

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EQUIPO DIDÁCTICO
PARA FORJA EN CALIENTE**

PRESENTADO POR:

JUAN FRANCISCO CHACÓN NAVARRETE

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EQUIPO DIDÁCTICO
PARA FORJA EN CALIENTE**

Presentado por :

JUAN FRANCISCO CHACÓN NAVARRETE

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, julio de 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso por su bendición, sabiduría, protección y guía que me ha dado durante toda mi vida.

A mamá Josefa Guadalupe Navarrete, por todo el amor de madre, por su apoyo incondicional en cualquier circunstancia, por todos sus consejos y sabiduría transmitida, por todo el esfuerzo que ha realizado en toda mi formación profesional.

A mis tíos Roberto Carlos Hernández y María Teresa Hernández por todo su amor brindado, por su apoyo cuando yo les he solicitado, brindarme consejos, compartir sus conocimientos y corregirme.

A mi abuela Amalia Hernández García por todo su amor, tal cual fuera mi madre, por su apoyo, consejos y sabiduría transmitida.

Juan Francisco

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme sabiduría e inteligencia para culminar con éxito esta etapa de mi formación académica.

A mi familia por proveerme los elementos necesarios, brindarme su apoyo incondicional y motivarme a culminar mis metas.

A la Universidad de El Salvador, por ser mi alma mater y formarme como ingeniero.

A mi asesore, Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por brindar su apoyo, conocimientos y ayuda durante el trabajo de graduación, en especial a su esfuerzo y deseo por terminar con éxito aún en el transcurso de una pandemia y todas las circunstancias que ésta acarreo después.

Y de manera muy especial a todos nuestros compañeros y amigos que me motivaron y ayudaron a cumplir la finalización de este sueño.

Juan Francisco

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA FORJA EN CALIENTE

Estudiante: Br. Juan Francisco Chacón Navarrete¹
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado una recopilación de información bibliográfica de diferentes fuentes con el fin de presentar el funcionamiento y las partes que constituyen un equipo de forja en caliente para aplicaciones didácticas; así como también las propiedades de los aceros utilizados para el diseño y posible construcción de dicha máquina de forja en caliente tomando en consideración la disposición de estos materiales en el territorio nacional. Posteriormente se propuso una máquina del tipo martillo de caída libre con un sistema de elevación a base de una banda plana de transmisión de poliamida y un sistema de aplicación de tensión mediante un rodillo tensor accionado por cilindros neumáticos. Luego, se realizó el diseño de los diferentes componentes con todas sus respectivas consideraciones en la adecuada selección del material y dimensiones. Luego se detallan los costos de los materiales, las piezas y las herramientas necesarias para realizar su posible construcción a futuro como otro trabajo de graduación. Por último, se presentan los planos de los elementos, subconjuntos y conjunto de la máquina didáctica para forja en caliente.

Palabras claves: Forja, Impacto, y Deformación.

1 E-mail: cn11008@ues.edu.sv

2 E-mail: jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	10
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Definición de conformado, concepto y aplicación.....	2
1.2. Clasificación de los procesos de deformación según las fuerzas involucradas.....	4
1.3. Parámetros generales de la conformación.....	4
1.4. Mecánica del conformado.....	5
1.5. Aceros para trabajo en caliente y sus aplicaciones.....	8
1.6. Aceros al carbono y de baja aleación.....	8
1.7. Aplicaciones.....	11
1.8. Teoría de la forja.....	13
1.9. Concepto de la forja.....	13
1.10. Clasificación de los métodos de forja.....	14
1.11. Parámetros involucrados en la forja libre.....	16
1.12. Tipos de máquinas para la forja.....	20
1.13. Prensas.....	20
1.14. Martillos.....	25
1.15. Componentes principales de una máquina de forja.....	28
2 DISEÑO DE UNA MÁQUINA DIDÁCTICA PARA FORJA EN CALIENTE.....	33
2.1. Tipo de máquina seleccionada para la propuesta de diseño.....	33
2.2. Justificación y determinación de la fuerza de forjado.....	34
2.3. Cálculo de la masa requerida.....	40
2.4. Concepto de la propuesta de diseño.....	41
2.5. Descripción de los elementos principales.....	43
2.6. Diseño de los elementos críticos que conforman la máquina didáctica para forja en caliente.....	59
2.7. Masa.....	59
2.8. Solicitación de carga.....	61
2.9. Selección de banda plana de transmisión.....	63

	Pág.
2.10. Pasadores de apoyo para acoples mecánicos.....	69
2.11. Alzas para pasadores de apoyo.....	73
2.12. Acoples mecánicos.....	77
3. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO.....	82
3.1. Costos del proyecto.....	82
ANEXOS.....	91
ANEXO A: PLANOS DE FABRICACIÓN.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Composiciones de algunos aceros al carbono y de baja aleación [1].....	10
Tabla 1.2. Valores característicos de coeficiente de resistencia K, y del exponente de endurecimiento por deformación, n, [5].....	19
Tabla 2.1. Lista de partes que conforman la plataforma.....	60
Tabla 2.2. Lista de partes que conforman un acople mecánico.....	61
Tabla 2.3. Propiedades del material poliamida utilizado para la fabricación de bandas planas y redondas [7].....	64
Tabla 2.4. Factor de corrección de la polea C_v para bandas planas [7].....	67
Tabla 3.1. Costos de materiales para la fabricación de elementos mecánicos, elementos de transmisión, elementos estructurales y de soporte.....	83
Tabla 3.2. Costos de mano de obra.....	85
Tabla 3.3. Costos indirectos.....	87
Tabla 3.4. Costos extras para fabricación de piezas.....	87
Tabla 3.5. Costos totales de fabricación por tipo de elemento.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Umbrales de plasticidad al aplastamiento (a), para aceros ordinarios con dificultad de forja normal [1].....	9
Fig. 1.2. Proceso de forjado de un disco: a) Materia prima; b) Inicio de forja; c) Final de forja; y d) Pieza forjada [4].....	14
Fig. 1.3. Distintos métodos de forjar: a) forja libre; b) forja en estampa con rebaba; y c) forja en matriz cerrada [1].....	15
Fig. 1.4. Secuencia de un proceso de forjado libre con troquel abierto: a) Inicio del proceso de forja; b) Efecto de abarrilamiento; y c) Fin del proceso de forja [5].....	16
Fig. 1.5. Esfuerzos cortantes en el interior del material [4].....	17
Fig. 1.6. Principio de funcionamiento de las prensas de husillo [1].....	21
Fig. 1.7. Esquema de una prensa mecánica, accionamiento por sistema biela-cigüeñal [1].....	22
Fig. 1.8. Esquema de una prensa de cuña [1].....	23
Fig. 1.9. Esquema de una prensa de rodillera [1].....	24
Fig. 1.10. Esquema del funcionamiento de una prensa hidráulica [1].....	25
Fig. 1.11. Esquema de un martillo de caída libre, con sus partes fundamentales [1].....	26
Fig. 1.12. Esquema de un martillo de doble efecto [1].....	27
Fig. 1.13. Principio de funcionamiento de los martillos de contra golpe [1]..	28
Fig. 1.14. Bastidor en una prensa mecánica.....	29
Fig. 1.15. Troqueles y matrices para el conformado de palancas con martillo de doble efecto [1].....	30
Fig. 1.16. Componentes del sistema de transmisión de una prensa mecánica.....	31
Fig. 2.1. Ductilidad y resistencia a la tracción en función de la temperatura, de un acero al carbono [6].....	36
Fig. 2.2. Diagrama de momentum lineal, antes del impacto.....	38
Fig. 2.3. Diagrama de impulsos durante el choque, hasta la deformación máxima.....	38
Fig. 2.4. Diagrama de momentum lineal, al final del impacto.....	38
Fig. 2.5. Power hammer MP50-MP60 [8].....	40
Fig. 2.6. Sistema para elevación del mazo.....	42

	Pág.
Fig. 2.7. Parte del mazo del sistema-plataforma: a) y b) vistas auxiliares; y c) vista lateral derecha.....	44
Fig. 2.8. Estructura central de la plataforma.....	45
Fig. 2.9. Apoyos de acoples mecánicos en la plataforma.....	45
Fig. 2.10. Estructura de placa de acero al carbono-apoyo para el mazo.....	46
Fig. 2.11. Isométrico y disposición de los rodamientos en la plataforma.....	47
Fig. 2.12. Desmontaje para los pasadores en la plataforma.....	47
Fig. 2.13. Desmontaje para los rodamientos en la plataforma.....	48
Fig. 2.14. Subconjunto plataforma, acoples mecánicos y banda plana de transmisión.....	49
Fig. 2.15. Partes que constituyen el acople mecánico.....	50
Fig. 2.16. Primer paso para el ensamblaje del acople mecánico.....	51
Fig. 2.17. Ajuste del acople mecánico y la banda plana: a) Vista lateral; y b) vista auxiliar.....	52
Fig. 2.18. Tercer paso para el ensamblaje del acople mecánico.....	53
Fig. 2.19. Prisionero como seguro de retención.....	53
Fig. 2.20. Conjunto rodillo.....	54
Fig. 2.21. Dibujo de ensamble del rodillo.....	55
Fig. 2.22. Conjunto rodillo más elevador.....	55
Fig. 2.23. Estructura principal del elevador.....	55
Fig. 2.24. Estructura, guías del elevador.....	56
Fig. 2.25. Perforación en varilla guía del elevador.....	56
Fig. 2.26. Tuerca de ajuste.....	57
Fig. 2.27. Armazón.....	58
Fig. 2.28. Máquina didáctica para forja en caliente.....	58
Fig. 2.29. Estructura guía para el elevador.....	58
Fig. 2.30. Límite superior y límite inferior de la carrera de trabajo.....	58
Fig. 2.31. Diagrama cinético y de cuerpo libre de la masa en elevación.....	62
Fig. 2.32. Ángulo de contacto entre el rodillo impulsor y la banda plana de transmisión.....	63
Fig. 2.33. Diagrama de cuerpo libre para el pasador de apoyo para el acople mecánico superior.....	69
Fig. 2.34. Diagrama de cuerpo libre, pasador de apoyo para acople mecánico inferior.....	72
Fig. 2.35. Diagrama de cuerpo libre, alza para pasador de apoyo, acople mecánico superior.....	73

	Pág.
Fig. 2.36. Diagrama de cuerpo libre, alza para pasador de apoyo, acople mecánico inferior.....	75
Fig. 2.37. Diagrama de cuerpo libre, placa de apoyo, acople mecánico superior.....	77
Fig. 2.38. Diagrama de cuerpo libre, placa de apoyo, acople mecánico inferior.....	79

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- a : Aceleración
- A : Área de sección transversal
- b : Ancho de banda plana
- c : Radio de pasador
- C_p : Factor de corrección de polea
- C_v : Factor de corrección de velocidad
- d : Diámetro de polea impulsora
- f : Coeficiente de fricción entre banda plana y polea
- F : Fuerza
- F_a : Tensión permitida recomendada por banda plana
- F_c : Fuerza centrífuga
- F_i : Tensión inicial, pretensión
- $(F_1)_a$: Tensión máxima permisible en bandas planas
- F_2 : Fuerza en el lado holgado banda plana
- g : Gravedad
- h : Altura
- I : Momento de inercia
- K_f : Factor de forma de forjado
- m : Masa
- M : Momento flector
- n : Factor de seguridad
- R : Fuerza de reacción
- S_e : Límite de resistencia a la fatiga
- S_{ut} : Esfuerzo último a la tracción
- t : Tiempo instantáneo, espesor de banda plana
- T : Energía cinética, par de torsión
- V : Energía potencial gravitatoria
- w : Peso específico por 1 pie de banda plana
- W_d : Trabajo de deformación

W_f : Trabajo total necesario para vencer las fuerzas de fricción entre la pieza de trabajo y la herramienta

W_r : Trabajo por deformación interna en el material

x : Desplazamiento

Y_f : Esfuerzo de fluencia para una deformación determinada

Δt : Lapso

ϵ_1 : Deformación por tracción

ϵ_2 : Deformación por compresión

η : Rendimiento o eficiencia

θ : Ángulo de contacto entre banda plana y polea

μ : Coeficiente de fricción entre la herramienta de trabajo y la herramienta

v : Velocidad

v_G : Velocidad del centro de gravedad

σ : Esfuerzo de flexión

σ_a : Componente de amplitud del esfuerzo de flexión

σ_m : Componente media del esfuerzo de flexión

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo de flexión

τ : Esfuerzo cortante

τ_a : Componente de amplitud del esfuerzo cortante

τ_m : Componente media del esfuerzo cortante

$\tau_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo cortante

INTRODUCCIÓN

El proceso de conformado de materiales abarca dos grandes áreas relacionadas con la metalurgia. El trabajo en frío y en caliente, así el trabajo en frío genera un endurecimiento en el metal, a consecuencia de la deformación plástica que experimenta, las dislocaciones en el metal se multiplican y es por esta razón que se produce el endurecimiento del metal a conformar, el trabajo en frío requiere que el material sea dúctil para su aplicación, es por esto que los materiales metálicos son los más utilizados en esta área, dejando de lado a los materiales frágiles, como fundiciones y cerámicos.

El trabajo en caliente consiste en la deformación plástica del metal de trabajo, pero este debe experimentar una temperatura mayor que su temperatura de recristalización, por esta razón el metal experimenta recristalización dinámica a través del proceso y de esta manera se consigue mantener la ductilidad del metal durante el proceso de deformación consiguiendo una gran capacidad de deformación.

Controlando los parámetros característicos de las dos áreas antes citadas, se puede dar paso a la fabricación de elementos y piezas funcionales y con las propiedades mecánicas deseadas para la aplicación que fueron pensadas, claro sin dejar de lado otros procesos complementarios para garantizar dichas propiedades mecánicas, como los tratamientos térmicos.

1. MARCO TEÓRICO

El proceso de forja en los metales ha sido utilizado en distintas áreas de la ingeniería a lo largo de la historia, por lo que la distinción de las diferentes temáticas que abarca este proceso es de vital importancia. En este marco teórico se abordan ciertos apartados tales como un breve contexto histórico del desarrollo de los diferentes diseños de las máquinas para forja en caliente, así como también una definición tanto general como específica del proceso de forja en caliente. De manera particular, se definen las máquinas para forja en caliente, donde se presentan los distintos arreglos que puede tener este tipo de máquinas, de igual manera, los elementos varios en cuanto a transmisión y ejecución del proceso de forja, proporcionando una breve descripción de los que son considerados más críticos dentro del funcionamiento de la máquina.

1.1. DEFINICIÓN DE CONFORMADO, CONCEPTO Y APLICACIÓN

Algunos metales tienen una característica que para el conformado de materiales con fines de producción de elementos mecánicos o piezas que es muy beneficioso, la cual es la facilidad con la que se les puede otorgar una forma útil con propiedades mecánicas específicas, lo cual es posible debido a la ductilidad que dichos materiales poseen, que es la capacidad de experimentar algún grado de deformación antes de llegar a experimentar falla.

En todos los casos de deformación plástica es necesario aplicar una sollicitación o carga suficiente para que, una vez transmitidos a los materiales a través de los utillajes apropiados, permitan sobrepasar el límite de fluencia del material, y se inicie el flujo plástico del material que conforme el producto deseado. En consecuencia, son los factores que afectan a la fluencia del material los que principalmente se tienen que tener en consideración para poder definir la aptitud a la deformación de un material en cada caso concreto [1].

El límite de fluencia disminuye a medida que aumenta la temperatura. Esto es así ya que al aumentar la temperatura se agrega energía suplementaria para que los átomos del material sólido que se encuentran vibrando alrededor de sus posiciones de equilibrio en las celdas cristalinas de los granos, esto hace que los átomos aumenten su amplitud de vibración y son arrancados de estas posiciones para luego tener la libertad para deambular libremente en la masa del sólido, modificando los granos de material originales.

Es de vital importancia tener en consideración el estado de esfuerzos que se generan sobre el material, para determinar el grado de deformación que se puede obtener en el proceso al cual es sometido, para ello se puntualizan las observaciones siguientes [2]:

- a) Si la pieza se somete a cargas compresivas y el índice de esbeltez es grande, el modelado está limitado por el pandeo plástico. Esto produce como resultado deformaciones relativamente pequeñas.
- b) Si las cargas son principalmente de tracción, el límite de modelado está dado por la condición de estricción para evitar la fractura del material.
- c) Si la carga se aplica de forma tal que no se produce pandeo ni estricción, como en la torsión de una barra sólida, el límite de modelado está dado por la fractura, y la deformación alcanzable, generalmente es apreciablemente mayor que en los dos casos anteriores.
- d) Si la carga se aplica de forma tal que no se produce pandeo ni estricción, y las operaciones se realizan bajo cargas de compresión biaxiales o triaxiales, se retarda la fractura, y la deformación que es posible alcanzar será muy grande.
- e) Si el proceso de modelado indicado anteriormente se realiza a una temperatura superior a la de recristalización, las deformaciones alcanzarán valores muy altos.

Muchas operaciones de conformado involucran cargas multiaxiales y los límites de modelado debidos a pandeo (en compresión), estricción (en tracción) o fractura (en torsión) no se pueden determinan fácilmente, por ello se debe considerar el efecto independiente de los diferentes tipos de carga.

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE DEFORMACIÓN SEGÚN LAS FUERZAS INVOLUCRADAS

Son muchos los procesos por deformación plástica con los cuales se disponen, particulares para cada interés y quizás hasta para cada región del mundo, estos se pueden clasificar de una forma más conveniente según la naturaleza de la fuerza involucrada, tal clasificación se puede describir de la manera siguiente [3]:

- a) Proceso de compresión directa, como la forja y la laminación.
- b) Procesos de compresión indirecta, el estirado de tubos y alambre, la extrusión y embutido profundo de copa son algunos ejemplos. Generalmente en estos procesos se aplican cargas de tracción, pero se generan fuerzas de compresión entre la pieza y la matriz.
- c) Proceso de tracción, el ejemplo más claro es el proceso de estirado, donde el material se adapta al contorno de una matriz.
- d) Proceso de plegado o flexión. y
- e) Proceso de cizallamiento.

1.3. PARÁMETROS GENERALES DE LA CONFORMACIÓN

A continuación, se describen los parámetros más importantes y de mayor influencia para la ejecución de cualquier proceso de conformación, ninguno de ellos se puede dejar de lado ya que en conjunto son determinantes para la calidad y el cumplimiento de las condiciones requeridas del producto final, estos parámetros son [3]:

- a) Temperatura: En el trabajo en frío por las condiciones de temperatura a las que se realiza no existe la recristalización del material durante el proceso de conformado, por lo que no se elimina el endurecimiento causado por el movimiento y multiplicación de las dislocaciones en el material. Por lo tanto, el grado de deformación que se puede obtener con el trabajo en frío sin producir fractura es mucho menor al que se logra con el trabajo en caliente,

ya que con este último se trabaja a temperaturas mayores a la de recristalización, si existe dicho efecto en el material durante el proceso.

- b) Velocidad de deformación: El efecto que la velocidad de deformación tiene se refleja en el fenómeno de la temperatura de transición de la condición de dúctil a frágil del material, el cual se hace más notorio cuando las velocidades de deformaciones son grandes. Ciertos metales pueden sufrir fractura a una temperatura determinada si se le aplica una carga a una velocidad demasiado elevada o aun en condiciones de choque.
- c) Micro estructura: En los metales puros la facilidad para el trabajo mecánico disminuye a medida que la temperatura de fusión sea más elevado. Ya que la temperatura del inicio de recristalización es aproximadamente proporcional a la de la temperatura de fusión, la temperatura mínima de trabajo en caliente también aumentará con una temperatura de fusión elevado. La adición de elementos de aleación eleva el esfuerzo de fluencia cuando estos forman solución sólida con la matriz haciendo que las cargas de conformación aumenten proporcionadamente.
- d) Fricción y lubricación: Las fuerzas de fricción generadas durante el contacto entre la pieza de trabajo y la herramienta constituyen uno de los factores más inciertos en el análisis de las operaciones de conformación. Diversos métodos de lubricación se emplean para disminuir en todo lo posible dichas fuerzas de fricción. En realidad, la selección del lubricante adecuado acorde al proceso de conformado que se esté aplicando determina el éxito o el fracaso de la operación.

1.4. MECÁNICA DEL CONFORMADO

La teoría de plasticidad es la encargada del análisis mecánico, y todos los avances que se han desarrollado a lo largo de la historia científica han demostrado que el criterio de fluencia de von Mises o de la energía de distorsión es el que otorga resultados que se encuentran más de acuerdo con los datos

obtenidos de forma experimental, dicho criterio se expresa mediante la Ec. 1.1 [3].

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2 \quad (1.1)$$

Esta relación es comúnmente utilizada para la mayoría de los análisis de los procesos de conformación. En la conformación de metales se expresan las deformaciones y fuerzas en términos de deformaciones y fuerzas naturales o reales, ya que durante cada proceso se generan grandes deformaciones. Asumiendo una constancia de volumen durante la deformación se pueden utilizar la Ec. 1.2:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (1.2)$$

Para deformaciones de tracción o compresión equivalentes se producen endurecimientos por deformación equivalentes, para una deformación por tracción (ϵ_1), igual a una deformación por compresión (ϵ_2), y de la constancia de volumen se obtiene la Ec. 1.3:

$$\frac{h_0 - h_f}{h_0} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (1.3)$$

Así, la Ec. 1.3 se presenta que para deformaciones iguales la reducción de la sección transversal se puede igualar a la reducción de altura o de espesor. Dentro de la teoría de plasticidad también se asume que en cualquier instante del proceso de deformación las condiciones geométricas de las velocidades de deformación serán coaxiales con los esfuerzos, es decir que tanto los esfuerzos como las deformaciones se asumen coaxiales o paralelas. En cuanto al trabajo necesario para producir deformación plástica éste consta de componentes de trabajo parciales, las cuales son:

1) Trabajo de deformación (W_d): Es el trabajo necesario para que todo el

volumen pase de una sección inicial a otra final asumiendo una deformación uniforme, es la energía mínima que se debe consumir para llevar a cabo un proceso en particular de conformación;

- 2) Trabajo superfluo (W_r): Es el trabajo relacionado con la deformación interna que se produce en el material, el cual no contribuye con el cambio de forma como se hace en el trabajo de deformación; y
- 3) Trabajo de fricción (W_f): Es la parte del trabajo total que se consume para vencer las fuerzas de fricción que se desarrollan entre la pieza de trabajo y la herramienta.

Entonces el trabajo total se puede expresar mediante la Ec. 1.4, como la suma de estas tres componentes, así:

$$W_T = W_f + W_r + W_d \quad (1.4)$$

Suponiendo que el metal es un material plástico ideal que obedece al criterio de deformación de Levy von Mises y para el caso de deformación proporcional se puede obtener el trabajo total ideal por unidad de volumen como se expresa en la Ec. 1.5, así:

$$W_d = \int dW_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 (\epsilon_1^2 + \epsilon_1 \epsilon_2 + \epsilon_2^2)^{1/2} \quad (1.5)$$

Asimismo, el rendimiento o eficiencia de un proceso de conformación se expresa mediante la Ec. 1.6:

$$\eta = \frac{W_d}{W_T} \quad (1.6)$$

1.5. ACEROS PARA TRABAJO EN CALIENTE Y SUS APLICACIONES

Los aceros, debido a sus magníficas propiedades mecánicas, son los materiales más utilizados en la fabricación de piezas forjadas y de productos laminados, por lo que se han diseñado una gran variedad de máquinas y demás medios industriales para conseguir la forja y laminación en caliente de aceros. Clasificaremos los aceros en tres grandes grupos según los constituyentes de su aleación [1], de la siguiente manera:

- 1) Aceros al carbono y de baja aleación,
- 2) Aceros inoxidable, y
- 3) Aceros refractarios y de muy alta aleación.

Tomando en consideración el tamaño didáctico que se plantea para este trabajo de diseño, solamente es de interés el grupo de materiales que comprenden los aceros al carbono y aceros de baja aleación, en específico, los que representan la menor dificultad para poder aplicar el proceso de forja.

1.6. ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN

Los grupos de aceros tanto de construcción, de cementación, de nitruración y de fácil mecanización, como también los específicos de válvulas, de muelles, para rodamientos, y de igual forma los utilizados en la fabricación de piezas para equipos mecánicos, de automoción, aeronáuticos, de ferrocarril, los cuales engloban aceros al carbono y aceros de baja aleación. Estos materiales tienen un comportamiento muy parecido para su forja y a su laminación.

Es importante disponer de las curvas de los ensayos de compresión axial de cilindros, también denominados ensayos de compresión axial simétrica que indican para distintas temperaturas las presiones necesarias para el inicio de la fluencia en el plano medio de los cilindros de prueba en función del coeficiente $K = h/D$. Para estos grupos de aceros, que a veces se denominan aceros ordinarios.

Las curvas obtenidas se presentan en la Fig. 1.1. A los valores dados por estas curvas se les suele denominar umbrales de plasticidad al aplastamiento y se les designa con la letra a [1].

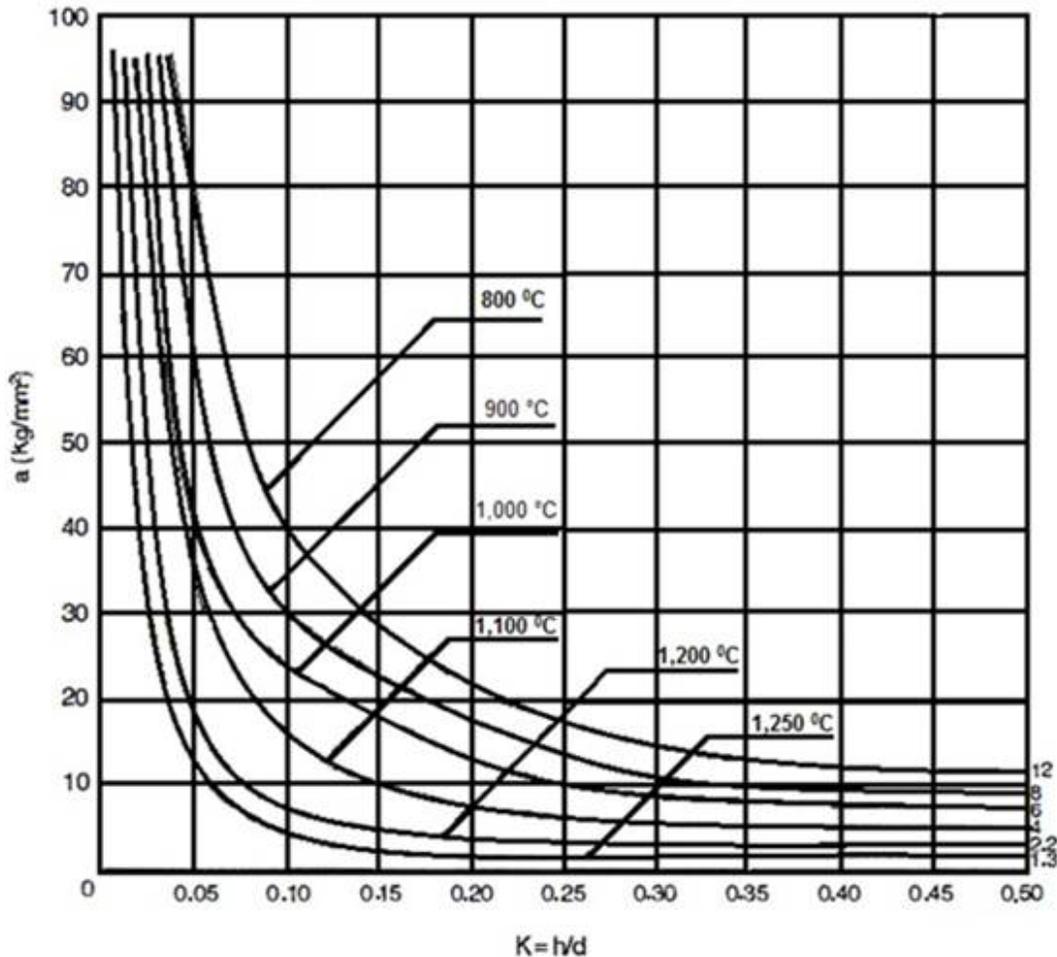


Fig. 1.1. Umbrales de plasticidad al aplastamiento (a), para aceros ordinarios con dificultad de forja normal [1].

