

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



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO  
DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE  
COBRE PURO**

PRESENTADO POR:

**LUANA PATRICIA AGUILAR PORTILLO**

**MANUEL SALVADOR HERNÁNDEZ ZACATARES**

**LUIS RAMÓN VICENTE LÓPEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2016

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR INTERINO :

**LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

SECRETARIA GENERAL :

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR :

**ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ**

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 :

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO  
PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO**

Presentado por :

**LUANA PATRICIA AGUILAR PORTILLO  
MANUEL SALVADOR HERNÁNDEZ ZACATARES  
LUIS RAMÓN VICENTE LÓPEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. Y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

San Salvador, septiembre de 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. Y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	1
1.MARCO TEÓRICO .....	3
1.1.Definición de conformado, concepto y aplicación .....	3
1.1.1.Clasificación según las fuerzas involucradas.....	5
1.1.2.Parametros generales de conformado.....	5
1.1.3.Mecánica del conformado.....	8
1.2.El cobre.....	10
1.2.1.Propiedades del cobre .....	10
1.2.2.Aplicaciones.....	13
1.3.Teoría del trefilado .....	15
1.3.1.Concepto.....	16
1.3.2.Tipos de trefilado .....	17
1.3.3.Descripción del proceso.....	18
1.3.4.Parámetros involucrados .....	21
1.4.Tipos de máquinas trefiladoras .....	24
1.4.1.De acuerdo a la autonomía del proceso .....	24
1.4.2.De acuerdo al lubricante utilizado en el proceso.....	24
1.4.3.De acuerdo a la extensión del proceso .....	25
1.5.Elementos principales de una máquina de trefilado.....	25

1.6.Parámetros involucrados en el proceso de trefilado del cobre.....	27
1.6.1.Reducción máxima de aire (análisis sin fricción) .....	28
1.6.3.Análisis incluyendo la fricción .....	30
1.6.4.Trabajo uniforme.....	32
1.6.5.Trabajo no uniforme o redundante.....	33
1.6.6.Trabajo de fricción .....	35
1.7.Ecuación del esfuerzo de trefilado .....	35
1.7.1.Trefilado multipasadas con reducción constante .....	37
1.7.2.Trefilado multipasadas con relación de esfuerzo de trefilado entre esfuerzo de cendencia constante.....	38
1.7.3.Trefilado de multipasadas con condición adiabática entre pasadas	40
2.DISEÑO DEL PROCESO DE TREFILADO .....	41
2.1.Determinación de los principales elementos del equipo .....	41
2.1.1.Alambre.....	42
2.1.2.Bancada.....	42
2.1.3.Hilera	43
2.1.4.Soporte de hilera.....	43
2.1.5.Guías	44
2.1.6.Tambores.....	44
2.1.7.Soporte de tambor .....	45

2.1.8.Motor eléctrico .....	46
2.1.9.Transmisión .....	47
2.1.10.Soporte de motor .....	48
2.2.Propuesta de reducción para alambre decobre .....	49
2.2.1.Hilera o dado propuesto.....	50
2.2.2.Determinación de las cargas preliminares de diseño.....	51
2.2.3.Propuesta de reducción N° 1 para la práctica de laboratorio	56
2.2.4.Propuesta de reducción N°2 .....	62
2.3.Criterios de selección de propuesta de reducción para la práctica de laboratorio .....	66
2.4.Diseño y selección de elementos.....	67
2.4.1.Diseño del eje .....	67
2.4.2.Diseño del soporte de hilera .....	85
2.4.3.Soporte de tambor .....	93
2.4.4.Diseño del tambor .....	99
2.4.5.Diseño de la bancada .....	105
2.4.6.Selección del motor-reductor .....	109
3.CONSTRUCCIÓN.....	113
3.1.Construcción de la bancada.....	113
3.2.Construcción del soporte de motor .....	116

3.3.Construcción de tambores para trefilado .....	117
3.4.Construcción de soporte de hilera .....	117
3.5.Construcción de base de tambor .....	118
3.6.Ensamblaje de banco de trefilado.....	119
4.ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA.....	127
CONCLUSIONES .....	128
REFERENCIAS .....	131
ANEXO ALABORATORIO DE TREFILADO DE ALAMBRE AWG 12 DE COBRE COMERCIALMENTE PURO.....	133
ANEXO B MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO DE TREFILADO EN FRÍO DE COBRE.....	143



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Propiedades físicas del cobre.....	12
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del cobre.....	12
Tabla 2.1. Evaluación de propuestas de calibre de alambre a reducir por criterios.....	66
Tabla 2.2. Especificaciones de reductor DODGE.....	110
Tabla 4.1. Presupuesto general del proyecto.....	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Influencia de la adición de elementos de aleación en la conductividad eléctrica del cobre (Askeland, 1998). .....	12
Fig. 1.2. Resistencia vs. Deformación para el cobre ETP (ICA Association , 2015). .....	13
Fig. 1.3. Cables de cobre (CIMSA, 2015). .....	14
Fig. 1.4. Elementos de acoples de mangueras y tuberías fabricados de latón..	14
Fig. 1.5. Esquema simplificado de un proceso de trefilado (Askeland, 1998)....	16
Fig. 1.6. Decapador mecánico. ....	19
Fig. 1.7. Forja rotativa. ....	20
Fig. 1.8. Sacapuntas. ....	20
Fig. 1.9. Banco de estirado. ....	21
Fig. 1.10. Elementos principales del equipo de trefilado (López Martínez, 2011). ....	26
Fig. 1.11. Representación esquemática de la sección de corte de un dado de trefilado (Dieter, 1967). ....	26
Fig. 1.12. Bobina de arrastre (Dieter, 1967). ....	27
Fig. 1.13. Sistema de esfuerzos en trefilado (Dieter, 1967). ....	28
Fig. 1.14. Propiedades mecánicas vs. trabajo en frío (Askeland, 1998). ....	30
Fig. 1.15. Esquema del proceso de trefilado y representación de las variables involucradas (Wright, 2011). ....	32
Fig. 2.1. Bancada. ....	42

Fig. 2.2. Hilera.....	43
Fig. 2.3. Soporte de hilera.....	44
Fig. 2.4. Guía .....	44
Fig. 2.5. Tambor.....	45
Fig. 2.6. Eje del tambor.....	45
Fig. 2.7. Motor eléctrico a utilizar y su transmisión por banda a la entrada del reductor.....	46
Fig. 2.8. Panel de control, vista exterior e interior.....	47
Fig. 2.9. Transmisión.....	47
Fig. 2.10. Soportes de motor.....	48
Fig. 2.11. Banco de trefilado.....	48
Fig. 2.12. Hilera de acero con dado de tungsteno para joyería de caña redonda.....	51
Fig. 2.13. Propiedades mecánicas vs. trabajo en frío (Askeland, 1998). .....	53
Fig. 2.14. Propiedades mecánicas vs. trabajo en frío (Askeland, 1998) .....	58
Fig. 2.15. Propiedades mecánicas vs. Trabajo en frío (Askeland, 1998). .....	63
Fig. 2.16. Esquema del eje acoplado al tambor y al reductor con sus respectivos rodamientos y esquematización del torque generado como resultado de la carga externa.....	68
Fig. 2.17. Esquema en donde se presenta la distancia existentes entre elementos ensamblados con el eje.....	69
Fig. 2.18. Diagrama de equilibrio equivalente para el eje, donde se representan los rodamientos como apoyos simples.....	70

Fig. 2.19. Diagrama cortante y diagrama momento flexionante para el eje de trefilado.....	71
Fig. 2.20. Menú de selección de tipo de estudio.....	75
Fig. 2.21. Menú para definir las características del estudio.....	75
Fig. 2.22. Menús de tipos de sujeción y tipo de cargas.....	76
Fig. 2.23. Aplicación de sujeción por rodamientos, aplicación de fuerzas cortantes y par torsión sobre el eje.....	77
Fig. 2.24. Generación de la malla sobre el modelo.....	78
Fig. 2.25. Menú de selección de resultados del estudio.....	79
Fig. 2.26. Resultados para un análisis estático tensión nodal bajo el criterio Von Mises.....	80
Fig. 2.27. Resultados para análisis estático de factor de seguridad bajo el criterio Von Mises máximo.....	80
Fig. 2.28. Ventana de resultados de evaluación a la fatiga del eje con un acero AISI 1045 recocido.....	85
Fig. 2.29. Esquema de los soportes de hilera.....	86
Fig.2.30. Diagrama de cuerpo libre del soporte de hilera.....	87
Fig. 2.31. Diagrama cortante y diagrama momento flexionante para ángulo del soporte de hilera.....	88
Fig. 2.32. Aplicación de la fuerza sobre la cara de contacto entre hilera y soporte.....	91
Fig. 2.33. Resultados del soporte hilera para un análisis estático tensión nodal bajo el criterio de cortante máximo.....	91

Fig. 2.34. Resultados para soporte hilera de factor de seguridad bajo el criterio cortante máximo.....	92
Fig.2.35. Resultados del estudio de desplazamiento del soporte hilera. ....	92
Fig. 2.36. Esquema se soporte de tambor. ....	93
Fig. 2.37. Diagrama de equilibrio, fuerza cortante y momento flector para soporte de tambor.....	94
Fig. 2.38. Esquematización de aplicación de carga y sujeción para estudio estático del soporte.....	97
Fig. 2.39. Resultados para soporte tambor de momento máximo y factor de seguridad bajo el criterio von mises máximo. ....	98
Fig. 2.40. Ensamble de tambor al eje de transmisión. ....	99
Fig. 2.41. Dibujo de ensamble del tambor. ....	100
Fig.2.42. Detalle del tambor. ....	101
Fig. 2.43. Aplicación de la fuerza sobre la ranura (en rojo), el torque en la periferia (morado) y la presión sobre el tambor (azul) sujeción fija (verde) y creación de la malla. ....	103
Fig.2.44. Resultados de momento máximo y factor de seguridad bajo el criterio del esfuerzo cortante máximo para el tambor. ....	104
Fig. 2.45. Esquematización de sistema de cargas actuantes sobre la bancada. ....	106
Fig. 2.46. Ventana de asesor de simulación definiendo cargas externas que actúan sobre la bancada.....	107

Fig. 2.47. Resultado de tensión axial y de flexión en límite superior de los miembros estructurales de la bancada. ....	108
Fig.2.48. Resultado del factor de seguridad mínimo obtenido en los miembros estructurales de la bancada. ....	109
Fig. 2.49. Dimensiones de poleas.....	110
Fig. 3.1. Corte de los tramos de tubos en base las medidas del plano.....	114
Fig. 3.2. Preparación de juntas mediante puntos, y armado de la bancada. ..	114
Fig. 3.3. Limpieza de la estructura, bancada finalizada debidamente pintada.	115
Fig. 3.4. Piezas que conforman el soporte del motor y soporte finalizado. ....	116
Fig. 3.5. Tambores de trefilado maquinados, soldados y pintados. ....	117
Fig. 3.6. Soportes de hilera finalizados, forma de uso de estas.....	118
Fig. 3.7. Base de tambor.....	119
Fig. 3.8. Montaje del eje y sus chumaceras.....	120
Fig. 3.9. Sujeciones del eje de transmisión.....	120
Fig. 3.10. Apriete de prisioneros en el reductor. ....	121
Fig. 3.11. Montaje de soporte de motor. ....	121
Fig. 3.12. Motor y reductor instalados y acoplados.....	122
Fig. 3.13. Instalación de soporte de tambor.....	123
Fig. 3.14. Instalación de soporte de hilera. ....	123
Fig. 3.15. Instalación de tambor y cuña. ....	124
Fig. 3.16. Atornillado de Pletina. ....	124
Fig. 3.17. Cable enhebrador. ....	125
Fig. 3.18. Equipo de trefilado completo.....	126

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

$A_f$	Área final transversal, $m^2$
AISI	Instituto Americano de Hierro y Acero
AWG	Calibre de Alambre Estadounidense
$A_0$	Área inicial transversal, $m^2$
BCC	Cúbica centrada en el cuerpo
$c$	Radio respecto a superficie externa de eje, Distancia del eje neutro a la fibra más alejada en la sección transversal de la viga mm
$D_f$	Diámetro final a la salida de la hilera, mm
$D_0$	Diámetro inicial a la entrada de la hilera, mm
ETP	Cobre Electrolíticamente Puro
$F$	Carga de trefilado, N
$f$	Coeficiente de rozamiento
FCC	Cúbica centrada en la cara
$h_f$	Espesor final de material, m
$h_0$	Espesor inicial de material, m
$I$	Momento de inercia del área transversal con respecto al eje neutro, $mm^4$
IACS	Estándar Internacional de Conductividad del Cobre
$J$	Momento polar de inercia, $mm^4$
$K$	Coeficiente de resistencia a la tracción, MPa
$K_a$	Factor de superficie en análisis por fatiga
$K_b$	Factor de tamaño en análisis por fatiga
$K_c$	Factor de carga en análisis por fatiga

$K_d$	Factor de temperatura en análisis por fatiga
$K_e$	Factor de efectos diversos en análisis por fatiga
$K_f$	Factor de concentración de esfuerzo en análisis por fatiga
$M$	Momento máximo flexionante en eje de tracción, N-m
$M_B$	Momento flexionante respecto a un punto de apoyo B, N-m
$N$	Número de pasadas de alambre a través de la hilera, Número de ciclos de fatiga
$n$	Exponente de endurecimiento por deformación, factor de seguridad en diseño
$n_1$	Velocidad en rpm en eje de entrada de reductor de velocidad
$n_2$	Velocidad en rpm en eje de salida de reductor de velocidad
$P$	Fuerza normal a superficie de contacto, N
Pot	Potencia, W
$r$	Reducción de área en el trefilado
$R_C$	Reacción en cojinete próximo a reductor, N
$R_B$	Reacción en cojinete próximo a tambor de tracción, N
$S_n$	Resistencia a la fatiga, MPa
$S_n'$	Límite de resistencia a la fatiga de ensayo, MPa
$S_{ut}$	Resistencia última del material, MPa
$S_Y$	Esfuerzo de fluencia, MPa
$T$	Par de torsión, N-m
TF	Trabajo en Frío
$V$	Velocidad de trefilado, m/s
$w$	Trabajo por unidad de volumen, J/m <sup>3</sup>
$W_d$	Trabajo de deformación, J



$W_f$	Trabajo de fricción, J
$W_r$	Trabajo superfluo, J
$W_T$	Trabajo total, J
$W_u$	Trabajo uniforme, J
$\alpha$	Ángulo de entrada de la hilera o dado
$\Delta$	Factor geométrico del dado o hilera
$\epsilon$	Deformación real, mm/mm
$\eta$	Rendimiento o eficiencia
$\mu$	Coeficiente de fricción
$\tau$	Esfuerzo de tensión cortante, Esfuerzo torsional cortante, MPa
$\sigma$	Esfuerzo de tensión normal, Esfuerzo flexionante, MPa
$\sigma'$	Esfuerzo de Von Mises, MPa
$\sigma_a$	Esfuerzo alterno resultante determinado mediante Von Mises, MPa
$\sigma_m$	Esfuerzo promedio constante determinado mediante Von Mises, MPa
$\sigma_p$	Esfuerzo de fluencia promedio, MPa
$\sigma_{pN}$	Esfuerzo de fluencia promedio por pasada, MPa
$\sigma_t$	Esfuerzo de trefilado, MPa
$\sigma_Y$	Esfuerzo de fluencia, MPa
$\sigma_o$	Esfuerzo de fluencia real, MPa
$\sigma_{00}$	Esfuerzo de fluencia a la entrada de la hilera, MPa
$\sigma_{01}$	Esfuerzo de fluencia a la salida de la hilera, MPa
$\sigma_{1,2}$	Esfuerzos principales máximos y mínimos, MPa
$\Phi$	Deformación no homogénea, mm/mm
$\phi$	Factor de trabajo redundante

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO**

Estudiantes: Brs. Luana Patricia Aguilar Portillo<sup>1</sup>, Manuel Salvador  
Hernández<sup>2</sup> y Luis Ramón Vicente López<sup>3</sup>  
Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz<sup>4</sup>

Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador. Tel. (503) 22-35-4235.

E-mail: 1 luanaaguilar070990@gmail.com  
2 manuelza64@gmail.com  
3 ramonvicente51@gmail.com  
4 jaberriosortiz@gmail.com

## **RESUMEN**

Se ha realizado un diseño y construcción de un equipo didáctico de trefilado de alambre de cobre para lo cual se recopiló la información bibliográfica con el fin de describir el proceso de trefilado en frío de cobre y las propiedades del material seleccionado. Así mismo, se describen los principales tipos de equipo utilizados actualmente en la industria con el fin de seleccionar los elementos principales que conformaron el modelo a desarrollar según la naturaleza del proyecto. Luego, se presenta la etapa de diseño definiendo diferentes propuestas de reducción de diámetro a partir de los calibres de alambre con mayor disponibilidad en el mercado y seleccionando aquella para la cual se determinó las variables del diseño y se establece la potencia necesaria para realizar el trefilado. Se detalla la etapa constructiva del equipo como resultado del diseño y finalmente se presentan los costos de materiales, equipo y herramienta utilizados para dicho fin.

## INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios el ser humano ha necesitado fabricar hilos o alambres de metales para diferentes usos como joyas, instrumentos musicales y armas, por lo cual actualmente el proceso de obtención de alambres mediante trefilado ha adquirido importancia a un nivel industrial, siendo cada vez más inminente la necesidad de investigaciones que aporten a la implementación y mejora de dicho proceso en la industria metalmeccánica. La importancia del trefilado se refleja en los innumerables usos de los alambres así obtenidos, utilizables en electrónica, estructuras, transmisión de potencia, resortes, entre otros.

El proceso de trefilado consiste en la disminución permanente de la sección transversal de un alambre, barra o varilla haciéndolo pasar a través de un dado, en una o múltiples pasadas.

El proceso de trefilado se caracteriza primordialmente por ser un proceso de conservación de masa, por ello dentro del marco teórico se abordan los conceptos básicos del conformado de metales donde se cumple dicho principio. Debido a que el tipo de trefilado sobre el cual será desarrollado el presente trabajo de graduación es el trefilado por trabajo en frío se considera necesario un estudio sobre los parámetros que durante el proceso determinan las propiedades mecánicas resultantes del alambre a trefilar como lo es el porcentaje de reducción, esfuerzo de fluencia del material del alambre, la configuración geométrica del dado, número de pasadas posibles de aplicar antes de alcanzar condiciones de estirado del alambre.

Debido a la finalidad proyectada para este trabajo, la cual es de naturaleza didáctica donde el estudiante puede observar la deformación real que experimenta el alambre se seleccionó como material de trabajo el cobre, el cual posee excelentes propiedades de ductilidad y una resistencia mecánica relativamente baja, lo cual facilitará que el nivel de capacidad del equipo a construir sea accesible a los recursos disponibles.

En la etapa de diseño se toman en cuenta las propuestas de reducción de la sección transversal del alambre para poder definir la carga crítica de

trefilado que se deberá satisfacer con el equipo motorreductor que ha sido proporcionado por la Escuela de Ingeniería Mecánica para fines del presente proyecto. Esto sirve de base para el diseño de los soportes de los diferentes elementos del banco de trefilado: hilera, tambores, motor y reductor, los cuales cumplen con factores de seguridad adecuados y con los materiales disponibles en el mercado.

Para la etapa constructiva se aplicaron conocimientos básicos de obra de banco, torno, limado, corte y soldadura por arco eléctrico. A la vez se realizó el análisis de cada uno de los elementos del banco que son sometidos a esfuerzos cortantes y flexionantes mediante software computacional lo cual demuestra que los programas de análisis de elementos mecánicos cada vez adquieren mayor importancia como herramienta útil para los profesionales dentro de la industria.

Cabe recalcar la importancia que adquieren las medidas de seguridad y un programa de mantenimiento básico para la realización de las prácticas de laboratorio que se esperan desarrollar con dicho equipo y que a la vez se puede hacer de este proyecto un tema de investigación sobre el trefilado de otros materiales en busca de una mejora continua en el aprendizaje.

## **1. MARCO TEÓRICO**

El proceso de conformado de metales abarca dos grandes áreas relacionadas con la metalurgia: el trabajo en frío y el trabajo en caliente. El trabajo en frío genera un endurecimiento y deformación simultánea sobre el metal a conformar a través de la multiplicación de dislocaciones lo cual requiere que el material sea dúctil, por lo que el conformado se aplica en su mayor parte a materiales metálicos ya que los materiales frágiles como los cerámicos no se pueden conformar.

El trabajo en caliente consiste en la deformación plástica del metal a una temperatura mayor que la de recristalización, por lo que el material se recristaliza de forma continua, logrando así que su ductilidad se mantenga en el proceso, y se obtenga una mayor capacidad de deformación plástica que es casi ilimitada. Al controlar los procesos donde se involucra la deformación se le puede conferir al metal una forma utilizable y aún así mejorar y controlar sus propiedades mecánicas mediante la correcta aplicación de recocido u otro tratamiento térmico.

### **1.1. DEFINICIÓN DE CONFORMADO, CONCEPTO Y APLICACIÓN**

Una de las características por la que se distinguen los metales de otros materiales, es que en su mayoría se pueden conformar; es decir, la facilidad con la que se les puede dar formas útiles con propiedades mecánicas específicas, según la aplicación que se requiera, esto es posible debido a la ductilidad, ya que pueden experimentar grandes deformaciones permanentes sin que estos lleguen a la fractura. Los métodos utilizados depende de varios factores entre los están las propiedades del metal, el tamaño y forma de la pieza acabada y no menos importante el costo (Callister, 1995).

Es muy importante tomar en consideración el estado de esfuerzos que se generan sobre el metal, para determinar el grado de deformación que se puede alcanzar en cualquier proceso al cual es sometido; para ello se puntualizan las observaciones siguientes (Degarmo, 1994):

- 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 da 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 es aplicada 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; y
- e) Si el proceso de modelado indicado en el literal anterior se realiza a una temperatura superior a la de recristalización, las deformaciones alcanzarán valores casi infinitos.

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 determinar fácilmente, por ello se debe considerar el efecto independiente de los diferentes tipos de carga.

### **1.1.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS FUERZAS INVOLUCRADAS**

De los muchos procesos por deformación plástica con los cuales se trabajan los metales, estos se clasifican de una forma más concreta según el tipo de fuerza involucrada en el proceso, esta clasificación se da como (Dieter, 1967):

- ✓ Proceso de compresión directa, entre los principales se pueden mencionar la forja y la laminación;
- ✓ 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 realiza fuerzas de tracción, pero se generan fuerzas de compresión entre la pieza y la matriz;
- ✓ Proceso de tracción, el ejemplo más claro es el proceso de estirado, donde el material se adapta al contorno de una matriz. Proceso de plegado o flexión; y
- ✓ Proceso de cizallamiento.

### **1.1.2. PARÁMETROS GENERALES DE CONFORMACIÓN**

En este apartado se describen los parámetros más importantes y de mayor influencia durante la ejecución de cualquier proceso de conformación, cada uno de los cuales no puede dejarse de lado ya que en conjunto determinan la calidad y el cumplimiento de las condiciones requeridas del producto final. Estos son (Dieter, 1967):

- ✓ Temperatura.- El trabajo en frío se realiza en condiciones tales de temperatura que no sea posible el desarrollo de los procesos de restauración o recristalización por lo cual no se elimina el endurecimiento por deformación obtenido por la generación de esfuerzos mayores al esfuerzo de fluencia del material. Por lo que la deformación total que puede generarse sin producir fractura es mucho menor que la que se logra con el trabajo en caliente. Un metal se puede deformar para que obtenga una

forma útil mediante el trabajo en caliente. El cual se define como la deformación plástica del material metálico a una temperatura mayor que la temperatura de recristalización de dicho material.

- ✓ Velocidad de deformación.- El comportamiento de un material metálico en las operaciones de conformado puede depender además de la temperatura de las condiciones de la velocidad de deformación. El efecto que la velocidad tiene se refleja hasta en el fenómeno de la temperatura de transición de la condición de dúctil a frágil del metal el cual se hace más pronunciado cuando las velocidades de deformación son grandes. Ciertos metales pueden sufrir fractura debajo de una temperatura determinada si se les aplica una carga a una velocidad demasiado elevada o aun en condiciones de choque. Para el tema de interés en este proyecto se tiene que para condiciones de trabajo en frío la variación de la velocidad de deformación solo produce un aumento de ~20% sobre los valores de esfuerzo de fluencia en la curva esfuerzo-deformación característica del material de donde se deduce que la velocidad de deformación tiene muy poca influencia en la práctica de las operaciones de conformación que se realizan en frío.
- ✓ Efecto de la microestructura.- En los metales puros como el cobre la facilidad para el trabajo mecánico disminuye a medida el punto de fusión sea más elevado. Ya que la temperatura del inicio de recristalización es aproximadamente proporcional a la del punto de fusión, la temperatura mínima de trabajo en caliente también aumentara con un punto de fusión elevado. La adición de elementos aleantes eleva la curva de fluencia cuando estos forman solución sólida con la matriz haciendo que las cargas de conformación aumenten proporcionadamente.
- ✓ Fricción e importancia de la 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.



Las tareas que debe cumplir un lubricante son:

- 1) Permitir la transferencia de calor para evitar elevaciones de temperatura durante los procesos;
- 2) Proteger las nuevas superficies formadas de la oxidación; y
- 3) Eliminar el contacto entre las rugosidades de ambas superficies en contacto para evitar el desgaste metálico de la herramienta de trabajo que se da mediante la adherencia metálica.

En realidad la selección del lubricante adecuado acorde al proceso de conformado que se esté ejecutando determina el éxito o el fracaso de la operación.

La fricción entre la pieza y la herramienta genera esfuerzos cortantes a lo largo de las superficies de contacto. La relación entre dicha tensión cortante( $\tau$ ), la tensión normal a la intercara entre pieza y herramienta ( $\sigma$ ), y el coeficiente de rozamiento ( $f$ ) se expresa mediante la *ley de Coulomb* del frotamiento por resbalamiento:

$$f = \frac{\tau}{\sigma} \quad (1.1)$$

El valor de ( $f$ ) depende de los siguientes factores:

- a) Del material del que está construida la pieza y la herramienta de trabajo;
- b) De la rugosidad superficial de ambas superficies (pieza y herramienta);
- c) De la buena selección del lubricante según el tipo de proceso de conformado;
- d) Velocidad de deformación; y
- e) Temperatura de operación.

Para el tema de interés el factor de rozamiento para el estirado en frío y la embutición profunda del acero, cobre y latón empleando superficies pulimentadas duras y lubricantes eficaces oscila entre 0.05 y 0.15(Dieter, 1967).

### 1.1.3. MECÁNICA DEL CONFORMADO

La rama encargada de este análisis mecánico está comprendida por la teoría de plasticidad, 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 resultados experimentales, dicho criterio se expresa mediante la siguiente relación (Dieter, 1967):

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2. \quad (1.2)$$

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 grandes deformaciones son generadas. Asumiendo una constancia en el volumen durante la deformación se pueden utilizar las siguientes relaciones:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0. \quad (1.3)$$

Para deformaciones de tracción o compresión equivalentes se producen endurecimientos por deformación equivalentes, para una deformación por tracción ( $\epsilon_1$ ), igual a una deformación por compresión ( $\epsilon_2$ ), y de la constancia de volumen se tiene que:

$$\frac{h_0 - h_f}{h_0} = \frac{A_0 - A_f}{A_0}. \quad (1.4)$$

La relación anterior expresa 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, o sea 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 debe consumirse 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 da en el material, el cual no contribuye en el puro cambio de forma como lo hace el trabajo de deformación; y
- 3) Trabajo de fricción ( $W_f$ ): Es la parte del trabajo total que se consume para vencer lo que son las fuerzas de fricción que se desarrollan entre la pieza de trabajo y la herramienta.

Entonces el trabajo total puede expresarse como la suma de estas tres componentes, así como sigue:

$$W_d + W_r + W_f = W_T. \quad (1.5)$$

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:

$$W_d = \int dW_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 (\epsilon_1^2 + \epsilon_1 \epsilon_2 + \epsilon_2^2)^{1/2}. \quad (1.6)$$

Asimismo, el rendimiento o eficiencia de un proceso de conformación se expresa mediante:

$$\eta = \frac{W_d}{W_T}. \quad (1.7)$$

## **1.2. EL COBRE**

Es uno de los metales más comercializados y sometidos al conformado en general por sus propiedades únicas. Desde su descubrimiento, el cobre un metal caracterizado por su color rojo, ha sido utilizado para el avance de la civilización. El cobre fue usado en sus inicios para fabricar herramientas de agricultura, armas para la caza y la construcción y se ha encontrado vestigios de su uso en las ruinas de las pirámides de Egipto. En la antigüedad se utilizaba en su estado nativo golpeándolo para darle forma y usarlo como puntas de flechas. En la edad media se usaba para corazas, campanas y algunas armaduras.

### **1.2.1. PROPIEDADES DEL COBRE**

Actualmente es el tercer metal más utilizado en el mundo después del hierro y el aluminio, adquiriendo importancia al inventarse el generador y con ello la industria eléctrica; ocupa el vigesimoquinto lugar en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre. Frecuentemente se encuentra agregado con otros metales como el oro, plata, bismuto y plomo, apareciendo en pequeñas partículas en rocas, aunque se han hallado masas compactas de hasta 420 toneladas. El cobre se encuentra por todo el mundo en la lava basáltica, localizándose el mayor depósito conocido en la cordillera de los Andes en Chile, bajo la forma de pórfido. Este país posee aproximadamente el 25% de las reservas mundiales conocidas de cobre y a comienzos de 1980 se convirtió en el primer país productor de este metal (Guevara, 2015).

Para lograr una mejor comprensión de las características del cobre es necesario relacionar la estructura cristalina, propiedades y procesamiento. El cobre puro presenta estructura cúbica centrada en las caras (FCC) y posee una alta capacidad de deformación plástica, por lo cual para su procesamiento se utilizan preferiblemente métodos de deformación plástica como el trefilado y el laminado. Estas propiedades permiten que sea muy utilizado en cables de conducción eléctrica (Neogranadina, 2006).

El cobre tiene una gran cantidad de propiedades por lo que es necesario agruparlas en propiedades físicas, mecánicas y químicas, entre estas se tienen:

- 1) **Propiedades físicas.**- El cobre el cual es un metal rojizo cuyo número atómico es 29 en la tabla periódica, es un elemento con propiedades excepcionales, dentro de las cuales destacan su alta conductividad eléctrica comparable con el oro y la plata, también posee una alta conductividad térmica, buena resistencia a la corrosión, resistencia y maquinabilidad (Avner, 1988). Además, el cobre no es magnético, tiene color atractivo metalizado. Es soldable entre sí y también se puede soldar con latón, estaño y generalmente se le aplica revestimiento con galvanizado o esmaltado. La mayor parte del cobre se utiliza para conductores eléctricos 99.9% de cobre, conocido como cobre electrolítico. El cobre es altamente reciclable y tratable térmicamente.

En la Tabla 1.1 se presentan agrupadas las propiedades físicas más importantes del cobre.

Haciendo énfasis en una de las propiedades más importantes del cobre, la conductividad eléctrica del cobre puro y blando a 20 °C, es de 58 MS/m (mega siemens por metro). El estándar internacional de conductividad IACS (International Annealed Copper Standard) define este valor como el 100% IACS para recocidos blandos a 20 °C. Este valor se ve reducido por deformaciones en frío, aumentos de temperatura o impurezas. En la Fig. 1.1 se presenta como los elementos de aleación o impurezas afectan la conductividad eléctrica del cobre puro.

Tabla 1.1 Propiedades físicas del cobre

Propiedad	Magnitud
Número atómico	29
Estado a $T_{\text{ambiente}}$	Sólido
Densidad, $\text{kg/m}^3$	8960
Punto de fusión, $^{\circ}\text{C}$	1084
Calor específico, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	385
Conductividad eléctrica, $\text{S/m}$	$58 \times 10^6$

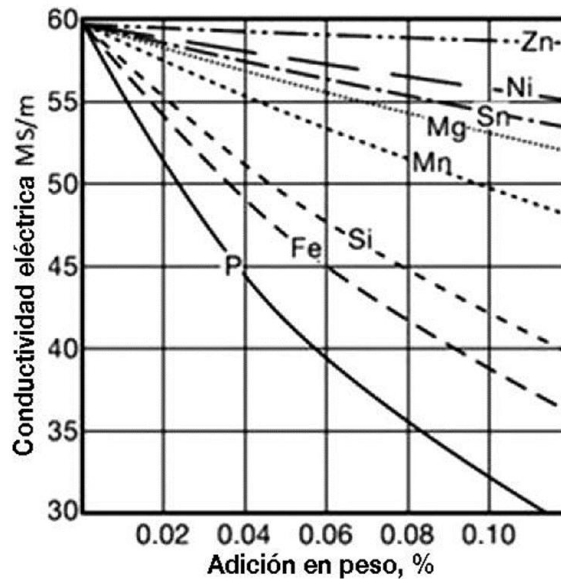


Fig. 1.1. Influencia de la adición de elementos de aleación en la conductividad eléctrica del cobre (Askeland, 1998).

- 2) Propiedades mecánicas.-Las características mecánicas más importantes se presentan en la Tabla 1.2(Neogradina, 2006).

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del cobre ETP

Propiedad	Magnitud
Resistencia a la tracción, MPa	200-250
Límite elástico, MPa	55
Alargamiento, %	33

Los cobres puros solo pueden endurecerse mediante deformación en frío. Tras el tratamiento, hay incrementos en el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza. La resistencia a la deformación aumenta, y a la vez la deformabilidad disminuye (caracterizada por la elongación y el inicio de la estricción). En la Fig.1.2 se presentan las curvas de endurecimiento para el cobre ETP (electrolíticamente puro) K10, el cual presenta una pureza del 99.9% (de los más puros comercialmente) con un endurecimiento alcanzado a través de una deformación en frío la cual puede revertirse a través de un tratamiento térmico posterior, como un recocido (ICA Association , 2015).

El cobre electrolítico es un cobre refinado que ha sido colado para formar ánodos que luego se refinan electrolíticamente.

