



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**AUTORES: JUAN GUACHAMÍN, GABRIEL BETANCOURT**

**TEMA: 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**

**DIRECTOR: ING. XAVIER SÁNCHEZ**

**CODIRECTOR: ING. EMILIO TUMIPAMBA**

**SANGOLQUÍ, ENERO 2014**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

**El proyecto “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” fue realizado en su totalidad por los señores Luis Gabriel Betancourt Aza y Juan Pedro Guachamín Torres, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.**

---

**Ing. Xavier Sánchez.**

**DIRECTOR**

---

**Ing. Emilio Tumipamba**

**CODIRECTOR**

**Sangolquí, 2014-01-02**

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros: BETANCOURT AZA LUIS GABRIEL, GUACHAMÍN  
TORRES JUAN PEDRO

DECLARAMOS QUE:

La tesis / proyecto de grado titulado “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”. Ha sido desarrollado con base a una investigación responsable, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en los párrafos correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis / proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 07 de Enero del 2014

---

Gabriel Betancourt  
C.I. 172102627-4

---

Juan Guachamín  
C.I. 172066369-7

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, Betancourt Aza Luis Gabriel,  
Guachamín Torres Juan Pedro

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado “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”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 02 de Enero de 2014

---

Gabriel Betancourt

---

Juan Guachamín

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“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”**

**ELABORADO POR:**

---

**Luis Gabriel Betancourt A.**

---

**Juan Pedro Guachamín T.**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

**Ing. Ángelo Villavicencio**  
**DIRECTOR DE LA CARRERA**

**Sangolquí, 2014-01**

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi madre Rosa y a mis tías Loly y Beatriz, por todo el apoyo que me han proporcionado de forma desinteresada durante todo este tiempo, y por todos los consejos que me han brindado en los momentos más difíciles de mi carrera.

**Luis Gabriel Betancourt A.**

Este trabajo se lo dedico a mi madre Gloria, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. A mi padre Rodrigo que hizo todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba.

En especial dedico este trabajo a mi esposa Mireya, que ha sido el impulso durante toda mi carrera, que con su apoyo constante y amor incondicional me inspiró a ser mejor para ella.

**Juan Pedro Guachamín T.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi amigo Juan por el apoyo y soportarme durante todo el tiempo que duro el proyecto, también a mi padre Luis, a mi tío Héctor, a los Ingenieros Sánchez y Ojeda por todo los consejos que me brindaron durante la construcción de este proyecto y sobre todo agradezco a mi madre y tías por su apoyo que me proporcionaron durante toda mi vida.

**Luis Gabriel Betancourt A.**

Agradezco a mis padres por darme la vida y ser un apoyo fundamental para culminar la Carrera de Ingeniería Mecánica, a mi amigo Luis por confiar en mí y por todo el apoyo brindado durante este proyecto, también agradezco a los Ingenieros Galo Andino, Jorge Zapata y Víctor Badillo por los consejos brindados para este proyecto.

**Juan Pedro Guachamín T.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |           |
|---|-----------|
| CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....      | I         |
| A U T O R I Z A C I Ó N.....                            | III       |
| LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....                          | IV        |
| DEDICATORIA .....                                       | V         |
| AGRADECIMIENTO .....                                    | VI        |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS .....                              | VII       |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                  | XII       |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                  | XV        |
| ABREVIATURAS .....                                      | XVIII     |
| ÍNDICE DE ANEXOS.....                                   | XIX       |
| RESUMEN.....  | XX        |
| ABSTRACT.....   | XXI       |
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....                                 | <b>1</b>  |
| GENERALIDADES .....                                     | 1         |
| 1.1 ANTECEDENTES .....                                  | 1         |
| 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA O NECESIDAD .....           | 2         |
| 1.3 ALCANCE DEL PROYECTO .....                          | 2         |
| 1.4 OBJETIVOS .....                                     | 2         |
| 1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....                             | 2         |
| 1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....                       | 2         |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN .....                                 | 3         |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....                                 | <b>4</b>  |
| FUNDAMENTO TEÓRICO .....                                | 4         |
| 2.1 PROCESO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA.....             | 4         |
| 2.2 TRABAJO EN FRÍO .....                               | 4         |
| 2.2.1 VENTAJAS DEL TRABAJO EN FRÍO.....                 | 5         |
| 2.2.2 DESVENTAJAS DEL TRABAJO EN FRÍO.....              | 5         |
| 2.2.3 FUNDAMENTOS DEL CONFORMADO DE LOS MATERIALES..... | 6         |
| 2.3 EFECTOS DEL TRABAJO EN FRÍO .....                   | 13        |
| 2.3.1 EFECTOS DE DEFORMACIÓN.....                       | 13        |
| 2.3.2 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN .....              | 13        |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....                                 | <b>15</b> |
| TREFILADO.....  | 15        |
| 3.1 DEFINICIÓN DE TREFILADO O ESTIRADO.....             | 15        |
| 3.2 TIPOS DE TREFILADO.....                             | 15        |
| 3.2.1 POR EL PROCESO .....                              | 16        |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.2 | POR EL LUBRICANTE UTILIZADO.....   | 17 |
| 3.3   | FASES DEL PROCESO DE TREFILADO.....  | 17 |
| 3.3.1 | LIMPIEZA.....  | 17 |
| 3.3.2 | AFILADO.....   | 17 |
| 3.3.3 | RECOCIDO.....  | 18 |
| 3.3.4 | APLICACIÓN DEL LUBRICANTE.....   | 19 |
| 3.3.5 | MECANIZADO EN FRÍO.....  | 19 |
| 3.4   | EQUIPO DE TREFILADO.....   | 20 |
| 3.4.1 | MESA TREFILADO.....  | 20 |
| 3.4.2 | BASTIDOR DE LA HILERA O DE TROQUELES.....  | 20 |
| 3.4.3 | CORREDERA O ARMAZON DE SALIDA.....   | 21 |
| 3.4.4 | HILERA O DADO.....   | 21 |
| 3.4.5 | TEMPERATURA EN EL PROCESO DE TREFILACIÓN.....  | 23 |
| 3.5   | MATERIA PRIMA.....   | 24 |
| 3.6   | APLICACIONES.....  | 25 |
|       | CAPÍTULO 4.....  | 26 |
|       | ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....  | 26 |
| 4.1   | FACTORES RELEVANTES PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....   | 26 |
| 4.2   | MATERIA PRIMA PARA LA TREFILACIÓN.....   | 27 |
| 4.2.1 | ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLES.....   | 27 |
| 4.2.2 | SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....   | 32 |
| 4.3   | MATERIAL DEL DADO DE TREFILADO.....  | 34 |
| 4.3.1 | ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLES.....   | 35 |
| 4.3.2 | SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....   | 39 |
| 4.4   | LUBRICANTE PARA EL PROCESO DE TREFILACIÓN.....   | 40 |
| 4.4.1 | ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS POSIBLES.....   | 40 |
| 4.4.2 | ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLE.....  | 41 |
| 4.5   | MECANISMO DE SUJECIÓN DEL MATERIAL HACER TREFILADO.....  | 42 |
| 4.5.1 | ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLES.....   | 42 |
| 4.5.2 | SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....   | 46 |
| 4.6   | SISTEMA MOTRIZ PARA LA EXTRACCIÓN DEL MATERIAL.....  | 47 |
| 4.6.1 | ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLES.....   | 48 |
| 4.6.2 | SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....   | 52 |
| 4.7   | MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MESA Y DEMÁS..... PARTES QUE CONFORMAN EL EQUIPO DE TREFILADO..... | 53 |
| 4.7.1 | PROPIEDADES ACERO ASTM A36.....  | 53 |