Las temperaturas de forja normales de este tipo de aceros se encuentran entre los 1,000 y 1,250 °C, conviene comenzar el proceso de forjado a estas temperaturas, que son las máximas deseables admitidas por el material y terminar el proceso antes de alcanzar los 1,000 °C [1].

Estos aceros también se pueden forjar en frío, pero solamente ciertas calidades de poca o nula aleación y de bajo contenido en carbono y para algunos tipos específicos de deformación.

A continuación, se plantea una clasificación de estos materiales según la dificultad que representa deformarlos, en general a mayor contenido de carbono y a mayor aleación, mayor dificultad para deformar en caliente el material [1], esta es:

1) Dificultad de forja normal:

$$C < 0.65\%; \text{ y } Mn + Ni + Cr + Mo + V + W < 5\%$$

2) Dificultad de forja superior:

$$C > 0.65\%; \text{ o } Mn + Ni + Cr + Mo + V + W > 5\%$$

Los aceros de dificultad normal se refieren a las curvas en la Fig. 1.1, los umbrales de plasticidad para los aceros de dificultad superior son un 30% superiores que los correspondientes de la Fig. 1.1, dependiendo de la cantidad de aleación. En la Tabla 1.1 se presenta algunas de las composiciones de estos tipos de aceros, denominados según normas españolas UNE, el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) que dan lugar a la denominación AISI/SAE, recogida a su vez por la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM) designación A 653 [1].

Tabla 1.1. Composiciones de algunos aceros al carbono y de baja aleación [1].

Denominación	Composición química, %								
	C	Mn	Si	P _{máx}	S _{máx}	Cr	Ni	Mo	Otros
F-1110	0.15	0.60	0.30	0.035	0.035	-	-	-	Al = 1
F-1120 (AISI 1020)	0.20	0.60	-	0.035	0.035	-	-	-	
F-1140	0.45	0.60	0.30	0.035	0.035	-	-	-	
F-1150	0.55	0.75	0.30	0.035	0.035	-	-	-	
F-1200	0.38	0.75	0.30	0.035	0.035	0.65	-	-	
F-1203	0.36	1.50	0.30	0.035	0.035	-	-	-	
F-1250	0.35	0.75	0.30	0.035	0.035	1.00	-	0.20	
F-1260	0.32	0.45	0.30	0.035	0.035	1.25	4.00	0.35	
F-1272 (AISI 4340)	0.40	0.75	0.30	0.035	0.035	0.75	1.80	0.20	
F-1280	0.35	0.75	0.30	0.035	0.035	0.75	0.85	0.20	
F-1711	0.25	0.50	0.30	0.035	0.035	3.00	-	0.50	
F-1740	0.60	0.60	0.35	0.035	0.035	1.65	-	0.35	

1.7. APLICACIONES

Como es bien conocido, los aceros son aplicados ampliamente en el conformado de piezas y elementos de máquinas, y para tener una idea de su clasificación por uso se puede agruparlos de la siguiente manera [1].

- 1) Los del grupo de temple y revenido, se usan para la fabricación de piezas para máquinas y motores, en automóviles y en aviación, como bielas, cigüeñales, ejes, palancas, transmisiones, rótulas, crucetas. Que precisan resistir altas sollicitaciones y, por lo tanto, necesitan altas resistencias mecánicas. Son aceros con contenidos de carbono entre 0.30 y 0.40% y con contenidos pequeños y variables (suma de elementos de aleación menor del 5%) de cromo, níquel y/o molibdeno.
- 2) Para los mismos usos, pero si las piezas además han de estar sometidas a grandes esfuerzos de rozamiento o a grandes abrasiones como engranajes, ejes, bulones, piñones, satélites, planetarios se utilizan los denominados aceros de cementación o de nitruración, ya que admiten perfectamente estos tratamientos superficiales que endurecen enormemente las superficies que han de rozar. Son aceros con contenidos de carbono de 0.1 a 0.8% en el caso de los aceros para cementación y de 0.30 a 0.40% los de nitruración, y con contenidos pequeños y variables, no superiores al 5% en total de cromo, níquel y/o molibdeno, e incluso con vanadio y aluminio.
- 3) Para la fabricación de piezas que han de estar sometidas a grandes esfuerzos de flexión, torsión o fatiga, como ballestas, muelles, elementos de sujeción de vías de ferrocarril y resortes, se usan aceros con contenidos de carbono de entre 0.45 a 0.65%, denominados genéricamente de muelles y con alto contenido en silicio (alrededor del 1.75%) que eleva mucho su límite elástico.
- 4) Si las piezas a fabricar no requieren altas resistencias mecánicas, como ciertos perfiles para la construcción de edificios u obra civil, redondos de hormigón. Suele ser suficiente la utilización de aceros de bajo contenido en carbono y sin aleación también conocidos como hierros comerciales.

- 5) Cuando se precisan piezas sin demasiadas exigencias de resistencia mecánica, pero de más calidad que el grupo anterior, se recurre a la utilización de los denominados aceros finos al carbono, elaborados al horno eléctrico con control de impurezas y segregaciones, con fósforo y azufre bajos <0.030%. Tienen contenidos en carbono entre 0.30% a 0.55% y con manganeso controlado, alrededor de 0.65%.
- 6) Para piezas que se fabrican en grandes series por arranque de viruta, que luego no tendrán una gran responsabilidad, se utilizan aceros de fácil maquinabilidad, que tienen contenidos de carbono no superiores al 0.09% y con adiciones de azufre, plomo, telurio, o selenio, que son los elementos que, en pequeñas cantidades, le confieren esa propiedad.
- 7) Cuando las piezas han de ser fabricadas en grandes series, pero no por arranque de viruta, sino por deformación en frío tornillos, tuercas, arandelas, remaches, pernos, bulones, etc. con resistencias de utilización desde 40 hasta 110 kg/mm, se usan aceros denominados de deformación en frío, con contenidos en carbono entre 0.35 a 0.45% y con pequeña aleación. Estos aceros son al cromo, al cromo-boro, al manganeso, al cromo-molibdeno, y al cromo-níquel-molibdeno.
- 8) Para determinadas aplicaciones muy específicas se fabrican aceros de composiciones especiales, como, por ejemplo, los que se usan en la fabricación de resistencias eléctricas, que soportan bien hasta los 300 °C (C < 0.15%, Cr = 13%, Al = 3.3%); los que se utilizan en aparatos y máquinas eléctricas por su alta permeabilidad magnética (hierro casi puro: C <0.02 % y sin aleación), los que se usan para aplicaciones criogénicas, es decir, para su utilización en muy bajas temperaturas (hasta -200 °C), que tienen un contenido en carbono menor que 0.10% y un contenido del 9% en níquel.
- 9) El un grupo de aceros de herramientas, cuyo uso va dirigido a la fabricación de herramientas para la deformación en frío (punzones, cortantes, matrices, cilindros de laminación en frío, etc) con altos contenidos en carbono (C= 1 a 2.2%) y cromo (Cr = 12%) y con algo de molibdeno y vanadio, para la deformación en caliente (moldes para la industria de inyección de plásticos,

o para troqueles de forja, para troqueles de extrusión e inyección de metales, etc.) con contenidos de carbono de 0.30 a 0.60% y aleación de cromo, níquel, molibdeno y vanadio, o aceros rápidos para herramientas de corte para las máquinas herramientas con arranque de viruta (cuchillas, fresas, brocas, etc.) con contenidos en carbono entre 0.75 y 1.25% y aleados con altos contenidos de cromo, molibdeno, vanadio, tungsteno y cobalto. Las limas se fabrican en aceros extra duros, con más del 1% de C.

1.8. TEORÍA DE LA FORJA

El proceso de forjado se remonta a los primeros registros escritos de la raza humana, hace ~7000 años. Así, Se ha encontrado evidencias de que el forjado era usado en el antiguo Egipto, Grecia, Persia, India, China y Japón para hacer armas, joyería y otros implementos. En esos tiempos, a los artesanos en el arte de la forja se les tenía en alta estima. En la antigua Creta se usaban placas de piedra labrada como troqueles de impresión en el martillado del oro y la plata, alrededor de 1600 a. de C. Esto evolucionó a la fabricación de monedas por un proceso similar hacia el año 800 a. de C. En Roma se usaron troqueles de impresión más complicados por el año 200 d. de C. El trabajo de la herrería permaneció relativamente sin cambios hasta que se introdujo el martinete de forja con pistón guiado a fines del siglo XVIII Este desarrollo trajo la práctica de la forja a la era industrial [5].

1.9. CONCEPTO DE LA FORJA

El proceso de la forja consiste en la conformación de piezas mediante la aplicación de fuerzas de compresión unidireccionales por presiones realizadas con prensas hidráulicas, o por la energía descargada en los golpes proporcionados por máquinas de impacto o martillo [4].

El método más antiguo es la forja libre del clásico herrero que martillea la pieza a temperatura de fluencia sobre el yunque. El yunque es una pieza colada de gran peso de acero, simulando una mesa plana. Dispone de dos salientes: uno cónico para producir curvas de diferentes radios y otro piramidal para reproducir polígonos y un agujero cuadrado sobre la mesa, para acomodar varias herramientas del yunque. En la Fig. 1.2 se presenta el esquema del proceso de forjado de un disco.

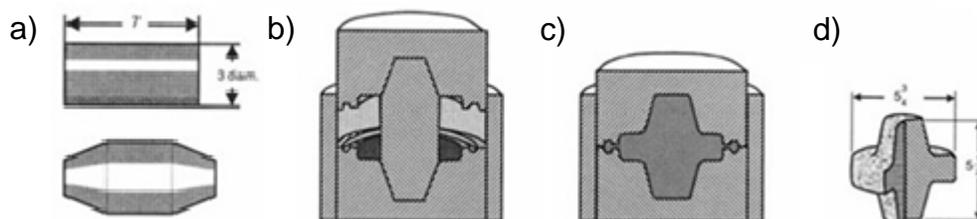


Fig. 1.2. Proceso de forjado de un disco: a) Materia prima; b) Inicio de forja; c) Final de forja; y d) Pieza forjada [4].

1.10. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE FORJA

Una primera clasificación de los métodos de forja se presenta a continuación [1]:

- 1) Forja libre,
- 2) Forja con estampa,
- 3) Forja con rebaba, y
- 4) Forja con matriz cerrada.

En la Fig. 1.3 se presenta esquemas de las clasificaciones anteriores.

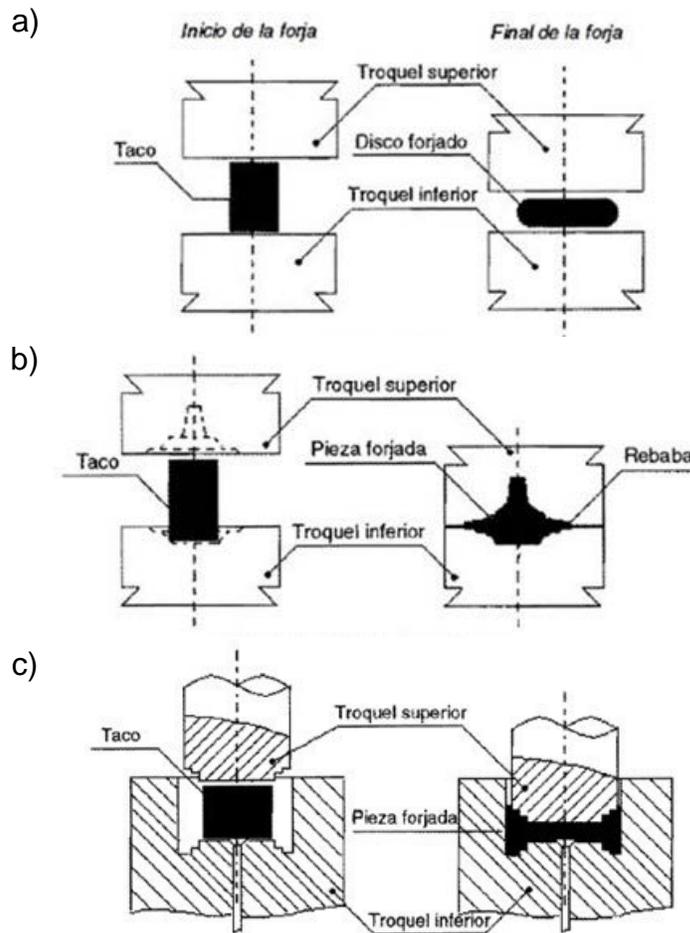


Fig. 1.3. Distintos métodos de forjar: a) Forja libre; b) forja en estampa con rebaba; y c) forja en matriz cerrada [1].

La forja es un proceso que puede ser realizado con los materiales a deformar a muy distintas temperaturas. En ocasiones es posible la deformación a temperatura ambiente, bien porque el material posea suficiente deformabilidad a esta temperatura o bien porque el medio que aplica la sollicitación necesaria tenga una potencia apropiada. En otras ocasiones es suficiente mejorar la deformabilidad calentando a bajas temperaturas, que no modifiquen la constitución interna de los materiales, para que estos se adapten bien al medio sollicitador empleado. Sin embargo, en otras muchas ocasiones, resulta absolutamente necesario alcanzar elevadas temperaturas en los materiales para conseguir adaptarlos a la geometría final deseada. Desde este punto de vista, la forja se puede clasificar también de las maneras siguientes:

- 1) En frío,
- 2) A media temperatura, y
- 3) En caliente.

Tomando nuevamente en consideración el tamaño didáctico de este trabajo, es importante recalcar que dicha propuesta está encaminada a una máquina para la forja libre en caliente.

1.11. PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN LA FORJA LIBRE

Como en todo proceso, el control de los parámetros es vital para la obtención de un buen producto. Así, el control de estos permite obtener las propiedades y características deseadas en el producto final de la forja, entre los parámetros involucrados más importantes se tienen [5]:

- Fuerza de forjado

El caso de forjado en troquel abierto consiste en comprimir una pieza de sección cilíndrica entre dos troqueles planos esta operación reduce la altura de trabajo e incrementa el diámetro, como se presenta en la Fig. 1.4 [5].

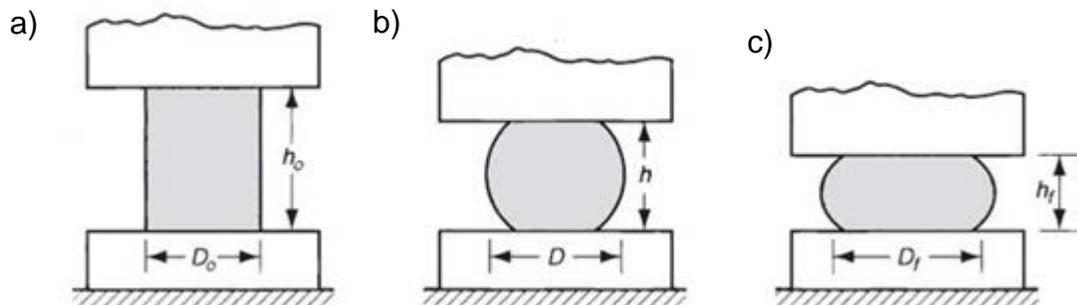


Fig. 1.4. Secuencia de un proceso de forjado libre con troquel abierto: a) Inicio del proceso de forja; b) Efecto de abarrilamiento; y c) Fin del proceso de forja [5].

Se puede estimar la fuerza necesaria para realizar el rebaje de material por golpe por medio de la Ec. 1.7, así:

$$F = Y_f A \quad (1.7)$$

donde: F es la fuerza de trabajo para el forjado,

Y_f es el esfuerzo de fluencia para la deformación dada, y

A es el área de contacto entre la pieza y el troquel.

El área (A) se incrementa continuamente al reducir la altura durante la operación.

En el caso específico de este trabajo, el equipo didáctico para forja libre realizará en caliente el trabajo; por lo tanto, se puede considerar al material totalmente plástico en ese momento y el esfuerzo de fluencia alcanzará el valor de la resistencia de fluencia del material, y esto se representa mediante la Ec. 1.8, así [5]:

$$Y_f = Y \quad (1.8)$$

El esfuerzo de fluencia Y_f se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal es perfectamente plástico.

- Coeficiente de fricción

Siempre que exista contacto entre superficies existe una fuerza de fricción asociada, en el proceso de forjado este contacto se encuentra presente entre el material de trabajo y ambos troqueles, durante el impacto el material en contacto con los troqueles se adhiere a la superficie de estos, perdiendo movimiento y permitiendo los deslizamientos por esfuerzos cortantes de los planos más interiores de material, tal como se presenta en la Fig. 1.5.

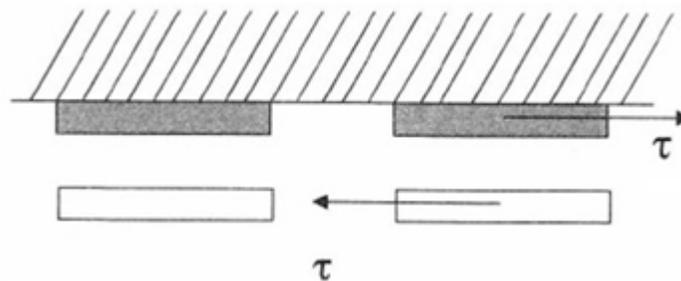


Fig. 1.5. Esfuerzos cortantes en el interior del material [4].

Debido a que la fricción se opone al flujo de metal en la superficie de los troqueles, esto crea un efecto de abultamiento en forma de barril, llamado abarrilamiento [5]. Esto se puede observar en la secuencia que se presenta en la Fig. 1.4.

Cuando se realiza un trabajo en caliente con troqueles fríos, el abarrilamiento es más pronunciado. Esto se debe a un coeficiente de fricción más alto, típico del trabajo en caliente, y a la transferencia de calor en la superficie del troquel y sus cercanías, lo cual enfría el metal y aumenta su resistencia a la deformación. El metal más caliente se encuentra en medio de la pieza y fluye más fácilmente que el material más frío de los extremos. El efecto se acentúa al aumentar la relación entre el diámetro y la altura a rebajar en la pieza, debido a la mayor área de contacto en la interfaz de los troqueles y el material de trabajo. Todos estos factores originan que la fuerza de forjado sea más grande que la proporcionada por la Ec. 1.7.

Dado lo anterior se aplica un factor de forma a la Ec. 1.7 para aproximar los efectos de la relación D/h y la fricción, lo cual se expresa en la Ec. 1.9 [5]:

$$F = K_f Y_f A \quad (1.9)$$

donde: K_f es el factor de forma del forjado, definido por la Ec. 1.10 [5]:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h} \quad (1.10)$$

donde: μ es el coeficiente de fricción,

D es el diámetro de la pieza de trabajo o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie de troquel, y

h es la altura a rebajar de la pieza.

- Temperatura de trabajo

Cuando la mayoría de los metales se deforma a temperatura ambiente, aumentan su resistencia debido al endurecimiento por deformación. El esfuerzo

requerido para continuar la deformación se debe incrementar para contrarrestar este incremento de la resistencia. El esfuerzo de fluencia se define como el valor instantáneo del esfuerzo requerido para continuar la deformación del material o mantener fluyendo al metal. Ésta es la resistencia de fluencia del metal en función de la deformación, que se puede expresar mediante la Ec. 1.11 [5]:

$$Y_f = K\epsilon^n \quad (1.11)$$

donde: μ es la deformación real que experimenta el material,

K es el coeficiente de resistencia, y

n es el exponente de endurecimiento por deformación.

Los valores típicos de K y n para diferentes metales a temperatura ambiente se presentan en la Tabla 1.2.

Tabla. 1.2. Valores característicos de coeficiente de resistencia K , y del exponente de endurecimiento por deformación, n , [5].

Material	Coeficiente de resistencia, k		Exponente de endurecimiento por deformación, n
	MPa	lb/pulg ²	
Aluminio puro, recocido	174	25000	0.20
Aleación de aluminio, templada	240	35000	0.15
Aleación de aluminio, tratada térmicamente	400	60000	0.10
Cobre puro, templado	300	45000	0.50
Cobre aleación: latón	700	100000	0.35
Acero bajo contenido de C, templado	500	75000	0.25
Acero alto contenido de C, templado	850	125000	0.15
Acero, aleación, templado	700	100000	0.15
Acero inoxidable, autentico, templado	1200	175000	0.40

El esfuerzo de fluencia Y_f se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal es perfectamente plástico, como en el trabajo en caliente, en este caso, el exponente de endurecimiento por deformación es igual a cero, y el esfuerzo de fluencia Y_f iguala a la resistencia de fluencia del metal Y , como se presentó en la sección 1.11.

1.12. TIPOS DE MÁQUINAS PARA LA FORJA

En la siguiente sección se presenta una clasificación de las máquinas utilizadas para el proceso de forja, los modernos procesos de forjado emplean martinetes, máquinas de tornillos y prensas para aplicar la fuerza necesaria, una máquina de este tipo consiste básicamente de una masa que se deja caer o es impulsada hacia abajo sobre el material de trabajo, y una mesa o yunque en donde se coloca dicho material, una prensa entrega la fuerza de trabajo de forma constante y uniforme, mientras que un martillo lo hace debido a la energía liberada en un choque entre dos cuerpos.

Se puede hacer una primera clasificación de las máquinas principales para forja en dos grandes grupos [1]:

- 1) Prensas, y
- 2) Martillos

1.13. PRENSAS

Las prensas a su vez, pueden ser clasificadas por su forma de accionamiento [1]:

- Prensa de husillo

Su funcionamiento se basa en el principio tornillo - tuerca. Si la tuerca permanece fija al girar el tornillo, éste se desliza subiendo o bajando, según el giro se produzca en un sentido o en el sentido contrario. Si es el tornillo el que gira, pero permanece fijo en el espacio, y se hace que la tuerca no gire sujetándola lateralmente con unas deslizaderas apropiadas, será esta última la que suba o baje, según sea el sentido de giro que se imprima al tornillo [1]. Las prensas más usadas son las de tuerca fija y tornillo móvil, en la Fig. 1.6 se presenta estos dos tipos de prensas de husillo.

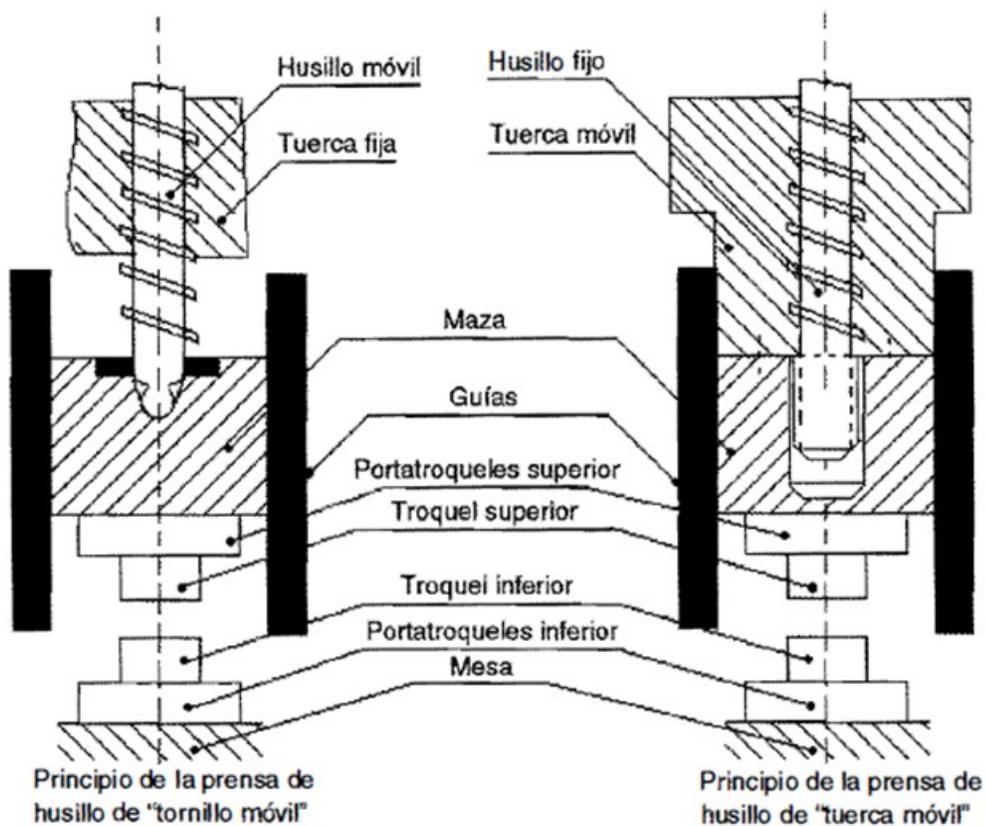


Fig. 1.6. Principio de funcionamiento de las prensas de husillo [1].

- Prensas mecánicas

Estas máquinas se basan en el principio biela-cigüeñal. Al girar el cigüeñal arrastra a la biela, cuyo pie está unido a la masa de la prensa que, a ser guiada por deslizaderas apropiadas realiza, en una vuelta del cigüeñal, el movimiento completo de subida y bajada, Unido al cigüeñal se sitúa un volante de inercia, que acumula la energía necesaria para el trabajo que se le exigirá a la prensa. Cuando la máquina está desembragada, el motor actúa directamente sobre el volante acumulando energía. Al embragar, el volante se acopla al cigüeñal que gira una vuelta completa, arrastrando a la biela y con ella a la masa y generando la sollicitación necesaria para la deformación plástica del trozo de material situado entre los troqueles. Al finalizar la vuelta completa de cigüeñal actúa el freno, fijando el cigüeñal en Su punto muerto superior y desacoplando el volante de inercia, con lo que la prensa queda dispuesta para volver a realizar el ciclo dando

el siguiente golpe [1]. A continuación, en la Fig. 1.7 se presenta una prensa de este tipo.

- Prensas de cuña

Son prensas verticales mecánicas que se basan en intercalar, entre el bastidor de la máquina y la masa, una cuña horizontal accionada por un mecanismo de biela-cigüeñal. Esta disposición consigue una unión directa y rígida sobre una gran superficie de contacto y con una menor deformación elástica del conjunto de la prensa [1]. En la Fig. 1.8 se presenta un esquema del funcionamiento de este tipo de prensas.

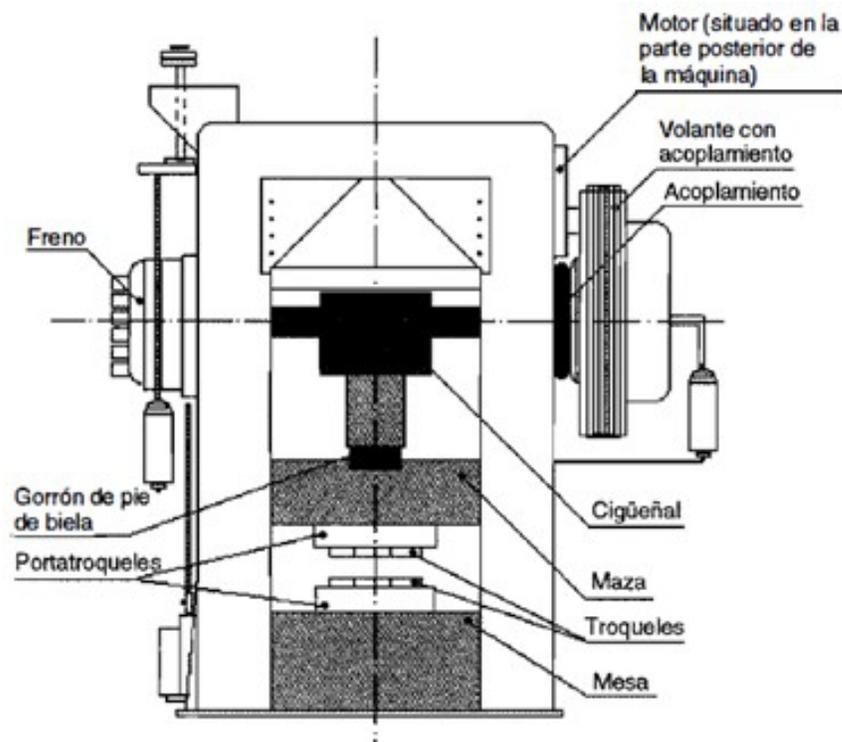


Fig. 1.7. Esquema de una prensa mecánica, accionamiento por sistema biela-cigüeñal [1].