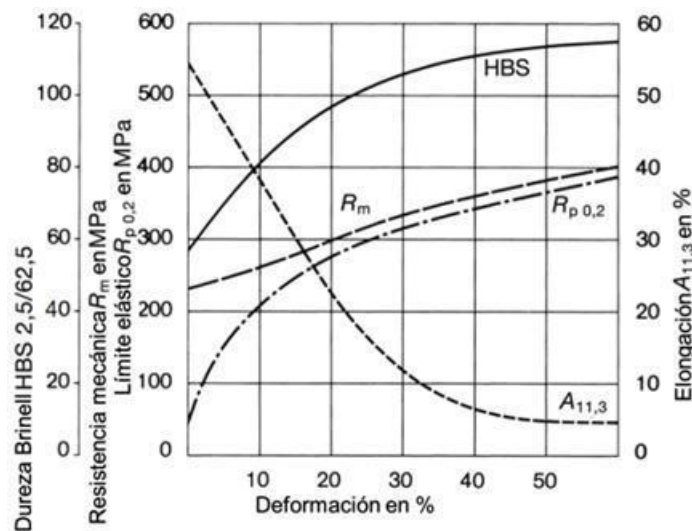


Fig. 1.2. Resistencia vs. Deformación para el cobre ETP (ICA Association , 2015).

## 1.2.2. APLICACIONES

El cobre es utilizado en estado puro (99.9%) o en aleación con otros elementos. Así, entre estas aplicaciones se pueden detallar:

- ✓ Cables.- En su estado electrolíticamente puro se usa en la fabricación de conductores eléctricos utilizables a todo nivel, transporte, redes informáticas, residencias y toda clase de equipos electrónicos.

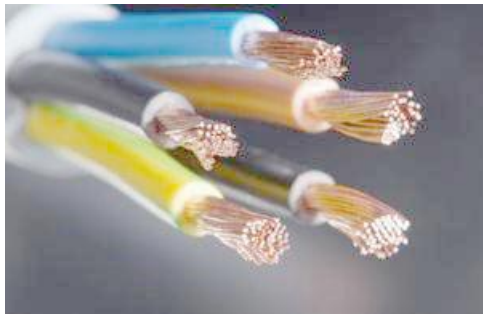


Fig. 1.3. Cables de cobre (CIMSA, 2015).

- ✓ Construcción.- Se utiliza aleado con estaño (bronce) en la elaboración de estatuas, techos, campanas, etc. También, se encuentra en forma de latón (cobre y zinc) en la fabricación de calderas, tubos y diferentes elementos mecánicos y ornamentales.



Fig. 1.4. Elementos de acoples de mangueras y tuberías fabricados de latón.

- ✓ Otras aplicaciones.- Se ha utilizado desde los inicios de la civilización en la fabricación de monedas, e instrumentos musicales. Sus usos generales abarcan casquillos, bisutería, iluminación (bombillas), y recubrimiento de



otros metales. En los medios de transporte se utiliza en radiadores por su alta conductividad térmica y en bujes y cojinetes por su baja fricción.

### **1.3. TEORÍA DEL TREFILADO**

La fabricación de pequeñas secciones metálicas de considerable longitud semejantes a los actuales cables se remonta al año 3000 a.C. donde se han encontrado adornos para faraones hechos de hilos de oro o plata. La hilera más antigua encontrada que ha sido utilizada para hacer hilos de metal se atribuye a los vikingos, aunque aún no ha sido totalmente demostrada su autenticidad, por lo que se estima que el proceso utilizando hileras rudimentarias data de al menos hace 1200 años. Joyerías similares se desarrollaron posteriormente mejorando el proceso de reducción de diámetro en metales preciosos conservando siempre su carácter ornamental. Los instrumentos de cuerda necesitaban cables de acero los cuales eran fabricados mediante este proceso(CIMSA, 2015) y(Askeland, 1998).

En el siglo XIX el proceso se había expandido no solo a las artes decorativas sino también a la industria militar y textil. La revolución industrial propicio estos cambios incrementando la fuerza de trabajo mediante la implementación de la máquina de vapor. Posteriormente, en el siglo XX se mejoró y perfeccionó el proceso mediante la introducción del recocido entre etapas, hileras múltiples y la implementación de nuevos y mejores materiales en la matriz de trefilado (hilera) como los carburos y el diamante sintético.

Actualmente las aplicaciones de barras y cables trefilados son infinitas, los cables de acero se utilizan en ascensores, puentes, máquinas y como transmisores de energía mecánica. Los cables de cobre en aparatos eléctricos, motores, generadores, telefonía pública transmisión de energía eléctrica, etc.

### 1.3.1. CONCEPTO

El trefilado es un método de conformado que consiste en reducir progresivamente la sección inicial de un producto metalúrgico (una barra de metal dúctil, alambrón laminado, etc.) haciéndolo pasar, mediante tracción sobre el material en el extremo a la salida del dado, por unos orificios calibrados llamados hileras, de sección inferior a la de la pieza que se va a trabajar.

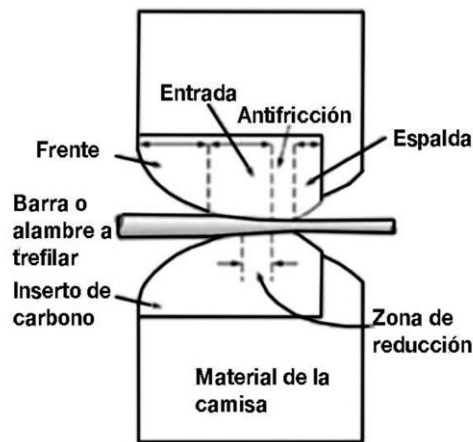


Fig.1.5. Esquema simplificado de un proceso de trefilado (Askeland, 1998).

El perfil obtenido a la salida del proceso no se limita únicamente a tubos y barras sino que también se pueden obtener perfiles complicados (usualmente simétricos) con materiales que presenten una alta maleabilidad. Los materiales más usados para la conformación son el acero, cobre, aluminio y latones. La reducción de área en el trefilado se realiza a temperatura ambiente por lo que se clasifica como un proceso de trabajo en frío. No se produce viruta ya que no existe arranque de material.

El trefilado total puede consistir en un conjunto de matrices o dados en serie. Dependiendo del material (usualmente para el caso de los aceros) y de las propiedades iniciales y finales que se requieran; entre cada etapa de

trefilado se debe aplicar un recocido para eliminar el endurecimiento por deformación. Generalmente se trabaja en frío, con lo cual se obtiene un aumento en la dureza y en la resistencia de la pieza, además de un buen acabado superficial, la etapa final define las propiedades ya sea del tubo o del alambre que se esté maquinando. Tanto el porcentaje de deformación, la forma de la sección transversal, así como las dimensiones finales del producto, depende de la geometría de la hilera o dado que se esté realizando en el proceso(Askeland, 1998).

### **1.3.2. TIPOS DE TREFILADO**

Existen diferentes tipos de clasificación para el proceso de trefilado entre las cuales se puede mencionar:

- ✓ Por el diámetro de la barra o cable, entre los cuales se pueden mencionar trefilado de desbaste grueso para obtener barras, trefilado en alambres hasta diámetros mayores de 2.06mm donde se suele utilizar dados carburados de tungsteno y trefilado fino para diámetros menores de 2.06mm donde se requieren dados diamantados (Handbook, 1993).
- ✓ Por el uso o no de un tambor embobinado, cuando en el proceso el diámetro de la barra o del alambre permite que este se pueda enrollar en un tambor, el proceso es denominado trefilado; cuando el proceso existe una mordaza que sujeta al producto que se obtendrá(barras generalmente) y es utilizado un carrito que se desplaza a través de rieles en una máquina denominada de banco el proceso es denominado estirado.
- ✓ Por el producto resultante del trefilado, como lo es trefilado de tubos, trefilado de alambre y trefilado de varillas que pueden ser de diferentes tipos de sección transversal simétricas.

### **1.3.3. DESCRIPCIÓN Y ETAPAS DEL PROCESO**

Para el desarrollo del proceso de trefilado se requiere del seguimiento de diferentes etapas en las cuales se prepara el estado superficial del material a trefilar ya que se presenta una relación directa con la vida útil y productiva de lo que es la matriz o dado de trefilado, para luego continuar con la etapa de sujeción del material para ser introducido por vez primera a la estación donde se realizará la pasada inicial.

#### **1.3.3.1. PREPARACIÓN SUPERFICIAL**

Durante el proceso de trefilado, se realiza una preparación superficial del alambre con el que se trabajará, el cual consiste, en la limpieza de posibles contaminantes como lo es el óxido o de recubrimientos no deseados en el proceso ya que podría generar residuos, además de acabado superficial con imperfecciones debido a la adherencia de estos residuos en el alambre; una vez limpio este último se debe de recubrir con algún tipo de lubricante, tomando en cuenta que durante el proceso se hará una lubricación posterior. Así, esto se realiza para evitar un daño superficial tanto en el alambre como en la hilera.

Esta limpieza se puede realizar mediante un decapado, el cual puede ser:

- ✓ Decapado mecánico.- Este se realiza mediante un equipo auxiliar en el proceso, que contiene una serie de rodillos decapantes los cuales generalmente se fabrican de tungsteno. La función de estos rodillos es la de realizar una remoción completa de cualquier impureza o suciedad que el alambrón posea, como el óxido (Córdova, 2011).



Fig.1.6. Decapador mecánico.

- ✓ Decapado químico.- Usualmente se busca eliminar posible óxidos en la superficie del material que se está trabajando. Se suele realizar esta limpieza superficial mediante solución de ácido sulfúrico, también se utiliza como decapante fuerte (desengrasante y decapado) el ácido clorhídrico en materiales como hierro, cobre y sus aleaciones. Posteriormente, se baña el material en óxido de cal, o sales inhibidoras lo cual detiene el ataque del ácido (López Martínez, 2011) y (METACSA, 2015).

### 1.3.3.2. PUNTEADO

Consiste en preparar una pequeña longitud de un extremo del alambre, hasta obtener una sección menor que la de la hilera o dado, una vez obtenido se hace pasar a través de ésta y se sujeta mediante una mordaza para trefilar, y ser enrollado.

Existen muchos métodos por los que se puede hacer esta etapa entre algunas están; la forja que se realiza en caliente y con martillo; forja rotativa donde se utiliza una máquina herramienta que posee un martillo de dos a tres mazos, ayudados por una fuerza centrífuga al girar, con la cual son proyectados hacia el centro al pasar por los rodillos fijos situados en la periferia, el alambre a afilar se sitúa en el centro; además es posible realizar el punteado mediante laminación y torno (Atienza Riera, 2001).

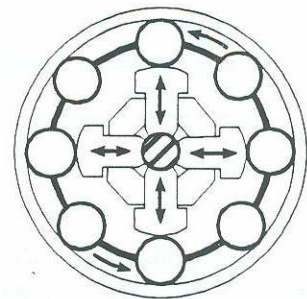


Fig. 1.7. Forja rotativa.

El punteado mediante laminación se realiza con un equipo auxiliar denominado sacapuntas que es utilizado para reducir la sección del alambre cuando éste ha sufrido una fractura o bien durante el momento de introducir un nuevo rollo de alambón para su posterior proceso de trefilado. Este cuenta con dos rodillos que poseen ranuras de distintos diámetros debidamente espaciadas que permiten disminuir la sección transversal del alambre hasta obtener el diámetro requerido(Córdova, 2011).



Fig.1.8. Sacapuntas.

### 1.3.3.3. TREFILADO

Una vez el alambre limpio, se hace pasar la punta ya preparada a través de la hilera, se sujeta con la mordaza y se enrolla a través de un tambor que al girar lo irá enrollando. Para el caso de un trefilado seco, la hilera se coloca dentro de una caja la cual contiene grasa y otros lubricantes, a través de los cuales se debe pasar el alambre antes de que éste entre en la hilera. Generalmente el trefilado es un proceso de multipasos en el que se obliga al alambre a pasar entre varios dados o hileras colocadas en serie. Las máquinas que poseen cabestrantes de tracción entre cada dado, lo hacen con el objetivo de tirar del material a una velocidad constante, además de enrollar el material enfriándolo, desde la temperatura alcanzada durante el trefilado hasta la temperatura necesaria para entrar en la siguiente hilera (Atienza Riera, 2001).

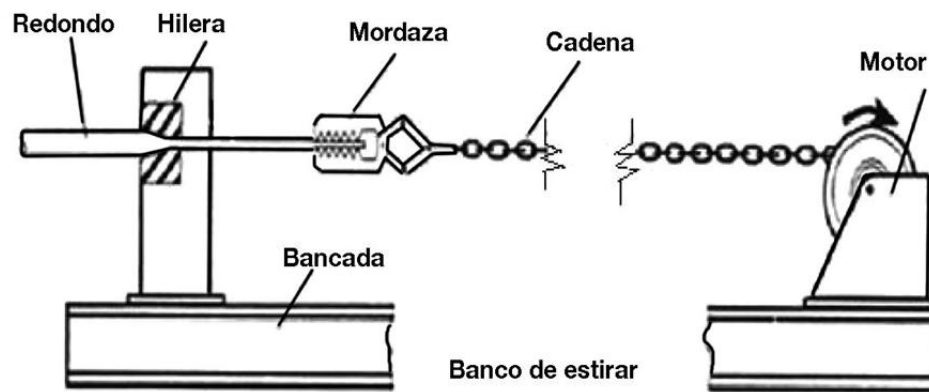


Fig.1.9. Banco de estirado.

### 1.3.4. PARÁMETROS INVOLUCRADOS

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 del alambre a trefilar, entre los parámetros involucrados más importantes se tienen (Atienza Riera, 2001):

- ✓ Fuerza de tirado,
- ✓ Factor de reducción,
- ✓ Número de pasadas,
- ✓ Geometría del dado de trefilado,
- ✓ Material del dado,
- ✓ Coeficientes de rozamiento,
- ✓ Lubricación,
- ✓ Calor generado durante el proceso, y
- ✓ Velocidad de trefilado.

#### **1.3.4.1. FUERZA DE TIRADO, FACTOR DE REDUCCIÓN Y NÚMERO DE PASADAS**

La fuerza de tirado es aquella necesaria para que el alambre pase a través de la hilera o dado. Es uno de los parámetros básicos del trefilado que está vinculado de forma muy estrecha con el factor de reducción, ya que entre mayor es la reducción mayor es la fuerza de tirado necesaria. El factor de reducción por pasada está limitado por las propiedades del material que se está trabajando, las características de la máquina y la lubricación.

Es importante tomar en cuenta la secuencia de pasadas además del porcentaje de reducción de área entre cada una de ellas, y es mucho más importante la última pasada, ya que a veces el factor de reducción en ésta es muy pequeño, con el único objetivo de suavizar e incluso invertir el perfil de esfuerzos residuales.

#### **1.3.4.2. GEOMETRÍA DEL DADO DE TREFILADO**

Es uno de los parámetros principales en el proceso, y el factor más importante de la geometría es el ángulo de reducción; es decir, el ángulo de la



zona donde se produce la deformación del material, sus valores oscilan entre 3 y 10° (semiángulo de reducción). A pesar de que no se produce reducción en la sección en el alambre a la salida del dado, éste es importante porque le permite acomodarse a sus nuevas dimensiones, favoreciendo la exactitud dimensional y su calidad superficial. Su longitud oscila alrededor de la mitad del diámetro de salida.

#### **1.3.4.3. MATERIAL DEL DADO**

La selección del material para el dado o hilera depende de muchos factores como: composición, tamaño, forma, tolerancia y esfuerzos a los que va estar sometido. Además, la vida útil de estos elementos se determina normalmente por la longitud o masa de metal a trefilar que pasará a través de éste antes de perder las tolerancias.

#### **1.3.4.4. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO Y LUBRICACIÓN**

En el trefilado la selección del lubricante se hace considerando sus propiedades tribológicas, ya que una adecuada lubricación es esencial en el proceso, debido a que se elige para proporcionar un menor coeficiente de rozamiento y el mínimo recubrimiento del lubricante, además que tiene como objetivo extraer el calor generado sobre todo en aquellos casos donde la velocidad del trefilado es grande.

#### **1.3.4.5. VELOCIDAD DE TREFILADO**

Se tiene que tomar en consideración que cuando se realiza un trefilado en varias etapas, la velocidad de paso del alambre por el dado irá aumentando

en la medida que se reduce la sección del material (debido a la conservación de volumen en el proceso).

#### **1.4. TIPOS DE MÁQUINAS TREFILADORAS**

Debido a la gran cantidad de configuraciones y procesos de trefilado, es necesario agruparlas de acuerdo al tipo de sus características principales. De esta forma se facilita su estudio para una mejor comprensión de las mismas.

##### **1.4.1. DE ACUERDO A LA AUTONOMÍA DEL PROCESO**

Un proceso de trefilado puede ser manual, semiautomático o automático. Un proceso manual es aquel donde un operario se encarga de colocar el alambre y que el proceso se lleve a cabo incluso proporcionando el mismo la fuerza motriz, cambiando con sus manos la configuración del sistema según sea el caso. Un proceso semiautomático es aquel donde la mayoría del mismo se realiza de forma autónoma; sin embargo, el operario aún debe manipular el sistema manualmente por ejemplo para cambiar la bobina de alambre. Un proceso automático es aquel donde el operario sólo debe supervisar los parámetros de trefilado mientras una máquina controlada electrónicamente por computadora realiza el proceso automáticamente.

##### **1.4.2. DE ACUERDO AL LUBRICANTE UTILIZADO EN EL PROCESO**

Las trefiladoras húmedas y secas difieren básicamente del tipo del lubricante, para el caso de trefiladoras secas pueden ser ya sea grasas o polvo de jabón, mientras que en las trefiladoras húmedas el dado se sumerge por completo en el lubricante fluido a base de licor fermentado de harina de

centeno, una solución alcalina de jabón, o lubricantes con aditivos de extrema presión (Dieter, 1967). Los lubricantes húmedos generalmente ayudan a disminuir el valor de carga de trefilado necesaria para realizar el proceso, sin embargo el acabado superficial resultante es de una calidad inferior al obtenido del trefilado en seco. Las trefiladoras húmedas suelen proporcionar un menor nivel de ruido en comparación con las secas, a pesar de una posible velocidad de trefilado mayor.

### **1.4.3. DE ACUERDO A LA EXTENSIÓN DEL PROCESO**

Estas pueden ser:

- ✓ De bloque o monobloque,
- ✓ Acumulativas de doble bloque,
- ✓ Acumulativa o multibloque,
- ✓ De velocidad controlada, y
- ✓ De trefilado continuo.

En el trefilado de materiales no ferrosos es una práctica común utilizar lubricantes húmedos. En los procesos industriales de trefilado de materiales no ferrosos es común el uso de trefiladoras continuas húmedas autónomas. Este tipo de trefiladoras también presenta un cierto resbalamiento en el tambor de salida si este gira más rápido que la velocidad de trefilado. Este resbalamiento crea una superficie pulida en el material trefilado mejorando el acabado superficial (Handbook, 1993).

### **1.5. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA MÁQUINA DE TREFILADO**

A continuación se presenta mediante un esquema los componentes principales de una máquina trefiladora (López Martínez, 2011):

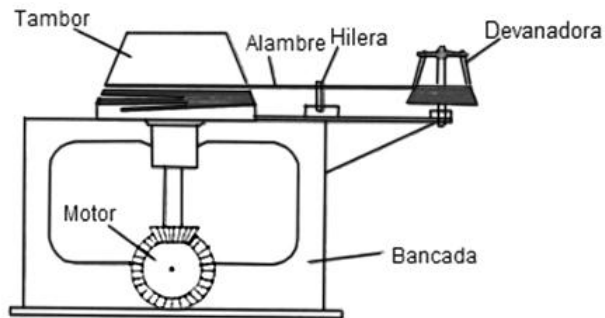


Fig.1.10. Elementos principales del equipo de trefilado (López Martínez, 2011).

- ✓ Hilera o dado.- Es el elemento en el cual se da la reducción de la sección transversal del alambre o cambio dimensional puro. En la Fig. 1.11 se observa la sección de corte de dicho elemento el cual se encuentra contenido dentro de una caja que puede ser de hierro o acero para protección. El ángulo de entrada es para incorporar el lubricante que servirá para disminuir el coeficiente de fricción entre alambre y dado. El ángulo de ataque o de aproximación es la sección del dado en la que se produce la reducción del diámetro. La superficie de apoyo sirve de guía cuando el alambre sale de la hilera(Dieter, 1967).

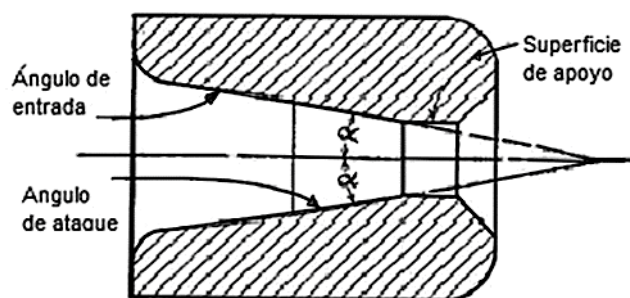


Fig. 1.11. Representación esquemática de la sección de corte de un dado de trefilado(Dieter, 1967).

- ✓ Bobina de arrastre o de tambor.- Después de preparado el alambre se reduce el diámetro de la punta, se hace pasar a través de la hilera y se sujeta a la mordaza de la bobina de arrastre.

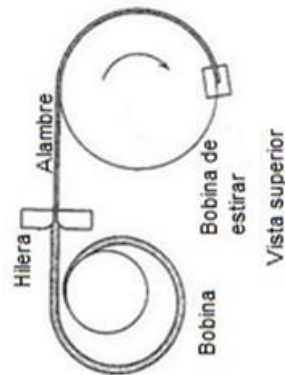


Fig. 1.12. Bobina de arrastre (Dieter, 1967).

- ✓ Devanador.- Es un equipo necesario dentro del proceso ya que tiene como función sostener el alambón que servirá de alimentación a la máquina trefiladora.
- ✓ Motor.- Es el componente encargado de proporcionar la potencia y velocidad requerida por el proceso. En las máquinas trefiladoras modernas es común utilizar servomotores. Un servomotor es un dispositivo similar al motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su intervalo de operación y mantenerse estable en dicha posición, lo cual brinda una gran ventaja ya que en el proceso de trefilado es vital un buen control de la velocidad a la que el alambre atraviesa la hilera o dado.
- ✓ Bancada.- Espacio donde se procede a colocar todos los componentes que conforman el equipo de trefilado como: motor, bastidor de la hilera, sistema de extracción.

## 1.6. PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE TREFILADO DE COBRE

El trefilado como un método de conformación en frío de metales, se apega al principio de conservación de masa; es decir, la misma cantidad de metal que entra en el proceso debe ser la misma que sale. En consecuencia,

conservando constante la masa y volumen se puede estimar de acuerdo a la reducción de diámetro en una barra o alambre, su longitud final.

La fuerza que se requiere para estirar un alambre a través de una hilera es la suma de la necesaria para producir una disminución del diámetro, la requerida para producir deformación de cizallamiento en las capas superficiales a la entrada y salida del dado y finalmente la requerida para superar la fuerza de fricción entre el material de trabajo y la hilera(Dieter, 1967).

### 1.6.1. REDUCCIÓN MÁXIMA DE ÁREA (ANÁLISIS SIN FRICCIÓN)

Para determinar la máxima deformación posible en el trefilado sin exceder el esfuerzo de inestabilidad o de fractura, se establece un sistema de esfuerzos usando el criterio de la teoría de cortante máximo, despreciando la fricción entre la barra o alambre y el dado, como se presenta en la Fig. 1.13 (Dieter, 1967).

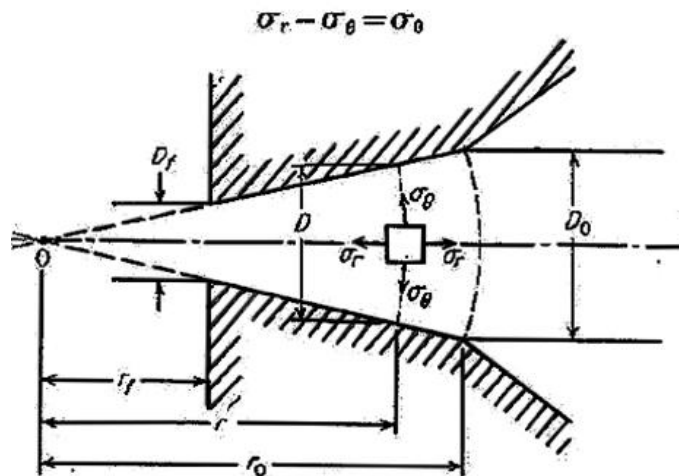


Fig. 1.13. Sistema de esfuerzos en trefilado (Dieter, 1967).

## 1.6.2. ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

Un análisis matemático de la Fig. 1.13 determina la relación(Dieter, 1967):

$$r = 1 - \frac{D_f^2}{D_o^2} \quad (1.9)$$

donde:

$r$ : Porcentaje de deformación en el material

$D_f$ : Diámetro final a la salida del dado

$D_o$ : Diámetro a la entrada del dado, antes del trefilado.

Al resolverse la Ec.1.9 se determina que(Dieter, 1967):

$$r = 1 - \frac{D_f^2}{D_o^2} = 1 - \frac{1}{e} \leq 0.63. \quad (1.10)$$

Esto significa que para un material plástico ideal, despreciado las fuerzas de fricción, no se puede obtener una reducción de área superior al 63%.

El diseño de un proceso de trefilado debe asegurar que el alambre de cobre incremente su esfuerzo de fluencia para evitar condiciones de estricción.

Para un diámetro inicial dado de un alambre que se encuentra en una condición más blanda posible el % de trabajo en frío se calcula mediante la siguiente(Askeland, 1998):

$$\%TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100\% \quad (1.11)$$

En dicha Ec. 1.11 se involucran los diámetros inicial y final como condiciones del proceso, lo cual da un valor determinado de trabajo en frío que necesita ser aplicado para lograr dicha reducción de área. En la Fig. 1.14 se

presenta la relación entre el porcentaje de trabajo en frío y su efecto sobre las propiedades mecánicas del cobre puro comercial, en donde se observa que al incrementar el trabajo en frío tanto el límite elástico como la resistencia a la tensión aumentan sacrificando la ductilidad. Por lo que si para un porcentaje de trabajo en frío dado se generan esfuerzos de tracción superiores al límite elástico del alambre de cobre indicado según la Fig. 1.14 dicho alambre se romperá.

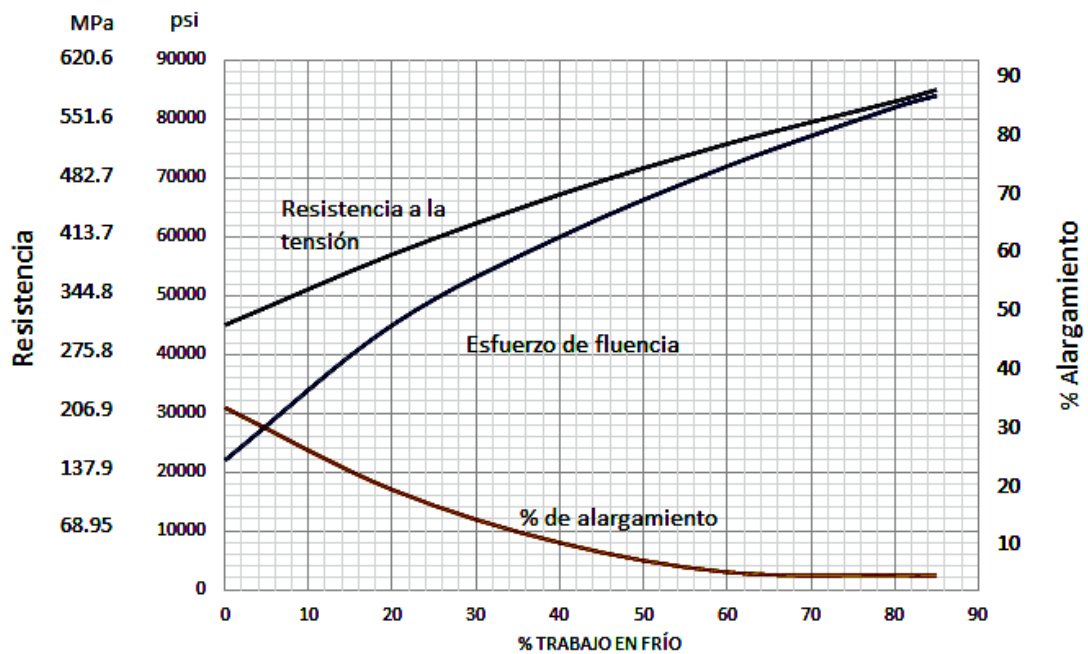


Fig. 1.14. Propiedades mecánicas vs. trabajo en frío (Askeland, 1998).

### 1.6.3. ANÁLISIS INCLUYENDO LA FRICCIÓN

El trabajo se define como el producto de la fuerza por la distancia y este concepto se aplica al proceso de trefilado (Wright, 2011) ya que se tiene una fuerza de trefilado la cual se ejerce sobre el alambre posterior al dado, por lo que el trabajo desarrollado es:



$$W = F * L \quad (1.12)$$

Si  $L$  pasa a dividir al lado derecho de la ecuación anterior y ambos miembros son afectados por  $1/A_f$  donde  $A_f$  es el área transversal del alambre posterior al dado, se tiene (Wright, 2011):

$$\frac{W}{(L \times A_f)} = \frac{F}{A_f} \quad (1.13)$$

El término en la izquierda es simplemente el trabajo dividido por el volumen o trabajo por unidad de volumen, y el término en la derecha es el esfuerzo de trefilado " $\sigma_t$ " (Wright, 2011).

$$\sigma_t = w \quad (1.14)$$

En la Fig. 1.15 se presenta cómo se desarrolla el esfuerzo de trefilado sobre el material, como se relacionan los diámetros de entrada y salida, así como las variables involucradas, todo desde el interior del dado donde se produce la deformación plástica.

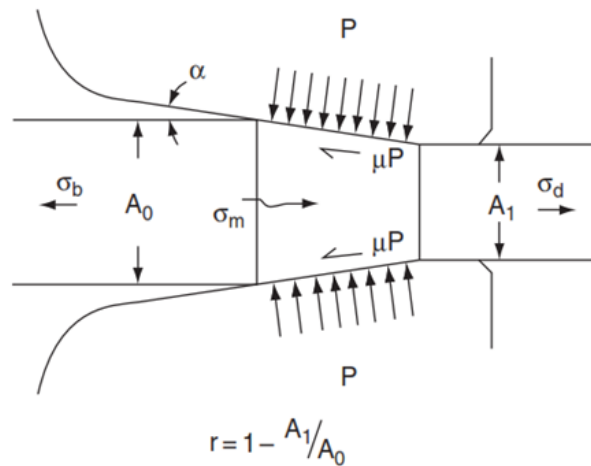


Fig. 1.15. Esquema del proceso de trefilado y representación de las variables involucradas (Wright, 2011).

Este análisis puede ser considerado como externo, ya que los términos involucrados son definidos y medidos fuera de la zona de trefilado del dado. El mismo trabajo necesario para el proceso de trefilado puede ser definido por un análisis interno donde se refleja el trabajo uniforme ( $w_u$ ), trabajo no uniforme o redundante ( $w_r$ ) y el trabajo de fricción ( $w_f$ ) todos en base a la unidad de volumen. Cada uno de los trabajos efectuados internamente contribuye al esfuerzo de trefilado.

$$\sigma_t = w_u + w_r + w_f. \quad (1.15)$$

#### 1.6.4. TRABAJO UNIFORME

El trabajo uniforme es el trabajo hecho durante el adelgazamiento del alambre o varilla sin considerar la interacción con el dado; es decir, sin

considerar los efectos del dado sobre el cambio de dirección del flujo de metal (convergencia) o los efectos de la fricción.

Además, puede expresarse como el producto del esfuerzo de fluencia promedio en el alambre  $\sigma_a$  y la deformación real durante la reducción, así:

$$w_u = \sigma_p \ln(A_0/A_1) = \sigma_p \ln[1/(1 - r)] \quad (1.16)$$

donde:

$\sigma_p$ : Esfuerzo de fluencia promedio, MPa;

$A_0$ : Área inicial, mm<sup>2</sup>;

$A_f$ : Área final, mm<sup>2</sup>; y

$r$ : Relación de deformación plástica.

El esfuerzo promedio de fluencia se emplea como un análisis simple. Además, se debería sobreentender que el esfuerzo de fluencia aumenta a partir de la entrada del dado hasta la salida del mismo por efecto del endurecimiento por deformación. Debido a esto, se toma un esfuerzo promedio entre las condiciones iniciales y finales de la deformación.

### 1.6.5. TRABAJO NO UNIFORME O REDUNDANTE

Cuando el alambre entra en contacto con la pared del dado, este converge desde el plano horizontal hacia el centro consistente con el ángulo medio del dado ( $\alpha$ ) esquematizado en la Fig. 1.15. En una manera opuesta el alambre al dejar el cono de trefilado del dado, diverge del plano horizontal de su trayectoria previa paralela a la pared del dado, pero en menor medida.

En un análisis simple el alambre experimenta cizallamiento a la entrada de la zona de deformación y de igual forma pero en dirección opuesta a la salida de dicha zona. Estos esfuerzos de cizallamiento se cancelan el uno al

otro y no se reflejan en la reducción de trefilado total del alambre. Estos esfuerzos comúnmente son denominados esfuerzos redundantes, ya que no hay efectos demostrables sobre la geometría del alambre. Sin embargo, el trabajo involucrado no se cancela, y este dividido por el volumen se define como trabajo redundante.

Del análisis anterior se define un factor de trabajo redundante ( $\phi$ ) como sigue:

$$\phi = (w_u + w_r)/w_u \quad (1.17)$$

donde:

$$w_r = (\phi - 1)w_u = (\phi - 1)\sigma_p \ln[1/(1 - r)]. \quad (1.18)$$

Si no existe trabajo redundante ( $\phi = 1$ ). En general el trabajo redundante existe, especialmente para valores del parámetro ( $\Delta$ ) mayores a 1 o con ángulos medios mayores y/o reducciones bajas. En conclusión el trabajo redundante aumenta a medida que el parámetro ( $\Delta$ ) aumenta.

$$\phi \approx 0.8 + \Delta/4.4 \quad (1.19)$$

donde:

$\Delta$ : Factor que define las características geométricas de la zona trapezoidal (conocida como zona de deformación plástica) del dado o la hilera.

La forma de esta zona está en función de ( $r$ ) y ( $\alpha$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\Delta \approx (\alpha/r) \left[ 1 + (1 - r)^{1/2} \right] \approx 4 \tan \alpha / \ln \left[ 1/(1 - r) \right]. \quad (1.20)$$

### 1.6.6. TRABAJO DE FRICCIÓN

La contribución de la fricción al esfuerzo de trefilado o el trabajo de fricción dividido por el volumen del alambre o varilla es el resultado del esfuerzo cortante o de cizallamiento generado en el área de contacto entre el alambre y el cono de trefilado del dado tal como se ve en la Fig. 1.15. El esfuerzo promedio de fricción se puede expresar comúnmente como  $(\mu P)$ , donde  $(\mu)$  es el coeficiente promedio de fricción y  $(P)$  es la presión promedio ejercida por el dado.

