tres pernos, cabe resaltar que el área aplicada de esta carga es la que únicamente aplicaría realmente los pernos en su arandela. Obteniéndose un esfuerzo equivalente máximo de Von Mises, de 11 MPa, como se indica en la figura 2.19.

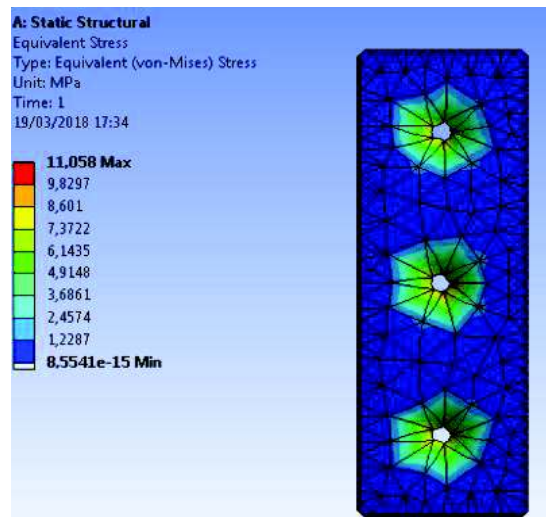


Figura 2. 19. Distribución de esfuerzos de Von Mises para la mordaza.
(Fuente: Propia)

Se obtiene deformaciones del elemento de 0.0004 mm como máximo valor, con lo que se dice que este valor es despreciable, esto quiere decir que este elemento se deformará de manera mínima. Obsérvese figura 2.20.

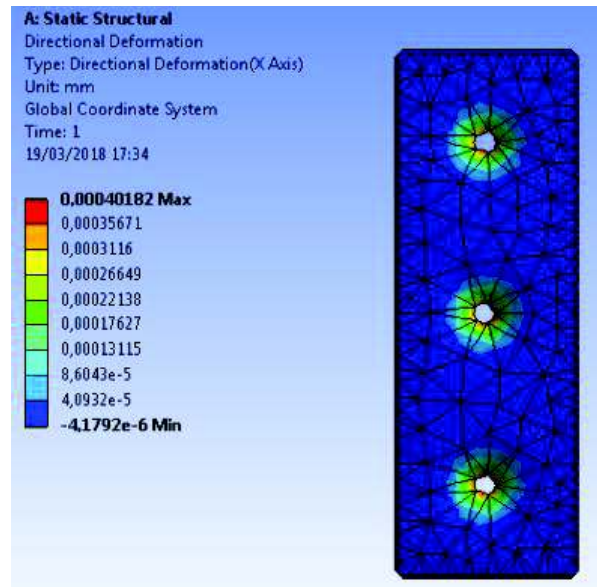


Figura 2. 20. Deformaciones en la mordaza.
(Fuente: Propia)

Se determina un factor de seguridad de 15, figura 2.21 con lo que se garantiza su diseño.

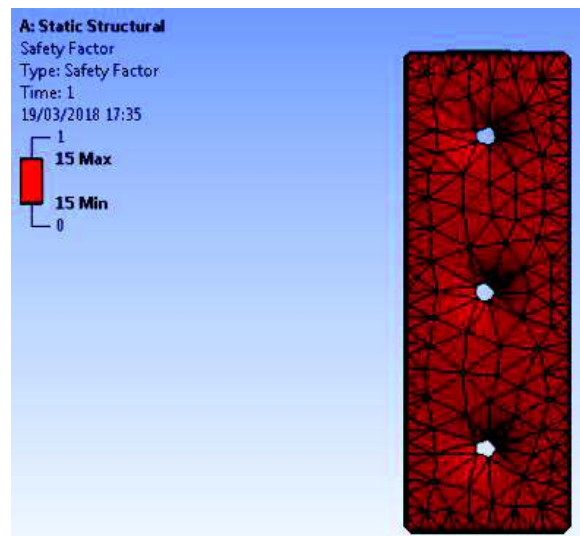


Figura 2. 21. Factor de seguridad para la mordaza.
(Fuente: Propia)

2.3.2. Cálculo de la placa base de la mordaza inferior

Para el cálculo de este elemento se lo toma como si fuese una viga doblemente empotrada, de sección rectangular, para cada una de las 4 aristas que lo conforman, debido a que la placa en cada extremo tiene una tuerca que la sujeta a sus respectivas columnas.

El método que se usa en este caso es el de enfoque general, es decir el problema de la carga permisible en comparación con la carga de pérdida de función, comúnmente llamado el método del factor de diseño o el método clásico de diseño ecuación 2.1, y su diagrama de cuerpo libre se lo puede observar en la figura 2.22.

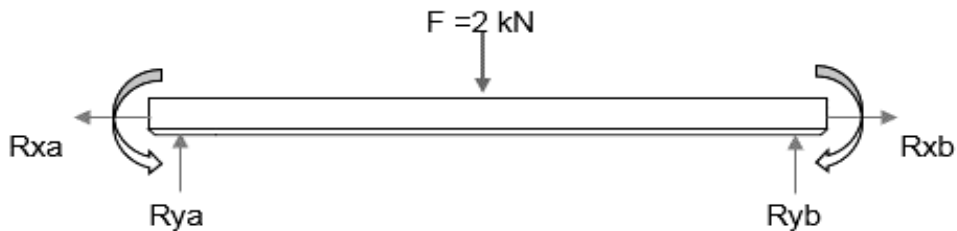


Figura 2. 22. Diagrama de cuerpo libre de la base de la mordaza.
(Fuente: Propia)

De la misma manera el diagrama de momento flector se ilustra en la figura 2.23 de donde se obtiene el momento flexor máximo necesario para la determinación del espesor mínimo de este elemento.

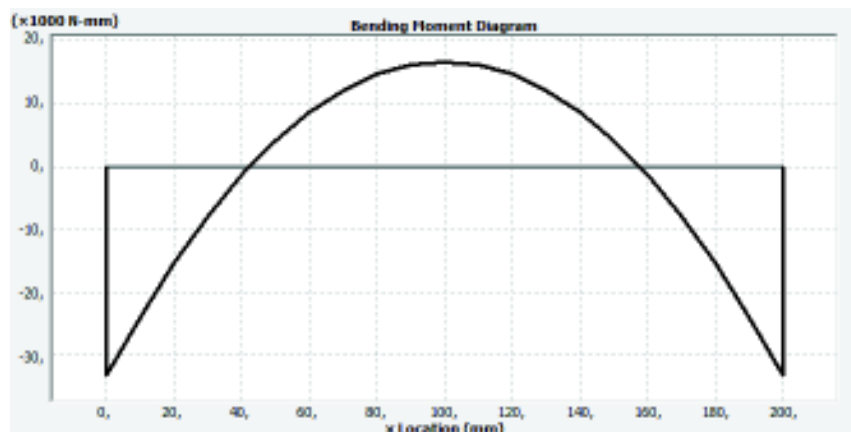


Figura 2. 23. Diagrama de momento flector para la base de la mordaza.
(Fuente: Propia)

Si se utiliza el mismo método clásico de diseño, la fórmula para la flexión en vigas, con su respectiva inercia en una configuración rectangular, una selección de acero ASTM A36 con un esfuerzo de cedencia de 250 MPa y un factor de seguridad de 2, se obtiene un espesor

de placa de 9,8 mm. Las propiedades mecánicas del material seleccionado se detallan en el anexo IV.

$$\sigma_d \geq \frac{\sigma_y}{F.S_1}$$

Ec. 2. 1. Método del factor de diseño o el método clásico de diseño.
(Fuente: [14])

Donde:

- σ_d : Esfuerzo de diseño calculado
- σ_y : Esfuerzo de fluencia del material
- $F.S_1$: Factor de seguridad

Reemplazando por el esfuerzo de cedencia se tiene:

$$\sigma_d \geq 125 \text{ Mpa}$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

Ec. 2. 2. Fórmula para la flexión en vigas.
(Fuente: [15])

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Ec. 2. 3. Inercia en una sección rectangular.
(Fuente: [15])

Dónde:

- M : Momento máximo generado
- c : Distancia al eje neutro de la viga
- I : Inercia
- b : Ancho de la placa
- h : Espesor de la placa
- $\sigma_{\text{calculado}}$: Esfuerzo calculado con el nuevo espesor

$$c = \frac{h}{2}$$

Ec. 2. 4. Distancia al eje neutro de la viga rectangular.
(Fuente: [15])

Por ser una placa rectangular.

$$h = \sqrt{\frac{6 * M}{b * \sigma_d}}$$

Ec. 2. 5. Espesor de la placa en función del momento flector, ancho de placa y el esfuerzo de diseño.
(Fuente: [14])

Reemplazando la inercia y despejando se tiene un espesor de 9.8 mm.

Entonces se selecciona un espesor normalizado de 12 mm, por cuestiones del roscado para las mordazas, con este valor y la ecuación 2.1, se obtiene un nuevo factor de seguridad de 3.

Entonces se dice que:

$$F. S_2 \geq F. S_1$$

Por el método clásico de diseño se sabe que cuando el nuevo factor de seguridad $F. S_2$, obtenido con los valores calculados, es mayor que el factor de seguridad elegido $F. S_1$, se garantiza el diseño.

2.3.3. Cálculo de la junta atornillada de la mordaza

En la figura 2.24, se representa la junta de la mordaza en un corte para dar idea de las fuerzas implicadas en el diseño de la misma.

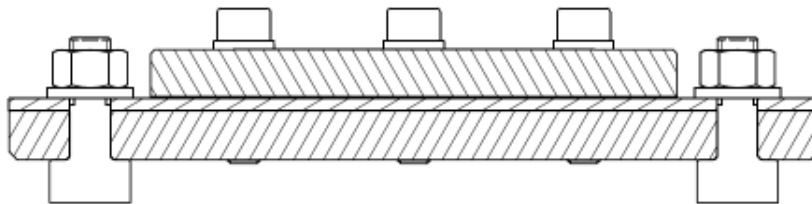


Figura 2. 24. Junta atornillada de la mordaza.
(Fuente: Propia)

Esta junta es la que permite mantener sujeta la chapa metálica para realizar el proceso de deformación, en la figura 2.25 se indica el diagrama de cuerpo libre donde se indican las cargas involucradas en la mordaza superior.

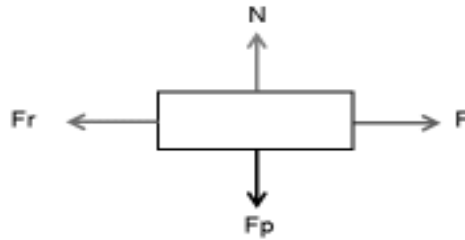


Figura 2. 25. Diagrama de cuerpo libre de la mordaza superior.
(Fuente: Propia)

Si la fuerza **F** representada en la figura 2.25 es de 2 kN que se daría en un caso crítico cuando la herramienta aplica carga en un sitio cercano a la mordaza, este valor se lo obtuvo de la simulación del proceso luego de multiplicarlo por un factor de seguridad de 4, con esto se obtiene el resto de fuerzas implicadas, esto con el fin de encontrar la fuerza **Fp** que los pernos deberán aplicar a la mordaza.

$$F - Fr = 0$$

Ec. 2. 6. Sumatorio de fuerzas en el eje x de la mordaza superior.
(Fuente: propia)

Tomando al eje horizontal como el eje x, y al vertical como el eje y en la figura 2.25, se dice que, por equilibrio de fuerzas ecuación 2.6, la fuerza aplicada **F** es igual a la fuerza de fricción generada **Fr**, del mismo modo la fuerza que aplican los pernos **Fp** es igual a la normal generada **N**. El coeficiente de fricción estático μ acero-aluminio es de 0,61. Al reemplazar valores y realizar las debidas operaciones en la ecuación 2.6, se obtiene una fuerza necesaria aplicada por los pernos de 3279 N,

$$F_p = N = 3278.7 \text{ N}$$

Donde:

- F:** Fuerza requerida para el proceso.
- Fr:** Fuerza de rozamiento (Acero-aluminio).
- N:** Fuerza normal generada.
- Fp:** Fuerza necesaria a ser aplicada por los pernos.

Mediante sumatoria de fuerzas indicada en la ecuación 2.6, se obtiene que la fuerza a ser resistida por los pernos es de al menos $F_p = 3300 \text{ N}$, a partir de esta se calcula el número de pernos necesarios para cada mordaza según la ecuación 2.7, en la cual se adopta un factor de seguridad a la fluencia de los pernos de 1.32, por tratarse de pernos que sujetarán las mordazas y estarán sometidos a esfuerzos de tensión. también se obtiene el factor de

carga n_l , y el factor de seguridad contra la separación n_0 cómo se indican en las ecuaciones 2.8, y 2.9.

$$n_p = \frac{S_p A_t}{C \left(\frac{P_{total}}{N_p} \right) + Fi}$$

Ec. 2. 7. Factor de seguridad a la fluencia estática de los pernos.
(Fuente: [14])

$$n_l = \frac{S_p A_t - Fi}{C \left(\frac{P_{total}}{N_p} \right)}$$

Ec. 2. 8. Factor de carga de los pernos.
(Fuente: [14])

$$n_0 = \frac{Fi}{\left(\frac{P_{total}}{N_p} \right) (1 - C)}$$

Ec. 2. 9. Factor de seguridad contra la separación.
(Fuente: [14])

Donde:

- n_p :** Factor de seguridad a la fluencia por esfuerzo estático
- n_l :** Factor de carga
- n_0 :** Factor de seguridad contra la separación
- S_p :** Resistencia de prueba
- A_t :** Área de esfuerzo de tensión de los pernos
- C :** Fracción de la carga externa P soportada por el perno
- P_{total} :** Carga externa total aplicada a la unión
- N_p :** Número de pernos en la unión
- Fi :** Precarga

Los pernos que se seleccionan son: M8x1,25 de 40 mm de longitud, grado 5. La rigidez de los pernos se los calcula con la ecuación 2.10, de la misma manera la rigidez de la mordaza, la chapa de aluminio, el separador y la base de la mordaza se las calcula con las ecuaciones 2.11 y 2.12. Las especificaciones técnicas de los pernos seleccionados se detallan en el anexo V.

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d}$$

Ec. 2. 10. Rigidez del perno.
(Fuente: [14])

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_i}$$

Ec. 2. 11. Inverso de la rigidez total de la junta.
(Fuente: [14])

$$k = \frac{0.5774\pi E d}{\ln \frac{(1.155t + D - d)(D + d)}{(1.155t + D + d)(D - d)}}$$

Ec. 2. 12. Rigidez de cada elemento.
(Fuente: [14])

Donde:

- A_d : Área del diámetro mayor del sujetador
- E : Módulo de la elasticidad del perno
- l_t : Longitud de la parte roscada de agarre
- l_d : Longitud de la parte sin roscar en agarre
- k : Rigidez de cada elemento
- k_b : Rigidez del perno
- k_m : Rigidez total de la junta
- k_1 : Rigidez del primer elemento
- k_i : Rigidez del i-ésimo elemento en la junta
- d : Diámetro del perno
- D : Diámetro del cono menor formado

Para el cálculo del número de pernos de la junta es necesario obtener: la fracción de la carga externa soportada por el perno ecuación 2.13 y la precarga ecuación 2.14, el resto de valores se los obtiene de tablas indicadas en el anexo VIII.

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

Ec. 2. 13. Fracción de la carga soportada por cada perno.
(Fuente: [14])

$$F_i = 0.75 * A_t S_p$$

Ec. 2. 14. Precarga en función de la resistencia de prueba.
(Fuente: [14])

Al despejar y reemplazar los valores respectivos en la ecuación 2.8, con un factor de seguridad a la fluencia por esfuerzo estático se obtiene el mínimo de pernos en cada mordaza de tres.

Aproximadamente 3 pernos, con un factor de carga $n_1 = 22$, este se aplica como protección contra las sobrecargas y un factor de seguridad contra la separación de $n_0 = 19$ con el fin de evitar separaciones de la junta.

2.3.4. Cálculo de las columnas

Las columnas le sirven de soporte a las mordazas, son la parte estructural del banco de pruebas, se selecciona un acero AISI 1018 y las cargas soportadas por estas se indican en la figura 2.26. Las especificaciones técnicas del material seleccionado se detallan en el anexo VI.

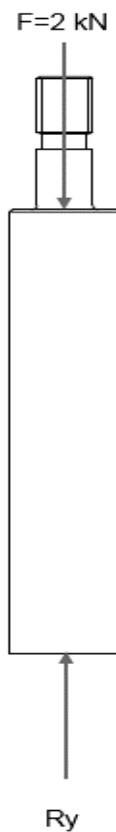


Figura 2. 26. Diagrama de cuerpo libre de las columnas.
(Fuente: Propia)

Los parámetros necesarios para los cálculos son:

- Sección transversal redonda sólida: $L=150$ mm. Factor de diseño: $N=3$.
- Ambos extremos están empotrados.
- Material: Acero A-36; $S_y = 250$ MPa; $E = 200$ GPa.
- Carga máxima a ser aplicada es de $P_a = 2000$ N.

Análisis:

Cálculo de la longitud efectiva L_e de la columna

$$L_e = KL$$

Ec. 2. 15. Longitud efectiva de la columna.
(Fuente: [16])

Donde:

L_e : Longitud real de la columna entre los soportes

K : Constante que depende del extremo fijo

L : Longitud de la columna

En la figura 2.27 se indica los factores de K para aplicarlos en la relación de esbeltez conforme la configuración de la columna.

| | | | | | | |
|--|------|------|-----|-----|------|-----|
| Buckled shape of column shown by dashed line | | | | | | |
| Theoretical K value | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 |
| Recommended design value K | 0.65 | 0.80 | 1.2 | 1.0 | 2.10 | 2.0 |
| End condition key | | | | | | |

Figura 2. 27. Valores de K para obtener longitud efectiva, $L_e = KL$ para distintas conexiones en los extremos.
(Fuente: [14])

Donde se obtiene por medio de la tabla 2.27 y la ecuación 2.15, la longitud real de la columna entre los soportes para este caso de 97,5 mm.

Suponiendo una columna larga se tiene la ecuación 2.16, para obtener un diámetro de la misma.

$$D = \left[\frac{64 * F. S_1 * P_a (KL)^2}{\pi^3 E} \right]^{1/4}$$

Ec. 2. 16. Diámetro de la columna de sección circular, para una columna larga.
(Fuente: [16])

Donde:

- P_a** : Carga admisible
- $F. S_1$** : Factor de seguridad
- E** : Módulo de la elasticidad de la columna
- D** : Diámetro de la columna

Con la ecuación 2.16, un factor de seguridad de 3 y una carga admisible de 2000 N, se obtiene un diámetro de 4,93 mm.

Ahora se puede calcular el radio de giro:

$$r = \sqrt{I/A}$$

Ec. 2. 17. Radio de giro de la columna.
(Fuente: [16])

$$r = \sqrt{\frac{\pi D^4 / 64}{\pi D^2 / 4}} = \frac{D}{4}$$

Ec. 2. 18. Radio de giro de la columna en función del diámetro.
(Fuente: [16])

Donde:

- A** : Área de la sección transversal
- r** : Radio de giro
- I** : Inercia

Con la ecuación 2.18, y el diámetro calculado se obtiene un radio de giro de 1,23 mm.

La relación de esbeltez es la relación que se usa en lugar de la longitud real de la columna para clasificar las columnas de acuerdo con las categorías de longitud:

$$L_e/r = KL/r$$

Ec. 2. 19. Relación de esbeltez.
(Fuente: [16])

Se obtiene a partir de la ecuación 2.19, la nueva relación de esbeltez de 79.15.

Ahora la relación de esbeltez de transición, o constante de columna c_c es la que permite seleccionar el método correcto de cálculo de la columna, ya sea columna larga con carga centrada método de Euler, o columna corta de carga centrada método de J. B. Johnson:

$$c_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}}$$

Ec. 2. 20. Constante de columna.
(Fuente: [16])

Donde:

c_c : Constante de la columna

S_y : Resistencia de fluencia del material

Con la ecuación 2.20, el módulo de la elasticidad del material y el esfuerzo de cedencia del material se obtiene una constante de columna de $c_c = 125.6$, ahora como $KL/r < c_c$; se debe rediseñar la columna como columna corta empleando la fórmula de J. B. Johnson.

$$P_{cr} = AS_y \left[1 - \frac{S_y(KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

Ec. 2. 21. Carga crítica de pandeo.
(Fuente: [16])

Donde:

P_{cr} : Carga crítica de pandeo

Pero la carga crítica de pandeo se obtiene al multiplicar el factor de seguridad seleccionado de 3, por la carga admisible de 2000 N. Con el valor de la carga crítica de pandeo el área

seccional de la columna, la relación de esbeltez calculada, y las propiedades del material, en la ecuación 2.21, se determina un diámetro mínimo de 5.95 mm.

Al comprobar de nuevo la relación de esbeltez se tiene un valor de $KL/r=65,55$.

Esta relación todavía es menor que el valor de transición, por lo que el análisis es aceptable. Para el diseño del banco de pruebas se especifica un diámetro de 20 mm, por cuestiones geométricas, de apoyo de la mordaza a las columnas.

2.3.5. Cálculo de la base de la estructura

Esta base soporta las cuatro columnas, la mordaza y se sujeta a la celda de carga, su función es hacer de base y estructura del banco. El material en el que se trabaja es ASTM A36 ya que es un estructural con propiedades y configuraciones geométricas aceptables también es de gran disposición en nuestro mercado, en la figura 2.28 se indica su respectivo diagrama de cuerpo libre.