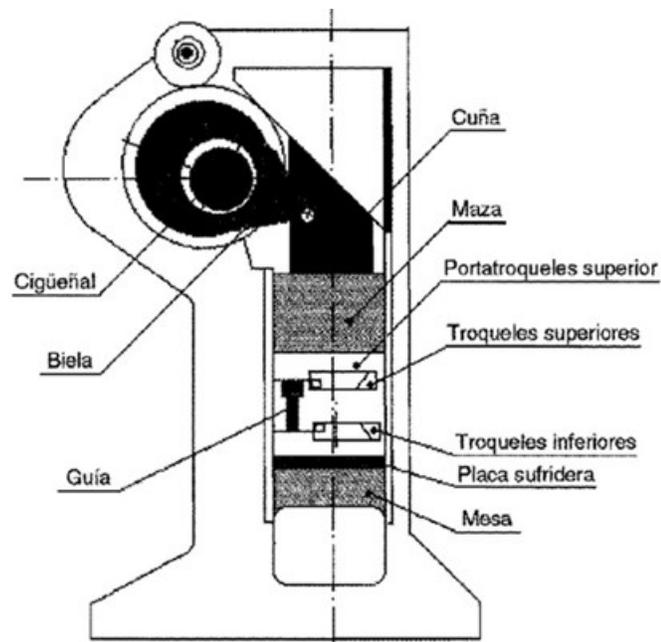


Fig. 1.8. Esquema de una prensa de cuña [1].

- Prensas de rodillera

Son prensas verticales mecánicas cuyo funcionamiento consiste en un mecanismo de rótulas que tiene fija la rótula superior y unida a la masa la inferior. Un dispositivo de cigüeñal-biela desplaza horizontalmente la articulación intermedia, y ésta en su movimiento origina el desplazamiento vertical del mazo. Se consigue así una gran rigidez, poca deformación elástica del bastidor, y gran superficie de apoyo [1]. En la Fig. 1.9 se presenta un esquema de funcionamiento de este tipo de prensas.

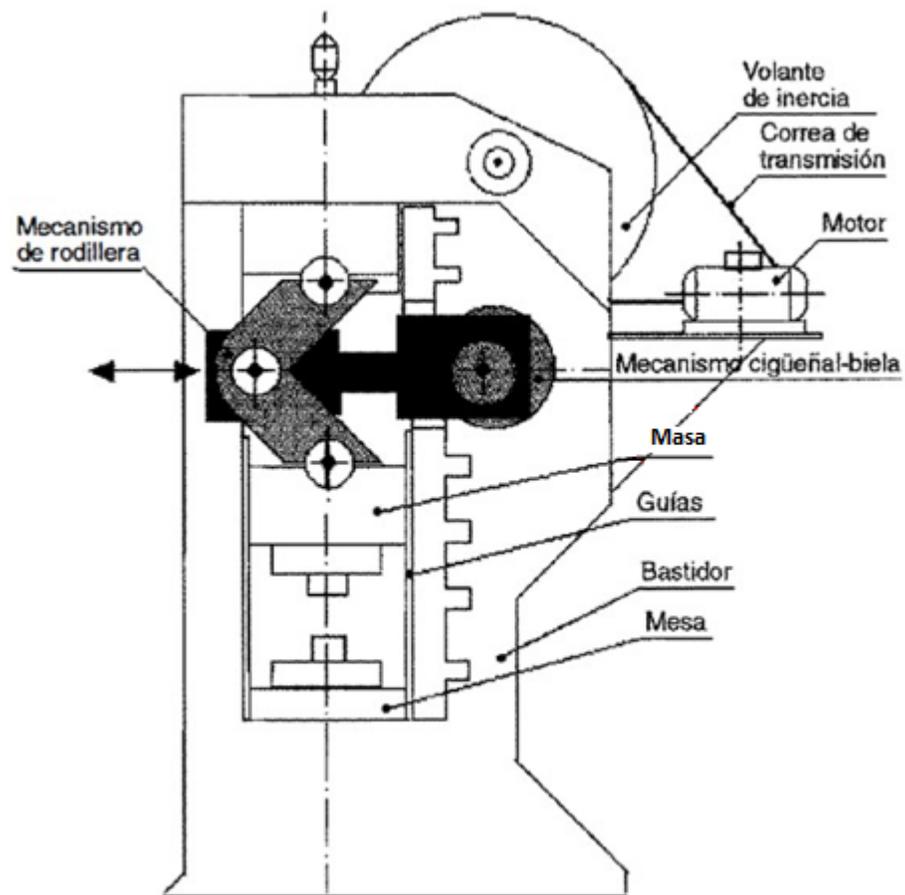


Fig. 1.9. Esquema de una prensa de rodillera [1].

- Prensas hidráulicas

Este tipo de prensas se basan en el dispositivo cilindro-pistón. Por lo general, el pistón está unido directamente, o bien a través de una transmisión más o menos compleja, a la masa de la prensa. A igualdad de esfuerzo máximo, por lo general, las prensas hidráulicas dan más capacidad de deformación. Este tipo de prensas son muy usadas para la forja libre, y no tanto en la forja en estampa con formación de rebaba [1]. En la Fig. 1.10 se presenta un esquema de esta clase de prensas, aunque es de notar que en el mercado existen infinidad de configuraciones y formas de este tipo de prensa.

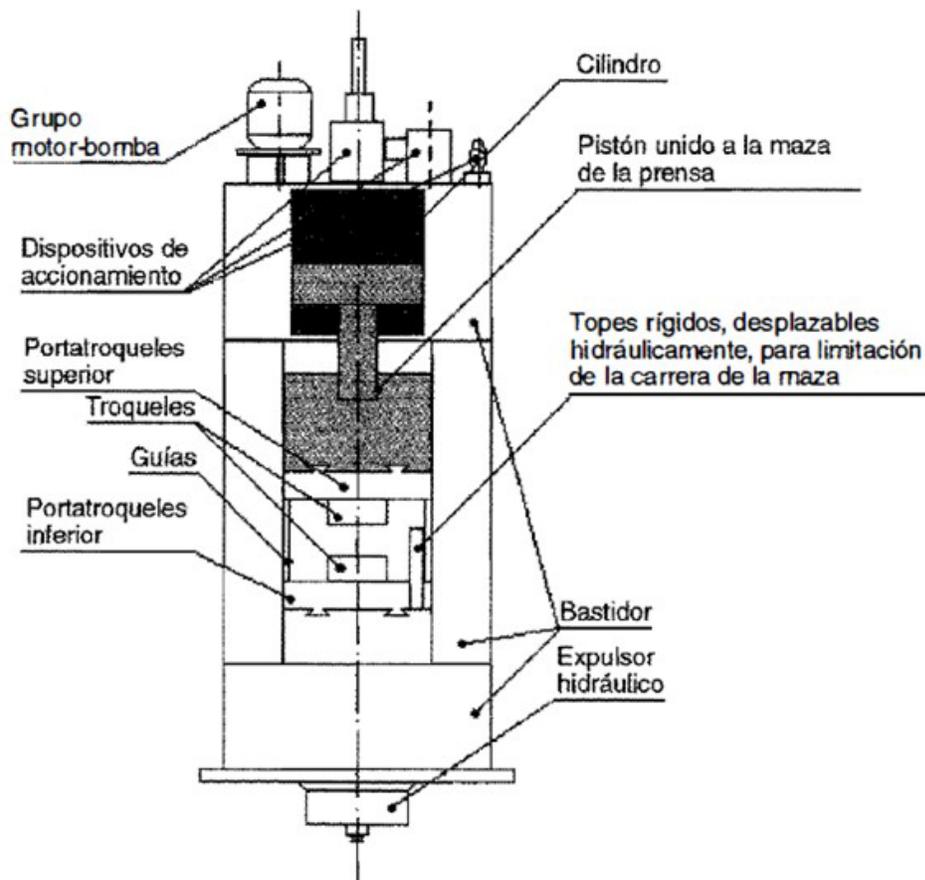


Fig. 1.10. Esquema del funcionamiento de una prensa hidráulica [1].

1.14. MARTILLOS

Los martillos al igual que las prensas, se pueden clasificar según el método de accionamiento que estos utilicen, a continuación, se presenta una clasificación de estos [1]:

- Martillos de caída libre

Su funcionamiento consiste en elevar a una determinada altura una masa y luego dejarla caer. La energía potencial gravitatoria acumulada en la elevación, se transforma en energía cinética en la caída y ésta en energía de deformación para conformar la pieza a fabricar. Para amortiguar el golpe contra el suelo se dispone una pieza, que hace las funciones de la mesa de las prensas, y que se fabrica mucho más pesada que la masa. A la masa y a la mesa se sujetan los

portatroqueles respectivos y a éstos los troqueles. La masa, en su caída, es conducida por unas guías apropiadas, sujetas a las columnas del martillo. El mecanismo de elevación del mazo suele estar empotrado encima de las columnas y constituye la parte de la máquina que se denomina cabezal [1]. En la Fig. 1.11 se presenta un esquema de un martillo de caída libre con sus partes fundamentales.

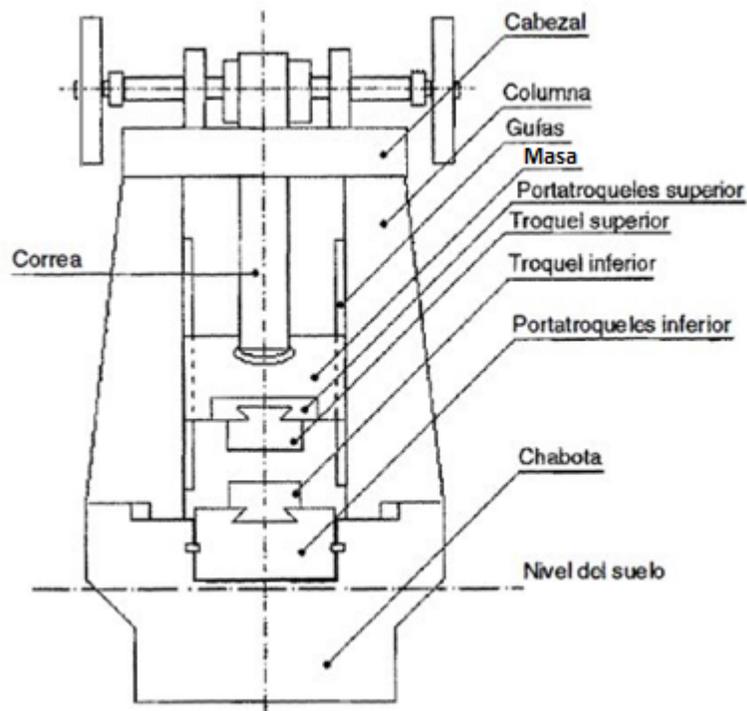


Fig. 1.11. Esquema de un martillo de caída libre, con sus partes fundamentales [1].

- Martillos de doble efecto

Los martillos de doble efecto consiguen generar energías de impacto y velocidades mayores que los de caída libre, como consecuencia de que la masa es impulsada en su caída por una fuerza adicional al peso del mazo, normalmente producido por un sistema cilindro-pistón accionado por aire o por vapor de agua. Para conseguir estos efectos el cabezal es algo distinto que el de los martillos de caída libre, ya que los mecanismos montados no solamente tienen por finalidad subir la masa para luego dejarla caer, sino que en el movimiento de bajada la

impulsan, añadiendo a la energía alcanzada por la caída libre el trabajo producido por el recorrido forzado del pistón superior [1]. En la Fig. 1.12 se presenta un esquema de un martillo de doble efecto.

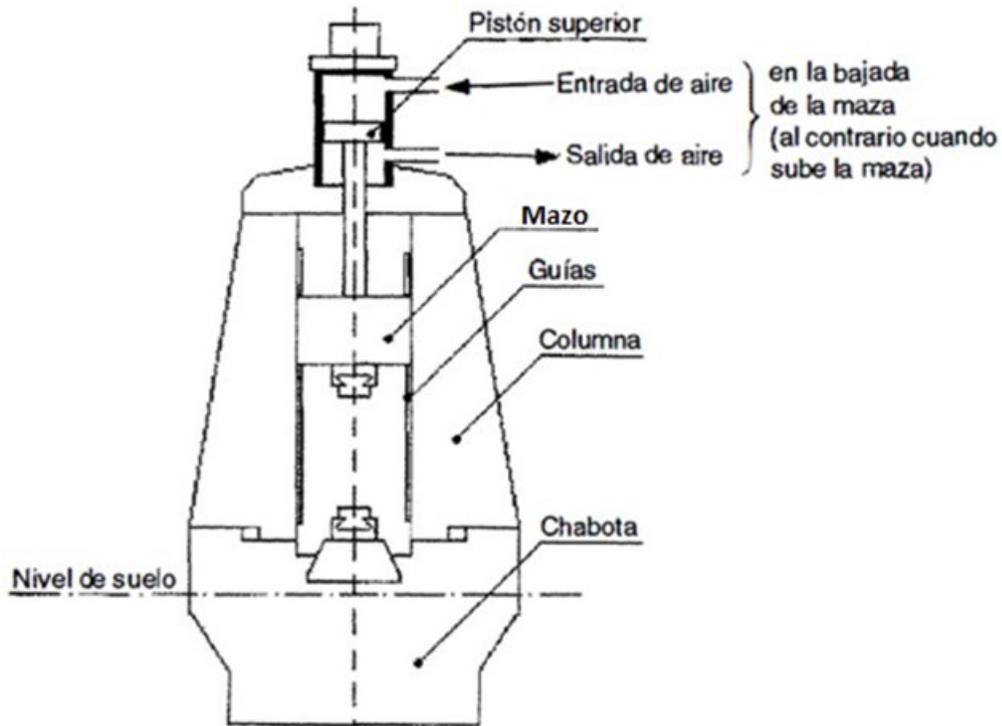


Fig. 1.12. Esquema de un martillo de doble efecto [1].

- Martillos de contragolpe

Para conseguir aún mayores energías que las obtenidas con los martillos de doble efecto, y evitar las enormes masas que serían necesarias, se han ideado los martillos de contragolpe. Estas máquinas funcionan de manera que mientras la masa cae la mesa sube, encontrándose ambas en su recorrido, por lo que todo el exceso de energía del golpe no pasa a las fundaciones de la máquina. Los recorridos de la mesa se proyectan mucho menores que los del mazo, para conseguir el correcto posicionado del taco sobre el troquel inferior. Normalmente masa y mesa adquieren su movimiento relativo de una misma cadena cinemática [1]. En la Fig. 1.13 se presenta un esquema del principio de funcionamiento de estos martillos.

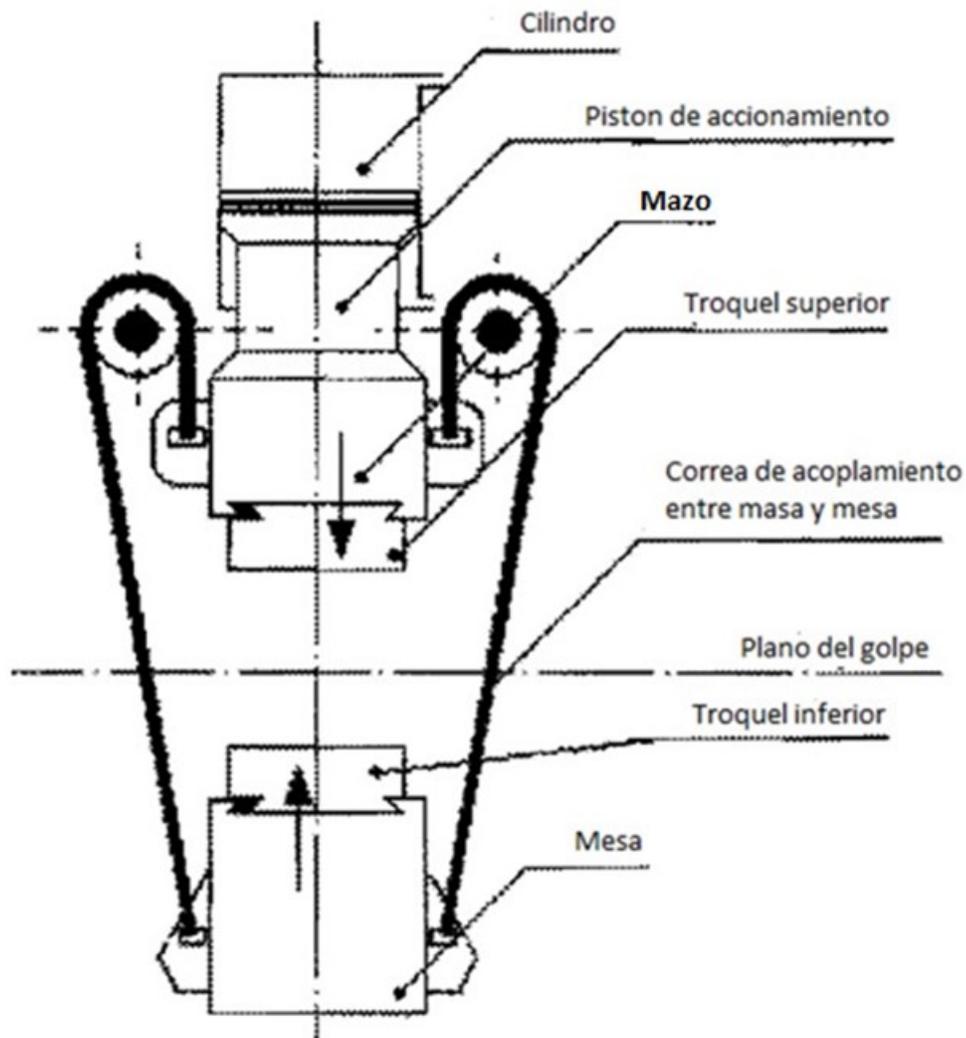


Fig. 1.13. Principio de funcionamiento de los martillos de contra golpe [1].

1.15. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA MÁQUINA DE FORJA

Como se describió en la sección 1.4, una máquina de este tipo consiste básicamente de una masa que se deja caer o es impulsada hacia abajo sobre el material de trabajo, y una mesa o yunque en donde se coloca dicho material, existen dos grandes grupos en los que se puede clasificar una máquina de este tipo, las prensas y los martillos.

La diferencia fundamental entre ambos tipos de máquinas es que, si se aplica cargas de impacto, es un martillo, mientras si se aplica carga gradual, es

una prensa [5]. Sin importar si la máquina en cuestión es un martillo o una prensa, estas máquinas están conformadas por algunos componentes principales que se describen a continuación:

a) Bastidor

Este elemento se encarga de proporcionar a la máquina una estructura firme y robusta para poder soportar y disipar de manera correcta las cargas que se generan en el proceso de conformar el material, también proporciona apoyo a los demás elementos que conforman la máquina, como la mesa, guías o correderas, transmisión, etc.

Puede estar manufacturado en fundición metálica o perfilería estructural de las dimensiones adecuadas, todo depende del diseño. En la Fig. 1.14 se presenta un ejemplo del bastidor de este tipo de máquinas.



Fig. 1.14. Bastidor en una prensa mecánica.

b) Troqueles

En cualquier proceso de deformación plástica son de vital importancia los utillajes, en el mundo de la forja se conocen como troqueles, estos canalizan y

distribuyen los esfuerzos que la máquina imprime para conseguir las deformaciones deseadas en el producto final [1].

Los troqueles tienen una función específica en el caso de la forja con estampa, sea con formación de rebaba o con matriz cerrada, ya que son ellos quienes contienen las matrices que dan forma al producto final, muchas veces depende del proceso diseñado, en múltiples etapas.

En la Fig. 1.15 se pueden observar los utillajes para un martillo para forjar, para la fabricación de palancas de dirección, los troqueles conforman cuatro fases diferentes del proceso de forja, que corresponden a las cuatro operaciones necesarias antes de quitar la rebaba del producto, el proceso está constituido por una fase dobladora, otra preparadora, una de inicio y otra de finalización [1].

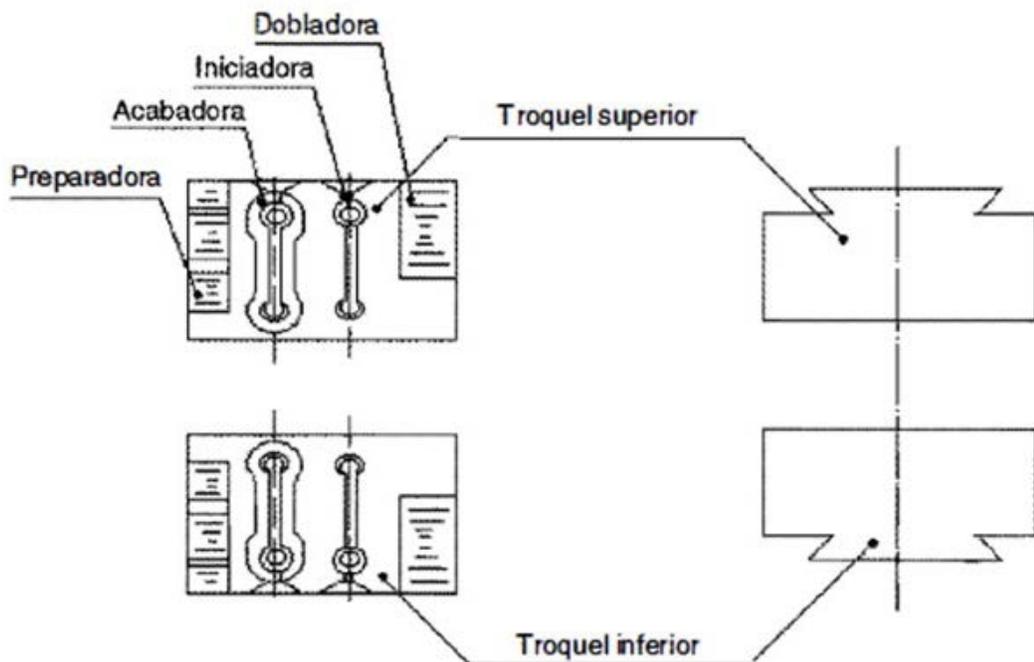


Fig. 1.15. Troqueles y matrices para el conformado de palancas con martillo de doble efecto [1].

c) Mazo

Se encarga de acumular energía cinética en su recorrido, que posteriormente se transmitirá como energía de deformación al material de trabajo por medio de impacto. Todas las máquinas para forja disponen de este

componente con excepción las prensas hidráulicas, que basan su funcionamiento en el principio cilindro-pistón [1].

d) Transmisión

Este grupo de componentes se encarga de llevar la potencia de trabajo, desde el motor o grupo motor-bomba en el caso de una prensa hidráulica, hasta los utillajes o troqueles, se incluyen el motor, o grupo motor-bomba, el volante de inercia, el eje de transmisión, el dispositivo freno-embregue, el reductor de velocidad y el sistema que la máquina en cuestión utiliza para realizar su movimiento, los cuales se citan en la sección 1.4. En la Fig. 1.16 se presenta un sistema de transmisión de una prensa mecánica.

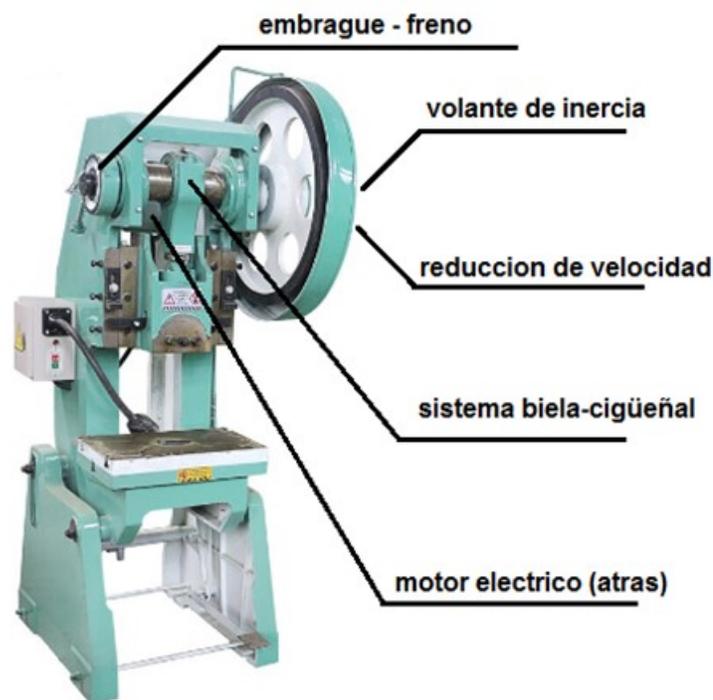


Fig. 1.16. Componentes del sistema de transmisión de una prensa mecánica.

El dispositivo de freno y embrague se encarga de funcionar como interruptor de transferencia entre el movimiento continuo del motor y el ciclo de trabajo que experimenta la máquina, se encarga de conectar y desconectar la potencia de trabajo a voluntad del operario, y a su vez, dependiendo del diseño,

el mismo dispositivo se encarga de frenar el movimiento de la máquina cuando se requiere. Así, solamente las máquinas como las prensas hidráulicas no disponen de este componente.

El volante de inercia sigue el movimiento de rotación continuo que el motor le imprime, a modo de funcionar como colector de energía cinética de rotación y entregarla al sistema encargado de efectuar el movimiento de los troqueles, tan característico de cada tipo de máquina. El momento en que esta energía acumulada por el volante de inercia es liberada depende de la manipulación del operario de la máquina.

2. DISEÑO DE UNA MÁQUINA DIDÁCTICA PARA FORJA EN CALIENTE

En este capítulo se presenta los criterios utilizados para la determinación de la fuerza de trabajo de la máquina didáctica para forja en caliente, así como también, el tipo de máquina a tomar en consideración para la propuesta de diseño, de los cuales se hace referencia en la sección 1.4. Además, se describen los elementos mecánicos involucrados en el sistema encargado de la aplicación de la carga de trabajo al material en caliente a conformar, así como también el principio por el cual se rige el funcionamiento de dicha máquina.

2.1. TIPO DE MÁQUINA SELECCIONADA PARA LA PROPUESTA DE DISEÑO

Se propone una máquina del tipo martillo de caída libre, como las que se hacen referencia en la sección 1.14.

Como se citó, estas máquinas utilizan la energía potencial gravitatoria ganada al ser elevadas una determinada distancia y luego transforman toda esta energía potencial gravitatoria en energía cinética justo antes del impacto del mazo con el material de trabajo, de esta manera la máquina transfiere esta energía por medio del impacto al material de trabajo, y este se deforma a consecuencia de la misma.

En la sección 1.5 se nombran las partes principales que constituyen una máquina para forja, de forma general para una prensa o un martillo. La máquina que se propone en este trabajo toma como base estos componentes principales como son un bastidor, la transmisión o sistema encargado de elevar el mazo, los troqueles encargados de aplicar la fuerza de trabajo al material, y fundamentalmente, la masa que se utiliza como mecanismo de transferencia de energía.