La presión promedio del dado se puede aproximar a  $(\phi\sigma_a)$ , con la presión del dado reflejando el trabajo redundante, así como uniforme en la zona de deformación. La expresión para el trabajo de fricción por unidad de volumen es:

$$w_f = \mu(\cot\alpha)\phi\sigma_p \ln[1/(1-r)] = 4\mu\phi\sigma_p/\Delta. \quad (1.21)$$

Además, se puede argumentar que ocurre un trabajo de fricción adicional en la sección cilíndrica inmediatamente después del cono de trefilado; sin embargo, no existe base teórica para el trabajo en dicha zona de contacto aparte del desalineamiento del alambre a partir del eje central del dado.

### 1.7. ECUACIÓN DEL ESFUERZO DE TREFILADO

Teniendo en cuenta que el esfuerzo de trefilado se define como la sumatoria del trabajo uniforme, el trabajo redundante y el trabajo de fricción, se introducen cada una de las variables involucradas en el proceso sustituyendo en la Ec.1.15 las Ecs. 1.16, 1.18 y 1.21 obteniendo la siguiente expresión para el esfuerzo de trefilado(Wright, 2011):

$$\sigma_t = \sigma_p \ln[1/(1-r)] + (\phi - 1)\sigma_p \ln[1/(1-r)] + 4\mu\phi\sigma_p/\Delta. \quad (1.22)$$

Al combinar términos, dividiendo entre  $(\sigma_p)$  y aproximando ( $\tan\alpha \approx \alpha$ ) se obtiene(Wright, 2011):

$$\sigma_t/\sigma_p = (4\phi/\Delta)(\alpha + \mu). \quad (1.23)$$

Al sustituir la relación obtenida para el factor  $(\phi)$  y utilizando  $(\Sigma)$  para la relación  $(\sigma_t/\sigma_p)$  se obtiene(Wright, 2011):

$$\sigma_t/\sigma_p = \Sigma = [(3.2/\Delta) + 0.9](\alpha + \mu). \quad (1.24)$$

El esfuerzo de trefilado debe permanecer por debajo del esfuerzo de fluencia a la salida del dado  $(\sigma_{01})$  para evitar un estiramiento incontrolado, estricción o fractura. Además, dado que  $(\sigma_{00})$  es el esfuerzo de fluencia a la entrada del dado, el esfuerzo promedio de fluencia se puede aproximar a(Wright, 2011):

$$\sigma_p = (\sigma_{00} + \sigma_{01})/2. \quad (1.25)$$

Analizando la Ec. 1.25 se puede decir que cuando no existe endurecimiento por deformación  $(\sigma_p = \sigma_{00} = \sigma_{01})$ , Por lo que deberá permanecer por debajo de  $(\sigma_p)$  y  $(\Sigma)$  tendrá un valor menor que 1. En el caso en que exista un endurecimiento por deformación significativo, teóricamente  $(\sigma_t)$  podrá exceder a  $(\sigma_p)$  ya que el incremento de fuerza a la salida del dado permite un mayor esfuerzo de trefilado sin que haya presencia de un estiramiento incontrolado, estricción o fractura. Sin embargo, para un análisis más conservativo se asumirá que  $(\sigma_t)$  no puede exceder  $(\sigma_p)$  y que el límite de

trefilado será ( $\Sigma = 1$ ). Se sabe que un análisis sin fricción y sin trabajo redundante se obtiene reducciones muy por debajo del 63%. En la práctica y en el área industrial raramente se tiene una reducción arriba de 30 a 35% por lo que la reducción comúnmente aplicada, se aconseja que tenga un valor de 20.7% para materiales no ferrosos (Wright, 2011).

Es importante destacar que la Ec. 1.24 no se puede utilizar para determinar la fuerza necesaria para un proceso de trefilado, pero aporta la relación entre el esfuerzo de trefilado y el esfuerzo de cedencia promedio, representando de forma directa el riesgo de rotura en el alambre. Además, es aconsejable que esta relación esté por debajo de 0.7 y un valor de 0.6 representa el máximo para una reducción agresiva en la práctica. Esta relación representa el endurecimiento por trabajo en frío que puede tener lugar en la matriz o en el dado. Esto complica el análisis ya que este esfuerzo de trefilado está relacionado con el esfuerzo promedio de fluencia no con el esfuerzo de cedencia obtenido a la salida del dado.

### 1.7.1. TREFILADO MULTIPASADAS CON REDUCCIÓN CONSTANTE

Existen diferentes planteamientos para un proceso de trefilado que se realiza con más de una pasada, y entre las más simple está la de reducción constante. La deformación real total, para pasar de ( $A_0$ ) a ( $A_f$ ) en ( $N$ ) reducciones de áreas iguales, se debe calcular por la siguiente expresión (Wright, 2011):

$$\varepsilon_t = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right). \quad (1.26)$$

Esta ecuación no cambia si los esfuerzos están a compresión o a tracción. Para ( $N$ ) pasadas, la deformación en cada una de estas es(Wright, 2011):

$$\varepsilon_{tn} = \frac{\ln\left(A_0/A_f\right)}{N}. \quad (1.27)$$

Así, la correspondiente reducción ( $r_n$ ) se obtiene por la expresión(Wright, 2011):

$$r_n = 1 - \exp(-\varepsilon_{tn}). \quad (1.28)$$

### **1.7.2. TREFILADO DE MULTIPASADAS CON RELACIÓN ESFUERZO TREFILADO ENTRE ESFUERZO DE CEDENCIA CONSTANTE**

Recordando la Ec.1.24 se puede expresar en función del esfuerzo de fluencia promedio(Wright, 2011):

$$\sigma_t = \sigma_p [(3.2/\Delta) + 0.9](\alpha + \mu). \quad (1.29)$$

Un análisis conservador puede considerar una gran cantidad de aspectos involucrados en el aumento de resistencia del material por el trabajo en frío realizado en el proceso, simplemente tomando en consideración la siguiente expresión para determinar el esfuerzo real(Wright, 2011):



$$\sigma_o = K \varepsilon_t^n \quad (1.30)$$

donde:

$\sigma_o$ : Esfuerzo de fluencia real;

$\varepsilon_t$ : Deformación real o natural;

$K$ : Coeficiente de resistencia a la tracción; y

$n$ : Exponente de endurecimiento por deformación.

Integrando la Ec. 1.30 se puede determinar que:

$$\sigma_o = \frac{K \varepsilon_t^n}{(n + 1)}. \quad (1.31)$$

En consecuencia y retomando la Ec.1.29 se obtiene la siguiente expresión (Wright, 2011), donde se da la relación entre el esfuerzo de trefilado y el esfuerzo de fluencia a la salida del dado o hilera.

$$\sigma_t / \sigma_{01} = (n + 1)^{-1} [(3.2/\Delta) + 0.9] (\alpha + \mu) \quad (1.32)$$

donde:

$\sigma_{01}$ : Esfuerzo de fluencia a la salida del dado.

En el mismo sentido, se puede asumir que la Ec. 1.32 se puede utilizar sin restricciones para determinar el esfuerzo de trefilado en cada pasada, lo cual es posible únicamente cuando se tenga en consideración la variación ( $n$ ), debido a que su valor disminuye entre más pasadas sean realizadas para obtener la reducción requerida. Se sabe que en el proceso de trefilado, debido al trabajo en frío realizado el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de trefilado aumentan. Por lo tanto, para mantener un esfuerzo constante de trefilado en la sección transversal del alambre en cada punto, se debe reducir la reducción por

pasada. Un proceso de trefilado multipasadas donde se aplica una disminución constante en la reducción por paso para compensar el efecto en la resistencia del alambre por el trabajo en frío se le denomina proceso de trefilado de pasada cónica.

### 1.7.3. TREFILADO DE MULTIPASADAS CON CONDICIÓN ADIABÁTICA ENTRE PASADAS

Si se supone que el esfuerzo de fluencia real está dado por la Ec.1.30 entonces el esfuerzo de fluencia en una pasada  $N$  debe corresponder a (Wright, 2011):

$$\sigma_{pN} = K \left[ \ln \frac{A_0}{A_N} \right]^n \quad (1.33)$$

donde:

$\sigma_{pN}$ : Esfuerzo de fluencia promedia en una pasada, N;

$A_0$ : Sección transversal antes de la pasada, N;

$A_N$ : Sección transversal después de la pasada, N;

Modificando nuevamente la Ec.1.29 se tiene:

$$\sigma_t / K(\alpha + \mu) = cte = \left[ \ln \frac{A_0}{A_N} \right]^n \left\{ \left[ \left( \frac{0.8}{\tan \alpha} \right) \ln \frac{A_{N-1}}{A_N} \right] + 0.9 \right\}. \quad (1.34)$$

donde ( $A_{N-1}$ ) es ( $A_0$ ) para la primera pasada, por lo que se obtiene con la Ec.1.34 una expresión para la determinación del esfuerzo de trefilado en función de las propiedades del material a trefilar, las condiciones geométricas iniciales y finales de éste, así como la geometría del dado.

## **2. DISEÑO DEL PROCESO DE TREFILADO**

En esta etapa del presente proyecto se tratarán los puntos de diseño esenciales del proceso de trefilado, así como los elementos mecánicos involucrados en éste, estableciendo al mismo tiempo los criterios sobre la base en los cuales se fundamentará la ejecución del análisis.

Las condiciones o requerimientos relacionados al proceso como tal se referirán tomando en cuenta la naturaleza del proyecto, la cual es puramente didáctica y de aprendizaje así como los costos de forma que ambas situaciones puedan equilibrarse conjuntamente.

### **2.1. DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DEL EQUIPO**

La manera en que se realizará el proceso de trefilado será mediante un banco de pruebas didáctico que constará de las siguientes partes:

- ✓ Alambre de cobre para ser trefilado,
- ✓ Bancada,
- ✓ Hilera,
- ✓ Soporte de hilera,
- ✓ Tambores,
- ✓ Eje de tambor,
- ✓ Motor eléctrico,
- ✓ Transmisión,
- ✓ Soporte de motor,
- ✓ Tablero de control,
- ✓ Guías y
- ✓ Pernos de sujeción.

Para comprender la función de cada uno de estos elementos se examinará cada una de ellos.

### 2.1.1. ALAMBRE

El alambre de cobre será el material a trefilar por lo que se deberá seleccionar su diámetro correctamente para un proceso óptimo y económicamente viable. Se usará aproximadamente quince metros de alambre de cobre el cual pasará de un tambor hacia otro pasando por una hilera, la cual reducirá su diámetro en varias pasadas.

### 2.1.2. BANCADA

Corresponde a la base o estructura en la cual se montarán todos los elementos del proceso. Estará construida de tubo estructural rectangular 50.8x25.4 mm (2x1 pulg) y deberá ser capaz de soportar el peso de los elementos y las fuerzas debidas al proceso de trefilado. Una pletina soldada sobre la estructura facilitará la sujeción de los diferentes elementos a la bancada mediante pernos y agujeros practicados en la pletina.



Fig.2.1.Bancada.

### 2.1.3. HILERA

Este elemento es el encargado de reducir el diámetro del alambre de cobre en intervalos definidos. En este proyecto se utilizará una hilera multiagujeros utilizada en joyería para trefilar metales preciosos. En la sección 2.2.1 se describirá más a detalle dicho elemento.



Fig.2.2. Hilera.

### 2.1.4. SOPORTE DE HILERA

La hilera se fijará mediante dos soportes hechos de ángulo estructural de 50.8x50.8x3.17mm (2x2x1/8 pulg), la sección fija irá soldada en una platina base de 3 mm (1/8 pulg) y la sección corrediza se sujetará a la base mediante un perno de 8 mm (5/16 pulg) en un agujero corredizo. Así, en la Fig. 2.3 se presenta un esquema del mismo. Los soportes se sujetaran a la estructura mediante pernos. La hilera podrá deslizarse hacia los lados o cambiarse de posición siempre y cuando el trefilado no se esté desarrollando ya que este generará una fuerza normal que dificultaría su movimiento debido a la fricción entre soporte e hilera.

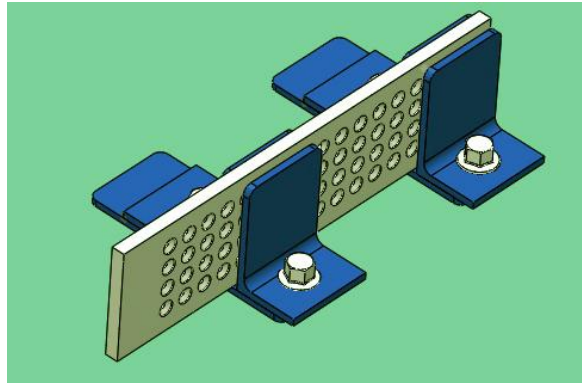


Fig.2.3. Soporte de hilera.

### 2.1.5. GUÍAS

Para mantener la perpendicularidad entre el alambre a trefilar y la hilera se incorporarían dos guías en forma de argolla como se presenta en la Fig. 2.4. Estas guías mantendrán un ángulo recto entre estos componentes sin importar el ángulo que exista entre el alambre y los tambores. Estos se colocarán en la entrada y salida de la hilera.

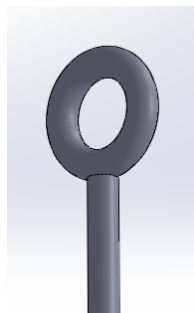


Fig.2.4. Guía

### 2.1.6. TAMBORES

Los tambores son cilindros encargados de enrollar o desenrollar el alambre sobre sí mismos durante el trefilado. Se usarán dos tambores: uno para halar el alambre haciéndolo pasar por la hilera y otro para desenrollar o

suministrar el alambre al proceso. Ambos tambores serán idénticos e intercambiables.

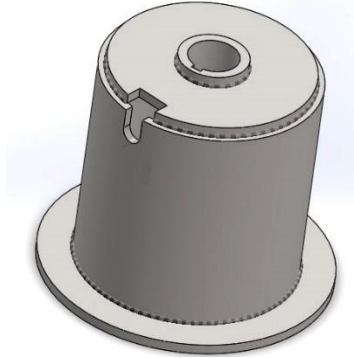


Fig.2.5. Tambor.

### 2.1.7. SOPORTE DE TAMBOR

El tambor que proporcione el alambre en el proceso se montará sobre una base con un vástago liso en la que el tambor girará libremente aportando el alambre hacia la hilera. Ese vástago será el eje del tambor libre mientras que el tambor de tracción se acoplará a una transmisión.

El eje estará soldado a una base que se sujetará a la bancada mediante cuatro pernos para fijar el tambor y solo permitirle un movimiento giratorio sobre sí mismo, tal como se presenta en la Fig. 2.6.

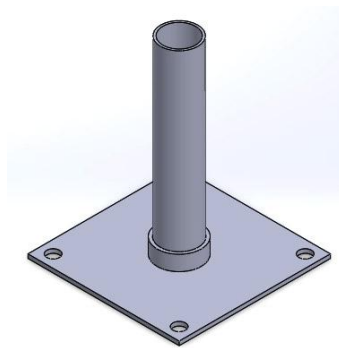


Fig.2.6. Eje del tambor.

### 2.1.8. MOTOR ELÉCTRICO

Se utilizará un motor eléctrico trifásico de 1.5 kW (2 HP) como el de la Fig. 2.7 que gira a 1725 rpm. Dicho motor tendrá acoplada una polea que por medio de una banda transmitirá la potencia a la transmisión de engranes que aumentaran el torque del sistema, proporcionando así una gran tracción en el tambor.

Las protecciones del motor y sus interruptores se alojaran en una carcasa que servirá también como panel de control donde se apagará, encenderá o detendrá por emergencia el equipo mediante sus respectivos botones

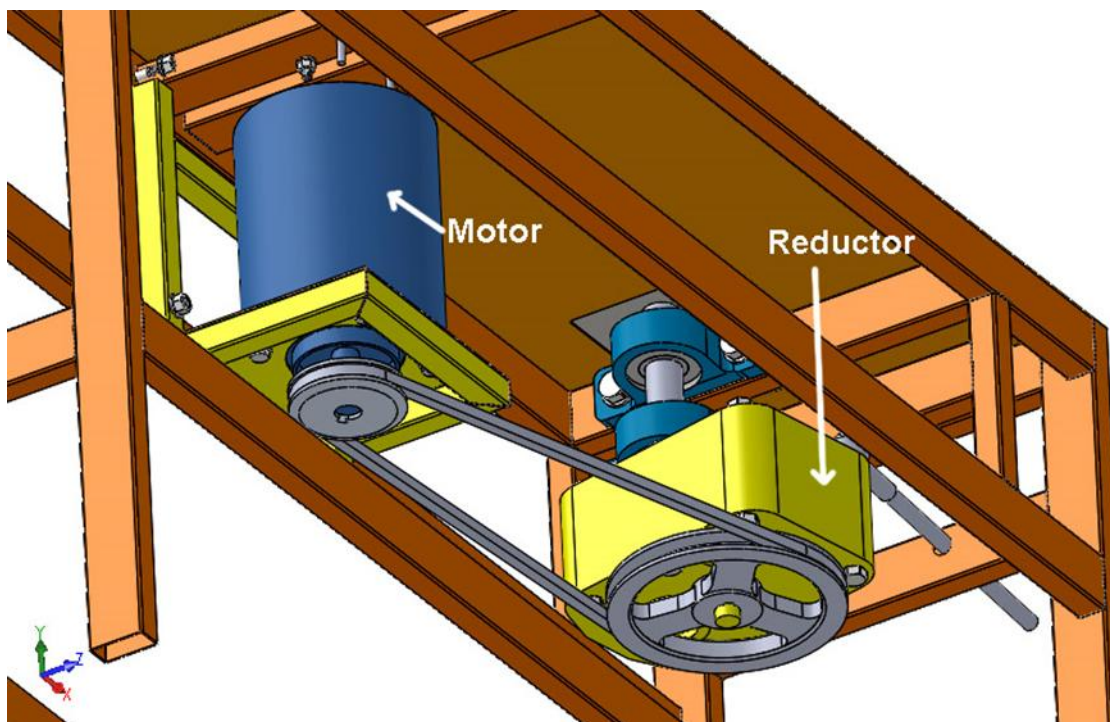


Fig.2.7. Motor eléctrico a utilizar y su transmisión por banda a la entrada del reductor.

De igual forma, el controlador y el procesador de las señales se alojarán en una carcasa que servirá también como panel de control donde se apagará, encenderá o detendrá de emergencia el equipo mediante sus respectivos botones, tal como se presenta en la figura 2.8.





Fig.2.8. Panel de control, vista exterior e interior.

### 2.1.9. TRANSMISIÓN

Para optimizar la potencia del motor se añadirá una transmisión entre el tambor de tracción y el motor eléctrico, incrementando el torque mediante engranajes internos y poleas, el objetivo principal de utilizar dicha transmisión es para poder reducir la velocidad de trefilado en el tambor, el reductor a utilizar presentara una configuración similar a la mostrada en la Fig. 2.9.



Fig.2.9. Transmisión.

### 2.1.10. SOPORTES DE MOTOR

Éste deberá soportar la torsión necesaria para el trefilado así como su propio peso, en la Fig. 2.10 se ilustra este soporte que irá acoplado a la bancada y al motor mediante pernos.

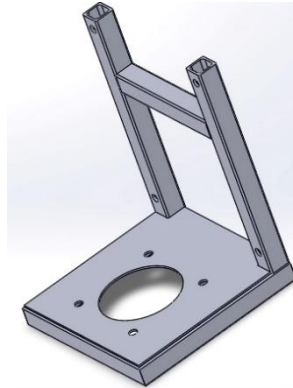


Fig.2.10. Soportes de motor.

Acoplado todos los elementos mencionados y definidos, la trefiladora presentará una configuración similar a la que se presenta en la Fig. 2.11. En anexos se encuentran los planos a detalle para cada elemento descrito, así como el plano en conjunto de la máquina.

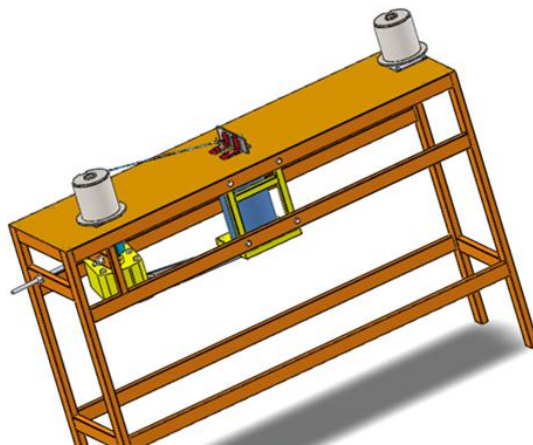


Fig.2.11. Banco de trefilado.

## 2.2. PROPUESTAS DE REDUCCIÓN PARA EL ALAMBRE DE COBRE

Primero se deben definir algunas propuestas de reducción de diámetro para alambre de cobre y seleccionar la más asequible y rentable económicamente y que a la vez satisfaga todos los objetivos establecidos en las prácticas de enseñanza aprendizaje que se espera realizar con el proceso de trefilado.

Para establecer estas propuestas se debe partir de las condiciones de mercado, accesibilidad y los recursos con los que se cuenta para poder definir los parámetros que componen a las mismas.

Se debe tomar en cuenta la geometría del alambre, principalmente el diámetro para determinar un máximo a trefilar, ya que esto es importante por las dimensiones de los elementos del equipo, la facilidad con la que el alambre deberá de maniobrase y al mismo tiempo la potencia del equipo para poder entregar la carga de trefilado de dicho diámetro.

La determinación de la carga necesaria para llevar a cabo el proceso de trefilado para alambre de cobre depende de la reducción total que se desea realizar y de los valores de esfuerzo de cedencia acorde al porcentaje de trabajo en frío aplicado que presenta el material (Askeland, 1998).

Dicho lo anterior, se partirá con el análisis en base a la carga preliminar de diseño para la selección de las características de motor y la potencia requerida para el proceso, así mismo para el diseño o selección de los elementos mecánicos tales como transmisión por engranajes y banda, ejes y tambores de enrollado del alambre serán analizados en función de dicha carga preliminar.

Finalmente, la hilera es el elemento en donde se dará el proceso de deformación y reducción de dimensiones del alambre, como tal se obtendrá del mercado externo, mediante compras en internet de sitios especializados en orfebrería.

### 2.2.1. HILERA O DADO PROPUESTO

Estas son fabricadas con acero carburo de tungsteno, los metales que se pueden trefilar son generalmente oro, plata y cobre. Su estructura es de forma rectangular y en ella viene una serie de agujeros (dados) por donde se hace pasar el metal a procesar según la geometría que se requiera. La geometría de los agujeros varía según las necesidades, entre cuadradas, rectangulares, circulares, media caña y oval son entre las más comunes.

Para el trabajo se utilizará una hilera de agujero circular, ya que el trefilado del alambre industrial que puede ser acero o cobre generalmente es con esta geometría.

Entre los criterios que se pueden tomar en cuenta para la selección de una hilera son:

- ✓ Vida útil.- Para este criterio el material que tiene mejor características en cuanto a resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión, es el tungsteno en comparación con el acero.
- ✓ Costos.- El tungsteno por sus propiedades es mucho más caro que el acero, por lo que este último tiene ventaja en este criterio.
- ✓ Facilidad de compra: Generalmente la forma de obtener es mediante compras en el exterior, ya que las que se logran conseguir en el mercado local son usadas, y a menudo presentan desgaste, por lo que la geometría de los agujeros o dados están alteradas no logrando así las condiciones requeridas para este proyecto.

A pesar de que la aplicación es de tipo didáctico y de aprendizaje; es decir, que su frecuencia de utilización no será como el de un proceso de trefilado industrial, se recomienda que la hilera sea de tungsteno ya que las ventajas presentadas por dicho material en cuanto a resistencia a la corrosión y desgaste superan los costos elevados de asequibilidad, por lo que con la selección de este material se asegura de que la hilera tendrá una larga vida útil, evitando así la necesidad de reposición en dado caso de falla prematura, en la figura se presenta la hilera a utilizar Fig.2.12.



Fig.2.12. Hilera de acero con dado de tungsteno para joyería de caña redonda.

Los calibres de alambre que han sido tomados en cuenta para las propuestas a considerar, también parte de la disponibilidad existente en el mercado local y son los siguientes:

- 1) Alambre esmaltado calibre AWG 10 con un diámetro de:  
D=2.588 mm (0.102 pulg)
- 2) Alambre esmaltado calibre AWG 12 con un diámetro de:  
D=2.053 mm (0.081 pulg)
- 3) Alambre esmaltado calibre AWG 14 con un diámetro de:  
D= 1.628 mm (0.064 pulg).

## 2.2.2. DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS PRELIMINARES DE DISEÑO

Para esta propuesta se parte de la mayor dimensión para alambre que se recomienda trefilar teniendo en cuenta las consideraciones citadas en el apartado anterior. Por lo que las fuerzas obtenidas en estas propuestas serán consideradas como cargas preliminares de diseño para el equipo de trefilado.

Para la propuesta se tienen las siguientes condiciones de entrada y salida:

$$D_0 = 2.588 \text{ mm}(0.102 \text{ pulg})$$

y

$$D_f = 2.3 \text{ mm}(0.0906 \text{ pulg})$$

De acuerdo a la curva de efectos de trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre se lee para un trabajo en frío de 0% (ver Fig. 2.12) el siguiente esfuerzo de cedencia:

$$\sigma_Y = 151.72 \text{ MPa}(22,000 \text{ psi}).$$

La fuerza necesaria para lograr que el material fluya en su condición inicial se determina como lo establece la Ec. 2.1 de esfuerzo (Askeland, 1998).

$$\sigma_Y = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

$$F = \sigma_Y A_0 = 151.72 \left[ \frac{\pi}{4} (D_0)^2 \right] = 151.72 \left[ \frac{\pi}{4} (2.588)^2 \right] = 798.11 \text{ N}(179.4 \text{ lb}).$$

El porcentaje de TF según la reducción deseada es de:

$$TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = \frac{(D_0)^2 - (D_f)^2}{(D_0)^2} \times 100\%$$

$$TF = \frac{(2.588)^2 - (2.3)^2}{(2.588)^2} \times 100\% = 21\%$$

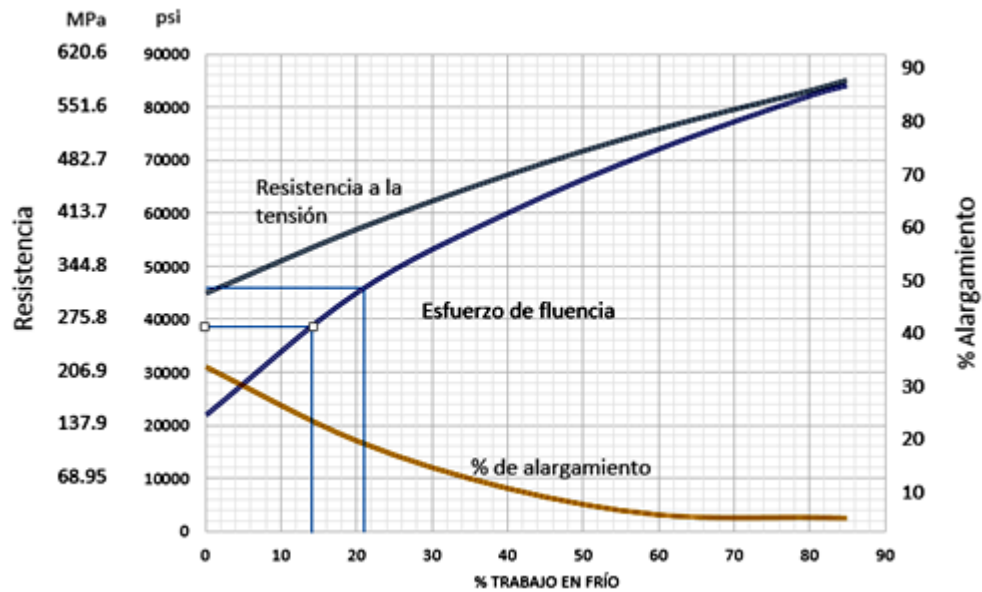


Fig.2.13. Propiedades mecánicas vs. trabajo en frío (Askeland, 1998).

El esfuerzo de cedencia según Fig. 2.13 es:

$$\sigma_Y \text{ a } 21\% \text{ de TF} = 317.24 \text{ MPa}(46000 \text{ psi}).$$

Para condiciones de trefilado se requiere que el esfuerzo generado por carga no sobrepase el esfuerzo de cedencia del material al final o salida de la hilera, ya que de lo contrario se produciría estirado del alambre. Por lo que se debe determinar el esfuerzo que la carga genera sobre el área final del alambre y comparar con el valor leído de la gráfica anterior:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{798.11}{\pi/4 (D_f)^2} = \frac{798.11}{\pi/4 (2.3)^2} = 192.1 \text{ MPa}(27,830.73 \text{ psi}).$$

De lo que se puede observar que no sobrepasa al valor de 317.24 MPa con lo que se garantiza que el material no se estirará.

Luego ya que el proceso debe ser separado en dos etapas (para fines didácticos y de aprendizaje) se debe evaluar las condiciones anteriores para la

primera etapa y segunda etapa, la cual partirá del diámetro inicial de 2.588 mm para reducir a un diámetro de 2.4 mm y de 2.4 mm a 2.3 mm, respectivamente.

El porcentaje de trabajo en frío para la primera etapa corresponde a:

$$TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = \frac{(D_0)^2 - (D_f)^2}{(D_0)^2} \times 100\%$$

$$TF = \frac{(2.588)^2 - (2.4)^2}{(2.588)^2} \times 100\% = 14\%.$$

Lo anterior se debe verificar que cumpla con las condiciones de deformación permanente de 0.2% donde deberá ser mayor para evitar el 100% de recuperación elástica tomando en cuenta que la deformación real viene definida por (Askeland, 1998):

$$\epsilon = \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) = \ln\left(\frac{D_o^2}{D_f^2}\right) \quad (2.2)$$

Por lo que se tiene:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{2.588^2}{2.4^2}\right) = 0.150833$$

$$\epsilon > \frac{0.2\%}{100}$$

$$0.150833 > 0.002$$

Así, se observa que cumple, por lo que se procede a evaluar las condiciones de esfuerzo correspondientes a esta etapa.

El esfuerzo de cedencia correspondiente a un TF=14% leído de la Fig. 2.13 corresponde a:



$$\sigma_{Y \text{ a } 14\% \text{ de } TF} = 268.96 \text{ MPa}(39,000 \text{ psi}).$$

Por lo que la fuerza o carga que se debe aplicar en la segunda etapa debe superar el valor de esfuerzo de cedencia anterior para lograr que el material con diámetro de 2.4mm fluya y pueda ser reducido a su condición última y final de 2.3 mm de diámetro.

Esta fuerza se determina de dicha condición límite:

$$\sigma_{Y \text{ a } 14\% \text{ de } TF} = \frac{F}{A}$$

$$\begin{aligned} F &= \sigma_{Y \text{ a } 14\% \text{ de } TF} A = 268.96 \left[ \frac{\pi}{4} (D_{intermedio})^2 \right] \\ &= 268.96 \left[ \frac{\pi}{4} (2.4)^2 \right] = 1216.9 \text{ N}(273.46 \text{ lb}). \end{aligned}$$

Por lo que la fuerza o carga de trefilado para lograr una reducción en dos etapas deberá ser mayor para garantizar la fluencia del alambre con diámetro de 2.4 mm. Suponiendo que se aplica una fuerza con un valor estimado de 1290.5N (290 lb). Se debe evaluar que el esfuerzo generado por dicha fuerza sea mayor al esfuerzo de cedencia que el material posee después de haberse finalizado la primera reducción (2.588 a 2.4 mm) para lograr la reducción final del alambre:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{1290.5}{\pi/4 (D_{intermedio})^2} = \frac{1290.5}{\pi/4 (2.4)^2} = 285.21 \text{ MPa}(41,355.79 \text{ psi}).$$

Comparando se observa que dicho esfuerzo es mayor al de cedencia, el cual ha sido leído de gráfica:

$$\sigma_Y \text{ a } 14\% \text{ de } TF = 268.96 \text{ MPa } (39,000 \text{ psi}).$$

Luego deberá evaluarse la condición en la cual la carga aplicada no sobrepase el esfuerzo de cedencia del material a la salida o final de la reducción:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{1290.5}{\pi/4 (D_f)^2} = \frac{1290.5}{\pi/4 (2.3)^2} = 310.60 \text{ MPa } (45,037 \text{ psi}).$$

Al comparar con el esfuerzo de cedencia del material a la salida después de haber sufrido una reducción de 2.588 mm a 2.3 mm el cual es:

$$\sigma_Y \text{ a } 21\% \text{ de } TF = 317.24 \text{ MPa } (46000 \text{ psi}).$$

Se tiene que la carga aplicada para poder realizar la reducción en dos etapas no sobrepasaría dicho valor obteniendo así las condiciones requeridas del proceso de trefilado.

En base a lo anterior se ha obtenido la carga del proceso para un alambre de cobre calibre 10, siendo este un valor preliminar, para el diseño del equipo, se debe enfatizar que el presente proyecto servirá para futuras investigaciones que buscarán la carga real de un proceso de trefilado para un calibre de alambre de cobre en específico.

### **2.2.3. PROPUESTA DE REDUCCIÓN N° 1 PARA PRÁCTICA DE LABORATORIO**

Se debe evaluar el alambre óptimo para la realización del laboratorio, teniendo como límite el calibre 10, se buscará aquel calibre adecuado que proporcione una carga menor a la preliminar de diseño que ya ha sido

determinada, un diámetro que permita apreciar a simple vista los efectos del trefilado y los costos para su compra.