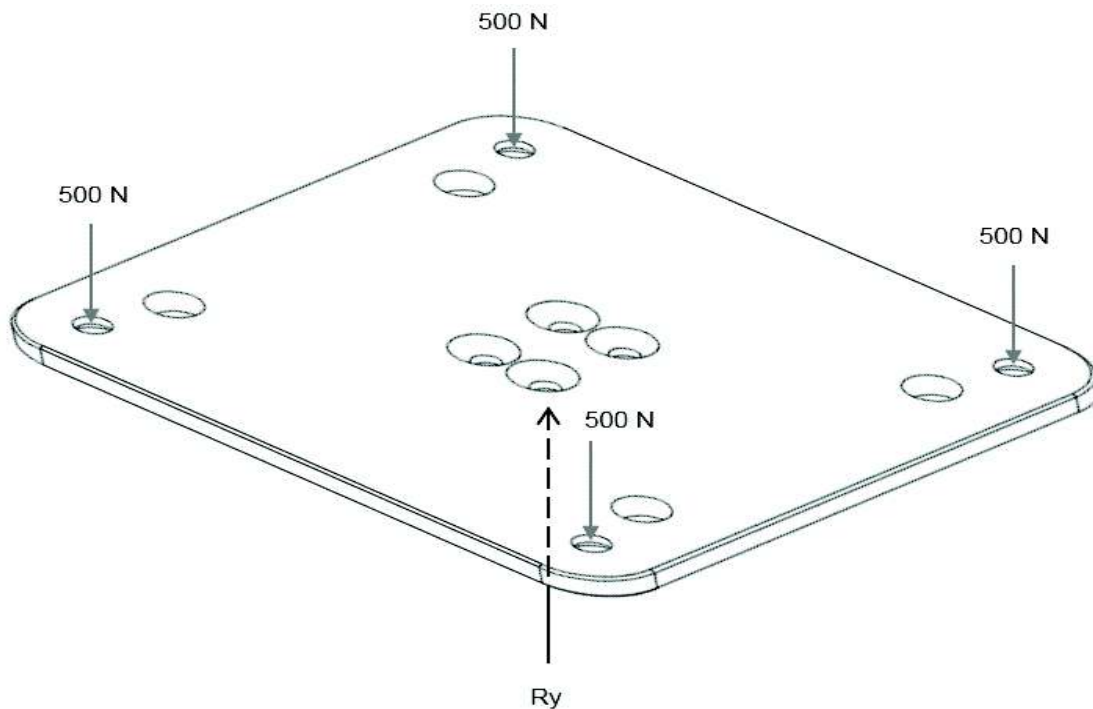


Figura 2. 28. Diagrama de cuerpo libre para la base del banco de pruebas.
(Fuente: Propia)

Al tratarse de una placa con la configuración que se indica en la figura 2.28, es necesario determinar este elemento por medio del método de elementos finitos. El material utilizado es acero ASTM A36, con un esfuerzo de cadencia de 250 MPa y sus propiedades mecánicas se detallan en el anexo IV. Se selecciona un espesor de 8mm.

Se configura en el contorno de los 4 orificios internos un soporte y cuatro cargas puntuales en cada agujero de los extremos de 500 N cada uno, estas cargas se las obtuvo mediante la simulación del proceso. Se obtiene un esfuerzo equivalente máximo de Von Mises, de 352 Mpa, como se indica en la figura 2.29.

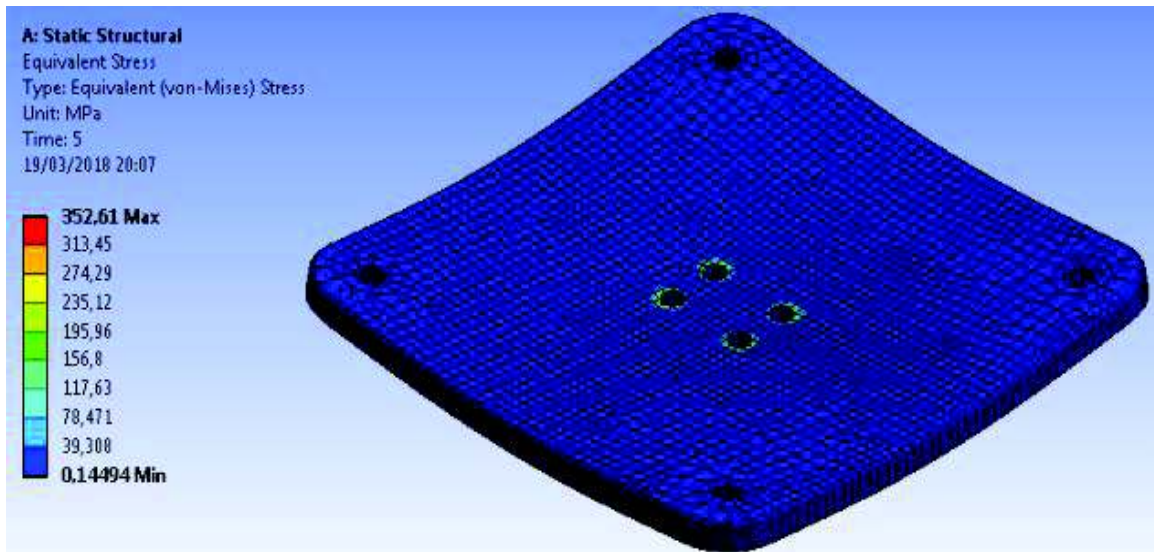


Figura 2. 29. Distribución de esfuerzos de Von Mises para la base del banco.
(Fuente: Propia)

Se obtiene deformaciones del elemento de 0.09 mm como máximo valor, con lo que se dice que este valor es despreciable, y la placa se deformará de manera mínima, se indica en la figura 2.30.

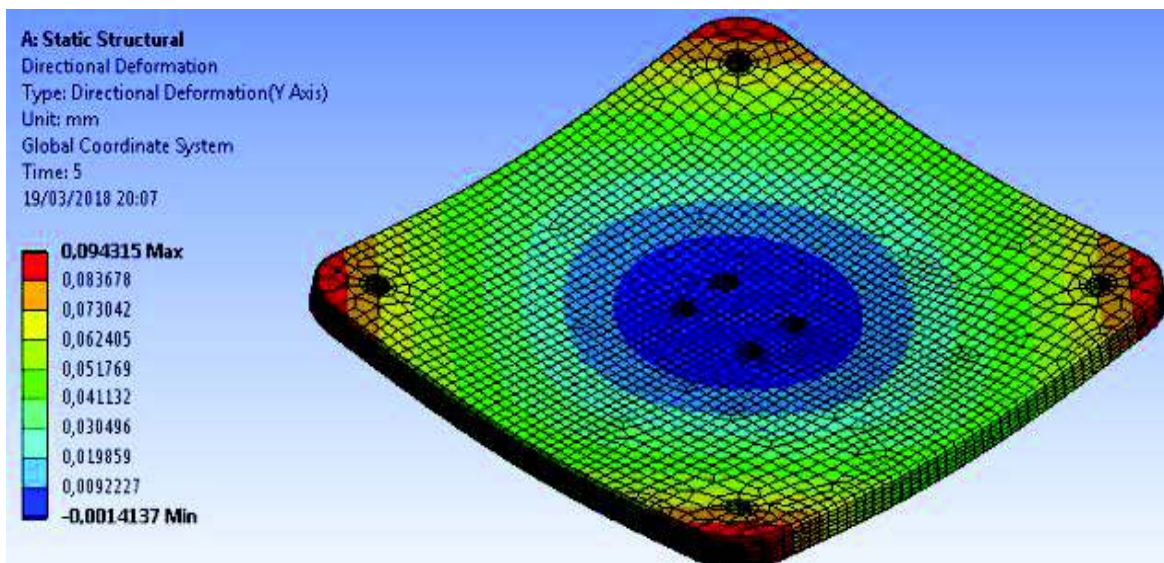


Figura 2. 30. Deformación en la base del banco.
(Fuente: Propia)

Se determina un factor de seguridad de 10, figura 2.31 con lo que se garantiza su diseño.

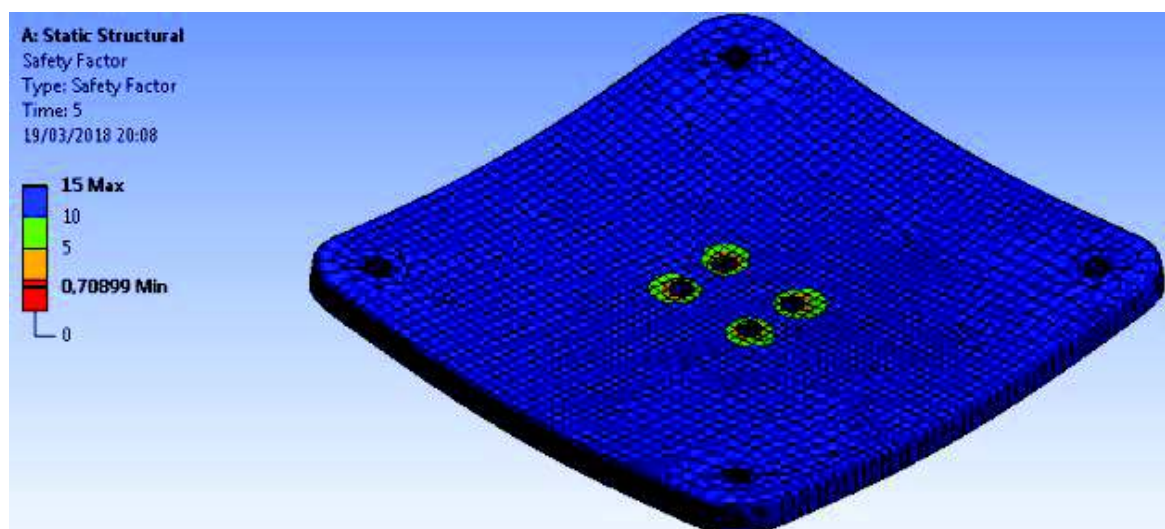


Figura 2. 31. Factor de seguridad para la base del banco.
(Fuente: Propia)

2.3.6. Selección de la celda de carga

Basados en la necesidad de recuperar información acerca de la carga aplicada durante el proceso de deformación con el fin de estudiar la deformación de las chapas tratadas y basados en la respectiva simulación del proceso se requiere un elemento que sense la carga aplicada en un rango de al menos 200 kg, este valor se lo toma como referencia por el cálculo de la carga máxima a resistir por el banco de 2000 N, valor que se obtiene del producto de la carga máxima registrada por la simulación del proceso, de aproximadamente 500 N, (ver figura 3.1), por un factor de seguridad de 4. La carga censada se trasmite en una sola dirección (eje z), por lo que se selecciona una celda de carga de 500 kg con apreciación de 0,01 kg, se selecciona una celda de carga de mayor capacidad debido a cuestiones de seguridad del banco de pruebas. Las especificaciones técnicas de la celda de carga se muestran en el anexo IX.

2.3.7. Cálculo de los separadores de la celda

Estos elementos permiten la separación necesaria entre la celda de carga, la base de la estructura del banco y la base de anclaje a la mesa de la CNC, con el fin de permitir el correcto funcionamiento de la celda de carga. Se las realiza de un acero ASTM A36, por cuestiones de fácil fabricación a bajo costo. En la figura 2.32, con la flecha roja se indica

su disposición. Las especificaciones técnicas del material seleccionado se detallan en el anexo IV.

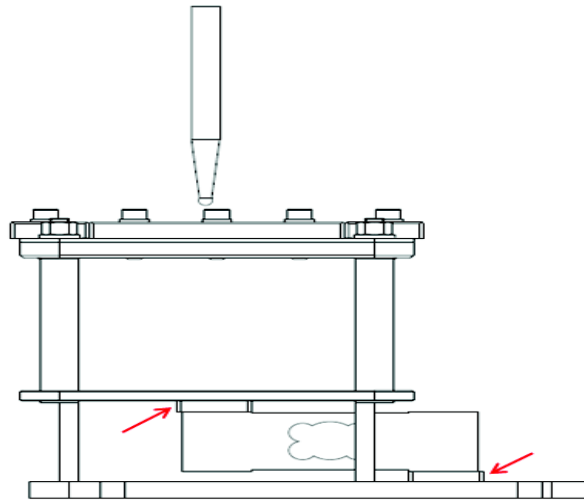


Figura 2. 32. Ubicación de los separadores.
(Fuente: Propia)

Estos separadores se encuentran sometidos a cargas de compresión, como se indica en la figura 2.33, por lo que el dimensionamiento se lo realiza por medio del método de elementos finitos.

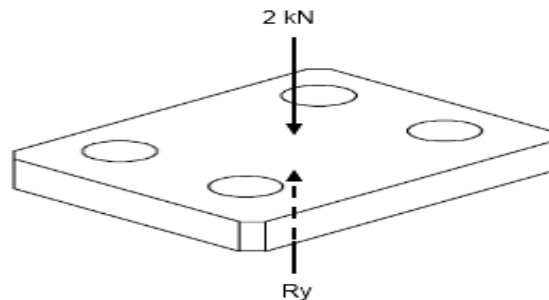


Figura 2. 33. Diagrama de cuerpo libre de los separadores.
(Fuente: Propia)

Sí se tiene una carga de aplicación de 2kN, que resulta de la simulación del proceso por un factor de seguridad de 4, esta carga solo se transmite a este elemento, el área necesaria de 16 mm^2 , por disposiciones de geometría y selección de la celda de carga donde se acopla este separador se dimensiona un rectángulo de 38x48 mm y un espesor de 8 mm, se diseña este elemento con esta configuración por cuestiones de correcto funcionamiento de la celda de carga. Se configura en una superficie del separador, un soporte y por la otra superficie se aplica la fuerza de 2kN. Se obtiene un esfuerzo equivalente máximo de Von Mises, de 2.4 Mpa, como se indica en la figura 2.34.

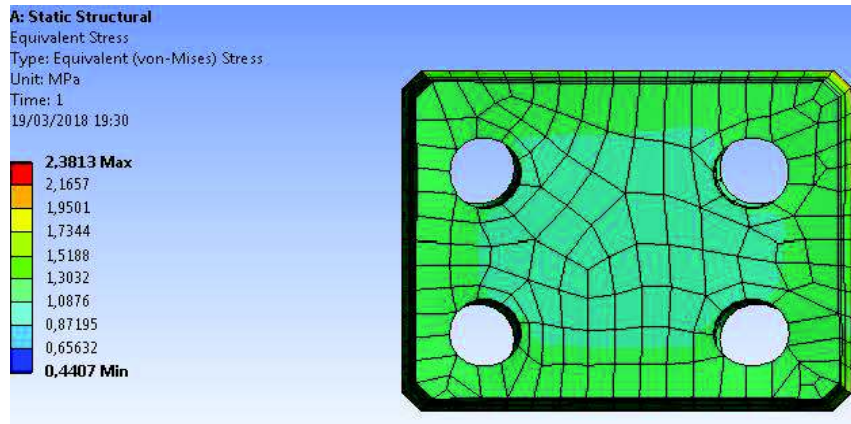


Figura 2. 34. Esfuerzo equivalente máximo de Von Mises para el separador.
 (Fuente: Propia)

Se obtiene deformaciones del elemento de 0,6 micras como máximo valor, con lo que se dice que este valor es despreciable, lo que quiere decir que prácticamente no se deformará este elemento. Obsérvese la figura 2.35.

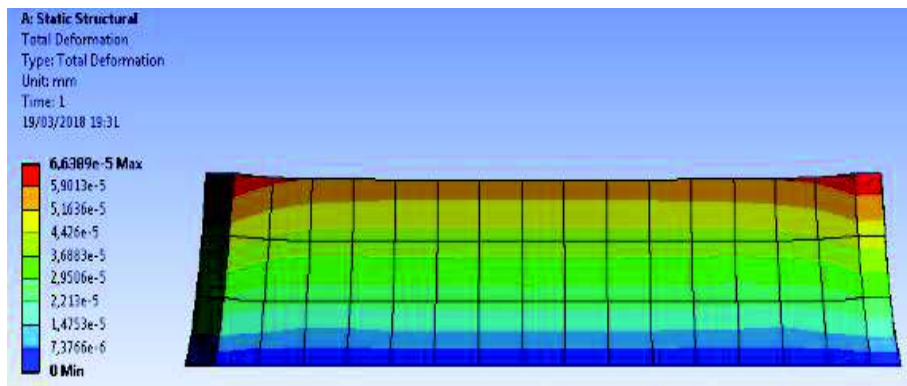


Figura 2. 35. Deformación total del separador.
 (Fuente: Propia)

Se determina un factor de seguridad de 15, figura 2.36 con lo que se garantiza su diseño.

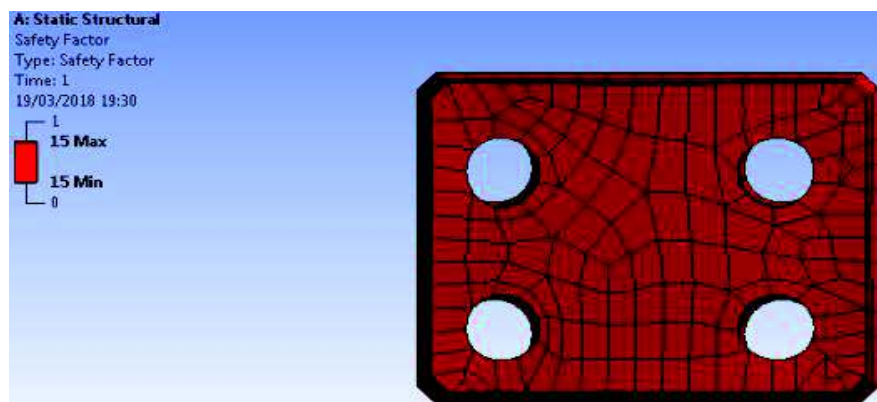


Figura 2. 36. Factor de seguridad para el separador
 (Fuente: Propia)

2.3.8. Cálculo de los pasadores guía

Los pasadores sirven para evitar que la carga aplicada en el proceso desvíe la posición de las mordazas, también para disminuir y anular pares que se puedan crear en el momento que la herramienta haga contacto con la chapa en lugares lejanos al centro de la misma. Se utiliza un acero AISI 1018 para su diseño y la carga máxima en estado crítico que se puede dar es de 2000 N, en la figura 2.37 se indica su diagrama de cuerpo libre.

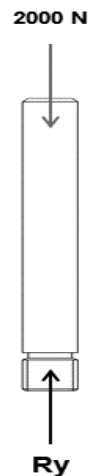


Figura 2. 37. Diagrama de cuerpo libre de los pasadores.
(Fuente: Propia)

Se tiene como parámetros:

- Sección transversal redonda sólida: $L = 74 \text{ mm}$
- Factor de diseño: $N=3$.
- Un extremo empotrado y el otro libre.
- Material: Acero AISI 1018; $S_y = 220 \text{ MPa}$; $E = 200 \text{ GPa}$.
- Carga máxima a ser aplicada es de $P_a = 2000 \text{ N}$.

Análisis:

Cálculo de la longitud efectiva L_e de la columna, con la ecuación 2.15 y selección de K , de la figura 2.27. Se tiene una longitud efectiva de $L_e = 155,4$.

Al suponer una columna larga con la ecuación 2.16, se tiene un diámetro de $D=6,22 \text{ mm}$.

Se calcula el radio de giro con la ecuación 2.18, la cual da un radio de $r=1,56\text{mm}$.

Obteniéndose con la ecuación 2.19, una relación de esbeltez de $KL/r=99,22$:

La constante de columna indicada en la ecuación 2.20, es de $c_c = 133.89$

Si $\frac{KL}{r} < c_c$: se utiliza la ecuación 2.21, correspondiente a la fórmula de J. B. Johnson, para columnas cortas, despejando y aplicando los respectivos reemplazos se tiene un diámetro de columna de 6,75 mm:

Comprobando la relación de esbeltez se tiene que $KL/r=92,13$.

Con lo que se garantiza su diseño dado que $\frac{KL}{r} < c_c$: con lo que se selecciona un diámetro de pasador de 10 mm.

2.3.9. Cálculo de la placa de anclaje

Esta placa se encarga de sujetar todo el banco de pruebas a la mesa de la máquina CNC, en cuatro puntos, los cuales son los pernos de anclaje que trae la maquinaria. El material con que se diseña esta parte es Acero A-36 también se lo selecciona por ser de fácil acceso en nuestro mercado, así como sus propiedades, en la figura 2.38 se indica el diagrama de cuerpo libre de este elemento.

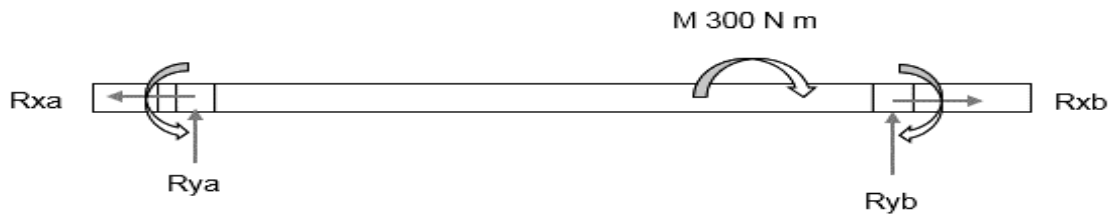


Figura 2. 38. Diagrama de cuerpo libre de la placa de anclaje.
(Fuente: Propia)

En la figura 2.39, se indica el diagrama de momento flector donde se determina el momento flexor máximo, parámetro inicial para obtener el espesor de este elemento.

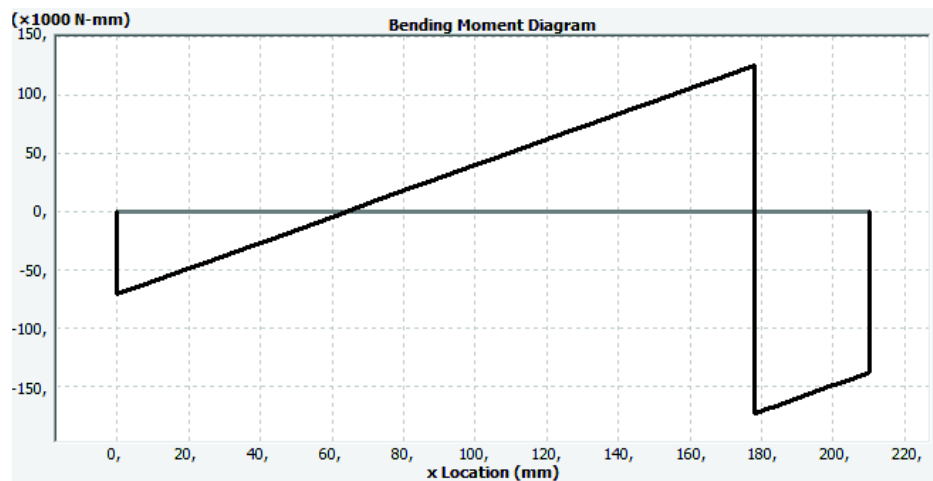


Figura 2. 39. Diagrama de momento flector de la placa de anclaje.
(Fuente: Propia)

Utilizando la fórmula para la flexión, conjuntamente con el método de diseño clásico, esto es el esfuerzo de fluencia del material dividido para un factor de seguridad se obtiene el espesor mínimo de la placa, para luego seleccionar un espesor existente en el mercado y posteriormente con este nuevo valor obtener el nuevo factor de seguridad con lo que se garantiza el diseño.