2.2. JUSTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA FUERZA DE FORJADO

En la sección 1.11 se expuso los parámetros involucrados en la forja libre, respecto a la fuerza de trabajo, el esfuerzo de fluencia del material a la temperatura y a la deformación dada el área de contacto entre el troquel y el material de trabajo determinan la fuerza necesaria para deformar el material, tal como se presenta la Ec. 1.7, aunque también el coeficiente de fricción entre el material de trabajo y los troqueles es de interés debido al abarrilamiento que éste causa en el material durante la deformación.

El coeficiente de fricción es de interés junto con las dimensiones del material de trabajo involucrado, las cuales se relaciona por medio de un factor de forma, que se presenta en la Ec. 1.10, que afecta a la fuerza de forjado, como se presenta en la Ec. 1.9.

El esfuerzo de fluencia (Y_f) se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal se comporta perfectamente plástico, como en el trabajo en caliente, en este caso, el exponente de endurecimiento por deformación es igual a cero, y el esfuerzo de fluencia iguala a la resistencia de fluencia del metal (Y), tal como se presentó en la sección 1.11

En el proceso de forjado, variables como el material que se utilizará para trabajar y la temperatura necesaria para aprovechar las propiedades que el material adquiere en caliente, requieren de una gran base teórica como estudios previos que satisfagan la información necesaria para determinar dichas variables, lo cual es una de las limitantes de este trabajo de graduación como el acceso a alguna información, así el trabajo de determinar estas variables se complica, como por ejemplo, cuando se requiere el esfuerzo de fluencia de determinado material a la temperatura de trabajo en caliente.

Así, es sumamente difícil encontrar referencia de cómo cambia la resistencia de fluencia de un acero al carbono en función de la temperatura. En la Fig. 2.1 se presenta un diagrama de la resistencia a la tracción en función de la temperatura de un acero al carbono, y se puede utilizar este parámetro como aproximación a la resistencia de fluencia.

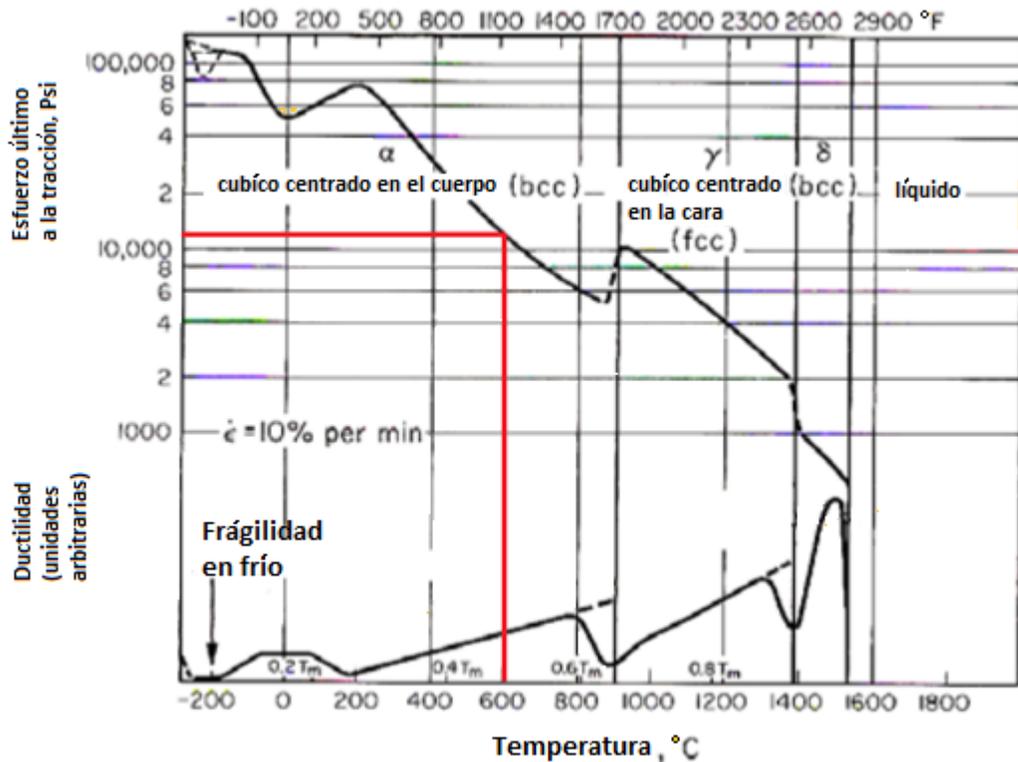


Fig. 2.1. Ductilidad y resistencia a la tracción en función de la temperatura, de un acero al carbono [6].

Se puede estimar mediante la Fig. 2.1 que, ligeramente por arriba de 600 °C la resistencia a carga máxima de un acero al carbono es de 10,000 psi, y se puede aproximar este valor como la resistencia de fluencia de este material.

En la Ec. 1.9 se define la fuerza necesaria para empezar la deformación en la forja libre, si se pretende calcular la fuerza necesaria para empezar la deformación de un cilindro de acero al carbono de ½ x ½ pulg, calentado a una temperatura tal que, su resistencia de fluencia sea 10,000 psi, tal como se presenta en la Fig. 2.1 de la Ec. 1.9, así:

$$F = K_f Y_f A$$

$$F = \left(1 + \frac{0.4\mu D}{h}\right) Y_f A$$

$$F = \left(1 + \frac{0.4(0.15)(12.7 \text{ mm})}{(12.7 \text{ mm})}\right)(68.94 \times 10^6 \text{ Pa})\left(\pi \left(\frac{12.7}{1000} \text{ m}\right)^2\right) = 37,028 \text{ N}$$

Se requieren 37,028 N de fuerza para dar inicio a la deformación en el cilindro en cuestión, suponiendo que es de acero al carbono y que fue calentado ligeramente por arriba de 600 °C.

Como se citó anteriormente en este capítulo, la máquina propuesta utilizará el principio de caída libre para entregar la energía mediante la forma de impacto al material de trabajo, desde este momento se define 1 m como la altura seleccionada que recorrerá el mazo antes del impacto.

A continuación, se procederá a calcular la masa necesaria del mazo para obtener una reacción de 37,028 N en el impacto, elevando 1 m este mazo y dejándolo caer libremente.

La conservación de la energía se define mediante la Ec. 2.1 [7]. Para sistemas que disponen solamente de fuerzas conservativas, en el caso de la máquina didáctica de la propuesta de diseño, se despreciará el efecto de la fricción que la banda plana comparte con los rodillos en los que se apoya, tomando en consideración únicamente el peso del mazo como fuerza externa para el análisis.

$$T_1 + V_1 = T_2 + V_2 \quad (2.1)$$

donde: T_1 es la energía cinética del mazo en el punto inicial,

V_1 es la energía potencial gravitatoria del mazo en el punto inicial,

T_2 es la energía cinética del mazo en el punto final, y

V_2 es la energía potencial gravitatoria del mazo en el punto final.

El nivel de referencia para aplicar la Ec. 2.1 se escoge como el punto final de la carrera del mazo, como el mazo en el punto inicial tiene velocidad cero, $T_1 = 0$ pero si tiene una componente de energía potencial gravitatoria asociada al metro que se elevó el mazo.

En el instante del impacto, el mazo ya no dispone de una componente de energía potencial gravitatoria, debido a que se encuentra en el nivel de referencia, por lo tanto $V_2 = 0$ pero si dispone de una componente de energía cinética, ésta define la velocidad del mazo antes del choque.

Para el caso de este trabajo de diseño, la conservación de la energía se aplica al mazo de la siguiente manera.

$$0 + mgh = \frac{1}{2}mv_2^2 + 0$$

Ahora, despejando para T_2 se obtiene:

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (2.2)$$

En la Ec. 2.2 se establece que, en caída libre, la velocidad al final de la carrera del mazo depende solamente de la altura a la que originalmente se elevó para dejarla caer, para 1 m de altura, la velocidad al final de la carrera es:

$$v_2 = \sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)(1\text{m})} = 4.43 \text{ m/s}$$

El principio del impulso y momentum lineal es usado para abordar situaciones cinéticas que tienen que ver con velocidad, fuerza y tiempo [7].

En las Figs. 2.2 - 2.4 se presentan los diagramas de momentum lineal de la masa antes del impacto y al final, se toma como referencia para este instante el momento de máxima deformación en el choque, cuando la velocidad del mazo es cero; y el diagrama de impulso que experimenta dicho mazo en el tiempo que dura el fenómeno, durante este tiempo ocurre el intercambio de energía entre el mazo y el material a deformar.

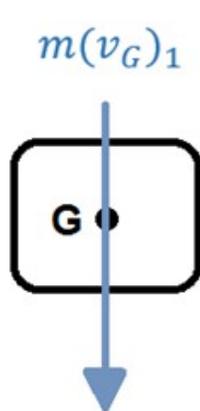


Fig. 2.2. Diagrama de momentum lineal, antes del impacto.

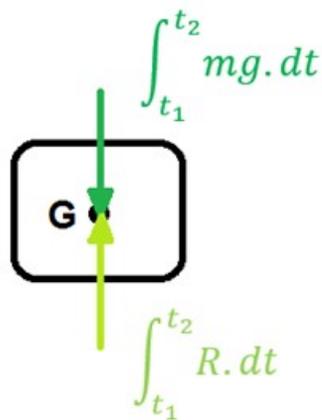


Fig. 2.3. Diagrama de impulsos durante el choque, hasta la deformación máxima.

$$m(v_G)_2 = 0$$



Fig. 2.4. Diagrama de momentum lineal, al final del impacto.

El movimiento del mazo es vertical y hacia abajo, por lo tanto, se puede decir que es en el eje de las y , el principio de impulso y momentum lineal para la masa en análisis se describe mediante la Ec. 2.3 [7].

$$m * v_{Gy_1} + \sum \int_{t_1}^{t_2} F_y dt = m * v_{Gy_2} \quad (2.3)$$

donde: v_{Gy_1} es la velocidad del mazo antes del choque,

v_{Gy_2} es la velocidad del mazo en el instante de máxima deformación durante el choque, y

dt es el diferencial de tiempo que dura el choque.

Utilizando los diagramas de las Figs. 2.2 - 2.4 se plantea la Ec. 2.2 de la forma siguiente:

$$m\sqrt{2gh} + mg\Delta t - R\Delta t = 0$$

Despejando la masa del mazo se obtiene:

$$m = \frac{R\Delta t}{\sqrt{2gh} + g\Delta t} \quad (2.4)$$

donde: R es la reacción de impacto en el mazo durante el choque,

Δt es el intervalo de tiempo en el que tiene lugar este análisis el cual se asume que es de 0.5 s, entre menor es el tiempo de análisis considerado mayores resultan las reacciones en el mazo durante el choque.

Con los valores obtenidos para una caída libre de 1 m, sobre el cilindro hipotético de material a forjar, la masa necesaria del mazo resultante para comenzar a deformar dicho cilindro es:

$$m = \frac{(37,028.35 \text{ N})(0.5 \text{ s})}{4.43 \text{ m/s} + (9.81 \text{ m}^2/\text{s}^2)(0.5 \text{ s})} = 1983 \text{ kg}$$

Cabe resaltar, que esta masa del mazo es demasiado grande para efectos prácticos, y sobre todo para efectos didácticos como los que se están proyectando para esta propuesta de diseño, y esto es debido al principio en el que se fundamenta la propuesta, que es el de intercambio de energía por medio del momentum lineal acumulado en la caída, y también por la distancia de carrera que se ha fijado en 1 m.

Pero, sobre todo, se requiere una masa del mazo tan grande para deformar el cilindro hipotético de prueba por la consideración sobre el esfuerzo de fluencia a la temperatura de ~600 °C de un acero al carbono, que es según la Fig. 2.1 de ~10,000 psi.

Teniendo lo anterior en consideración, se tomará otro enfoque para establecer la fuerza de impacto o de trabajo de la propuesta de diseño de la máquina didáctica para forja en caliente.

Existen en el mercado internacional diversos tipos de maquinaria para la forja en caliente de forma ornamental del hierro, así valores típicos de las

máquinas más pequeñas oscilan entre 50 y 60 kg_f de peso nominal en el golpe, un ejemplo de maquinaria en el mercado con esta fuerza nominal de golpe es el martillo pilón MP50 de la marca española NARGESA (ver, Fig. 2.5), cuyo peso nominal de golpe es 50 kg_f .



Fig. 2.5. Power hammer MP50-MP60.

De esta manera, se selecciona una fuerza de golpe de 40 kg_f para la máquina, tomando en consideración el tamaño didáctico de la propuesta de diseño.

2.3. CÁLCULO DE LA MASA REQUERIDA

En este apartado se calculará la masa necesaria del mazo que deberá ser elevada 1 m, para posteriormente dejarla caer y obtener una fuerza de reacción en el instante del choque de 40 kg_f .

Si el mazo viaja 1 m, cayendo solamente por el efecto de la gravedad, experimenta una velocidad antes del choque de 4.3 m/s como se expresa en la Ec 2.2 y asumiendo un intervalo de tiempo para el análisis de 0.5 s, la Ec 2.4

evaluada para los 40 kg_f es utilizada para calcular la masa necesaria del mazo para este caso, así:

$$m = \frac{(392.4 N)(0.5 s)}{4.43 m/s + (9.81 m^2/s)(0.5 s)} = 21 kg$$

2.4. CONCEPTO DE LA PROPUESTA DE DISEÑO

En este apartado se define el concepto bajo el cual se postulará la propuesta de diseño para la máquina didáctica de forja en caliente.

En la sección 1.14 se definió las máquinas de martillo de caída libre, por lo tanto, se seleccionará este tipo de máquina, debido a que representa un mecanismo sencillo que únicamente se encarga de elevar el mazo a la altura necesaria para acumular la energía requerida en el golpe.

Para el diseño del sistema de elevación del mazo se propone el que se presenta en la Fig. 2.6, dicho sistema consiste en una masa que se elevada por medio de un sistema de rodillos, elementos 2 - 4 en la Fig. 2.6, y una banda plana de transmisión, elemento 1 en la Fig. 2.6, el elemento encargado de transmitir potencia al arreglo, a través de una unidad motor-reductor, es el rodillo marcado en la Fig. 2.6 como elemento 3, este elemento estará continuamente girando mientras la unidad motor-reductor de la máquina esté encendida.

El elemento marcado en la Fig. 2.6 como 5, es un elevador que permite mover hacia arriba y hacia abajo el eje marcado como 4 en dicha figura.

Las especificaciones del elemento 5 en la Fig. 2.6 tanto de diseño, como también de los elementos que corresponde a materiales y perforaciones, se definirán más adelante.

El elemento 5 en la Fig. 2.6 tienen como fin funcionar como un tensor de la banda plana de transmisión, si se ubica en su punto más alto, el sistema contará con la tensión inicial necesaria para que el elemento 3 transfiera la

potencia a la banda plana por medio de la fricción entre la cara en contacto de la banda y el rodillo que forma parte del eje 3.

Si el elemento 5 se ubica en su punto más bajo, la banda plana de transmisión perderá la tensión necesaria para transmitir la potencia del rodillo impulsor y por consecuencia el mazo caerá por gravedad.

El elemento 6 que se presenta en la Fig. 2.6, es un cilindro neumático de doble efecto, la propuesta de diseño incluye dos de estos, ambos son capaces de ejercer una fuerza tal que mueva todo el elevador, elemento 5, y a la vez proporcionar la carga de pretensión que la transmisión por bandas planas requiere para ser aplicada eficazmente.

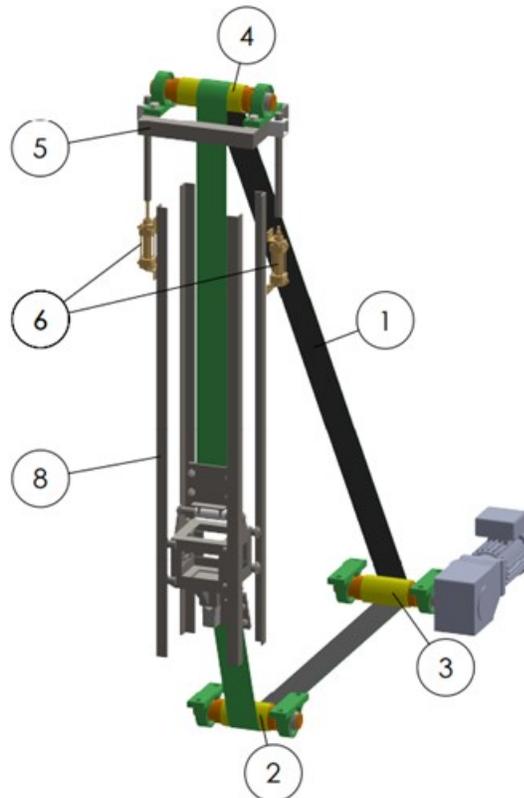


Fig. 2.6. Sistema para elevación del mazo.

En la sección 2.3 se definió la masa necesaria del mazo para obtener 40 kg_f de reacción en el golpe cuando ésta se deja caer 1 m sólo por acción de su peso, en la Fig. 2.6 se presenta el elemento 7 el cual corresponde a un conjunto

de tres elementos, una plataforma a modo de carrito que se encarga de dar apoyo a la cabeza de un mazo de 5 lb y dos acoples necesarios para unir de forma satisfactoria la banda plana de transmisión al carrito, todo el conjunto tiene aproximadamente la masa necesaria del mazo que es de 21 kg que se obtuvo en la sección 2.3.

La plataforma a modo de carrito del elemento 7 dispone de rodamientos para asegurar solamente su movimiento vertical hacia arriba y abajo, esto se logra mediante cuatro rieles que lo mantienen en su lugar, estos rieles están representados en la Fig. 2.6 por el elemento 8.

Las especificaciones de todos los elementos en la Fig. 2.6, tanto de diseño, como también de los elementos que se refiere a materiales y perforaciones, se definirán más adelante.

2.5. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES

En esta sección se describe en forma general los principales elementos que constituyen la máquina didáctica de forja en caliente, más adelante en este trabajo de graduación se abordará el diseño de estos elementos, en la sección 1.5 se citaron los elementos principales que conforman este tipo de máquinas, estos son:

a) Mazo

Como se citó en el apartado 2.4, se ha propuesto una plataforma a modo de carrito cuya masa es complementaria junto con la masa de dos acoples mecánicos que se describirán más adelante, para unir la banda plana de transmisión a la denominada plataforma y también es complementaria con la masa de la cabeza de un martillo o mazo de 5 lb, para lograr obtener la masa calculada en la sección 2.3 que es de 21 kg.

b) Plataforma

Dado el enfoque didáctico de este trabajo y teniendo en consideración que esta propuesta de diseño de máquina se podrá construir,

se tiene el cuidado de seleccionar materiales que se pueden encontrar en el mercado nacional de forma accesible, materiales que comúnmente son utilizados en las aplicaciones de ingeniería y los procesos de fabricación son sencillos.

En la Fig. 2.7 se presenta la plataforma propuesta, la masa de esta plataforma es complementaria con dos acoples mecánicos y el mazo de 5 lb.

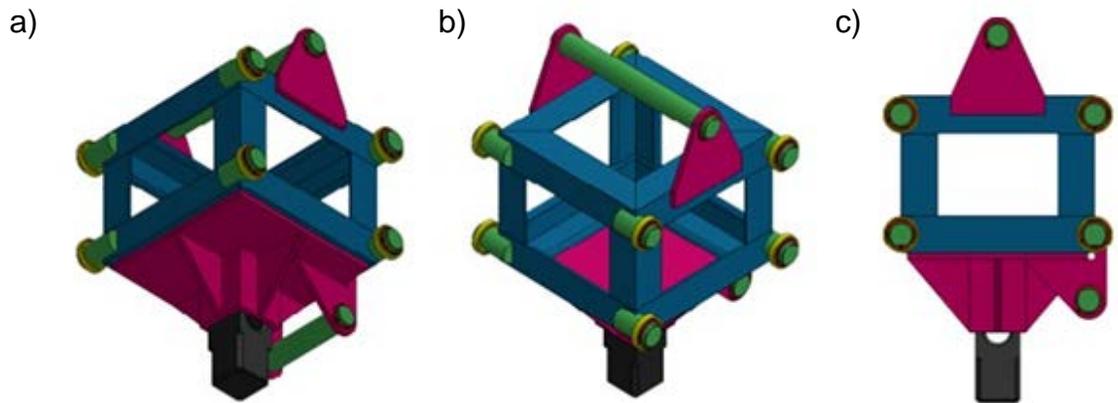


Fig. 2.7. Parte del mazo del sistema-plataforma: a) y b) isométricos auxiliares; y c) vista lateral derecha

Una plataforma a modo de carrito es el elemento designado para fungir como la masa encargada de la cedencia de energía, como se citó en la sección 2.4.

La estructura central de la plataforma está conformada por perfiles angulares de acero al carbono de 6 mm de espesor, soldados entre sí, tal como se presenta en la Fig. 2.8, y en la Fig. 2.7 también se presenta en color azul.

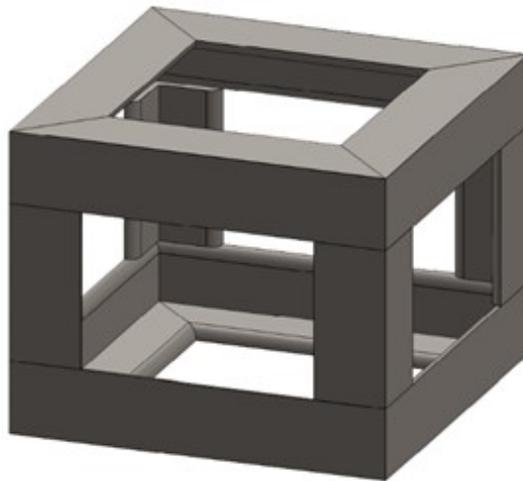


Fig. 2.8. Estructura central de la plataforma.

Los apoyos para los acoples mecánicos entre la banda plana de transmisión y la estructura central de la plataforma tomarán forma a partir de alzas de placa de acero al carbono que se soldarán a la estructura, estas placas estarán perforadas para acomodar un pasador también de acero al carbono, tal como se presenta en la Fig. 2.9 en color verde.

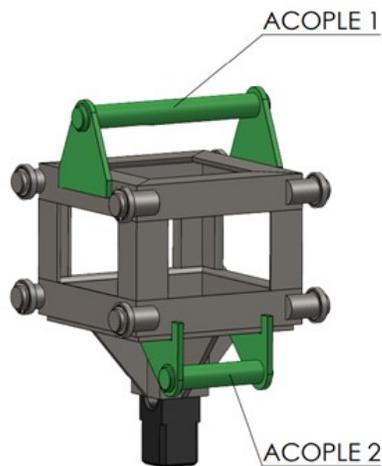


Fig. 2.9. Apoyos de acoples mecánicos en la plataforma.

La plataforma debe contar con una estructura de placa de acero al carbono, del mismo espesor a utilizar para los apoyos de los acoples mecánicos antes descritos, que se deberá soldar a la estructura principal

descrita en la Fig. 2.8, esta estructura tendrá como función mantener en su lugar la cabeza de un martillo de 5 lb, este deberá ser soldado a esta estructura para mantenerlo en su lugar, tal como se presenta en la Fig. 2.10 en color rosa.

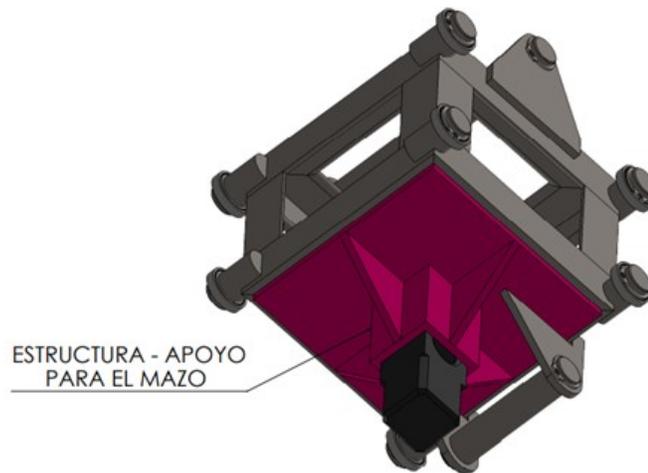


Fig. 2.10. Estructura de placa de acero al carbono-apoyo para el mazo.

Tal como se citó en la sección 2.4 la máquina debe contar con cuatro rieles fabricados a base de perfil angular, estos rieles deben mantener la plataforma en su posición en todo su recorrido de trabajo, y para facilitar el movimiento de la plataforma a través de estos rieles, la plataforma dispondrá de unos muñones de acero al carbono, soldados a la estructura descrita en la Fig. 2.8 y maquinados de tal forma para alojar un rodamiento de bolas, juntos realizarán la función de un rodo que debe correr a través del riel o perfil angular descrito en la Fig. 2.6.

En la Fig. 2.11 se presenta en color amarillo los rodamientos descritos anteriormente, en total deben ser 8 rodamientos, dispuestos de la forma siguiente.

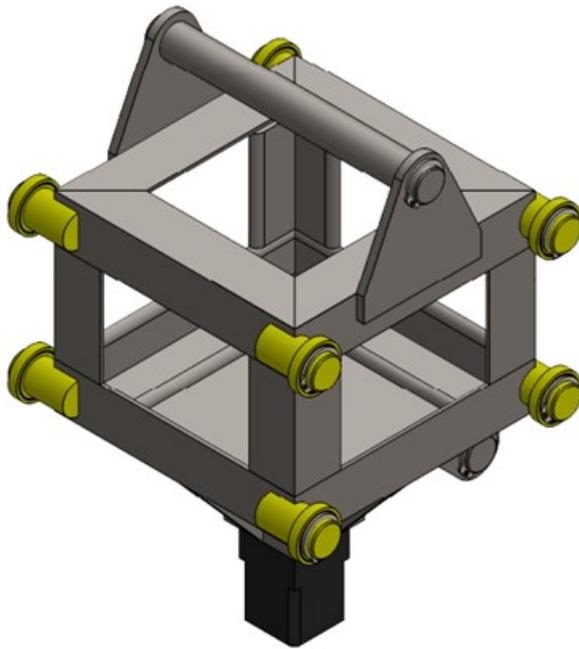


Fig. 2.11. Isométrico y disposición de los rodamientos en la plataforma.

Los pasadores de los apoyos para los acoples mecánicos presentados en la Fig. 2.9 se extraen de las alzas de placa de acero al carbono mediante un seguro de retención para ranura externa que impide su movimiento axial, tal como se presenta en la Fig. 2.12, de esta manera será posible extraer el pasador para colocar el acople mecánico con la banda plana de transmisión.

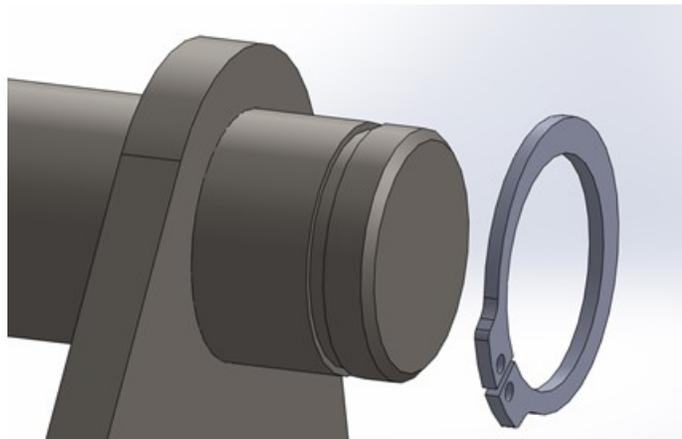


Fig. 2.12. Desmontaje para los pasadores en la plataforma.

De igual forma, los rodamientos de bola que se deben utilizar se presentan en la Fig. 2.11, los cuales están restringidos axialmente por este tipo de seguros de retención, como se presenta en la Fig. 2.13.