Al igual que el análisis anterior se establecen la siguiente dimensión inicial para un alambre de calibre AWG 12 de la cual se parte para lograr reducir y deformar a una dimensión final según las condiciones de la hilera y la disponibilidad de los diferentes calibres de alambre que se encuentran en el mercado.

$$D_0 = 2.052 \text{ mm}(0.081 \text{ pulg.})$$

y

$$D_f = 1.7 \text{ mm}(0.067 \text{ pulg.})$$

El esfuerzo de cedencia del cobre comercialmente puro con 0% de TF es:

$$\sigma_Y = 151.72 \text{ MPa}(22,000 \text{ psi})$$

La fuerza necesaria para lograr que el material fluya en su condición inicial se determina como:

$$\sigma_Y = \frac{F}{A_0}$$

$$F = \sigma_Y A_0 = 151.72 \left[ \frac{\pi}{4} (D_0)^2 \right] = 151.72 \left[ \frac{\pi}{4} (2.052)^2 \right] = 501.75 \text{ N}(112.75 \text{ lb})$$

El porcentaje de TF según la reducción deseada es de:

$$TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% = \frac{(D_0)^2 - (D_f)^2}{(D_0)^2} \times 100\%$$

$$TF = \frac{(2.052)^2 - (1.7)^2}{(2.052)^2} \times 100\% = 31.37\%$$

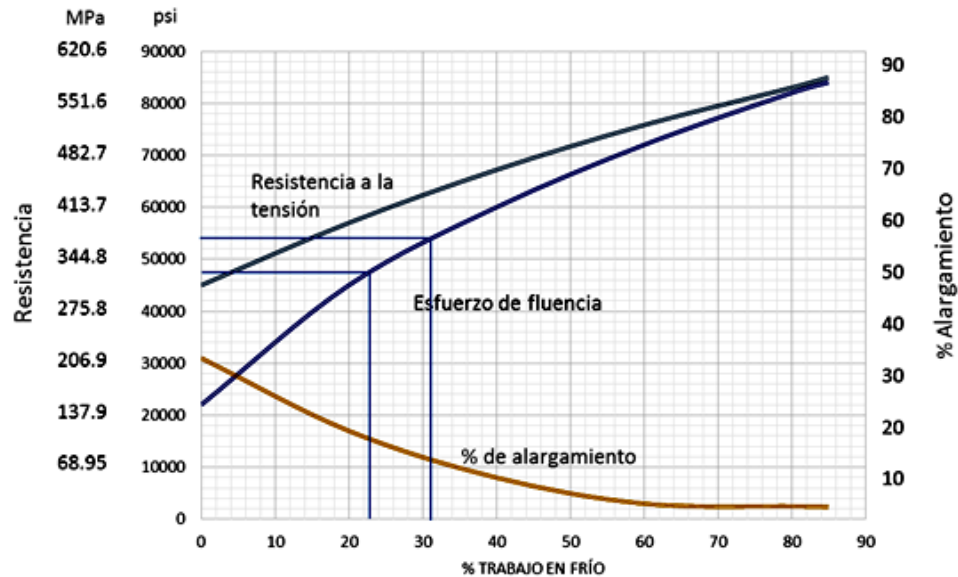


Fig. 2.14. Propiedades mecánicas vs. trabajo en frío (Askeland, 1998)

El esfuerzo de cedencia según la Fig. 2.14 es:

$$\sigma_Y \text{ a } 31.37\% \text{ de } TF = 372.41 \text{ MPa}(54000 \text{ psi}).$$

Seguidamente se debe verificar que la condición que el esfuerzo de estirado generado por la fuerza de 501.75 N no sobrepase el valor de esfuerzo de cedencia anterior que el alambre de cobre poseerá al final del proceso (una vez haya sido efectuado el %TF de 31.37). El esfuerzo que la carga genera sobre el diámetro final del alambre es:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{501.75}{\pi/4 (D_f)^2} = \frac{501.75}{\pi/4 (1.7)^2} = 221.03 \text{ MPa}(32,053.80 \text{ psi}).$$

Comparando este valor con el esfuerzo de cedencia del material para un 31.37%TF se observa que no excede por lo que se garantiza que el alambre no estará siendo estirado.

Las dos etapas en las cuales se ha dividido el proceso de trefilado para cumplir con las metas didácticas y de aprendizaje son:

1)  $D_0 = 2.052 \text{ mm}$  ( 0.081 pulg) hacia un diámetro intermedio de:

$$D_{intermedio} = 1.8 \text{ mm} (0.071 \text{ pulg.})$$

2)  $D_{intermedio} = 1.8 \text{ mm}(0.071 \text{ plg})$  hacia el diámetro final de:

$$D_f = 1.7 \text{ mm} (0.067 \text{ pulg.})$$

El porcentaje de trabajo en frío para la primera etapa corresponde a:

$$TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% = \frac{(D_0)^2 - (D_f)^2}{(D_0)^2} \times 100\%$$

$$TF = \frac{(2.052)^2 - (1.8)^2}{(2.052)^2} \times 100\% = 23.05 \%$$

Lo anterior debe verificarse que cumpla con las condiciones de deformación permanente de 0.2% donde deberá ser mayor para evitar recuperación elástica, evaluando la Ec. 2.2 para deformación real se tiene:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{2.052^2}{1.8^2}\right) = 0.262$$

$$\epsilon > \frac{0.2\%}{100}$$

$$0.262 > 0.002$$

Se observa que cumple, por lo que se procede a evaluar las condiciones de esfuerzo correspondientes a esta etapa.

El esfuerzo de cedencia correspondiente a un TF = 23.05% leído de la Fig. 2.13 corresponde a:

$$\sigma_{Y \text{ a } 23.05\% \text{ de TF}} = 331.03 \text{ MPa}(48,000 \text{ psi}).$$

Para poder deformar el alambre a partir del diámetro intermedio propuesto hacia el diámetro final de 1.7 mm la carga o fuerza de trefilado deberá generar un esfuerzo que supere el valor anterior de esfuerzo de cedencia una vez el material ha sufrido un TF de 23.05%. Esta fuerza se determina de dicha condición límite:

$$\sigma_{Y \text{ a } 23.05\% \text{ de TF}} = \frac{F}{A}$$

$$\begin{aligned} F = \sigma_{Y \text{ a } 23.05\% \text{ de TF}} A &= 331.03 \left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{intermedio}})^2 \right] = 331.03 \left[ \frac{\pi}{4} (1.8)^2 \right] \\ &= 842.37 \text{ N}(189.33 \text{ lb}). \end{aligned}$$

Por lo que la fuerza o carga de estirado para lograr una reducción en dos etapas deberá ser mayor para garantizar la fluencia del alambre con diámetro de 1.8 mm (0.071 pulg). Suponiendo que se aplica una fuerza con un valor estimado de 844N (192 lb).

Para esta condición de carga de trefilado se debe verificar que se cumplan las condiciones de esfuerzo siguientes:

- ✓ El esfuerzo generado por la fuerza de 844 N debe superar el esfuerzo de cedencia del material que posee un TF de 23.05%.

- ✓ El esfuerzo generado por la fuerza de 844 N no debe superar el esfuerzo de cedencia del material al finalizar el proceso total de reducción; es decir, el correspondiente al TF de 31.37%. Por lo que:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{844}{\pi/4 (D_{intermedio})^2} = \frac{844}{\pi/4 (1.8)^2} = 331.67 \text{ MPa}(48,092.15 \text{ psi})$$

Comparando se puede observar que dicho esfuerzo es mayor el de cedencia leído de gráfica:

$$\sigma_Y \text{ a } 23.05\% \text{ de TF} = 331.03 \text{ MPa}(48,000 \text{ psi})$$

Luego evaluando la condición en la cual la carga aplicada no sobrepase el esfuerzo de cedencia del material a la salida o final de la reducción:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{844}{\pi/4 (D_f)^2} = \frac{844}{\pi/4 (1.7)^2} = 371.83 \text{ MPa}(53,916.62 \text{ psi})$$

Al comparar con el esfuerzo de cedencia del material a la salida después de haber sufrido una reducción de 2.052 mm a 1.7 mm el cual es:

$$\sigma_Y \text{ a } 31.37\% \text{ de TF} = 372.41 \text{ MPa}(54000 \text{ psi})$$

Se tiene que la carga aplicada para poder realizar la reducción en dos etapas no sobrepasaría dicho valor obteniendo así las condiciones requeridas del proceso de trefilado.

## 2.2.4. PROPUESTA DE REDUCCIÓN N° 2

Para la última propuesta se parte del calibre de alambre AWG 14 cuyo diámetro es:

$$D_0 = 1.628 \text{ mm}(0.064 \text{ pulg})$$

Para llegar a un diámetro final de:

$$D_f = 1.4 \text{ mm}(0.055 \text{ pulg})$$

Recordando el valor de esfuerzo de cedencia para 0% de TF:

$$\sigma_Y = 151.72 \text{ MPa}(22,000 \text{ psi})$$

La fuerza necesaria para lograr que el material fluya en su condición inicial se determina como:

$$\sigma_Y = \frac{F}{A_0}$$

$$F = \sigma_Y A_0 = 151.72 \left[ \frac{\pi}{4} (D_0)^2 \right] = 151.72 \left[ \frac{\pi}{4} (1.628)^2 \right] = 315.87 \text{ N}(70.98 \text{ lb})$$

El %TF según la reducción deseada es de:

$$TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% = \frac{(D_0)^2 - (D_f)^2}{(D_0)^2} \times 100\%$$

$$TF = \frac{(1.628)^2 - (1.4)^2}{(1.628)^2} \times 100\% = 26.05\%$$



El esfuerzo de cedencia para 26.05% de TF según la Fig. 2.15 es:

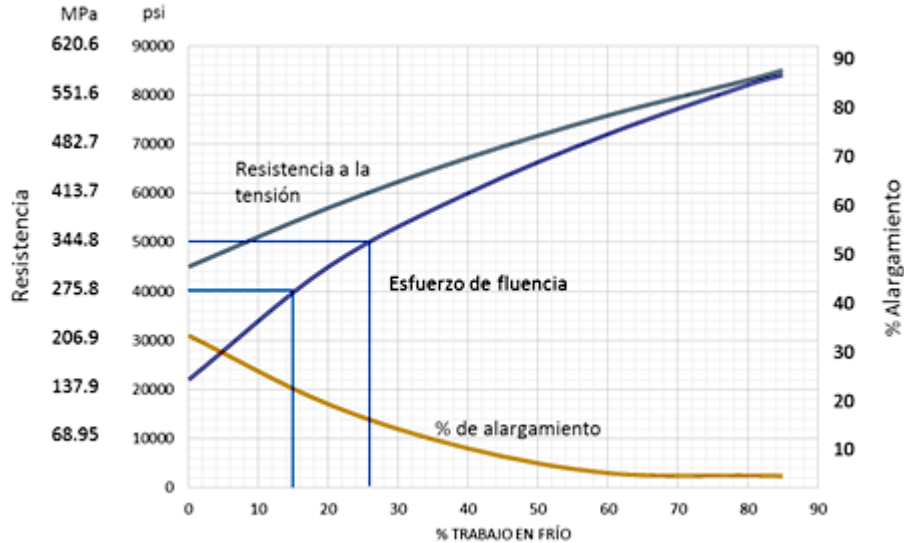


Fig.2.15. Propiedades mecánicas vs. Trabajo en frío (Askeland, 1998).

$$\sigma_Y \text{ a } 26.05\% \text{ de TF} = 344.83 \text{ MPa}(50,000 \text{ psi})$$

Evaluando condiciones de esfuerzo para carga 315.87 N:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{315.87}{\pi/4 (D_f)^2} = \frac{315.87}{\pi/4 (1.4)^2} = 205.19 \text{ MPa}(29,749.21 \text{ psi})$$

De lo que se puede observar que no sobrepasa al valor de 344.83 MPa con lo que se garantiza que el material no se estirará.

Por lo tanto, las dos etapas en las que se espera dividir el proceso son:

- 1)  $D_0 = 1.628 \text{ mm}$  para obtener un diámetro intermedio de 1.5 mm, y
- 2)  $D_{intermedio} = 1.5 \text{ mm}$  para obtener un diámetro final de 1.4 mm.

El porcentaje de trabajo en frío para la primera etapa corresponde a:

$$TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% = \frac{(D_0)^2 - (D_f)^2}{(D_0)^2} \times 100\%$$

$$TF = \frac{(1.628)^2 - (1.5)^2}{(1.628)^2} \times 100\% = 15.11\%$$

Lo anterior debe verificarse que cumpla con las condiciones de deformación permanente de 0.2% donde deberá ser mayor para evitar recuperación elástica evaluando la Ec. 2.2, para deformación real se tiene:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{1.628^2}{1.5^2}\right) = 0.1637$$

$$\epsilon > \frac{0.2\%}{100}$$

$$0.1637 > 0.002$$

El esfuerzo de cedencia correspondiente a un TF igual a 15.11% leído de Fig. 2.15 corresponde a:

$$\sigma_Y \text{ a } 15.11\% \text{ de } TF = 275.8 \text{ MPa}(40,000 \text{ psi})$$

Por lo que la fuerza o carga que se debe aplicar en la segunda etapa debe superar el valor de esfuerzo de cedencia anterior para lograr que el material con diámetro de 1.5 mm fluya y pueda ser reducido a su condición última y final de 1.4 mm de diámetro.

Esta fuerza se determina de dicha condición límite:

$$\sigma_Y \text{ a } 15.11\% \text{ de } TF = \frac{F}{A}$$

$$F = \sigma_Y \text{ a } 15.11\% \text{ de } TFA = 275.8 \left[ \frac{\pi}{4} (D_{intermedio})^2 \right] = 275.8 \left[ \frac{\pi}{4} (1.5)^2 \right]$$

$$= 487.56 \text{ N} (109.56 \text{ lb})$$

Para garantizar que el alambre con diámetro de 1.5 mm fluya, la fuerza de trefilado debe ser mayor que la condición límite anterior y asegurar así que el material que ya ha experimentado un TF de 15.11% continúe deformándose hacia el diámetro final de 1.4 mm.

Suponiendo un valor de fuerza de trefilado de 511.75 N se procede a evaluar nuevamente las condiciones de esfuerzo con dicho valor:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{511.75}{\pi/4 (D_{intermedio})^2} = \frac{511.75}{\pi/4 (1.5)^2} = 289.55 \text{ MPa} (41,984.88 \text{ psi})$$

Comparando se puede observar que dicho esfuerzo es mayor al de cedencia leído de gráfica:

$$\sigma_Y \text{ a } 15.11\% \text{ de } TF = 275.8 \text{ MPa} (40,000 \text{ psi})$$

Evaluando situación de esfuerzo de trefilado en condición de salida o diámetro final:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_f} = \frac{511.75}{\pi/4 (D_f)^2} = \frac{511.75}{\pi/4 (1.4)^2} = 332.39 \text{ MPa} (48,196.92 \text{ psi})$$

Al comparar con el esfuerzo de cedencia del material a la salida después de haber sufrido una reducción de 1.628 a 1.4 mm el cual es:

$$\sigma_Y \text{ a } 26.05\% \text{ de } TF = 344.83 \text{ MPa} (50,000 \text{ psi})$$

Se tiene que la carga aplicada para poder realizar la reducción en dos etapas no sobrepasará dicho valor obteniendo así las condiciones requeridas del proceso de trefilado al igual que en las dos propuestas anteriores.

### 2.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PROPUESTA DE REDUCCIÓN PARA LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Una vez presentadas las dos propuestas se procede a evaluar, cuál de ellas es la más adecuada para las prácticas de laboratorio, tomando criterios como:

- Potencia requerida por el proceso de trefilado,
- Factibilidad económica de adquisición del motor eléctrico como fuente de potencia, y
- Los costos del alambre y la geometría que influye en la apreciación de los cambios de sección a los que el alambre es sometido en el proceso de trefilado, lo cual se encuentra implícito en el ángulo de ataque que posea la hilera o dado.

Se debe proceder a la evaluación cada uno de estos criterios. En la Tabla 2.1 se hace un resumen, evaluando por puntos en el rango de 1 a 10 según cada caso, la propuesta a recomendar será la de mayor puntaje en la evaluación de criterios.

Tabla 2.1. Evaluación de propuestas por criterios.

Propuesta	Requerimientos de potencia	Disponibilidad en el mercado	Costos	Tamaño	Total de la evaluación
Calibre 12	7	10	5	9	31
Calibre 14	8	10	7	5	30

Se concluye lo siguiente:

- ✓ Las propuestas planteadas cumplen con los requerimientos de potencia ya que se ha estimado que estás estén por debajo de la carga preliminar de diseño, y
- ✓ La disponibilidad en el mercado local es satisfactoria para ambos casos,

En cuanto al criterio económico el alambre de calibre AWG 14 presenta menor costo, pero el criterio a considerar más importante es el tamaño del alambre y la apreciación de los cambios de geometría del proceso durante la práctica de laboratorio por la que se recomienda la propuesta N° 1 correspondiente a un alambre de calibre AWG 12; es decir, una reducción partiendo de un diámetro inicial de 2.052mm (0.0807 pulg) hacia un diámetro final de 1.7mm (0.067 pulg), con un TF de 31.37% y una fuerza de trefilado máxima de 844 N (192 lb).

## **2.4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS**

El diseño de los elementos que constituyen el banco de trefilado se realiza en base a la carga crítica de trefilado determinada en la sección 2.2.2 debido a que dicha carga se transmitirá a los elementos generando esfuerzos cortantes y flexionantes que deberán ser tomados en cuenta para el factor de seguridad de cada uno de los componentes y el cumplimiento de los requerimientos del proceso.

### **2.4.1. DISEÑO DEL EJE**

El diámetro y los cambios de secciones en el eje deberán establecerse en función de las dimensiones del eje hueco del reductor seleccionado para transmitir la potencia desde el motor, además de una longitud adecuada para poder estar instalado entre el tambor donde se enrollará el alambre y el reductor, a través de rodamientos, para que estos puedan soportar todas

aquellas cargas y anular en la medida de lo posible el efecto de estas, a la transmisión. Para determinar las reacciones a las que este eje estará sometido, se parte de una carga preliminar de diseño para el alambre calibre 10, la cual resultó de 1290N (290 lb).

El material del cual debe estar construido estará en función de los esfuerzos críticos resultantes de las cargas externas y de las reacciones de los apoyos de rodamiento, para que pueda tener una vida útil prolongada, respaldada bajo un factor de diseño aceptable.

Al transferir la carga sobre el eje, da como resultado un torque sobre éste generado por la fuerza y por el radio del tambor, cuyo torque de igual magnitud deberá ser transferido por el motor a través del reductor, un esquema del acople del eje con todos estos elementos mencionados y los torques generados sobre éste se puede apreciar en la Fig.2.16.

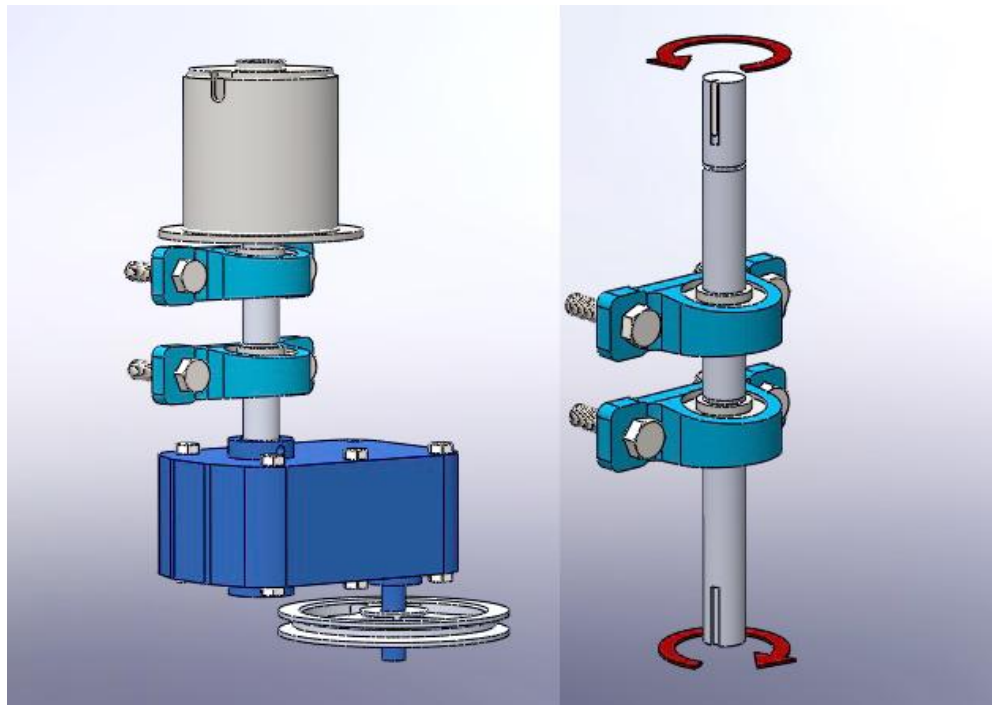


Fig.2.16. Esquema del eje acoplado al tambor y al reductor con sus respectivos rodamientos y esquematización del torque generado como resultado de la carga externa.

Es necesario determinar las distancias entre el punto de carga en el tambor, los rodamientos y el reductor, para la realización de los cálculos de reacciones resultantes sobre el eje. En la Fig. 2.17 se presenta la distancia existente desde el punto de carga “A”, hacia el cojinete de carga radial en “B” y el cojinete de carga axial en “C” que son los dos apoyos que tendrá el eje sobre la bancada.

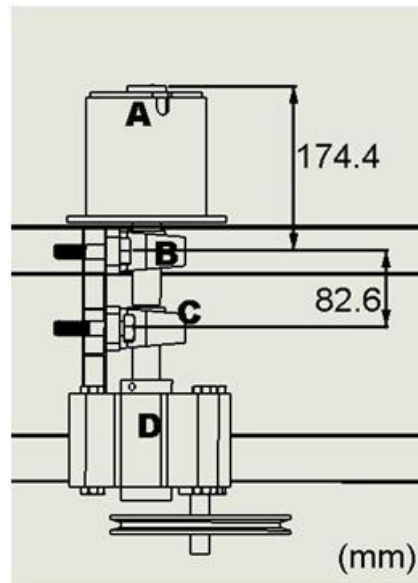


Fig.2.17. Esquema en donde se presenta la distancia existentes entre elementos ensamblados con el eje

Por lo tanto, para definir las reacciones en función de la carga que se produce en el punto “A”, que es el punto donde se sujetará el mecanismo para halar el alambre y hacerlo pasar por la hilera, se debe de aclarar que el reductor se encontrará en voladizo; es decir, la reacción de éste en el eje, además de transmitir el torque necesario para generar la carga de trefilado, somete al eje a su propio peso, el cual genera una reacción o fuerza axial en éste que puede ser despreciada, ya que su magnitud es insignificante en comparación con las fuerzas cortantes generadas por la carga de trefilado. Por lo tanto, en el punto “D” únicamente existirá el torque transmitido desde el reductor, producto de la carga que se requiera en el punto “A”.

### 2.4.1.1. DETERMINACIÓN DEL MOMENTO MÁXIMO FLEXIONANTE SOBRE EL EJE Y EL PAR TORSIÓN

Se debe de plantear el diagrama de equilibrio del eje, con sus respectivas cotas y fuerzas actuantes sobre el eje. El diagrama presentado en la Fig. 2.18 se considera equivalente.

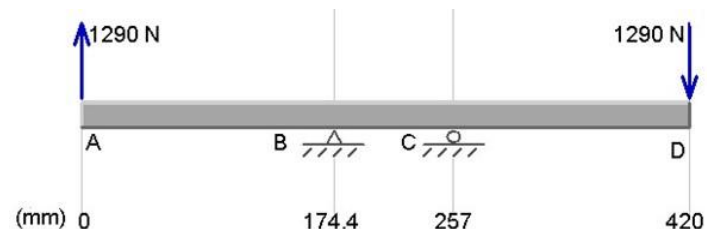


Fig. 2.18. Diagrama de equilibrio equivalente para el eje, donde se representan los rodamientos como apoyos simples.

Estableciendo equilibrio de fuerzas en la dirección aplicada al eje, y equilibrio de momento se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\sum M_B = 0 \quad (2.2)$$

$$-(1290N \times 174.4mm) - (1290N \times 245.6mm) + (R_c \times 82.6mm) = 0$$

$$R_c = 6,559.32 N$$

donde:  $R_c$ : Reacción en el cojinete más próximo al reductor.

$$\sum F_y = 0 \quad (2.3)$$

$$1290N + R_B + 6,559.32N - 1290N = 0$$

$$R_B = - 6,559.32 N$$

donde:  $R_B$ : Reacción en el cojinete más próximo al tambor.



Teniendo el valor de las reacciones en los puntos del eje donde estará apoyado con rodamientos y aplicando el método gráfico, para la determinación de los momentos flexionantes, los diagramas de esfuerzo cortante y momento flexionante para el eje de trefilado quedan de la forma en la que se presenta en la Fig. 2.19.

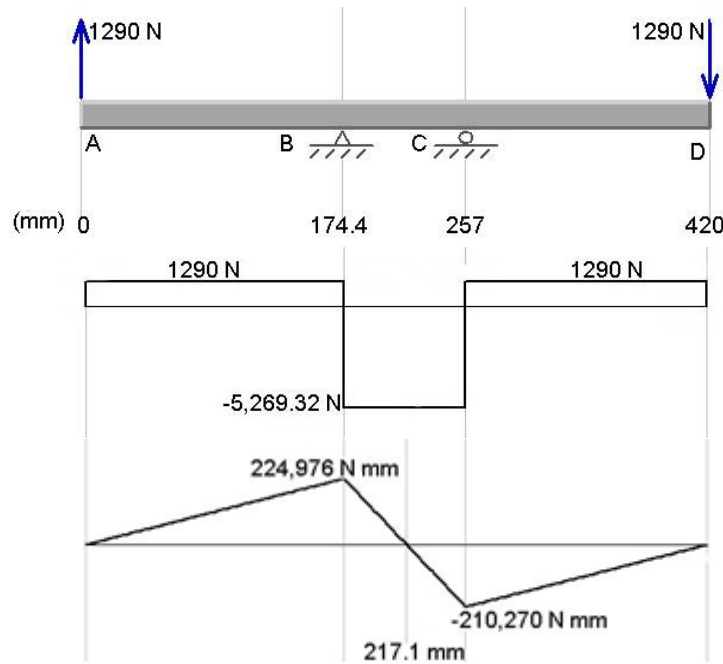


Fig.2.19. Diagrama cortante y diagrama momento flexionante para el eje de trefilado.

En base a los resultados se tiene que el punto crítico en función del máximo momento flexionante sobre el eje es en el rodamiento más próximo al tambor, es decir en el punto "B" según el diagrama de equilibrio, que tiene el valor de 224.976 N·m.

$$M = 224.976 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El par torsión al que está sometido el eje está en función del diámetro del tambor que es 127mm (5 pulg.) y la carga de trefilado actuando tangencialmente a este, que es de 1290 N (290 lb) por lo que se tiene:

$$T = (1290N)(63.5mm) = 81,915 N \cdot mm = 81.92 N \cdot m.$$

#### 2.4.1.2. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA EL EJE

Se debe realizar un análisis de fatiga, que estará bajo un esfuerzo flexionante completamente invertido y un esfuerzo de torsión constante. Se tiene que el valor de estos esfuerzos es de (Robert L. Mott, 2006):

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{32M}{\pi D^3} = \frac{32(224.976)}{\pi(0.03)^3} = 84.87 MPa \quad (2.4)$$

$$\tau = \frac{Tc}{J} = \frac{T}{Z} = \frac{16T}{\pi D^3} = \frac{16(81.92)}{\pi(0.03)^3} = 15.45 MPa \quad (2.5)$$

Una vez determinados el esfuerzo flexionante y el esfuerzo cortante torsional, se pueden calcular los esfuerzos principales, actuantes sobre un elemento finito del eje, donde cuyas ecuaciones para los esfuerzos principales máximos y mínimos vienen dadas por (Robert L. Mott, 2006):

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.6)$$

Por lo que se tiene para el esfuerzo principal máximo:

$$\sigma_1 = \frac{84.87}{2} + \sqrt{\left(\frac{84.87}{2}\right)^2 + 15.45^2}$$

$$\sigma_1 = 87.60 MPa$$

Y el esfuerzo principal mínimo tiene el valor de:

$$\sigma_2 = \frac{84.87}{2} - \sqrt{\left(\frac{84.87}{2}\right)^2 + 15.45^2}$$

$$\sigma_2 = -2.73 \text{ MPa}$$

### 2.4.1.3. ANÁLISIS ESTÁTICO

Debido a que se empleara software SolidWorks, para la simulación del eje, es necesario realizar un análisis estático previo a la evaluación de fatiga, tal como lo requiere el programa, ya que este se basa en los aspectos geométricos, cargas y apoyos bajo condiciones estáticas para simular un análisis de fatiga. Por tal razón se realizará un análisis estático convencional a manera de comprobar el diseño mediante ambos criterios. Se ha demostrado que el método de energía de distorsión máxima es el mejor estimador de falla para materiales dúctiles para cargas estáticas combinadas, por lo que se determina el esfuerzo de Von Mises, estando este en función de los esfuerzos principales calculados previamente, la ecuación del criterio de Von Mises viene evaluada por (Robert L. Mott, 2006):

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1\sigma_2$$

$$\sigma' = \sqrt{(87.6)^2 + (-2.73)^2} - (87.6)(-2.73)$$

$$\sigma' = 88.98 \text{ MPa}$$

Para realizar el diseño de un elemento se debe de aplicar un factor de diseño  $n$  a la resistencia de fluencia y entonces emplear:

$$\sigma' < \frac{S_y}{n}$$

Se considerará el material que además de estar disponible en el mercado local sea el más económico, que cumpla con las condiciones de

carga establecidas para este caso particular, con el fin de proporcionar una guía ante cualquier necesidad de reposición del elemento, por lo que la economía y las propiedades para satisfacer las condiciones requeridas son importantes. Se evaluará dicho diseño para un acero AISI 1045, cuyo límite elástico es de 530 MPa, por lo que se tiene que:

$$\sigma' = 88.98 \text{ MPa} = \frac{530 \text{ MPa}}{n}$$

$$n = 5.96$$

Por lo que el material satisface el sistema de cargas para un análisis estático.

#### **2.4.1.4. SIMULACIÓN DEL EJE**

Una vez realizado el dibujo del eje en forma de sólido en SolidWorks, cuyas dimensiones se pueden ver a detalle en anexos, se debe definir un estudio de simulación, siguiendo los pasos enlistados a continuación:

1. Ir a Complemento de SolidWorks, Simulation y crear un nuevo estudio.
2. Una vez abierta la barra de menú de estudio mostrada en la Fig.2.20.se escoge: Análisis Estático.

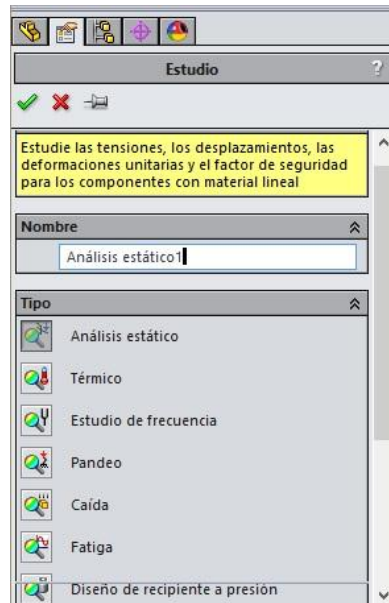


Fig.2.20. Menú de selección de tipo de estudio.

3. Se procede a definir las características del estudio, como sujeciones existentes en el elemento, las cargas a la que está sometido y la malla a construir, tal como se aprecia en el menú de la Fig. 2.21.

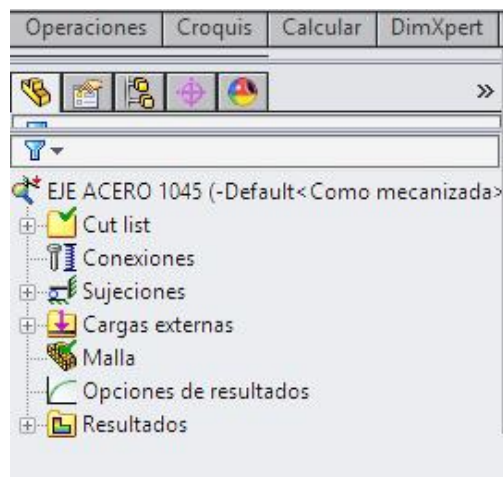


Fig.2.21. Menú para definir las características del estudio

En este estudio se han definido las dos sujeción a base de rodamientos, una fuerza en el extremo donde se montará el tambor, resultante de la

translación de carga del tambor al eje, y por consecuente un par torsión debido a la traslación, la fuerza y el par torsión de igual magnitud pero en sentido contrario en el otro extremo del eje, son el resultado de la transferencia de la potencia requerida a través del piñón de salida del reductor a través del motor.

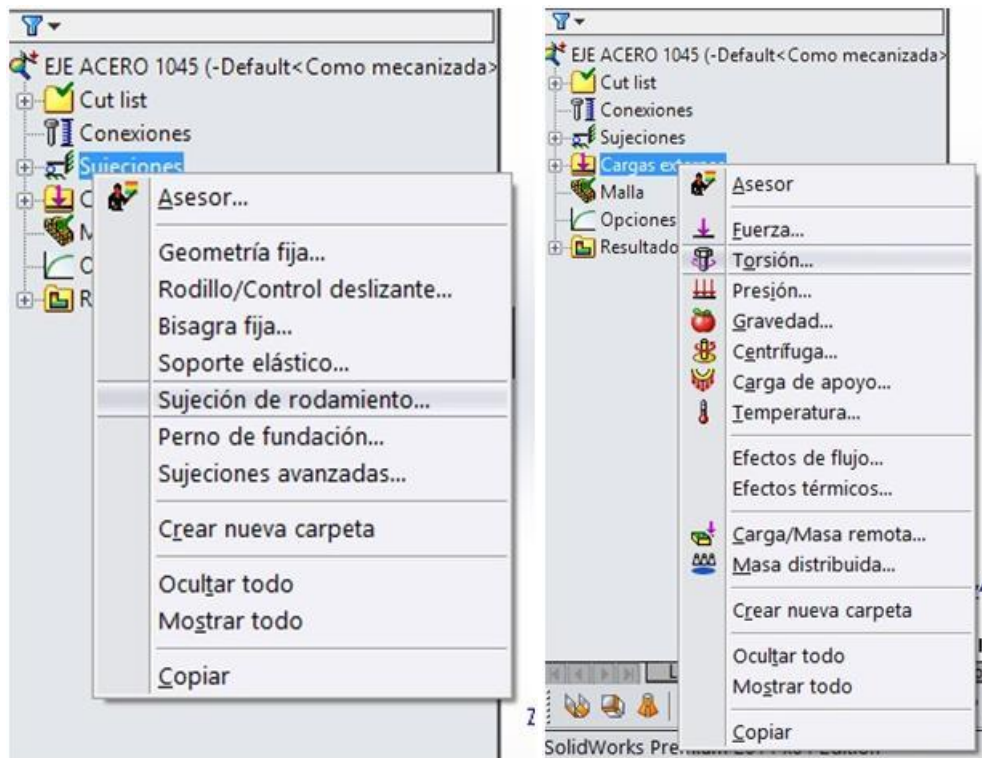


Fig.2.22. Menús de tipos de sujeción y tipo de cargas.