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 4.7.2 | FORMAS DE ACERO ASTM A36 .....  | 54        |
| 4.7.3 | MÉTODO DE UNIÓN .....   | 54        |
| 4.8   | ELECTRODO A USARSE EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA MESA Y.<br>DEMÁS PARTES QUE CONFORMAN EL EQUIPO DE TREFILADO..<br>..... | 55        |
| 4.8.1 | PROPIEDADES DEL ELECTRODO E 7018 .....  | 55        |
| 4.9   | BOMBAS PARA LUBRICACIÓN Y REFRIGERACIÓN.....  | 55        |
| 4.9.1 | BOMBA DE LUBRICACIÓN .....  | 55        |
| 4.9.2 | BOMBA DE REFRIGERACIÓN.....   | 57        |
|       | <b>CAPÍTULO 5</b> .....   | <b>58</b> |
|       | <b>DISEÑO DEL EQUIPO DE TREFILADO</b> .....   | <b>58</b> |
| 5.1   | DISEÑO HILERA DE TREFILADO.....   | 58        |
| 5.1.1 | DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO.....   | 58        |
| 5.1.2 | SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL DADO .....  | 60        |
| 5.1.3 | CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL DADO   | 63        |
| 5.2   | CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE IMPORTANCIA EN EL.....<br>TREFILADO .....  | 66        |
| 5.2.1 | CÁLCULO DEL ÁREA INICIAL Y FINAL.....   | 66        |
| 5.2.2 | CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE TRABAJO EN FRÍO.....  | 67        |
| 5.2.3 | CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN REAL DEL MATERIAL ( $\epsilon$ ),.....<br>(GROVER, 2007). .....                           | 67        |
| 5.2.4 | CÁLCULO DEL ESFUERZO DE FLUENCIA PROMEDIO (YF) .....  | 68        |
| 5.2.5 | CÁLCULO FACTOR PARA LA DEFORMACIÓN NO HOMOGÉNEA ...<br>( $\phi$ ), (GROVER, 2007).....                              | 68        |
| 5.2.6 | CÁLCULO DE LA LONGITUD DE CONTACTO (LC), (GROVER, .....   | 68        |
|       | 2007).....  | 68        |
| 5.2.7 | CÁLCULO DEL DIÁMETRO PROMEDIO (D), (GROVER, 2007). ....   | 68        |
| 5.2.8 | CÁLCULO DE LA TENSION QUE SE PRODUCE EN EL TREFILADO<br>.....   | 69        |
| 5.3   | CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR.....   | 71        |
| 5.4   | DISEÑO DEL BASTIDOR .....   | 74        |
| 5.4.1 | DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO .....  | 75        |
| 5.4.2 | CÁLCULO EN DETALLE.....   | 76        |
| 5.5   | DISEÑO DE LA CAJA PORTA HILERAS.....  | 88        |
| 5.5.1 | DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO.....   | 88        |
| 5.5.2 | CÁLCULO EN DETALLE.....   | 89        |
| 5.6   | DISEÑO SISTEMA MOTRIZ POR WINCHE ELÉCTRICO.....   | 91        |
| 5.6.1 | CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EJE DEL WINCHE.....   | 91        |
| 5.6.2 | CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL TUBO.....   | 95        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.6.3 | CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LA JUNTA POR SOLDADURA .<br>EN EL WINCHE ..... | 98  |
| 5.6.4 | CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL CABLE .....  | 100 |
| 5.6.5 | DISEÑO ACOPLE EJE MOTOR Y CARRETE .....                                     | 103 |
| 5.6.6 | SELECCIÓN DE LA CHUMACERA .....   | 106 |
| 5.7   | SISTEMA DE EXTRACCIÓN .....   | 108 |
| 5.7.1 | DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....  | 108 |
| 5.7.2 | DIMENSIONAMIENTO SISTEMA DE EXTRACCIÓN.....                                 | 109 |
| 5.7.3 | CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL CÁNCAMO .....                           | 110 |
| 5.8   | DISEÑO DE LA MESA PARA EL EQUIPO DE TREFILADO .....                         | 113 |
| 5.8.1 | DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO.....   | 113 |
| 5.8.2 | CARGAS .....  | 114 |
| 5.8.3 | CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL ESPESOR DE LA ....<br>PLACA BASE .....  | 115 |
| 5.8.4 | CÁLCULO FACTOR DE SEGURIDAD Y DIMENSIONES DEL .....                         | 118 |
| 5.8.5 | CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA SOLDADURA .....                       | 120 |
| 5.8.6 | CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA SOLDADURA .....                       | 122 |
|       | CAPÍTULO 6 .....  | 125 |
|       | CONSTRUCCIÓN, FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS .....                             | 125 |
| 6.1   | CONSTRUCCIÓN .....  | 125 |
| 6.1.1 | PLANOS EQUIPO DE TREFILADO.....   | 125 |
| 6.1.2 | HOJAS DE PROCESOS .....   | 125 |
| 6.1.3 | HOJAS DE MONTAJE .....  | 125 |
| 6.2   | FUNCIONAMIENTO.....   | 126 |
| 6.2.1 | CARACTERÍSTICAS.....  | 126 |
| 6.2.2 | MANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....                                 | 131 |
| 6.3   | PRÁCTICAS DE LABORATORIO .....  | 131 |
| 6.4   | SIMULACIÓN BARRA DE TREFILADO.....  | 131 |
| 6.5   | PRUEBAS .....   | 131 |
| 6.5.1 | PRUEBA DE TREFILACIÓN A VARIAS VELOCIDADES .....                            | 131 |
| 6.5.2 | FOTOS PRUEBAS MÁQUINA .....   | 132 |
| 6.6   | RESULTADOS.....   | 133 |
| 6.6.1 | PRUEBA DE TREFILACIÓN A VARIAS VELOCIDADES .....                            | 133 |
| 6.6.2 | ENSAYO DE TRACCIÓN A BARRAS TREFILADAS.....                                 | 135 |
| 6.6.3 | ENSAYO DE DUREZA A BARRAS TREFILADAS.....                                   | 137 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.6.4 ENSAYO DE ANÁLISIS METALOGRAFICO A BARRAS ..... |     |
| TREFILADAS .....                                      | 138 |
| <b>CAPÍTULO 7</b> .....                               | 140 |
| ANÁLISIS ECONÓMICO .....                              | 140 |
| 7.1 COSTOS DE PRODUCCIÓN.....                         | 140 |
| 7.1.1 COSTOS DIRECTOS.....                            | 140 |
| 7.1.2 COSTOS INDIRECTOS .....                         | 143 |
| 7.1.3 COSTO TOTAL .....                               | 144 |
| <b>CAPÍTULO 8</b> .....                               | 145 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                  | 145 |
| 8.1 CONCLUSIONES.....                                 | 145 |
| 8.2 RECOMENDACIONES .....                             | 146 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                     | 148 |
| ANEXOS.....   | 149 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2. 1 Rangos de temperaturas para el conformado .....   | 5  |
| Tabla 2. 2 Valores típicos del coeficiente de resistencia K y exponente de .....<br>endurecimiento por deformación n, (Schey, 2002). ..... | 7  |
| Tabla 2. 3 Lubricantes comunes y coeficientes de fricción .....  | 11 |
| Tabla 2. 4 Temperaturas comunes del conformado de metales, (Callister, .....<br>2002).....   | 12 |
| Tabla 3. 1 Características del recocido aplicado al Aluminio (P, Poner año)...<br>.....  | 18 |
| Tabla 3. 2 Características del recocido aplicado al Cobre .....  | 19 |
| Tabla 3. 3 Campos de aplicación de alambres y varillas trefiladas.....   | 25 |
| Tabla 4. 1 Propiedades del Cobre al 99,90% .....   | 28 |
| Tabla 4. 2 Propiedades del Aluminio Comercial .....  | 29 |
| Tabla 4. 3 Propiedades generales del Latón .....   | 31 |
| Tabla 4. 4 Costo y Fuerza de Barras a Trefilar .....   | 32 |
| Tabla 4. 5 Factores de ponderación de los criterios de selección.....  | 32 |
| Tabla 4. 6 Selección de la materia para trefilar .....   | 33 |
| Tabla 4. 7 Propiedades C110 .....  | 33 |
| Tabla 4. 8 Propiedades Al 5052.....  | 34 |
| Tabla 4. 9 Propiedades C110 O.....   | 34 |
| Tabla 4. 10 Propiedades generales del Carburo de Tungsteno.....  | 35 |
| Tabla 4. 11 Propiedades generales del Diamante Policristalino .....  | 37 |
| Tabla 4. 12 Composición química del acero K-100.....   | 38 |
| Tabla 4. 13 Propiedades físicas del acero K-100.....   | 39 |
| Tabla 4. 14 Factores de ponderación de los criterios de selección.....   | 39 |
| Tabla 4. 15 Selección Material del dado .....  | 39 |
| Tabla 4. 16 Propiedades de Mobilith SHC™ 007.....  | 40 |
| Tabla 4. 17 Propiedades de Aceite ISO 32.....  | 41 |
| Tabla 4. 18 Factores de ponderación de los criterios de selección.....   | 41 |
| Tabla 4. 19 Selección del lubricante para trefilar .....   | 42 |
| Tabla 4. 20 Factores de ponderación de los criterios de selección.....   | 47 |
| Tabla 4. 21 Selección Mecanismo de sujeción de las barras a ser trefiladas ..<br>.....   | 47 |
| Tabla 4. 22 Factores de ponderación de los criterios de selección.....   | 52 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4. 23 Selección del sistema motriz.....                                 | 52  |
| Tabla 4. 24 Propiedades Mecánicas de los Materiales a Utilizar .....          | 53  |
| Tabla 4. 25 Propiedades Mecánicas E 7018 y E6011 .....                        | 55  |
| Tabla 4. 26 Propiedades de bomba sumergible 40W .....                         | 57  |
| Tabla 5. 1 Tamaño del ángulo de reducción para diferentes materiales.....     | 61  |
| Tabla 5. 2 Parámetros de la geometría del dado .....                          | 62  |
| Tabla 5. 3 Parámetros de la geometría del dado .....                          | 64  |
| Tabla 5. 4 Fuerza de Trefilado y % de deformación .....                       | 71  |
| Tabla 5. 5 Velocidades de trefilado .....                                     | 71  |
| Tabla 5. 6 Factores de servicio para selección de motor-reductores.....       | 72  |
| Tabla 5. 7 Parámetros de motor reductores marca Transtecno.....               | 73  |
| Tabla 5. 8 Factores de Seguridad.....   | 74  |
| Tabla 5. 9 Valor para Placa Empotrada .....                                   | 78  |
| Tabla 5. 10 Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino...     | 79  |
| Tabla 5. 11 Propiedades Mecánicas del perno .....                             | 80  |
| Tabla 5. 12 Tamaños estándar de pernos en milímetros .....                    | 81  |
| Tabla 5. 13 Factores del par de torsión K.....                                | 81  |
| Tabla 5. 14 Parámetros de la rigidez para varios materiales .....             | 84  |
| Tabla 5. 15 Tamaño mínimo de soldadura de filete, h .....                     | 86  |
| Tabla 5. 16 Iteraciones eje del carrete.....                                  | 95  |
| Tabla 5. 17 Iteraciones Tubo winche .....                                     | 98  |
| Tabla 5. 18 Tipos de cable de acero.....                                      | 100 |
| Tabla 5. 19 Factores de diseño para cables de acero .....                     | 101 |
| Tabla 5. 20 Propiedades del cable de acero 6X19 .....                         | 102 |
| Tabla 5. 21 Dimensiones y clasificaciones de carga para cojinetes de bola.... | 108 |
| Tabla 5. 22 Dimensiones cáncamo .....   | 110 |
| Tabla 5. 23 Coeficientes $W_i$ y $W_o$ para roscas estándar .....             | 112 |
| Tabla 5. 24 Carga a ser aplicada en la mesa .....                             | 115 |
| Tabla 5. 25 Propiedades y dimensiones placa base .....                        | 116 |
| Tabla 5. 26 Iteraciones espesor placa base .....                              | 117 |
| Tabla 5. 27 Propiedades y dimensiones para tubos cuadrados .....              | 119 |
| Tabla 5. 28 Iteraciones cuadro superior mesa .....                            | 120 |
| Tabla 6. 1 Velocidades para trefilar aluminio y cobre recocido.....           | 132 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 6. 2 Resultado de barras de aluminio trefiladas .....       | 133 |
| Tabla 6. 3 Resultado de barras de cobre recocido trefiladas ..... | 133 |
| Tabla 6. 4 Datos Barras de Cobre Recocido .....                   | 135 |
| Tabla 6. 5 Resultado Ensayo de Tracción Cobre Recocido.....       | 135 |
| Tabla 6. 6 Datos Barras de Aluminio .....                         | 136 |
| Tabla 6. 7 Resultado Ensayo de Tracción Aluminio.....             | 136 |
| Tabla 6. 8 Resultado Ensayo De Dureza Barras de Cu Recocido ..... | 137 |
| Tabla 6. 9 Resultado Ensayo de Dureza de Barras de Aluminio ..... | 137 |
| Tabla 6. 10 Análisis de Microfotografías del cobre recocido.....  | 138 |
| Tabla 6. 11 Análisis de Microfotografías del Aluminio.....        | 139 |
| Tabla 7. 1 Costos de materiales del Equipo de Trefilado.....      | 140 |
| Tabla 7. 2 Costos de mano de obra del Equipo de Trefilado .....   | 143 |
| Tabla 7. 3 Costo total de acabados .....                          | 143 |
| Tabla 7. 4 Costo total de uso de taller .....                     | 144 |
| Tabla 7. 5 Costo de transporte.....                               | 144 |
| Tabla 7. 6 Costo total.....                                       | 144 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2. 1 Procesos de deformación volumétrica, (Grover, 2007).....  | 4  |
| Figura 2. 2 Diagrama esfuerzo de formación para un material dúctil, (Gere,...<br>2008).....                             | 6  |
| Figura 2. 3 Porcentaje de trabajo en frío sobre la resistencia a la tracción y...<br>límite elástico (Smith, 1998)..... | 9  |
| Figura 2. 4 Coeficiente de fricción ( $\mu$ ) .....   | 9  |
| Figura 2. 5 Ejemplo de dislocación una red cristalina .....   | 14 |
| Figura 3. 1 Proceso de Trefilado o estirado .....   | 15 |
| Figura 3. 2 Proceso de Trefilado Simple, (Kalpakjian, 2002). .....  | 16 |
| Figura 3. 3 Proceso de Trefilado Continúo .....   | 16 |
| Figura 3. 4 Equipo de trefilado o estirado .....  | 20 |
| Figura 3. 5 Partes de hilera de trefilado .....   | 21 |
| Figura 3. 6 Temperaturas en el dado de trefilación.....   | 24 |
| Figura 4. 1 Varios productos de cobre .....   | 28 |
| Figura 4. 2 Varios productos de aluminio.....   | 30 |
| Figura 4. 3 Acoples de tuberías .....   | 31 |
| Figura 4. 4 Dados de Carburo de Tungsteno.....  | 36 |
| Figura 4. 5 Dados de Diamante Policristalino .....  | 37 |
| Figura 4. 6 Dado en Acero K-100 .....   | 38 |
| Figura 4. 7 Mandril porta-barras.....   | 43 |
| Figura 4. 8 Sujeción mediante tornillo.....   | 44 |
| Figura 4. 9 Soldadura por barras de cobre .....   | 45 |
| Figura 4. 10 Soldadura por barras de cobre .....  | 45 |
| Figura 4. 11 Soldadura por barras de cobre .....  | 46 |
| Figura 4. 12 Winche eléctrico .....   | 48 |
| Figura 4. 13 Tornillo de potencia.....  | 49 |
| Figura 4. 14 Cadena de dientes invertidos .....   | 50 |
| Figura 4. 15 Perfiles Acero ASTM A36 .....  | 54 |
| Figura 4. 16 Soldadura SMAW .....   | 54 |
| Figura 4. 17 Esquema de ubicación de la bomba .....   | 56 |
| Figura 4. 18 Bomba 40W .....  | 57 |
| Figura 5. 1 Dado de trefilado .....   | 58 |
| Figura 5. 2 Diagrama de revenido.....   | 59 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5. 3 Parámetros que controlan el dado .....  | 60  |
| Figura 5. 4 variables del trefilado .....   | 66  |
| Figura 5. 5 Eficiencia de deformación .....   | 70  |
| Figura 5. 6 Bastidor.....   | 75  |
| Figura 5. 7 Diagrama de distribución de carga .....   | 76  |
| Figura 5. 8 Esquema de la plancha de acero .....  | 76  |
| Figura 5. 9 Esquema de un perno.....  | 82  |
| Figura 5. 10 Propiedades flexionantes de las soldaduras de filete (Budynas, .<br>2012)..... | 85  |
| Figura 5. 11 Caja porta hileras.....  | 88  |
| Figura 5. 12 Esquema Winche.....  | 91  |
| Figura 5. 13 Esquema Eje .....  | 91  |
| Figura 5. 14 Diágrama de momento Eje .....  | 93  |
| Figura 5. 15 Esquema carrete.....   | 96  |
| Figura 5. 16 Diágrama de momento tubo .....   | 96  |
| Figura 5. 17 Esquema de las soldaduras en el carrete.....                                   | 99  |
| Figura 5. 18 Fuerza aplicada en el eje.....   | 103 |
| Figura 5. 19 Acople.....  | 106 |
| Figura 5. 20 Esquema Guía de extracción.....  | 109 |
| Figura 5. 21 Sistema de extracción de las barras .....                                      | 109 |
| Figura 5. 22 Área de la raíz de un filete de un perno sometida a cortante. ....             | 111 |
| Figura 5. 23 Esquema Mesa .....   | 114 |
| Figura 5. 24 Cortante y momentos con carga distribuida de la placa .....                    | 115 |
| Figura 5. 25 Diagramas de cortante y momento .....  | 118 |
| Figura 5. 26 Soldaduras para la mesa de trefilado .....                                     | 121 |
| Figura 6. 1 Máquina de trefilación.....   | 127 |
| Figura 6. 2 Motorreductor .....   | 128 |
| Figura 6. 3 Panel de control.....   | 128 |
| Figura 6. 4 Figura 6.4 Winche.....  | 129 |
| Figura 6. 5 Bastidor.....   | 129 |
| Figura 6. 6 Sistema de extracción.....  | 130 |
| Figura 6. 7 Depósitos de lubricación y refrigeración .....                                  | 130 |
| Figura 6. 8 Prueba de Velocidades.....  | 132 |
| Figura 6. 9 Gráfica Esfuerzo – Deformación Barras de Cobre.....                             | 135 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6. 10 Gráfica Esfuerzo – Deformación Barras de Aluminio.....                               | 136 |
| Figura 6. 11 Estructura de grano del cobre recocido, producido por el trabajo en frío (100x)..... | 138 |
| Figura 6. 12 Estructura de grano del aluminio, producido por el trabajo en frío (100x).....       | 139 |

## ABREVIATURAS

- $\beta$  → Ángulo de salida
- $\alpha$  → Ángulo de reducción
- $a$  → Diámetro del núcleo
- $h_1$  → Campana
- $z$  → Aproximación
- $b$  → Altura del núcleo
- $D$  → Diámetro de la encajadura
- $H$  → Altura de la encajadura
- $\Delta$  → Parámetro delta
- $r$  → Reducción por paso
- $P$  → Presión del dado
- $\bar{Y}_f$  → Esfuerzo de fluencia promedio
- $S_{utK100}$  → Resistencia última a la tensión del K100
- $F_{est}$  → Fuerza de estirado
- $\sigma_d$  → Esfuerzo que se produce durante la trefilación
- $\emptyset$  → Factor de deformación no homogénea
- $L_c$  → Longitud de contacto
- $\sigma_g$  → Esfuerzo debido al cambio de forma geométrica
- $\sigma_f$  → Esfuerzo debido a la fricción
- $\sigma_c$  → Esfuerzo debido al cizallamiento no uniforme
- $F$  → Fuerza de trefilado
- $P$  → Potencia
- $V$  → Velocidad
- $\tau_{adm}$  → Tensión máxima admisible
- $F_p$  → Resistencia del perno
- $S_p$  → Resistencia de prueba mínima
- $F_i$  → Precarga del perno
- $F_b$  → Carga resultante sobre el perno
- $\tau'$  → Cortante primario
- $\tau''$  → Cortante secundario

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Planos del equipo de trefilado

Anexo B: Planos Eléctricos

Anexo C: Hojas de procesos

Anexo D: Hojas de montaje

Anexo E: Manuales de operación y mantenimiento

Anexo F: Prácticas de Laboratorio

Anexo G: Simulación Barra de trefilado

## Resumen

En la actualidad la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, cuenta con laboratorios de calidad, como el Laboratorio de Procesos de Manufactura, en el cual se realizan prácticas académicas en los procesos de: soldadura, mecanizado, conformado y prototipado. Y debido al acelerado avance tecnológico, obliga a que la preparación de los estudiantes sea cada vez más integral, razón por la que la carrera de Ingeniería Mecánica plantea diseñar y construir un equipo de trefilado de materiales no ferrosos para mejorar la formación profesional de los estudiantes, y así reforzar de una forma práctica los conocimientos adquiridos teóricamente, el equipo realiza el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos, reduciendo la sección transversal de una barra, al tirar del material al introducirlo en un dado o hilera. Los materiales a utilizados son: Cobre electrolítico 99,90% y Aluminio Prodax y para comprobar el proceso de trefilado se realizó ensayos destructivos a las barras obtenidas en el proceso. Al realizar el diseño y construcción del equipo de trefilado, se obtuvo una eficiencia mecánica del 65%. Los beneficiarios son los estudiantes universitarios del DECEM, los cuales podrán obtener un mejor conocimiento realizando prácticas en este Equipo de Trefilado.

Palabras clave: Trefilado de barras, eficiencia mecánica, ensayos destructivos, deformación volumétrica, tracción.

## **Abstract**

Today the University of Armed Forces - ESPE has quality laboratories such as Manufacturing Processes Laboratory, in which academic practices are performed in the following processes: welding, machining, forming and prototyping. And due to the increase technological progress requires the preparation of students increasingly integral, reason the Engineering Mechanics presents design and build a wire drawing equipment of nonferrous materials to enhance the training of students and thus reinforce a practical way foreground theoretically, the cold wire drawing equipment of nonferrous metals, reducing the cross section of a bar, pulling the material when introduced into a given row or. The materials used are: 99.90% electrolytic copper and aluminum Prodax and to check the drawing process was performed, we apply destructive testing for the bars obtained in the process. Finished the design and construction of the wire drawing equipment, we get 65% of mechanical efficiency. The beneficiaries are DECEM college students, who may get a better knowledge making practices in the wire drawing equipment.

**Keywords:** Bar drawing, mechanical efficiency, destructive testing, volumetric strain, traction.

# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La Escuela Politécnica del Ejército es una institución de educación superior, que prepara a profesionales y líderes con pensamiento crítico, y conciencia social, de manera que contribuyan eficazmente al mejoramiento de la producción intelectual.

Debido al acelerado avance tecnológico, obliga a que la preparación de los estudiantes sea cada vez más integral, razón por la que el laboratorio de Máquinas y Herramientas (M &H) demanda de un sin número de equipos y herramientas que ayuden a reforzar de una forma práctica los conocimientos adquiridos teóricamente.