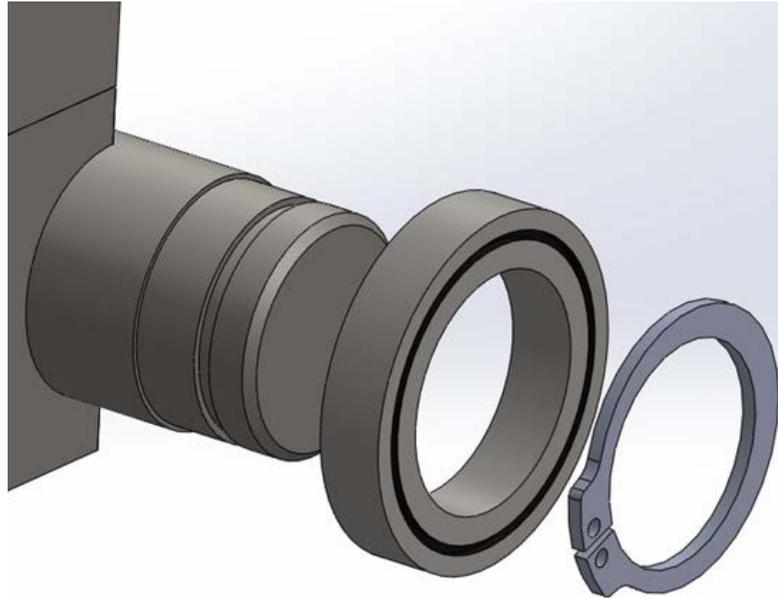


Fig. 2.13. Desmontaje para los rodamientos en la plataforma.

c) Acoples mecánicos

En la sección 2.4 se plantea el concepto para la propuesta de diseño de la máquina didáctica para forja en caliente, en dicha sección se citó que el mazo será elevado mediante una banda plana de transmisión y que se acople a la plataforma que cumple la función de mazo por medio de dos acoples mecánicos que se deben asegurar mediante los pasadores que se describen en la Fig. 2.9. Así, lo anterior se presenta en la Fig. 2.14.

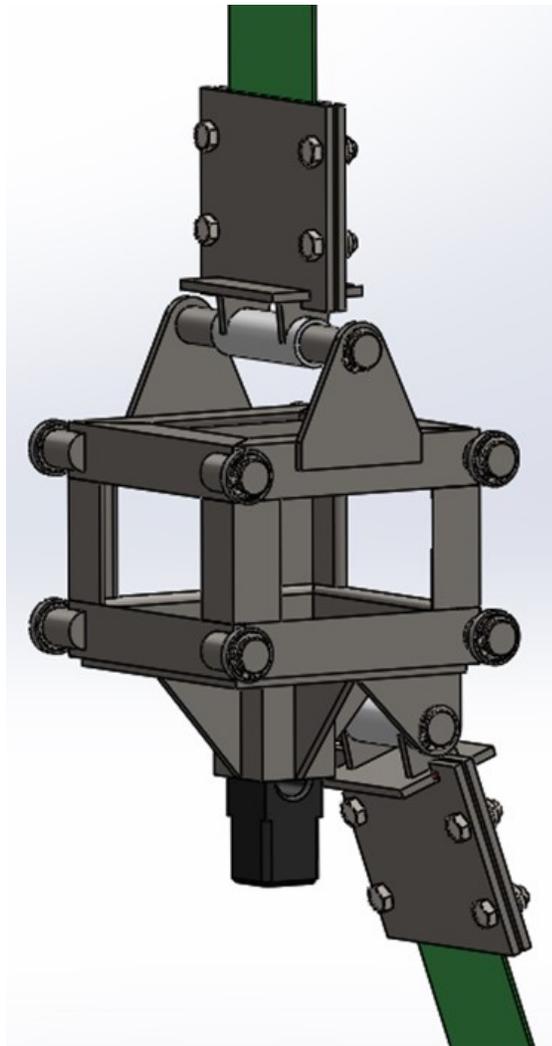


Fig. 2.14. Subconjunto plataforma, acoples mecánicos y banda plana de transmisión.

Dichos acoples tienen como función sujetar una sección de la banda plana por medio de la fricción entre sus superficies de contacto, a modo de sándwich, y con el ajuste de cuatro pernos se asegura la sujeción de la banda al acople.

La estructura fundamental de los acoples está compuesta por tres partes o secciones, tal como se presenta en la Fig. 2.15.

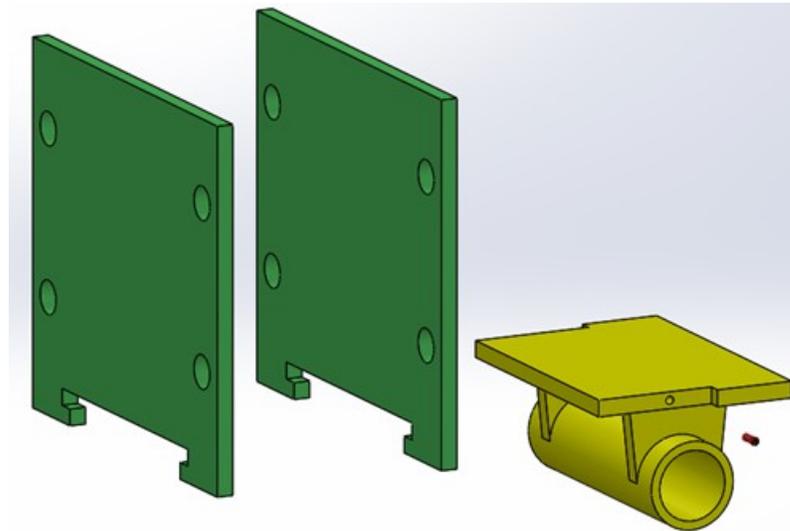


Fig. 2.15. Partes que constituyen el acople mecánico.

En la Fig. 2.15 se presenta en color verde, dos placas de acero al carbono, de 6 mm de espesor, maquinadas de tal forma que se observa en ambas una ranura por la cual deberá ingresar la estructura en color amarillo que también se presenta en la Fig. 2.15, la estructura en color amarillo debe estar constituida de placa de acero al carbono de 6 mm de espesor, y tubería de acero al carbono cedula 40, soldadas entre sí, en la estructura de color amarillo se ensamblarán los pasadores presentados en la Fig. 2.9.

Para ensamblar un acople mecánico con la banda plana de transmisión, primero es necesario realizar la secuencia siguiente, una placa de acero al carbono seguida de la banda plana de transmisión, y luego la última placa de acero al carbono, tal como se presenta en la Fig. 2.16, es importante citar que no es necesario perforar la banda plana, esto es para evitar cualquier concentrador de esfuerzos extra en la banda plana de transmisión.

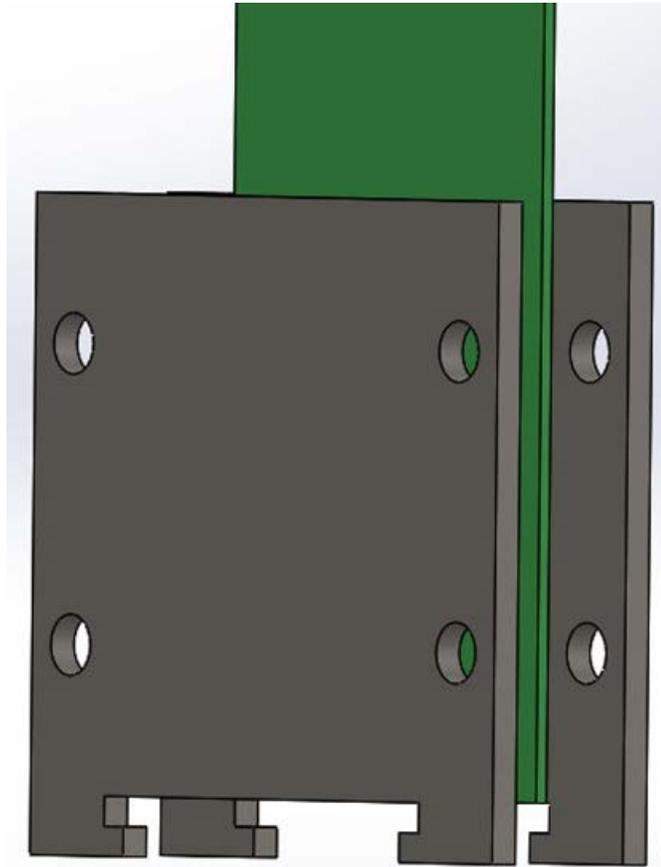


Fig. 2.16. Primer paso para el ensamblaje del acople mecánico.

El siguiente paso en el ensamblaje del acople mecánico con la banda, es colocar cuatro pernos pasados por los orificios de las placas, estos pernos son los que se encargarán de proporcionar la presión necesaria para que, por medio de la fricción entre las superficies la banda plana se mantenga en su lugar, esto se presenta en la Fig. 2.17.

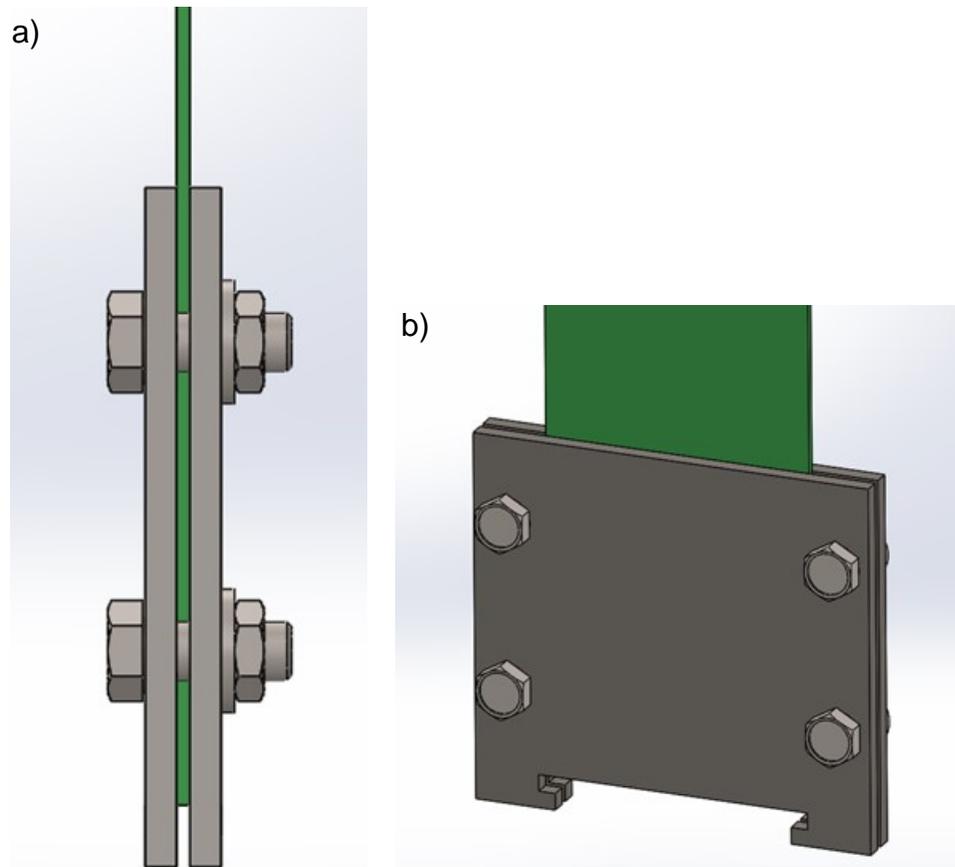


Fig. 2.17. Ajuste del acople mecánico y la banda plana: a) Vista lateral; y b) vista auxiliar.

El tercer paso para el ensamblaje de los acoples mecánicos y la banda plana, es deslizar la estructura que se presenta en color amarillo de la Fig. 2.15 por la ranura del conjunto que se presenta en la Fig. 2.17b hasta llegar al final del recorrido, tal como presenta en la Fig. 2.18.

Por último, la estructura en color amarillo de la Fig. 2.18, debe contar con dos orificios roscados, cada uno para un prisionero, de esta forma la estructura en cuestión se mantendrá en su lugar evitando el juego axial, tal como se presenta en la Fig. 2.19.

La unión entre un acople mecánico y la plataforma debe contar con lubricación por medio de grasa, ya que el principio de funcionamiento de la unión es similar al de una bisagra.

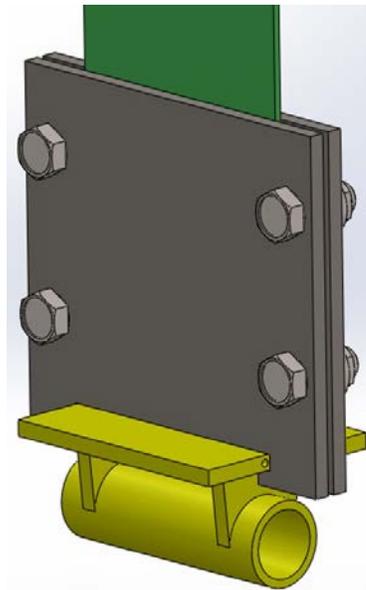


Fig. 2.18. Tercer paso para el ensamblaje del acople mecánico.

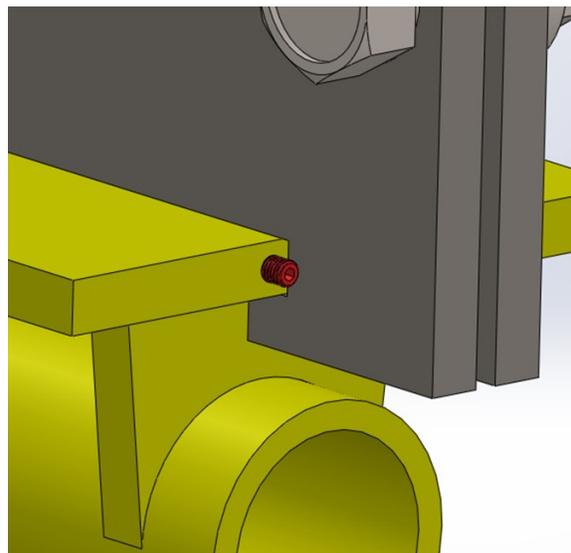


Fig. 2.19. Prisionero como seguro de retención.

d) Rodillos

En la sección 2.4 se citó que, el sistema para elevar la carga está compuesto por una banda plana de transmisión y un conjunto de tres rodillos encargados de dar orientación y puntos de apoyo a la banda, mediante uno

de estos tres rodillos se transmitirá la potencia de un motor reductor a la banda para elevar la carga.

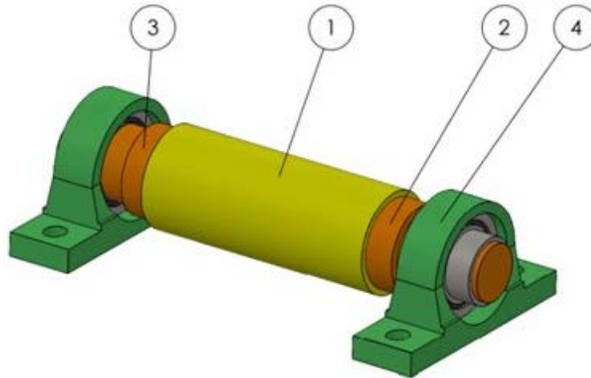


Fig. 2.20. Conjunto rodillo.

En la Fig. 2.20 se presenta el conjunto de partes que conforman un rodillo en color amarillo y marcado con el número 1, la cual es la pieza central del conjunto, una sección de tubo redondo de acero al carbono cedula 40, en los extremos del tubo, en color naranja y marcado con los números 2 y 3, se presenta dos ejes sólidos de acero al carbono, maquinados de tal forma que permitan la transición entre el tubo redondo marcado en amarillo en la Fig. 2.20 y una chumacera que se presenta en color verde y marcada con el número 4 en la figura, los ejes sólidos se deberán soldar a la sección de tubería redonda 25 mm a partir de la cara lateral del tubo, en la Fig. 2.21 se presenta un dibujo de ensamble del conjunto rodillo.

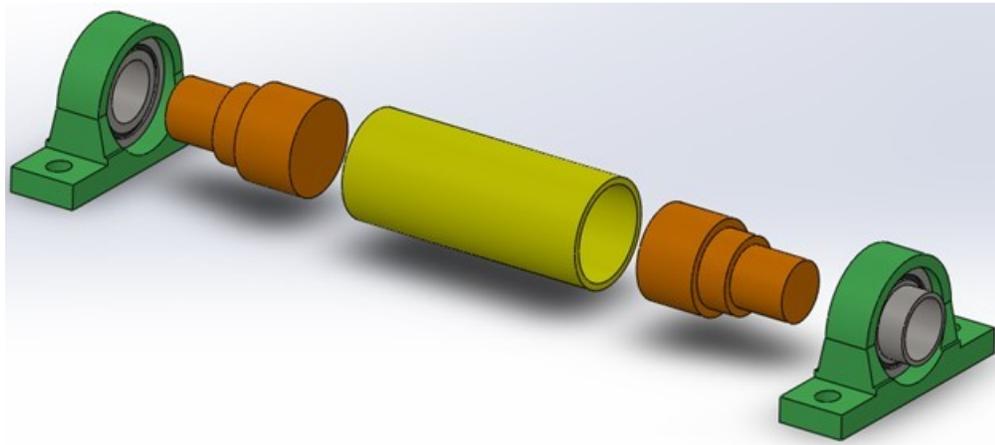


Fig. 2.21. Dibujo de ensamble del rodillo.

e) Elevador

Cómo se citó en la sección 2.4 se utilizará una plataforma elevadora para uno de los tres rodillos de apoyo que se citan en el apartado anterior, el conjunto en cuestión se presenta en la Fig. 2.22.

La estructura principal de la plataforma elevadora debe estar constituida por elementos de perfil angular de 5 mm de espesor, soldados entre sí, dicha estructura se presenta en la Fig. 2.23 en color rojo.

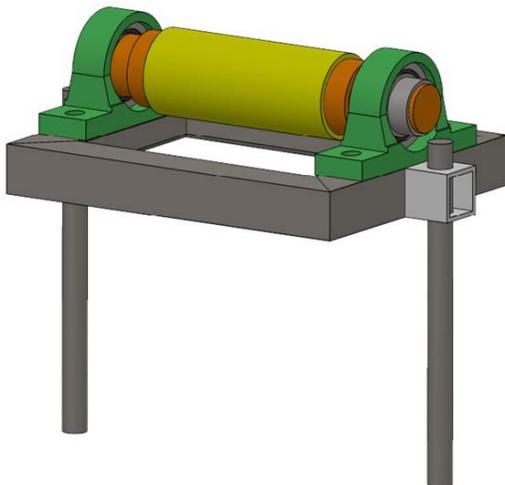


Fig. 2.22. Conjunto rodillo más elevador.

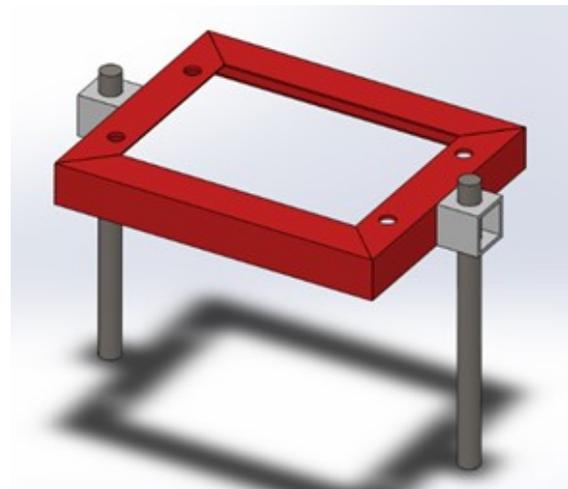


Fig. 2.23. Estructura principal del elevador.

A esta estructura principal se deberán soldar dos secciones de tubería cuadrada de 5 mm de espesor, que se presentan en color azul en la Fig. 2.24,

estos elementos se deben perforar de tal forma que cada sección de tubo cuadrado pueda alojar una varilla redonda de 25 mm de diámetro, tal como se presenta en la Fig. 2.24 en color amarillo, estas varillas se deben soldar a las secciones de tubo cuadrado y proporcionan una guía al recorrido de trabajo del elevador.

La varilla que se presenta en color amarillo en la Fig. 2.24 debe contar con perforaciones en su extremo inferior, tal como se presenta la Fig. 2.25 con una marca en forma de un círculo de color rojo.

En la sección 2.4 se citó que el elevador encargado de mantener la tensión en la banda obtendrá la fuerza necesaria para dicha acción, de dos cilindros neumáticos de doble efecto, estos cilindros disponen de una tuerca corrediza que permite desplazar el punto de apoyo de la varilla guía ~4 mm hacia arriba, o hacia abajo, esta tuerca se presenta en la Fig. 2.26.

De esta forma es posible ajustar la fuerza de tracción que los cilindros entregan a la banda plana de transmisión.

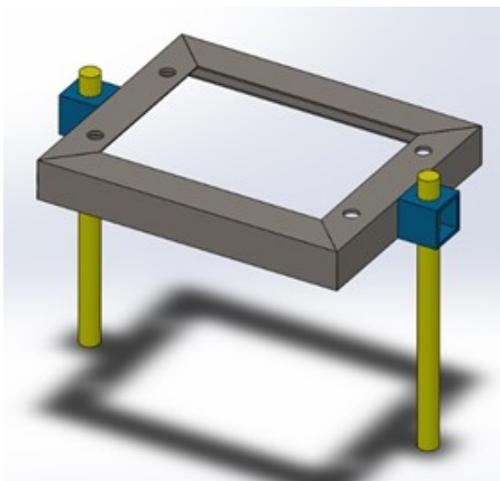


Fig. 2.24. Estructura, guías del elevador.

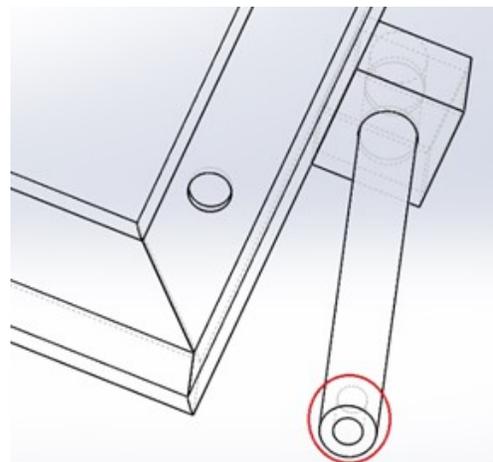


Fig. 2.25. Perforación en varilla guía del elevador.

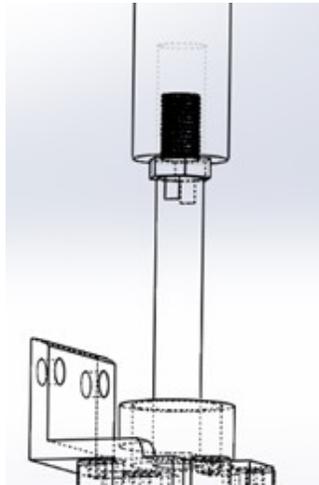


Fig. 2.26. Tuerca de ajuste.

f) Armazón

El armazón es la estructura principal de la máquina didáctica para forja en caliente, cumple la función de proporcionar apoyo a los rodillos citados en la sección 2.4, y a los rieles que se citan en la misma sección, así como también a los cilindros neumáticos de doble efecto que se utilizan para lograr el movimiento en la plataforma elevadora que se cita en la sección anterior.

El armazón debe estar fabricado a partir de tubería cuadrada de acero al carbono de 5 mm de espesor, y para los rieles que guían la plataforma que funge como masa del sistema se partirá de perfil angular de acero al carbono de 6 mm de espesor.

En la Fig. 2.27 se presenta una forma preliminar del armazón para esta propuesta de diseño y en la Fig. 2.28 se presenta todos los elementos descritos anteriormente acoplados al armazón.

El armazón debe contar con dos estructuras a base de tubería cuadrada de 5 mm de espesor y de tubería redonda cedula 40, ambos de acero al carbono, estas estructuras tienen la función de proporcionar apoyo y guía a las varillas descritas en la Fig. 2.24 y se presenta en la Fig. 2.29 en color rojo.

En la Fig. 2.30 se presenta en color verde uno de los eslabones del armazón, este desempeña la función de límite superior para la carrera del mazo

de trabajo, y en la misma figura, en color rojo se presenta el límite inferior entre ambas referencias debe haber 1 m, también en la Fig. 2.30 se presenta en color amarillo, los perfiles angulares que tienen la función de rieles para la masa de trabajo.



Fig. 2.27. Armazón.



Fig. 2.28. Máquina didáctica para forja en caliente.

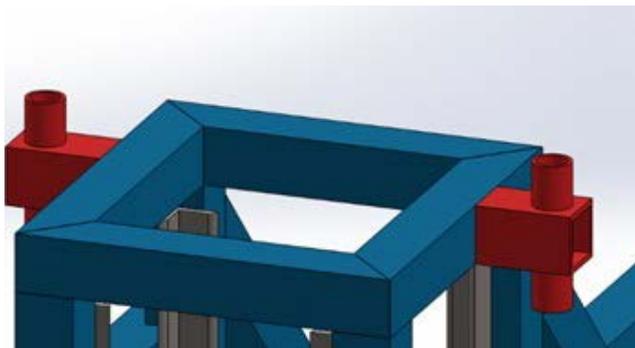


Fig. 2.29. Estructura guía para el elevador.

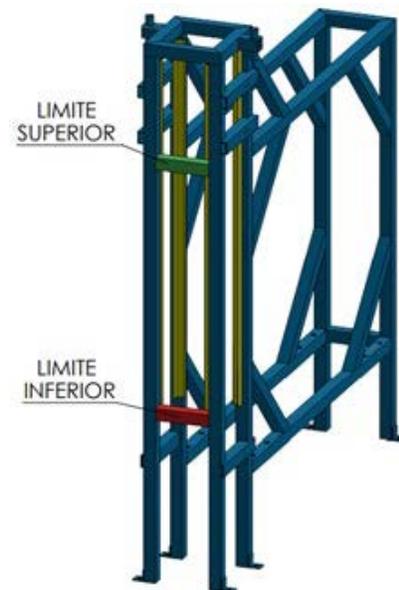


Fig. 2.30. Límite superior y límite inferior de la carrera de trabajo.

2.6. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS CRÍTICOS QUE CONFORMAN LA MÁQUINA DIDÁCTICA PARA FORJA EN CALIENTE

En este apartado se define el diseño de los elementos que conforman la máquina didáctica para forja en caliente, la selección y justificación de los materiales a utilizar para estos, procesos de fabricación, diseño de los métodos de unión entre las partes y dimensiones de las mismas.

2.7. MASA

En la sección 2.5 se describió que la masa de trabajo estará conformada por la masa de una plataforma, a modo de carrito y por la masa de dos acoples mecánicos entre la banda plana de transmisión y la plataforma.

A continuación, se calcula la masa del conjunto con la ayuda de un Software de diseño CAD, SolidWorks 2017 con el cual sólo se necesita modelar cada elemento que conforma el conjunto y asignarle el tipo de material.

Los materiales seleccionados corresponden a los que comúnmente se encuentran en el mercado nacional, y las partes de la plataforma se describen en la Tabla 2.1.

En la Tabla 2.2 se describen las partes que conforman cada acople mecánico.

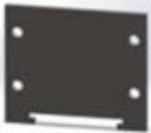
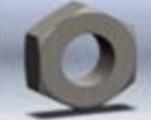
De esta manera, la suma del mazo de la plataforma y la masa de dos acoples mecánicos es de 20.13 kg.

En la sección 2.3 se determinó que la masa necesaria para obtener 40 kg_f de reacción en el golpe, al elevar el mazo 1 m y luego dejarlo caer es de 20 kg.