En la Fig.2.23 se presenta la aplicación de la fuerza sobre el eje actuando sobre su cara transversal como una fuerza cortante, cuya magnitud es de 1290N (290 lb), y el torque actuando sobre la misma cara con un valor de 81.92 N·m, se han localizado las sujeciones de rodamientos a la distancia especificada en el apartado 2.4.1, la cual ejerce una reacción perpendicular a la cara circular de éste.

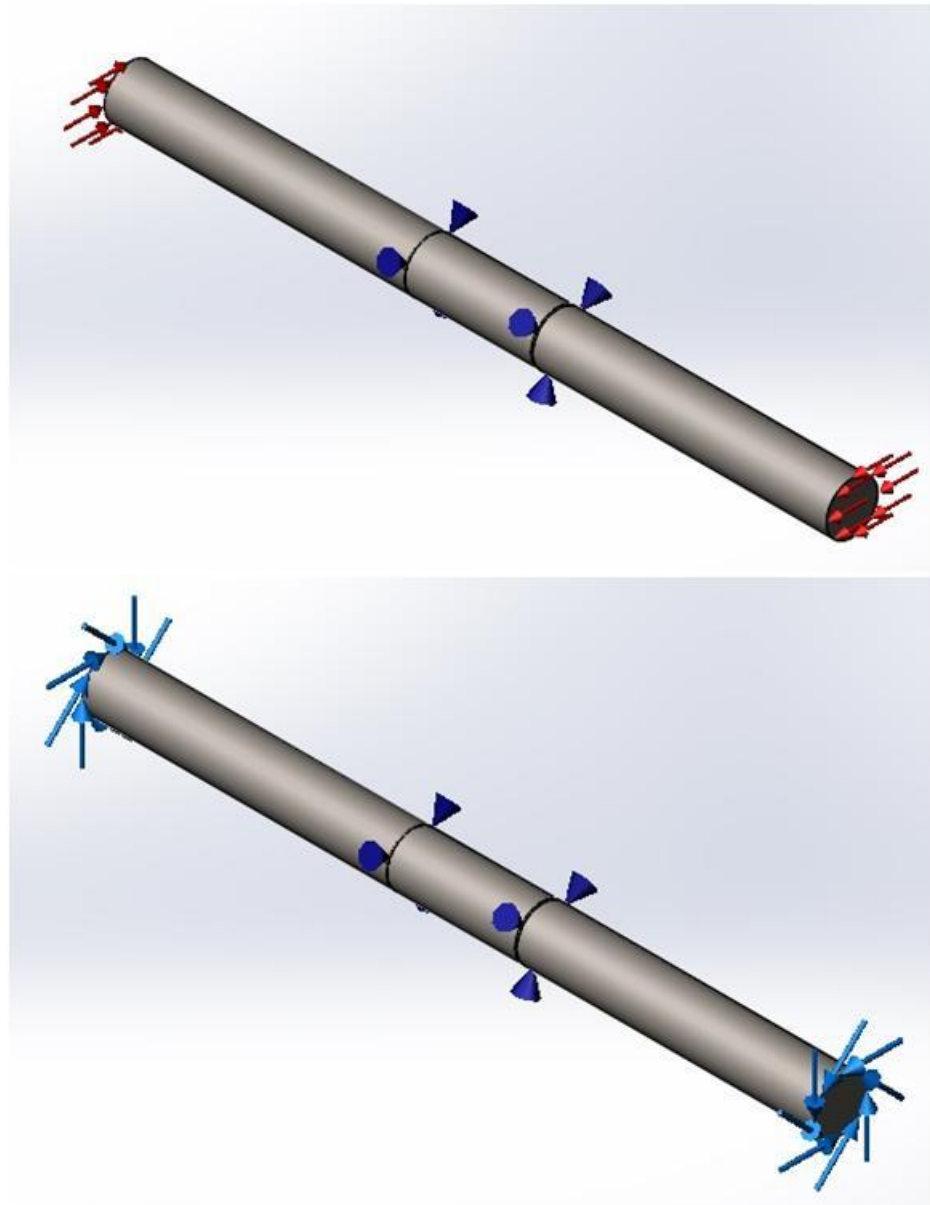


Fig.2.23. Aplicación de sujeción por rodamientos, aplicación de fuerzas cortantes y par torsión sobre el eje.

4. Creación de la malla. Una vez definidas las sujeciones del modelo y todas las cargas externas que actúan sobre éste, se procede a crear una malla; es decir, el programa subdivide el modelo o dibujo, en pequeñas porciones de formas (elementos) simples, conectadas en puntos comunes (nodos), para realizar un análisis de elementos finitos, que es una técnica numérica fiable para analizar los diseños de ingeniería.

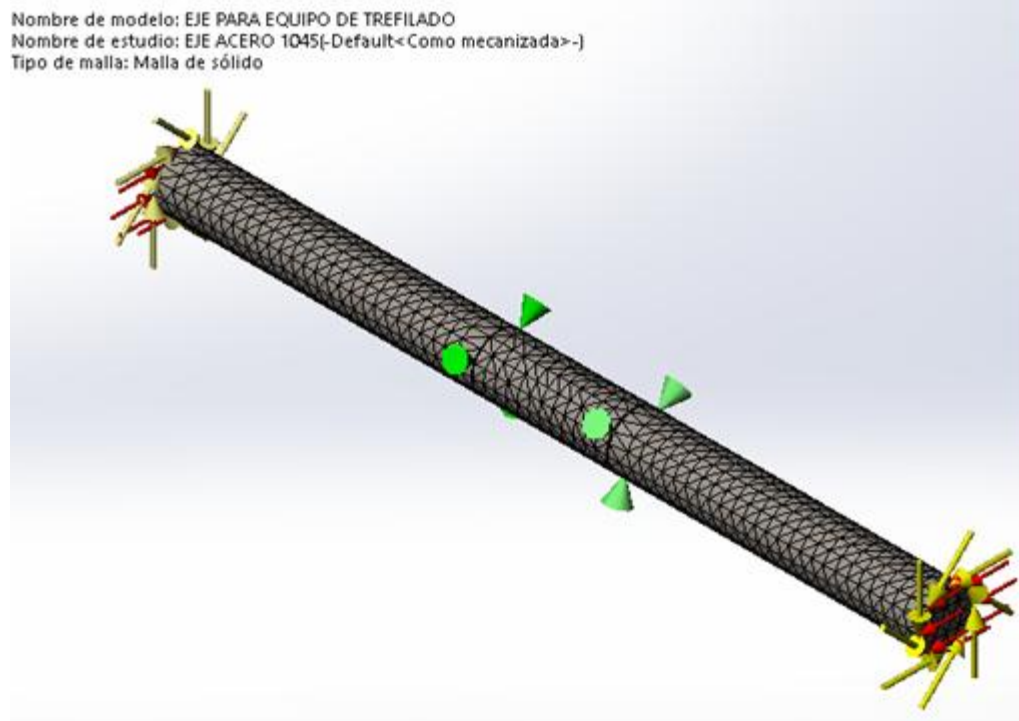


Fig.2.24. Generación de la malla sobre el modelo

5. Se ejecuta la simulación o estudio que se está realizando y se seleccionan los resultados que se desean obtener, en la Fig.2.25 se presenta el menú de entre los cuales se pueden escoger. Así, los menús que se utilizarán en este estudio son, tensiones (en base al análisis de Von Mises), factor de seguridad y la comprobación de fatiga.



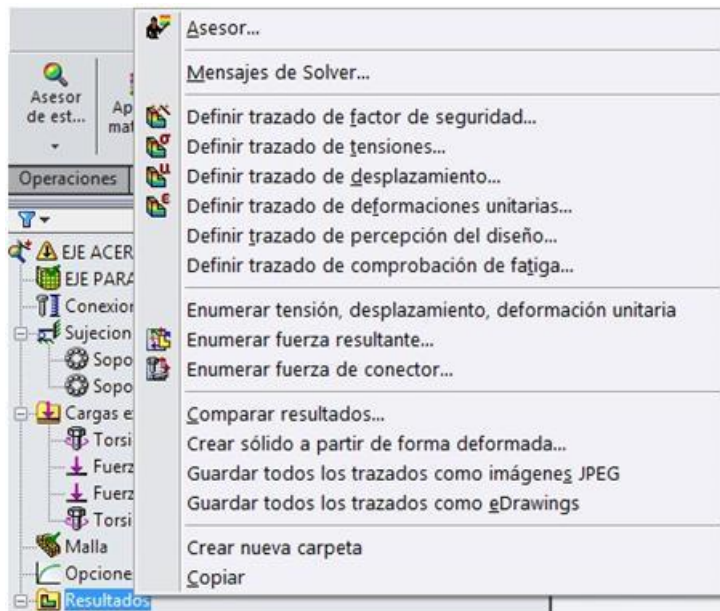


Fig.2.25. Menú de selección de resultados del estudio.

En el análisis estático realizado sin el uso de computadora, el valor del esfuerzo de Von Mises dio un valor de 88.98 MPa, ejecutando la simulación y obteniendo el resultado se obtiene un valor según la Fig. 2.26 de 90.096 MPa por lo que se confirma que el punto crítico, sobre el eje en función del sistema de cargas se encuentra en el apoyo del cojinete más próximo al tambor. Mediante la ecuación de Von Mises para el diseño se obtuvo un factor de seguridad de 5.96, en la Fig. 2.27 se presenta los resultados del factor de seguridad del modelo, y se confirma que el valor mínimo en el punto crítico es de 5.882, por lo que se concluye que los datos obtenidos bajo simulación son equivalentes a la realización de un análisis matemático, ya que los valores obtenidos son muy similares.

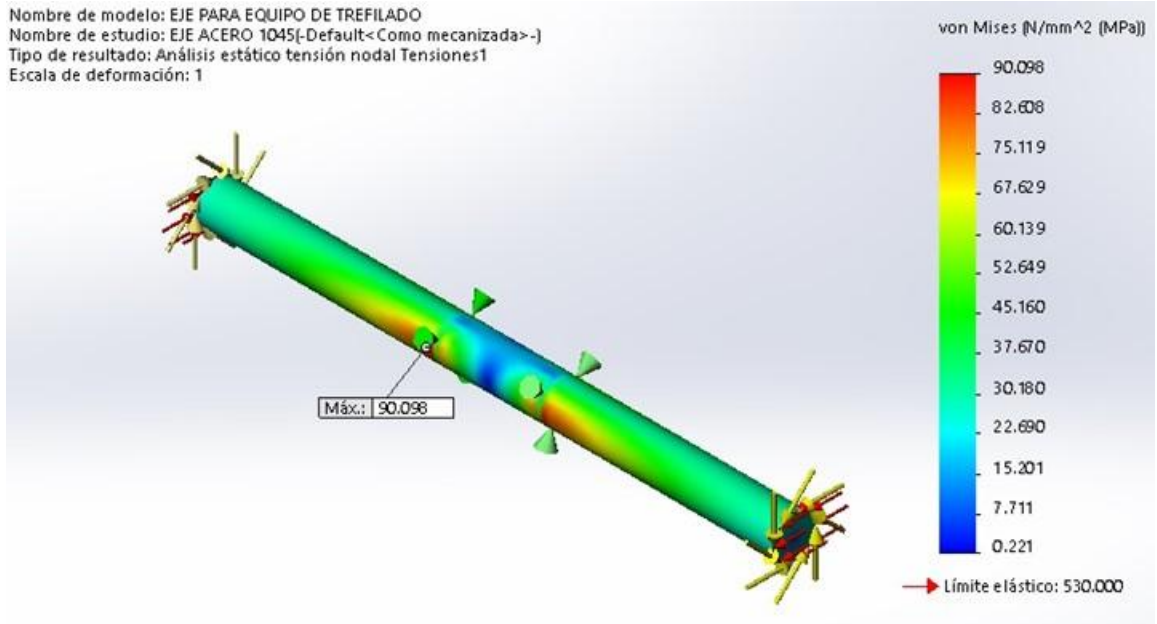


Fig.2.26. Resultados para un análisis estático tensión nodal bajo el criterio Von Mises.

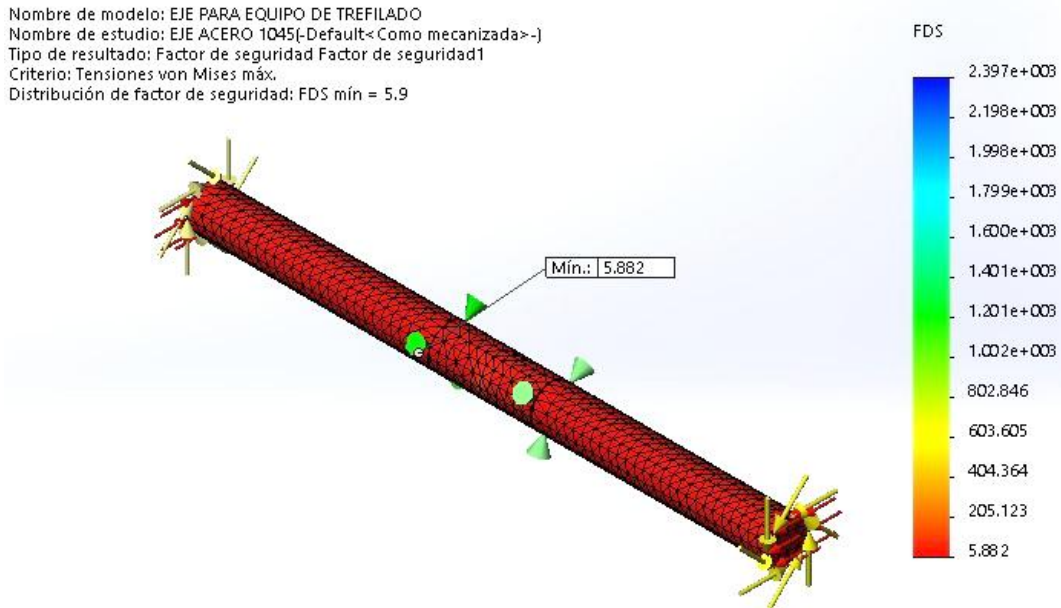


Fig.2.27. Resultados para análisis estático de factor de seguridad bajo el criterio Von Mises máximo.

#### 2.4.1.5. ANÁLISIS DE FATIGA

El análisis que se desarrollará a continuación será para comprobar que el eje no fallará bajo un número de ciclos especificados ya que este está sometido a fatiga, se sabe que aun cuando los esfuerzos máximos son mucho más inferiores que el límite de fluencia, los elementos suelen fallar por fatiga. Así, el material seleccionado se determinará bajo el análisis de fatiga ya que se considera que el número de ciclos será mayor a:

$$N = 10^3 \text{ ciclos}$$

Se tomó como referencia el acero AISI 1045 en condición de recocido y se determinará si este cumple para las condiciones de diseño, lo cual se hará determinando el factor de seguridad que tiene que ser mayor a 1. Tomando como base el criterio de Goodman modificado se tiene que (Robert L. Mott, 2006):

$$\frac{\sigma_a}{S_n} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (2.7)$$

donde:

$\sigma_a$  = Valor del esfuerzo alterno resultante determinado mediante Von Mises

$\sigma_m$  = Valor del esfuerzo promedio resultante determinado mediante Von Mises

$S_n$  = Resistencia a la fatiga

$S_{ut}$  = Resistencia última del material

$n$  = Factor de seguridad

- ✓ Límite de resistencia a la fatiga.- Tomando la ecuación de Joshep Marin la cual involucra factores que modifican la resistencia a la fatiga determinada por laboratorio, como lo son el efecto de la condición superficial, el tamaño, la carga, y la temperatura entre los principales, la ecuación de Marin viene dada por (Budynass, 2011):

$$S_n = \frac{K_a K_b K_c K_d K_e}{K_f} S_n' \quad (2.8)$$

donde:

$K_a$  = Factor de superficie

$K_b$  = Factor de tamaño

$K_c$  = Factor de carga

$K_d$  = Factor de temperatura = 1 (temperatura ambiente)

$K_e$  = Factor de efectos diversos = 1 (condiciones normales)

$K_f$  = Factor de concentración de esfuerzo = 1 (no existe)

$S_n'$  = Límite de resistencia a la fatiga de ensayo.

- ✓ Límite de resistencia a la fatiga de ensayo ( $S_n'$ ).- Para materiales con resistencia máxima a la tracción inferiores a 1400 MPa (200 kpsi) y recordando que el material que se espera utilizar es un acero AISI 1045 con  $S_{ut} = 625$  MPa, ( $S_n'$ )se puede aproximar a:

$$S_n' = 0.5S_{ut} = 0.5 \times 625 = 312.5 \text{ MPa}$$

- ✓ Factor de superficie ( $K_a$ ).- Se considera como superficie acabado de maquinado y su valor viene determinado por:

$$K_a = aS_{ut}^b$$

Donde los valores de las constantes  $a$  y  $b$  son de 4.51 y -0.265 respectivamente para maquinado, por lo que se tiene:

$$K_a = 4.51(292.5^{-0.265}) = 1$$

- ✓ Factor de tamaño( $K_b$ ).- Para valores de diámetros entre 7.62 mm a 51 mm se tiene para el factor de tamaño la siguiente expresión:

$$K_b = 1.24(d_{eq}^{-0.107})$$

Por lo que se tiene:

$$K_b = 1.24(30^{-0.107}) = 0.86$$

- ✓ Factor de carga ( $K_c$ ).- Se considera el factor más crítico según las cargas alternantes a las que está sometido el elemento en este caso el eje está sometido únicamente a flexión alternante ya que el torque es un esfuerzo medio, el factor de carga a flexión es de 1, por lo que se tiene:

$$K_c = 1$$

Sustituyendo en la Ec. 2.11 de límite de resistencia a la fatiga, se tiene:

$$S_n = \frac{K_a K_b K_c K_d K_e}{K_f} S_n' = \frac{1 \times 0.86 \times 1 \times 1 \times 1}{1} (292.500 \text{ MPa}) = 251.550 \text{ MPa}$$

Resolviendo para Goodman modificado, recordando que el esfuerzo alternante es únicamente el esfuerzo a flexión con un valor de 84.87 MPa y el esfuerzo medio es el esfuerzo a torsión que tiene la magnitud de 15.45 MPa, se despejará el factor de seguridad:

$$\frac{\sigma_a}{S_n} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{84.87}{251.55} + \frac{15.45}{625} = \frac{1}{n}$$

$$n = 2.76$$

Dado en valor de factor de seguridad de 2.76 para los esfuerzos que se obtienen en las condiciones de carga preliminar de diseño, se concluye que un eje de acero AISI 1045 en condición de recocido satisface los requerimientos mecánicos.

En la Fig. 2.28 se presenta la ventana de resultado de evaluación a la fatiga mediante la simulación por SolidWorks, donde se verifica que el análisis

a la fatiga realizado mediante el método teórico tradicional es coherente al de simulación.

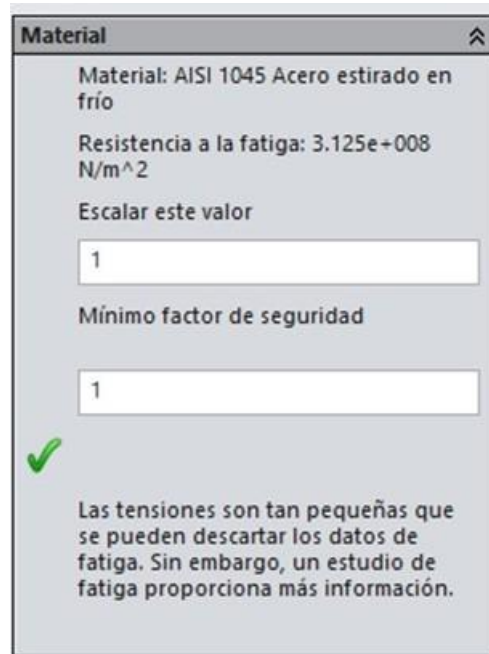


Fig.2.28. Ventana de resultados de evaluación a la fatiga del eje con un acero AISI 1045 recocido.

#### 2.4.2. DISEÑO DE LOS SOPORTE DE HILERA

El soporte estará conformado por una base de platina y dos ángulos, uno servirá para soportar toda la carga transmitida por la hilera y por lo tanto está estará soldada en la base, este conjunto estará sujeto sobre la bancada mediante un perno, la sujeción del otro ángulo será únicamente por perno, ya que este tendrá que instalarse de forma ajustable a la hilera ya que la función de este último ángulo será mantener a la hilera en su posición vertical, tal como se presenta en la Fig.2.29 en la cual se puede apreciar un esquema del soporte de hilera.

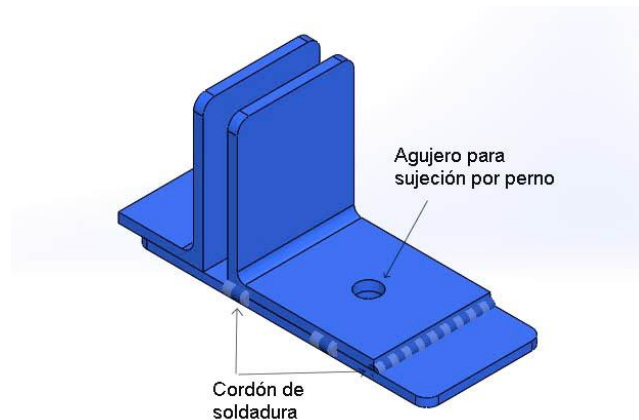


Fig.2.29. Esquema de los soportes de hilera.

#### 2.4.2.1. DETERMINACIÓN DEL MOMENTO FLEXIONANTE PARA LOS SOPORTES HILERA

Al igual que el análisis estático del eje, se debe evaluar las cargas a la que estará sometido el soporte de hilera, debido a que se utilizarán dos soportes totalmente idénticos para mantener fija la hilera mientras el alambre pasa sobre ésta para ser trefilado, la carga preliminar de diseño determinada, se distribuye de forma equitativa entre los soportes; es decir, que la carga que éstos soportarán será de 645N(145lb) ya que la carga de diseño es de 1290 N (290lb).

Para determinar el momento flexionante crítico se considera al ángulo que soportará la carga como el elemento a evaluar, se asumirá como una viga empotrada, ya que esta estará soldada a la base, los cordones de soldadura no se consideran críticos ya que el perno contribuirá a absorber la carga de manera considerable. En la Fig. 2.30 se presenta el diagrama de cuerpo libre del ángulo. Además, dado que la hilera estará en contacto con toda la cara del ángulo de 2 pulg, se considerará como una carga distribuida. Cuya magnitud se determina mediante:



$$W = \frac{F}{L} = \frac{645 \text{ N}}{50 \text{ mm}} = 12.9 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

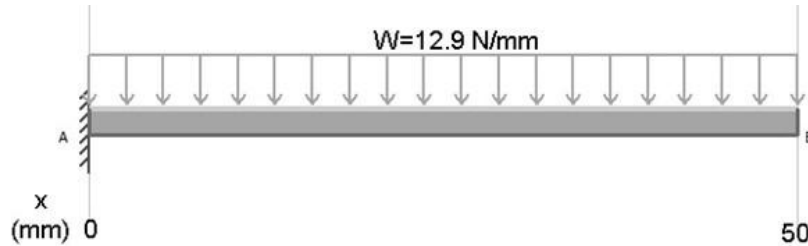


Fig.2.30. Diagrama de cuerpo libre del soporte de hilera.

Teniendo la carga distribuida sobre la cara del ángulo se procede a determinar los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes sobre esta sección, los cuales se presentan en la Fig. 2.31 en donde se puede observar que el máximo momento flexionante se produce en el punto de empotramiento, en el caso del ángulo cerca del concentrador de esfuerzo y cuya magnitud es de:

$$M = -16,125 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Por lo que, para la determinación del esfuerzo flexionante se debe evaluar bajo este momento y considerar la sección transversal de la cara del ángulo en contacto con la hilera, y el valor de este esfuerzo es de (Robert L. Mott, 2006):

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} = \frac{6M}{th^2} = \frac{6(16,125 \text{ N} \cdot \text{mm})}{40\text{mm}(3.28\text{mm})^2} = 224.82 \text{ MPa}$$

donde:

S= Módulo de sección,

t= Ancho de sección cuadrada, y

$h$ = Altura de sección cuadrada.

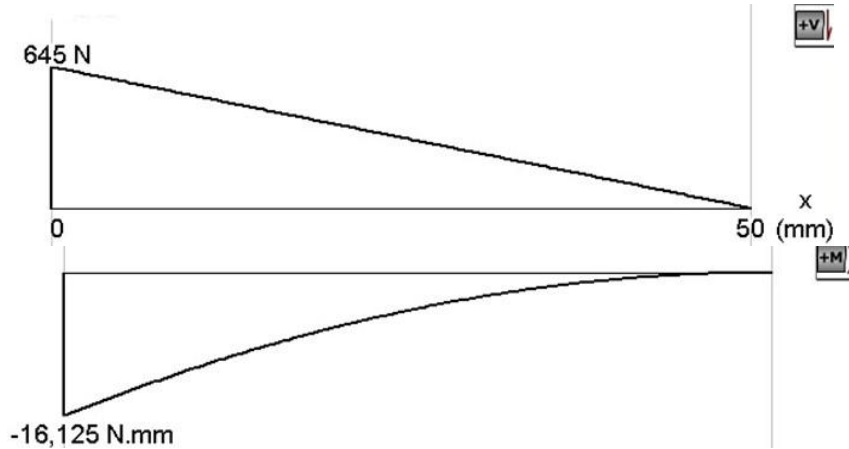


Fig. 2.31. Diagrama cortante y diagrama momento flexionante para ángulo del soporte de hilera.

Una vez determinado el esfuerzo flexionante, se pueden calcular los esfuerzos principales, actuantes sobre un elemento finito del eje, cuyas ecuaciones para los esfuerzos principales máximos y mínimos vienen dadas por (Robert L. Mott, 2006):

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Por lo que se tiene para el esfuerzo principal máximo:

$$\sigma_1 = \frac{224.82}{2} + \sqrt{\left(\frac{224.82}{2}\right)^2 + 0}$$

$$\sigma_1 = 224.82 \text{ MPa}$$

Así, se obtiene que el esfuerzo principal es de igual magnitud al esfuerzo de fluencia máximo, debido a que es el único esfuerzo actuante sobre el elemento; es decir, está sujeto a flexión pura, por lo tanto el esfuerzo principal mínimo es cero.

### 2.4.2.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

Debido a que es un caso de carga estática, para material dúctil, se empleará el criterio del método de esfuerzo cortante máximo para predecir la falla, se sabe que es un método conservador, y es relativamente fácil de usar, este establece que un material dúctil empieza a ceder cuando el esfuerzo cortante máximo en un componente bajo carga, es mayor que el esfuerzo de cedencia o fluencia, el análisis bajo el círculo de Mohr, establece que el esfuerzo cortante máximo es la mitad del esfuerzo de tracción aplicado, esto es igual a (Budynass, 2011):

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \geq \frac{\sigma_y}{2}$$

Para realizar el diseño de un elemento se debe de aplicar un factor de diseño  $N$  a la resistencia de fluencia y entonces emplear:

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2n} \quad o \quad \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_y}{n}$$

Se considerará el material, más económico y que cumpla con las condiciones de carga establecidas, por lo que se evaluará el acero AISI 1020. Así, evaluando dicho diseño para este material, cuyo límite elástico es de 351.57 MPa, por lo que se tiene que:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_y}{n}$$
$$224.82 \text{ MPa} - 0 = \frac{351.57 \text{ MPa}}{n}$$

$$n = 1.56$$

Por lo que el material satisface el sistema de cargas para un análisis estático.

### 2.4.2.3. SIMULACIÓN DEL SOPORTE DE HILERA

Utilizando simulación con SolidWorks, al igual que en el caso del eje se siguen los pasos del apartado 2.4.1.4 y considerando la fuerza que se aplicará al soporte de hilera en la cara de contacto, como se presenta en la Fig. 2.32, se determinan los resultados obtenidos bajo el método teórico tradicional, al igual que el desplazamiento del ángulo, ya que si es excesivo esto puede ser perjudicial.

Los resultados obtenidos mediante el estudio de esfuerzos considerando el criterio de esfuerzo cortante máximo, tal como se presenta en la Fig. 2.33, se confirmando que la parte crítica está próxima al cambio de dirección del ángulo que soportará la carga, el valor obtenido es equivalente al obtenido bajo el método teórico tradicional.

El factor de seguridad mínimo determinado por la simulación bajo el método de esfuerzo cortante máximo y el punto donde se produce se presenta en la Fig. 2.34, en la cual también coincide con el obtenido mediante el método teórico tradicional.

Además, es importante determinar los desplazamientos del elemento por deformación bajo carga, ya que si estos son de gran magnitud podría no mantener a la hilera alineada en la línea de trefilado del alambre entre tambor y tambor, y provocar una deformación no uniforme o incluso la falla del alambre. Así, para determinar este desplazamiento se realizó una simulación, tal como se presenta en la Fig. 2.35, en la cual se puede observar que el máximo desplazamiento obtenido es de 0.39 mm en el extremo superior del ángulo, para lo cual en este caso se considera despreciable.

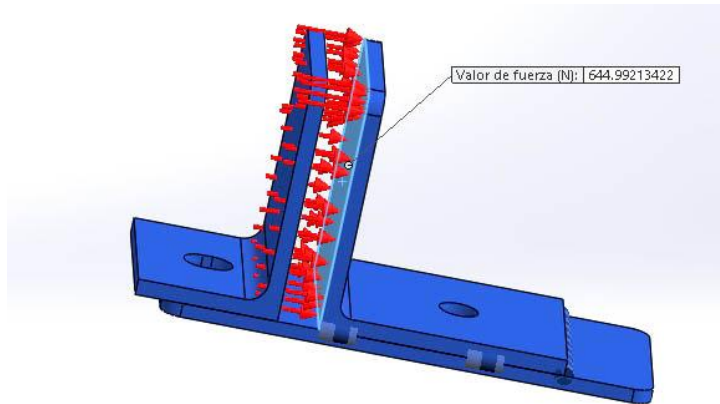


Fig.2.32. Aplicación de la fuerza sobre la cara de contacto entre hilera y soporte.

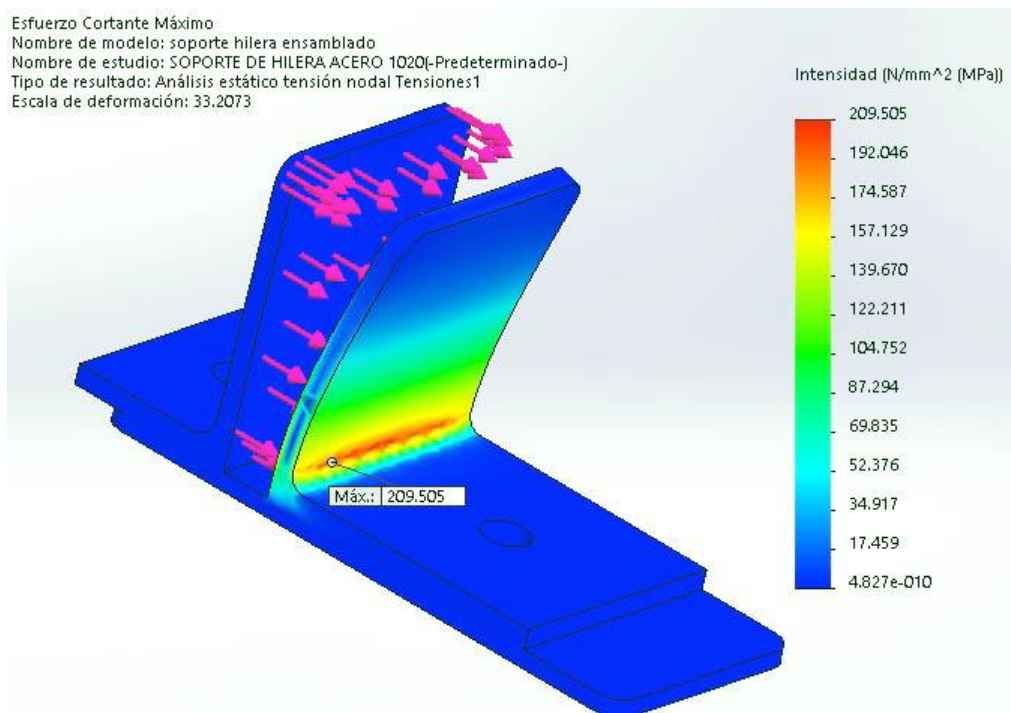


Fig. 2.33. Resultados del soporte hilera para un análisis estático tensión nodal bajo el criterio de cortante máximo.

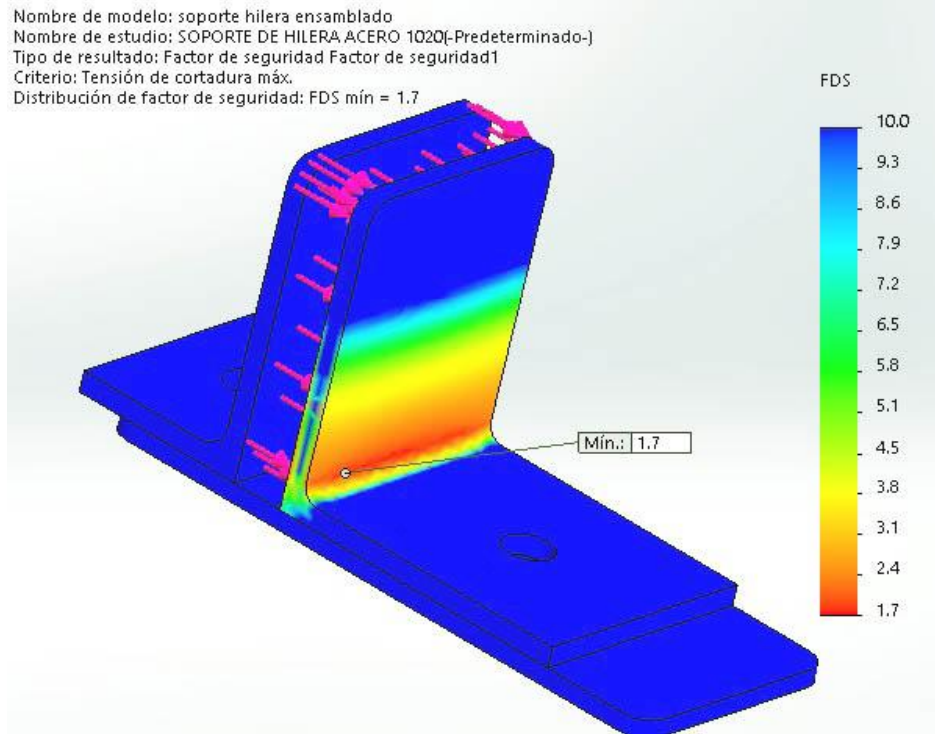


Fig. 2.34. Resultados para soporte hilera de factor de seguridad bajo el criterio cortante máximo.