Si se tiene un factor de seguridad de 2:

$$\sigma_d \geq \frac{\sigma_y}{F.S_1}$$

$$\sigma_d \geq 125 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I}; \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

Reemplazando por el esfuerzo de diseño se tiene

$$\sigma_d = \frac{Mc}{I}$$

Por ser una placa rectangular se sabe que $c = \frac{h}{2}$, reemplazando en la inercia y despejando se tiene un espesor de placa de $h=7,45 \text{ mm}$.

Se selecciona una placa de 12 mm de espesor con lo que se obtiene un factor de seguridad de $F.S_2 = 5.2$, con lo que se garantiza el diseño.

2.3.10. Cálculo de las herramientas

Estos elementos son los encargados de la deformación de las chapas metálicas, toman direcciones dadas por el centro de mecanizado, también pueden ser dotadas de giro o no, razón por la cual se dice que este es el único elemento del banco que está sometido a cargas dinámicas, que no se pueden obviar.

Como primera observación se tiene que el material necesario para el diseño de este elemento sea resistente a la fatiga superficial o desgaste, por lo cual se selecciona un acero AISI D2 o acero para herramienta. Las especificaciones técnicas para este material se detallan en el anexo VII. El valor que se tomará en cuenta para el diseño respecto a los esfuerzos último y de fluencia están dados luego de que se haya dado un tratamiento térmico de temple al material. Esta herramienta se asemeja a un eje con punta hemisférica,

como se indica en la figura 2.40, la carga alternante se asemeja a una viga empotrada en un lado y libre por el otro en donde se aplica la carga.

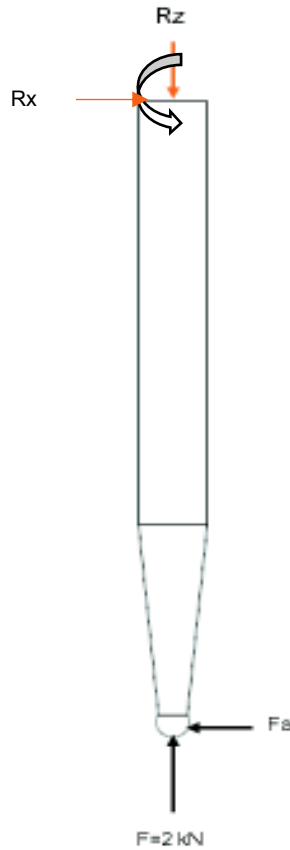


Figura 2. 40. Herramienta de punta hemisférica, con sus respectivas cargas.
(Fuente: Propia)

Se diseña esta herramienta primero en estado estático, con el fin de dimensionar la misma para tener una referencia de la dimensión que se requeriría en caso de trabajo solo con cargas estáticas, en la figura 2.41 se indica el diagrama de cuerpo libre de la herramienta.

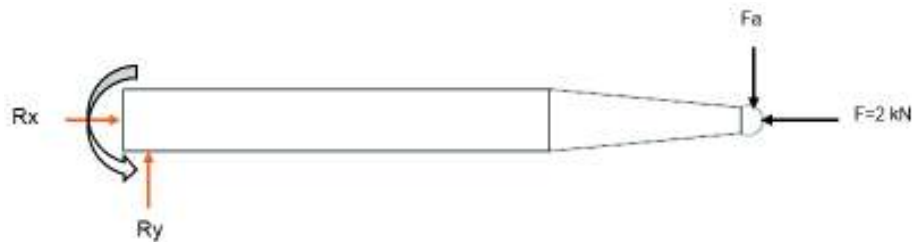


Figura 2. 41. Diagrama de cuerpo libre para la herramienta de punta hemisférica.
(Fuente: Propia)

Al tener su similitud a una viga en voladizo, en la figura 2.42 se indica su diagrama de momento flector, respectivo a la herramienta, también se resalta el hecho de que esta carga será para el caso dinámico la carga alternante.

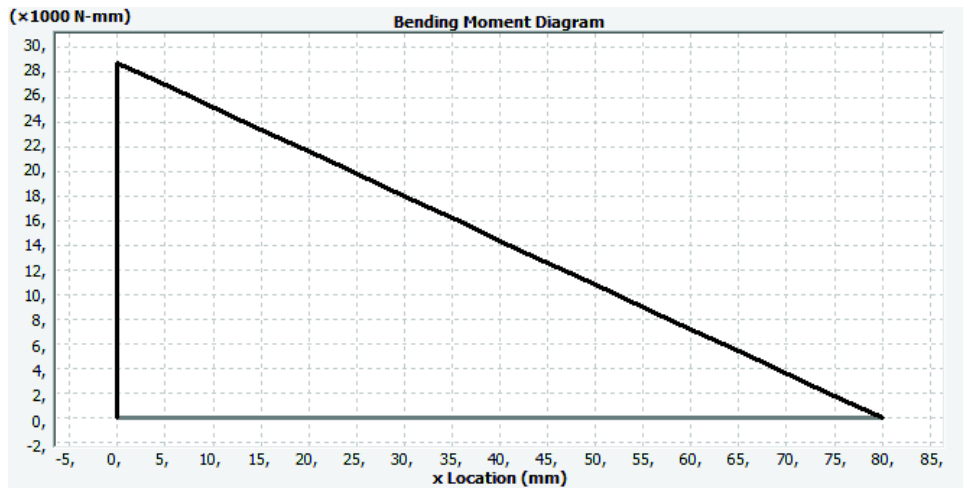


Figura 2. 42. Diagrama de momento flector para la herramienta en estado estático.
(Fuente: Propia)

Se utiliza nuevamente el método de diseño clásico con un factor de seguridad de 2, esto es:

$$\sigma_d \geq \frac{\sigma_y}{F.S_1}$$

Utilizando la fórmula para la flexión para secciones circulares se tiene:

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3}$$

Ec. 2. 22. Fórmula para la flexión en secciones circulares.
(Fuente: [16])

Igualando las ecuaciones 2.1 y 2.22 se puede despejar el diámetro D, de la herramienta para cargas estáticas:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * M * F.S_1}{\pi * \sigma_y}}$$

Reemplazando valores en la ecuación del diámetro, se tiene un diámetro mínimo requerido de 8,2 mm. Al seleccionar un diámetro de la herramienta de 14 mm, se tiene un nuevo factor de seguridad de 11.3, con lo que para cargas estáticas este diámetro es aceptable.

A continuación, se diseña la herramienta en estado de cargas dinámicas o diseño a fatiga, para lo cual se asume que la carga tomada en cuenta para el estado estático, se alternará. La ecuación 2.23, se utiliza para el diseño a fatiga de ejes que pueden estar a flexión pura,

torsión pura, o flexión y torsión a la vez. Para el caso de la herramienta solo se trabajará a flexión pura, por lo que el término de la torsión T de la ecuación 2.23 se suprime.

$$D = \left[\frac{32F \cdot S_1}{\pi} \sqrt{\left[\frac{K_t M}{S'_n} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{T}{S_y} \right]^2} \right]^3$$

Ec. 2. 23. Fórmula para el diseño de ejes a flexión y torsión.
(Fuente: [16])

Donde:

- S'_n : Resistencia a la fatiga modificada
- S_y : Resistencia de fluencia del material
- T : Par torsional aplicado al eje
- D : Diámetro del eje
- k_t : Factor de concentrador de esfuerzos
- M : Momento flector aplicado al eje

Se procede a calcular el valor de la resistencia a la fatiga modificada S'_n :

$$S'_n = S_n C_s C_R C_{st} C_m$$

Ec. 2. 24. Resistencia a la fatiga modificada.
(Fuente: [16])

Donde:

- S_n : Resistencia a la fatiga aproximada
- C_s : Factor de tamaño
- C_R : Factor de confiabilidad
- C_{st} : Factor de esfuerzo
- C_m : Factor del material

Para el acero AISI D2, con una resistencia a la tracción de 1736 Mpa, se tiene una resistencia a la fatiga aproximada $S_n = 868$ MPa.

Se selecciona un factor del material $C_m = 1$, por tratarse de un acero forjado su respectiva selección se detalla en el anexo VIII (8), factor de tamaño $C_s = 0,94$, por tratarse de un diámetro entre 7,62 y 50 mm según la tabla detallada en el anexo VIII (11).

También se seleccionan el factor $C_{st} = 1$, por tratarse de un esfuerzo flexionante puro detallado en el anexo VIII (9) y el factor de confiabilidad aproximado $C_R = 0,81$ tomado de la tabla detallada en el anexo VIII (10), para una confiabilidad deseada de 99%.

Se reemplaza todos los valores obtenidos en la ecuación (31), para calcular la resistencia a la fatiga modificada de 660.9 MPa.

Si se sabe que los valores de $K_t = 1.5$ al tratarse de una transición redondeada detallada en el anexo VIII (12), se reemplazan los valores obtenidos anteriormente en la ecuación 2.23 para determinar el diámetro mínimo requerido de la herramienta de 12,3 mm.

Se selecciona un diámetro de 14 mm, dando un nuevo factor de diseño de 3.4 con lo que se garantiza el diseño de la herramienta.

2.4. Elaboración de planos

Una vez realizado los cálculos y la selección de los elementos mecánicos constitutivos del banco de pruebas se lleva a cabo el desarrollo del plano de conjunto y planos de taller para la construcción del mismo. En los planos se realizaron de acuerdo con el Código de Dibujo Técnico Mecánico del INEN y se encuentran en el anexo XVI.

2.5. Construcción del prototipo

La construcción del banco de pruebas se realiza a partir de los planos de taller obtenidos luego del diseño. La construcción en su mayoría se lleva a cabo en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Los procesos de fabricación del banco de pruebas en su mayoría son procesos comunes y tradicionales, con excepción de la fabricación de las herramientas que se realizaron en un torno CNC.

2.5.1. Construcción del soporte

El soporte mostrado en la figura 2.32, entiéndase como la las mordazas y la estructura en forma de cubo, la celda de carga y la placa de anclaje del banco a la máquina CNC. En la tabla 2.33 se da una indicación rápida de la maquinaria utilizada en cada elemento del banco, se indica el hecho de utilizar herramienta de medida, tales como: calibrador pie de rey, flexómetro, escuadras, correspondientes a cada necesidad, de construcción.

Tabla 2. 33. Materiales y maquinaria utilizada por elemento construido.

| Cantidad | Elemento | Material | Maquinaria y utillajes Utilizados |
|-----------------|------------------------|-----------------|---|
| 4 | Mordazas | AISI 1045 | Sierra eléctrica Limadora o carnero Taladro de mesa Rectificador |
| 1 | Base de la mordaza | ASTM A36 | Cortadora Plasma Fresadora Amoladora (disco Flat) Taladro de mesa Machuelos |
| 1 | Placa guía del proceso | ASTM A36 | Cortadora Plasma Amoladora (disco Flat) Taladro de mesa |
| 4 | Columnas | AISI 1018 | Sierra eléctrica Torno Machuelos |
| 1 | Base estructura | ASTM A36 | Cortadora Plasma Amoladora (disco Flat) Taladro de mesa Broca avellanados |
| 4 | Bujes | BRONCE | Torno Sierra manual |
| 4 | Pasadores | AISI 1018 | Torno |
| 2 | Separadores | ASTM A36 | Cortadora Plasma Taladro de mesa Rectificador |
| 1 | Base de anclaje | ASTM A36 | Cortadora Plasma Fresadora Taladro de mesa Machuelos Broca avellanados |

(Fuente: Propia)

Algunas operaciones de maquinado, procedimientos de construcción, calibración y montaje de los componentes del banco de pruebas se muestran en el anexo XIII.

2.5.2. Construcción del vástago

El vástago, entiéndase como las herramientas desarrolladas para el proceso, estas fueron realizadas en un torno CNC ROMI C420, que reposa en el Laboratorio de Investigación, Desarrollo e Innovación de nuevas tecnologías de diseño, manufactura y producción LABINTECDIMP, se construyen de un acero AISI D2 para herramientas, luego realizar el maquinado de cada una de las tres herramientas, se procede a realizar un tratamiento

térmico de templado, para alcanzar con los requerimientos de resistencia al desgaste y alta tenacidad, el tratamiento fue realizado en Aceros BÖHLER del Ecuador.

2.5.3. Ensamble del soporte

El ensamblaje del soporte o utillaje se lo realiza en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Facultad de ingeniería Mecánica de la Politécnica Nacional y se requiere de herramienta tales como: llave Allen 5.5 mm, llave Allen 4.5 mm, llave 17 mm, martillo, entenalla y yunque. El procedimiento de ensamble se da en el orden indicado en la tabla 2.34.

Tabla 2. 34. Orden de ensamble del soporte.

| Orden | Elementos involucrados | Herramientas involucradas | Ejecución |
|-------|--|--|--|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> • Base de la estructura • Bujes de bronce | <ul style="list-style-type: none"> • Yunque • Martillo • Rectificador | <ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar la base de la estructura sobre el yunque. 2. Colocar cada buje en cada agujero correspondiente. 3. Introducir con ligeros golpes los bujes ubicados con la ayuda del martillo. 4. Rectificar las rebabas de los bujes acoplados. |
| 2 | <ul style="list-style-type: none"> • Base de anclaje • Separador • Celda de carga • Pernos avellanados M8x1,25 | <ul style="list-style-type: none"> • Llave Allen 4.5 mm • Entenalla | <ol style="list-style-type: none"> 1. Asegurar la base de anclaje a la entenalla. 2. Colocar el separador entre la celda de carga y la base. 3. Empernar la celda a la base de anclaje, ajustándola con la llave Allen. |
| 3 | <ul style="list-style-type: none"> • Elementos acoplados anteriormente • Separador • Base estructura | <ul style="list-style-type: none"> • Llave Allen 4.5 mm • Entenalla | <ol style="list-style-type: none"> 1. En la posición anterior, colocar el separador entre la celda y la base de la estructura. 2. Empernar la base de la estructura a la celda de carga, ajustándola con la llave Allen. |

| Orden | Elementos involucrados | Herramientas involucradas | Ejecución |
|-------|---|--|--|
| 4 | <ul style="list-style-type: none"> Elementos acoplados anteriormente Pasadores | <ul style="list-style-type: none"> Alicate Entenalla | <ol style="list-style-type: none"> En la posición anterior, colocar los pasadores roscando estos en la base de anclaje. Ajustar los pasadores con la ayuda de un alicate. |
| 5 | <ul style="list-style-type: none"> Elementos acoplados anteriormente columnas | <ul style="list-style-type: none"> Llave Allen 5.5 mm Entenalla | <ol style="list-style-type: none"> En la posición anterior, colocar las columnas en cada esquina de la base de la estructura. Empernar cada una de las columnas, luego ajustarlas con la llave Allen |
| 6 | <ul style="list-style-type: none"> Elementos acoplados anteriormente Base de la mordaza Placa guía del proceso | <ul style="list-style-type: none"> Llave 17 mm Entenalla | <ol style="list-style-type: none"> En la posición anterior, colocar la base de las mordazas y la placa guía del proceso, guiándolas en las 4 columnas. Colocar rodelas de presión y tuercas en cada uno de las columnas roscadas. Ajustar con la llave cada una de las tuercas. |
| 7 | <ul style="list-style-type: none"> Elementos acoplados anteriormente Mordazas | <ul style="list-style-type: none"> Llave Allen 4.5 mm Entenalla | <ol style="list-style-type: none"> En la posición anterior, colocar las mordazas, en cada arista de la base de las mordazas. Empernar y ajustar los 12 pernos con la llave Allen. |

(Fuente: Propia)

2.5.4. Montaje del banco de pruebas

El montaje del banco de pruebas se lo realiza en el centro de mecanizado marca Viwa VCM3 M400, del laboratorio de máquinas y herramientas de la FIM de la Escuela Politécnica Nacional, para lo cual es necesario el uso de herramientas como: llave de corona 24 mm, escuadra y llave Allen 5.5 mm

La herramienta se la instala en a un porta herramientas BT-30 para diámetro de herramienta de 12 mm como se indica en la figura 2.43, luego esta porta herramienta se coloca en el centro de mecanizado. En la figura 2.43, se indican los pernos de anclaje, son los normalizados para la mordaza del mismo centro de maquinado, se indica que para el trasladar y colocar el soporte o utillaje sobre la mesa del centro de mecanizado es únicamente necesario una solo persona con la indumentaria necesaria.

Para verificar que la instalación ha sido correcta se corrobora con una escuadra que el banco de pruebas este paralelo a la mesa del centro de mecanizado y el par de apriete de cada uno de los 4 pernos sea de 80 a 100 lb-ft, de la misma forma para verificar que la herramienta está correctamente colocada en el porta herramienta se debe aplicar de 50 a 60 lb-ft al perno Allen respectivo que trae el porta herramienta BT-30, el acople del porta herramienta con la herramienta se realiza automáticamente por el centro de maquinado.

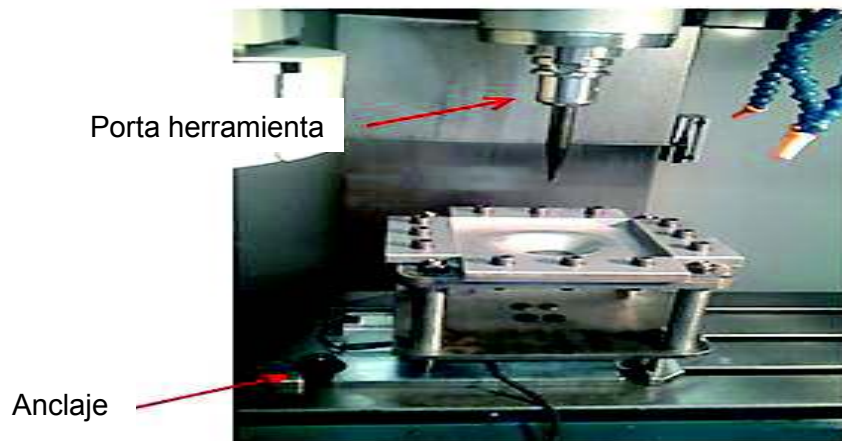


Figura 2. 43. Montaje del banco de pruebas.
(Fuente: Propia)

2.6. Proceso para realizar la experimentación

Una vez finalizada la construcción y ensamblaje del banco de pruebas, se debe establecer un protocolo de pruebas que garantice el correcto funcionamiento de los elementos que lo conforman. El protocolo de pruebas permite someter al banco construido a una serie de pruebas y procedimientos que determinan la fiabilidad del diseño, a verificar la funcionalidad, el montaje de los elementos y asegurar la integridad tanto del mecanismo como de las personas, se adjunta un documento en el Anexo XV, para su respectiva verificación.

2.6.1. Nombre del proceso: Protocolo de pruebas

Objetivo: Conocer los pasos para desarrollo de proceso SPIF utilizando el banco de pruebas.

Responsable: Operario

Conjunto de actividades:

- Comprobar que todos los elementos del banco de pruebas se encuentren correctamente ajustados por los pernos.
- Tomar una chapa de aluminio de 150x150x1 mm.
- Posicionar la chapa entre la placa guía y las mordazas asegurando un buen ajuste.
- Montar el banco de pruebas en la mesa de la fresadora CNC.
- Verificar la calibración de la celda de carga con ayuda de un peso conocido.
- Verificar el paralelismo entre la mesa de trabajo y la chapa de aluminio.
- Encender el centro de mecanizado vertical.
- Montar la herramienta respectiva en el husillo del CNC.
- Realizar la compensación de la herramienta y los ceros de la pieza
- Cargar el programa de la pieza a realizar.
- Ingresar los valores de diámetro de punta de la herramienta, velocidad de giro, velocidad de avance y desplazamiento vertical.
- Ejecutar el programa.
- Conectar la celda de carga, módulo HX711 y Arduino.
- Cargar el código de programación para registro de carga en Arduino.
- Ejecutar el programa en el momento que la herramienta haga contacto con la chapa a deformar.
- Guardar los datos y realizar las gráficas.
- Alejar la herramienta del área de trabajo del banco de pruebas.
- Desajustar los pernos de las mordazas.
- Extraer la pieza realizada.
- Limpiar la superficie de la pieza y mesa de trabajo.

2.7. Análisis de costos de fabricación

Una vez que se ha seleccionado los elementos mecánicos del banco de pruebas para estudio de deformación incremental, es necesario desglosar todos los costos involucrados en el desarrollo del mismo. Se analizará los costos generados por mano de obra empleada,

costos de materia prima utilizada, elementos normalizados seleccionados, costos del circuito para la celda de carga y costos varios.

2.7.1. Costos de mano de obra

Los costos de mano de obra han sido cotizados por el Colegio Técnico Salesiano Don Bosco de Quito y se detallan en la tabla 2.35. (Ver anexo XVI), más el costo de construir las tres herramientas.

Tabla 2. 35. Costos de mano de obra.

| Cantidad | Descripción elemento | Costo Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|-----------------|------------------------|----------------------|-------------------|
| 1 | Base anclaje | 60 | 60 |
| 1 | Base estructura | 40 | 40 |
| 1 | Base de mordaza | 60 | 60 |
| 1 | Placa guía del proceso | 60 | 60 |
| 2 | Separador | 15 | 30 |
| 4 | Mordaza | 40 | 160 |
| 4 | Columna | 25 | 100 |
| 4 | Pasador | 15 | 60 |
| 4 | Buje | 5 | 20 |
| 3 | Herramientas | 40 | 120 |
| Subtotal | | | 710 |
| IVA 12% | | | 85.2 |
| TOTAL | | | 795.2 |

(Fuente: Propia)

2.7.2. Costos de materia prima

En la tabla 2.36 se muestran los costos de los materiales utilizados para la construcción del banco de pruebas.

Tabla 2. 36. Costos de materiales.

| Cantidad | Descripción | Proveedor | Referencia | Costo Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|----------|---|-----------|--------------------|----------------------|-------------------|
| 1 | Plancha de aluminio liso 1220x2440x1 mm | Dipac | Chapa de ensayo | 34 | 34 |
| 1 | Plancha de acero A36 289x154x12 mm | Servicor | Base anclaje | 5,35 | 5,35 |
| 1 | Plancha de acero A36 204x204x8 mm | Servicor | Base estructura | 3,12 | 3,12 |
| 1 | Plancha de acero A36 204x204x12 mm | Servicor | Base de la mordaza | 9,82 | 9,82 |

| Cantidad | Descripción | Proveedor | Referencia | Costo Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|-----------------|--|------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | Plancha de acero A36 204x204x4 mm | Servicor | Placa guía de proceso | 3,57 | 3,57 |
| 1 | Plancha de acero A36 50x40x8 mm | Servicor | Separadores | 1,33 | 1,33 |
| 1 | Barra de acero AISI 1018 7/8'' | Import Com | Columnas | 3,97 | 3,97 |
| 1 | Barra de acero AISI 1018 7/16'' | Import Com | Pasadores | 0,89 | 0,89 |
| 1 | Barra de bronce dulce 5/8'' | Import Com | Bujes | 2,6 | 2,6 |
| 1 | Barra de acero AISI D2 14,5x150 mm | Bohler | Herramientas | 8,8 | 8,8 |
| 1 | Lámina de acero AISI 1045 45x12x550 mm | Bohler | Mordazas | 10,62 | 10,62 |
| | | | | Subtotal | 84,07 |

(Fuente: Propia)

Los costos de elementos normalizados se detallan en la tabla 2.37.