Tabla 2.1. Lista de partes que conforman la plataforma.

Parte	Descripción	Referencia	Material	Cantidad	Masa, kg
	Estructura principal de la plataforma a base de perfil angular de acero al carbono AISI	1	1008	1	5.85
	Estructura de apoyo para la cabeza del martillo a base de placa lisa de acero al carbono AISI	2	1008	1	2.96
	Muñón de apoyo para el rodamiento de acero al carbono AISI	3	1045	8	0.15
	Pasador de apoyo para acople mecánico superior de acero al carbono AISI	4	1045	1	0.87
	Pasador de apoyo para acople mecánico inferior de acero al carbono AISI	5	1045	1	0.48
	Alza para pasador de apoyo superior de acero al carbono AISI	6	1008	2	0.3
	Alza para pasador de apoyo inferior de acero al carbono AISI	7	1008	2	0.15
	Rodamiento de bolas para carga radial	8		8	0.03
	Anillo de retención	9		12	0.001
	Martillo	10		1	2.27
Masa tota =					14.78

Tabla 2.2. Lista de partes que conforman un acople mecánico.

Parte	Descripción	Referencia	Material	Cantidad	Masa, kg
	Placa de acero al carbono AISI	1	1008	2	0.97
	Placa de acero al carbono AISI	2	1008	1	0.4
	Placa de acero al carbono AISI	3	1008	2	0.03
	Tubo redondo de acero al carbono cedula 40	4	A500 grado A	1	0.25
	Perno M12 de 30 mm de largo	5		4	0.0053
	Tuerca M12	6		4	0.001
	Arandela plana	7		4	0.001
Masa total de un acople					2.68
Masa tota en dos acoples					5.35

2.8. SOLICITACIÓN DE CARGA

La masa deberá recorrer 1 m en 2 s para su elevación, por lo tanto, experimenta una aceleración que está dada por la Ec. 2.5 [8], así:

$$a = \frac{2X_f}{t^2} = \frac{(2)(1 \text{ m})}{(2 \text{ s})^2} = 0.50 \text{ m/s}^2 \quad (2.5)$$

En la Fig. 2.30 se presenta los diagramas de cuerpo libre y cinético de la masa en elevación.

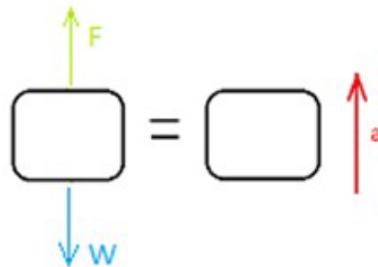


Fig. 2.31. Diagrama cinético y de cuerpo libre de la masa en elevación.

donde: F es la carga de tracción que experimenta la masa en el movimiento de elevación,

w es el peso de la masa, y

a es la aceleración que experimenta la masa en su movimiento de elevación.

Aplicando la segunda ley de Newton a los diagramas de la Fig. 2.31 se obtiene la Ec. 2.6, así:

$$F - w = m a \quad (2.6)$$

Despejando F se obtiene la Ec. 2.7.

$$F = m(g + a) \quad (2.7)$$

$$F = (20 \text{ kg}) \left(9.81 \text{ m/s}^2 + 0.5 \text{ m/s}^2 \right) = 206.20 \text{ N}$$

F es la fuerza necesaria para elevar la masa 1 m en 2 s en su movimiento de elevación.

2.9. SELECCIÓN DE BANDA PLANA DE TRANSMISIÓN

En la sección 2.4 se citó que el sistema encargado de elevar el mazo utiliza una banda plana de transmisión para ello, y se presenta en el esquema de la Fig. 2.6 como el elemento marcado con la referencia 1.

Los pasos de análisis para una transmisión por banda plana funcionando con tensión máxima permisible son los siguientes [7]:

1) Utilizando el coeficiente de fricción f entre la banda y la polea, y el ángulo de contacto entre ambos ϕ , se calcula mediante la Ec. 2.8.

$$\exp^{f\phi} = \exp^{(0.8)(2.1863 \text{ rad})} = 5.78 \quad (2.8)$$

En la Fig. 2.32 se presenta un esquema del rodillo impulsor junto con una sección de la banda plana de transmisión en el cual se logra apreciar el ángulo de contacto entre ambos.

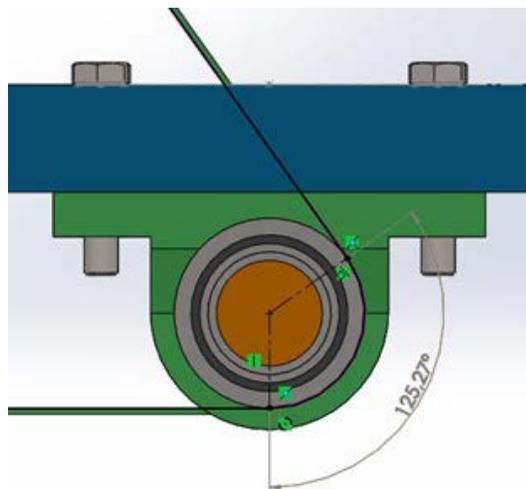


Fig. 2.32. Ángulo de contacto entre el rodillo impulsor y la banda plana de transmisión.

En la Tabla 2.3 se presenta las propiedades de algunos materiales utilizados para la fabricación de bandas planas y redondas, en la cual se puede observar el valor del coeficiente de fricción entre polea y banda correspondiente

a una banda de poliamida tipo A2, la cual se sugiere para esta propuesta de diseño.

Tabla 2.3. Propiedades del material poliamida utilizado para la fabricación de bandas planas y redondas [7].

Material	Especificación	Tamaño, pulg	Diámetro mínimo de la polea, pulg	Tensión permisible por ancho unitario a 600 pies/min, lb _f /pulg	Peso específico, Lb _f /pulg ³	coeficiente de fricción
Poliamida	F-0	0.003	0.60	10	0.035	0.5
	F-1	0.05	1.0	35	0.035	0.5
	F-2	0.07	2.4	60	0.051	0.5
	A-2	0.11	2.4	60	0.037	0.8
	A-3	0.13	4.3	100	0.042	0.8
	A-4	0.20	9.5	175	0.039	0.8
	A-5	0.25	13.5	275	0.039	0.8

2) A partir de la Ec. 2.9 se puede calcular la magnitud de la fuerza centrífuga que experimenta la banda por acción de la rotación [7].

$$F_c = \frac{w}{g} \left(\frac{v}{60} \right)^2 \quad (2.9)$$

donde: w es el peso por un pie de banda en lb_f/pie,

g es la aceleración de la gravedad en pie/min², y

v es la velocidad tangencial de la banda en pie/min.

La Ec. 2.10 se utiliza para calcular el peso por 1 pie de banda y la Ec. 2.11 se utiliza para calcular la velocidad tangencial de la banda, éstas son [7]:

$$w = 12\gamma tb \quad (2.10)$$

$$V = \sqrt{2ax} \quad (2.11)$$

donde: γ es el peso específico del material de banda en lb_f/pulg³, la cual se presenta en la Tabla 2.3;

t es el espesor de la banda, la cual se presenta en Tabla 2.3; y
 b es el ancho de la banda en pulg.

Así de la Ec. 2.10 se obtiene que:

$$w = 12 \left(0.037 \frac{Lb_f}{\text{pulg}^3} \right) (0.11 \text{pulg}) (4 \text{pulg}) = 0.20 \frac{Lb_f}{\text{pulg}}$$

De la Ec. 2.11 se obtiene la velocidad final que la masa adquiere al experimentar una aceleración constante de 0.5 m/s^2 tal como se expresa la Ec 2.5 [8].

$$v = \sqrt{2(0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1 \text{ m})} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 196.90 \text{pie}/\text{min}$$

Sustituyendo los resultados de las Ecs. 2.10 y 2.11 en la Ec. 2.9 se obtiene que la fuerza centrífuga que la banda experimenta.

$$F_c = \frac{0.20 \frac{Lb_f}{\text{pie}}}{32.17 \frac{\text{pie}}{\text{min}^2}} \left(\frac{196.90 \text{pie}/\text{min}}{60} \right)^2 (4.448 \text{ N}/Lb_f) = 0.30 \text{ N}$$

3) El par de torsión necesario para elevar la carga se define por medio de la Ec. 2.12.

$$T = F \left(\frac{d}{2} \right) \quad (2.12)$$

donde: F es la fuerza de tracción necesaria para elevar la carga, y
 d es diámetro de la polea impulsora.

El diámetro de la polea impulsora o rodillo impulsor es de 3.5 pulg, en la sección 2.4, Fig. 2.6, se presenta el elemento marcado con la referencia número 3.

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ec. 2.12 se obtiene el torque necesario para elevar la carga.

$$T = (206.2 \text{ N}) \left(\frac{0.09 \text{ m}}{2} \right) = 9.30 \text{ N}\cdot\text{m}$$

4) A partir del par de torsión se conoce la diferencia representada por la Ec. 2.13 [7].

$$(F_1)_a - F_2 = \frac{2T}{d} \quad (2.13)$$

donde: $(F_1)_a$ es la tensión permisible máxima, y

F_2 es la tensión en el lado holgado de la banda.

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ec. 2.12 se obtiene.

$$(F_1)_a - F_2 = \frac{2T}{d} = \frac{2(9.3 \text{ N}\cdot\text{m})}{0.09 \text{ m}} = 206.60 \text{ N}$$

El resultado de la Ec. 2.13 concuerda con el obtenido en la Ec. 2.7.

5) A continuación, se calcula $(F_1)_a$ a partir de la Ec. 2.14 [7].

$$(F_1)_a = bF_a C_p C_v \quad (2.14)$$

donde: b es el ancho de la banda en pulg,

F_a es la tensión permitida recomendada en lb \bar{f} /pulg,

C_p es el factor de corrección de la polea

C_v es el factor de corrección de velocidad, que es 1 para bandas de poliamida.

En la Tabla 2.4 se presenta valores para el factor de corrección de la polea [7].

Tabla 2.4. Factor de corrección de la polea C_v para bandas planas [7].

Material		Diámetro de la polea menor, pulg					
		1.6 a 4	4.5 a 8	9 a 12.5	14 a 16	18 a 31.5	Más de 31.5
Cuero		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Poliamida	F-0	0.95	1.0	1.0	1.0	1.	1.0
	F-1	0.70	0.92	0.95	1	1.0	1.0
	F-2	0.73	0.86	0.96	1.0	1.0	1.0
	A-2	0.73	0.86	0.96	1.0	1.0	1.0
	A-3	---	0.7	0.87	0.94	0.96	1.0
	A-4	---	---	0.71	0.80	0.85	0.92
	A-5	---	---	---	0.72	0.77	0.91

Sustituyendo los valores correspondientes de la Tabla 2.3 en la Ec. 2.12 para un ancho de la banda de 3 pulg, se obtiene.

$$(F_1)_a = (4 \text{ pulg}) \left(60 \frac{\text{lb}_f}{\text{pulg}} \right) (0.73)(1)(4.448 \text{ N/Lb}_f) = 779.30 \text{ N}$$

6) A partir de la Ec. 2.15 se calcula la fuerza en el lado holgado de la polea o rodillo impulsor [7].

$$F_2 = (F_1)_a - [(F_1)_a - F_2] = 779.3 \text{ N} - 206.6 \text{ N} = 572.70 \text{ N} \quad (2.15)$$

7) La tensión inicial necesaria para que la banda plana transmita el torque de elevación a la carga está dada por la Ec. 2.16 [7].

$$F_i = \frac{(F_1)_a + F_2}{2} = \frac{779.33 \text{ N} + 572.73 \text{ N}}{2} = 676 \text{ N} \quad (2.16)$$

8) La Ec. 2.17 se utiliza para verificar el desarrollo de la fricción entre la banda y la polea de transmisión [7].

$$f' < f \quad (2.17)$$

$$f' = \frac{1}{\phi} \ln \left(\frac{(F_1)_a - F_c}{F_2 - F_c} \right) = \frac{1}{2.1863 \text{ rad}} \ln \left(\frac{779.33 \text{ N} - 0.3 \text{ N}}{572.73 \text{ N} - 0.3 \text{ N}} \right) = 0.14 \quad (2.18)$$

Según la Tabla 2.3 el coeficiente de fricción para una banda de poliamida tipo A2 es de 0.8, por lo tanto, se verifica el desarrollo de la fricción para el trabajo a tensión máxima permisible.

$$f' < f$$

$$0.14 < 0.8$$

La Ec. 2.19 se denomina ecuación de bandas, y expresa la relación entre la magnitud de la fuerza en el lado tenso F_1 y del lado holgado F_2 en una banda de transmisión [7].

$$\frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} = \exp^{f\phi} \quad (2.19)$$

Sustituyendo para $\exp^{f\phi}$ según las Ec. 2.8 y Ec. 2.9 se obtiene lo siguiente.

$$\frac{F_1 - 0.3 \text{ N}}{F_2 - 0.3 \text{ N}} = 5.78$$

Luego simultaneando la Ec. 2.13 con la Ec. 2.19, se obtiene:

$$F_1 - F_2 = \frac{2T}{d} = 206.6 \text{ N}$$

$$F_1 = 250 \text{ N}$$

$$F_2 = 44 \text{ N}$$

Comparando el resultado de F_1 con el resultado de $(F_1)_a$, que se refleja en el resultado de la Ec. 2.14 se puede determinar que una banda plana de transmisión de poliamida tipo A2 es una selección adecuada para esta propuesta de diseño.

2.10. PASADORES DE APOYO PARA ACOPLES MECÁNICOS

En la Fig. 2.33 se presenta el diagrama de cuerpo libre del elemento marcado con la referencia 4 en la Tabla 2.1, el cual funge de pasador de apoyo para el acople mecánico superior entre la masa y la banda plana de transmisión.

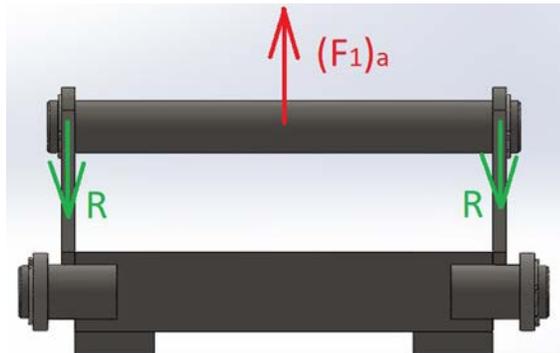


Fig. 2.33. Diagrama de cuerpo libre para el pasador de apoyo para el acople mecánico superior.

El esfuerzo de flexión máximo sobre un elemento recto está determinado por la Ec. 2.20 [7].

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.20)$$

donde: M es el momento flector en el punto de aplicación de la fuerza, c es el radio del pasador, y

I es el momento de inercia del área transversal del pasador respecto a su eje neutro.

La Ec. 2.21 determina el momento de flexión en el elemento recto.

$$M = (d)((F_1)_a) = (0.10 \text{ m})(779.33 \text{ N}) = 77.93 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (2.21)$$

La Ec. 2.22 determina el momento de inercia del área transversal del pasador respecto a su eje neutro para un diámetro de pieza de 0.03 m.

$$c = \frac{\pi}{4} (0.015 \text{ m})^4 = 3.97 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \quad (2.22)$$

Sustituyendo los valores obtenidos de las Ecs. 2.21 y Ec. 2.22 en la Ec. 2.20 se obtiene.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{(77.93 \text{ N} \cdot \text{m})(0.015 \text{ m})}{3.97 \times 10^{-8} \text{ m}^4} = 29.44 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.23 se utiliza para evaluar el factor de seguridad en fatiga [7].

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \quad (2.23)$$

donde: σ_a es la componente de amplitud del esfuerzo,

σ_m es la componente de esfuerzo medio,

S_e es el límite de resistencia a la fatiga,

S_{ut} es el esfuerzo último a la tracción del material, y

n es el factor de seguridad.

La Ec. 2.24 se utiliza para calcular la componente de amplitud del esfuerzo [7].

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{29.44 \text{ MPa} - 0}{2} \right| = 14.72 \text{ MPa} \quad (2.24)$$

La Ec. 2.25 se utiliza para calcular la componente media del esfuerzo [7].

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{29.44 \text{ MPa} + 0}{2} = 14.72 \text{ MPa} \quad (2.25)$$

La Ec. 2.26 se utiliza para calcular el límite de resistencia a la fatiga para un acero AISI 1045 seleccionado [7].

$$S_e = 0.5 S_{ut} = 0.5(1580 \text{ MPa}) = 790 \text{ MPa} \quad (2.26)$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ec. 2.23 y despejando el factor de seguridad, se obtiene.

$$\frac{1}{n} = \frac{14.72 \text{ MPa}}{790 \text{ MPa}} + \frac{14.72 \text{ MPa}}{1580 \text{ MPa}}$$

$$n = 36.$$

En la Fig. 2.34 se presenta el diagrama de cuerpo libre del elemento marcado con la referencia 5 en la Tabla 2.1, el cual funge de pasador de apoyo para el acople mecanıco inferior entre la masa y la banda plana de transmisión.

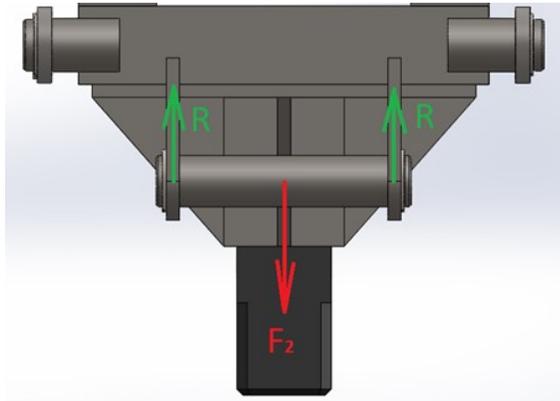


Fig. 2.34. Diagrama de cuerpo libre, pasador de apoyo para acople mecánico inferior.

Se utiliza la Ec. 2.20 para calcular el esfuerzo de flexión máximo en el elemento y se evalúa con el valor obtenido para F_2 que resulta de la Ec 2.15.

La Ec. 2.21 se utiliza para calcular el momento de flexión que la fuerza F_2 produce y la Ec. 2.22 se utiliza para calcular el momento de inercia con respecto al eje neutro de la pieza.

$$M = (d)(F_2) = (0.06m)(572.73N) = 34.36 N.m$$

$$I = \frac{\pi}{4}c^4 = \frac{\pi}{4}(0.015 m)^4 = 3.97 \times 10^{-8} m^4$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} = \frac{(34.36 N.m)(0.015 m)}{3.97 \times 10^{-8} m^4} = 12.98 MPa$$

La Ec. 2.24 se utiliza para calcular la componente de amplitud del esfuerzo [7].

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{12.98 MPa - 0}{2} \right| = 6.50 MPa$$

La Ec. 2.25 se utiliza para calcular la componente media del esfuerzo [7].

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{12.98 \text{ MPa} + 0}{2} = 6.50 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.26 se utiliza para calcular el límite de resistencia a la fatiga para un acero AISI 1045 seleccionado [7].

$$S_e = 0.5 S_{ut} = 0.5(1580 \text{ MPa}) = 790 \text{ MPa}$$

Sustituyendo los valores correspondientes de los cálculos anteriores en la Ec. 2.23 y despejando el factor de seguridad se obtiene.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{6.5 \text{ MPa}}{790 \text{ MPa}} + \frac{6.5 \text{ MPa}}{1580 \text{ MPa}}$$

$$n = 81$$

2.11. ALZAS PARA PASADORES DE APOYO

En la Fig. 2.35 se presenta el diagrama de cuerpo libre del elemento marcado con la referencia 6 en la Tabla 2.1, el cual funge de alza para el pasador de apoyo superior que se presenta en la misma tabla.

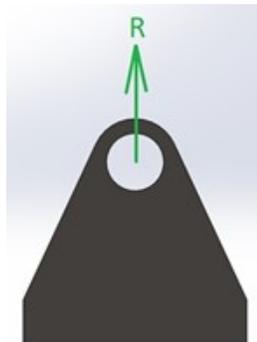


Fig. 2.35. Diagrama de cuerpo libre, alza para pasador de apoyo, acople mecánico superior.

Del diagrama de cuerpo libre de la Fig. 2.35 se obtiene el resultado de la reacción R y se calcula mediante la Ec. 2.27.

$$-2R + (F_1)_a = 0 \quad (2.27)$$

$$R = \frac{(F_1)_a}{2} = \frac{779.33 \text{ N}}{2} = 389.66 \text{ N}$$

El esfuerzo cortante máximo en el elemento se calcula mediante la Ec. 2.28.

$$\tau = \frac{R}{A} = \frac{389.66 \text{ N}}{(0.0064 \text{ m})(0.0064 \text{ m})} = 9.51 \text{ MPa} \quad (2.28)$$

donde: A es el área de la sección transversal del elemento sometida a cortante.

La Ec. 2.24 se utiliza para calcular la componente de amplitud del esfuerzo [7].

$$\tau_a = \left| \frac{\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}}{2} \right| = \left| \frac{9.51 \text{ MPa} - 0}{2} \right| = 4.775 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.25 se utiliza para calcular la componente media del esfuerzo [7].

$$\tau_m = \frac{\tau_{\text{máx}} + \tau_{\text{mín}}}{2} = \frac{9.51 \text{ MPa} + 0}{2} = 4.755 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.26 se utiliza para calcular el límite de resistencia a la fatiga para un acero AISI 1008 seleccionado [7].

$$S_e = 0.5S_{ut} = 0.5(400 \text{ MPa}) = 200 \text{ MPa}$$

Sustituyendo los valores correspondientes de los cálculos anteriores en la Ec. 2.23 y despejando el factor de seguridad se obtiene.

$$\frac{1}{n} = \frac{\tau_a}{S_e} + \frac{\tau_m}{S_{ut}} = \frac{4.775 \text{ MPa}}{200 \text{ MPa}} + \frac{4.775 \text{ MPa}}{400 \text{ MPa}}$$

$$n = 28.$$

En la Fig. 2.36 se presenta el diagrama de cuerpo libre del elemento marcado con la referencia 7 en la Tabla 2.1, el cual funge de alza para el pasador de apoyo inferior que se presenta en la misma tabla.

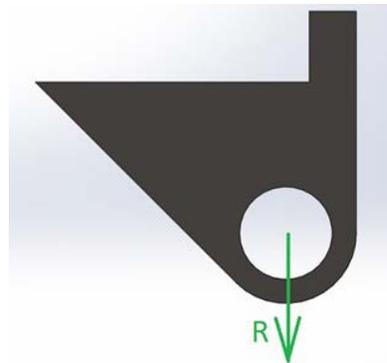


Fig. 2.36. Diagrama de cuerpo libre, alza para pasador de apoyo, acople mecánico inferior.

Del diagrama de cuerpo libre de la Fig. 2.36 se obtiene el resultado de la reacción R y se calcula mediante la Ec. 2.29.

$$-2R + F_2 = 0 \tag{2.29}$$

$$R = \frac{F_2}{2} = \frac{572.73 \text{ N}}{2} = 286.36 \text{ N}$$

El esfuerzo cortante máximo en el elemento se calcula mediante la Ec. 2.28.

$$\tau = \frac{R}{A} = \frac{286.36 \text{ N}}{(0.0064 \text{ m})(0.0064 \text{ m})} = 6.99 \text{ MPa}$$

donde: A es el área de sección transversal del elemento sometida a cortante.

La Ec. 2.24 se utiliza para calcular la componente de amplitud del esfuerzo [7].

$$\tau_a = \left| \frac{\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}}{2} \right| = \left| \frac{6.99 \text{ MPa} - 0}{2} \right| = 3.50 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.25 se utiliza para calcular la componente media del esfuerzo [7].

$$\tau_m = \frac{\tau_{\text{máx}} + \tau_{\text{mín}}}{2} = \frac{6.99 \text{ MPa} + 0}{2} = 3.50 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.26 se utiliza para calcular el límite de resistencia a la fatiga para un acero AISI 1008 seleccionado [7].

$$S_e = 0.5 S_{ut} = 0.5(400 \text{ MPa}) = 200 \text{ MPa}$$

Sustituyendo los valores correspondientes de los cálculos anteriores en la Ec. 2.23 y despejando para factor de seguridad se obtiene.

$$\frac{1}{n} = \frac{\tau_a}{S_e} + \frac{\tau_m}{S_{ut}} = \frac{3.5 \text{ MPa}}{200 \text{ MPa}} + \frac{3.5 \text{ MPa}}{400 \text{ MPa}}$$

$$n = 38.$$

2.12. ACOPLES MECÁNICOS

En la Fig. 2.37 se presenta el diagrama de cuerpo libre del elemento marcado con la referencia 1 en la Tabla 2.2, el cual forma parte del acople mecánico superior entre la banda de transmisión y la masa.

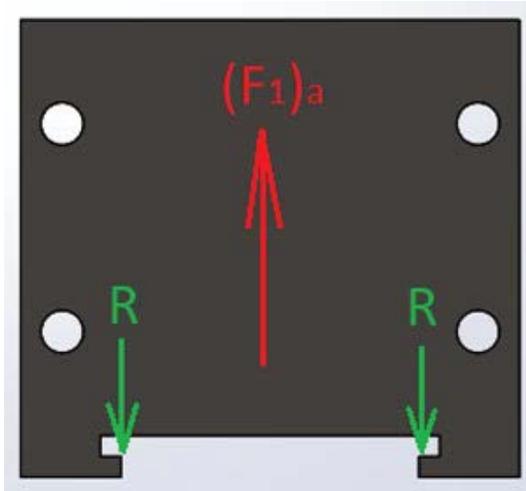


Fig. 2.37. Diagrama de cuerpo libre, placa de apoyo, acople mecánico superior.

Del diagrama de cuerpo libre de la Fig. 2.37 se obtiene el resultado de la reacción R y se calcula mediante la Ec. 2.29.

$$-2R + (F_1)_a = 0$$

$$R = \frac{(F_1)_a}{2} = \frac{779.33\text{ N}}{2} = 389.66\text{ N}$$

El esfuerzo de flexión máximo sobre un elemento recto está determinado por la Ec. 2.20 [7]. Además, mediante la Ec. 2.21 se determina el momento de flexión en el elemento recto, así:

$$M = (d)((F_1)_a) = (0.0064\text{ m})(779.33\text{ N}) = 4.98\text{ N} \cdot \text{m}$$

La Ec. 2.22 determina el momento de inercia del área transversal de la sección del material encargada de soportar la fuerza de reacción con respecto a su eje neutro, para una sección transversal de $h = 0.013m$ y $b = 0.0064m$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}(0.0064\text{ m})(0.013\text{ m})^3 = 1.17 \times 10^{-9}\text{ m}^4$$

Sustituyendo los valores obtenidos de las Ecs. 2.21 y 2.22 en la Ec. 2.20 se obtiene:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{(4.98\text{ N} \cdot \text{m})(0.0064\text{ m})}{1.17 \times 10^{-9}\text{ m}^4} = 27.24\text{ MPa}$$

La Ec. 2.23 se utiliza para evaluar el factor de seguridad en fatiga [7].

La Ec. 2.24 se utiliza para calcular la componente de amplitud del esfuerzo, así [7]:

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{27.24\text{ MPa} - 0}{2} \right| = 13.62\text{ MPa}$$

La Ec. 2.25 se utiliza para calcular la componente media del esfuerzo, así [7]:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{27.24\text{ MPa} + 0}{2} = 13.62\text{ MPa}$$

La Ec. 2.26 se utiliza para calcular el límite de resistencia a la fatiga para un acero AISI 1008 seleccionado, así [7]:

$$S_e = 0.5S_{ut} = 0.5(400\text{ MPa}) = 200\text{ MPa}$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ec. 2.23 y despejando el factor de seguridad se obtiene.

$$\frac{1}{n} = \frac{13.62 \text{ MPa}}{200 \text{ MPa}} + \frac{13.62 \text{ MPa}}{400 \text{ MPa}}$$

$$n = 9.8$$

En la Fig. 2.38 se presenta el diagrama de cuerpo libre del elemento marcado con la referencia 1 en la Tabla 2.2, el cual forma parte del acople mecánico inferior entre la banda de transmisión y la masa.