Uno de estos procesos es el trefilado, el cual es un proceso de conformación en frío, que permite la reducción de secciones hasta lograr el diámetro requerido, para la obtención de barras, tubos y alambres.

El proceso de trefilado se lo puede realizar desde un simple banco de trefilado para trabajo intermitente, hasta bloques múltiples para operación continua. El trefilado de barras se realiza en una máquina llamada banco de trefilado, que consiste en una mesa de entrada, un bastidor del dado (que contiene el dado de trefilado), la corredera y el armazón de salida. La corredera se usa para halar el material a través del dado de trefilado. Está accionado por cilindros hidráulicos o cadenas movidas por un motor. El bastidor del dado se diseña frecuentemente para contener más de un dado, de manera que se puedan estirar varias barras simultáneamente a través de los respectivos dados.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA O NECESIDAD**

La Escuela Politécnica del Ejército en la actualidad cuenta con laboratorios de calidad, como el Laboratorio de Máquina y Herramientas, en el cual se realizan prácticas académicas de diferentes procesos de Manufactura, a excepción de prácticas de conformado en frío, además en la provincia de pichincha existen pocas empresas que realizan este tipo de proceso, como: Adelca e Ideal Alambrec.

El Laboratorio de Máquinas y Herramientas plantea la necesidad de fabricar diversos equipos de conformado en frío, uno de los equipos propuestos por el Laboratorio es: Diseño y Construcción de un equipo para el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos.

## **1.3 ALCANCE DEL PROYECTO**

Diseñar y construir un equipo de trefilado, para poder realizar prácticas de laboratorio, de esta forma los estudiantes puedan observar y comprender el proceso de trefilado de barras de materiales no ferrosos.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y Construir una trefiladora didáctica de materiales no ferrosos, para ser implementado en el laboratorio de Procesos de Manufactura, y de este modo poder experimentar y observar el proceso de trefilado.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Investigar los diferentes materiales no ferrosos que pueden ser trefilados.

- Investigar la disponibilidad de los materiales y su proceso de fabricación de la hilera para la trefilación.
- Seleccionar la mejor alternativa del sistema de sujeción y sistema motriz, para realizar el diseño básico del equipo de trefilado.
- Investigar el tipo de lubricante para ser implementado en el proceso de trefilado.
- Diseñar y construir los subcomponentes del equipo de trefilado.
- Realizar pruebas mecánicas a las barras antes y después del proceso de trefilado.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

El Laboratorio de Máquinas y Herramientas tiene como misión brindar soporte académico eficiente a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica y comunidad, a más de prestar los mejores servicios, razón por la cual se hace necesaria la continua actualización de los equipos e instrumentos para el laboratorio, que ayuden a la formación profesional de los estudiantes.

Por tal motivo, el enfoque del proyecto es implementar al laboratorio de Máquinas y Herramientas un equipo de trefilado didáctico de materiales no ferrosos, para realizar y observar este proceso de conformado, y de esta forma permitir al estudiante comprender y aplicar los conocimientos teóricos; dándoles una pauta para que en un futuro puedan construir diversos equipos didácticos de los diferentes procesos de manufactura, que en su mayoría no son muy conocidas en el país.

Ya que esto ayuda a entrar en un plan de mejora del laboratorio y a su vez está vinculada con los objetivos estratégicos de la ESPE los cuales son:

- Fortalecer la formación integral de los estudiantes y mejorar la calidad educativa.
- Actualizar la oferta de prestación de servicios para los sectores públicos y privados en las áreas de competencia de la ESPE.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1 PROCESO DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

Estos procesos se caracterizan por el cambio de forma que tiene el material al aplicar una fuerza a través de un dado, la operación básica en deformación volumétrica se ilustra en la Figura 2.1.

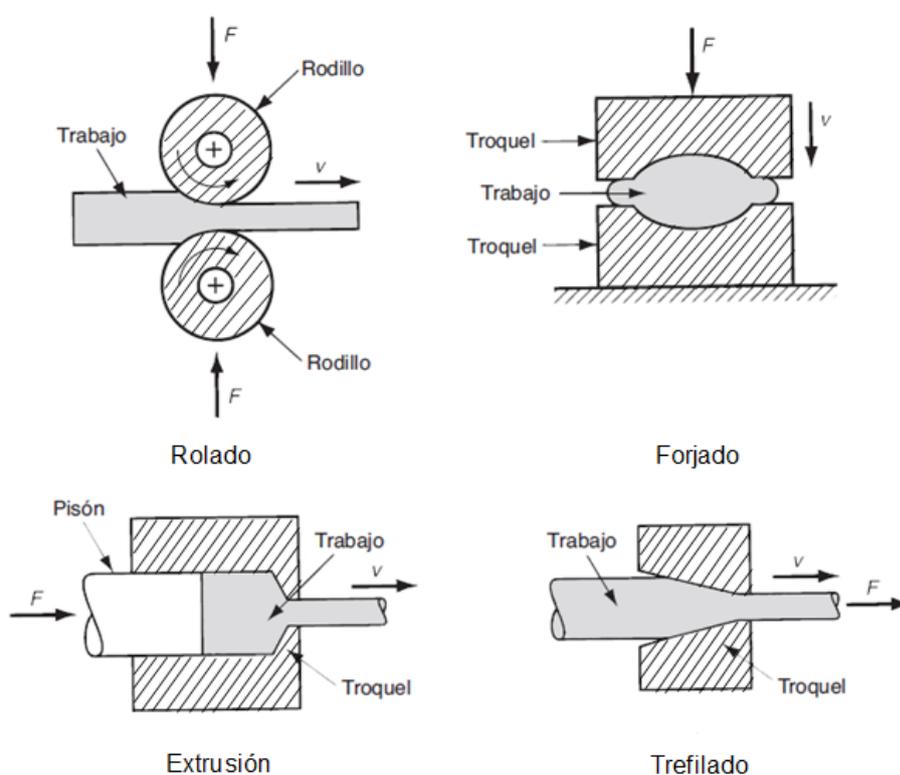


Figura 2. 1 Procesos de deformación volumétrica, (Grover, 2007).

#### 2.2 TRABAJO EN FRÍO

Este proceso también es conocido como formado en frío, es decir, la formación del material se realiza a temperatura ambiente ( $20^{\circ}$ - $25^{\circ}$ C), o ligeramente superior, es decir; Trabajo en frío  $\leq 0.3 T_m$ , en la Tabla 2.1 se muestra los rangos de temperaturas para el conformado.

**Tabla 2. 1 Rangos de temperaturas para el conformado**

| <b>Categoría</b>           | <b>Rango de temperatura</b> |
|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Trabajo en frío</b>     | $\leq 0.3T_m$               |
| <b>Trabajo a 0.3 Tm</b>    | $0.3T_m - 0.5T_m$           |
| <b>Trabajo en caliente</b> | $0.5T_m - 0.75T_m$          |

Fuente: (Grover, 2007).

La temperatura de fusión del material ( $T_m$ ) en °K, es la temperatura a la cual el material pasa de estado sólido a estado líquido, es decir se funde. Cabe destacar que el cambio de fase ocurre a temperatura constante.

### 2.2.1 VENTAJAS DEL TRABAJO EN FRÍO

- Proporciona una mejor precisión, es decir tolerancias estrechas.
- Proporciona un mejor acabado superficial.
- El endurecimiento por deformación aumenta la resistencia y la dureza del producto a ser elaborado.
- Como no se requiere un previo calentamiento a la materia prima, los costos son bajos.

Debido a estas ventajas se han creado varios procesos de formado en frío para producir diversos productos en masa, como varillas, ángulos, alambre, y otros perfiles.

### 2.2.2 DESVENTAJAS DEL TRABAJO EN FRÍO

- Se requiere más potencia y fuerza para desempeñar las operaciones.
- Se debe tener cuidado para asegurar que las superficies de la pieza de trabajo inicial estén libres de impurezas y suciedad.
- La ductilidad y el endurecimiento por deformación del metal de trabajo, limita la cantidad de formado que se puede hacer sobre la pieza.

## 2.2.3 FUNDAMENTOS DEL CONFORMADO DE LOS MATERIALES

El conformado de materiales, incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de la materia prima. La deformación resulta del uso de una herramienta que usualmente es un dado, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del material hacer deformado.

### 2.2.3.1 Esfuerzo de fluencia en el trabajo en frío

Esfuerzo de fluencia en tensión, se define como el esfuerzo necesario para iniciar el flujo plástico en el material. Cada vez que se aplica un esfuerzo mayor, el esfuerzo de fluencia y la resistencia máxima a la tensión aumenta, y la ductilidad disminuye. Al final, el material se fortalece hasta que el esfuerzo de fluencia y la resistencia máxima a la tensión y de ruptura son iguales, y no hay ductilidad, Figura 2.2. En este punto, el material ya no se puede deformar plásticamente.

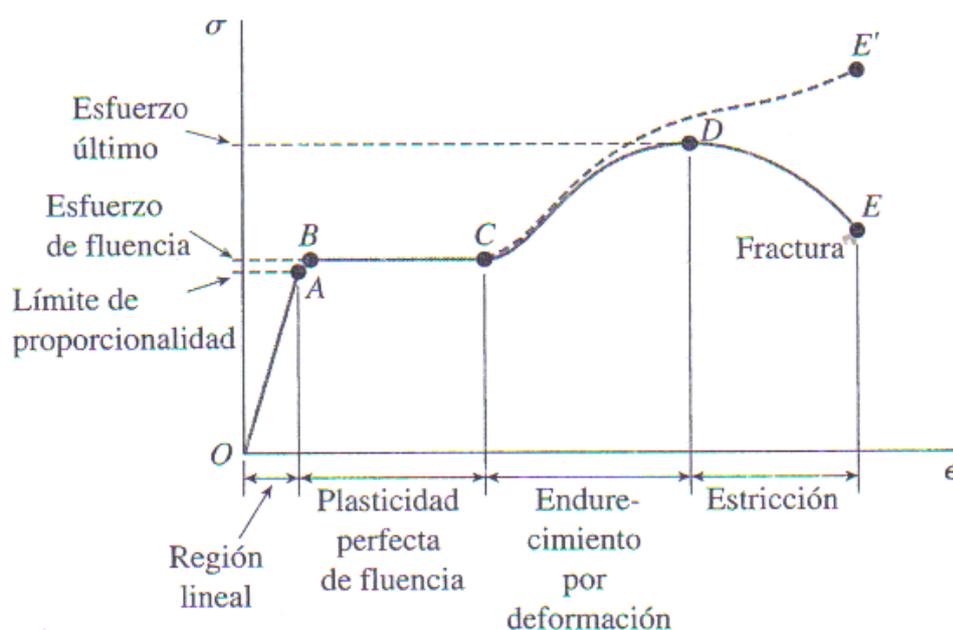


Figura 2. 2 Diagrama esfuerzo de formación para un material dúctil, (Gere, 2008).

### 2.2.3.2 Exponente de endurecimiento por deformación (n)

El exponente  $n$  es una propiedad relacionada con la capacidad de estiramiento de un metal durante un proceso de formado. Mientras más grande es este valor menor es la tendencia del material a causar deformaciones localizadas, lo que posibilita un mejor formado. También brinda una medida del incremento de la resistencia del material debido a la deformación plástica. Los valores de  $n$  para materiales dúctiles a temperatura ambiente varían generalmente entre 0,02 y 0,5. (Mangonon, 2001).

Valores típicos de los parámetros  $K$  y  $n$  para diferentes metales pueden encontrarse en la Tabla 2.2.

**Tabla 2. 2 Valores típicos del coeficiente de resistencia  $K$  y exponente de endurecimiento por deformación  $n$ .**

| Materiales                                | K          | n           |
|---|------------|-------------|
|   | MPa        |             |
| Acero 1015 barra.                         | 620        | 0,18        |
| Acero 1045                                | 950        | 0,12        |
| Cobre 99,99%                              | 450        | 0,33        |
| <b>Cobre puro recocido</b>                | <b>315</b> | <b>0,54</b> |
| Latón (30Zn)                              | 500        | 0,41        |
| Bronce fosforado                          | 720        | 0,46        |
| 1100 Al 99% recocido                      | 95         | 0,41        |
| <b>5052 Al 3,5 Mg</b>                     | <b>210</b> | <b>0,13</b> |
| Aleación de Aluminio tratado térmicamente | 690        | 0,16        |

Fuente: (Schey, 2002).

### 2.2.3.3 Porcentaje de trabajo en frío

La cantidad del trabajo en frío que un material soporta depende de su ductilidad, mientras más dúctil sea el material mejor podrá trabajarse en frío.

Los metales puros pueden soportar una mayor deformación que los materiales que tienen otros elementos, dado que los materiales de aleación incrementan la tendencia y rapidez del endurecimiento.

Si se controla la cantidad de deformación plástica, se controla el endurecimiento por deformación. Se suele medir el porcentaje de trabajo en frío (Askeland, 1998) de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \left[ \frac{A_o - A_f}{A_o} \right] * 100 \quad (2.1)$$

Donde:

$A_o$  = es el área de la sección transversal original del metal.

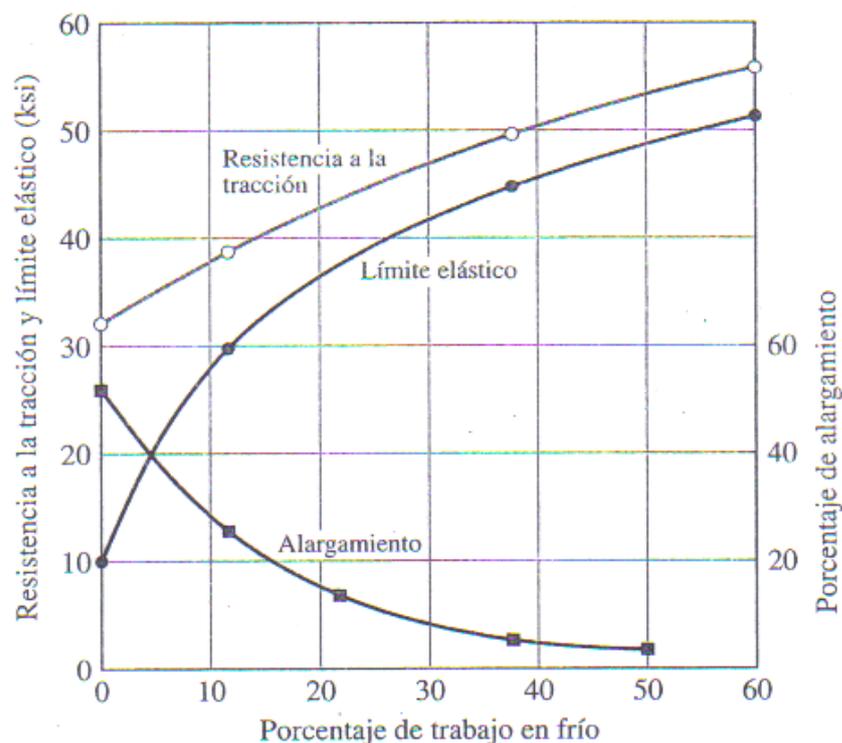
$A_f$  = es el área de la sección transversal final después de la deformación.

Al trabajar con placas, las áreas serán sustituidas por espesores.

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío placas} = \left[ \frac{e_o - e_f}{e_o} \right] * 100 \quad (2.2)$$

El efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre comercialmente puro se muestra en la Figura 2.3. Al aumentar el trabajo en frío, la resistencia de cedencia y la resistencia a la tensión aumentan; sin embargo la ductilidad disminuye y tiende a cero. El metal se rompe si se intenta más trabajo en frío. En consecuencia, hay una cantidad máxima de trabajo o deformación en frío que se puede hacer en un material antes que se vuelva demasiado frágil y se rompa.