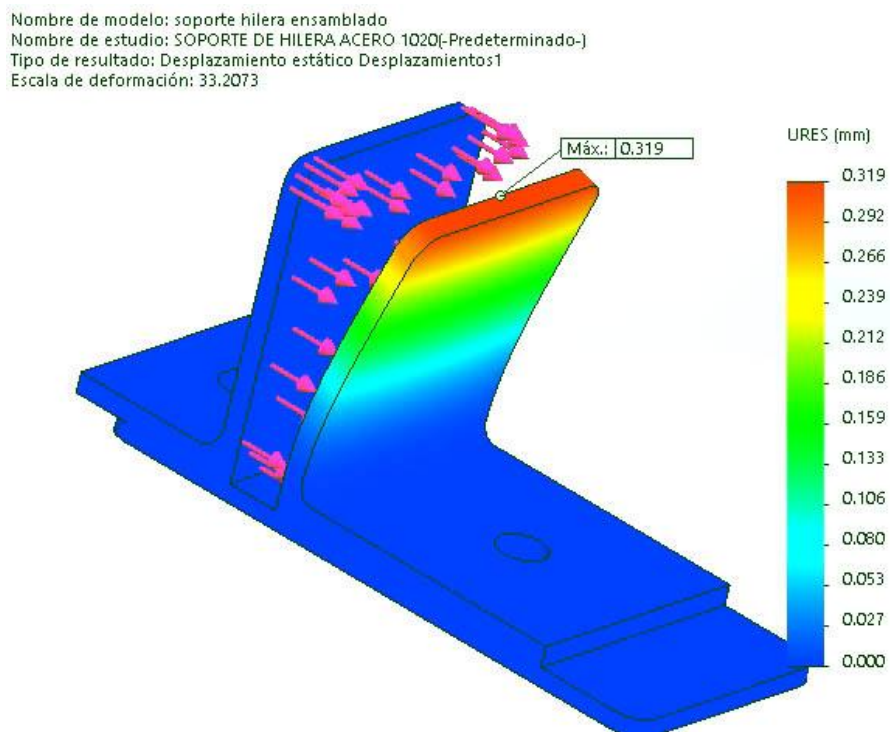


Fig.2.35. Resultados del estudio de desplazamiento del soporte hilera.

Por lo que se reafirma que el material seleccionado al igual que la geometría especificada, cumple con los requerimientos, bajo la carga preliminar de diseño.

### 2.4.3. SOPORTE DE TAMBOR

El soporte de tambor, donde se colocará el tambor que suministrará el alambre para trefilar, únicamente consistirá de una barra soldado a una pletina, el cual servirá como eje fijo en donde el tambor girará por el mismo efecto de carga de trefilado, además el soporte estará sujeto sobre la bancada por medio de pernos, tal como se presenta en la Fig. 2.36.

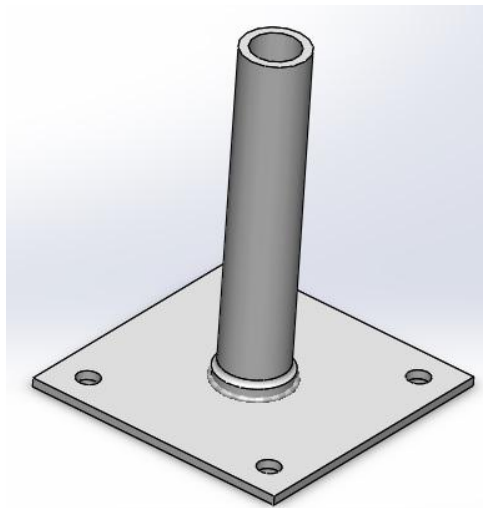


Fig. 2.36. Esquema se soporte de tambor.

### 2.4.3.1. DETERMINACIÓN DEL MOMENTO FLEXIONANTE PARA LOS SOPORTE DE TAMBOR

Debido a que la pletina está fija sobre la bancada y la barra estará soldada sobre esta se analizará la barra como una viga empotrada, teniendo en cuenta dos puntos críticos, el cordón de soldadura en la base, y el cambio de sección necesario para que el tambor no tope a la base mientras esté girando.

En la Fig.2.37 se presenta el diagrama de equilibrio equivalente para la barra con sus diagramas de cortantes y momento flector resultante.

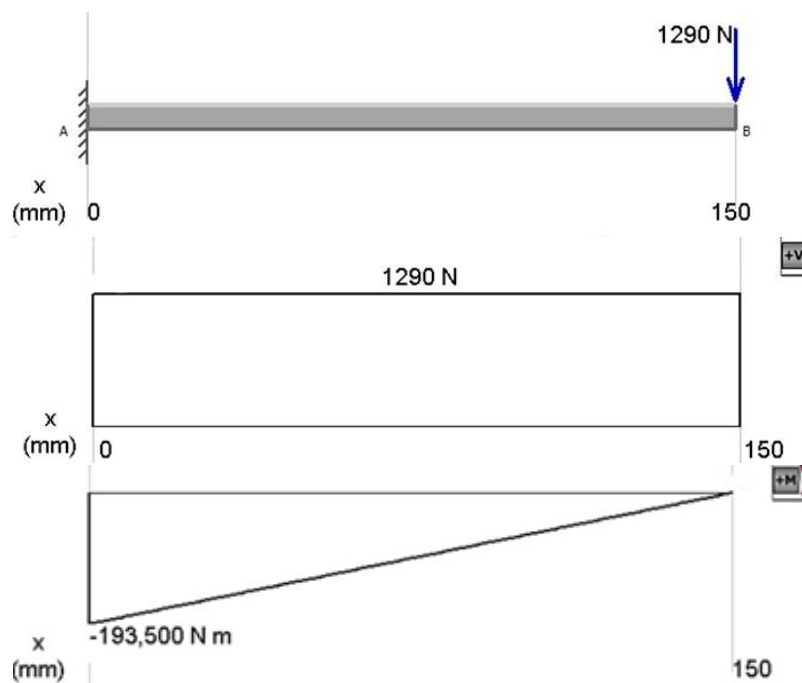


Fig. 2.37. Diagrama de equilibrio, fuerza cortante y momento flector para soporte de tambor.

Según el diagrama de momento, se determina el momento, en el punto de cambio de sección según lo especificado en el plano de este elemento, el cual es a una distancia de la base de 8 mm, mediante el método de área por lo que se tiene para este punto que el momento es de:

$$M = 183,180 \text{ N} \cdot \text{mm}$$



Determinando el esfuerzo flexionante en este punto, para lo cual se ha considerado un factor de concentración debido al cambio de sección, se tiene que su magnitud es de:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} = \frac{32DM}{\pi(D^4 - d^4)} = \frac{32(29)(183,180)}{\pi(29^4 - 21^4)} = 105.5 \text{ MPa}$$

Determinando las relaciones establecidas de la gráfica de factor de concentración para un eje sometido a flexión redondo escalonado se tiene un valor del concentrador K de:

$$\frac{r}{d} = \frac{2}{29} = 0.07$$

$$\frac{D}{d} = \frac{33}{29} = 1.14$$

$$K = 1.6$$

Determinando el esfuerzo máximo tomando en cuenta el factor de concentración de esfuerzo se tiene:

$$\sigma_{max} = K_t \sigma$$

$$\sigma_{max} = 1.6(105.5) = 168.8 \text{ MPa}$$

Una vez determinado el esfuerzo flexionante, se pueden calcular los esfuerzos principales, actuantes sobre un elemento finito de la barra del soporte, debido a que este esfuerzo es el único actuante sobre la barra, se obtiene que el esfuerzo principal máximo tiene la misma magnitud y el mínimo es cero.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Por lo que se tiene para el esfuerzo principal máximo:

$$\sigma_1 = \frac{168.8}{2} + \sqrt{\left(\frac{168.8}{2}\right)^2 + 0}$$

$$\sigma_1 = 168.8 \text{ MPa}$$

### 2.4.3.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

Debido a que es un caso de carga estática, para material dúctil, al igual que el soporte de hilera, se empleará el criterio del método de esfuerzo cortante máximo para predecir la falla por lo que se tiene (Budynass, 2011):

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2n} \quad o \quad \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_y}{n}$$

Se selecciona un acero AISI 1020, ya que se considerará que es el material más económico y que puede cumplir con las condiciones de carga establecidas para este caso particular. Así, al evaluar dicho diseño para este acero cuyo límite elástico es de 351.57 MPa, se tiene que:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_y}{n}$$
$$168.8 \text{ MPa} - 0 = \frac{351.57 \text{ MPa}}{n}$$

$$n = 2.08$$

Por lo que el material satisface el sistema de cargas para un análisis estático.

### 2.4.3.3. SIMULACIÓN DEL SOPORTE DE TAMBOR

Previamente a la evaluación de la soldadura, se sometió a simulación dicho elemento para determinar mediante este estudio que punto realmente es el más crítico, para ello se establece para el estudio la base como sujeción fija, y la aplicación de la carga en el extremo de la barra, ya que se ha considerado

este punto como la condición de carga máxima a la que podría estar sometido el soporte, tal como se presenta en la Fig. 2.38.

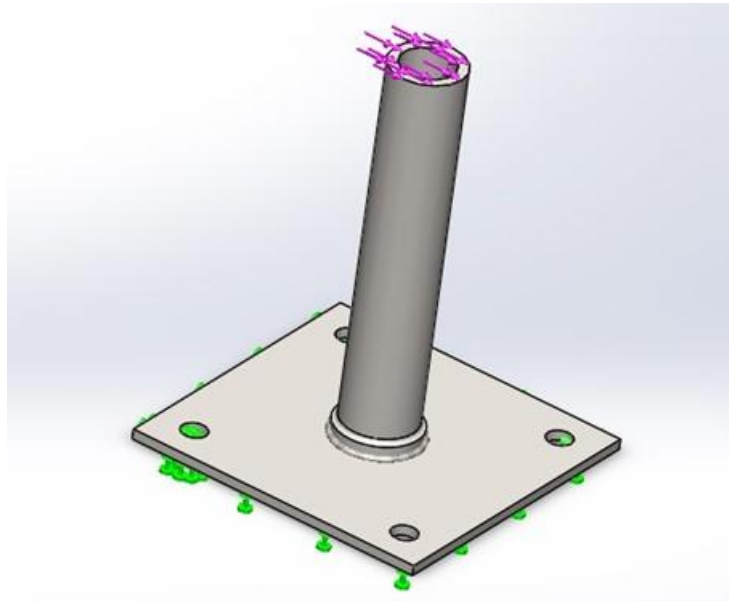
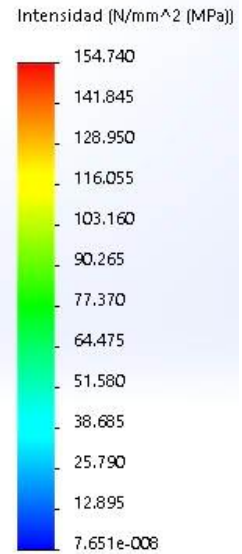
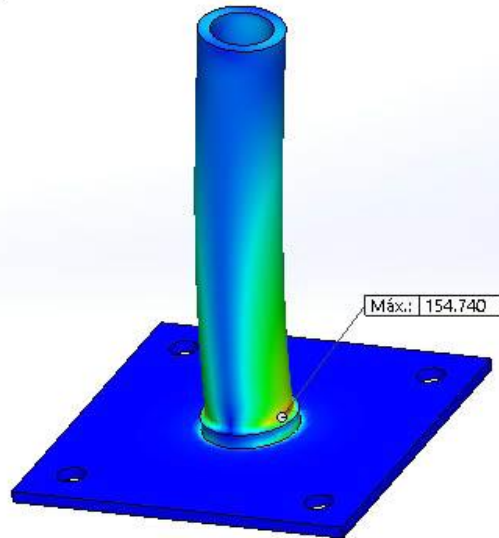


Fig.2.38. Esquematación de aplicación de carga y sujeción para estudio estático del soporte

Una vez definidas las sujeciones y la carga existente, se realiza el mallado de estudio de la pieza y ejecutando la simulación se obtienen los resultados que se presentan en la Fig.2.39 en donde se obtiene un esfuerzo cortante máximo de 154.74 MPa, lo cual si bien no es parecido al obtenido bajo el método teórico tradicional, la diferencia es mínima y se afirma que el punto crítico es el cambio de sección y no la soldadura de la base. Además, el factor de seguridad obtenido en la simulación es de 2.272. Así, se concluye que el material satisface el diseño en función de la carga preliminar de diseño, ya que tanto el método teórico tradicional como el de simulación mediante SolidWorks son satisfactorios, aún con las mínimas diferencias.

Esfuerzo Cortante Máximo  
 Nombre de modelo: SOPORTE DE TAMBOR  
 Nombre de estudio: SOPORTE DE TAMBOR ACERO AISI 1020[-Default-]  
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones2  
 Escala de deformación: 52.004



Nombre de modelo: SOPORTE DE TAMBOR  
 Nombre de estudio: SOPORTE DE TAMBOR ACERO AISI 1020[-Default-]  
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
 Criterio: Tensión de cortadura máx.  
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 2.3

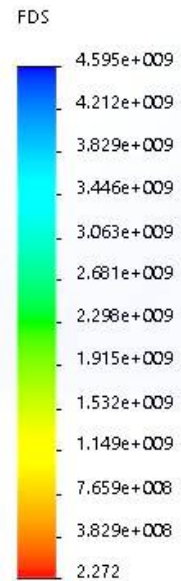
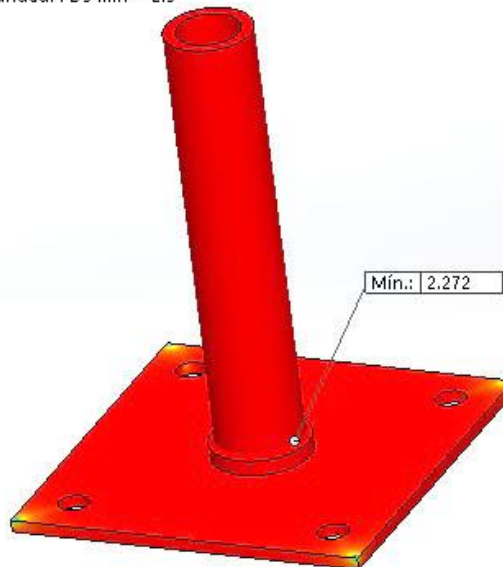


Fig. 2.39. Resultados para soporte tambor de momento máximo y factor de seguridad bajo el criterio von mises máximo.

#### 2.4.4. DISEÑO DEL TAMBOR

El tambor será el elemento encargado de recibir el alambre que será trefilado una vez haya pasado por la hilera, se encontrará ensamblado mediante una cuña entre su eje hueco y el eje de salida de la transmisión, el cual será el elemento encargado de proporcionarle su velocidad angular, tal como se presenta en la Fig. 2.40.

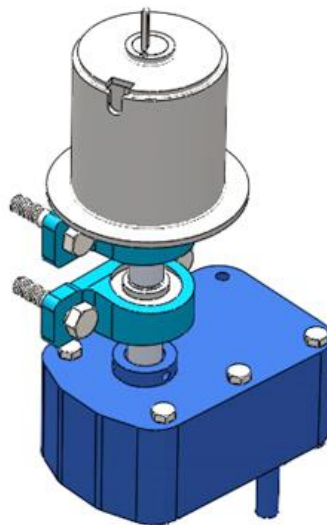


Fig.2.40. Ensamble de tambor al eje de transmisión.

Una combinación apropiada entre la tensión necesaria en el alambre y la velocidad de trefilado sugiere un tambor de 127 mm (5 pulg), manteniendo de ésta forma un equilibrio apropiado entre el torque necesario y la velocidad. Su longitud se ha considerado de 127 mm.

El tambor estará conformado por 4 partes, las cuales son la base, una pieza cilíndrica donde se enrollará el alambre, la tapa superior y una barra hueca interna que actúa como eje hueco del tambor, todas construidas de hierro dulce, y unidas entre sí mediante soldadura. En la Fig. 2.41 se presenta un dibujo de ensamble del tambor para una mejor comprensión del mismo. Además, debido a las múltiples cargas y por estar constituido por varios

elementos, se hará uso de simulación con SolidWorks para determinar con exactitud el factor de seguridad de este elemento, en función de los parámetros establecidos y el material seleccionado.

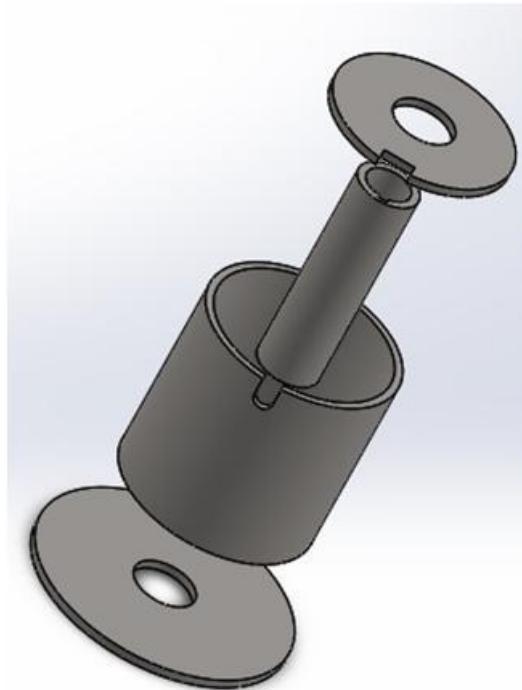


Fig. 2.41. Dibujo de ensamble del tambor.

#### **2.4.4.1. DETERMINACIÓN DE REACCIONES**

El reductor proporcionará un torque constante de 81.92 N·m debido a que el tambor tiene un diámetro de 127mm (5 pulg.) y que la fuerza tangencial de tracción que soportará es la carga preliminar de diseño estimada de 1290N (290lb). Esto implica que inicialmente el tambor debe soportar en algún punto al menos 1290N para trefilar el alambre antes de que éste se enrolle sobre el tambor. Para ello se hará uso de un cepo que unirá el alambre a un cable

fijado en el tambor. El punto donde se aplicará la fuerza de 1290 N es una ranura en la parte cilíndrica del tambor como se presenta en la Fig. 2.42.



Fig.2.42. Detalle del tambor.

Después de la primera vuelta del tambor, el cable que sujetará al alambre para ser enrollado en el tambor y posteriormente, el alambre mismo, empezaran a enrollarse alrededor del tambor, lo que provocará que el tambor además de estar sometido al torque por la fuerza en su periferia experimente una presión determinada por:

$$\sigma = \frac{F}{LD} = \frac{1290N}{(127\text{ mm})(127\text{ mm})} = 79.98\text{ kPa}$$

donde:

$F$ = Carga preliminar de diseño

$L$ = Longitud del tambor

$D$ = Diámetro del tambor

Se consideraran como cargas externas actuando sobre el tambor el torque generado para enrollar el alambre y la presión que esto genera además de la carga puntual sobre la ranura para sujetar el cable que se utilizará para halar al principio del proceso, la punta del alambre desde la hilera hacia el tambor, la aplicación de estas cargas se presentan en la Fig.2.43, también se consideraran que todas estas cargas estén actuando simultáneamente, además se debe de considerar una sujeción para realizar el estudio de simulación mediante SolidWorks, por lo que se considerará una sujeción fija en el eje hueco del tambor.

El material para todos los elementos del tambor, se selecciona un acero AISI 1020 con límite elástico de 351.57 MPa. Cabe agregar que se seleccionaron estos materiales debido a su disponibilidad y precio. La unión entre cada elemento se hará mediante una soldadura con electrodo E6013 de 3mm (1/8 pulg)de diámetro para proporcionar conexiones rígidas entre elementos.



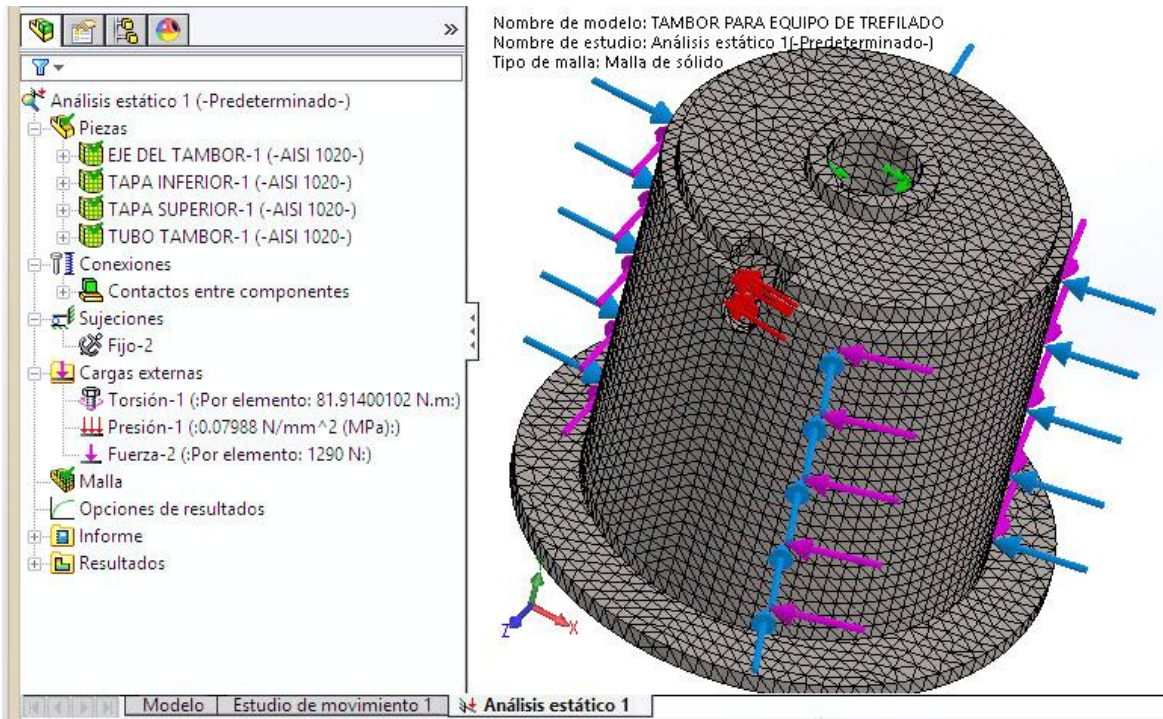


Fig. 2.43. Aplicación de la fuerza sobre la ranura (en rojo), el torque en la periferia (morado) y la presión sobre el tambor (azul) sujeción fija (verde) y creación de la malla.

Realizando la simulación para elementos sólidos mediante SolidWorks, bajo el criterio de esfuerzo cortante máximo, se determinó que el esfuerzo máximo al que estará sometido el tambor, bajo el sistema de cargas establecidas es de 69.498 MPa, el cual se localiza en la zona de la ranura donde se sujetará el cable para halar el alambre. Además, determinando el factor de seguridad para este esfuerzo cortante máximo y el esfuerzo de cedencia para el material seleccionado se tiene un valor de 3.291. Así, en la Fig. 2.44 se presentan los resultados obtenidos.

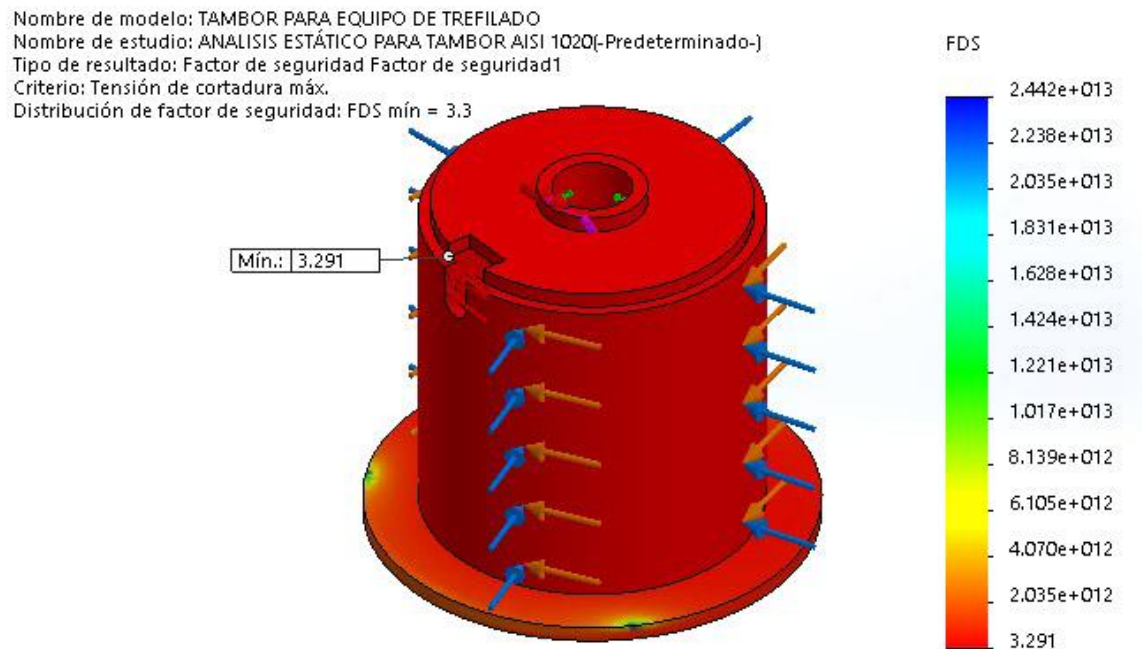
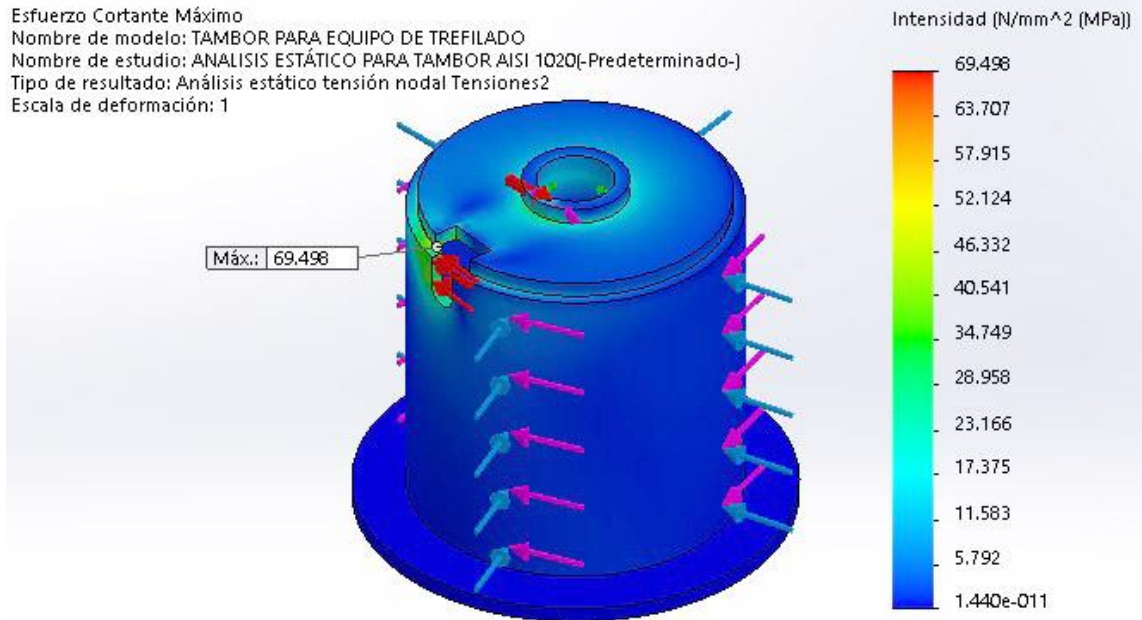


Fig.2.44. Resultados de momento máximo y factor de seguridad bajo el criterio del esfuerzo cortante máximo para el tambor.

Por lo que se concluye que el material especificado en el diseño es apropiado tanto para las condiciones geométricas establecidas como también para el sistema de cargas al que se someterá el tambor durante el trefilado. Además, se requieren construir dos tambores completamente idénticos ya que se usaran simultáneamente, así mientras uno esté entregando el alambre el otro estará recibiendo el alambre trefilado y luego se intercambiarán de posición. También, es de suma importancia citar que el material utilizado para la construcción de los tambores es acero AISI 1045, debido a que este presenta características y propiedades mecánicas superiores a las de un acero AISI 1020 es seguro el funcionamiento del equipo.

#### **2.4.5. DISEÑO DE LA BANCADA**

Una vez definidas todas las cargas en los elementos que estarán en contacto directo con el alambre durante el trefilado, se procede a establecer la ubicación adecuada de cada elemento sobre la bancada, de manera que se cumplan los siguientes requerimientos:

- ✓ El alambre quede completamente alineado entre tambor y tambor, al pasar por la hilera,
- ✓ La bancada tenga una altura adecuada para la realización de las prácticas de laboratorio con suficiente espacio para la apreciación del proceso de reducción, y
- ✓ No exista interferencia entre los diferentes elementos que conformarán el banco de trefilado.

Debido a que la bancada estará compuesta por miembros estructurales, los cuales se encontrarán sometidos a diversas cargas de los elementos analizados anteriormente, se hace uso de la simulación mediante SolidWorks para determinar la zona crítica y evaluar el material a utilizar, si este

cumple con los requerimientos del diseño mediante el factor de seguridad a obtener.

Haciendo uso de ecuaciones de análisis estático de las cargas y momentos actuantes sobre los elementos estructurales de la bancada se identificaron los siguientes puntos de análisis:

- 1) Tubo estructural de apoyo para chumaceras de eje.
- 2) Tubo estructural de apoyo para soporte de tambor que entrega alambre.
- 3) Tubo estructural de apoyo para soportes de hilera.

Nota: El peso de los elementos a instalar es despreciable en relación a las cargas que se generan durante el proceso por lo cual no se consideraron dentro del análisis estático.

En la Fig. 2.45 se presentan las diversas reacciones según la ubicación otorgada a los diferentes componentes del banco de trefilado que se enlistaron anteriormente como objeto de análisis.

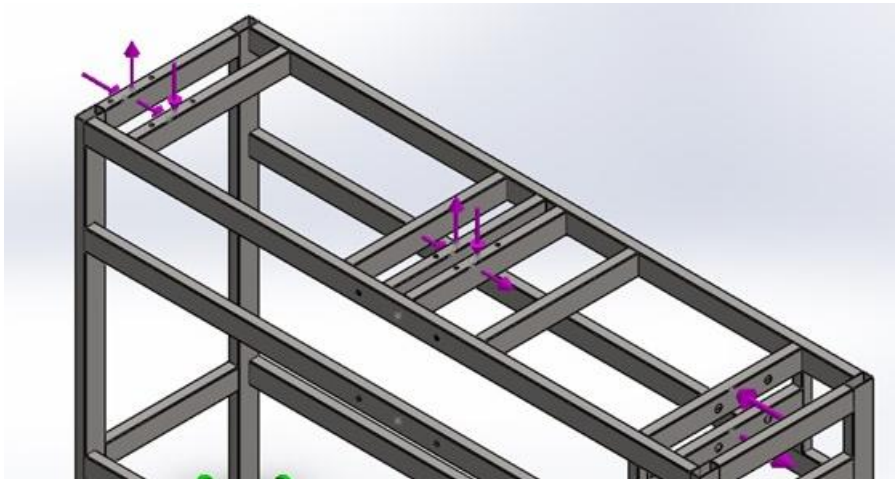


Fig. 2.45. Esquematación de sistema de cargas actuantes sobre la bancada.

En la Fig. 2.46 se detallan las cargas en el asesor de simulación establecidas por cada componente actuando sobre la bancada.

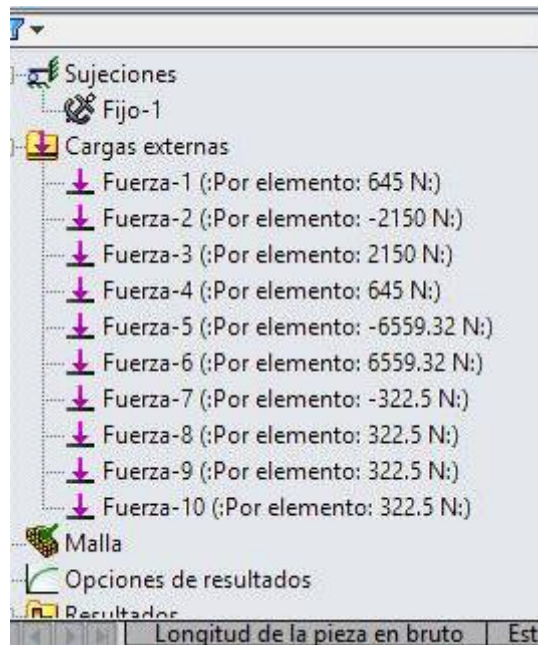


Fig. 2.46. Ventana de asesor de simulación definiendo cargas externas que actúan sobre la bancada.

Igual que en los elementos anteriores una vez definidas las sujeciones que para el caso de la bancada son de tipo fija en cada miembro de apoyo en el suelo, se procede con el estudio. Así, para desarrollar el análisis por medio de elementos finitos y obtener los resultados en las Figs. 2.47 y 2.48 se presentan el sistema de cargas actuantes y la creación de malla, respectivamente.



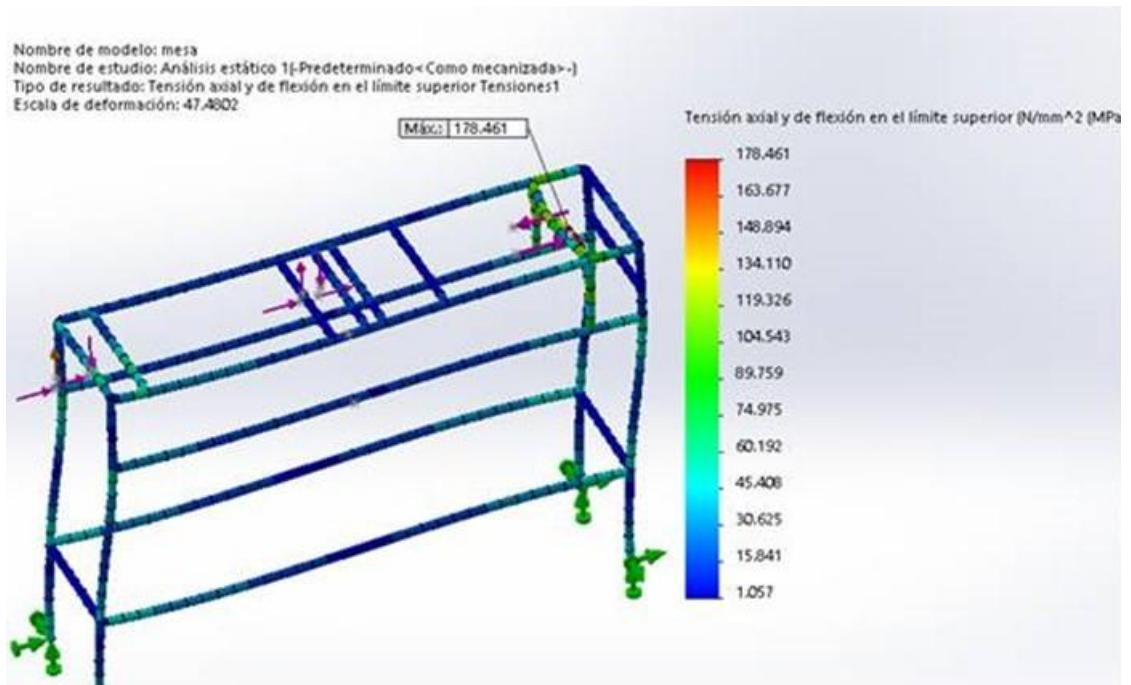


Fig. 2.47. Resultado de tensión axial y de flexión en límite superior de los miembros estructurales de la bancada.