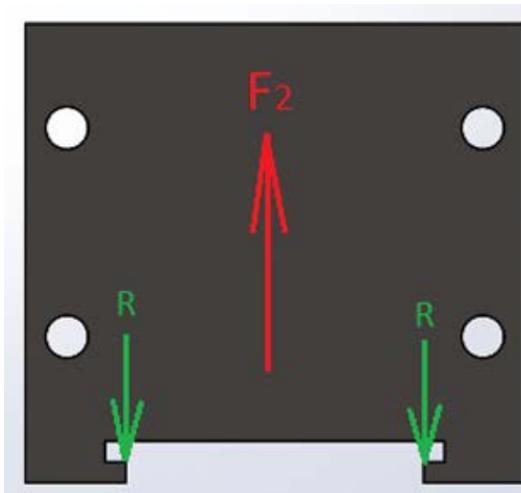


Fig. 2.38. Diagrama de cuerpo libre, placa de apoyo, acople mecánico inferior.

Del diagrama de cuerpo libre de la Fig. 2.38 se obtiene el resultado de la reacción R y se calcula mediante la Ec. 2.27.

$$R = \frac{F_2}{2} = \frac{572.73 \text{ N}}{2} = 286.36 \text{ N}$$

El esfuerzo de flexión máximo sobre un elemento recto se determina mediante la Ec. 2.20. Además, con la Ec. 2.21 se determina el momento de flexión en el elemento recto, así:

$$M = (d)(F_2) = (0.0064 \text{ m})(572.73 \text{ N}) = 3.66 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La Ec. 2.22 se determina el momento de inercia del área transversal de la sección de material encargada de soportar la fuerza de reacción con respecto a su eje neutro, para una sección transversal de $h = 0.013 \text{ m}$ y $b = 0.0064 \text{ m}$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}(0.0064 \text{ m})(0.013 \text{ m})^3 = 1.17 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Sustituyendo los valores obtenidos de las Ec. 2.21 y 2.22 en la Ec. 2.20, se obtiene.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} = \frac{(3.66 \text{ N} \cdot \text{m})(0.0064 \text{ m})}{1.17 \times 10^{-9} \text{ m}^4} = 20 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.23 se utiliza para evaluar el factor de seguridad en fatiga [7].

La Ec. 2.24 se utiliza para calcular la componente de amplitud del esfuerzo [7].

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{20 \text{ MPa} - 0}{2} \right| = 10 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.25 se utiliza para calcular la componente media del esfuerzo [7].

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{20 \text{ MPa} + 0}{2} = 10 \text{ MPa}$$

La Ec. 2.26 se utiliza para calcular el límite de resistencia a la fatiga para un acero AISI 1008 seleccionado [7].

$$S_e = 0.5S_{ut} = 0.5(400 \text{ MPa}) = 200 \text{ MPa}$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ec. 2.23 y despejando el factor de seguridad se obtiene.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{10 \text{ MPa}}{200 \text{ MPa}} + \frac{10 \text{ MPa}}{400 \text{ MPa}}$$
$$n = 13$$

3. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO

En este capítulo se realiza un análisis de los costos de todos los recursos empleados para construir una máquina didáctica para forja en caliente. Para realizar el análisis es preciso cotizar los precios de todos los componentes que se utilizarán en la construcción de la máquina. Las cotizaciones se obtuvieron de la forma más precisa posible.

3.1. COSTOS DEL PROYECTO

A continuación, se presenta el conglomerado de tablas, en las cuales, se especifican las piezas a conformar la máquina didáctica para forja en caliente, con su correspondiente valor monetario de su fabricación.

Es imperante que se consideren todas y cada una de las partes que constituyen la máquina, ya que así se puede establecer un valor total más exacto del costo que pueda implicar la construcción completa del equipo, como son soportes, estructuras, entre otros elementos.

Se dividirán en tablas los costos de materiales de fabricación y los costos de mano de obra, estas clasificadas de acuerdo a elementos y dependiendo a su naturaleza de la acción, para esta máquina, se tendrán los elementos mecánicos, de transmisión y estructurales.

Los costos de materiales para la fabricación de los elementos de la máquina se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Costos de materiales para la fabricación de elementos mecánicos, elementos de transmisión, elementos estructurales y de soporte.

Elemento		Costo Unitario, \$	Cantidad	Costo Total, \$
Perfiles de acero y láminas, utilizados para la fabricación del almacén, carrito, elevador y rodillos de la máquina	Tubo cuadrado estructural 2 x 2 x 3/16 pulg de 6 m de largo	122.43	5	612.15
	Ángulo estructural 1 ½ x 1 ½ x ¼ pulg de 6 m de largo	30.50	2	61.00
	Ángulo estructural 2 x 2 x 3/16 pulg de 6 m de largo	29.59	1	29.59
	Tubo redondo SCH 40 de 1" x 6 m de largo	33.50	1	33.50
	Perfil redondo SAE 1045 de 25 mm de diámetro x 400 mm de largo	10.4	3	31.20
	Perfil redondo SAE 1045 de 80 mm de diámetro x 125 mm de largo	18.75	6	112.50
	Tubo redondo SCH 40 de 3 pulg de diámetro x 6 m de largo	145	1	145.00
	lámina de acero estructural ¼ pulg de diámetro x 4x8 pies	282	1	282.00
Carrito - plataforma (masa)	Rodamiento para carga radial de 25 mm	7.50	8	60.00
	Seguro de retención 25 mm radio externo	0.30	12	3.60
	Electrodo para hierro dulce 3/32 pulg marca Lincoln E6013	2.35/lb	3	7.05
Elevador	Perno cabeza hexagonal 3/4 x 2 pulg	1.60	4	6.40
	Arandela de presión ¾ pulg	0.26	4	1.04
	Tuerca hexagonal ¾ pulg	1.25	4	5.00
	Electrodo para hierro dulce 3/32 pulg marca Lincoln E6013	2.35/lb	3	7.05
	cilindro neumático de doble efecto 32 mm de diámetro y 50 mm de carrera	218.20	2	436.40
	Perno cabeza hexagonal ¼ x 3 pulg	1.45	8	11.60
	Arandela de presión ¼ pulg	0.07	8	0.56
	chumacera de piso de 50 mm	21.80	2	43.60
	Tuerca hexagonal ¼ pulg	0.06	8	0.48

Continúa.

Continuación.- Tabla 4.1. Costos de materiales para la fabricación de elementos mecánicos, de corte, elementos de transmisión, elementos estructurales y de soporte.

Elemento		Costo Unitario, \$	Cantidad	Costo Total, \$
Acoples	Prisionero M3 x 8	3.50	2	7.00
	Perno cabeza hexagonal 7/16 x 1 ½ pulg	0.60	8	4.80
	Arandela plana 7/16 pulg	0.15	8	1.20
	Arandela de presión 7/16 pulg	0.10	8	0.80
	Tuerca hexagonal 7/16 pulg	0.22	8	1.76
	Electrodo para hierro dulce 3/32 pulg marca Lincoln E6013	2.35/lb	3	7.05
Rodillos de apoyo	Chumacera de piso de 50 mm	21.80	6	130.80
	Varilla roscada de ¾ x 3 pies de largo	33.95	2	67.90
	Tuerca hexagonal de ¾ pulg	1.25	8	10.00
	arandela de presión ¾ pulg	0.26	8	2.08
	Electrodo para hierro dulce 3/32 pulg marca Lincoln E6013	2.35/lb	3	7.05
Discos de corte y brocas	Broca escalonada HSS de 3/16 - 7/8 pulg	27.50	1	27.50
	disco de corte para acero inoxidable 4 ½ pulg	1.60	12	19.20
Banda plana de transmisión	Banda de transmisión de poliamida tipo A2 de 4 pulg de ancho	82/m ²	0.64 m ²	52.90
Total =				2222.71

En la Tabla 3.2 se presenta una estimación de los costos de mano de obra para la fabricación de los elementos principales de la máquina didáctica para forja en caliente, estos costos unitarios se calculan al obtener el tiempo del ciclo de trabajo para obtener la pieza multiplicado por el salario/hora del operario. Sin embargo también se tiene que recurrir a la experiencia propia pues se considera que el operario no mantiene un ritmo constante de producción, sino que se cansa hacia el final de cada turno, también se tiene que incluir la tolerancia requerida para que el operador atienda periódicamente sus necesidades naturales, y además se deberá tener en consideración la tolerancia para que la máquina se ajuste de vez en cuando, por razón de desgaste de las herramientas, o por el daño al herramental que sea preciso corregir.

Se considera un salario de \$800.00 mensuales para el operario a cargo de la fabricación de los elementos, considerando que trabaje de lunes a viernes y en una jornada de 8 horas, el salario por hora correspondiente es de \$3.33. Se duplica el costo total de mano de obra porque se consideran dos operarios a cargo de la fabricación de los elementos mecánicos.

Tabla 4.2. Costos de mano de obra.

Elemento		Tiempo de duración, h	C/U, \$	Can.	C/T, \$
Armazón	Diseño de ingeniería (Determinación de dimensiones y forma de cada una de las piezas que conforman el armazón principal de la máquina)	16	53.28	1	26.64
	Corte y perforación (cortar y perforar, según sea el caso, cada una de las piezas que conforman el armazón principal de la máquina)	8	26.64	1	26.64
	Armado (Armar la estructura y unir por medio de puntos de soldadura)	8	26.64	1	26.64
	Uniones (aplicar cordones de soldadura a las uniones en el armazón principal de la máquina)	8	26.64	1	26.64
Carrito - plataforma (masa)	Diseño de ingeniería (Diseño y determinación de las dimensiones y formas de cada una de las piezas que conforman la plataforma)	16	53.28	1	53.28
	Corte y soldadura de las piezas a base de placa de acero	8	26.64	1	26.64
	Corte, armado y soldadura de la estructura a base de perfil angular	8	26.64	1	26.64
	Maquinado de los muñones de apoyo y los pasadores de apoyo	4	13.32	1	13.32
	Soldadura de los muñones de apoyo	4	13.32	1	13.32

Continúa.

Continuación. - Tabla 4.2. Costos de mano de obra.

Elemento		Tiempo de duración, h	C/U, \$	Can.	C/T, \$
Elevador	Diseño de ingeniería (Diseño y determinación de las dimensiones y formas de cada una de las piezas que conforman el elevador)	8	26.64	1	26.64
	Corte y perforación (cortar y perforar, según sea el caso, cada una de las piezas que conforman la estructura a base de perfil angular y las barras guías del elevador)	8	26.64	1	26.64
	Armado (Armar la estructura y unir por medio de puntos de soldadura)	4	13.32	1	13.32
	Uniones (aplicar cordones de soldadura a las uniones)	4	13.32	1	13.32
	Maquinado de las secciones de eje sólido del rodillo del elevador	4	13.32	1	13.32
	armado del rodillo del elevador por medio de puntos de soldadura	4	13.32	1	13.32
	Unión por medio de cordones de soldadura a los elementos que conforman el rodillo del elevador	4	13.32	1	13.32
Acoples	Diseño de ingeniería (Diseño y determinación de las dimensiones y formas de cada una de las piezas que conforman los acoples mecánicos)	8	26.64	1	26.64
	Corte y soldadura de las piezas a base de placa de acero y tubería redonda SCH 40 de 1"	16	53.28	1	53.28
Rodillos de apoyo	Diseño de ingeniería (Diseño y determinación de las dimensiones y formas de cada una de las piezas que conforman los rodillos de apoyo para la banda plana de transmisión)	8	26.64	1	26.64
	Maquinado de las secciones de eje sólido	4	13.32	1	13.32
	Armado de los rodillos del por medio de puntos de soldadura	4	13.32	1	13.32
	Unión por medio de cordones de soldadura a los elementos que conforman los rodillos de apoyo para la banda plana de transmisión	4	13.32	1	13.32
Total =					506.16

En la Tabla 3.3 se presenta los costos indirectos, estos incluyen el costo por el consumo mensual de electricidad (electricidad de las máquinas, de las lámparas, ventilador/extractor del taller, entre otras), también incluye la depreciación de las máquinas, depreciación de las herramientas y otros gastos como papelería, herramientas menores, artículos de limpieza y seguridad.

Existieron otros elementos que se consideran como extra y son parte en su mayoría del mantenimiento de las máquinas herramientas a utilizar para el maquinado de las piezas, estos costos surgen en el camino como parte del proceso de fabricación de piezas como el armazón principal de la máquina, el elevador, la plataforma y los rodillos de apoyo y las partes que los conforman. Entre esos elementos se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3. Costos indirectos.

Elemento	Costo total, \$
Electricidad	80.00
Depreciación de las máquinas	120.00
Depreciación de las herramientas	50.00
Otros gastos	25.00
Total =	275.00

Tabla 3.4. Costos extras para fabricación de piezas.

Elemento	Costo unitario, \$	Cantidad	Costo total, \$
Buril cuadrado 5/8 x 5 pulg de cobalto	21.85	1	21.85
Aceite para introducir las piezas fabricadas y evitar corrosión de las mismas.	30	1	30.00
Total =			51.85

En la Tabla 3.5 se presenta un resumen con los costos totales de fabricación clasificados en materiales, costos de mano de obra y costos extra.

Tabla 3.5. Costos totales de fabricación por tipo de elemento.

Descripción del texto	C/t, \$
Costos de materiales	2222.71
Costos de mano de obra	506.16
Costos Indirectos	275.00
Costos extras para fabricación de piezas	51.85
Costo total de la máquina	3055.72

El costo total para la fabricación de la máquina didáctica para forja en caliente es de \$ 3055.72, tomando en consideración tanto materiales, mano de obra, costos indirectos y gastos imprevistos.

CONCLUSIONES

Finalizado el presente trabajo de graduación sobre el diseño de un equipo didáctico para forja en caliente, se puede concluir lo siguiente:

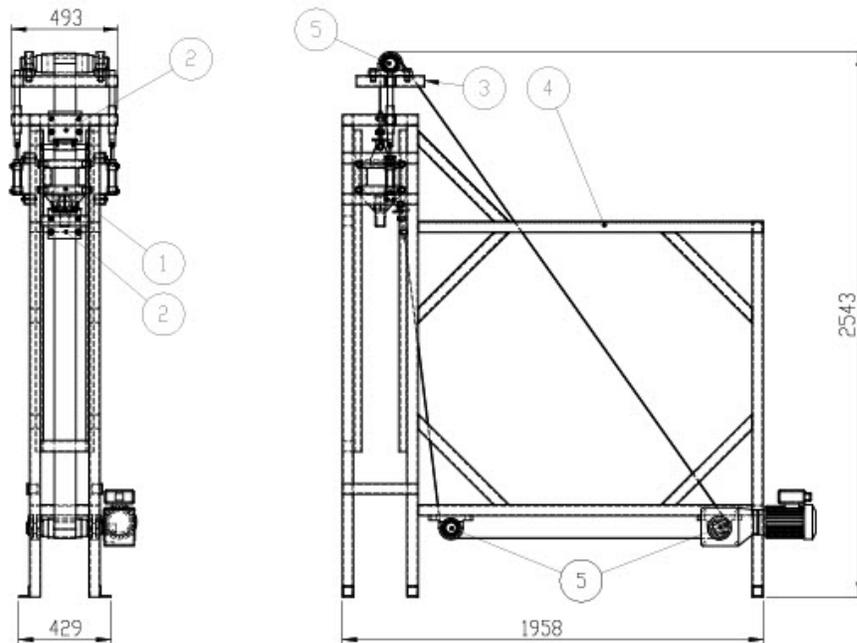
- Que se formuló una propuesta de diseño para una máquina didáctica para forja en caliente del tipo martillo de caída libre con el mecanismo para elevación de carga a base de una banda plana de transmisión, con materiales de común disposición en el territorio nacional.
- Que el costo total para la fabricación de una máquina para forja en caliente para uso didáctico es de \$ 3055.72 tomando en consideración materiales, mano de obra, costos indirectos, gastos imprevistos, y tiempos de fabricación.
- Que la rentabilidad del equipo no es medible económicamente ya que ha sido desarrollado para usos didácticos sin fines de lucro, más bien se encuentra relacionado con el beneficio académico que se espera lograr al ser implementado dentro de los equipos disponibles del taller mecánico para las prácticas de laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

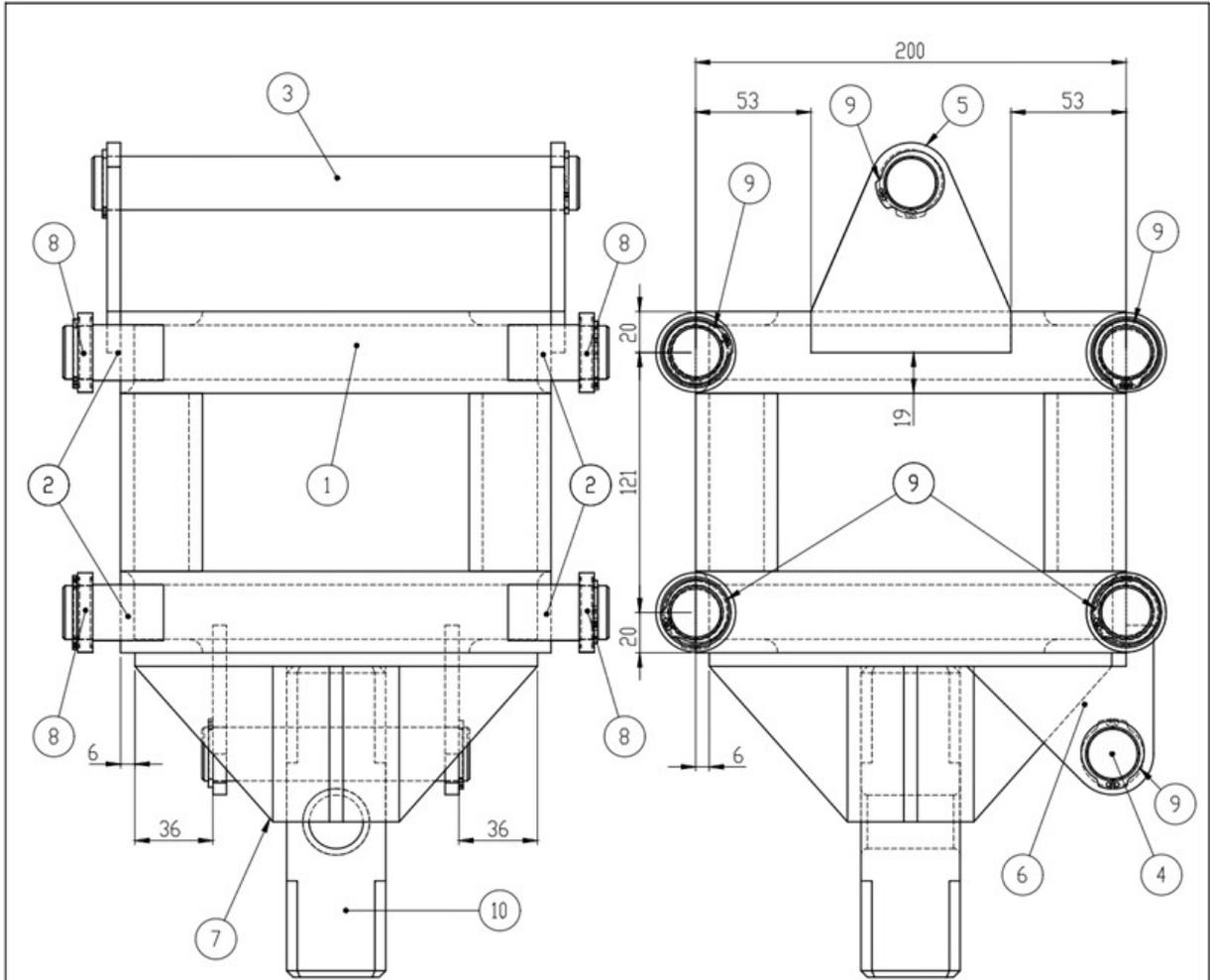
- [1] Del Rio, Jesús (2005). *conformación plástica de materiales metálicos (en frío y en caliente)*.
- [2] DeGarmo, E.Paul (1994). *Materiales y procesos de fabricación*. Barcelona España. Editorial REVERTE.
- [3] Dieter, George (1997). *Metalurgia mecánica*.
- [4] Ferrer-Giménez, C., y Amigó-Borrás, V. (2005). *Tecnología de materiales*. México. Alfaomega grupo editor.
- [5] Groover, Mikell P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México. McGraw-Hill.
- [6] Robert N. (2008). *Procesos de conformado mecánico*.
- [7] Budynas, Richard G., y Keith Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de shigley*. México. McGraw-Hill.
- [8] Hibbeler, R.C. (2008). *Mecánica vectorial para ingenieros dinámica*. México. McGraw-Hill.

ANEXOS

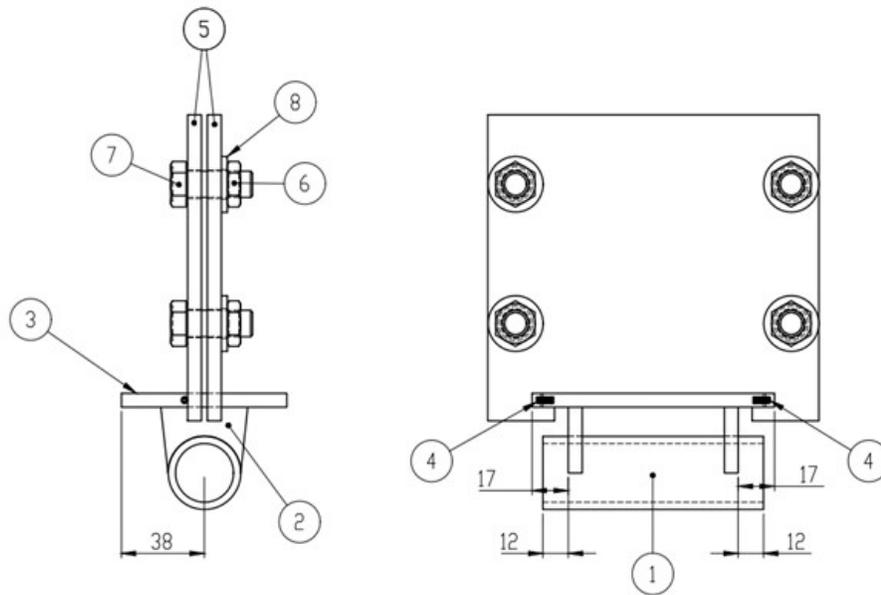
ANEXO A: PLANOS DE FABRICACIÓN



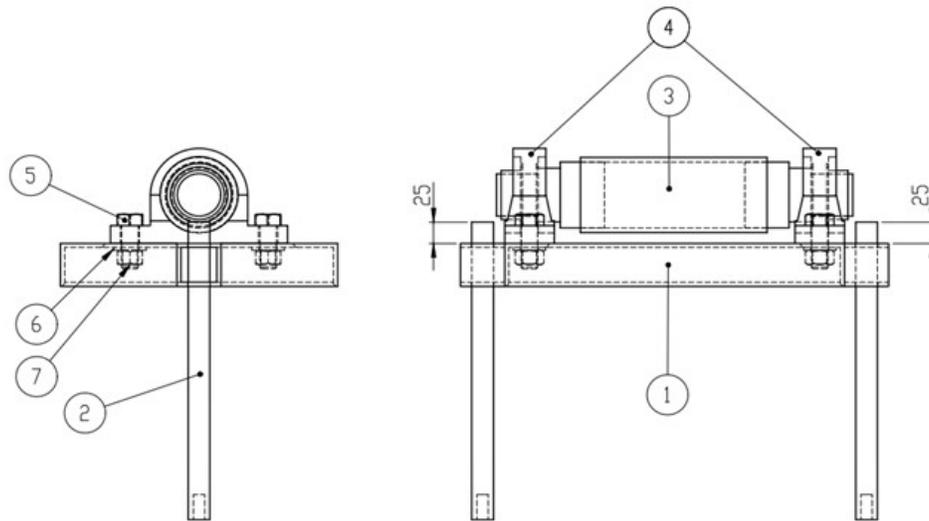
5	Rodillos de apoyo	Subconjunto 4
4	Armazón	DETALLE A
3	Elevador	Subconjunto 3
2	Acople mecánico	Subconjunto 2
1	Plataforma	Subconjunto 1
ITEM	Descripción	Especificaciones
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete
No DE PLANO PLANO A1	FECHA Mayo de 2022	CONJUNTO A1 : MÁQUINA PARA FORJA



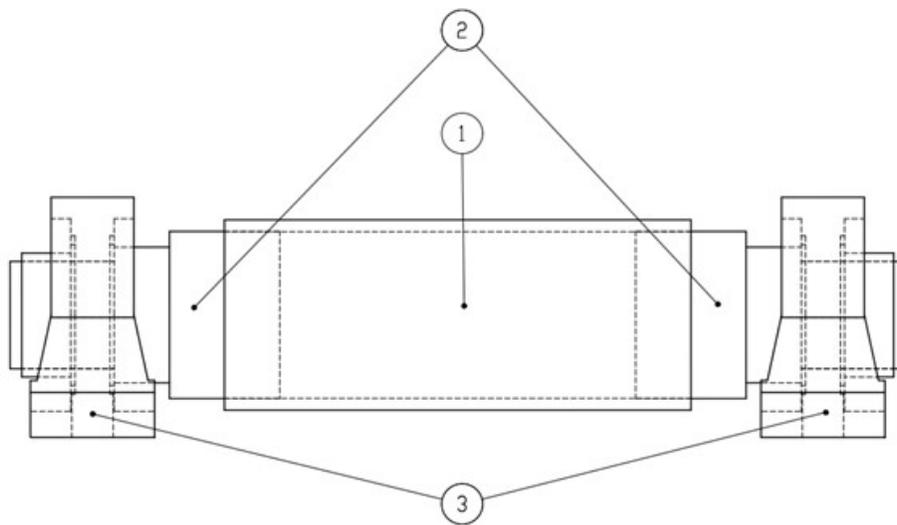
10	Cabeza de martillo	1
9	Seguro de retencion	12
8	Rodamiento	8
7	Estructura de apoyo para la cabeza del martillo	Detalle 1.7
6	Placa de alza inferior	Detalle 1.6
5	Placa de alza superior	Detalle 1.5
4	Pasador de apoyo para acople mecanico inferior	Detalle 1.4
3	Pasador de apoyo para acople mecanico superior	Detalle 1.3
2	Muñon de apoyo para rodamientos	Detalle 1.2
1	Estructura principal	Detalle 1.1
ÍTEM	Descripción	Especificaciones / cantidad
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		ESCALA 1:2
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathon Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete
No DE PLANO PLANO B1	FECHA Mayo de 2022	SUBCONJUNTO 1 : Masa - plataforma