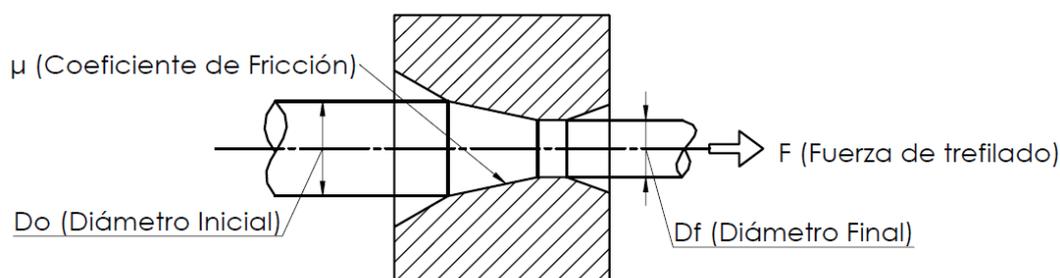
Para el cobre, aluminio, latón, bronce y aceros de bajo contenido de carbono el porcentaje de trabajo en frío es menor al 25%.



**Figura 2. 3 Porcentaje de trabajo en frío sobre la resistencia a la tracción y límite elástico (Smith, 1998)**

#### 2.2.3.4 Fricción

En la Figura 2.4 se puede observar que la fricción se caracteriza por medio de la variable  $\mu$  que representa al coeficiente de roce entre el dado usado en la trefilación y el material. La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajo, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones.



**Figura 2. 4 Coeficiente de fricción ( $\mu$ )**

En la mayoría de los procesos de formado, la fricción es un inconveniente por las siguientes razones:

- Retarda el flujo del metal en el trabajo, ocasionando esfuerzos residuales y algunas veces defectos del producto.
- Se incrementan las fuerzas y la potencia para desempeñar la operación.
- Ocurre un rápido desgaste de las herramientas. Esto puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, y por ende a la fabricación de piezas defectuosas y al remplazo de las herramientas. Como las herramientas para formado de metales son generalmente costosas, esto tiene una mayor importancia.

Los valores típicos del coeficiente de fricción para las tres categorías de formado de metales aparecen en la Tabla 2.3.

#### **2.2.3.5 Lubricación, (Bawa S. , 2004).**

El propósito de la lubricación es reducir o, controlar la fricción y el desgaste que ocurren entre la herramienta de trabajo y la pieza a ser elaborada, la Tabla 2.3, muestra los lubricantes que se utiliza con frecuencia en el trefilado.

Las consideraciones para escoger un lubricante apropiado para el trabajo de metales incluyen el tipo de procesos de formado que se va a utilizar por ejemplo: laminado, forjado, embutido de lámina metálica u otros, ya sea trabajo en caliente o trabajo en frío, así como el material a ser trabajado.

##### **2.2.3.5.1 Tipos de Lubricantes**

Los lubricantes usados para operaciones de trabajo en frío son generalmente:

- Aceites minerales.
- Grasas y aceites grasos.
- Emulsiones en agua, jabones y otros recubrimientos.

**Tabla 2. 3 Lubricantes comunes y coeficientes de fricción**

| Material                             | Trabajo  | Estirado de alambre            |              |
|--------------------------------------|----------|--------------------------------|--------------|
|                                      |          | Lubricante                     | $\mu$        |
| Aleaciones de Sn,<br>Pb, Zn          | Caliente | FO                             | 0,05         |
|                                      | Frío     | FA - MO - EM,<br>FA - MO       | 0,1<br>0,03  |
| Aleaciones de Al                     | Caliente |                                |              |
|                                      | Frío     | FO - Jabón - EM,<br>MO         | 0,1<br>0,03  |
| Aleaciones de Cu                     | Caliente |                                |              |
|                                      | Frío     | Jabón seco o<br>Jabón sobre PH | 0,05<br>0,03 |
| Aceros                               | Caliente |                                |              |
|                                      | Frío     | Jabón sobre PH<br>o CL - MO    | 0,03<br>0,05 |
| Acero inoxidable, Ni<br>y aleaciones | Caliente |                                |              |
|                                      | Frío     | Polímero                       | 0,1          |

Fuente: (Schey, 2002).

Donde:

- CL = parafina clorada.
- EM = emulsión; los ingredientes listados del lubricante se distribuyen finamente en agua.
- FA = ácidos y alcoholes grosos, por ejemplo, ácido oleico, ácido esteárico, alcohol estearílico.
- FO = aceites grasos, por ejemplo, aceite de palma y aceite sintético de palma.
- MO = aceite mineral (la viscosidad en paréntesis, en unidades de centipoises a 40°C).
- PH = conversión superficial fosfatada (o similar), proporcionando modulación del lubricante.

Si el coeficiente de fricción llega a ser lo suficientemente grande ocurre una condición conocida como adherencia, que es la tendencia de las dos superficies en movimiento, a pegarse una a la otra en lugar de deslizarse.

### 2.2.3.6 Temperatura de deformación

Existe tres rangos de temperatura para realizar la deformación de un material: trabajo en frío, (se lo realiza a temperatura ambiente), en tibio, (se lo realiza por debajo de temperatura de recristalización) y en caliente, (se lo realiza ligeramente por encima de la temperatura de recristalización), la Tabla 2.1 muestra los tres rangos mencionados.

La temperatura a la que aparece una microestructura de nuevos granos con muy baja densidad de dislocaciones se la conoce como temperatura de recristalización, en la Tabla 2.4 se muestra la temperatura de fusión y recristalización de algunos materiales.

**Tabla 2. 4 Temperaturas comunes del conformado de metales.**

| Materiales                | Temperatura de recristalización |      | Temperatura de fusión |      |
|---------------------------|---------------------------------|------|-----------------------|------|
|                           | °C                              | °F   | °C                    | °F   |
| Plomo                     | -4                              | 25   | 327                   | 620  |
| Estaño                    | -4                              | 25   | 232                   | 450  |
| Cinc                      | 10                              | 50   | 420                   | 788  |
| Aluminio (99.99% en peso) | 80                              | 176  | 660                   | 1220 |
| Cobre (99.99% en peso)    | 120                             | 250  | 1085                  | 1985 |
| Latón (60% Cu - 40% Zn)   | 475                             | 887  | 900                   | 1652 |
| Níquel (99.99% en peso)   | 370                             | 700  | 1455                  | 2651 |
| Hierro                    | 450                             | 840  | 1538                  | 2800 |
| Tungsteno                 | 1200                            | 2200 | 3410                  | 6170 |

Fuente: (Callister, 2002).

## **2.3 EFECTOS DEL TRABAJO EN FRÍO**

Para comprender la acción de trabajo en frío y sus efectos, se debe poseer algún conocimiento de la estructura de los metales. Todos los metales son cristalinos por naturaleza y están hechos de granos de forma irregular de varios tamaños. Esto puede verse claramente en un microscopio metalúrgico si el metal fue convenientemente pulido o atacado con ácido.

### **2.3.1 EFECTOS DE DEFORMACIÓN**

- Incremento de la resistencia a la tracción
- Incremento de la Fragilidad
- Incremento de la Dureza
- Disminuye la ductilidad y elasticidad.

### **2.3.2 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN**

Cuando un material se deforma plásticamente en frío, los granos se modifican según la dirección de flujo plástico, esto se conoce como endurecimiento por deformación, o acritud, o bien endurecimiento por trabajo en frío, de esta manera un material dúctil se hace más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente.

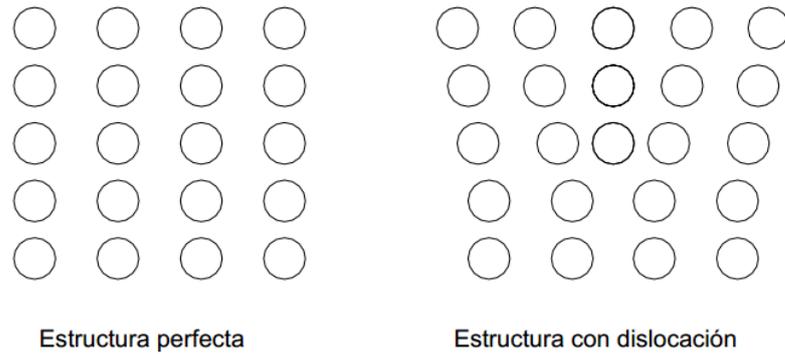
#### **2.3.2.1 Fases del Endurecimiento por Deformación**

Las fases del endurecimiento por deformación se presentan de la siguiente manera:

1. El metal posee dislocaciones en su estructura cristalina.
2. Cuando se aplica una fuerza sobre el material, las dislocaciones se desplazan causando la deformación plástica.
3. Al haber más dislocaciones en la estructura del material, se estorban entre sí, volviendo más difícil su movimiento.

- Al ser más difícil que las dislocaciones se muevan, se requiere de una fuerza mayor para mantenerlas en movimiento. De esta forma se llega a la conclusión que el material se ha endurecido.

Una dislocación es una imperfección en una red cristalina que influye notablemente en las propiedades mecánicas, ver Figura 2.5.



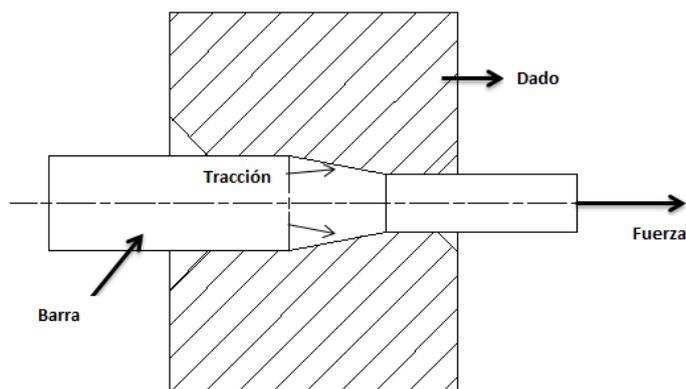
**Figura 2. 5 Ejemplo de dislocación una red cristalina, (Askeland, 1998).**

## CAPÍTULO 3

### TREFILADO

#### 3.1 DEFINICIÓN DE TREFILADO O ESTIRADO

En el proceso de deformación volumétrica, el trefilado o también conocido como estirado es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de un dado o matriz donde aparecen tensiones por tracción en lugar a las de compresión, Figura 3.1.



**Figura 3. 1 Proceso de Trefilado o estirado**

El término estirado de alambre y estirado de barras, son expresiones diferentes, es decir, el estirado de alambre utiliza materia prima de diámetro menores a 5 mm, y se fabrica en grandes lotes, al contrario del estirado de barras que utiliza materia prima de diámetros mayores a 5mm, donde su producción es limitada.

#### 3.2 TIPOS DE TREFILADO

El trefilado se lo puede realizar por dos procedimientos como se explica a continuación.

### 3.2.1 POR EL PROCESO

#### 3.2.1.1 Trefilado Simple

Esta operación se lo realiza en la trefilación de barras, el producto se obtiene en una pieza recta y no enrollada, también se limita la longitud de trabajo, por lo que no necesita una serie de dados, Figura 3.2.

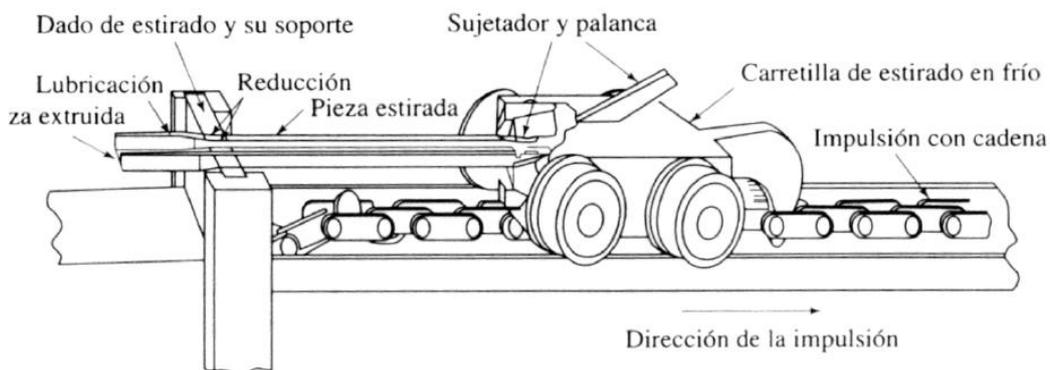


Figura 3. 2 Proceso de Trefilado Simple, (Kalpakjian, 2002).

#### 3.2.1.2 Trefilado Continuo

Como su nombre lo indica es un proceso continuo, y requiere de una serie de 4 a 12 dados para adquirir el producto final que es enrollado en carretes, ver Figura 3.3, este proceso es utilizado para la elaboración de alambre en grandes lotes.

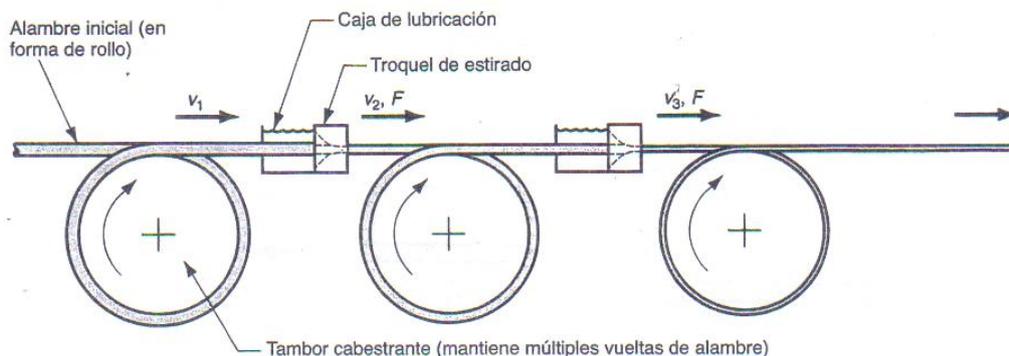


Figura 3. 3 Proceso de Trefilado Continuo

### **3.2.2 POR EL LUBRICANTE UTILIZADO**

#### **3.2.2.1 Trefilado en Seco**

En este proceso se utiliza como lubricante jabón seco en polvo, logrando con esto una rápida deformación y una mayor reducción por paso. Debido a la mayor disminución de sección por paso se logra un rápido aumento a la resistencia de tracción, pero también la ductilidad no será la mejor.

#### **3.2.2.2 Trefilado Húmedo**

La trefilación en húmedo se lo realiza con lubricante líquido, remplazando al jabón en polvo. Así disminuye la presión gradual del lubricante, de modo que se obtenga una reducción por paso gradual, permitiendo con esto una buena ductilidad y calidad superficial del alambre a trefilar.

### **3.3 FASES DEL PROCESO DE TREFILADO**

La trefilación, como todo proceso, conlleva varias etapas para poder obtener el producto deseado, las cuales son:

#### **3.3.1 LIMPIEZA**

La limpieza del material se la realiza para evitar daños en la hilera o dado y la superficie de la barra o alambre a ser trefilada. Esto implica la eliminación de contaminantes de la superficie, por ejemplo capas de óxido, esto se lo realiza con baños químicos (bicarbonato de sodio). Debido a que el grado de corrosión del aluminio, cobre es muy bajo y al momento de procesarlos se encuentran limpios, no se realiza baños químicos.