Tabla 2. 37. Costos de elementos normalizados.

| Cantidad | Descripción | Proveedor | Costo Unitario (USD) | Costo Total (USD) | |
|-----------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| 4 | Pernos avellanados M10x40x1.5mm | Casa del Perno | 0,30 | 1,2 | |
| 12 | Pernos M8x30x1.25mm | Casa del Perno | 0,25 | 3 | |
| 8 | Pernos avellanados M8x30x1.25mm | Casa del Perno | 0,25 | 2 | |
| 12 | Arandelas de presión 8 mm | Casa del Perno | 0,05 | 0,6 | |
| 8 | Arandelas de presión 10mm | Casa del Perno | 0,06 | 0,48 | |
| 4 | Tuercas M10x1.5mm | Casa del Perno | 0,3 | 1,2 | |
| | | | | Subtotal | 8,48 |

(Fuente: Propia)

En la tabla 2.38 se detallan los costos de los elementos necesarios para la conexión y programación de la celda de carga.

Tabla 2. 38. Costos del circuito para celda de carga.

| Cantidad | Descripción | Proveedor | Costo Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | Celda de carga | Vimael_SA | 50 | 50 |
| 1 | Módulo HX711 | MSG-Electrosonido | 4,5 | 4,5 |
| 1 | Arduino Uno R3 | Tecompartes | 12,4 | 12,4 |

| Cantidad | Descripción | Proveedor | Costo Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 8 | Cable Dupont hembra a macho | MSG-Electrosonido | 0,6 | 4,8 |
| | | | Subtotal | 71,7 |

(Fuente: Propia)

En la tabla 2.39 se indica los costos de materia prima de la máquina.

Tabla 2. 39. Costos de materia prima.

| Descripción | Costo (USD) |
|---|--------------------|
| Costos de materiales | 84,07 |
| Costos de elementos normalizados | 8,48 |
| Costos del circuito para celda de carga | 71,70 |
| Total | 164,25 |

(Fuente: Propia)

2.7.3. Costos indirectos de fabricación

A continuación, se detallan los costos más relevantes debidos a imprevistos en el diseño y construcción del banco de pruebas.

Tabla 2. 40. Costos indirectos de fabricación.

| Descripción | Costo Total (USD) |
|-----------------------------|--------------------------|
| Lijas | 3,25 |
| Transporte | 50 |
| Pintura | 4,50 |
| Herramientas para maquinado | 30 |
| Asesoría y programación | 40 |
| Subtotal | 127,75 |

(Fuente: Propia)

2.7.4. Costo total del banco de pruebas

En la tabla 2.41 se tabula el costo total de fabricar el banco de pruebas para el proceso.

Tabla 2. 41. Costo total de banco.

| Descripción | Costo (USD) |
|----------------------------------|--------------------|
| Costos de materia prima | 164,25 |
| Costos de mano de obra | 795,2 |
| Costos indirectos de fabricación | 127,75 |
| COSTO TOTAL | 1087,2 |

(Fuente: Propia)

2.8. Definición de variables del proceso

Las variables más importantes de este proceso son cuatro: El diámetro de la herramienta, velocidad de avance, profundidad de penetración y espesor de la chapa, (ver figura 1.9). Es claro que existen otros factores que modifican este proceso, se resalta el hecho de que los antes mencionados son los básicamente necesarios para realizar un estudio correcto de la deformabilidad del material en estudio.

2.8.1. Diámetro de la herramienta D

El diámetro específico de la herramienta constituye una variable dentro del proceso SPIF. Una herramienta con diámetro de mayor tamaño requiere de mayor potencia para deformar una lámina que una herramienta con diámetro de menor tamaño debido a que el ángulo o el área de contacto involucrado son mucho más grandes entre la herramienta y la parte a ser deformada. En zonas con ángulos de pared demasiado grande, y por esta causa pueda darse el contacto entre el vástago y la chapa, resulta necesario la utilización de un vástago de herramienta menor que el diámetro del extremo hemisférico. Por otro lado, una herramienta de mayor diámetro asegura una mejor calidad en cuanto al acabado superficial y un mayor espesor en la zona de chapa deformada.

2.8.2. Velocidad de avance v

La velocidad de avance de la herramienta tiene una influencia significativa en la capacidad de conformabilidad de la chapa y su rugosidad o acabado superficial. Para el caso de herramientas de pequeño diámetro, el aumento en la velocidad de avance provoca un arranque de viruta en la superficie de contacto, en materiales maleables como el aluminio, lo cual hace que el acabado superficial presente un aspecto rugoso.

2.8.3. Profundidad de penetración Δz

El aumento de la profundidad de penetración o desplazamiento vertical de la herramienta hace que la chapa se someta a condiciones de deformación más severas. La conformabilidad de una chapa disminuye a medida que aumenta la profundidad de penetración [5]. Además, el aumento de la profundidad de penetración hace que la chapa reduzca su espesor llegando a darse la rotura o fallo de la misma.

2.8.4. Espesor de la chapa t_0

La consideración más importante acerca del espesor de la chapa es que este afecta al ángulo máximo de pared (ψ) (ver figura 1.9). El proceso puede ser aplicado a distintos espesores de chapa y material. Este estudio se realizó para un espesor y tres herramientas de distinto diámetro. La velocidad de giro y el desplazamiento de la herramienta sobre la superficie de la chapa son otras variables importantes dentro del desarrollo del proceso SPIF. El aumento de la velocidad de giro de la herramienta puede aumentar la capacidad de conformabilidad debido al calentamiento local en el punto de contacto chapa-herramienta disminuyendo así los efectos de fricción en la zona de contacto. Además, la herramienta puede desplazarse con rotación como sin rotación mientras deforma progresivamente la chapa. De su control depende no solamente la fricción o el calentamiento de la chapa, sino también el acabado superficial de la misma. Dependiendo del tipo de desplazamiento, la herramienta puede desgastarse más rápidamente, dando problemas de seguridad y medioambientales si se trabaja con lubricantes. El desgaste de la herramienta se ve directamente ligado a la velocidad de giro de la herramienta, por cuestiones de fricción, es necesario tomar en cuenta entonces el material de la herramienta. Es necesario que este material sea de alta resistencia a la fatiga superficial y que posea una tenacidad aceptable, estas características se las puede encontrar en los aceros para herramientas.

2.9. Fabricación de una pieza modelo

Definido el diseño del banco de pruebas y la colocación de la chapa de aluminio AA 1200 H14 de 1 mm de espesor se realiza el montaje del banco en el centro de mecanizado CNC Viwa con controlador Centroid M-V802 de 4 ejes, como se indica en la figura 2.44. Como parte del diseño, el banco de pruebas cuenta con 4 mordazas de acero de transmisión como método de sujeción de la lámina y una celda de carga para registrar los valores de la carga aplicada por la herramienta sobre la chapa de aluminio.



Figura 2. 44. Banco de pruebas experimental SPIF montado en una fresadora CNC Viwa.
(Fuente: Propia)

La geometría escogida para la fabricación de la pieza modelo es un tronco cónico con generatriz circular con un diámetro inicial de 80 mm, profundidad de formado de 25 mm, ángulo de pared de 45° y diámetro generatriz final de 23 mm como se indica en la figura 2.45. Cada chapa de aluminio tiene una dimensión de 150x150 mm con un área de trabajo efectivo de 130x130 mm y cuentan con un patrón de círculos de diámetro conocido que permite medir las deformaciones en la superficie una vez realizada la pieza modelo como se indica en la figura 2.46. La forma y dimensiones de la pieza modelo fueron previamente establecidas en un software CAD/CAM que genere el programa de maquinado de forma automática, es decir, que partiendo del modelaje termine con la ejecución de la pieza. El centro de mecanizado Viwa cuenta con un postprocesador NX CAM que utiliza códigos G como lenguaje de programación. Las herramientas sólidas de cabeza hemisférica utilizadas tienen un diámetro de 3, 5 y 7 mm respectivamente.

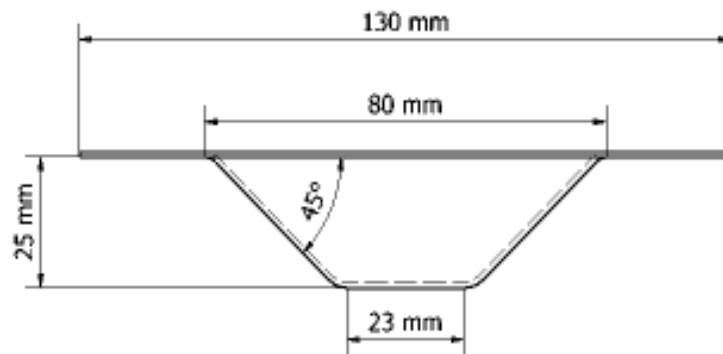


Figura 2. 45. Geometría y dimensiones escogidas para la pieza modelo.
(Fuente: Propia)

Se realizaron 3 piezas modelos cada una con una herramienta de distinto diámetro. En la tabla 2.42 se muestran los parámetros utilizados para el desarrollo de las mismas.

Tabla 2. 42. Combinación de parámetros para las piezas modelos realizadas.

| Diámetro de herramienta | Profundidad de penetración | Velocidad de giro | Velocidad de avance |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| mm | mm | rpm | mm/s |
| 3, 5, 7 | 0,5 | 900 | 10 |

(Fuente: Propia)

Adicional, se utilizó lubricante durante el proceso de manera que se reduzca el desgaste en la herramienta y se obtenga una superficie más limpia y de mejor calidad superficial.



Figura 2. 46. Fabricación de pieza modelo mediante SPIF.
(Fuente: Propia)

Adicionalmente, se fabricó una pieza modelo con la figura del sello de la marca Chevrolet, figura 2.47, a fin de poder demostrar que mediante proceso SPIF se pueden producir piezas de forma irregular siempre que el ángulo de pared de la pieza ψ (ver figura 1.9), no exceda la capacidad geométrica de la herramienta utilizada, esto es que el vástago de la herramienta no choque con la pared formada de la pieza [6]. De la misma forma que con la pieza cónica, para la fabricación del sello se utilizó una chapa de aluminio AA 1200 H14 de 1 mm de espesor con una herramienta de formado de 5 mm de diámetro, paso de profundidad controlado de 0.5 mm en cada ciclo, velocidad de avance de 10 mm/s y velocidad de giro de 900 rpm. Los códigos G para ambas piezas fabricadas se detallan en el anexo XIV.

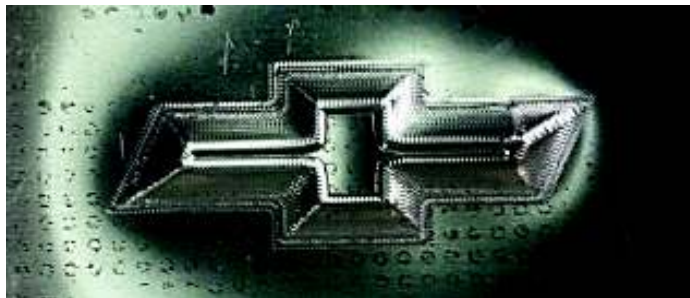


Figura 2. 47. Pieza modelo de forma irregular mediante SPIF.
(Fuente: Propia)

2.10. Medidas de la deformación plástica

A fin de conocer acerca del estado de la deformación, la chapa de aluminio en estado no deformado se compara con su estado deformado. Para medir las deformaciones es necesario grabar o imprimir un patrón de círculos visibles en la superficie de la chapa sin deformar. Como referencia, este patrón de círculos debe ser exactamente regular de

diámetro d_0 y distancia entre puntos conocidas. Al deformarse la chapa, el patrón de círculos se deforma conjuntamente con ella brindando la información necesaria para medir la deformación. Los círculos al deformarse se estiran convirtiéndose en elipses de diámetro mayor d_1 y diámetro menor d_2 cuyos ejes coinciden con las direcciones de las deformaciones principales. Obsérvese figura 2.48.

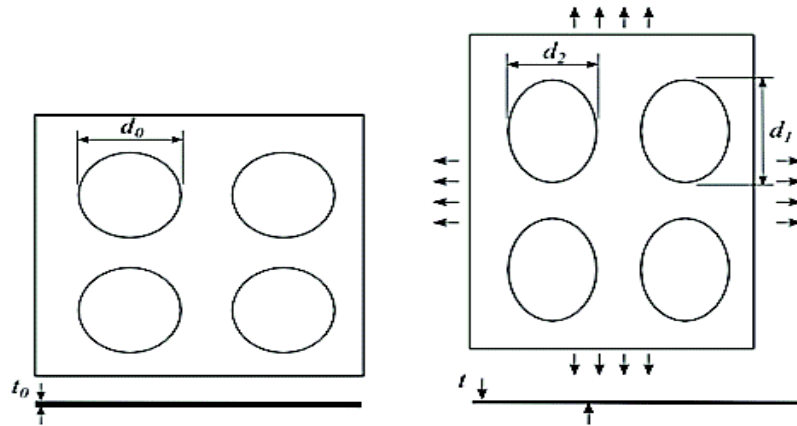


Figura 2. 48. Chapa con patrón de círculos en estado deformado y no deformado.
(Fuente: [6])

El patrón escogido, figura 2.49, tiene un círculo de diámetro inicial 2 mm con una separación entre ellos de centro a centro de 3,5 mm. El grabado del patrón de círculos se realizó mediante método de impresión de circuitos y un proceso electrolítico para evitar que se desvanezcan los puntos y se tenga una mejor visualización.

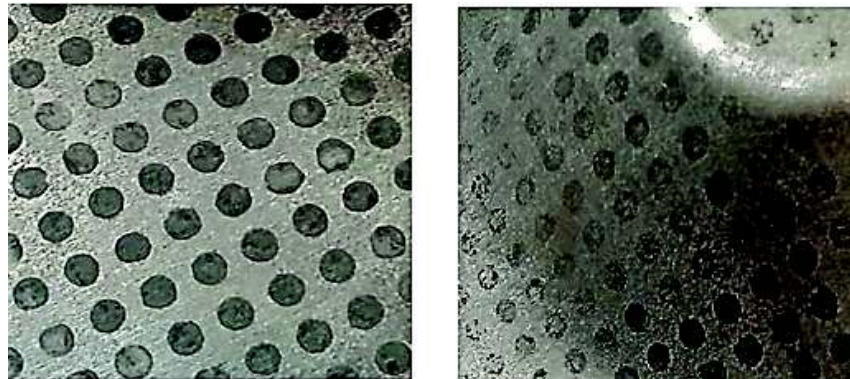


Figura 2. 49. Patrón de círculos antes y después de la deformación mediante SPIF.
(Fuente: Propia)

La deformación se calcula comparando la chapa en estado inicial sin deformación y con deformación para lo cual se mide directamente los diámetros d_1 , d_2 y el espesor t . Como anteriormente se determinó, las deformaciones principales al final del proceso se calculan utilizando la ecuación 1.1, desarrollado en el capítulo 1.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos al realizar varios ensayos en SPIF a chapas de aluminio AA 1200 H14 de 1 mm de espesor mediante proceso SPIF. Se describen dos partes, en primer lugar, los resultados de la simulación en un software de elementos finitos donde se toma como parámetro importante las magnitudes de las fuerzas implicadas en el proceso. Posteriormente se muestran los resultados de ensayos en SPIF realizados a 3 chapas de aluminio utilizando herramientas de distinto diámetro. Finalmente se analizan los resultados obtenidos tanto de la simulación y el proceso experimental SPIF.

3.1. Resultados obtenidos de la simulación de la chapa

Los resultados obtenidos de la simulación de la chapa de aluminio corresponden a una deformación de chapa realizada con una herramienta de 7 mm sin rotación.

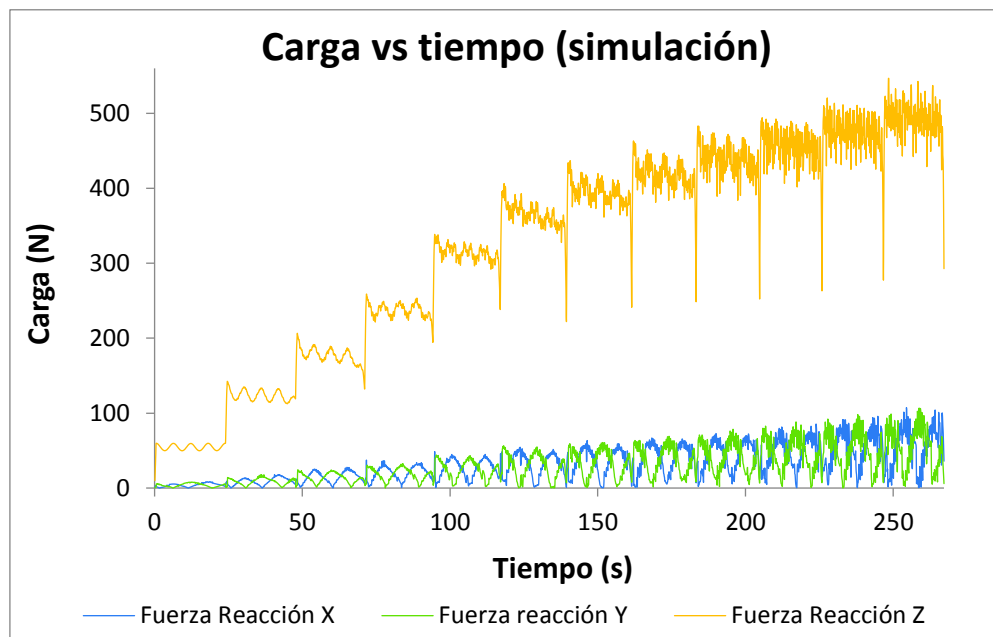


Figura 3. 1. Predicción de la carga aplicada por medio de un software de elementos finitos.
(Fuente: Propia)

3.2. Resultados obtenidos mediante ensayos en SPIF

A continuación, se detallan las gráficas de carga vs tiempo obtenidas al realizar ensayos con SPIF a chapas de aluminio 1200 H14 de 1 mm de espesor utilizando herramientas de cabeza hemisférica para conformado incremental. Cada ensayo se realizó hasta una

distancia adecuada de modo que no se produzca una fractura en cada chapa haciendo uso del giro de herramientas de 3, 5 y 7 mm de diámetro durante el proceso. Los ensayos se evaluaron para 3 casos particulares de piezas cónicas con generatriz circular con el fin de medir las deformaciones del material obtenido en forma incremental y el porcentaje respecto a la variación de sus espesores.

3.2.1. Curvas de carga vs tiempo para las tres herramientas

En la figura 3.2, se indica una comparación del desarrollo de la carga en el tiempo del proceso, esto es con cada herramienta de diferente diámetro, 3, 5, 7 mm, con el fin de apreciar la distinción de cargas necesarias conforme se reduce el diámetro de cada herramienta.

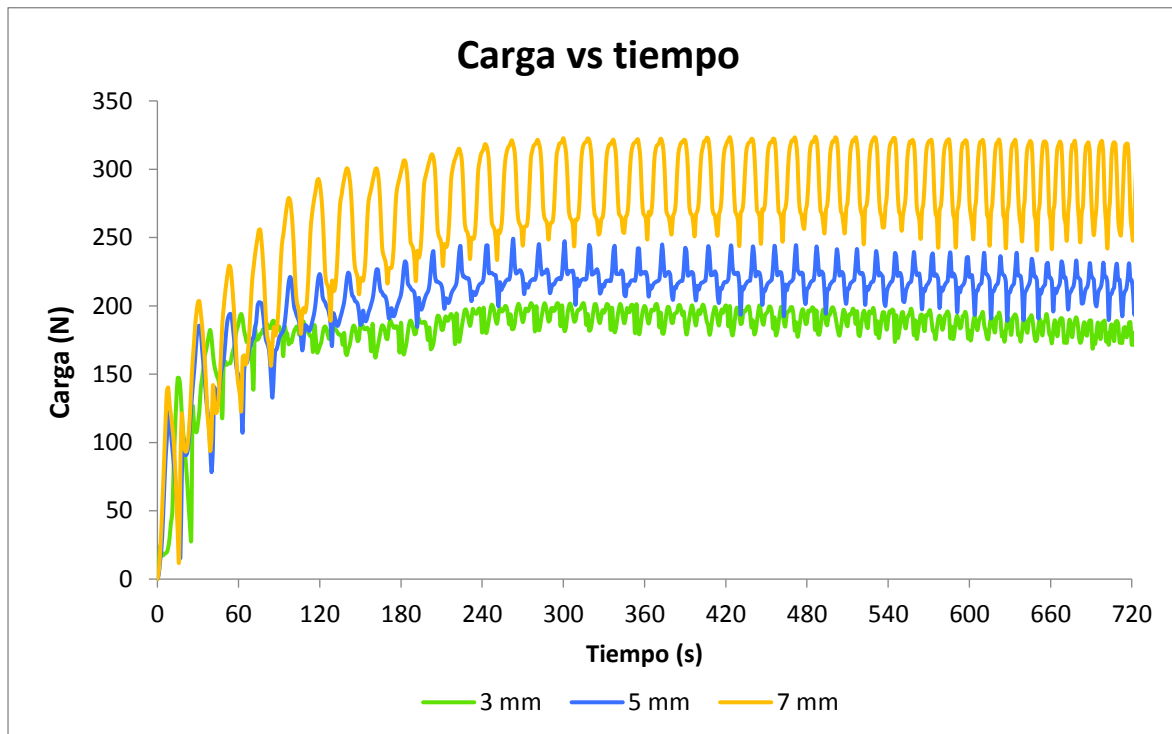


Figura 3. 2. Gráfica de carga vs tiempo con herramientas de 3,5 y 7 mm.
(Fuente: Propia)

3.2.2. Comparación de curvas carga vs tiempo entre simulación y experimental

En la figura 3.3, se indica una comparación del desarrollo de cargas en el tiempo de la simulación del proceso y su experimentación, todos los parámetros y variables en los dos casos son idénticos.