Como se puede apreciar en la Fig. 2.48 el máximo esfuerzo resultante de tensión axial y de flexión es de 178.46 MPa, el cual se localiza en el punto de apoyo de la chumacera inferior del eje. Así, al comparar este esfuerzo resultante con el valor del límite elástico de 351.57 MPa del material AISI 1020 del cual se han fabricado los miembros estructurales, se determina que no existe deformación plástica y que la estructura presentará un factor de seguridad según los resultados de la Fig. 2.49 de 1.970, por lo que se concluye que el diseño para la bancada satisface el sistema de cargas y las condiciones de diseño.

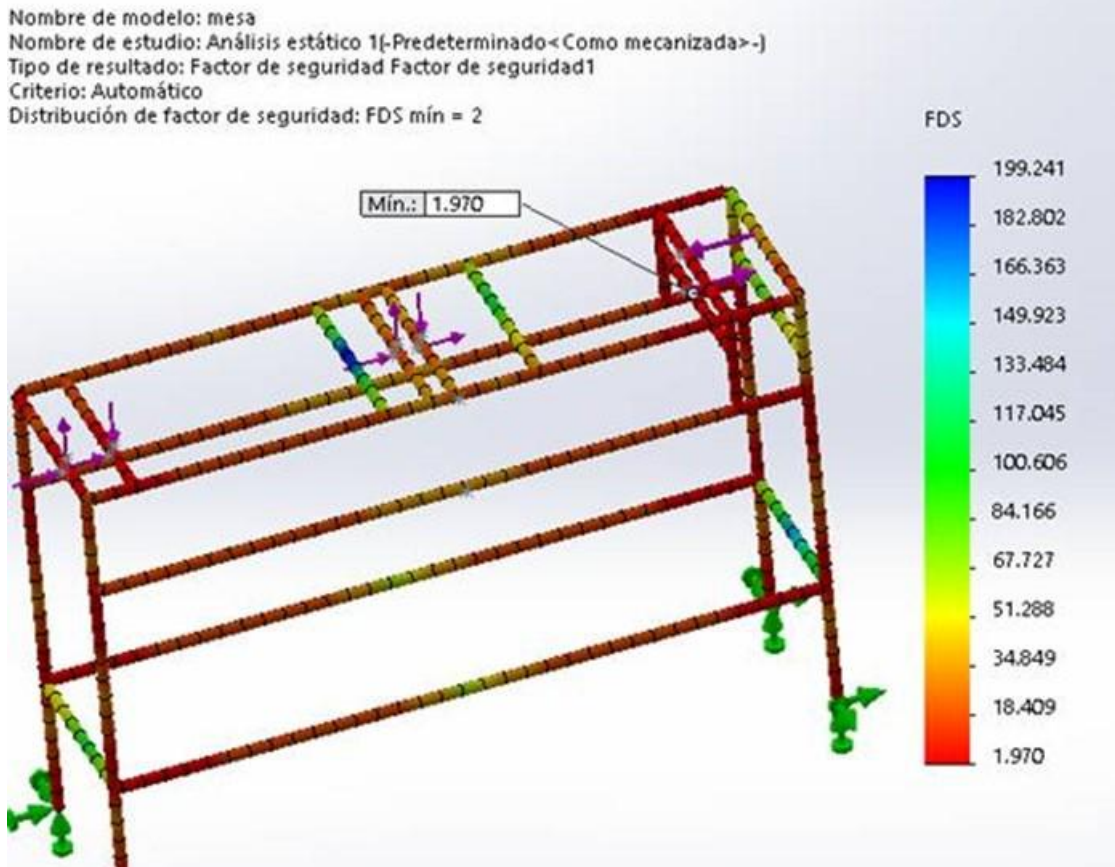


Fig.2.48. Resultado del factor de seguridad mínimo obtenido en los miembros estructurales de la bancada.

## 2.4.6. SELECCIÓN DEL MOTOR-REDUCTOR

Se hará uso de un reductor de engranes rectos helicoidales, así como dos poleas que aumentando el efecto de reducción de velocidad, en donde la polea de mayor diámetro estará acoplada al eje del reductor y una de menor diámetro en el eje del motor.

El eje transmisor de potencia irá acoplado a dos rodamientos que sostendrán el peso del reductor además de absorber las cargas radiales generadas en el proceso. El eje de entrada del reductor estará acoplado a una polea ya que la potencia aportada por el motor al sistema será a través de banda.

En la Fig. 2.16 se presenta el reductor a instalar, es cual es de engranas, marca DODGE (Fig. 2.9) de doble reducción, con una capacidad de potencia máxima de 2.5 hp a la entrada y con un ratio de 15.35:1, las especificaciones se presentan en la Tabla 2.2.

En el eje de entrada que es de tipo sólido, se instalará una de las poleas para la transmisión de potencia desde el motor, la geometría de las poleas se puede apreciar en el esquema de la Fig. 2.49:

Tabla 2.2. Especificaciones de reductor DODGE2.3

Reductor de velocidad DODGE	
Tipo de unidad	Torque-Arm
Ratio	15.35:1
Tamaño	TD115
Tipo de entrada	Eje sólido
Tamaño de la entrada ( $\Phi$ ), mm	3/4
Tipo de Salida	Eje hueco
Tamaño de la salida ( $\Phi$ ), mm	30
Máxima velocidad de entrada, rpm	2148
Máxima potencia de entrada, hp	2.5

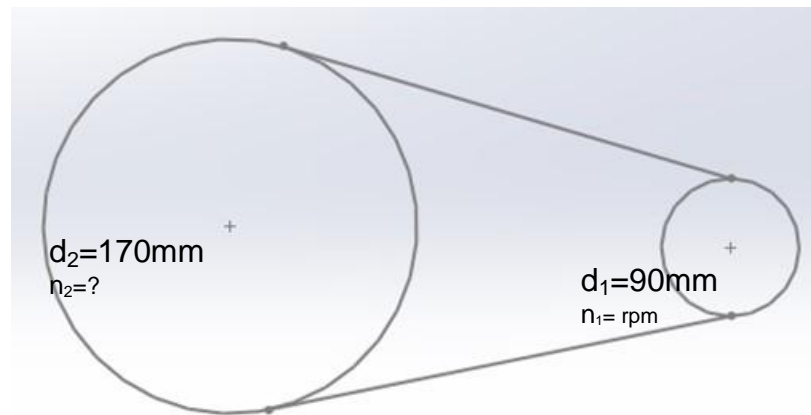


Fig. 2.49. Dimensiones de poleas.



La relación de velocidad angular en rpm a obtener en el eje de entrada del reductor se determina mediante la Ec. 2.1 y los datos de la Fig. 2.17, así:

$$(70)(n_1) = (190)n_2$$

$$n_2 = 0.37n_1[rpm]$$

Se sabe que la relación entre la velocidad a la entrada del reductor y la velocidad del eje de salida donde se instalará en uno de sus extremos el tambor, es de:

$$n_{eje} = \frac{1}{15.35}n_2[rpm]$$

Sustituyendo  $n_2$  en esta ecuación, se obtendrá la relación de velocidad entre el motor y el eje de salida del reductor, o velocidad del tambor, por lo que se tiene que la relación de velocidad entre el motor y el tambor es de:

$$n_{eje} = \frac{0.37}{15.35}n_1[rpm]$$

Sustituyendo en esta ecuación las rpm del motor o  $n_1$  se tiene para la velocidad del tambor que es la misma del eje de salida un valor de:

$$n_{eje} = \frac{0.37}{15.35}(1725) = 42 \text{ rpm}$$

El torque que deberá entregar el motor-reductor, como se ha mencionado anteriormente está en función de la carga preliminar de diseño y el radio del tambor por lo tanto se tiene que:

$$T = F \times r_{tambor} = (1290N) \left( \frac{0.127m}{2} \right) = 81.92 \text{ N} \cdot m \text{ (726 lb} \cdot \text{ pulg)}$$

Una vez definida la velocidad angular a la que se trefilará y el torque necesario para realizar dicho proceso se determinará la potencia demandada por el equipo para la carga preliminar de diseño; es decir, para poder trefilar un alambre de cobre puro, calibre 10, la cual viene dada por:

$$Pot = \frac{T \eta}{63000} = \frac{726 \text{ lb} \cdot \text{ in} \times 42 \text{ rpm}}{63000} = 0.48 \text{ hp (358 W)}$$

Además, tomando en consideración las pérdidas generadas en la transmisión de potencia; es decir, tomando en cuenta la eficiencia del reductor y la de transmisión por bandas se tiene que la potencia requerida para el motor es de:

$$Pot_{motor} = \frac{0.48hp}{\eta_{reductor} \times \eta_{banda}} = \frac{0.48hp}{0.7 \times 0.8} = 0.86hp \approx 1hp = 746W$$

Por lo que se concluye que el motor-reductor seleccionado satisface holgadamente la potencia que se requiere en el equipo.

### **3. CONSTRUCCIÓN**

En el capítulo anterior se ha determinado la geometría y el material que se requiere para cada uno de los elementos que conformarán el equipo de trefilado, para que éste pueda ser operado en condiciones óptimas sin posibilidades de falla y realizar su construcción de la forma más económica posible. Se ha hecho uso del software SolidWorks para poder determinar las posibles interferencias del diseño, eliminándolas por completo para que esta etapa pueda ser realizada de manera eficiente, por lo que en este capítulo se describirá de forma breve el proceso de fabricación que se requirió para la construcción de cada elemento, así como el ensamblaje de todos estos, obteniendo como resultado el equipo completo de forma funcional.

#### **3.1. CONSTRUCCIÓN DE BANCADA**

- ✓ Trazado, corte y limado.

La primera etapa de la construcción de la bancada, consiste en el trazado, corte y limado de tubo estructural AISI 1020 de 50.8x23.4 mm (2x1 pulg) en tramos en base al plano de diseño realizado. Para esta etapa fue necesario el uso de un trazador, escuadra, cinta métrica y cortadora para acero de disco de alta revolución de 35.56cm (14 pulg) para asegurar la calidad del corte, tal como se observa en la Fig. 3.1. Posteriormente, se hizo uso de una prensa de banco y lima para eliminar la rebaba y filo de los cortes.



Fig. 3.1. Corte de los tramos de tubos en base las medidas del plano.

✓ Preparación de juntas.

Una vez obtenida cada sección de tubo que conformara la bancada se procedió a la etapa inicial de colocar a escuadra cada elemento a soldar.

Para ello se hizo uso de escuadras magnéticas como se puede apreciar en la Fig. 3.2, y se desarrolló la etapa inicial de soldadura mediante punto. En base a los planos de diseño elaborado para la bancada se continuó con este proceso hasta obtener todas las juntas soldadas únicamente por puntos, esto para disminuir deformaciones por dilatación térmica al momento de aplicar el cordón de soldadura lo cual es el paso final a realizar para la obtención de las juntas.

Posteriormente se hizo uso de cepillo de copa y manual para eliminar residuos de escoria en cada junta realizada. Además de la limpieza de signos iniciales de oxidación en las zonas cercanas a la soldadura.



Fig. 3.2. Preparación de juntas mediante puntos, y armado de la bancada.

✓ Trabajos de aplicación de base y pintura.

Una vez asegurada la limpieza de la estructura de residuos de escoria y signos de oxidación se efectuó una limpieza final previa a la aplicación de la base con el uso de thinner, logrando con ello la remoción de polvo y otros contaminantes.

Realizado la aplicación de la base, se procede a la etapa final de aplicación de pintura anticorrosiva de la estructura quedando la estructura tal como se presenta en la Fig.3.3.



Fig.3.3. Limpieza de la estructura, bancada finalizada debidamente pintada.

✓ Trazado, cortado y pintado de lámina de bancada

Se usó lámina de 1.58 mm (1/16 de pulg) que servirá para cubrir la base en donde se montarán todos los demás elementos que se requieran, además de posibilitar un área de trabajo adecuado en el que se pueda realizar las prácticas de laboratorio.

Se realizó el trazado según las dimensiones de ancho por largo de la bancada, para posteriormente hacer el corte de la lámina, una vez obtenida la sección a utilizar se realizó la limpieza de esta para aplicar la base y la respectiva pintura.

### 3.2. CONSTRUCCIÓN DE SOPORTE DE MOTOR

El soporte del motor mostrado en la Fig. 3.4, se construyó con tubo estructural cuadrado de 25.4 mm (1 pulg), y lámina lagrimada de 3.18 mm (1/8 pulg), al igual que la bancada, el proceso inicia con el trazado para la realización de los cortes en base a las dimensiones del diseño realizado, una vez cortado y limado se debe soldar todas las piezas, se taladra los agujeros para los pernos de sujeción del motor y se termina realizando limpieza de dicha estructura para su posterior aplicación de base y pintura. El motor posee de agujeros en la carcasa transversal para que la sujeción de este sea a través de pernos quedando posicionado de forma vertical.



Fig.3.4. Piezas que conforman el soporte del motor y soporte finalizado.

### 3.3. CONSTRUCCIÓN DE TAMBORES PARA TREFILADO

Todas las partes que conformarán el tambor de trefilado, previamente se refrentaron y cilindraron mediante un torno, para poder proporcionar la longitud de los tubos tanto de 127mm (5 pulg) como el de 30mm (1.18 pulg) y diámetro de las tapas requeridos, para posteriormente ser soldadas entre sí, luego con el uso de una fresadora se realizó tanto el chavetero en el eje hueco, como el canal en el cuerpo del tambor que servirá como acople a la pieza a utilizar de sujeción del cable de acero y su accesorio para poder agarrar el alambre a trefilar y ser enrollado al tambor. Los tambores construidos son como el mostrado en la Fig. 3.5.



Fig.3.5. Tambores de trefilado maquinados, soldados y pintados.

### 3.4. CONSTRUCCIÓN DE SOPORTES DE HILERA

Para realizar los soportes de hilera se cortó el ángulo estructural de 50.8x50.8x3.16 mm (2x2x1/8 pulg) para obtener las dos piezas requeridas según el diseño, además de la lámina de 3.16 mm (1/8 pulg) que servirá como base. Una vez hecho el cortado, se eliminó los filos de los bordes mediante



limado. Se realizó el proceso de soldadura uniendo las piezas requeridas y se realizaron los agujeros que servirán para que el soporte hilera sea fijado a la base mediante pernos como se presenta en la Fig. 3.6.



Fig. 3.6. Soportes de hilera finalizados, forma de uso de estas.

### 3.5. CONSTRUCCIÓN DE BASE DE TAMBOR

Este tambor está constituido por tres elementos, dos tubos uno de los cuales sirve de eje del tambor y el segundo tiene la finalidad de alza para que la parte inferior del tambor no tenga contacto con la lámina que conformará la base, ambos tubos deben ser cortados y posteriormente refrentados en sus extremos mediante torno para asegurar que el eje quede totalmente perpendicular a su base. La lámina de 3.18mm (1/8 pulg) debe ser cortada a la medida requerida haciendo uso de una pulidora, al igual que en todos los procesos de corte ejecutados se procede a una etapa de limado para eliminar bordes y haciendo uso de un taladro se perfora la lámina para que el soporte sea instalado sobre la bancada mediante pernos. Se realizó la etapa de



soldadura entre las partes y la limpieza de estas para culminar con la etapa de construcción que es la aplicación de pintura al elemento terminado como se puede apreciar en la Fig. 3.7.



Fig.3.7. Base de tambor.

### **3.6. ENSAMBLAJE DE BANCO DE TREFILADO**

Una vez fabricados todos estos elementos se procede al montaje y ajuste de los mismos en la bancada. El primer elemento a instalar fue el eje de transmisión para el cual fue necesario montarlo ensamblado juntamente con las chumaceras y sus rodamientos, tal como se presenta en la Fig. 3.8.



Fig.3.8. Montaje del eje y sus chumaceras.

Cuando las chumaceras se ubicadas en su sitio, se procedió a asegurar el eje mediante un seguro y 4 prisioneros ubicando dos en cada chumacera, tal como se presenta en la Fig. 3.9. Esto fija al eje evitando que se desplace axialmente ya que también soportará el peso del reductor.



Fig.3.9. Sujeciones del eje de transmisión.

Después se instaló el reductor acoplándolo al eje de transmisión y sujetándolo mediante dos prisioneros en la entrada del eje hueco, como se presenta en la Fig.3.10, quedando el reductor en voladizo y con movimiento libre sobre el eje, dando facilidad para ubicar el reductor según la posición requerida.



Fig.3.10. Apriete de prisioneros en el reductor.

El siguiente elemento a instalar fue el soporte del motor, el cual se acopló junto al motor. Este soporte se sujetó a la bancada mediante pernos de 10 mm (3/8 pulg) como se presenta en la Fig. 3.11.



Fig.3.11. Montaje de soporte de motor.

Con las sujeciones apretadas correctamente se instaló el perno tensor en el reductor y se colocó la banda que une al reductor con el motor, para luego tensarla, resultando en un ensamble como el que se presenta en la Fig. 3.12.



Fig.3.12. Motor y reductor instalados y acoplados.

El siguiente paso fue la colocación de la pletina superior de la bancada, para poder ubicar sobre ella todos los elementos externos con los cuales el estudiante interactuará. Después de montada la pletina el primer elemento a instalar fue el soporte del tambor, mediante 4 pernos de 8 mm (5/16 pulg) con sus respectivas arandelas y tuercas, como se presenta en la Fig. 3.13. Estos fueron ubicados en agujeros taladrados junto con la pletina.

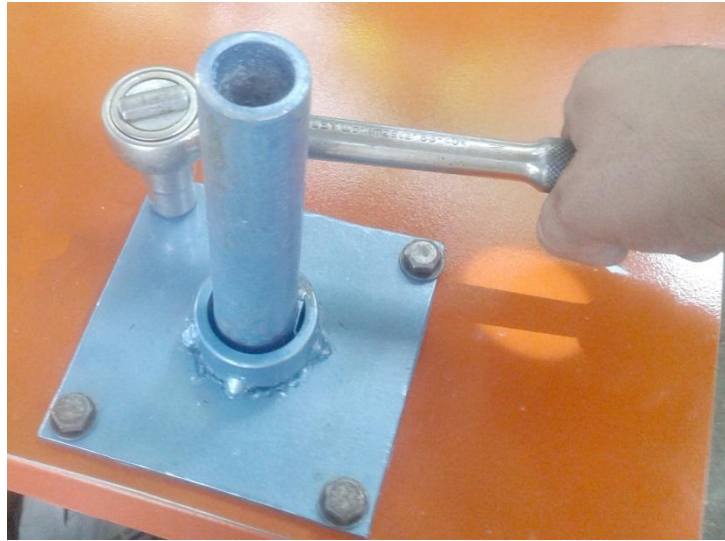


Fig.3.13. Instalación de soporte de tambor.

El soporte de hilera fue el siguiente a instalar, taladrando un agujero de 8 mm a través de la pletina y los tubos de la estructura de la bancada. Estos soportes se fijaron mediante pernos de 8 mm con sus respectivas tuercas y arandelas como se presenta en la Fig. 3.13.



Fig.3.14. Instalación de soporte de hilera.

Posteriormente, se colocaron los tambores en sus respectivos lugares, esto es, uno en el soporte de tambor y otro en el eje de transmisión. El tambor acoplado al eje deberá tener acoplada una cuña de 6 mm como se presenta en la Fig. 3.15, para sincronizar el movimiento del tambor y el eje.





Fig.3.15. Instalación de tambor y cuña.

Una vez que se determinó la posición final de la pletina, se procedió a fijarla mediante tornillos autoroscantes en la periferia de la bancada. Se hizo uso de un taladro y una punta Phillips como se observa en la Fig. 3.16.



Fig.3.16. Atornillado de Pletina.

El cable a utilizar para sujetar el alambre desde la hilera hasta el tambor de tracción, se instala fácilmente colocándolo en la ranura destinada para el mismo, como se observa en la Fig. 3.17.



Fig.3.17. Cable enhebrador.

Finalizado el montaje de todos los elementos mecánicos, se debe de instalar la botonera, la cual será el mando de accionamiento del equipo de trefilado. Así, ésta estará constituida por un botón de arranque y apagado, y un botón de paro de emergencia tipo hongo, en el interior de la caja metálica se encuentran tanto las protecciones del circuito de potencia como del circuito de mando, ubicando ésta en la posición más adecuada para que el equipo pueda ser manipulada de forma segura, se tiene el equipo de trefilado ensamblado de forma completa tal como se presenta en la Figura. 3.18.



Fig.3.18. Equipo de trefilado completo



#### 4. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

En el presupuesto del presente trabajo de graduación se abarcan los materiales y componentes necesarios para llevar a cabo la construcción física del mismo, realizándolo más económicamente posible y así poner a disposición el curso didáctico que se espera lograr con ésto en la Escuela de Ing. Mecánica.

La selección de la propuesta y sus componentes que constituirán las partes y piezas principales del equipo ha sido realizada en base al análisis presentado en las secciones anteriores de los esfuerzos generados así como las dimensiones de cada elemento, factores que son necesarios conocer a la hora una cotización. Dentro de este mismo proceso de selección ha sido muy importante el factor económico ya que se ha velado por equilibrar factores de seguridad y calidad con costos monetarios.

A continuación se presenta detalladamente el listado de precios así como cantidad a utilizar de todos los materiales y equipos, en base a precios del mercado local y exterior tratando de obtenerlos lo más actualizados posible:

Tabla 4.1. Presupuesto general del proyecto.

Ítem	Descripción	Costo total, \$
1	Materiales para la construcción de la bancada: tubo estructural 2x1, lámina y consumibles	150.00
2	Materiales para la construcción de los soportes: tubo estructural, barra hueca, ángulo estructural, pletina.	70.00
3	Componentes electrónicos: motor trifásico, contactor, guardamotor, paro de emergencia, botón doble: encendido y apagado, caja para botonera.	260.00
4	Fabricación de componentes mecánicos: tambores, soporte de tambor, mordazas.	100.00
5	Hilera de trefilado	40.00
6	Instalación de componentes eléctricos	10.00
7	Reductor de Velocidad DODGE ratio 15.3: 1 tamaño	500.00
8	Impresiones, empastados, anillado, discos, viáticos	80.00
9	honorario de ingeniero	1,230.00
<b>Total</b>		<b>2,440.00</b>

## CONCLUSIONES

Finalizado el presente trabajo de graduación sobre el diseño y construcción de un equipo didáctico de trefilado de alambre de cobre se puede concluir lo siguiente:

1. Que se diseñó y construyó un equipo semiautomático de trefilado que representa los conceptos básicos del conformado de metales específicamente el trefilado de alambre mediante componentes sencillos que permitirán la realización de las prácticas de laboratorio de una manera comprensible para los estudiantes de la cátedra de Procesos de Fabricación I.
2. Que durante el diseño de los componentes del equipo se hizo uso de un programa computacional SolidWorks para la verificación de los factores de seguridad de cada uno de los elementos así como las cargas críticas que cada uno de ellos soporta, reflejando así la importancia de estos software como herramienta útil para los estudiantes de Ingeniería Mecánica y la necesidad de implementar cursos o inducciones sobre los mismos.
3. Que se estableció la base bibliográfica necesaria para el desarrollo de la etapa de diseño así como la selección de los elementos que conforman el equipo de trefilado. El alambre a trefilar de cobre posee excelentes características de ductilidad, sin embargo para el presente proyecto se tuvo la limitante sobre las dimensiones del mismo sobre las cuales es posible ejecutar una reducción ya que debido a la fuente de potencia y a la disponibilidad de tamaño de hilera fue preciso determinar la carga crítica para proseguir con el diseño de demás componentes que conforman el equipo.

4. Que la disponibilidad de alambre de cobre propiamente desnudo en el mercado es limitado ya que únicamente se puede obtener alambre con recubrimiento lo cual en cierta forma dificulta el desarrollo de las prácticas ya que se deberá preparar con anticipación el alambre a trefilar.
5. Que los efectos generados por la fricción durante el proceso son despreciables debido a que las reducciones efectuadas se mantuvieron por debajo del valor límite de trabajo en frío aconsejado para el proceso de trefilado.
6. Que durante la etapa constructiva se aplicaron conocimientos de soldadura, obra de banco y trabajo con máquinas herramientas, por lo que se considera que el presente trabajo integro de forma satisfactoria los conocimientos implicados en la cátedra de Procesos de Fabricación además del tema central de trefilado.
7. Que las medidas de seguridad pueden ser mejoradas al implementar una pantalla de acrílico en el banco, lo cual impida cualquier impacto generado por una posible rotura de alambre.
8. Que las bases teóricas sobre las ecuaciones de trefilado pueden servir como punto de partida para una investigación más profunda donde se involucren los parámetros de diseño del dado o hilera y los efectos de la fricción.
9. Que la rentabilidad del proyecto no es medible económicamente ya que ha sido desarrollado sin fines de lucro, más bien se encuentra relacionada con el beneficio académico que se espera lograr al ser implementado dentro de los equipos disponibles del taller mecánico para las prácticas de laboratorio.

10. Que se elaboraron guías de laboratorio y mantenimiento del equipo que sirvan de orientación a los estudiantes esperando aclarar los conceptos requeridos para la puesta en marcha y buen funcionamiento del equipo.

## REFERENCIAS

- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson Editores.
- Atienza Riera, J. (2001). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de <http://oa.upm.es/139/1/04200111.pdf>
- Avner, S. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física*. México: McGraw-Hill.
- Budynass, R. (2011). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw Hill.
- Callister, W. (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Mexico: Reverté.
- CIMSA. (2015). *CIMSA*. Obtenido de [http://www.cimsaww.com/internet/es/cupropedia/aleaciones\\_1/serie\\_k/serie\\_k.jsp](http://www.cimsaww.com/internet/es/cupropedia/aleaciones_1/serie_k/serie_k.jsp)
- Córdova, W. (2011). *Elaboración de un manual de procedimientos operativos, para la estandarización del proceso de trefilación de alambre, en la industria metal mecánica*.
- Degarmo, P. (1994). *Materiales y procesos de fabricación*. España: Reverté.
- Dieter, G. (1967). *Metalurgia Mecánica*. España: McGraw-Hill.
- Guevara, J. (2015). *monografías*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos13/tramat/tramat.shtml#COBRE#ixz3UtTbQzJA>
- Handbook, A. (1993). *VOLUMEN 14 Forming and Forging*.
- ICA Association, P. (2015). *Afinidad Electrica*. Obtenido de <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=147>
- J. Guachamín, G. B. (2014). *Diseño y construcción de un equipo para el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos a ser implementado en laboratorio de máquinas y herramientas del departamento de ciencias de la energía y mecánica*. Sangolquí, Ecuador.

López Martínez, A. (octubre de 2011). *Universidad de Almería*. Obtenido de [http://www.ual.es/personal/alm212/documentos/Complementos\\_Tecnologia\\_Mecanica.pdf](http://www.ual.es/personal/alm212/documentos/Complementos_Tecnologia_Mecanica.pdf)

METACSA. (2015). *METACSA*. Obtenido de <http://metacsa.com/productos/decapantes/>

Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pearson Educación de México S.A. de C.V.

Neogranadina, C. e. (agosto de 2006). *Ciencia e ingeniería Neogranadina*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/911/91116210.pdf>

Progress, G. P. (2015). *GATES*. Obtenido de <http://www.gates.com.mx/seccion03.asp?subseccion=13&segundonivel=31>

Robert L. Mott, P. (2006). *Diseño de Elementos de Máquina*. México: Pearson.

*Webelements*. (2015). Obtenido de <http://webelements.com/copper/physics.html>

Wright, R. N. (2011). *Wire Technology ,Process Engineering and Metallurgy*. Burlington: Elsevier.

**ANEXO A LABORATORIO DE TREFILADO DE ALAMBRE AWG 12 DE  
COBRE COMERCIALMENTE PURO**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DEPARTAMENTO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN**

**LABORATORIO DE TREFILADO DE ALAMBRE AWG 12 DE COBRE  
COMERCIALMENTE PURO**

**Instructor:** \_\_\_\_\_

**Objetivo General:**

- Realizar el proceso de conformado de trefilado de un alambre de cobre.

**Objetivos específicos:**

- Identificar los diferentes componentes de un equipo de trefilado y las funciones que cada uno de ellos posee durante el proceso.
- Conocer los conceptos teóricos de porcentaje de reducción de área, trabajo en frío, esfuerzo de trefilado, hilera y ángulo de hilera.
- Observar las propiedades y comportamiento de un material dúctil como lo es el cobre.
- Determinar la carga de trefilado necesaria para una reducción dimensional definida para el alambre.

**INTRODUCCIÓN**

El proceso de trefilado es aquel mediante el cual se reduce la sección transversal de un alambre cuando este pasa a través de una hilera o dado, el cual se encarga mediante esfuerzos compresivos y de tracción producir la deformación necesaria para obtener el cambio dimensional del diámetro del alambre.

Los elementos que conforman un equipo de trefilado son:



- 1) Motor eléctrico,
- 2) Sistema de banda y reductor,
- 3) Hilera o dado,
- 4) Tambor de entrega de alambre,
- 5) Tambor encargado de la tracción del alambre,
- 6) Soportes de motor,
- 7) Soportes de reductor, y
- 8) Soportes de hilera.

El cobre posee una estructura FCC lo cual hace que posea excelentes propiedades de maquinabilidad, su ductilidad permite producir láminas e hilos muy delgados y finos.

El trabajo en frío está relacionado con la aplicación de un esfuerzo superior al valor del límite elástico del material, lo cual genera un endurecimiento por deformación, esta deformación es el objetivo que se desea lograr para otorgarle una forma dimensional útil a un alambre de cobre. Así, La curva de esfuerzo vs. Trabajo en frío del cobre es la siguiente:

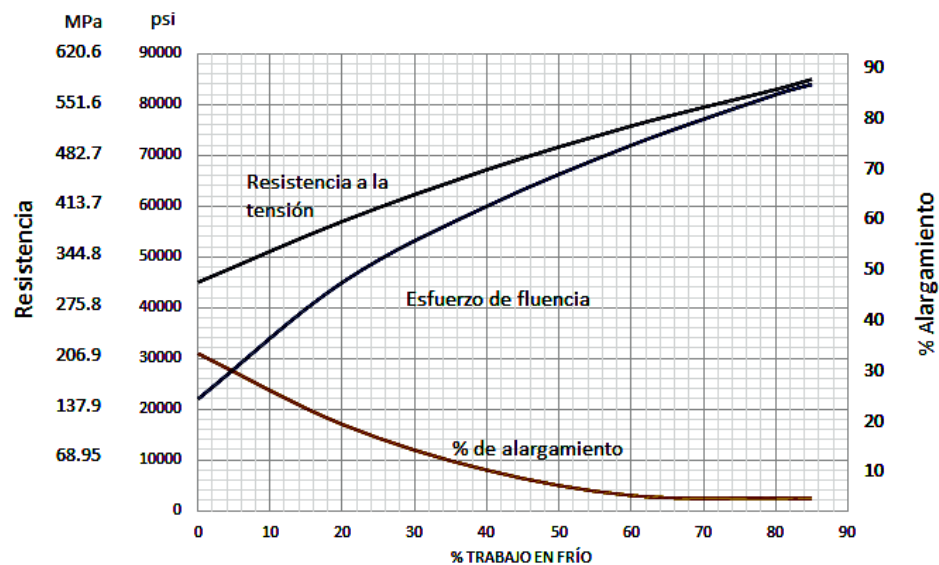


Fig.A.1. Curva de Esfuerzo vs. Trabajo en frío del cobre comercialmente puro

El funcionamiento de un equipo de trefilado consiste en el paso a través de un dado o hilera generalmente hecho de carburos de tungsteno por la cual pasa el alambre, el cual es entregado por un tambor y que al pasar por la hilera es recibido por otro tambor encargado a la vez de la tracción del alambre. El tambor de tracción recibe la potencia y el torque requerido para completar el trefilado de un motorreductor eléctrico.

La variable crítica durante el proceso de trefilado es el ángulo de ataque que posee la hilera el cual al ser menor, permite obtener altas reducciones sin embargo se produce un trabajo de fricción excesivo entre alambre y el cono de trefilado de la hilera. Además, si el ángulo de ataque es mayor se obtienen reducciones pequeñas y el trabajo de fricción disminuye al disminuir el área de contacto entre el alambre y la hilera.

A continuación se presenta un esquema del trefilado del alambre a través del dado o hilera de trefilado:

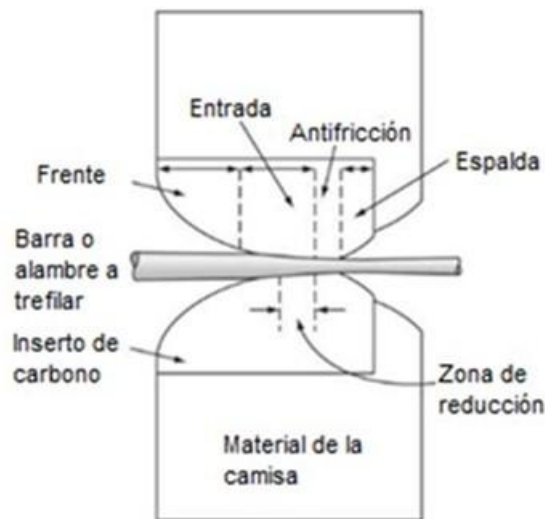


Fig.A.2. Reducción de alambre de cobre mediante el dado o hilera de trefilado

La carga inicial necesaria para lograr la fluencia del material se determina de la siguiente forma:

$$\sigma_Y = \frac{F}{A_0}$$

donde:

$\sigma_Y$ : Esfuerzo de fluencia del cobre a 0% de trabajo en frío

$A_0$ : Área inicial del alambre de cobre

El porcentaje de TF según la reducción deseada es de:

$$\%TF = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\%$$

Así, se deberá definir el área final del alambre de cobre, la cual para la siguiente práctica poseerá un diámetro de 1.7 mm.