#### **3.3.2 AFILADO**

El afilado involucra la reducción del diámetro del extremo inicial del material, de manera que se pueda introducir de forma fácil en la hilera para

iniciar el proceso, esto se lo realiza generalmente con otros procesos como: torneado, laminado, estampado.

El extremo afilado se sujeta a una mordaza u otro dispositivo de sujeción para proceder al estirado.

### 3.3.3 RECOCIDO

El recocido consiste en calentar el material a una temperatura adecuada, en la cual se mantiene por un cierto tiempo y después se enfría lentamente, en la Tabla 3.1 y 3.2 se muestra las características del recocido para el aluminio y cobre.

El recocido se lo realiza en cualquiera de los siguientes casos:

- Para reducir la dureza y la fragilidad.
- Para alterar la microestructura del material, y de esta manera obtener las propiedades mecánicas deseadas.
- Para recristalizar los materiales trabajados en frío.
- Para aliviar los esfuerzos residuales inducidos por los procesos de formado previo.

**Tabla 3. 1 Características del recocido aplicado al Aluminio (P, Poner año).**

| Tratamiento | Objetivo  | Calentamiento                        | Enfriamiento                           |
|-------------|---|--------------------------------------|--|
| Recocido    | Eliminar la acritud debido al proceso de deformación volumétrica, recuperando plasticidad | A 380 ° C durante dos a cuatro horas | Lento, en el horno o al aire en reposo |

Fuente: (Molera, 1991)

- Si solo interesa eliminar las tensiones internas suele ser suficiente un calentamiento a 200 – 250 ° C durante unas 5 horas.

**Tabla 3. 2 Características del recocido aplicado al Cobre**

| <b>Metal</b> | <b>Nombre</b>   | <b>Temperatura de Recocido ° C</b> |
|--------------|---|------------------------------------|
| C10200       | Cobre OFHC  | 425 - 650                          |
| C11000       | Cobre Electrolítico                                     | 250 - 650                          |
| C12000       | Cobre desoxidado con fósforo. Bajo contenido en fósforo | 325 - 650                          |
| C12200       | Cobre desoxidado con fósforo. Alto contenido en fósforo | 375 - 650                          |

Fuente: (Molera, 1991)

### 3.3.4 APLICACIÓN DEL LUBRICANTE

Los lubricantes se aplican en la interface herramienta trabajo, para reducir los efectos de la fricción.

Los beneficios que se obtienen de su aplicación incluyen:

- Reducción en la adherencia en las fuerzas y en la potencia.
- Reducción del desgaste de las herramientas de trabajo.
- Mejora el acabado de la superficie en el producto final.
- Reduce la temperatura entre la pieza y la herramienta de trabajo.

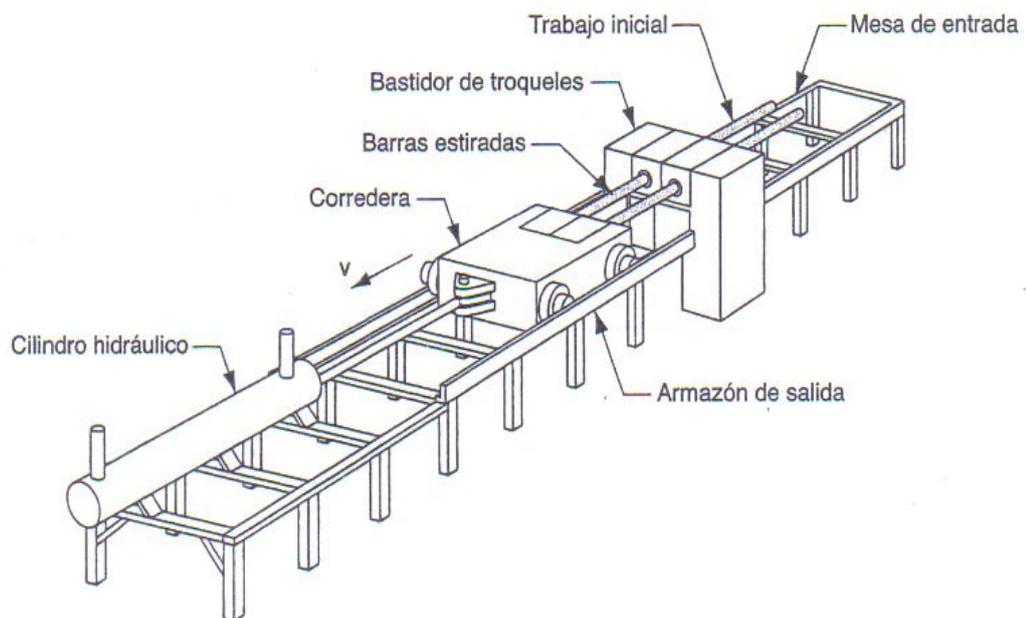
### 3.3.5 MECANIZADO EN FRÍO

Método por el cual el alambre se va reduciendo y moldeando hasta la forma deseada mediante la hilera o dado. La disminución de sección en cada paso (Grover, 2007) es el orden de un 20 % a un 25 % lo que da un aumento en la resistencia entre 10 y 15 Kg/mm<sup>2</sup>.

No es aconsejable continuar con el proceso de trefilado, debido a que la resistencia a la tracción sigue aumentando, se pierden otras características como la flexión.

### 3.4 EQUIPO DE TREFILADO

El estirado de barras o alambre se lo realiza en una máquina llamada banco de estirado Figura 3.4 que consiste básicamente en:



**Figura 3. 4 Equipo de trefilado o estirado**

#### 3.4.1 MESA TREFILADO

Espacio donde se procede a colocar todos los componentes que conforman el equipo de trefilado como: motor, bastidor de la hilera, armazón de salida.

#### 3.4.2 BASTIDOR DE LA HILERA O DE TROQUELES

El bastidor de la hilera es diseñado para contener una o más hileras, dependiendo del tipo de trefilado que se lleve a cabo. En este dispositivo se colocan también las cámaras de lubricación y de refrigeración.

### 3.4.3 CORREDERA O ARMAZON DE SALIDA

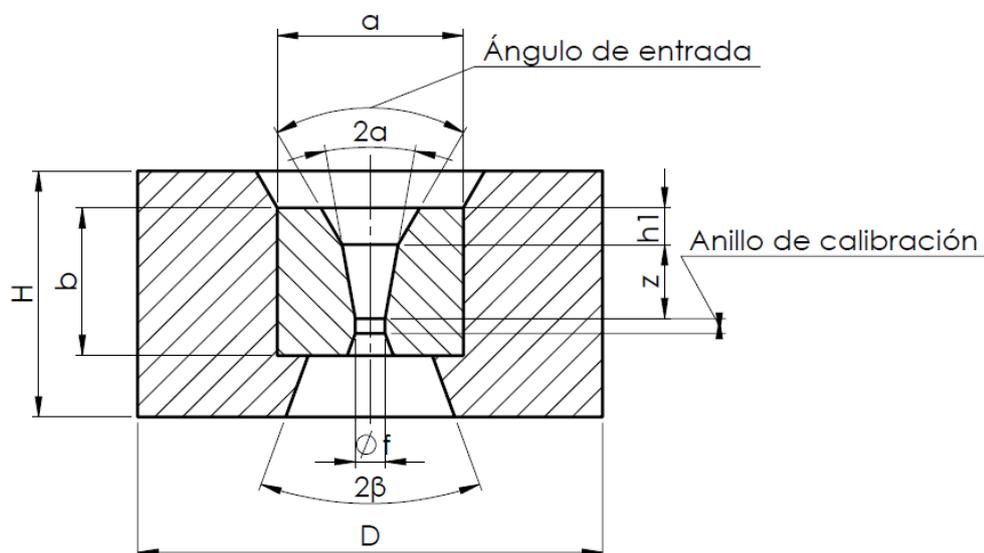
Es el mecanismo por el cual se jala el material a través de la hilera. Este dispositivo está accionado por cilindros hidráulicos, cadenas movidas por un motor, por un cable sujeto a un carrete que gira mediante un motor, mediante un tornillo de potencia y un motor.

### 3.4.4 HILERA O DADO

Las hileras o dados son matrices que posibilitan la trefilación, estas son de diferente diámetro ya que no se puede realizar la reducción de la barra con una sola operación. Estas hileras se componen de materiales muy resistentes principalmente son de carburo tungsteno y de diamante. Ambos materiales son muy resistentes al desgaste especialmente las hileras de diamante pero son poco usadas por su elevado costo de fabricación.

#### 3.4.4.1 Partes de la Hilera

La Figura 3.5 muestra las características de una hilera de estirado.



**Figura 3. 5 Partes de hilera de trefilado, (Esteves, 2008).**

#### 3.4.4.1.1 Ángulo de Entrada

Generalmente es una abertura en forma de campana o cono con un ángulo que fluctúa de 20° a 60°, que no entra en contacto con el trabajo. Su

propósito es hacer un embudo lubricante en el dado y prevenir el rayado en la superficie del trabajo y la superficie del dado.

#### 3.4.4.1.2 Ángulo de Reducción ( $2\alpha$ )

Es donde ocurre el proceso de trefilado. Es una abertura en forma de cono con un ángulo que fluctúa de  $6^\circ$  a  $20^\circ$ . El ángulo correcto varía de acuerdo con el material de trabajo. Ver Tabla 5.1

#### 3.4.4.1.3 Ángulo de Salida ( $2\beta^\circ$ )

Permite que el metal se expanda ligeramente a medida que la barra sale del dado. Este también minimiza la posibilidad de que la abrasión tome lugar si el proceso de trefilación se interrumpe o si el dado está fuera de alineación.

El valor de  $2\beta$  es de  $30^\circ$ -  $60^\circ$  con una tolerancia de  $\pm 5^\circ$ .

#### 3.4.4.1.4 El Núcleo

Como su nombre lo indica es la parte central y principal del dado, es decir, es la que realiza el trabajo de trefilado, este núcleo puede ser de dos materiales, diamante o aceros al carbono, también en esta parte es donde se encuentran los ángulos de entrada como de salida.

#### 3.4.4.1.5 Campana ( $h_1$ )

Su propósito es hacer un embudo lubricante en el dado y prevenir el rayado en la superficie del trabajo y la superficie del cono. Su longitud varía de 0.1 – 0.3 de H.

#### 3.4.4.1.6 Aproximación ( $z$ )

Es una abertura en forma de cono, donde ocurre el proceso de trefilado. Su longitud varía de 0.4 – 0.6 de H.

#### 3.4.4.1.7 Anillo de calibración

Determina el tamaño final del material estirado, es la zona de calibración y representa el 50% del diámetro final del alambre trefilado (Dieter, 2003)

#### 3.4.4.1.8 Encajadura

El material de la encajadura puede ser un material 1040 hasta 1060 (normalmente con una aleación para evitar la oxidación). La Tabla 5.2 muestra los valores de la altura de la caja (H) y diámetro de la caja (D) según el diámetro final de alambre trefilado.

### 3.4.5 TEMPERATURA EN EL PROCESO DE TREFILACIÓN

En el proceso de trefilado existen dos temperaturas que se controlan y son: la del alambre o barras y la del dado.

#### 3.4.5.1 Temperatura del alambre

Las temperaturas del alambre trefilado varían según los siguientes parámetros: propiedades mecánicas del alambre, porcentaje de reducción, ángulo del dado, lubricante y la velocidad. Y si la temperatura no se controla puede afectar negativamente a las propiedades del alambre.

Para materiales no ferrosos se puede calcular la temperatura de trabajo en frío mediante la siguiente ecuación (Wright, 2011):

$$T_{\max} = 1.25 * (\mu * \varphi * \sigma_a) * \left[ \frac{V * L_c}{C * \rho * K} \right]^{1/2} + \varphi * \sigma_a * \frac{\ln \left[ \frac{1}{1-r} \right]}{C * \rho} + T_{am} \quad (3.1)$$

Donde:

$\mu$  = Coeficiente de Fricción

$\varphi$  = Deformación no homogénea

$\sigma_a$  = Esfuerzo de fluencia promedio (Mpa)

V = Velocidad de trefilado (m/s)

Lc = Longitud de la barra a trefilar (m)

$C$  = Calor específico ( $J/g \cdot ^\circ C$ )

$\rho$  = Densidad ( $g/m^3$ )

$K$  = Coeficiente de resistencia ( $J/m \cdot s \cdot ^\circ C$ )

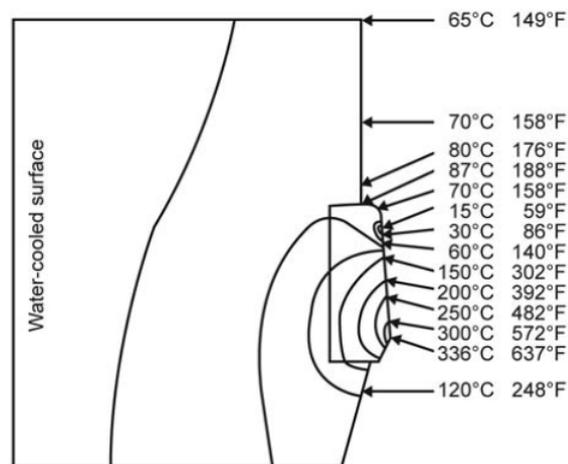
$T_{am}$  = Temperatura ambiente  $^\circ C$

$r$  = Reducción de área en el trefilado

### 3.4.5.2 Temperatura de la hilera de trefilación

En ausencia de cualquier enfriamiento la temperatura aumenta y puede superar fácilmente varios cientos de grados Fahrenheit. Debido a que el aumento de temperatura es proporcional a la cantidad de deformación.

En la Figura 3.6 se puede observar las temperaturas que se producen en las diferentes áreas del dado.



**Figura 3. 6 Temperaturas en el dado de trefilación**

## 3.5 MATERIA PRIMA

Los materiales más empleados para la conformación por trefilado son:

- Aceros al carbono y aleados
- Cobre
- Latones
- Aluminio y sus aleaciones
- Magnesio y sus aleaciones

Los materiales que se someten a conformación por trefilado deben ser:

- Suficientemente dúctiles
- De excelente calidad en cuanto a uniformidad de composición y estructura
- De suficiente resistencia a la tracción, para que no se rompan al estirar.

### 3.6 APLICACIONES

El proceso de trefilado se utiliza para producir alambres y varillas con superficies lisas y tolerancias bajas para diversos campos de aplicación, la Tabla 3.3 muestra algunos ejemplos.

**Tabla 3. 3 Campos de aplicación de alambres y varillas trefiladas**

| Material                                      | Aplicación   |
|---|--|
| <b>Aceros de bajo carbono, C 10 - C 22</b>    | Alambres, mallas de alambre, alambre de púas, alfileres, clavos, tornillos y pernos, remaches            |
| <b>Aceros de alto carbono (hasta 1,6 % C)</b> | Varilla de material para el procesamiento automático, cable de alambre                                   |
| <b>Aceros aleados</b>                         | Resortes industriales, alambres de soldadura   |
| <b>Cobre y aleaciones de cobre</b>            | Alambres, mallas de alambre, tornillos, pernos y piezas mecanizadas, piezas para la industria eléctrica. |
| <b>Aluminio y aleaciones de Al.</b>           | Tornillos y pernos, piezas perfiladas, líneas elécticas, etc.  |

---

Fuente: (Tschaetsch, 2005).