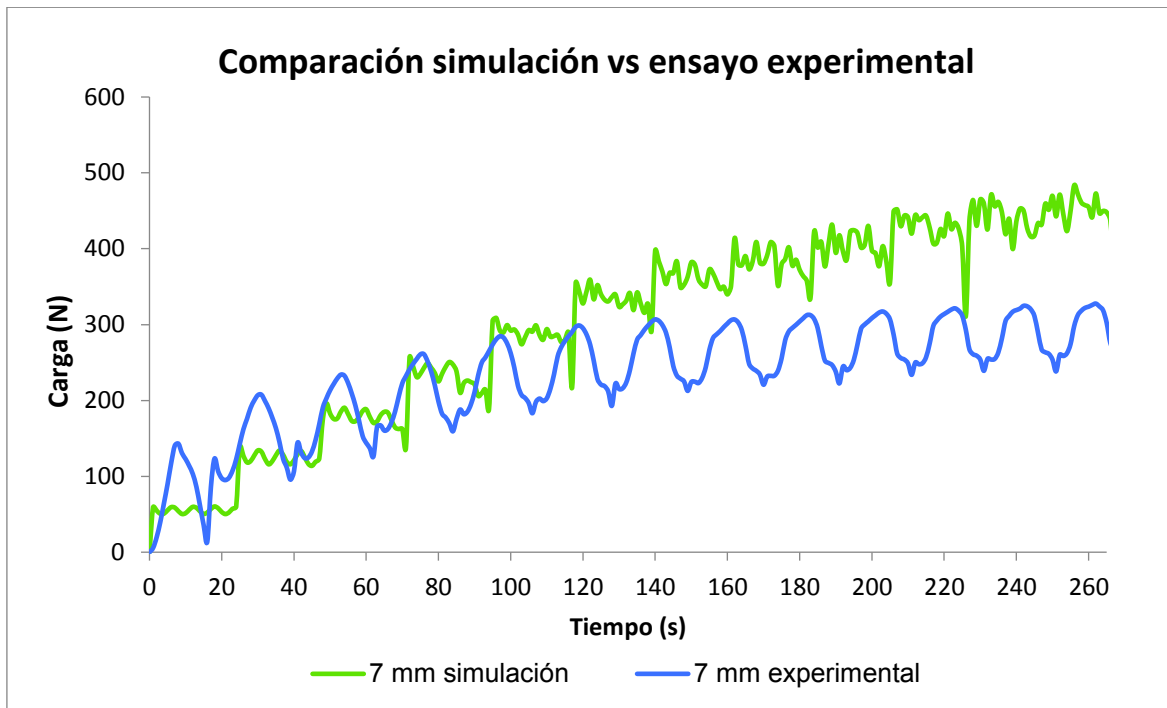


Figura 3. 3. Comparación de la carga entre la simulación del proceso y la experimentación. (Fuente: Propia)

3.2.3. Curvas de carga vs distancia recorrida por las tres herramientas

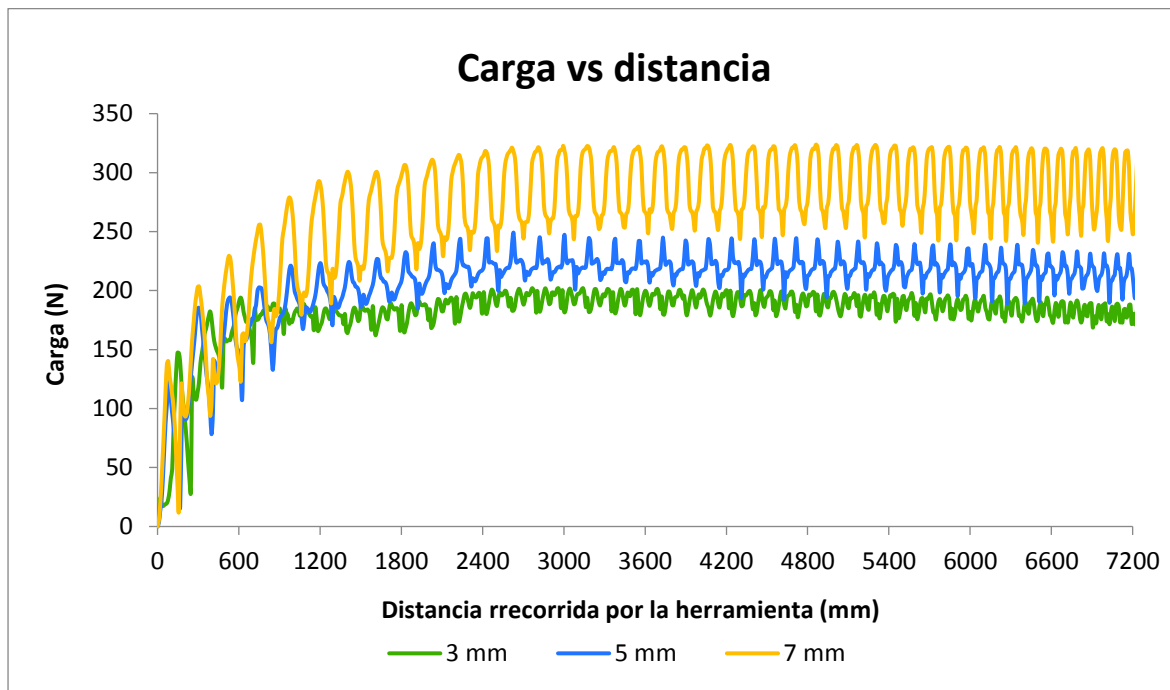


Figura 3. 4. Gráfica carga vs distancia recorrida por la herramienta de 3, 5 y 7 mm. (Fuente: Propia)

3.2.4. Piezas modelo realizadas experimentalmente mediante proceso SPIF y sus deformaciones principales

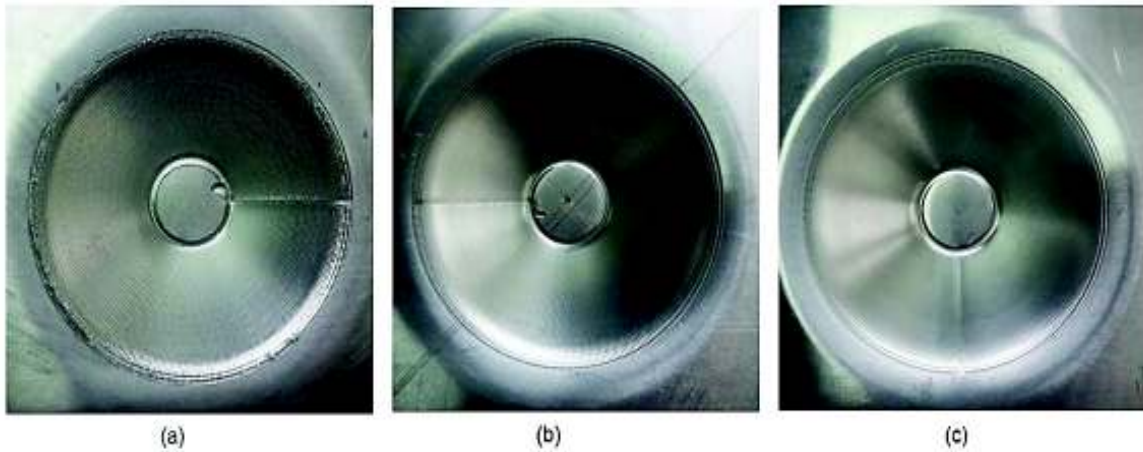


Figura 3. 5. Piezas cónicas realizadas mediante SPIF con herramientas de diámetro: (a) 3 mm; (b) 5 mm; y (c) 7 mm.
(Fuente: Propia)

Utilizando la ecuación (6) los valores de deformación encontrados son:

Tabla 3. 1. Deformaciones principales para cada herramienta.

| Diámetro herramienta | Diámetro de patrón inicial | Diámetros de patrón deformados | | Espesor inicial | Espesor final | Deformaciones principales | | |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|----------|-----------------|---------------|---------------------------|--------------|--------------|
| | | d_1 mm | d_2 mm | | | ϵ_1 | ϵ_2 | ϵ_3 |
| d_h mm | d_0 mm | d_1 mm | d_2 mm | t_0 mm | t mm | ϵ_1 | ϵ_2 | ϵ_3 |
| 3 | 2 | 2,817 | 1,988 | 1 | 0,7 | 0,342 | -0,0057 | -0,356 |
| 5 | 2 | 2,948 | 2,011 | 1 | 0,66 | 0,388 | 0,0056 | -0,415 |
| 7 | 2 | 3,014 | 2,017 | 1 | 0,64 | 0,410 | 0,0085 | -0,446 |

(Fuente: Propia)

3.3. Discusión de resultados

De la simulación realizada mediante el software de elementos finitos Ansys se observa que las reacciones de fuerza en la dirección z (F_z) son de 552 N, lo cual se acerca significativamente a los valores obtenidos experimentalmente con un error aproximado del 19%. Con esto se entiende que el modelo utilizado por el entorno de simulación es aceptable.

En la figura 3.2 se superpone las 3 curvas obtenidas de carga vs tiempo para los distintos diámetros de herramienta a fin de evidenciar como varía la carga a medida que se cambia

el diámetro de la herramienta utilizada. Las cargas máximas evidenciadas durante el proceso SPIF con las distintas herramientas son:

Tabla 3. 2. Cargas máximas obtenidas experimentalmente.

| Diámetro herramienta mm | 3 | 5 | 7 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| Carga N | 215,47 | 248,95 | 323,73 |

(Fuente: Propia)

Tal como se esperaba, es razonable que la fuerza necesaria para deformar la chapa aumente al utilizar una herramienta de mayor diámetro debido a que se necesita de mucha más carga para poder deformar una porción de material de mayor área. Por otro lado, para las 3 herramientas empleadas se observa que aproximadamente a partir de los 4 minutos de iniciado el proceso de formado, la carga comienza a estabilizarse a valores de amplitud y período semejantes hasta el final del proceso.

En la figura 3.3 se tienen las curvas comparativas resultantes de la simulación y el proceso experimental utilizando una herramienta de 7 mm de diámetro. Se observa que la curva de simulación alcanza valores más altos que mediante ensayo experimental, siendo la carga máxima registrada experimentalmente de 472,2 N y de 323,7 N mediante la simulación. Esto se debe a que la simulación se realizó sin rotación de la herramienta, lo cual hace que aumenten las cargas necesarias para provocar deformación en la chapa.

En la figura 3.4 se indica la curva de carga en función de la distancia que recorre la herramienta, en este caso la herramienta de 7 mm requiere más carga seguida por la herramienta de 5 mm y finalmente la de 3 mm. Tomando en cuenta que en estos tres casos la distancia que recorren es idéntica también su velocidad es la misma en los tres casos, esto se debe a que, a mayor área de contacto mayor carga se requiere bajo parámetros similares, constantes y controlados.

En la figura 3.5 se evidencia un buen resultado en términos de conformado incremental para las piezas experimentalmente ensayadas mediante SPIF para todos los diámetros de las herramientas utilizadas, sin embargo, claramente se distingue una calidad superficial final diferente para cada tipo de herramienta. El acabado superficial obtenido con la herramienta de 7 mm de diámetro es muy superior al obtenido con la de 3 mm. Esto puede deberse a que el área de contacto entre la chapa y la herramienta es muy pequeña y la geometría de la punta de la herramienta además de deformar la chapa tiende a arrancar el material.

El patrón de círculos al deformarse se convierte en elipses de diámetro mayor d_1 y diámetro menor d_2 . La tabla 3.1, muestra que para los 3 casos analizados existe variación en los diámetros del patrón luego de la deformación. Se observa que el diámetro mayor d_1 aumenta de longitud mientras que el diámetro menor d_2 casi no hay variación manteniéndose su longitud original. Esto apunta que las deformaciones principales ε_2 en la dirección transversal al desplazamiento vertical de la herramienta son muy cercanas a un valor de cero, por tanto, la relación de deformación $\beta = 0$. Se evidencia que no existe deformación en la segunda dirección principal $\varepsilon_2 = 0$, a lo cual se señala a este fenómeno como deformación plana (plane strain) [2]. Durante este proceso, la chapa se extiende solo en una dirección y el círculo se convierte en una elipse en la que el eje menor no cambia. Además, se observa una disminución del espesor en la zona de conformado de la pieza y se comprueba el modo de fallo dependiente de la relación t_o/R , donde t_o corresponde al espesor inicial de la chapa y R el radio de la herramienta de conformación. Por este motivo se espera que exista un menor espesor en la chapa que fue deformada con una herramienta de mayor diámetro.

Finalmente, con el fin de comparar las fuerzas involucradas entre el proceso SPIF y alguno de sus procesos convencionales como es el embutido y el estampado se desarrolla el siguiente análisis. Las normas de embutido en forma de cono truncado se indican en la figura 3.6.

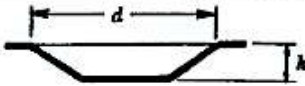
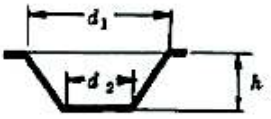
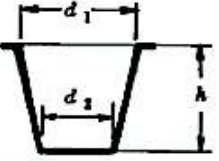
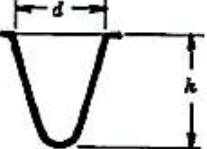
| Forma | Croquis | Transformabilidad |
|---|---|---|
| Muy poca profundidad $h \leq (0.25 \sim 0.3) d$ |  | Normalmente se requiere sólo un proceso. |
| La profundidad equivale aprox. a 1/2 del diámetro máximo $h = (0.4 \sim 0.55) d_1$ |  | Normalmente se requiere sólo un proceso. Se puede aplicar la tasa de embutido correspondiente al embutido cilíndrico de diámetro medio. |
| Mayor profundidad con menor diferencia entre d1 y d2 $h = (0.8 \sim 1.5) d_1$ |  | No se puede realizar el trabajo en un proceso. Suelen quedar las marcas de cada proceso de embutido en la zona lateral. |
| Cono circular profundo en forma ahusada |  | La transformación es extremadamente difícil y se requieren varios procesos. |

Figura 3. 6. Normas de embutido en forma de cono truncado.
(Fuente: [15])

La fuerza de embutido para las mismas condiciones geométricas de la pieza realizada mediante SPIF se calcula mediante la siguiente formula:

$$F_e = \pi d * e * n * r$$

Ec. 3. 1. Fuerza de embutido.
(Fuente: [17])

Dónde:

- d:** Diámetro del punzón
- e:** Espesor de la chapa
- n:** Coeficiente de embutición que depende de d/D
- r:** Resistencia a la tracción del material

Tabla 3. 3. Coeficientes de embutición dependientes de d/D.

| d/D | n |
|------------|----------|
| 0,55 | 1 |
| 0,575 | 0,93 |
| 0,6 | 0,86 |
| 0,625 | 0,79 |
| 0,65 | 0,72 |
| 0,675 | 0,66 |
| 0,7 | 0,6 |
| 0,725 | 0,55 |
| 0,75 | 0,5 |
| 0,775 | 0,45 |
| 0,8 | 0,4 |

(Fuente: [15])

Tabla 3. 4. Comparación de carga máxima necesaria para estampado y proceso SPIF.

| Proceso de deformación | Carga máxima necesaria N |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Proceso SPIF | 323,76 |
| Estampado | 15787,3 |

(Fuente: Propia)

Se tiene que tomar en cuenta que el gran desfase de fuerza necesaria por los distintos procesos para realizar un mismo elemento, se debe también al factor tiempo dado que con el proceso de deformación incremental se demora al menos unos 13 minutos en formar un tronco cónico de las dimensiones antes mencionadas, en cambio el proceso de embutido realizaría un mismo elemento en dichas dimensiones, pero en tiempos muy pequeños oscilantes entre 1 a 5 segundos.

4. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se diseñó y construyó un banco de pruebas para estudio de deformación incremental en chapas de aluminio AA 1200 H14 de 1 mm de espesor analizando las deformaciones y los datos obtenidos de carga en función del tiempo durante todo el proceso, es importante indicar que con este estudio en lo posterior se puede realizar el proceso para diferentes materiales y diferentes espesores.
- El análisis del proceso SPIF se realizó variando una serie de parámetros: diámetro de la herramienta de 3, 5 y 7 mm, profundidad de penetración o desplazamiento vertical de la herramienta de 0,5 mm por pasada, velocidad de avance de 10 mm/s y velocidad de giro de la herramienta de 900 rpm.
- Las mejor conformabilidad y acabado superficial de la chapa de aluminio se obtuvo al utilizar una herramienta de 7 mm de diámetro. Sin embargo, al utilizar esta herramienta se necesitó de mayor carga para deformar el material.
- El desgaste de la herramienta se ve directamente ligado a la velocidad de giro de la herramienta por cuestiones de fricción. La rotación en la herramienta permite que tanto el acabado superficial mejore como la carga necesaria sea menor. Además, el hecho de lubricar la chapa durante el proceso disminuye la carga necesaria.
- El estado de deformación de las chapas ensayadas presentó una deformación plana debido a que solamente existió deformación en una dirección principal del patrón analizado.
- Las chapas ensayadas presentan una buena capacidad de deformación con este proceso dado, que los espesores finales no demostraron fisuras o lugares demasiado finos. Con la herramienta de 3 mm la chapa redujo su espesor en 0,356 mm mientras que con la herramienta de 7 mm la chapa redujo su espesor en 0,446 mm. Con esto, se comprobó que se tiene menor espesor en la chapa deformada con una herramienta de mayor diámetro.
- La carga necesaria para deformar una chapa mediante proceso SPIF es mucho menor a la necesaria mediante procesos análogos como el embutido. Esto se comprueba con la carga de 323,76 N que es 50 veces menor a la carga 15787,3 N sin embargo, el tiempo de fabricación es 150 veces mayor al requerido por embutición.
- Por un lado, el proceso de formado incremental mono punto es un proceso controlado numéricamente aplicable a la producción de piezas de geometrías irregulares y complejas. Su flexibilidad, bajo costo en fabricación de herramental y posibilidad de realizar prototipos funcionales de fácil modificación hace que el proceso SPIF sobresalga fuertemente sobre los procesos manufactureros análogos como el

embutido o estampado evitando costos de construcción de nuevas matrices cada vez que se requiera modificar un modelo.

- Por otro lado, el proceso se limita a pequeños lotes de producción, tiempos de procesamiento más largos y elevada capacitación por parte del personal a cargo. Entonces, el proceso SPIF representa una alternativa dependiendo de la aplicación. No es adaptable a una rápida producción en serie, pero puede ser rentable para una baja producción y fabricación rápida de prototipos.

Recomendaciones

- Conocer el modo de operación del controlador del centro de mecanizado para que el programa se ejecute correctamente al realizar piezas mediante proceso SPIF.
- Simular el programa o a su vez ejecutarlo en vacío para observar si la trayectoria coincide con la que se desea realizar.
- Es necesario lubricar la zona de contacto entre la chapa y la herramienta para evitar el desgaste de la herramienta y brindar un mejor acabado superficial.
- Almacenar a tiempo real los valores de carga aplicada durante el proceso de deformación incremental.
- El banco de pruebas está diseñado para cargas máximas de 2000 N, por lo cual, no se debe exceder este valor al momento de realizar pruebas de deformación.

Trabajos futuros

Se pueden realizar ensayos en distintos materiales con diferente espesor, estudiando su comportamiento al variar los parámetros de velocidad de avance, velocidad de giro de la herramienta, profundidad de penetración y el diámetro de la herramienta, también se puede trabajar este proceso en otros materiales.

El proceso de deformación incremental mono punto puede aplicarse a distintas áreas. Por ejemplo, visto desde el área médica puede implementarse para la fabricación de distintas prótesis personalizadas utilizando titanio como material. En el sector automotriz para la fabricación de nuevos prototipos funcionales de autos debido al bajo costo inicial del herramental. Finalmente se abre camino al diseño de nuevos utillajes, herramientas y equipos necesarios para el desarrollo del proceso.

Referencias Bibliográficas

- [1] FIUBA, «Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires,» 2013. [En línea]. Available:
http://materias.fi.uba.ar/7204/teoricas/conformado_de_laminas_metalicas.pdf.
[Último acceso: 5 Junio 2017].
- [2] Z. Marciniak, J. Duncan y S. Hu, *Mechanic of Sheet Metal Forming*, Oxford: BUTTERWORTH HEINEMANN, 2002.
- [3] Theatlasgroup, «The Atlas Group,» 2013. [En línea]. Available:
<http://theatlasgroup.biz/overview-stretch-forming/>. [Último acceso: 8 Junio 2017].
- [4] E. Corona, «A simple analysis for bend-stretch forming of aluminum extrusions,» *ELSEVIER*, vol. 46, nº 3, pp. 433-448, 2004.
- [5] S. Matsubara, H. Amino, S. Aoyama y Y. Lu, «APPARATUS FOR DIELESS FORMING PLATE MATERIALS». Estados Unidos Patente US 6,216,508 B1, 17 abril 2001.
- [6] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou y J. Allwood, «Asymetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal,» *CIRP Annals*, pp. 88-114, 2005.
- [7] C. Suntaxi, «Análisis experimental de deformaciones límites en chapas de acero AISI 304 en conformado incremental,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2013.
- [8] S. Sánchez, «Diseño y modelado mediante CATIA V5 de operaciones de conformado incremental de chapa y aplicación práctica en ensayos de laboratorio,» Universidad de Sevilla , Sevilla, 2014.
- [9] L. Fratini, G. Ambrogio, R. Di Lorenzo, L. Filice y F. Micari, «Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming,» *ELSEVIER*, pp. 207-210, 2004.
- [10] M. Strano, «Technological Representation of Forming Limits for Negative Incremental Forming of Thin Aluminum Sheets,» *ELSEVIER*, vol. 7, nº 2, pp. 122-129, 2005.