El proceso se dividirá en dos etapas de reducción las cuales se recomienda se realicen de la siguiente forma:

1)  $D_0 = 2.052 \text{ mm}$  hacia un diámetro intermedio de:

$$D_{intermedio} = 1.8 \text{ mm}$$

2)  $D_{intermedio} = 1.8 \text{ mm}$  hacia el diámetro final de:

$$D_f = 1.7 \text{ mm}$$

Es necesario determinar el valor de trabajo en frío que se realizará durante el proceso. Así como también, verificar que las condiciones de deformación real permanente se cumplan, esto mediante la siguiente relación:

$$\epsilon = \ln \left( \frac{D_0^2}{D_f^2} \right)$$

Aquí el diámetro final será el diámetro intermedio durante las dos etapas del proceso de reducción. El valor de deformación permanente deberá ser superior al 0.02% del límite de deformación elástica del material.

De la curva esfuerzo vs. porcentaje de trabajo en frío se obtiene el valor del esfuerzo de cedencia correspondiente al trabajo en frío aplicado durante la primera etapa, esto con el fin de conocer el valor de la carga requerida para que el material fluya a partir del endurecimiento por deformación que ha sufrido durante la primera etapa del proceso de trefilado.

$$\sigma_{Y a \% de TF} = \frac{F}{A}$$

Por lo que la fuerza o carga de estirado para lograr una reducción en dos etapas deberá ser mayor para garantizar la fluencia del alambre con diámetro de 1.8 mm.

Para la condición de carga de trefilado se debe verificar que se cumplan las condiciones de esfuerzo siguientes:

- ✓ El esfuerzo generado por la carga de trefilado deberá superar el esfuerzo de cedencia del material correspondiente al % de TF generado durante la primera etapa.
- ✓ El esfuerzo generado por la carga de trefilado no debe superar el esfuerzo a carga máxima del material al finalizar el proceso total de reducción para evitar condiciones de estiramiento del alambre. Se deberá comparar el esfuerzo de trefilado generado por dicha carga con el esfuerzo de cedencia correspondiente al % de TF que implica la reducción diametral total del proceso, es decir:

$$\%TF = \frac{(2.052)^2 - (1.7)^2}{(2.052)^2} \times 100\% = 31.37\%$$

### **EQUIPOS Y MATERIALES A UTILIZAR:**

Los materiales, herramientas y equipos a utilizar para esta práctica de laboratorio son:

- 1) Equipo de trefilado,
- 2) Alambre de cobre AWG calibre 12,
- 3) Lima,
- 4) Lija,
- 5) Tenaza,
- 6) Llaves fijas,
- 7) Calibrador o pie de rey,
- 8) Guantes protectores,

- 9) Lentes de protección, y
- 10) Spray o barniz para protección contra la corrosión.



Fig. A.3. Equipo de trefilado.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Preparar el alambre de cobre removiendo el recubrimiento aislante de protección que este posee.
- 2) Medir con calibrador o pie de rey el diámetro inicial del alambre.
- 3) Con uso de lima y lija preparar el segmento de alambre que será introducido inicialmente a través de la hilera.
- 4) Colocar el alambre en el tambor de entrega, el cual suministrará el alambre durante todo el proceso.
- 5) Introducir el alambre en el agujero correspondiente a la medida intermedia de diámetro que se espera obtener durante la primera etapa de trefilado. Para este caso 1.8 mm.
- 6) Sujetar el alambre mediante dispositivo de enganche para permitir el enrollado inicial del alambre en el tambor de tracción ver Fig. A.4.



Fig. A.4. Sujeción de alambre mediante dispositivo de enganche.

- 7) Verificar las conexiones eléctricas de motor, asegurar que éstas se encuentren en buen estado y disponibles para operar el mecanismo.
- 8) Identificar en la botonera de control el arranque, paro y paro de emergencia del equipo, ver Fig. A.5.
- 9) Encender el equipo presionando el botón de arranque de la botonera



Fig. A.5. Botonera del equipo de trefilado.

- 10) Observar durante la práctica, que el alambre no llegue a rotura y tomar tiempo así como la cantidad de alambre a trefilar.
- 11) Presionar botón de paro en botonera de control.
- 12) Al finalizar, el trefilado del alambre dispuesto en el tambor de entrega (el cual se encontrará totalmente enrollado en tambor de tracción) proceder al

intercambio de tambores para continuar con la segunda etapa del proceso del trefilado.

- 13) Medir con el calibrador el diámetro intermedio obtenido después de primera etapa, ver Fig.6.



Fig. A.6. Medición del diámetro del alambre.

- 14) Repetir el procedimiento anterior e introducir alambre en agujero de hilera con 1.7 mm de diámetro.
- 15) Efectuar el enganche del alambre en el dispositivo de sujeción y presionar el botón de arranque en botonera para segunda la etapa de trefilado.
- 16) Volver a tomar el tiempo en el que se ejecuta la deformación del alambre a través de la hilera.
- 17) Presionar el botón de paro en la botonera al finalizar el enrollado total del alambre en el tambor de tracción.
- 18) Medir con el calibrador el diámetro final obtenido después de las dos etapas de reducción.

## **ASIGNACIONES**

- 1) Explicar de manera breve el concepto de trefilado y que influencia tiene el trabajo en frío en la carga de trefilado requerida para lograr la fluencia del material durante el proceso de trefilado.
- 2) Investigar las diferentes aplicaciones para alambres de cobre y del proceso de trefilado.
- 3) Determinar el trabajo en frío, esfuerzo de cedencia y carga de trefilado según la reducción propuesta en la presente práctica de laboratorio, tomando en cuenta las dos etapas en las cuales se divide el proceso. Además, determinar si el alambre sufre estirado o no.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aguilar, L., Hernández, M., Vicente, R. (2016). Diseño y construcción de un equipo didáctico para trefilado de alambre de cobre puro. (Trabajo de graduación). Universidad de El Salvador.



**ANEXO B MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO DE TREFILADO  
EN FRÍO DE COBRE**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DEPARTAMENTO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN**

**MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO DE TREFILADO EN FRÍO DE  
COBRE**

La trefiladora es una máquina capaz de reducir el diámetro de un alambre, específicamente de cobre, en varias pasadas a través de una hilera, mediante una tracción producida por un tambor acoplado a una transmisión que a su vez está conectada a un motor eléctrico. Al realizar un correcto mantenimiento preventivo en este equipo se puede lograr extender su vida útil y así maximizar la experiencia didáctica para la cual fue creada. Para ello se debe conocer la máquina y los diferentes procedimientos de mantenimiento.

**PARTES DE LA MÁQUINA**

Para comprender mejor su funcionamiento se debe conocer sus diversas partes, las cuales se presentan en la Fig. B.1:

- 1) Alimentador de alambre: tambor para desenrollar el alambre a trefilar y un eje de libre giro.
- 2) Sección de trefilado: consta de una hilera para trefilar el alambre y soporte para la misma.
- 3) Motor eléctrico: la fuente de potencia del equipo.
- 4) Tren de potencia: transmisión de engranes y poleas que transmiten la potencia desde el motor hasta el tambor de tracción o trefilado.
- 5) Cable de tracción: encargado de sujetar el alambre. Se acopla al tambor de tracción.

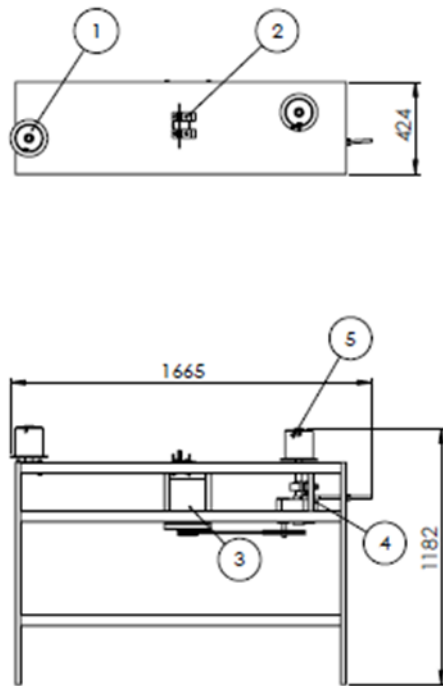


Fig. B.1. partes de la máquina

Debido a la importancia del Mantenimiento Preventivo en la prolongación de la vida útil de la máquina y su funcionamiento adecuado, se han determinado procedimientos generales para las rutinas de mantenimiento, constituidas por la frecuencia, materiales, herramientas a utilizar y los implementos de seguridad que el personal encargado de dicha actividad debe utilizar.

Las rutinas se clasifican principalmente por la frecuencia en las que se deben realizar:

- Rutina previa a las prácticas: estas se realizan previa a la práctica de laboratorio.
- Rutina trimestral: se realiza cada tres meses se utilice el equipo o no.

## RUTINA PREVIA A LA PRÁCTICA

Para conservar la máquina en buen estado y buen aspecto físico, es necesario realizar una limpieza externa sencilla, en el área de trabajo que implica la superficie superior del banco y el panel de control, antes de encender y conectar la máquina. Estos Pasos son:

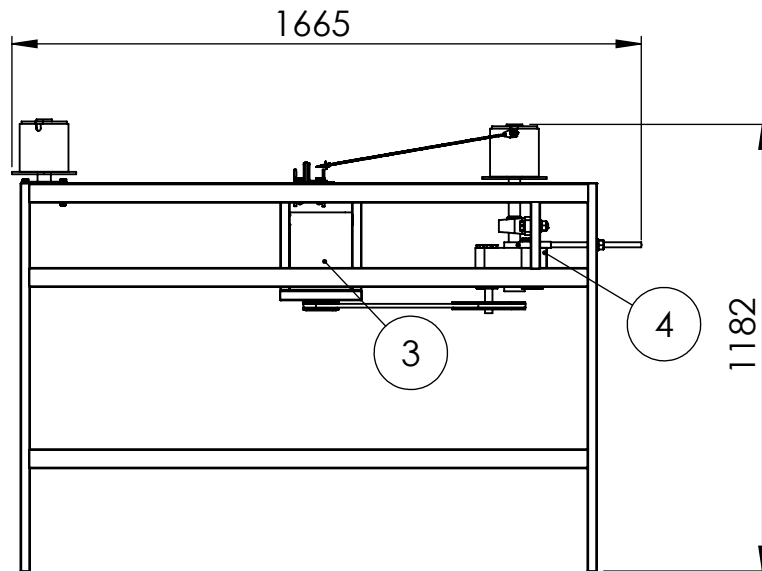
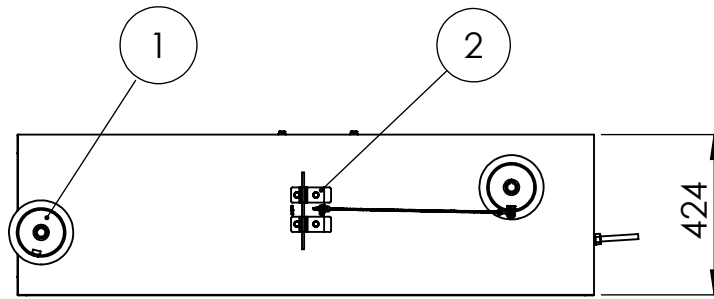
- Equipo de protección necesario:
  - Gabacha;
  - Lentes transparentes;
  - Mascarilla anti polvo; y
  - guantes de mecánico.
  
- Materiales y herramientas:
  - Escoba;
  - Paño de limpieza limpio y seco; y
  - Jabón líquido.
  
- Procedimiento:
  - Quitar los elementos que no corresponden a la máquina;
  - Limpiar con el paño la zona superior de la mesa y el panel de control, con el fin de eliminar cualquier partícula del medio ambiente;
  - Barrer el área de trabajo;
  - Eliminar cualquier obstáculo alrededor de la máquina; y
  - Guardar los elementos utilizados.

## RUTINA TRIMESTRAL

Para mantener funcional la máquina se deben calibrar, limpiar o lubricar los diversos elementos de la misma. Para realizar esta actividad la máquina debe estar desconectada. Estos Pasos son:

- Equipo de protección necesario:
  - Gabacha;
  - lentes transparentes; y
  - guantes de mecánico.
  
- Materiales y herramientas
  - Llave ajustable #8;
  - Aceite de transmisión;
  - Paño seco;
  - Grasa HD2;
  - Aceite de transmisión supergear 80w-140g; y
  - Embudo.
  
- Procedimiento:
  - Revise el apriete de todos los pernos en la máquina. Para los pernos de 14mm de diámetro el torque de apriete debe ser ~15 psi, para los pernos de 13mm de 25 psi, para los de 10 mm y 50 psi para los pernos de 17mm de diámetro.
  - Revisar la tensión en la banda de transmisión entre el motor y el reductor. Esta tensión debe ser tal que la banda se deflecte un cm de su línea de movimiento al aplicar una ligera fuerza perpendicular a ella, ~5 lb. Si esto no ocurre utilice la tuerca del tornillo tensor para aumentar la distancia entre el reductor y el tensor o disminúyala, si la banda está demasiado tensa.

- Engrase los rodamientos que sostienen el eje del tambor de tracción mediante el uso de una grasera manual, conectándola a los terminales de las chumaceras.
- Revise el nivel de aceite de la transmisión, removiendo el tapón ubicado en la parte superior de la misma. Si el nivel se encuentra inferior a la mitad de la altura del reductor, llénelo hasta un cm antes de rebosar. Utilice un embudo para su comodidad.
- Apretar los cepos o abrazaderas del cable de tracción.
- Cambiar la tuerca de mariposa de la tenaza de tracción si esta se encuentra en mal estado o ya no aprieta. Cambie el perno si es necesario.
- Revise los cables de conexión eléctrica en busca de alambres pelados. Si encuentra una sección descubierta aíslela para evitar cortocircuitos.



4	Tren de potencia	1	Acero AISI 1045	Subconjunto 4
3	Motor eléctrico	1	Hierro fundido	Subconjunto 3
2	Sección de trefilado	1	Acero AISI 1020	Subconjunto 2
1	Alimentador de cable	1	Acero AISI 1020	Subconjunto 1
ITEM	DESCRIPCION	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

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

Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN  
DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO  
DE ALAMBRE DE COBRE PURO

Escala  
1:20

Docente asesor:  
Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo  
Manuel Salvador Hernández  
Luis Ramón Vicente López

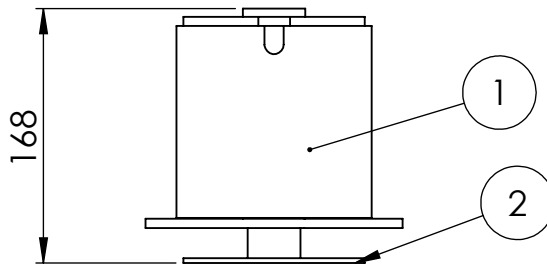
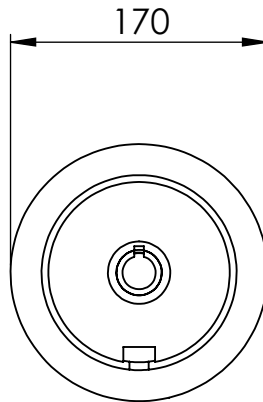
Unidades:  
Milímetros

Nº PLANO:  
A1

Fecha:  
03/09/2016

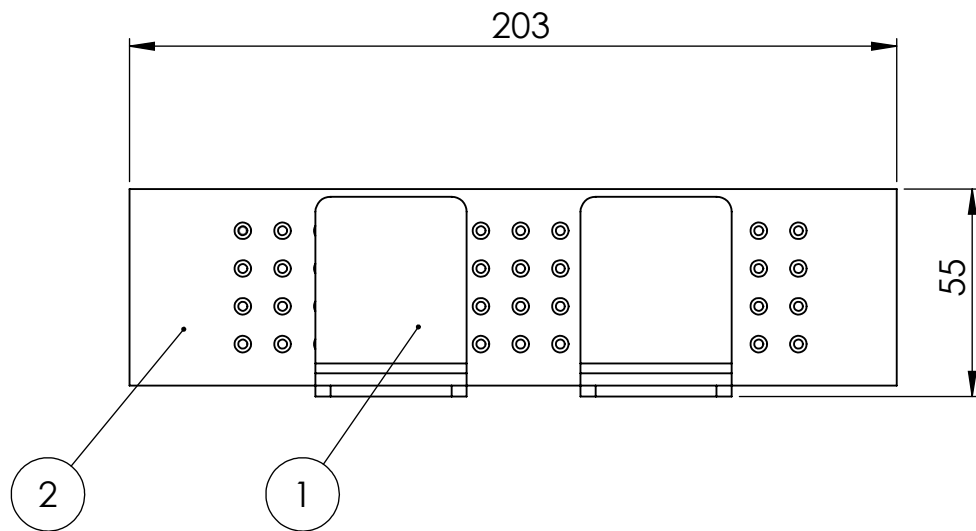
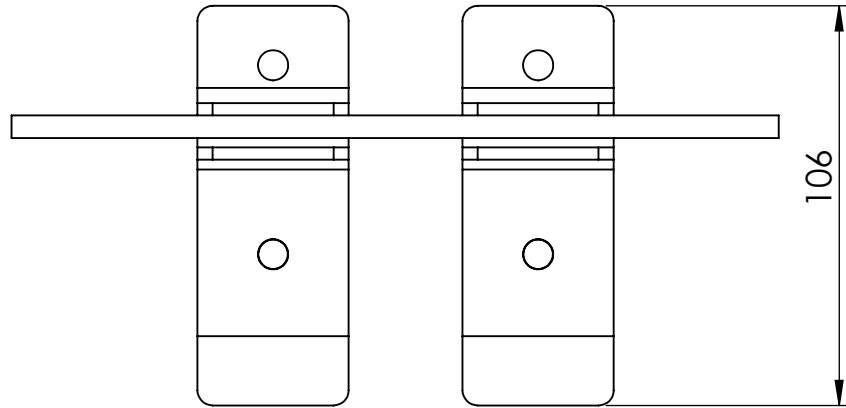
CONJUNTO: BANCO DE TREFILADO



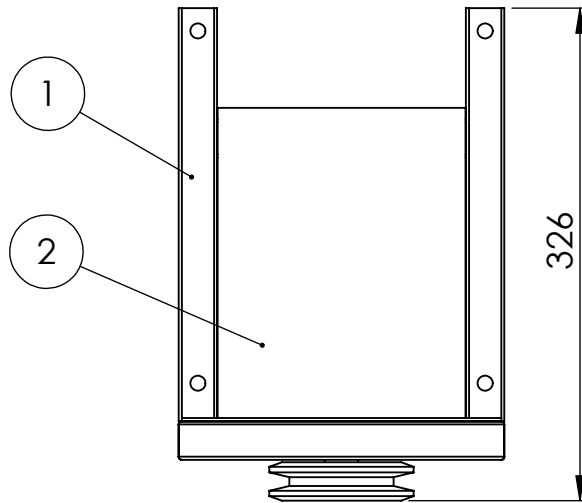
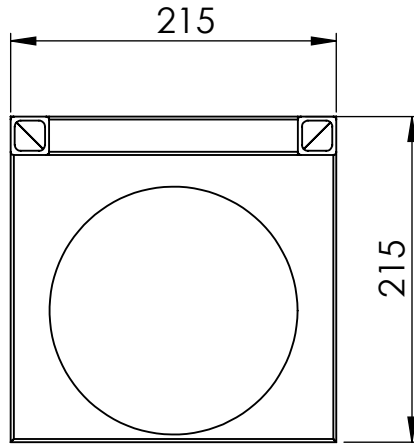


2	Soporte de tambor	1	Acero AISI 1020	
1	Tambor	1	Acero AISI 1045	
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO	
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz			Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo Manuel Salvador Hernández Luis Ramón Vicente López	
Nº PLANO: B1		Fecha: 03/09/2016	SUBCONJUNTO 1: ALIMENTADOR DE ALAMBRE	

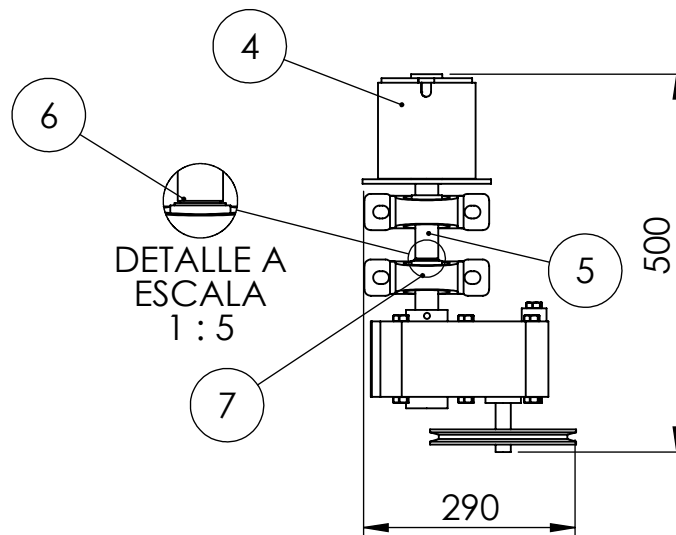
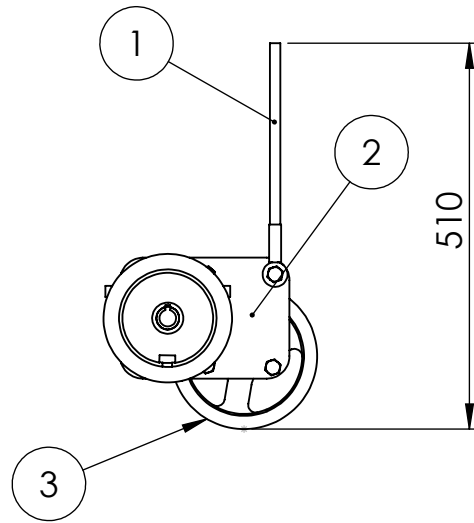




ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
2	Hilera	1	Acero-tungsteno	
1	Soporte de hilera	2	Acero AISI 1020	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO		Escala 1:2
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo Manuel Salvador Hernández Luis Ramón Vicente López		Unidades: Milímetros
Nº PLANO: B2	Fecha: 03/09/2016	SUBCONJUNTO 2: SECCIÓN DE TREFILADO		



2	Motor eléctrico trifásico	1		General Electric 3F 220 V 2HP
1	Soporte de motor	1	Acero AISI 1020	
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO		Escala 1:5
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo Manuel Salvador Hernández Luis Ramón Vicente López		Unidades: Milímetros
Nº PLANO: B3	Fecha: 03/09/2016	SUBCONJUNTO 3: MOTOR ELÉCTRICO		



7	Chumacera	2	Hierro fundido	UCP 206
6	Seguro de ojos	1	Acero AISI 1045	Anillo de 30 mm DIN 471
5	Eje	1	Acero AISI 1020	
4	Tambor	1	Acero AISI 1020	
3	Polea de reductor	1	Hierro fundido	Radio 85 mm
2	Reductor dodge	1	Hierro fundido	Ratio 15.35:1
1	Perno tensor	1	Acero AISI 1020	Rosca unc 1/2"X8
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

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

Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN  
DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO  
DE ALAMBRE DE COBRE PURO

Escala  
1:10

Docente asesor:  
Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

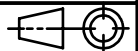
Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo  
Manuel Salvador Hernández  
Luis Ramón Vicente López

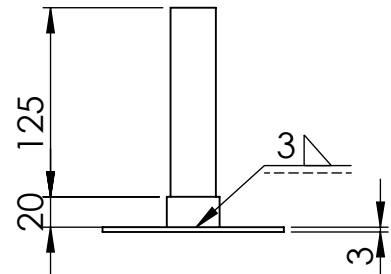
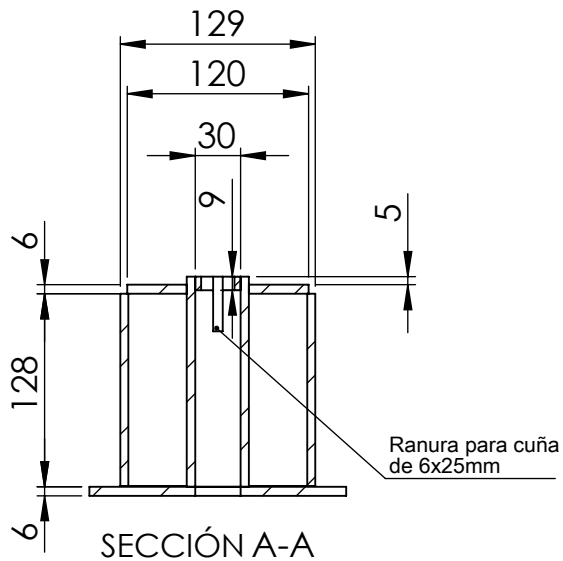
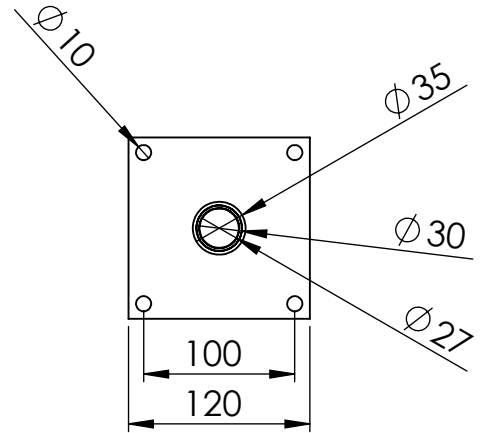
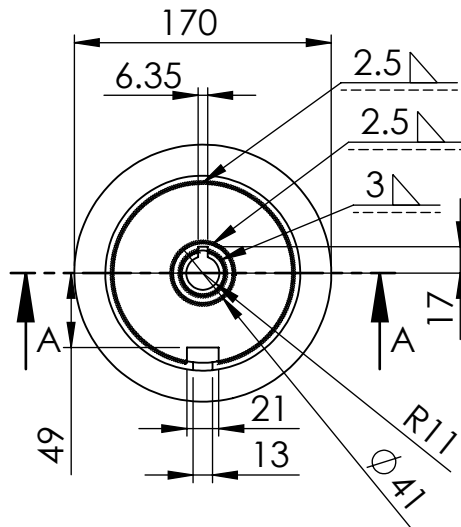
Unidades:  
Milímetros

Nº PLANO:  
B4

Fecha:  
03/09/2016

SUBCONJUNTO 4: TREN DE POTENCIA



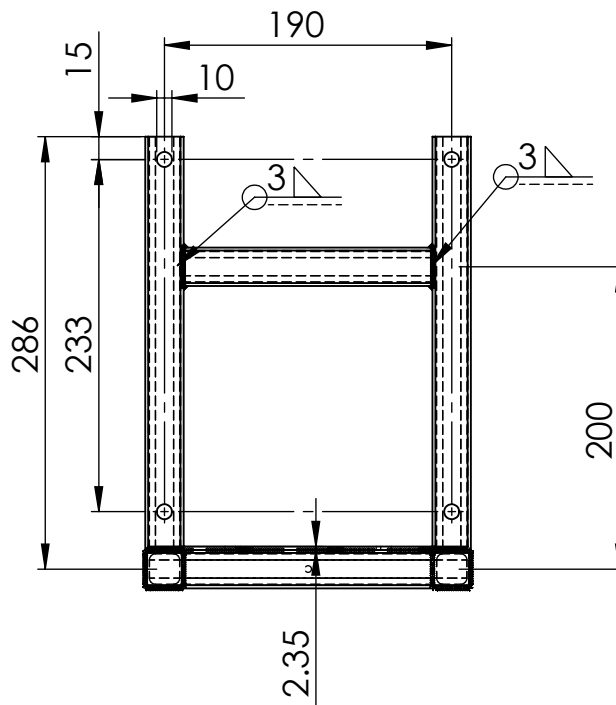
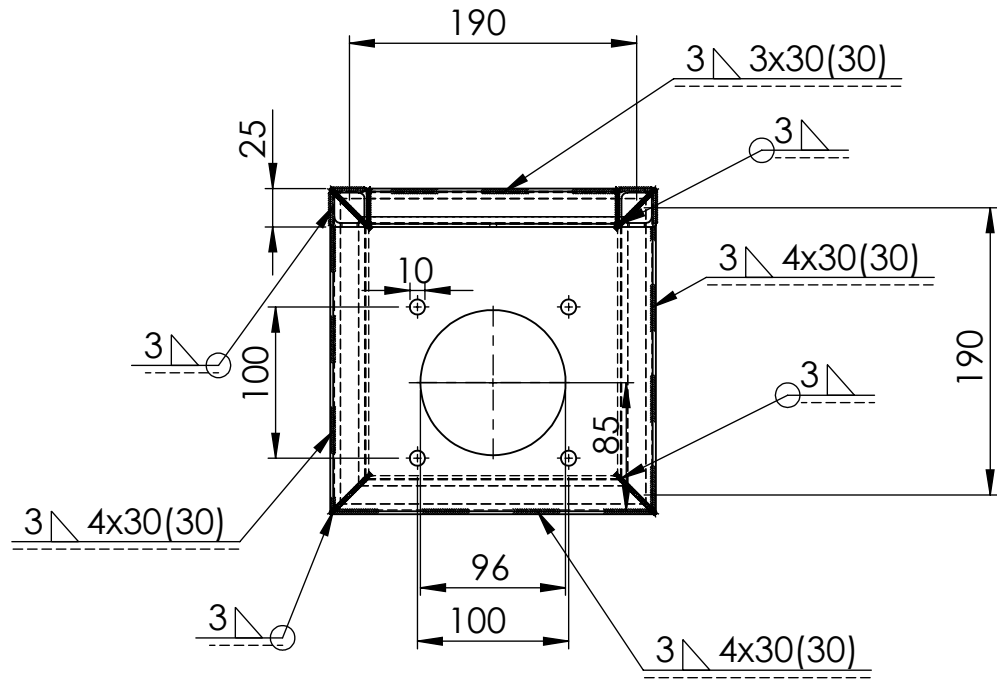


Detalle 3.1: Tambor

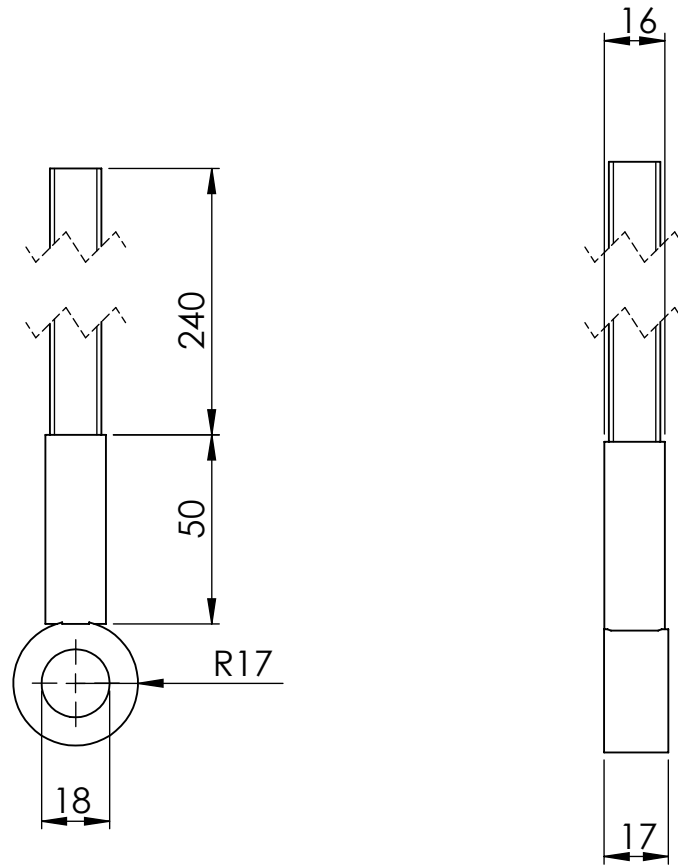
Detalle 3.2: Soporte de tambor

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO	Escala 1:5
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo Manuel Salvador Hernández Luis Ramón Vicente López	Unidades: Milímetros
Nº PLANO: C1	Fecha: 03/09/2016	DETALLE 1.1: TAMBOR DETALLE 1.2: SOPORTE DE TAMBOR	

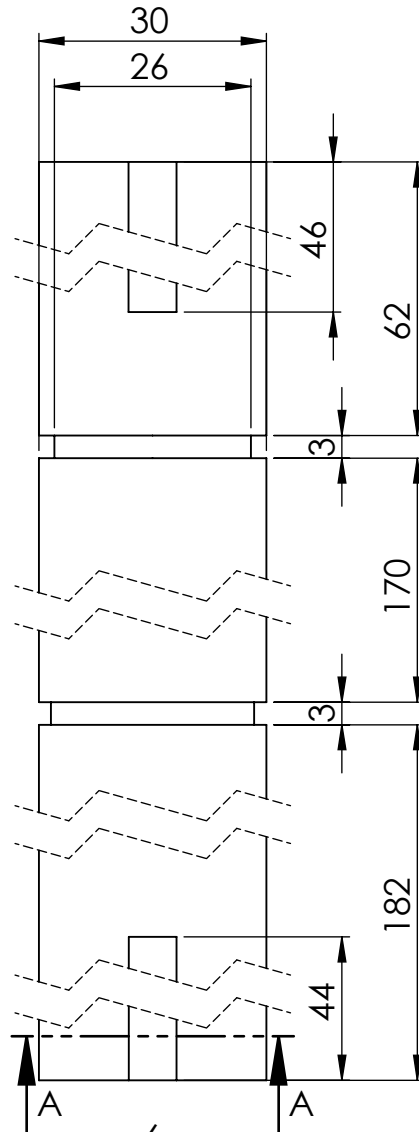




UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO	Escala 1:5
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo Manuel Salvador Hernández Luis Ramón Vicente López	Unidades: Milímetros
Nº PLANO: C3	Fecha: 03/09/2016	DETALLE 3.1: SOPORTE DE MOTOR	



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO	Escala 1:2
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo Manuel Salvador Hernández Luis Ramón Vicente López	Unidades: Milímetros
Nº PLANO: C4	Fecha: 03/09/2016	DETALLE 4.1: TENSOR	



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Trabajo de graduación: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PURO	Escala 1:2
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		Presentado por: Luana Patricia Aguilar Portillo Manuel Salvador Hernández Luis Ramón Vicente López	Unidades: Milímetros
Nº PLANO: C5	Fecha: 03/09/2016	DETALLE 4.2: EJE DE TAMBOR	