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Se considera en el diseño como parte importante los siguientes aspectos:

- Materia prima para la trefilación.
- Material del dado de trefilado.
- Lubricante para el proceso de trefilación
- Mecanismo de sujeción del material hacer trefilado
- Sistema motriz para la extracción del material

Se tomó en cuenta estos aspectos porque existen más de dos posibilidades a tomar en cuenta en cada punto.

#### 4.1 FACTORES RELEVANTES PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para la selección de materiales, actuadores, lubricantes se utiliza el método de Asignación Óptima por Puntos, priorizando los factores de selección más importantes en el desarrollo de este proyecto como son los siguientes:

- **Disponibilidad:** Esto se refiere a la facilidad con la cual se puede adquirir los materiales, instrumentos, sensores y actuadores, en el mercado nacional.
- **Costo:** Se entiende por costos, al valor total que resulta de la adquisición del material, fabricación, montaje y mantenibilidad.
- **Maquinabilidad:** es una propiedad de los materiales que permite comparar la facilidad con que pueden ser mecanizados por arranque de viruta.
- **Maleabilidad:** es la propiedad de un material blando de adquirir una deformación mediante una descompresión sin romperse

- **Facilidad de fabricación:** Se refiere a la fabricación de piezas de forma simple y rápida optimizando recursos.
- **Durabilidad:** Es la capacidad que tienen los elementos o partes del equipo para resistir la acción del clima, ataque químico, abrasión y otras condiciones, a que está expuesta.
- **Concentricidad:** En este criterio se evalúa la sujeción de precisión existente entre el mandril y el material hacer trefilado para que no exista deformaciones en el material trabajado.
- **Resistencia:** Es una propiedad de los materiales y trata sobre la capacidad para resistir fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.
- **Desmontaje:** En este criterio se evalúa el grado de dificultad que representan los elementos constitutivos del equipo para ser montados.
- **Eficiencia:** Es la relación entre la potencia obtenida y la potencia teórica. Es decir en una maquina según los cálculos es posible obtener cierta potencia, sin embargo en la práctica, por diversas variables (fricción, cambios bruscos de dirección, variación de la intensidad) se pierde potencia y únicamente se tendrá un porcentaje de la potencia teórica.

## 4.2 MATERIA PRIMA PARA LA TREFILACIÓN

Alternativa 1: Cobre electrolítico 99,90%

Alternativa 2: Aluminio Comercial

Alternativa 4: Bronce dulce C38500

### 4.2.1 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLES

#### 4.2.1.1 Cobre Electrolítico

El cobre electrolítico contiene entre un 0,02 y un 0,05% de Oxígeno, que se combina con el cobre para dar  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Después de ser trabajado en

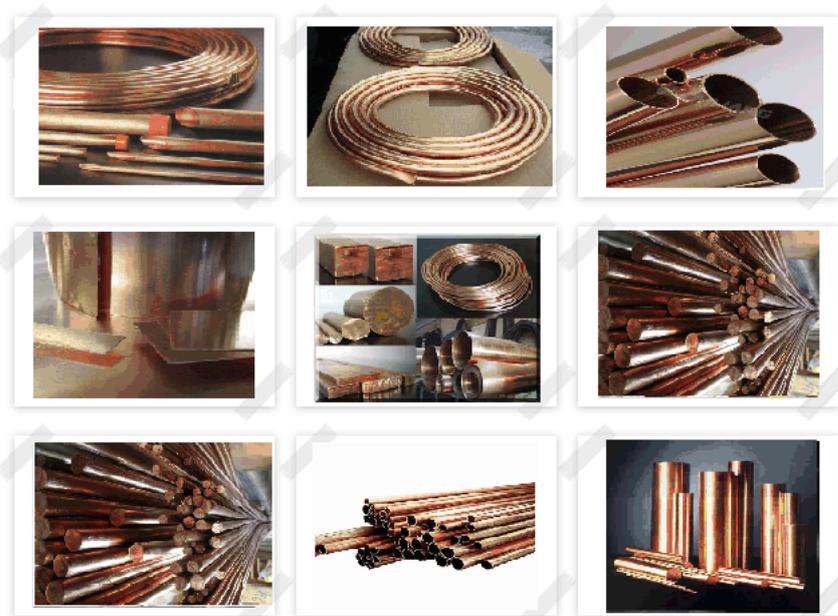
caliente y recocido, se mejora la resistencia mecánica. Se utiliza como conductor eléctrico y térmico.

Admite procesos de fabricación de deformación como laminación o forja, y procesos de soldadura y sus aleaciones adquieren propiedades diferentes con tratamientos térmicos como temple y recocido, en la Tabla 4.1 se muestra algunas propiedades de este material y en la Figura 4.1 algunas aplicaciones.

**Tabla 4. 1 Propiedades del Cobre al 99,90%**

|                                 |                       |                               |   |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---|
| <b>Símbolo</b>                  | Cu                    | Mineral que se extrae de :    | Varios: por ejemplo, calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ )   |
| <b>Dureza</b>                   | 87 Rockwell F         | <b>Elementos de aleación:</b> | Estaño (bronce), aluminio, zinc (latón), níquel, silicio y berilio.                             |
| <b>Gravedad específica</b>      | 8,96 $\text{gr/cm}^3$ |                               |   |
| <b>Temperatura de fusión</b>    | 1083 °C               |                               |   |
| <b>Módulo de elasticidad</b>    | 110000 MPA            | <b>Aplicaciones comunes:</b>  | Conductores y componentes eléctricos, municiones, intercambiadores de calor, joyería, plomería. |
| <b>Resistencia a la tensión</b> | 235 MPA               |                               |   |
| <b>Elongación</b>               | 45%                   |                               |   |

Fuente: (Grover, 2007).



**Figura 4. 1 Varios productos de cobre**

**Ventajas:**

- Excelentes propiedades mecánicas
- Material muy versátil
- Excelente resistencia a la corrosión
- Fácil soldabilidad

**Desventajas:**

- Elevado costo
- Baja maleabilidad

**4.2.1.2 Aluminio Comercial**

El aluminio es un metal no ferroso, y es el más abundante de los materiales, constituyendo cerca del 8% de la corteza terrestre. Sus propiedades han permitido que sea uno de los materiales más utilizados en la actualidad. Es de color blanco y es el más ligero de los materiales producidos a gran escala, en la Tabla 4.2 se muestra algunas propiedades de este material y en la Figura 4.2 algunas aplicaciones.

**Tabla 4. 2 Propiedades del Aluminio Comercial**

| Símbolo                  | Al                     | Mineral que se extrae de : | Varios: por ejemplo, Bauxita (mezcla impura de $Al_2O_3$ y $Al(OH)_3$ .  |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|--|
| Número atómico           | 13                     |                            |  |
| Gravedad específica      | 2,7 gr/cm <sup>3</sup> | Elementos de aleación:     | Cobre, manganeso, silicio, zinc.   |
| Temperatura de fusión    | 660°C                  |                            |  |
| Módulo de elasticidad    | 69000 MPA              |                            |  |
| Resistencia a la tensión | 76 MPA                 | Aplicaciones comunes:      | Contenedores (latas de aluminio), laminas para envolturas, piezas para construcción aeroespaciales y automotrices, conductores eléctricos. |
| Elongación               | 39%                    |                            |  |

Fuente: (Grover, 2007).



**Figura 4. 2 Varios productos de aluminio**

**Ventajas:**

- Excelentes propiedades mecánicas
- Bajo costo, debido a que se coloca entre los materiales más versátiles desde el punto de vista de la fabricación
- Buena maleabilidad
- Excelente resistencia a la corrosión

**Desventajas:**

- Baja resistencia mecánica (Sin tratamiento térmico)
- Material delicado

**4.2.1.3 Bronce dulce C38500**

El latón es una aleación de cobre y zinc, donde las proporciones pueden variar para crear una variedad de latones con propiedades diversa, además su composición influye en las características mecánicas, en la Tabla 4.3 se muestra algunas propiedades de este material y en la Figura 4.3 algunas aplicaciones.

**Tabla 4. 3 Propiedades generales del Latón**

|                                 |                        |                               |  |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------------|--|
| <b>Símbolo</b>                  | Pb                     | <b>Dureza</b>                 | 90 HB  |
| <b>Aleación</b>                 | Cu+Zn+Pb               | <b>Elementos de aleación:</b> | Zinc, Plomo                                      |
| <b>Gravedad específica</b>      | 8,4 gr/cm <sup>3</sup> |                               |  |
| <b>Temperatura de fusión</b>    | 900 °C                 |                               |  |
| <b>Módulo de elasticidad</b>    | 110000 Mpa             | <b>Aplicaciones comunes:</b>  | Fabricación de bisutería, artículos de decorado. |
| <b>Resistencia a la tensión</b> | 350 MPA                |                               |  |
| <b>Elongación</b>               | 20%                    |                               |  |

Fuente: (Grover, 2007).



**Figura 4. 3 Acoples de tuberías**

**Ventajas:**

- Posee un punto de fusión bajo
- Buena maquinabilidad.
- Presenta una alta resistencia a la corrosión.
- Disponible en el mercado nacional.

**Desventajas:**

- Elevado costo.
- Elevada resistencia a la tracción.
- Baja maleabilidad.

A continuación se presenta el costo de cada barra de las alternativas seleccionadas y la fuerza requerida para el trefilado, Tabla 4.4.

**Tabla 4. 4 Costo y Fuerza de Barras a Trefilar**

| COSTO BARRAS A TREFILAR |              |              |              |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Material                | Aluminio     | Cobre        | Latón        |
| Costo                   | 45 \$        | 145 \$       | 85 \$        |
| Dimensiones             | φ7 x 6000 mm | φ8 x 6000 mm | φ8 x 6000 mm |
| Barras a obtener        | 17           |              |              |
| Fuerza de trefilado     | 5,30 KN      | 7,43 KN      | 9,80 KN      |

Fuente: Imporcom Ecuador L.T.D.A.

#### 4.2.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para escoger el material adecuado para la trefilación se ha procedido a la utilización del método de Asignación Óptima por Puntos, con una escala de calificación de 1 a 10, ver Tabla 4.6, y en la Tabla 4.5 se presenta los factores de ponderación de los criterios de selección.

**Tabla 4. 5 Factores de ponderación de los criterios de selección**

| Ord  | Criterio de Selección     | 1   | 2   | 3 | 4   | 5 | 6 | P  | W.F. |
|------|---------------------------|-----|-----|---|-----|---|---|----|------|
| 1    | Disponibilidad            | -   | 0.5 | 1 | 1   | 1 | 1 | 4  | 0,36 |
| 2    | Costo                     | 0.5 | -   | 1 | 0.5 | 1 | 1 | 3  | 0,27 |
| 3    | Ductilidad                | 1   | 0.5 | - | 0.5 | 0 | 1 | 1  | 0,09 |
| 4    | Resistencia a la tracción | 0   | 1   | 1 | -   | 0 | 1 | 2  | 0,18 |
| 5    | Maquinabilidad            | 0   | 0.5 | 0 | 0   | - | 1 | 1  | 0,09 |
| SUMA |                           |     |     |   |     |   |   | 11 | 1,00 |

P: Puntaje de criterio

W.F.: Factor de ponderación

**Tabla 4. 6 Selección de la materia para trefilar**

| Ord   | Criterio de Selección     | W.F. | ALTERNATIVA 1<br>COBRE |             | ALTERNATIVA 2<br>ALUMINIO |             | ALTERNATIVA 3<br>LATÓN |         |
|-------|---------------------------|------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|------------------------|---------|
|       |                           |      | R.F.                   | Puntaje     | R.F.                      | Puntaje     | R.F.                   | Puntaje |
| 1     | Disponibilidad            | 0,36 | 10                     | 3,64        | 8                         | 2,91        | 8                      | 2,91    |
| 2     | Costo                     | 0,27 | 2                      | 0,55        | 10                        | 2,73        | 5                      | 1,36    |
| 3     | Ductilidad                | 0,09 | 8                      | 0,73        | 5                         | 0,45        | 8                      | 0,73    |
| 4     | Resistencia a la tracción | 0,18 | 8                      | 1,45        | 2                         | 0,36        | 5                      | 0,91    |
| 5     | Maquinabilidad            | 0,09 | 8                      | 0,73        | 5                         | 0,45        | 8                      | 0,73    |
| TOTAL |                           | 1,00 |                        | <b>7,09</b> |                           | <b>6,91</b> |                        | 6,64    |

R.F.: Factor de evaluación

Al analizar las diferentes alternativas, ventajas, desventajas y cuadro de selección se llega a la siguiente conclusión:

Debido a que se va a trefilar dos tipos de materiales para poder comparar los resultados entre ellos se decide por: cobre y aluminio. Las propiedades y composición del material a trefilar son proporcionadas por el distribuidor, en este caso son: Imporcom e Iván Bohman. Ver Tabla 4.7, 4.8, 4.9.

- **Cobre electrolítico al 99.90% C110**

**Tabla 4. 7 Propiedades C110**

|                                      |                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Número de aleación y nombre</b>   | C1100 (Cobre duro Electrolítico) |
| <b>Composición</b>                   | 99,90 Cu y 0,04 O                |
| <b>Distribuidor</b>                  | Imporcom (Quito)                 |
| <b>Dimensiones</b>                   | Barras redondas de 5 -18 mm      |
| <b>Esfuerzo de Rotura</b>            | 350 MPa                          |
| <b>Dureza</b>                        | 87 HRF                           |
| <b>Coefficiente de Resistencia K</b> | 450 MPa                          |
| <b>Exponente de endurecimiento n</b> | 0,33                             |

Fuente: (Handbook, 1990).

- **Aluminio Prodax Al 5052**

**Tabla 4. 8 Propiedades Al 5052**

|                                      |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Número de aleación y nombre</b>   | Al 5052 (Prodax)            |
| <b>Composición</b>                   | Al (3,5 Mg)                 |
| <b>Distribuidor</b>                  | Imporcom (Quito)            |
| <b>Dimensiones</b>                   | Barras redondas de 5 -22 mm |
| <b>Esfuerzo de Rotura</b>            | 200 MPa                     |
| <b>Dureza</b>                        | 70 HB                       |
| <b>Coefficiente de Resistencia K</b> | 210 MPa                     |
| <b>Exponente de endurecimiento n</b> | 0,13                        |

Fuente: (Handbook, 1990).

- **Cobre electrolítico al 99.90% C110 O**

**Tabla 4. 9 Propiedades C110 O**

| <b>Propiedades Cobre Recocido</b>    |                   |
|--------------------------------------|-------------------|
| <b>Número de aleación y nombre</b>   | C 1100 O          |
| <b>Composición</b>                   | 99,90 Cu y 0,04 O |
| <b>Esfuerzo de Rotura</b>            | 235 MPa           |
| <b>Dureza</b>                        | 40 HRF            |
| <b>Recocido</b>                      | 300° C /1 hora    |
| <b>Enfriamiento</b>                  | Al aire libre     |
| <b>Coefficiente de Resistencia K</b> | 315 MPa           |
| <b>Exponente de endurecimiento n</b> | 0,54              |

Fuente: Informe Bohler.

### 4.3 MATERIAL DEL DADO DE TREFILADO

Alternativa 1: Dados de Carburo de Tungsteno

Alternativa 2: Dados de Diamante Policristalino

Alternativa 3: Dados en Acero K100

Se escoge estas alternativas por ser las más comunes en el mercado.

### 4.3.1 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLES

#### 4.3.1.1 Datos de Carburo de Tungsteno

Las hileras de carburo de tungsteno para el trefilado de alambres y barras son el resultado de una tecnología experta y de una fabricación precisa. Especialmente ventajosas en las aplicaciones de alambres de acero, las hileras de carburo de tungsteno son la opción correcta para las aplicaciones en las que no son necesarios el acabado y la resistencia al desgaste, pero sí en las que es una prioridad el ahorro en los costos. (Figura 4.4).