- [11] G. LBO, «Grupo LBO,» 2017. [En línea]. Available: <http://grupolbo.com/>. [Último acceso: 5 Octubre 2017].
- [12] C. R. Riba, Diseño Concurrente, España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2002.
- [13] E. Alzate, J. Montes y C. Silva, «Medidores de Deformación por Resistencia: Galgas Extensiométricas,» *Scientia et Technica Año XIII*, pp. 7-12, 2007.
- [14] J. Naranjo, V. Miguel, A. Martínez-Martínez, L. Gómez-Lopez, M. Manjabacas y J. Coello, «Analysis and simulation of Single Point Incremental Forming by ANSYS,» *ELSEVIER*, pp. 1104-1111, 2015.
- [15] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Mexico: The McGraw-Hill, 2012.
- [16] R. C. Hibbeler, Mecánica de Materiales, Mexico: PEARSON, 2011.
- [17] R. L. Mott, DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS, Mexico: Pearson Educación, 2006.
- [18] S. Koyu, «SCRIBD,» 18 octubre 2011. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/69342049/Estampado-y-Troquelado-Mejoramiento>. [Último acceso: 20 marzo 2018].
- [19] P. Suriyapakan, «Single Point Incremental Forming and Multi-Stage Incremental Forming on Aluminium Alloy 1050,» Thammasat, Bangkok, 2013.
- [20] D. Young y J. Jeswiet, «Forming Limits Diagrams for Single Point Incremental Forming of Aluminium,» *IMECHE*, pp. 1-6, 2005.

ANEXO I.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ALUMINIO AA 1200 H14



C y M San Pascual S.A.
Construcción y Montaje

www.cymsanpascual.cl

Aluminio
Ficha Técnica

Características

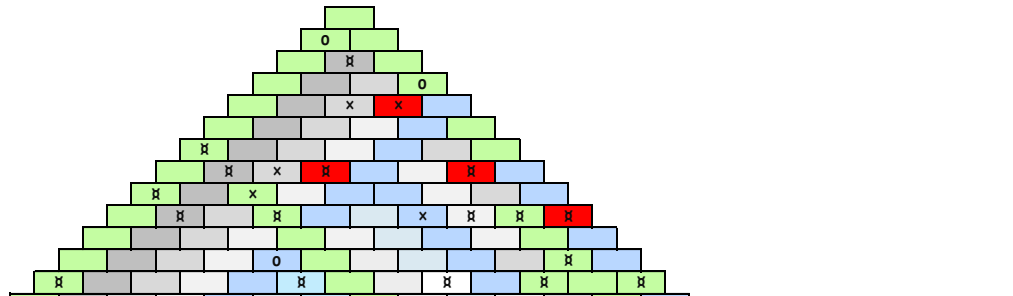
| Especificaciones Aluminio Aleación AA 1200 H12 y H14 | |
|--|--|
| Descripción | Recubrimiento para el aislante térmico. |
| Composición Química | Al: 99,00% mín. ; Si y Fe: 0,95% máx. ; Cu: 0,05% - 0,20% ; Mn: 0,05% máx. ; Zn: 0,10% máx. |
| Densidad | 2.710 [kg/m ³] |
| Resistencia Mecánica Temple H12 | 96 - 131 [MPa] |
| Resistencia Mecánica Temple H14 | 110 - 144 [MPa] |
| Emisividad | Aluminio Nuevo: 0,05 Aluminio Envejecido: 0,13 |
| Rollos Lisos | Espesores: 0,4 mm ; 0,5 mm ; 0,6 mm ; 0,8 mm ; 1,0 mm |
| Planchas Lisas | Ancho: 1.000 mm liso y 840 mm en planchas onduladas. |
| Planchas Onduladas (Onda 2") | Aluminio con y sin Barrera de Polykraft. |
| Usos y Aplicaciones | Piezas Prefabricadas: Cubiertas metálicas, cilindradas y rodonadas, para cubrir cañerías aisladas. Piezas en segmentos mitrados en forma de: codos, tees, caps, reducciones concéntricas y excéntricas, cubiertas para válvulas de mariposa, globo y compuerta. |

C y M San Pascual S.A, Av. El Roble 793 Recoleta, Santiago, Chile. Teléfonos:
+56 2 2622 9582 +56 2 2622 8415 +56 2 2629 3933 +56 2 2629 0574 Website:
www.cymsanpascual.cl

ANEXO II.

CASA DE LA CALIDAD PARA EL BANCO DE PRUEBAS

| FACTOR DE INCIDENCIA | Valores |
|--------------------------|--------------|
| ⊙ | 9 |
| △ | 3 |
| Δ | 1 |
| ● | 1,5 |
| • | 1,2 |
| ◦ | 1 |
| Intervalo de ponderación | |
| 5 | |
| 10 | |
| 15 | |
| Intervalo de incidencia | |
| 5 | |
| 9 | |
| 15 | |
| Compromisos | |
| o | Muy positiva |
| ⊗ | Positiva |
| x | Negativa |
| ⊗ | Muy negativa |



| | Peso | Volumen | Niveles de ruido | Medir la carga aplicada | Tiempo en cambiar otra herramienta | Tiempo de acople | Número de herramientas | Estabilidad y Rigidez | Lubricación del proceso | Energía necesaria máquina CNC | Mantenimiento | Seguridad y ergonomía | Costos | Rango de Espesores a deformar | A | B | C | D | E | F | G | H | I | |
|--|-------|---------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------|--------|-------------------------------|--------|---|---|---|---|---|---|------|------|--|
| Que sirva para varios espesores de chapa | O | | | | | | | △ | | ⊙ | | | △ | ⊙ | 1 | 4 | 4 | 5 | 5 | ● | 5 | 37,5 | 11,6 | |
| Que sea liviano | E | ⊙ | ⊙ | | | △ | | △ | | | | Δ | △ | | 1 | 4 | 5 | 3 | 3 | ◦ | 2 | 6 | 1,85 | |
| Que sea de rápido acople a la máquina | O | | Δ | | △ | ⊙ | △ | | | | Δ | Δ | △ | | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | • | 4 | 19,2 | 5,91 | |
| Que sea fácil de usar | O | | | △ | Δ | △ | △ | | | | | Δ | Δ | Δ | 1 | 4 | 4 | 3 | 3 | • | 3 | 10,8 | 3,33 | |
| Que el tamaño no exceda el 30% de la capacidad de la mesa de trabajo | O | △ | ⊙ | | | △ | | Δ | | Δ | | | △ | Δ | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 | ◦ | 3 | 9 | 2,77 | |
| Que sujete fácilmente la chapa | E | | | | | △ | | | | | Δ | Δ | △ | ⊙ | 1 | 2 | 4 | 3 | 3 | ● | 4 | 18 | 5,55 | |
| Que sea de bajo costo | O | △ | △ | Δ | ⊙ | Δ | △ | △ | △ | | ⊙ | Δ | ⊙ | △ | 1 | 2 | 3 | 5 | 5 | ● | 5 | 37,5 | 11,6 | |
| Que no genere altos ruidos | O | | ⊙ | | | | Δ | Δ | ⊙ | Δ | | ⊙ | | | 1 | 4 | 4 | 2 | 2 | ◦ | 3 | 6 | 1,85 | |
| Que mida la carga aplicada | B | | | ⊙ | | | | Δ | | △ | | | ⊙ | | 1 | 2 | 3 | 5 | 5 | ● | 5 | 37,5 | 11,6 | |
| Que sea de fácil cambio de herramienta | O | | | | ⊙ | △ | △ | | | | | △ | △ | △ | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | • | 4 | 19,2 | 5,91 | |
| Que tenga varios diámetros de herramienta | B | | | | Δ | | ⊙ | | | ⊙ | | | ⊙ | ⊙ | 1 | 4 | 3 | 5 | 5 | ● | 5 | 37,5 | 11,6 | |
| Que tenga rigidez aceptable | O | ⊙ | △ | Δ | △ | | | ⊙ | | | | | △ | | 1 | 4 | 5 | 4 | 4 | ◦ | 3 | 12 | 3,7 | |
| Que sea de fácil mantenimiento | O | | | | | | Δ | | | | ⊙ | | △ | | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | ◦ | 2 | 6 | 1,85 | |
| Que no sea peligroso para el usuario ni la máquina | B | | | ⊙ | | Δ | | | | △ | | ⊙ | Δ | | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | • | 4 | 19,2 | 5,91 | |
| Que tenga repuestos accesibles | O | | | | ⊙ | | Δ | | | ⊙ | | | △ | | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | • | 4 | 19,2 | 5,91 | |
| Que se pueda lubricar la chapa | O | | | ⊙ | | | | | ⊙ | Δ | △ | | | | 1 | 4 | 5 | 3 | 3 | ◦ | 2 | 6 | 1,85 | |
| Que se acople a otras máquinas CNC | E | | △ | | Δ | △ | △ | | | ⊙ | | | Δ | ⊙ | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | ● | 4 | 24 | 7,39 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 325 | 100 | |
| Propia empresa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | |
| Competencia 1 | 4 | 4 | 4 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | | | | | | | | | | |
| Competencia 2 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 5 | 2 | 5 | | | | | | | | | | |
| Incidencia | 301,5 | 374,7 | 330,3 | 916,2 | 340,2 | 565,5 | 925,8 | 403,5 | 145,5 | 1082 | 619,5 | 375,9 | 1505 | 1243 | 9128,4 | | | | | | | | | |
| Incidencia en (%) | 3,303 | 4,105 | 3,618 | 10,04 | 3,727 | 6,195 | 10,14 | 4,42 | 1,594 | 11,85 | 6,787 | 4,118 | 16,48 | 13,62 | 100 | | | | | | | | | |

ANEXO III.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL ACERO AISI 1045

AISI 1045 Medium Carbon Steel

Written by AZoM

Jul 5 2012

Mechanical Properties

| Mechanical Properties | Metric | Imperial |
|--|---------|-----------|
| Hardness, Brinell | 163 | 163 |
| Hardness, Knoop (Converted from Brinell hardness) | 184 | 184 |
| Hardness, Rockwell B (Converted from Brinell hardness) | 84 | 84 |
| Hardness, Vickers (Converted from Brinell hardness) | 170 | 170 |
| Tensile Strength, Ultimate | 565 MPa | 81900 psi |
| Tensile Strength, Yield | 310 MPa | 45000 psi |
| Elongation at Break (in 50 mm) | 16.0 % | 16.0 % |
| Reduction of Area | 40.0 % | 40.0 % |
| Modulus of Elasticity (Typical for steel) | 200 GPa | 29000 ksi |
| Bulk Modulus (Typical for steel) | 140 GPa | 20300 ksi |
| Poissons Ratio (Typical For Steel) | 0.290 | 0.290 |
| Shear Modulus (Typical for steel) | 80 GPa | 11600 ksi |

Machining

AISI 1045 steel has good machinability in normalized as well as the hot rolled condition. Based on the recommendations given by the machine manufacturers, operations like tapping, milling, broaching, drilling, turning and sawing etc. can be carried out on AISI 1045 steel using suitable feeds, tool type and speeds.

Applications

AISI 1045 is widely used for all industrial applications requiring more wear resistance and strength. Typical applications of AISI 1045 are as follows:

| | | |
|-----------------|--------------|------------------|
| Gears | Pins | Rams |
| Shafts | Rolls | Sockets |
| Axles | Spindles | Worms |
| Bolts | Ratchets | Light gears |
| Studs | Crankshafts | Guide rods |
| Connecting rods | Torsion bars | Hydraulic clamps |

ANEXO IV.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL ACERO ASTM A36

ASTM A36 Mild/Low Carbon Steel

Written by AZoM

Jul 5 2012

Mechanical Properties

| Mechanical Properties | Metric | Imperial |
|----------------------------------|---------------|-------------------|
| Tensile Strength, Ultimate | 400 - 550 MPa | 58000 - 79800 psi |
| Tensile Strength, Yield | 250 MPa | 36300 psi |
| Elongation at Break (in 200 mm) | 20.0 % | 20.0 % |
| Elongation at Break (in 50 mm) | 23.0 % | 23.0 % |
| Modulus of Elasticity | 200 GPa | 29000 ksi |
| Bulk Modulus (typical for steel) | 140 GPa | 20300 ksi |
| Poissons Ratio | 0.260 | 0.260 |
| Shear Modulus | 79.3 GPa | 11500 ksi |

Machining

The machinability rate of ASTM A36 is estimated to be 72%, and the average surface cutting feed of ASTM A36 is 120 ft/min. Machining of ASTM A36 steel is not as easy as that of AISI 1018 steel.

Applications

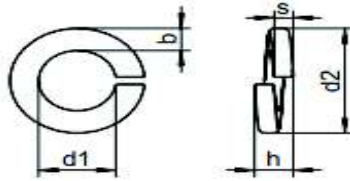
ASTM A36 steel has the following applications:

- It is used in bolted, riveted or welded construction of bridges, buildings and oil rigs.
- It is used in forming tanks, bins, bearing plates, fixtures, rings, templates, jigs, sprockets, cams, gears, base plates, forgings, ornamental works, stakes, brackets, automotive and agricultural equipment, frames, machinery parts.
- It is used for various parts obtained by flame cutting such as in parking garages, walkways, boat landing ramps and trenches.

ANEXO V.

CATÁLOGO DE PERNOS SELECCIONADOS

DIN 127 B Arandela grower Forma B plana

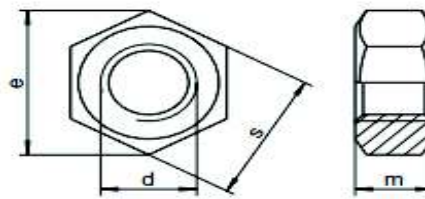


| Diámetro nominal | para | d1 | d2 | h mín. | s | b |
|------------------|------|------|------|--------|-----|-----|
| 2 | M2 | 2,1 | 4,4 | 1,0 | 0,5 | 0,9 |
| 2,3 | M2,3 | 2,3 | 4,8 | 1,2 | 0,6 | 1,0 |
| 2,5 | M2,5 | 2,6 | 5,1 | 1,2 | 0,6 | 1,0 |
| 2,6 | M2,6 | 2,7 | 5,2 | 1,2 | 0,6 | 1,0 |
| 3 | M3 | 3,1 | 6,2 | 1,6 | 0,8 | 1,3 |
| 3,5 | M3,5 | 3,6 | 6,7 | 1,6 | 0,8 | 1,3 |
| 4 | M4 | 4,1 | 7,6 | 1,8 | 0,9 | 1,5 |
| 5 | M5 | 5,1 | 9,2 | 2,4 | 1,2 | 1,8 |
| 6 | M6 | 6,1 | 11,8 | 3,2 | 1,6 | 2,5 |
| 8 | M8 | 8,1 | 14,8 | 4,0 | 2,0 | 3,0 |
| 10 | M10 | 10,2 | 18,1 | 4,4 | 2,2 | 3,5 |

| Grado | UV |
|-------|------|
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 1000 |
| ▲● FS | 500 |

DIN 934 Materiales especiales - sim. ISO 4032 Tuercas hexagonales

1.4462, 1.4529, 1.4539 y 1.4571

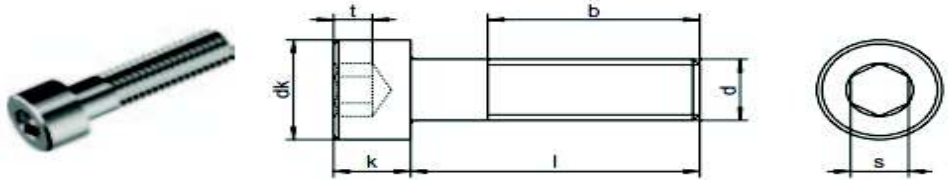


| d | m mín. | s | e | ● |
|-----|--------|----|-------|----|
| M6 | 4,70 | 10 | 11,05 | 10 |
| M8 | 6,14 | 13 | 14,38 | 13 |
| M10 | 7,64 | 17 | 18,90 | 17 |
| M12 | 9,64 | 19 | 21,10 | 19 |
| M16 | 12,30 | 24 | 26,75 | 24 |
| M20 | 14,90 | 30 | 32,95 | 30 |
| M24 | 17,70 | 36 | 39,55 | 36 |
| M27 | 20,70 | 41 | 45,20 | 41 |
| M30 | 22,70 | 46 | 50,85 | 46 |

| Grado | UV |
|-------------|-----|
| A5 AI BA BB | 100 |
| A5 AI BA BB | 100 |
| A5 AI BA BB | 50 |
| A5 AI BA BB | 50 |
| A5 AI BA BB | 25 |
| A5 AI BA BB | 25 |
| A5 AI BA BB | 25 |
| A5 AI BA BB | 25 |
| A5 AI BA BB | 25 |
| A5 AI BA BB | 25 |

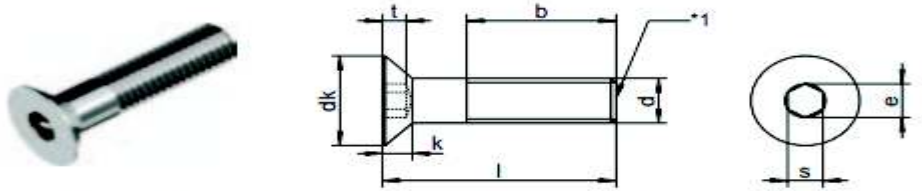
■ A1 / ▲ A2 / ● A4 | UV: Unidad de venta | Todas las medidas en mm | Otras dimensiones bajo pedido
Ejemplo Art.-Nr.: 934-BB-10 DIN 934 - 1.4539 - M8

DIN 912 - Página 1 - sim. ISO 4762
Tornillo Allen cilíndrico



| dk max. | 3,0 | 3,8 | 4,5 | 5,5 | 7,0 | 8,5 | 10,0 | 13,0 | 16,0 | 18,0 | 21,0 | 24,0 | 27,0 |
|-----------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| k max. | 1,6 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 16,0 | 18,0 |
| s | 1,5 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 14 |
| b | 15 | 16 | 17 | 18 | 20 | 22 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 |
| t | 0,7 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 |
| • | 1,5 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 14 |
| Long. / Ø | M1,6 | M2 | M2,5 | M3 | M4 | M5 | M6 | M8 | M10 | M12 | M14 | M16 | M18 |
| 3 | ▲● | ▲● | | | | | | | | | | | |
| 4 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | | | | | | |
| 5 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | | | | | |
| 6 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | | | |
| 8 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | | |
| 10 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | |
| 12 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | |
| 14 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | |
| 16 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | |
| 18 | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 20 | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 22 | | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 25 | | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 30 | | | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 35 | | | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 40 | | | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 45 | | | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 50 | | | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |

DIN 7991 - sim. ISO 10642
Tornillo avellanado Allen



| dk | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 24 | 30 | 36 | 39 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| k | 1,7 | 2,3 | 2,8 | 3,3 | 4,4 | 5,5 | 6,5 | 7,5 | 8,5 | 14,0 |
| s | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 |
| b | 12 | 14 | 16 | 18 | 22 | 26 | 30 | 38 | 46 | 54 |
| t | 1,2 | 1,8 | 2,3 | 2,5 | 3,5 | 4,4 | 4,6 | 5,3 | 5,9 | 10,3 |
| e | 2,30 | 2,87 | 3,44 | 4,58 | 5,72 | 6,86 | 9,15 | 11,43 | 13,72 | 16,00 |
| • | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 |
| Long. / Ø | M3 | M4 | M5 | M6 | M8 | M10 | M12 | M16 | M20 | M24 |
| 6 | ▲● | ▲● | ▲● | | | | | | | |
| 8 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | | | |
| 10 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | | |
| 12 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | | |
| 14 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | | |
| 16 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | | |
| 18 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | |
| 20 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 22 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 25 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 30 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 35 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 40 | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 45 | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 50 | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 55 | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 60 | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |
| 65 | | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● | ▲● |

ANEXO VI.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL ACERO AISI 1018

AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel

Written by AZoM

Jul 5 2012

Mechanical Properties

| Mechanical Properties | Metric | Imperial |
|---|----------|-----------|
| Hardness, Brinell | 126 | 126 |
| Hardness, Knoop (Converted from Brinell hardness) | 145 | 145 |
| Hardness, Rockwell B (Converted from Brinell hardness) | 71 | 71 |
| Hardness, Vickers (Converted from Brinell hardness) | 131 | 131 |
| Tensile Strength, Ultimate | 440 MPa | 63800 psi |
| Tensile Strength, Yield | 370 MPa | 53700 psi |
| Elongation at Break (In 50 mm) | 15.0 % | 15.0 % |
| Reduction of Area | 40.0 % | 40.0 % |
| Modulus of Elasticity (Typical for steel) | 205 GPa | 29700 ksi |
| Bulk Modulus (Typical for steel) | 140 GPa | 20300 ksi |
| Poissons Ratio (Typical For Steel) | 0.290 | 0.290 |
| Machinability (Based on AISI 1212 steel. as 100% machinability) | 70 % | 70 % |
| Shear Modulus (Typical for steel) | 80.0 GPa | 11600 ksi |

Machining

The machinability of AISI 1018 mild/low carbon steel is graded at 78% of B1112.

Applications of AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel

- It is used in bending, crimping and swaging processes.
- Carburized parts that include worms, gears, pins, dowels, non-critical components of tool and die sets, tool holders, pinions, machine parts, ratchets, dowels and chain pins use AISI 1018 mild/low carbon steel.
- It is widely used for fixtures, mounting plates and spacers.
- It is suitably used in applications that do not need high strength of alloy steels and high carbon.
- It provides high surface hardness and a soft core to parts that include worms, dogs, pins, liners, machinery parts, special bolts, ratchets, chain pins, oil tool slips, tie rods, anchor pins, studs etc.
- It is used to improve drilling, machining, threading and punching processes.
- It is used to prevent cracking in severe bends.

ANEXO VII.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL ACERO AISI D2

SISA D2

TRATAMIENTO TÉRMICO

Forjar

1050-850°C (1920-1560°F)

No forjar por debajo de 825°C (1520°F), enfriamiento lento en horno o material termoaislante.

Recocer

Calentamiento a 870°C (1600°F), mantener 2 horas, enfriamiento lento 15°C (25°F) por hora hasta alcanzar 540°C (1000°F), posterior enfriamiento al aire.

Recocido Alternativo Calentamiento a 870°C (1600°F), mantener 2 horas, enfriamiento a 775°C (1425°F), mantener 6 horas, posterior enfriamiento al aire.

Dureza en Estado Recocido BHN 221/225

Relevado de Tensiones

Material Recocido 650-675°C (1200-1250°F) Mantener 2 horas después de calentamiento al núcleo, enfriamiento lento en horno o al aire.

Material Templado Calentar 15-30°C (25-50°F) por debajo de la temperatura de revenido, mantener 2 horas después de calentamiento al núcleo, enfriamiento lento en horno o al aire.

Recomendable para reducir las tensiones causadas por un extenso maquinado en caso de herramientas de configuración complicada y para reducir las tensiones después de un proceso de electro-erosión.

Enderezado

Preferible a 205-425°C (400-800°F).