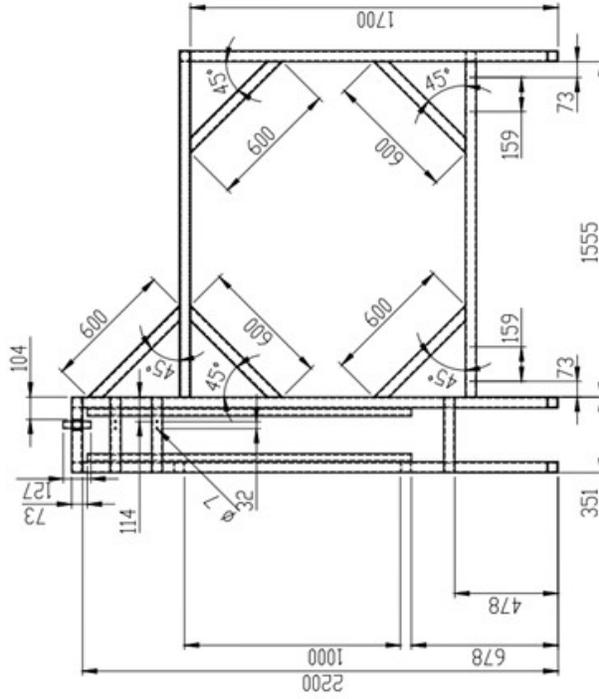
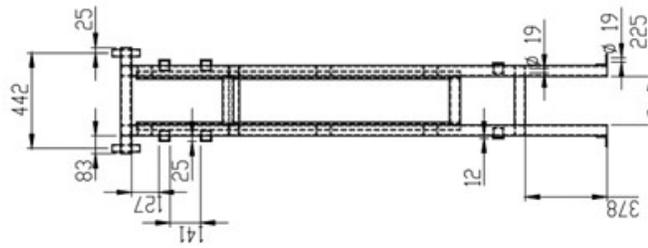
8	Arandela de presión 7/16"	8
7	Perno 7/16"	8
6	Tuerca 7/16"	8
5	Placa prensa deslizante	Detalle 2.4
4	Prisionero M3x8	4
3	Base	Detalle 2.3
2	Alza	Detalle 2.2
1	Camisa de acople para pasador de apoyo	Detalle 2.1
ÍTEM	Descripción	Especificaciones / cantidad
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD D E INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete
No DE PLAND PLAND B2	FECHA Mayo de 2022	SUBCONJUNTO 2 : ACOPLE MECÁNICO



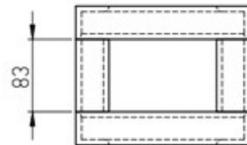
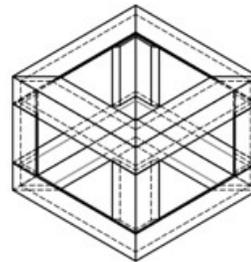
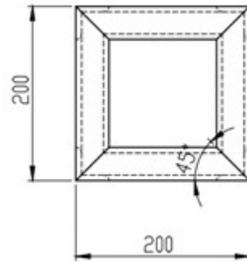
7	Tuerca 3/4"	4
6	Arandela de presión 3/4"	4
5	Perno 3/4"x2"	4
4	Chumacera de piso 50 mm	2
3	Rodillo de apoyo	subconjunto 4
2	Barra lisa directora	Detalle 3.2
1	Estructura	Detalle 3.1
ÍTEM	Descripción	Especificaciones/ cantidad
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete
No DE PLANO PLANO B3	FECHA Mayo de 2022	SUBCONJUNTO 3 : ELEVADOR
		ESCALA 1:5
		UNIDADES milímetros



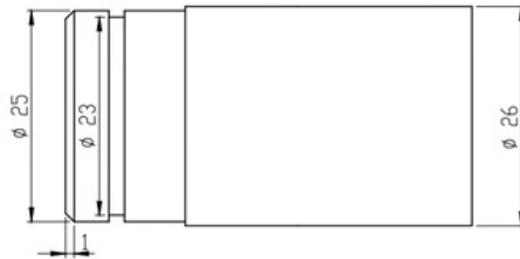
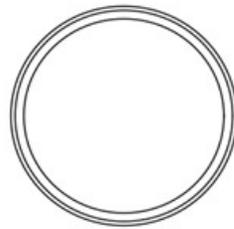
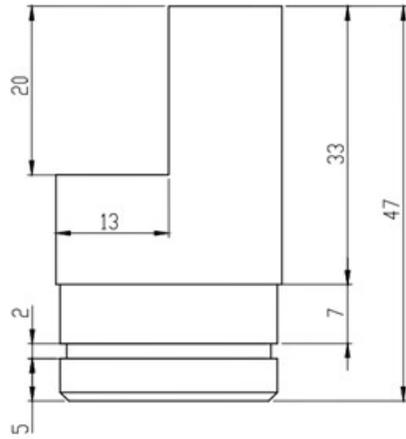
3	Chumacera de piso 50 mm	4
2	Sección eje sólido	Detalle 4.2
1	Sección eje hueco	Detalle 4.1
ÍTEM	Descripción	Especificaciones
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN - PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete
No DE PLANO PLANO B4	FECHA Mayo de 2022	SUBCONJUNTO 4 : RODILLO DE APOYO



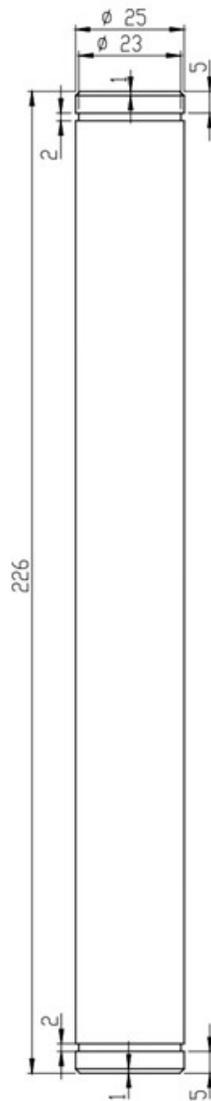
1	A36	MATERIAL EN BRUTO - TUBERIA CUADRADA 2"x2"x1/16"	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	TRABAJO DE GRADUACION - PROPIETA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJAR EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 1:20	
Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Dr-tiz	ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros	
No. DE PLANO PLANO C1	FECHA Mayo de 2022	DETALLE A : ARMAZÓN	



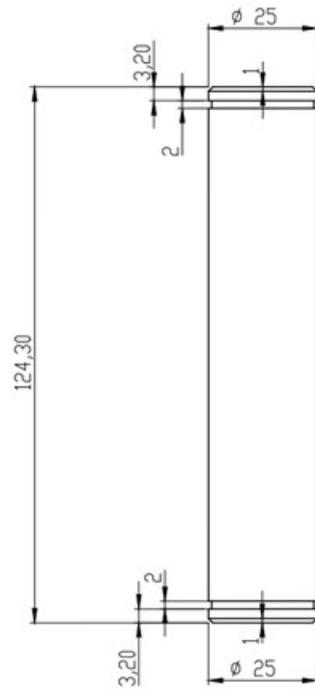
1	A 36	Material en bruto : perfil angular 1 1/2" x 1 1/2" x 1/4"
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA FORJAJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO	ESCALA 1:5
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz	ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO D1	FECHA Mayo de 2022	Detalle 1.1 estructura principal de la masa 



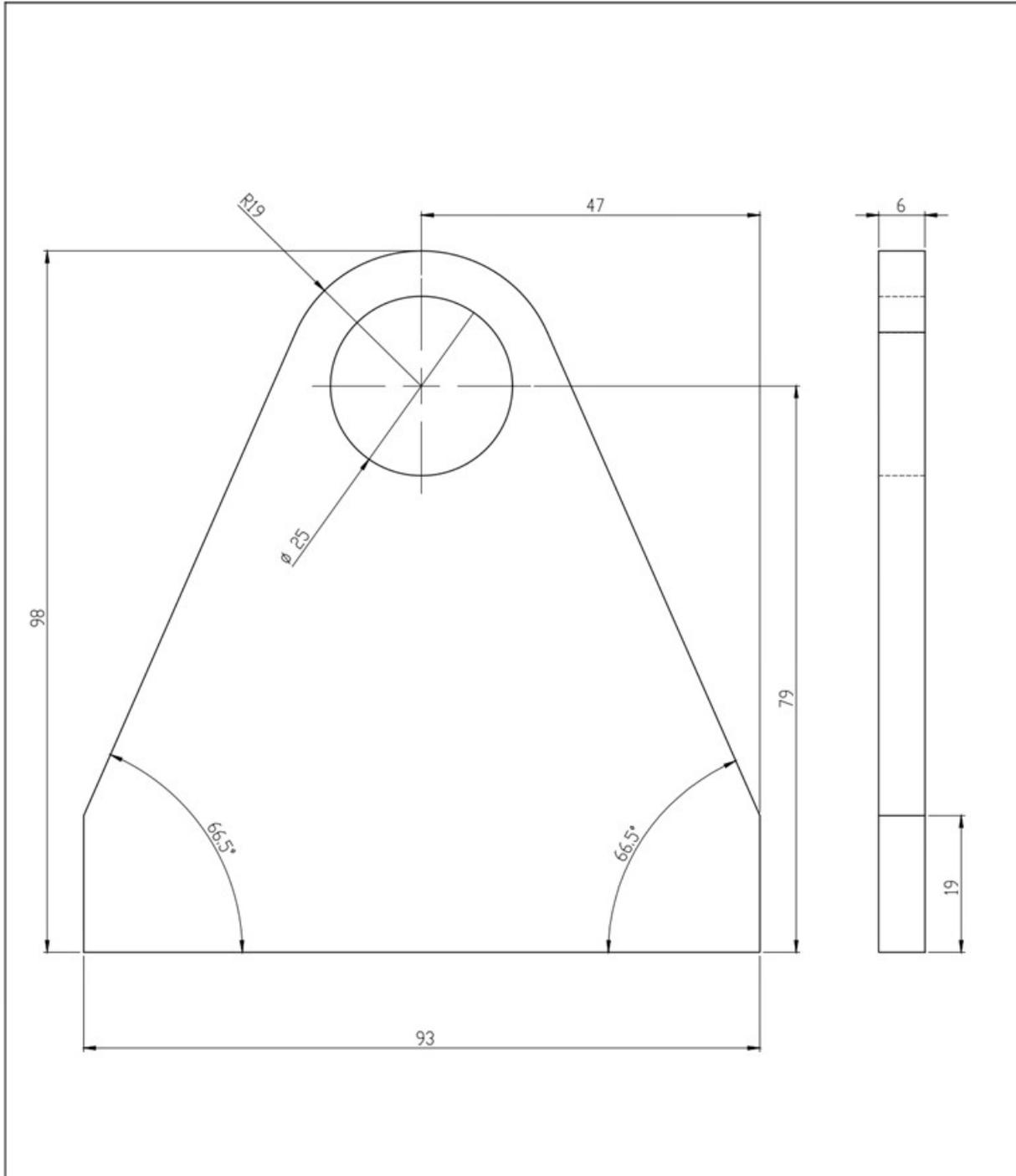
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
8	AISI 1020	Material en bruto : barra redonda de 30m de diámetro	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO D2	FECHA Mayo de 2022	Detalle 12 muñón de apoyo para rodamiento	



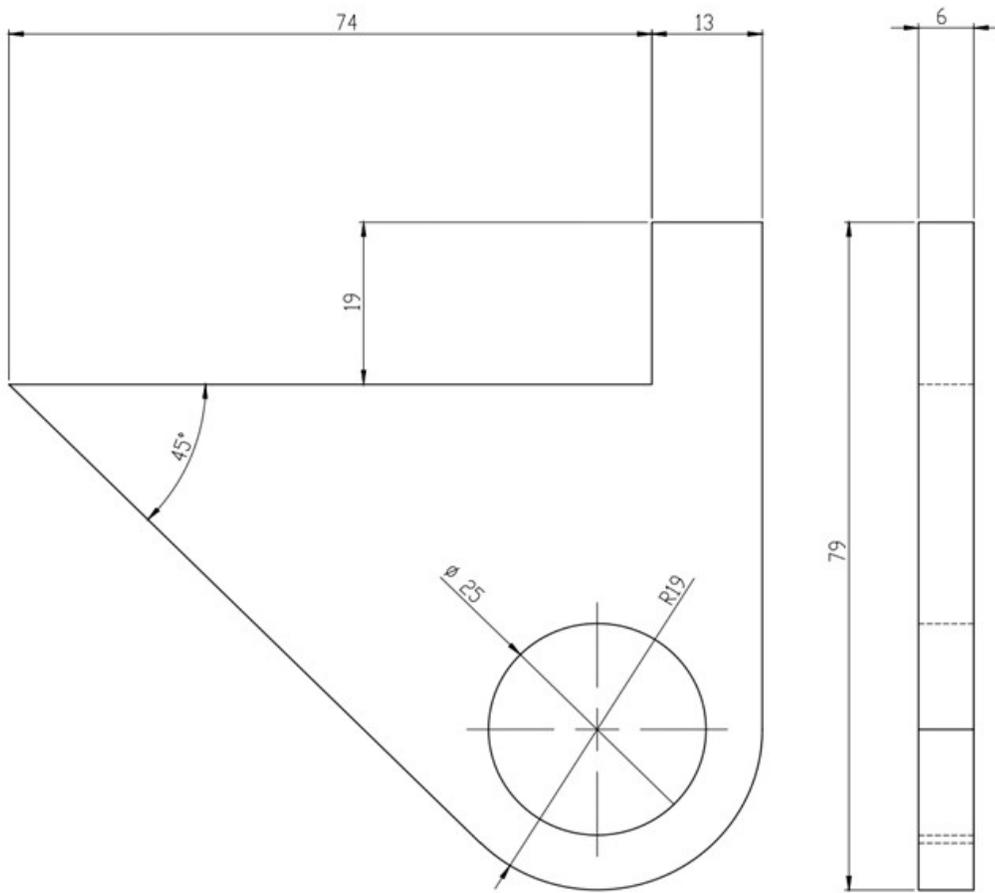
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
1	AISI 1020	Material en bruto : barra redonda de 30 mm de diámetro	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD D E INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO	ESCALA 1:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y MSc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO D3	FECHA Mayo de 2022	Detalle 1.3 Pasador de apoyo acople mecánico superior	



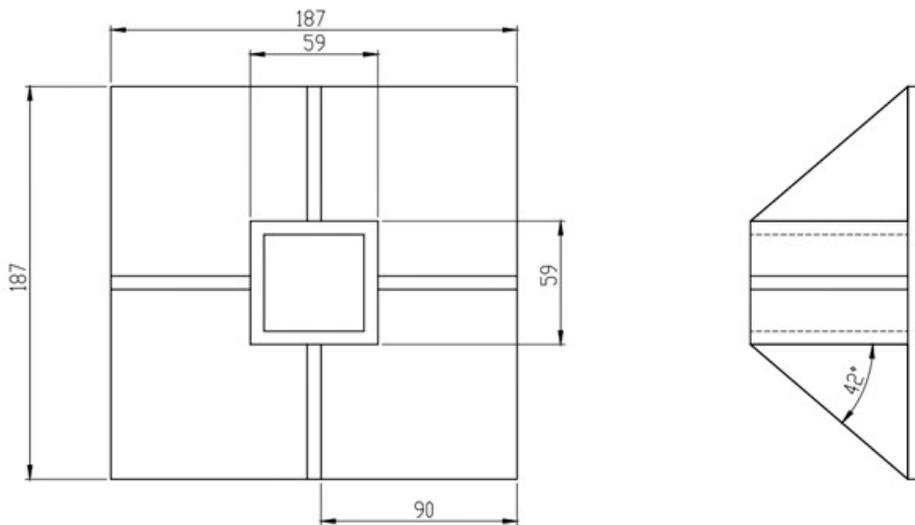
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
1	AISI 1020	Material en bruto : barra redonda de 30 mm de diámetro	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACION : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 1:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO D4	FECHA Mayo de 2022	Detalle 1.4 Pasador de apoyo acople mecánico inferior	



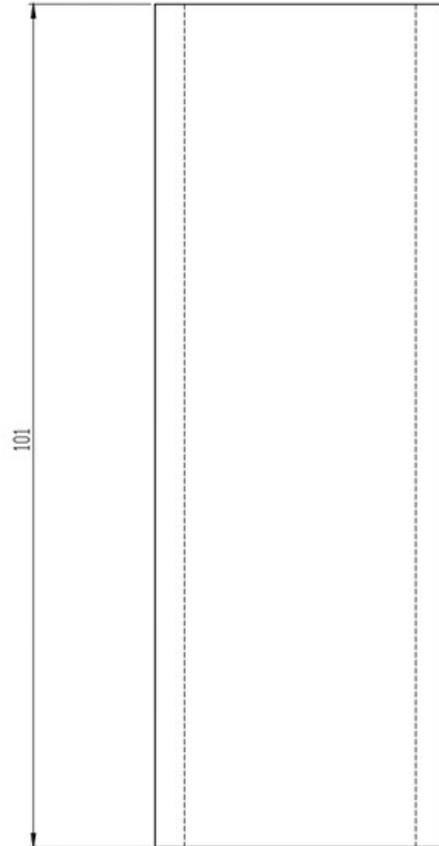
2	A 36	Material en bruto : placa de acero A 36 de 1/4" de espesor	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO D5	FECHA Mayo de 2022	Detalle 1.5 Placa de alza superior	



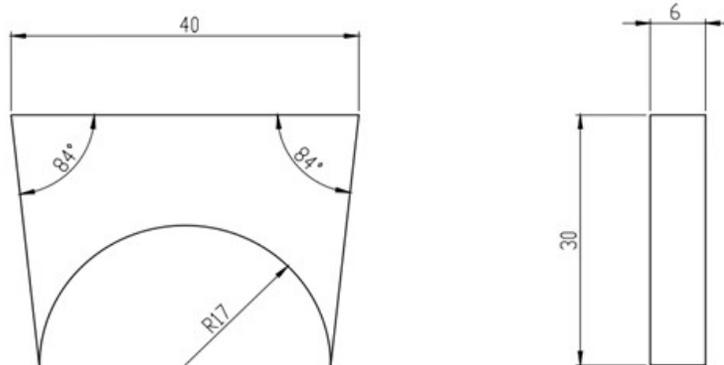
2	A 36	Material en bruto : placa de acero A 36 de 1/4" de espesor	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO D6	FECHA Mayo de 2022	Detalle 1.6 Placa de alza inferior	



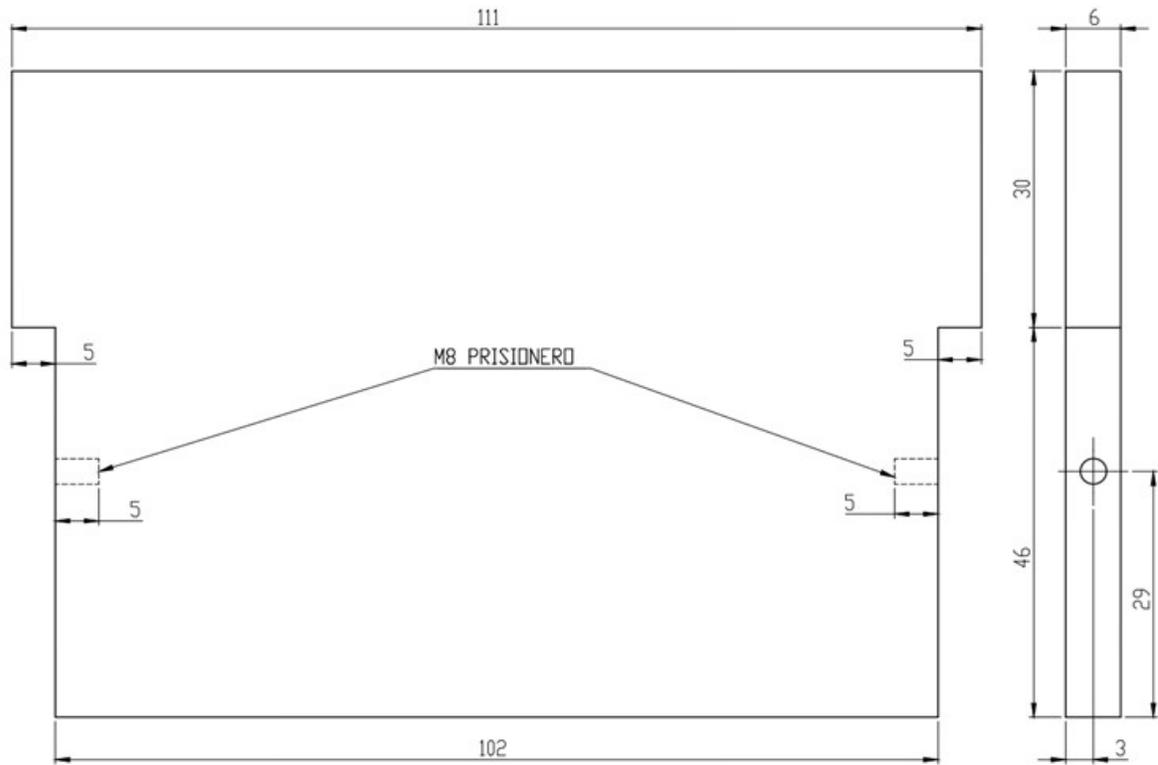
1	A 36	Material en bruto : placa de acero A36	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO D7	FECHA Mayo de 2022	Detalle 1:7 Estructura de apoyo para la cabeza de martillo	



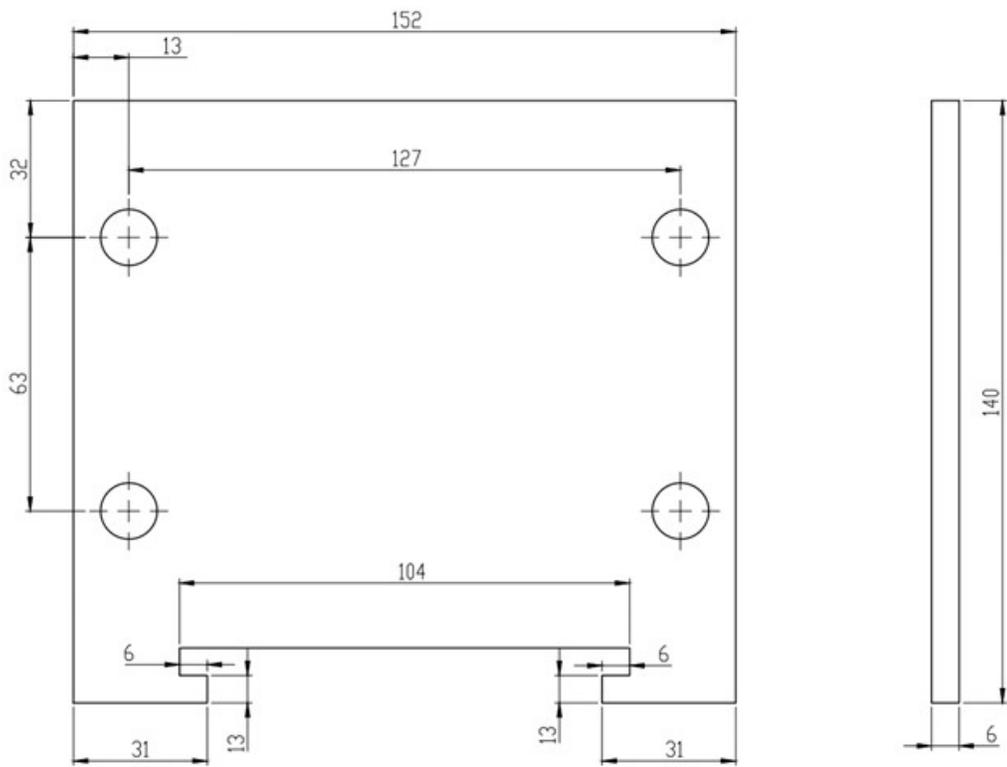
2	ASTM A 500 GRADO A	Material en bruto : tubo de acero sch 40	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO E1	FECHA Mayo de 2022	Detalle 2:1 Conisa de acople para pasador de apoyo	



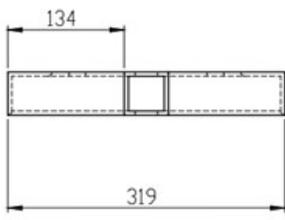
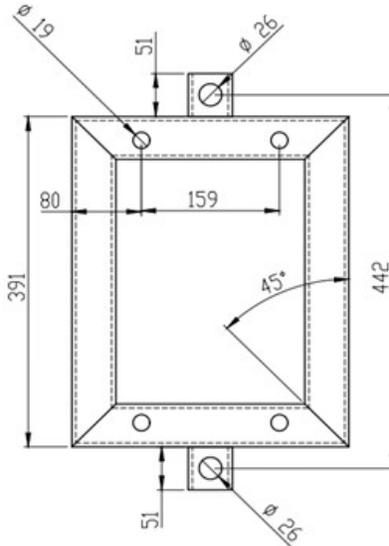
4	A 36	Material en bruto : placa de acero de 1/4"	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACION : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathon Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO E2	FECHA Mayo de 2022	Detalle 2.2 : Placa de alza	



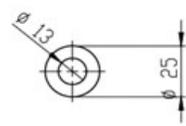
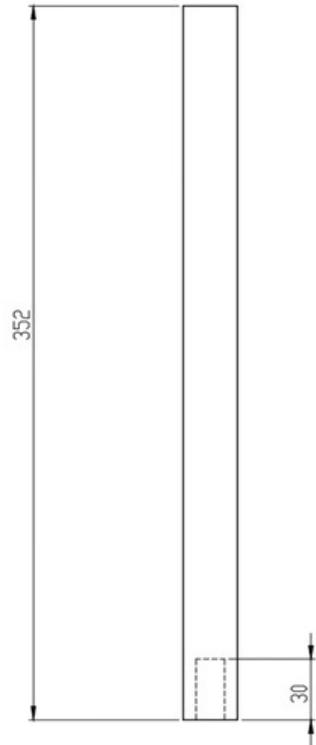
2	A 36	Material en bruto : placa de acero de 1/4	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD D INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACION : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacon Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO E3	FECHA Mayo de 2022	Detalle 2.3 : Placa base	



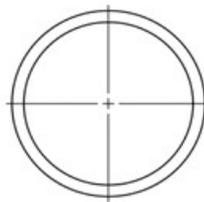
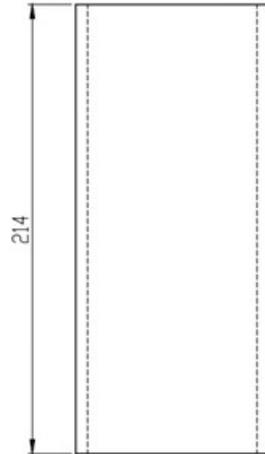
2	A 36	Material en bruto : placa de acero DE 1/4"
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	TRABAJO DE GRADUACION : PROPUUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz	ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO E4	FECHA Mayo de 2022	Detalle 2.4 : placa prensa deslizante 



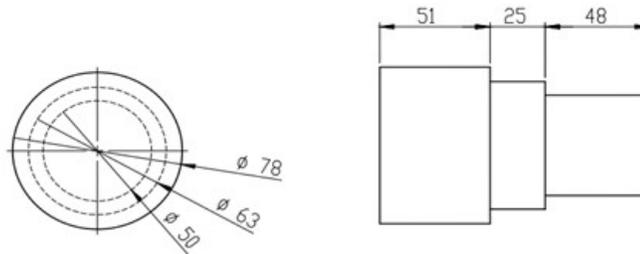
1	A 36	Material en bruto : perfil angular 2"x2"x3/16" tubo cuadrado 2"x2"x3/16"	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO	ESCALA 1:5
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO F1	FECHA Mayo de 2022	Detalle 3.1 : estructura del elevador	



2	AISI 1045	Material en bruto : barra redonda de 30 mm de diámetro	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDACTICO	ESCALA 2:1
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO F2	FECHA Mayo de 2022	Detalle 3.2 : barra lisa directora	



3	ASTM A500 GRADO A	Material en bruto : tubería de 3" sch 40
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD D E INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO	ESCALA 1:2
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz	ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO G1	FECHA Mayo de 2022	Detalle 4.1 : Sección eje hueco 



6	AISI 1045	Material en bruto : barra circular de 60 mm de diámetro	
CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN : PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MAQUINA PARA FORJA EN CALIENTE PARA USO DIDÁCTICO	ESCALA 1:2
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTE : Juan Francisco Chacón Navarrete	UNIDADES milímetros
No DE PLANO PLANO G2	FECHA Mayo de 2022	Detalle 4.2 : Sección eje solido	