El carburo de tungsteno no es una aleación de metal, sino el producto de la metalurgia de polvos, con cobalto como aglutinante, los granos muy finos de dos materiales se mezclan y fusionan bajo alta temperatura y presión, en la Tabla 4.10 se muestran algunas propiedades de este material.

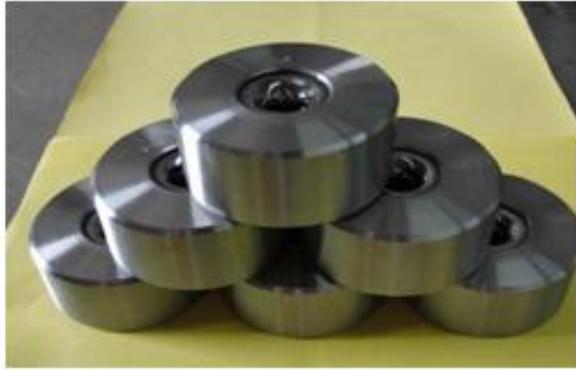
**Tabla 4. 10 Propiedades generales del Carburo de Tungsteno**

| Símbolo                                   | WC            |
|---|---------------|
| Resistencia a la rotura transversal (MPa) | 1030 - 2600   |
| Resistencia a la compresión (MPa)         | 4100 - 5900   |
| Módulo elástico (GPa)                     | 520 - 700     |
| Dureza Rockwell A                         | 86 - 93       |
| Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )             | 10000 - 15000 |

Fuente: <http://www.china-tungsten.biz/spanish/Tungsten-carbide.html>

#### Características principales de carburo de tungsteno

- Excelente dureza: 86 ~ 93 HRA
- Excelente resistencia al desgaste;
- Larga vida de servicio



**Figura 4. 4 Dados de Carburo de Tungsteno**

### **Aplicaciones**

Ideal para la mayoría de los alambres ferrosos, diámetros grandes y aplicaciones en las que el desgaste por corrosión es la causa principal de fallas de la hilera.

### **Mercados típicos**

Alambre de acero de todos tamaños, alambre para llantas y alambre para soldar.

#### **4.3.1.2 Dados de Diamante Policristalino**

Las hileras de diamante, se fabrican con diamante Policristalino, un material sintético de gran durabilidad con un acabado sumamente pulido de la superficie que minimiza la fricción. Figura 4.5.

El Diamante Policristalino estandarizado como DP es obtenido de una masa de partículas de diamante sintético, formando una capa uniforme en la parte superior de una base de wolframio, por medio de un catalizador (cobalto) con altas presiones ( $14\text{GPa} \approx 2$  millones de psi) y temperaturas ( $3000^\circ\text{C} - 5400^\circ\text{C}$ ) en un proceso llamado sinterización. En la Tabla 4.11 se puede apreciar las propiedades generales del diamante Policristalino.

**Tabla 4. 11 Propiedades generales del Diamante Policristalino**

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Resistencia a la rotura transversal (MPa)</b> | <b>1400</b> |
| <b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>         | 7000        |
| <b>Módulo elástico (GPa)</b>                     | 830 - 1000  |
| <b>Dureza Knoop (HK)</b>                         | 7000 - 8000 |
| <b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>               | 3500        |

Fuente: <http://www.diamondscbntech.com/13ES-DIAMANTE-POLICRISTALINO-PCD-cortador-PDC.htm>

**Figura 4. 5 Dados de Diamante Policristalino****Beneficios:**

- La vida máxima de la hilera le brinda una eficiencia más alta con menos tiempos improductivos.
- Disponibles en una amplia gama de granos y de tamaños de núcleos.
- Resistencia excelente contra las fracturas y rompimientos de las hileras.
- Desgaste parejo y predecible de la hilera.

**Aplicaciones:**

Alambre no ferroso, en especial los tamaños más grandes en los que el desgaste excesivo es un problema, pero el acabado de la superficie es menos crítico.

### Mercados típicos:

Alambre de aluminio, alambre de cobre, alambre de acero inoxidable y alambre para llantas.

#### 4.3.1.3 Dados en Acero K100

Marca estándar de los aceros ledeburíticos (aceros con alto porcentaje de cromo), al 12% cromo, el acero Böhler K-100, (AISI D3 – DIN: X210Cr12W), en estado de suministro tiene una dureza de 250HB y se caracteriza por su mínima variabilidad dimensional, además presenta excelente tenacidad, en la Tabla 4.12 se muestra la composición química de este material y en la Tabla 4.13 las propiedades.

Apto para herramientas sin virutaje como dados para trefilar metales no ferrosos, hileras y machos para estirado de tubos y perfiles, mandriles para laminar tubos de acero en frío, etc. Figura 4.6.



Figura 4. 6 Dado en Acero K-100

Tabla 4. 12 Composición química del acero K-100

| C     | Si    | Mn    | Cr     |
|-------|-------|-------|--------|
| 2.00% | 0.25% | 0.35% | 11.50% |

Fuente: (Bohler, 2010).

**Tabla 4. 13 Propiedades físicas del acero K-100**

|                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| Densidad (kg/dm <sup>3</sup> ) | 7,70                |
| Conductividad Térmica (W/m.K)  | 20,00               |
| Módulo de elasticidad (Mpa)    | 210X10 <sup>3</sup> |

Fuente: (Bohler, 2010).

#### 4.3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para escoger el material adecuado para la trefilación se ha procedido a la utilización del método de Asignación Óptima por Puntos, con una escala de calificación de 1 a 10, ver Tabla 4.15, y en la Tabla 4.14 se presenta los factores de ponderación de los criterios de selección.

**Tabla 4. 14 Factores de ponderación de los criterios de selección**

| Ord  | Criterio de Selección    | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6 | P | W.F. |
|------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|------|
| 1    | Disponibilidad           | -   | 0.5 | 0   | 0.5 | 0   | 1 | 1 | 0,14 |
| 2    | Costo                    | 0.5 | -   | 1   | 0.5 | 1   | 1 | 3 | 0,43 |
| 3    | Mantenibilidad           | 0   | 0.5 | -   | 0   | 0.5 | 1 | 1 | 0,14 |
| 4    | Facilidad de fabricación | 0.5 | 0.5 | 0   | -   | 0   | 1 | 1 | 0,14 |
| 5    | Durabilidad              | 0   | 0.5 | 0.5 | 0   | -   | 1 | 1 | 0,14 |
| SUMA |                          |     |     |     |     |     |   | 7 | 1,00 |

P: Puntaje de criterio

W.F.: Factor de ponderación

**Tabla 4. 15 Selección Material del dado**

| Ord   | Criterio de Selección    | W.F. | ALTERNATIVA 1<br>TUNGSTENO |         | ALTERNATIVA 2<br>POLICRISTALINO |         | ALTERNATIVA 3<br>ACERO K100 |             |
|-------|--------------------------|------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------|-----------------------------|-------------|
|       |                          |      | R.F.                       | Puntaje | R.F.                            | Puntaje | R.F.                        | Puntaje     |
| 1     | Disponibilidad           | 0,14 | 2                          | 0,29    | 2                               | 0,29    | 8                           | 1,14        |
| 2     | Costo                    | 0,43 | 8                          | 3,43    | 5                               | 2,14    | 8                           | 3,43        |
| 3     | Mantenibilidad           | 0,14 | 8                          | 1,14    | 5                               | 0,71    | 8                           | 1,14        |
| 4     | Facilidad de fabricación | 0,14 | 5                          | 0,71    | 2                               | 0,29    | 8                           | 1,14        |
| 5     | Durabilidad              | 0,14 | 8                          | 1,14    | 10                              | 1,43    | 5                           | 0,71        |
| TOTAL |                          | 1,00 |                            | 6,71    |                                 | 4,86    |                             | <b>7,57</b> |

R.F.: Factor de evaluación

Al analizar las diferentes alternativas, ventajas, desventajas y cuadro de calificación se llega a la siguiente conclusión:

**Los datos de trefilación serán de Acero K-100**

## 4.4 LUBRICANTE PARA EL PROCESO DE TREFILACIÓN

Alternativa 1: Grasa Mobilith SHC™ 007

Alternativa 2: Emulsión de aceite (ISO 32)

### 4.4.1 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS POSIBLES

#### 4.4.1.1 Grasa Mobilith SHC™ 007

Son productos de desempeño superior diseñados para un amplio rango de aplicaciones que operan a temperaturas extremas, en la Tabla 4.16 se muestran las propiedades de la grasa Mobilith SHC™ 007.

#### Beneficios:

- Excelente desempeño a alta y baja temperatura
- Excelente protección anti desgaste, contra el óxido y la corrosión
- Excelente estabilidad estructural en presencia de agua
- Baja volatilidad

**Tabla 4. 16 Propiedades de Mobilith SHC™ 007**

| <b>Mobilith SHC Series</b>        | <b>007</b> |
|-----------------------------------|------------|
| Color, visual                     | Rojo       |
| Penetración trabajada, 25°C       | 415        |
| Viscosidad del aceite, cSt @ 40°C | 460        |

Fuente: [http://www.mobil.com/Mexico-Spanish-LCW/heavydutyengineoils\\_products\\_greases\\_mobilith-shc-007.aspx#](http://www.mobil.com/Mexico-Spanish-LCW/heavydutyengineoils_products_greases_mobilith-shc-007.aspx#)

#### 4.4.1.2 Emulsión de aceite (ISO 32)

Lubricante industrial de alto desempeño, calidad PREMIUM que supera todos los requerimientos de los fabricantes de sistemas hidráulicos. Desarrollado con bases lubricantes parafínicas altamente refinadas y un balanceado paquete de aditivos de avanzada tecnología que le confieren gran resistencia contra la oxidación y efectiva protección antidesgaste de los

equipos que trabajan en condiciones severas de operación, además proveen una rápida acción antiespumante y una efectiva protección antiherrumbre. Ver propiedades en la Tabla 4.17.

#### Beneficios:

- Óptima protección antidesgaste.
- Efectivo control a la corrosión y a la herrumbre.

**Tabla 4. 17 Propiedades de Aceite ISO 32**

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>NOMBRE DEL PRODUCTO:</b>  | MOLYDRAULIC AW ISO 32.                                   |
| <b>PRODUCTO APLICABLE A:</b> | PIEZAS EN MOVIMIENTO, SISTEMAS HIDRÁULICOS               |
| <b>NOMBRE QUÍMICO:</b>       | ACEITE HIDRÁULICO ANTI-DESGASTE, O ACEITES PARA MÁQUINA. |
| <b>APARIENCIA:</b>           | ACEITE MINERAL.  |
| <b>PUNTO DE INFLAMACIÓN:</b> | >190°C.  |
| <b>VISCOSIDAD:</b>           | 32 cSt A 40°C.   |
| <b>GRAVEDAD ESPECIFICA:</b>  | 0.8 – 0.9 gr/cm <sup>3</sup>                             |
| <b>SOLUBILIDAD:</b>          | SOLUBLE EN SOLVENTES NATURALES; INSOLUBLE EN AGUA.       |

Fuente: Catalogo CONAUTO.

#### 4.4.2 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLE

Para escoger el material adecuado para la trefilación se ha procedido a la utilización del método de Asignación Óptima por Puntos, con una escala de calificación de 1 a 10, ver Tabla 4.19, y en la Tabla 4.18 se presenta los factores de ponderación de los criterios de selección.

**Tabla 4. 18 Factores de ponderación de los criterios de selección**

| Ord  | Criterio de Selección | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6 | P  | W.F. |
|------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|---|----|------|
| 1    | Disponibilidad        | -   | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 1  | 0,10 |
| 2    | Costo                 | 0.5 | -   | 1   | 1   | 1   | 1 | 4  | 0,40 |
| 3    | Lubricación           | 1   | 1   | -   | 0.5 | 1   | 1 | 2  | 0,20 |
| 4    | Limpieza              | 0.5 | 1   | 0.5 | -   | 0.5 | 1 | 1  | 0,10 |
| 5    | Riesgo de uso         | 0.5 | 1   | 1   | 0.5 | -   | 1 | 2  | 0,20 |
| SUMA |                       |     |     |     |     |     |   | 10 | 1,00 |

P: Puntaje de criterio

W.F.: Factor de ponderación





**Figura 4. 7 Mandril porta-barras**

**Ventajas:**

- Fácil montaje y desmontaje.
- Bajo costo y excelente disponibilidad en el mercado.
- Fácil utilización.
- Excelente Concentricidad.

**Desventajas:**

- Se requiere mayor fuerza para la sujeción.
- Poca sujeción.

**4.5.1.2 Sujeción mediante mordaza**

Es un mecanismo en el cual consiste en dos piezas dentadas (Figura 4.8), el mismo que al ingresar el material por la guía se ajusta por medio de pernos.



**Figura 4. 8 Sujeción mediante tornillo**

**Ventajas:**

- Facilidad de operación
- Bajos costos
- Buena sujeción

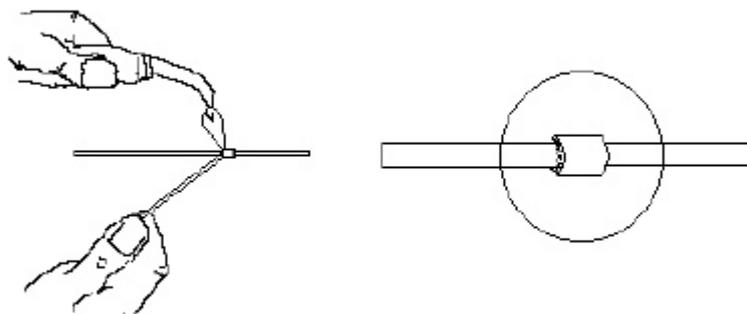
**Desventajas:**

- Poca disponibilidad en el mercado
- Poca Concentricidad

**4.5.1.3 Por soldadura**

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), a través de fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y pudiendo agregar un material de relleno fundido, para conseguir un baño de material fundido (el baño de soldadura) que, al enfriarse, se convierte en una unión fija.

Pero para este proceso se utiliza materiales no ferrosos por lo tanto la soldadura es mucho más complicada especialmente para el aluminio. Figura 4.9.



**Figura 4. 9 Soldadura por barras de cobre**

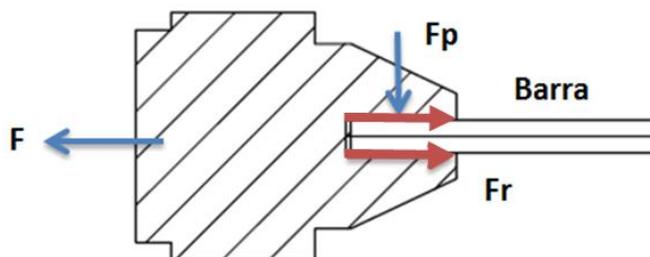
**Ventajas:**

- Facilidad y rapidez de unión (para el cobre).
- Mayor resistencia.

**Desventajas:**

- Mayor costo.
- Menor disponibilidad de los equipos de soldadura (para el aluminio).
- Mayor dificultad en la separación del material de trefilado y la sujeción.

A continuación se presenta un modelo aproximado del cálculo del agarre en el porta brocas y mordaza, ver Figura 4.10 y 4.11.