TEMPLE

Precalentar

595-650°C (1100-1200°F) - Normalizar.

Posteriormente a 760-790°C (1400-1450°F) - Normalizar.

Temple (Austenización)

995-1025°C (1825-1875°F) - Mantener 30 a 45 minutos a temperatura.

Enfriamiento

Al aire, aceite o enfriamiento con presión positiva (2 bar mínimo) a 65°C (150°F). Tratamiento en baño de sales, cuando es práctico, asegura la máxima tenacidad alcanzable para un tratamiento térmico.

Revenir inmediatamente.

Revenir

205-540°C (400-1000°F) - Doble revenido es necesario.

Revenir por un mínimo de 2 horas por cada revenido o por lo menos 1 hora por cada pulgada (25 mm) de espesor para secciones arriba de 2" (50 mm) de espesor.

Enfriar a temperatura ambiente entre revenidos.

RESPUESTA AL TRATAMIENTO TÉRMICO

Dureza y Tenacidad al Impacto

Temple a 1010°C (1850°F) Enfriamiento al Aire

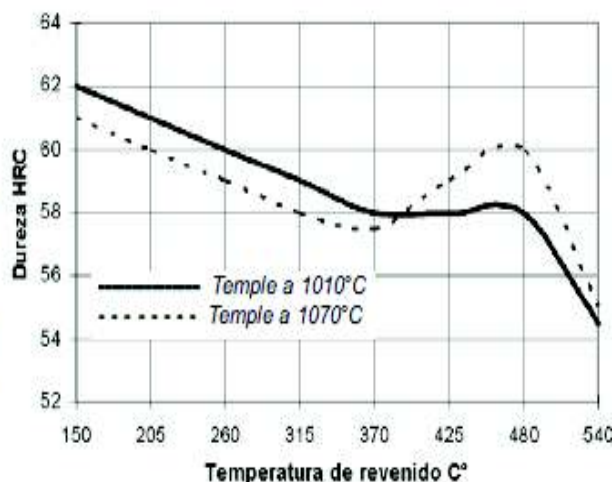
| Temperatura de Revenido | HRC | Entalla Charpy C | |
|-------------------------|-----|------------------|--------|
| | | Ft. lbs. | Joules |
| Temple al Aire | 63 | -- | -- |
| 150°C - (300°F) | 62 | 17 | 23 |
| 205°C - (400°F) | 61 | 21 | 29 |
| 260°C - (500°F) | 60 | 23 | 31 |
| 315°C - (600°F) | 59 | 22 | 30 |
| 380°C - (700°F) | 58 | 22 | 30 |
| 425°C - (800°F) | 58 | 21 | 29 |
| 480°C - (900°F) | 58 | 21 | 29 |
| 540°C - (1000°F) | 55 | 19 | 26 |

Los resultados pueden variar dependiendo del método de temple y el tamaño de la pieza. Enfriamiento al vacío o en atmósfera puede resultar hasta en 1-2 puntos HRC menos.

MAQUINABILIDAD Y RECTIFICABILIDAD

La maquinabilidad y rectificabilidad en estado recocido es aproximadamente un 35% de un acero tipo W1 (1% C).

DIAGRAMA DE REVENIDO



ANEXO VIII.

PARÁMETROS PARA EL DESARROLLO DE CÁLCULOS

1. CRITERIOS PARA ESFUERZOS DE DISEÑO

TABLA 3—2 Criterios para esfuerzo de diseño—Esfuerzos normales directos.

| Forma de la carga | Material dúctil | Material frágil |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| Estática | $\sigma_d = s_y/2$ | $\sigma_d = s_u/6$ |
| Repetida | $\sigma_d = s_u/8$ | $\sigma_d = s_u/10$ |
| Impacto o choque | $\sigma_d = s_u/12$ | $\sigma_d = s_u/15$ |

Figura 2. 50. Criterios para esfuerzos de diseño.
(Fuente: [17])

2. CLASIFICACIÓN DEL GRADO DEL PERNO

Equivalencias aproximadas entre los grados SAE, ASTM y métricos, de aceros para tornillos. La siguiente lista muestra los equivalentes aproximados que pueden ser útiles al comparar diseños para los cuales las especificaciones incluyan combinaciones de grados SAE, ASTM y métricos, de aceros para pernos. Para conocer datos específicos de resistencia, deben consultarse las normas individuales.

| <i>Grado SAE</i> | <i>Grado ASTM</i> | <i>Grado métrico</i> |
|------------------|-------------------|----------------------|
| J429 Grado 1 | A307 Grado A | Grado 4.6 |
| J429 Grado 2 | ————— | Grado 5.8 |
| → J429 Grado 5 | A449 | → Grado 8.8 |
| → J429 Grado 8 | A354 Grado BD | → Grado 10.9 |

3. CLASES MÉTRICAS DE PROPIEDAD MECÁNICA DE PERNOS, TORNILLOS BIRLOS DE ACERO

| Clase de propiedad | Intervalo de tamaños, inclusive | Resistencia de prueba mínima, † MPa | Resistencia mínima a la tensión, † MPa | Resistencia mínima a la fluencia, † MPa | Material | Marco en la cabeza |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|---|---|---|
| 4.6 | M5-M36 | 225 | 400 | 240 | Acero de bajo o medio carbono |  |
| 4.8 | M1.6-M16 | 310 | 420 | 340 | Acero de bajo o medio carbono |  |
| 5.8 | M5-M24 | 380 | 520 | 420 | Acero de bajo o medio carbono |  |
| 8.8 | M1.6-M36 | 600 | 830 | 660 | Acero de medio carbono, T y R |  |
| 9.8 | M1.6-M16 | 650 | 900 | 720 | Acero de medio carbono, T y R |  |
| 10.9 | M5-M36 | 830 | 1 040 | 940 | Acero martensítico de bajo carbono, T y R |  |
| 12.9 | M1.6-M36 | 970 | 1 220 | 1 100 | Acero alado, T y R |  |

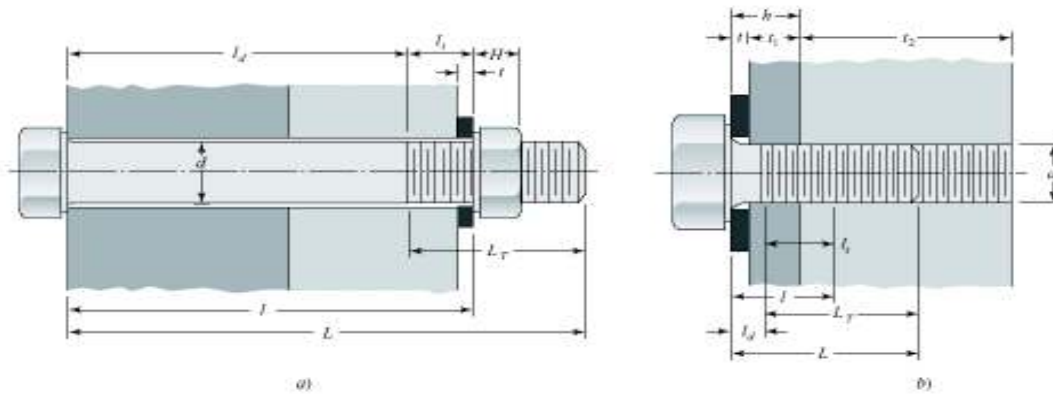
Figura 2. 51. Clases métricas de las propiedades mecánicas de los pernos.
(Fuente: [15])

4. DIÁMETROS Y ÁREAS DE ROSCAS MÉTRICAS DE PASO GRUESO Y FINO

| Diámetro mayor nominal d , mm | Serie de paso grueso | | | Serie de paso fino | | |
|---------------------------------|----------------------|---|---|--------------------|---|---|
| | Paso p , mm | Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ² | Área del diámetro menor A_r , mm ² | Paso p , mm | Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ² | Área del diámetro menor A_r , mm ² |
| 1.6 | 0.35 | 1.27 | 1.07 | | | |
| 2 | 0.40 | 2.07 | 1.79 | | | |
| 2.5 | 0.45 | 3.39 | 2.98 | | | |
| 3 | 0.5 | 5.03 | 4.47 | | | |
| 3.5 | 0.6 | 6.78 | 6.00 | | | |
| 4 | 0.7 | 8.78 | 7.75 | | | |
| 5 | 0.8 | 14.2 | 12.7 | | | |
| 6 | 1 | 20.1 | 17.9 | | | |
| 8 | 1.25 | 36.6 | 32.8 | I | 39.2 | 36.0 |
| 10 | 1.5 | 58.0 | 52.3 | 1.25 | 61.2 | 56.3 |
| 12 | 1.75 | 84.3 | 76.3 | 1.25 | 92.1 | 86.0 |
| 14 | 2 | 115 | 104 | 1.5 | 125 | 116 |
| 16 | 2 | 157 | 144 | 1.5 | 167 | 157 |
| 20 | 2.5 | 245 | 225 | 1.5 | 272 | 259 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Figura 2. 52. Diámetros y área de roscas métricas de paso grueso y fino.
(Fuente: [15])

5. LONGITUD ROSCADA PARA TORNILLOS METRICOS CON SUJETADORES ROSCADOS



$$L_T = \begin{cases} 2d + 6 & L \leq 125 \quad d \leq 48 \\ 2d + 12 & 125 < L \leq 200 \\ 2d + 25 & L > 200 \end{cases}$$

Figura 2. 53. Longitud roscada para tornillos métricos con sujetadores roscados.
(Fuente: [15])

6. COMPRESION DE UN ELEMENTO CON LAS PROPIEDADES ELASTICAS EQUIVALENTES REPRESENTADAS POR UN TRONCO HUECO

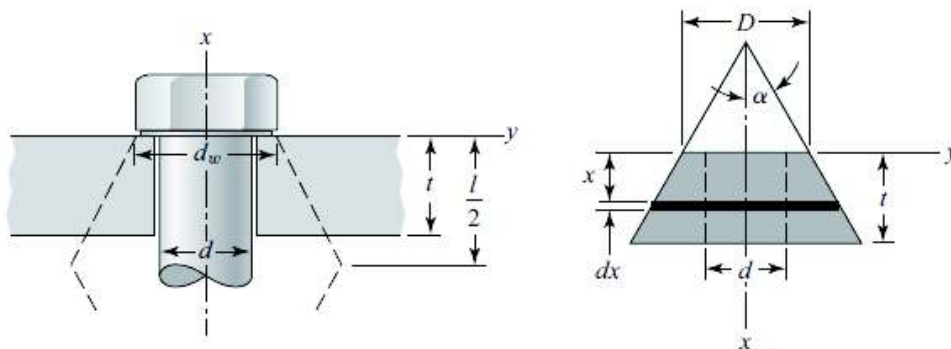


Figura 2. 54. Compresión de un elemento representadas por un tronco hueco.
(Fuente: [15])

7. PRECARGA EN FUNCION DE LA CARGA DE PRUEBA

$$F_i = \begin{cases} 0.75F_p & \text{para conexiones no permanentes, sujetadores reutilizados} \\ 0.90F_p & \text{para conexiones permanentes} \end{cases}$$

donde F_p es la carga de prueba, que se obtiene mediante la ecuación

$$F_p = A_t S_p$$

8. C_m FACTOR DEL MATERIAL

Aplique un factor de material C_m de la siguiente lista.

| | | | |
|--------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Acero forjado: | $C_m = 1.00$ | Hierro colado maleable: | $C_m = 0.80$ |
| Acero colado: | $C_m = 0.80$ | Hierro colado gris: | $C_m = 0.70$ |
| Acero pulverizado: | $C_m = 0.76$ | Hierro colado dúctil: | $C_m = 0.66$ |

9. C_{st} FACTOR DE TIPO DE ESFUERZO

Aplique un factor de tipo de esfuerzo: $C_{st} = 1.0$ para el esfuerzo flexionante, $C_{st} = 0.80$ para la tensión axial.

10. C_R FACTOR DE CONFIABILIDAD

| Factores de confiabilidad aproximados C_R | |
|---|------|
| Confiabilidad deseada C_R | |
| 0.50 | 1.0 |
| 0.90 | 0.90 |
| 0.99 | 0.81 |
| 0.999 | 0.75 |

Figura 2. 55. Factores de confiabilidad aproximados.
(Fuente: [17])

11. C_s FACTOR DE TAMAÑO

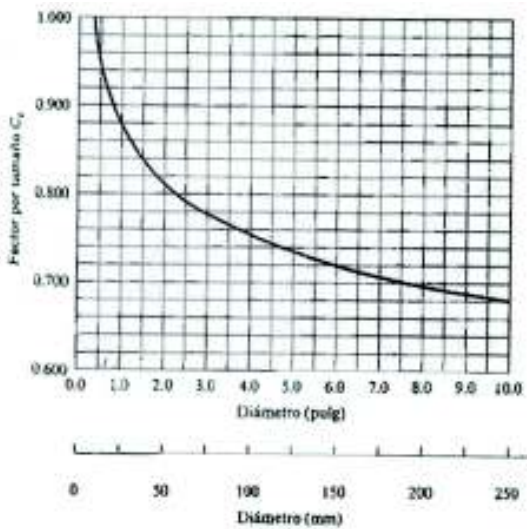


TABLA 5-2 Factores de tamaño

Unidades del Sistema Estadounidense Tradicional

| Rango de tamaño | Para D en pulgadas |
|---------------------|--------------------------|
| $D \leq 0.30$ | $C_S = 1.0$ |
| $0.30 < D \leq 2.0$ | $C_S = (D/0.3)^{-0.11}$ |
| $2.0 < D < 10.0$ | $C_S = 0.859 - 0.02125D$ |

Unidades SI

| Rango de tamaño | Para D en mm |
|--------------------|---------------------------|
| $D \leq 7.62$ | $C_S = 1.0$ |
| $7.62 < D \leq 50$ | $C_S = (D/7.62)^{-0.11}$ |
| $50 < D < 250$ | $C_S = 0.859 - 0.000837D$ |

Figura 2. 56. Factor de tamaño.
(Fuente: [17])

12. FACTOR DE CONCENTRADOR DE ESFUERZOS

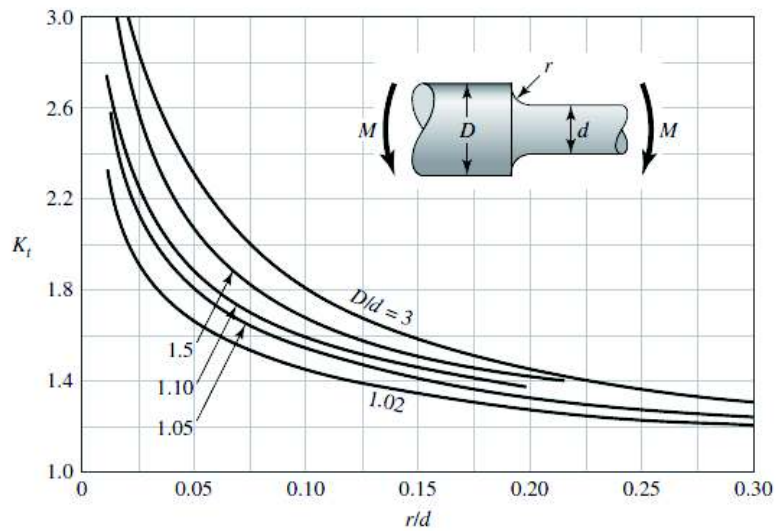


Figura A-15-9

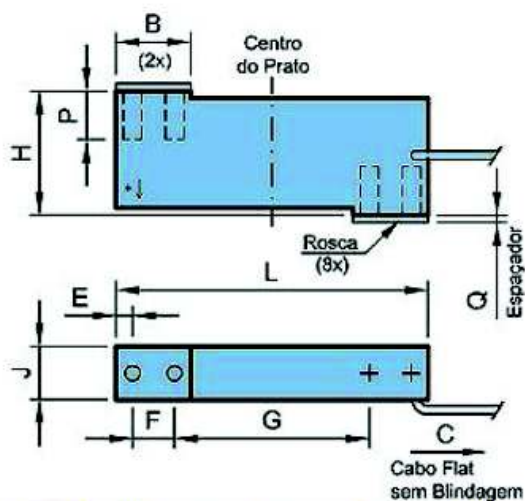
Eje redondo con filete en el hombro en flexión. $\sigma_0 = Mc/I$, donde $c = d/2$ e $I = \pi d^4/64$.

Figura 2. 57. Factor de concentración de esfuerzos.
(Fuente: [15])

ANEXO IX.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CELDA DE CARGA

| | |
|---|---|
| Capacidad de Nominal - kg | 300, 500 |
| Material | Aluminio Anodizado |
| Sensibilidad de mv/v | 2 +/- 10% |
| Error combinado - % salida nominal | < 0,03 |
| Creep de capacidad de nominal - % salida nominal | 20 min: < 0,03 08 hrs: < 0,05 |
| Cero inicial - % salida nominal | +/- 1 |
| Temperatura de trabajo útil - °C | - 5 a + 60 |
| Temperatura de trabajo compensada - °C | 0 a + 50 |
| Error excentricidad de conformidad OIML | > 3.000 divisiones |
| Efecto de la temperatura- ppm/°C de la salida nominal | en el cero: < 30 En la calibración: < 10 |
| Máx. sobrecarga s/ alteraciones - % cap. nominal | 150 |
| Sobrecarga de ruptura - % cap. nominal | 300 |
| Excitación VCC o VCA | máxima: 15 recomendada: 10 |
| Resistencia eléctrica entrada - ohms | 405 +/- 10 |
| Resistencia eléctrica salida - ohms | 350 +/- 1 |
| Resistencia de aislación (50 VCC máx.) - megaohms | > 5.000 |
| Deflexión máxima - mm a cap. nominal | < 1 |
| Grado de protección (IEC 529) | IP67 |
| Plataforma máxima - mm | 600 x 500 |



| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|---------------|
| Nota (1) | Recomendado utilizar espaçadores (Espesor Q) | | | | | | | | | | | | |
| Nota (2) | Cabo 9604 (Ø 4mm blindado) | | | | | | | | | | | | |
| Nota (3) | Medidas en mm | | | | | | | | | | | | |
| Modelos | B | C | D | E | F | G | H | J | L | P | Q | Rosca | Torque |
| GL300/500 | 41 | 2m | 60 | 8 | 25 | 125 | 75 | 75 | 191 | 25 | 5 | M10x1.5 | 8.1kgm |

ANEXO X.

MODULO HX711



HX711

24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
 - normal operation $< 1.5\text{mA}$, power down $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range: $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

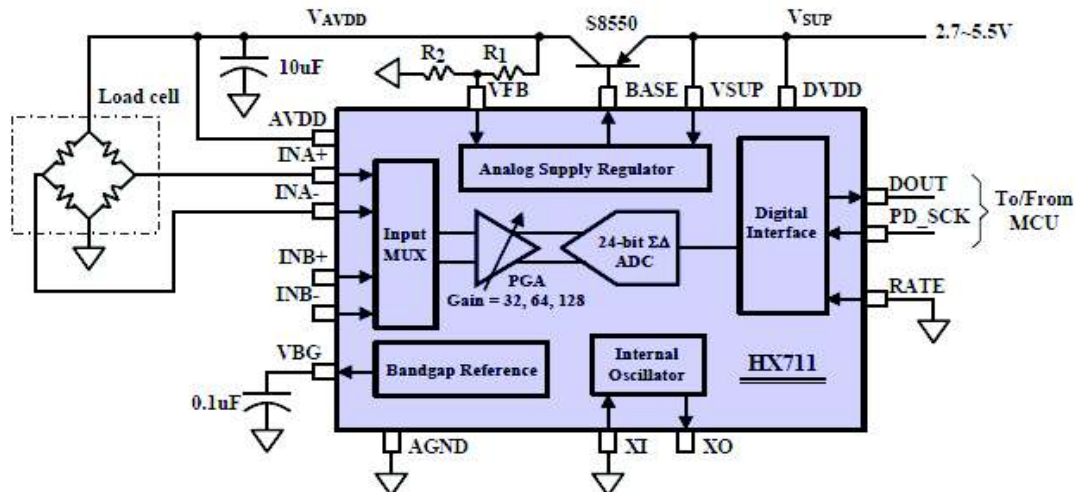
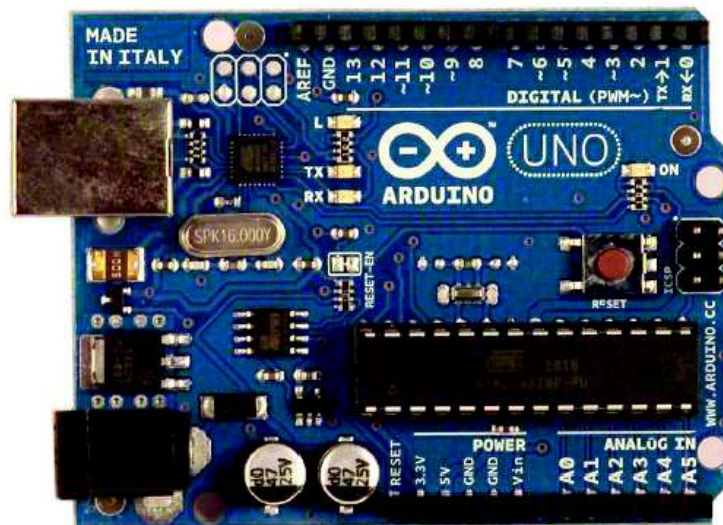


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

ANEXO XI.

ESPECIFICACIONES TECNICAS ARDUINO UNO

Arduino UNO



Technical Specification



EAGLE files: [arduino-duemilanove-uno-design.zip](#) Schematic: [arduino-uno-schematic.pdf](#)

Summary

| | |
|-----------------------------|--|
| Microcontroller | ATmega328 |
| Operating Voltage | 5V |
| Input Voltage (recommended) | 7-12V |
| Input Voltage (limits) | 6-20V |
| Digital I/O Pins | 14 (of which 6 provide PWM output) |
| Analog Input Pins | 6 |
| DC Current per I/O Pin | 40 mA |
| DC Current for 3.3V Pin | 50 mA |
| Flash Memory | 32 KB of which 0.5 KB used by bootloader |
| SRAM | 2 KB |
| EEPROM | 1 KB |
| Clock Speed | 16 MHz |

ANEXO XII.

CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN EN ARDUINO

CALIBRACIÓN DE CELDA DE CARGA

```
Para_calibrar
#include "HX711.h"

#define DOUT A1
#define CLK A0

HX711 balanza(DOUT, CLK);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Lectura del valor del ADC: ");
  Serial.println(balanza.read());
  Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la balanza");
  Serial.println("Destarando...");
  balanza.set_scale(10210.43); //La escala por defecto es 1
  balanza.tare(20); //El peso actual es considerado Tara.
  Serial.println("Coloque un peso conocido:");
}

void loop() {
  Serial.print("Peso: ");
  Serial.print(balanza.get_units(20),3);
  Serial.println(" kg");
  delay(100);
}
```

ALMACENAMIENTO DE DATOS

```
Para_almacénar
#include "HX711.h"

#define DOUT A1
#define CLK A0

HX711 balanza(DOUT, CLK);

int lectura = 0; // variable que se refiere a las líneas de excel
int LABEL = 1;

void setup(){
  Serial.begin(9600); // inicialización de la comunicación serial
  Serial.println("CLEARDATA"); // Restablecimiento de la comunicación serial
  Serial.println("LABEL, Hora, Lectura"); // Nombra las columnas
  Serial.print("Lectura del valor del ADC: ");
  Serial.println(balanza.read());
  balanza.set_scale(10326.44); //La escala por defecto es 1
  balanza.tare(20); //El peso actual es considerado Tara.
  Serial.println("Coloque un peso conocido:");
}

void loop(){
  lectura++; // incrementa la línea del excel para que la lectura salte de línea en línea

  Serial.print("DATA,TIME,"); //inicia la impresión de datos, siempre iniciando
  //Serial.print(",");
  Serial.print(" ");
  Serial.println(balanza.get_value(10),0);
  Serial.println(lectura);

  if (lectura > 60000) //lazo para limitar la cantidad de datos
  {
    lectura = 0;
    Serial.println("ROW,SET,2"); // alimentación de las líneas con los datos siempre iniciando
  }
  delay(200); // espera 200 milisegundos
}
```

ANEXO XIII.

IMÁGENES DE LA CONSTRUCCION DEL BANCO



Figura 1. Corte de la materia prima.



Figura 2. Desbastado de los elementos.



Figura 3. Taladrado de los elementos.



Figura 4. Rectificado de los elementos.



Figura 4. Torneado de los elementos cilíndricos.



Figura 6. Ensamblado del soporte.



Figura 7. Herramienta templada.



Figura 8. Calibración del módulo de carga.



Figura 9. Montaje del banco.



Figura 10. Medición de la herramienta.



Figura 11. Desarrollo del proceso de deformación.



Figura 12. Registro de datos.

ANEXO XIV.

CODIGOS G DE LAS PIEZAS MODELO

TRONCO CÓNICO

%
O1(chapa_deformacion_in
cremental_igs)
(=====)
)
(## FECHA : Thu Feb 01
17:55:57 2018)
N2 G40 G17 G90
N3 (##)
N4 (## OPERACION:
ZLEVEL_PROFILE)
N5 G0 G91 G28 Z0.0
N6 (## - FERR.: T2
ESFERICA_7)
N7 T2 M6
N8 G90
N9 G0 G54 X-33.331 Y3.5
S900 M3
N10 G43 Z10.5 H2
N11 Z2.5
N12 G1 Z-.5 D2 F600. M8
N13 X-33.515
N14 G3 X-37.015 Y0.0 I0.0
J-3.5
N15 G3 X-37.015 Y0.0
I37.015 J0.0
N16 G1 X-36.438 Z-.75
N17 X-35.979 Z-1.
N18 G3 X-35.979 Y0.0
I35.979 J0.0
N19 G1 X-35.561 Z-1.25
N20 X-35.207 Z-1.5
N21 G3 X-35.207 Y0.0
I35.207 J0.0
N22 G1 X-34.892 Z-1.75
N23 X-34.608 Z-2.
N24 G3 X-34.608 Y0.0
I34.608 J0.0
N25 G1 X-34.351 Z-2.25
N26 X-34.101 Z-2.5
N27 G3 X-34.101 Y0.0
I34.101 J0.0
N28 G1 X-33.601 Z-3.
N29 G3 X-33.601 Y0.0
I33.601 J0.0
N30 G1 X-33.101 Z-3.5
N31 G3 X-33.101 Y0.0
I33.101 J0.0
N32 G1 X-32.601 Z-4.
N33 G3 X-32.601 Y0.0
I32.601 J0.0
N34 G1 X-32.101 Z-4.5
N35 G3 X-32.101 Y0.0
I32.101 J0.0
N36 G1 X-31.601 Z-5.
N37 G3 X-31.601 Y0.0
I31.601 J0.0
N38 G1 X-31.101 Z-5.5
N39 G3 X-31.101 Y0.0
I31.101 J0.0
N40 G1 X-30.601 Z-6.
N41 G3 X-30.601 Y0.0
I30.601 J0.0
N42 G1 X-30.101 Z-6.5
N43 G3 X-30.101 Y0.0
I30.101 J0.0
N44 G1 X-29.601 Z-7.
N45 G3 X-29.601 Y0.0
I29.601 J0.0
N46 G1 X-29.101 Z-7.5
N47 G3 X-29.101 Y0.0
I29.101 J0.0
N48 G1 X-28.601 Z-8.
N49 G3 X-28.601 Y0.0
I28.601 J0.0
N50 G1 X-28.101 Z-8.5
N51 G3 X-28.101 Y0.0
I28.101 J0.0
N52 G1 X-27.601 Z-9.
N53 G3 X-27.601 Y0.0
I27.601 J0.0
N54 G1 X-27.101 Z-9.5
N55 G3 X-27.101 Y0.0
I27.101 J0.0
N56 G1 X-26.601 Z-10.
N57 G3 X-26.601 Y0.0
I26.601 J0.0
N58 G1 X-26.101 Z-10.5
N59 G3 X-26.101 Y0.0
I26.101 J0.0
N60 G1 X-25.601 Z-11.
N61 G3 X-25.601 Y0.0
I25.601 J0.0
N62 G1 X-25.101 Z-11.5
N63 G3 X-25.101 Y0.0
I25.101 J0.0
N64 G1 X-24.601 Z-12.
N65 G3 X-24.601 Y0.0
I24.601 J0.0
N66 G1 X-24.101 Z-12.5

| | | |
|--|--|---|
| N67 G3 X-24.101 Y0.0 I24.101 J0.0 | N88 G1 X-18.601 Z-18. N89 G3 X-18.601 Y0.0 I18.601 J0.0 | N109 G3 X-13.601 Y0.0 I13.601 J0.0 |
| N68 G1 X-23.601 Z-13. N69 G3 X-23.601 Y0.0 I23.601 J0.0 | N90 G1 X-18.101 Z-18.5 N91 G3 X-18.101 Y0.0 I18.101 J0.0 | N110 G1 X-13.101 Z-23.5 N111 G3 X-13.101 Y0.0 I13.101 J0.0 |
| N70 G1 X-23.101 Z-13.5 N71 G3 X-23.101 Y0.0 I23.101 J0.0 | N92 G1 X-17.601 Z-19. N93 G3 X-17.601 Y0.0 I17.601 J0.0 | N112 G1 X-12.601 Z-24. N113 G3 X-12.601 Y0.0 I12.601 J0.0 |
| N72 G1 X-22.601 Z-14. N73 G3 X-22.601 Y0.0 I22.601 J0.0 | N94 G1 X-17.101 Z-19.5 N95 G3 X-17.101 Y0.0 I17.101 J0.0 | N114 G1 X-12.101 Z-24.5 N115 G3 X-12.101 Y0.0 I12.101 J0.0 |
| N74 G1 X-22.101 Z-14.5 N75 G3 X-22.101 Y0.0 I22.101 J0.0 | N96 G1 X-16.601 Z-20. N97 G3 X-16.601 Y0.0 I16.601 J0.0 | N116 G1 X-11.851 Z-24.75 N117 X-11.774 Z-24.813 N118 X-11.702 Z-24.875 |
| N76 G1 X-21.601 Z-15. N77 G3 X-21.601 Y0.0 I21.601 J0.0 | N98 G1 X-16.101 Z-20.5 N99 G3 X-16.101 Y0.0 I16.101 J0.0 | N119 X-11.598 Z-24.938 N120 X-11.416 Z-25. N121 G3 X-11.416 Y0.0 I11.409 J.005 |
| N78 G1 X-21.101 Z-15.5 N79 G3 X-21.101 Y0.0 I21.101 J0.0 | N100 G1 X-15.601 Z-21. N101 G3 X-15.601 Y0.0 I15.601 J0.0 | N122 G3 X-7.915 Y-3.498 I3.5 J.001 N123 G1 X-7.098 N124 Z-22. |
| N80 G1 X-20.601 Z-16. N81 G3 X-20.601 Y0.0 I20.601 J0.0 | N102 G1 X-15.101 Z-21.5 N103 G3 X-15.101 Y0.0 I15.101 J0.0 | N125 G0 Z10.5 N126 (## Tiempo de Operacion: 12.6 min.) N127 M30 |
| N82 G1 X-20.101 Z-16.5 N83 G3 X-20.101 Y0.0 I20.101 J0.0 | N104 G1 X-14.601 Z-22. N105 G3 X-14.601 Y0.0 I14.601 J0.0 | N128 (## Tiempo Total de Mecanizado: 12.6 min.) % |
| N84 G1 X-19.601 Z-17. N85 G3 X-19.601 Y0.0 I19.601 J0.0 | N106 G1 X-14.101 Z-22.5 N107 G3 X-14.101 Y0.0 I14.101 J0.0 | |
| N86 G1 X-19.101 Z-17.5 N87 G3 X-19.101 Y0.0 I19.101 J0.0 | N108 G1 X-13.601 Z-23. | |

SELLO MARCA CHEVROLET

| | | |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| % | N24 G1 Y13.743 | N55 X9.589 |
| O2(chevrolet_spif_igs) | N25 X-11.243 | N56 Y-8.327 |
| (===== | N26 Y9.089 | N57 G2 X11.829 Y-6.089 |
| ===== | N27 G2 X-12.589 Y7.743 I- | I2.239 J-.001 |
| ===== | 1.346 J0.0 | N58 G1 X27.252 |
| =) | N28 G1 X-28.305 | N59 X32.931 Y6.089 |
| ## FECHA : Thu Feb 01 | N29 X-35.526 Y-7.743 | N60 X11.83 |
| 18:11:47 2018) | N30 X-24.058 | N61 G2 X9.589 Y8.326 I- |
| N2 G40 G17 G90 | N31 Y-7.212 Z-.75 | .002 J2.239 |
| N3 (##) | N32 Y-6.779 Z-1. | N62 G1 Y12.089 |
| N4 (## OPERACION: | N33 X-12.148 | N63 X-9.589 |
| ZLEVEL_PROFILE) | N34 G2 X-10.279 Y-8.645 | N64 Y8.327 |
| N5 G0 G91 G28 Z0.0 | I.002 J-1.868 | N65 G2 X-11.828 Y6.089 I- |
| N6 (## - FERR.: T2 | N35 G1 Y-12.779 | 2.238 J.001 |
| ESFERICA_7) | N36 X10.279 | N66 G1 X-27.252 |
| N7 T2 M6 | N37 Y-8.645 | N67 X-32.931 Y-6.089 |
| N8 G90 | N38 G2 X12.147 Y-6.779 | N68 X-24.058 |
| N9 G0 G54 X-27.558 Y- | I1.868 J-.001 | N69 Y-5.806 Z-1.75 |
| 4.243 S900 M3 | N39 G1 X27.691 | N70 Y-5.55 Z-2. |
| N10 G43 Z10.5 H2 | N40 X34.013 Y6.779 | N71 X-11.389 |
| N11 Z2.5 | N41 X12.147 | N72 G2 X-9.05 Y-7.889 I0.0 |
| N12 G1 Z-.5 D2 F600. M8 | N42 G2 X10.279 Y8.648 | J-2.339 |
| N13 G3 X-24.058 Y-7.743 | I.001 J1.869 | N73 G1 Y-11.55 |
| I3.5 J0.0 | N43 G1 Y12.779 | N74 X9.05 |
| N14 G1 X-12.589 | N44 X-10.279 | N75 Y-7.889 |
| N15 G2 X-11.243 Y-9.089 | N45 Y8.648 | N76 G2 X11.389 Y-5.55 |
| I0.0 J-1.346 | N46 G2 X-12.148 Y6.779 I- | I2.339 J0.0 |
| N16 G1 Y-13.743 | 1.869 J0.0 | N77 G1 X26.909 |
| N17 X11.243 | N47 G1 X-27.691 | N78 X32.085 Y5.55 |
| N18 Y-9.089 | N48 X-34.013 Y-6.779 | N79 X11.389 |
| N19 G2 X12.589 Y-7.743 | N49 X-24.058 | N80 G2 X9.05 Y7.889 I0.0 |
| I1.346 J0.0 | N50 Y-6.41 Z-1.25 | J2.339 |
| N20 G1 X28.305 | N51 Y-6.089 Z-1.5 | N81 G1 Y11.55 |
| N21 X35.526 Y7.743 | N52 X-11.83 | N82 X-9.05 |
| N22 X12.589 | N53 G2 X-9.589 Y-8.326 | N83 Y7.889 |
| N23 G2 X11.243 Y9.089 | I.002 J-2.239 | N84 G2 X-11.389 Y5.55 I- |
| I0.0 J1.346 | N54 G1 Y-12.089 | 2.339 J0.0 |

| | | |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| N85 G1 X-26.909 | N118 X-8.05 | N151 X9.378 |
| N86 X-32.085 Y-5.55 | N119 Y6.884 | N152 G2 X7.05 Y5.878 I0.0 |
| N87 X-24.058 | N120 G2 X-10.384 Y4.55 I- | J2.328 |
| N88 Y-5.05 Z-2.5 | 2.334 J0.0 | N153 G1 Y9.55 |
| N89 X-10.881 | N121 G1 X-26.272 | N154 X-7.05 |
| N90 G2 X-8.55 Y-7.381 I0.0 | N122 X-30.515 Y-4.55 | N155 Y5.879 |
| J-2.331 | N123 X-24.058 | N156 G2 X-9.379 Y3.55 I- |
| N91 G1 Y-11.05 | N124 Y-4.05 Z-3.5 | 2.328 J0.0 |
| N92 X8.55 | N125 X-9.89 | N157 G1 X-25.635 |
| N93 Y-7.381 | N126 G2 X-7.55 Y-6.39 I0.0 | N158 X-28.946 Y-3.55 |
| N94 G2 X10.881 Y-5.05 | J-2.339 | N159 X-24.058 |
| I2.331 J0.0 | N127 G1 Y-10.05 | N160 Y-3.05 Z-4.5 |
| N95 G1 X26.59 | N128 X7.55 | N161 X-8.884 |
| N96 X31.3 Y5.05 | N129 Y-6.39 | N162 G2 X-6.55 Y-5.384 |
| N97 X10.881 | N130 G2 X9.89 Y-4.05 | I0.0 J-2.334 |
| N98 G2 X8.55 Y7.381 I0.0 | I2.339 J0.0 | N163 G1 Y-9.05 |
| J2.331 | N131 G1 X25.953 | N164 X6.55 |
| N99 G1 Y11.05 | N132 X29.73 Y4.05 | N165 Y-5.384 |
| N100 X-8.55 | N133 X9.89 | N166 G2 X8.884 Y-3.05 |
| N101 Y7.381 | N134 G2 X7.55 Y6.39 I0.0 | I2.334 J0.0 |
| N102 G2 X-10.881 Y5.05 I- | J2.339 | N167 G1 X25.316 |
| 2.331 J0.0 | N135 G1 Y10.05 | N168 X28.161 Y3.05 |
| N103 G1 X-26.59 | N136 X-7.55 | N169 X8.884 |
| N104 X-31.3 Y-5.05 | N137 Y6.39 | N170 G2 X6.55 Y5.384 I0.0 |
| N105 X-24.058 | N138 G2 X-9.89 Y4.05 I- | J2.333 |
| N106 Y-4.55 Z-3. | 2.339 J0.0 | N171 G1 Y9.05 |
| N107 X-10.384 | N139 G1 X-25.953 | N172 X-6.55 |
| N108 G2 X-8.05 Y-6.884 | N140 X-29.73 Y-4.05 | N173 Y5.384 |
| I0.0 J-2.334 | N141 X-24.058 | N174 G2 X-8.884 Y3.05 I- |
| N109 G1 Y-10.55 | N142 Y-3.55 Z-4. | 2.334 J0.0 |
| N110 X8.05 | N143 X-9.379 | N175 G1 X-25.316 |
| N111 Y-6.884 | N144 G2 X-7.05 Y-5.879 | N176 X-28.161 Y-3.05 |
| N112 G2 X10.384 Y-4.55 | I0.0 J-2.328 | N177 X-24.058 |
| I2.334 J0.0 | N145 G1 Y-9.55 | N178 Y-2.55 Z-5. |
| N113 G1 X26.272 | N146 X7.05 | N179 X-8.376 |
| N114 X30.515 Y4.55 | N147 Y-5.879 | N180 G2 X-6.05 Y-4.876 |
| N115 X10.384 | N148 G2 X9.379 Y-3.55 | I0.0 J-2.326 |
| N116 G2 X8.05 Y6.884 I0.0 | I2.328 J0.0 | N181 G1 Y-8.55 |
| J2.334 | N149 G1 X25.635 | N182 X6.05 |
| N117 G1 Y10.55 | N150 X28.946 Y3.55 | N183 Y-4.876 |

| | | |
|--|--------------------------------------|---|
| N184 G2 X8.376 Y-2.55 I2.326 J0.0 | N205 X7.89 | N229 X25.818 Y1.558 |
| N185 G1 X24.998 | N206 G2 X5.55 Y4.39 I0.0 J2.34 | N230 X7.533 |
| N186 X27.376 Y2.55 | N207 G1 Y8.05 | N231 X7.439 Y1.559 |
| N187 X8.376 | N208 X-5.55 | N232 X5.4 Y1.871 |
| N188 G2 X6.05 Y4.876 I0.0 J2.326 | N209 Y4.39 | N233 X5.33 Y1.925 |
| N189 G1 Y8.55 | N210 G2 X-7.89 Y2.05 I- 2.34 J0.0 | N234 X5.058 Y4.033 |
| N190 X-6.05 | N211 G1 X-24.679 | N235 Y7.558 |
| N191 Y4.876 | N212 X-26.591 Y-2.05 | N236 X-5.058 |
| N192 G2 X-8.376 Y2.55 I- 2.326 J0.0 | N213 X-24.058 | N237 Y4.033 |
| N193 G1 X-24.998 | N214 Y-1.8 Z-5.75 | N238 X-5.33 Y1.925 |
| N194 X-27.376 Y-2.55 | N215 Y-1.558 Z-6. | N239 X-5.4 Y1.871 |
| N195 X-24.058 | N216 X-7.533 | N240 X-7.439 Y1.559 |
| N196 Y-2.05 Z-5.5 | N217 X-7.439 Y-1.559 | N241 X-7.533 Y1.558 |
| N197 X-7.89 | N218 X-5.4 Y-1.871 | N242 X-24.365 |
| N198 G2 X-5.55 Y-4.39 I0.0 J-2.34 | N219 X-5.33 Y-1.925 | N243 X-25.818 Y-1.558 |
| N199 G1 Y-8.05 | N220 X-5.058 Y-4.033 | N244 X-24.058 |
| N200 X5.55 | N221 Y-7.558 | N245 G3 X-22.308 Y.192 I0.0 J1.75 |
| N201 Y-4.39 | N222 X5.058 | N246 G1 Z-3. |
| N202 G2 X7.89 Y-2.05 I2.34 J0.0 | N223 Y-4.033 | N247 G0 Z10.5 |
| N203 G1 X24.679 | N224 X5.33 Y-1.925 | N248 (## Tiempo de Operacion: 3.1 min.) |
| N204 X26.591 Y2.05 | N225 X5.4 Y-1.871 | N249 M30 |
| | N226 X7.439 Y-1.559 | N250 (## Tiempo Total de Mecanizado: 3.1 min.) % |
| | N227 X7.533 Y-1.558 | |
| | N228 X24.365 | |

ANEXO XV.

PROTOCOLO DE PRUEBAS

| Protocolo de Pruebas para maquinaria | | | |
|---|--|--------------------------|-----------|
| Máquina: | Banco de pruebas para el estudio del proceso de deformación incremental en chapas de aluminio AA1200 H14 | | |
| Empresa: | Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional | | |
| Verificado por: | Christian Maigua Santiago Velasteguí | Fecha: 20/01/2018 | |
| Prueba de Ensamble | | | |
| Pruebas | Actividades | Si Cumple | No Cumple |
| | Correcto par de apriete pernos de la celda de carga con la base de anclaje. | X | |
| | Correcto par de apriete pernos de la celda de carga con la base de la mordaza. | X | |
| | Correcto par de apriete pernos de las columnas. | X | |
| | Correcto par de apriete de las tuercas superiores de la columna. | X | |
| | Correctas conexiones de tarjeta Arduino, HX711, a la PC. | X | |
| | Adecuada calibración de la celda de carga | X | |
| Prueba de montaje | | | |
| | Adecuado paralelismo entre el banco y la mesa de la CNC. | X | |
| | Correcto par de apriete pernos de anclaje a la mesa de la CNC. | X | |
| | Herramienta correctamente centrada en el porta herramienta BT-30. | X | |
| | Correcto par de apriete de prisionero del porta herramienta BT-30 | X | |

| | | |
|--|---|---|
| La chapa de aluminio esta correctamente centrada en la mordaza. | X | |
| Las 4 mordazas están correctamente posicionadas y el par de apriete de los 12 pernos son adecuados. | X | |
| La compensación de la herramienta es adecuada, medida de la herramienta en la CNC, se realizó cero piezas. | X | |
| Existen excentricidades del husillo haciéndolo girar a 500 Rpm. | | X |
| Prueba de funcionamiento | | |
| Se carga el programa al controlador del centro de maquinado normalmente. | X | |
| Ingresó valores de diámetro de herramienta. | X | |
| Configuró velocidades angulares, y avances. | X | |
| Inició el proceso en velocidades mínima. | X | |
| Se ejecutó con normalidad el programa. | X | |
| Hay lubricación en el proceso. | X | |
| Existen ruidos Excesivos. | | X |
| Existen temperatura elevada. | | X |
| Existen vibraciones excesivas. | | X |
| Existen movimientos relativos entre chapa y mordaza. | | X |
| Se tiene correcta obtención de datos de carga. | X | |
| Extracción del elemento deformado. | X | |

ANEXO XVII.
PLANO DE CONJUNTO
PLANOS DE TALLER