**Figura 4. 10 Soldadura por barras de cobre**

Donde:

$F$ =Fuerza de Trefilado (8 KN)

$F_p$ =Apriete (1.1 KN)

$F_r$ =Fuerza de rozamiento

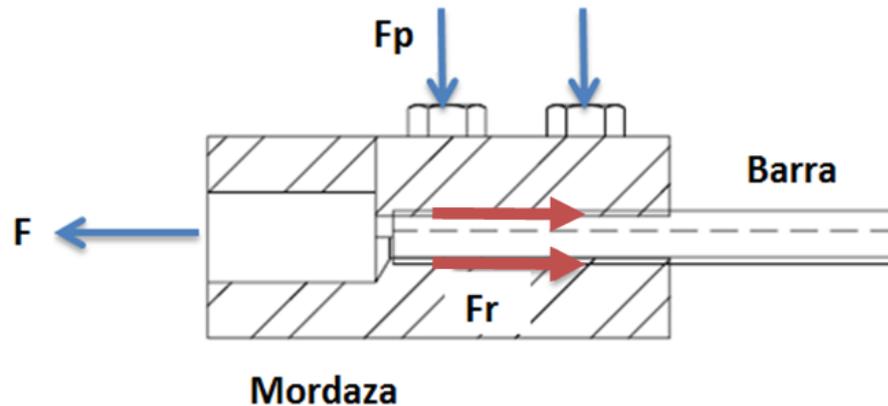
$u_s$ =coeficiente de rozamiento (Serway, 1992)

$$F_{rs}=3 \cdot u_s \cdot F_p \quad (4.1)$$

$$F_{rs}= 3 \cdot 0.53 \cdot (1.1)$$

$$F_{rs}=1.75 \text{ KN}$$

$F > F_r$  Hay deslizamiento



**Figura 4. 11 Soldadura por barras de cobre**

Donde:

$F$ =Fuerza de Trefilado (8 KN)

$F_p$ =Precarga perno (9.195 KN)

$F_r$ =Fuerza de rozamiento

$u$ =coeficiente de rozamiento

$$F_{rs}=2 \cdot u_s \cdot (4 \cdot F_p)$$

$$F_{rs}= 2 \cdot 0.53 \cdot (4 \cdot 9.195)$$

$$F_{rs}=38 \text{ KN}$$

$F < F_{rs}$  No hay deslizamiento

#### 4.5.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para escoger el material adecuado para la trefilación se ha procedido a la utilización del método de Asignación Óptima por Puntos, con una escala de calificación de 1 a 10, ver Tabla 4.21, y en la Tabla 4.20 se presenta los factores de ponderación de los criterios de selección.

**Tabla 4. 20 Factores de ponderación de los criterios de selección**

| Ord  | Criterio de Selección | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6 | P | W.F. |
|------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|------|
| 1    | Disponibilidad        | -   | 0.5 | 0   | 1   | 1   | 1 | 3 | 0,38 |
| 2    | Costo                 | 0.5 | -   | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 0,13 |
| 3    | Concentricidad        | 1   | 1   | -   | 0.5 | 0   | 1 | 1 | 0,13 |
| 4    | Agarre                | 1   | 1   | 1   | -   | 0   | 1 | 2 | 0,25 |
| 5    | Montaje y Desmontaje  | 0.5 | 1   | 0.5 | 0   | -   | 1 | 1 | 0,13 |
| SUMA |                       |     |     |     |     |     |   | 8 | 1,00 |

P: Puntaje de criterio

W.F.: Factor de ponderación

**Tabla 4. 21 Selección Mecanismo de sujeción de las barras a ser trefiladas**

| Ord   | Criterio de Selección | W.F. | ALTERNATIVA 1<br>PORTA-BROCAS |         | ALTERNATIVA 2<br>MORDAZA |             | ALTERNATIVA 3<br>SOLDADURA |         |
|-------|-----------------------|------|-------------------------------|---------|--------------------------|-------------|----------------------------|---------|
|       |                       |      | R.F.                          | Puntaje | R.F.                     | Puntaje     | R.F.                       | Puntaje |
| 1     | Disponibilidad        | 0,38 | 10                            | 3,75    | 5                        | 1,88        | 5                          | 1,88    |
| 2     | Costo                 | 0,13 | 10                            | 1,25    | 8                        | 1,00        | 5                          | 0,63    |
| 3     | Concentricidad        | 0,13 | 8                             | 1,00    | 8                        | 1,00        | 8                          | 1,00    |
| 4     | Agarre                | 0,25 | 2                             | 0,50    | 10                       | 2,50        | 10                         | 2,50    |
| 5     | Montaje y Desmontaje  | 0,13 | 8                             | 1,00    | 10                       | 1,25        | 2                          | 0,25    |
| TOTAL |                       | 1,00 |                               | 7,50    |                          | <b>7,63</b> |                            | 6,25    |

R.F.: Factor de evaluación

Al analizar las diferentes alternativas, beneficios, aplicaciones y cuadro de calificación se llega a la siguiente conclusión:

Se realizará la extracción del material mediante una mordaza la cual será fabricada de acuerdo a las medidas requeridas en el sistema de extracción.

## 4.6 SISTEMA MOTRIZ PARA LA EXTRACCIÓN DEL MATERIAL

Considerando que el movimiento se lo obtiene de un motor eléctrico, es importante realizar un análisis de alternativas posibles para transmitir movimiento al sistema de extracción de las barras a ser trefiladas.

Alternativa 1: Sistema motriz, por Winche

Alternativa 2: Sistema motriz, por Tornillo de potencia

Alternativa 3: Sistema motriz, por Cadena

#### 4.6.1 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS POSIBLES

##### 4.6.1.1 Sistema motriz por Winche eléctrico

Los winches están compuestos por un tambor horizontal donde se envuelve un cable de acero de alta resistencia a la tracción, el cual hala la carga que se desea mover, el tambor es accionado por un motorreductor. Existen varios equipos para diferentes longitudes de extracción y varias capacidades de arrastre o elevación, en la Figura 4.12 se muestra un ejemplo.



Figura 4. 12 Winche eléctrico

##### Ventajas:

- No hay posibilidad de deslizamiento.
- Bajo mantenimiento.
- Buena eficiencia.

##### Desventajas:

- Alto costo
- Se requiere mayor espacio.

#### 4.6.1.2 Sistema motriz por tornillo de potencia

A través de estos elementos de máquinas, denominados también tornillos de movimiento o de fuerza, es posible transformar un movimiento de rotación en un movimiento rectilíneo con el objeto de transmitir fuerza o potencia, derivándose de esto último el nombre de tornillos de potencia, Figura 4.13.

Generalmente trabajan con un roce elevado, por lo que la eficiencia, el desgaste y el calentamiento son consideraciones importantes para su diseño.

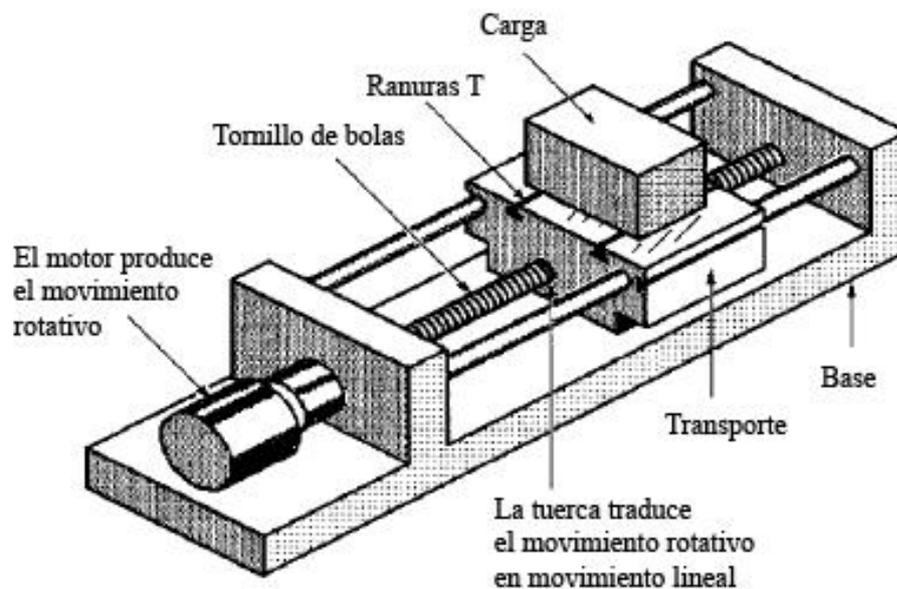


Figura 4. 13 Tornillo de potencia

#### Ventajas:

- Fácil construcción
- Extremadamente versátiles
- Soportan altas temperaturas

#### Desventajas:

- Elevado costo
- Mayores requerimientos de potencia
- Baja eficiencia

#### 4.6.1.3 Sistema motriz por cadenas

Este mecanismo consiste en piñones acoplados a cada eje motriz, los cuales transmiten movimiento, Figura 4.14.



**Figura 4. 14 Cadena de dientes invertidos**

#### **Ventajas:**

- Facilidad de instalación
- Transmiten potencia a grandes distancias
- Larga vida y capacidad de impulsar cierto número de ejes desde una sola fuente de potencia.

#### **Desventajas:**

- Elevado costo
- Son ruidosas y fuente de vibración
- Mayores requerimientos de potencia
- Requiere permanente lubricación

A continuación se presenta un cálculo de la eficiencia de las alternativas.

#### **Calculo de la eficiencia del tornillo de potencia (Norton, 1999).**

Datos:

F = fuerza de trefilado 1798 lbf → 8000N

d = diámetro tornillo → 1 plg

dc = diámetro cojinete → 1.5 plg

u = coeficiente de fricción tornillo → 0.16

uc = coeficiente de fricción cojinete → 0.12

n1 = número de hilos por pulgada → 5

p = paso → 0.2 plg

l = avance → 0.4 plg

$\beta$  = ángulo de rosca → 29°

dp = diámetro de paso

$\alpha$  = ángulo de avance

$\theta$  = ángulo fuerza

T = torque para alar la carga

$$dp = d - 0.5 * p - 0.01 = 0.89 \text{ plg} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\pi * dp} \right) = 8.14^\circ \quad (4.3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \cos \alpha * \tan \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] = 14.36^\circ \quad (4.4)$$

$$T = F * \left[ \frac{\left( \frac{dp}{2} \right) * (\cos \theta * \tan \alpha + \mu)}{\cos \theta - \mu \tan \alpha} + \frac{dc}{2} * u_c \right] = 414.50 \text{ lbf plg} \quad (4.5)$$

$$n = \frac{100 * F * l}{2 * \pi * T} * 100\% = 27.67\% \quad (4.6)$$

### Cálculo eficiencia Winche

Datos:

Vr = velocidad de trefilado → 0.0667 m/s Tabla 5.5

P = Potencia → 745.66 W sección 5.3

Pu = Potencia útil

$$P_u = F * V_r \quad (4.7)$$

$$P_u = 8000 * 0.0667 = 533.6 \text{ W}$$

$$n_M = \frac{P_u}{P} \quad (4.8)$$

$$n_M = \frac{533.6}{745.66} * 100 = 71.25\%$$

#### 4.6.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para escoger el material adecuado para la trefilación se ha procedido a la utilización del método de Asignación Óptima por Puntos, con una escala de calificación de 1 a 10, ver Tabla 4.23, y en la Tabla 4.22 se presenta los factores de ponderación de los criterios de selección.

**Tabla 4. 22 Factores de ponderación de los criterios de selección**

| Ord  | Criterio de Selección | 1   | 2   | 3 | 4   | 5   | 6 | 7 | P  | W.F. |
|------|-----------------------|-----|-----|---|-----|-----|---|---|----|------|
| 1    | Disponibilidad        | -   | 0.5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 2  | 0,14 |
| 2    | Costo                 | 1   | -   | 1 | 1   | 1   | 1 | 1 | 5  | 0,36 |
| 3    | Mantenibilidad        | 0   | 0.5 | - | 0   | 0.5 | 0 | 1 | 1  | 0,07 |
| 4    | Construcción          | 0.5 | 1   | 0 | -   | 0.5 | 1 | 1 | 2  | 0,14 |
| 5    | Eficiencia            | 0.5 | 1   | 0 | 1   | -   | 1 | 1 | 3  | 0,21 |
| 6    | Montaje y Desmontaje  | 0.5 | 1   | 0 | 0.5 | 0   | - | 1 | 1  | 0,07 |
| SUMA |                       |     |     |   |     |     |   |   | 14 | 1,00 |

P: Puntaje de criterio

W.F.: Factor de ponderación

**Tabla 4. 23 Selección del sistema motriz**

| Ord   | Criterio de Selección | W.F. | ALTERNATIVA 1<br>WINCHE |             | ALTERNATIVA 2<br>TORNILLO DE<br>POTENCIA |         | ALTERNATIVA 3<br>CADENAS |         |
|-------|-----------------------|------|-------------------------|-------------|--|---------|--------------------------|---------|
|       |                       |      | R.F.                    | Puntaje     | R.F.                                     | Puntaje | R.F.                     | Puntaje |
| 1     | Disponibilidad        | 0,14 | 10                      | 1,43        | 10                                       | 1,43    | 10                       | 1,43    |
| 2     | Costo                 | 0,36 | 8                       | 2,86        | 2  | 0,71    | 8                        | 2,86    |
| 3     | Mantenibilidad        | 0,07 | 8                       | 0,57        | 8  | 0,57    | 8                        | 0,57    |
| 4     | Construcción          | 0,14 | 8                       | 1,14        | 5  | 0,71    | 8                        | 1,14    |
| 5     | Eficiencia            | 0,21 | 8                       | 1,71        | 5  | 1,07    | 5                        | 1,07    |
| 6     | Montaje y Desmontaje  | 0,07 | 8                       | 0,57        | 5  | 0,36    | 5                        | 0,36    |
| TOTAL |                       | 1,00 |                         | <b>8,29</b> |  | 4,86    |                          | 7,43    |

R.F.: Factor de evaluación

Al analizar las diferentes alternativas, ventajas, desventajas y cuadro de calificación se llega a la siguiente conclusión:

El sistema de extracción se lo realizará en forma de Winche eléctrico, de acuerdo a las especificaciones requeridas en la tesis.

## 4.7 MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MESA Y DEMÁS PARTES QUE CONFORMAN EL EQUIPO DE TREFILADO

Para la construcción de las distintas partes del equipo de trefilado, se utilizará los siguientes materiales:

- Acero ASTM A 36
- Acero ASTM A 500 C
- AISI 1018
- AISI 1045

### 4.7.1 PROPIEDADES ACERO ASTM A36

El acero ASTM A36 es un material que por sus características y propiedades se ha convertido en el más usado por la industria ecuatoriana por ser utilizado en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, además por la variedad que presenta y sobre todo por la disponibilidad en el mercado.

El acero ASTM A 500 C es la designación para los perfiles cuadrados y redondos, el AISI 1018 para barras solidas (ejes) y el AISI 1045 para barras cuadradas sólidas. En la Tabla 4.24 se presenta las propiedades mecánicas de los Materiales.

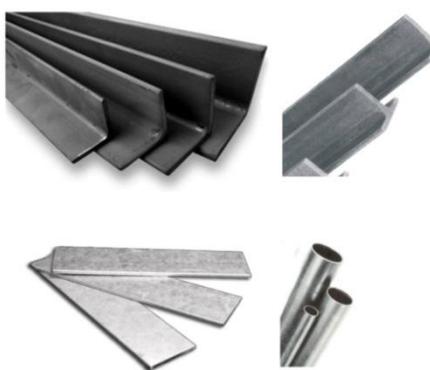
**Tabla 4. 24 Propiedades Mecánicas de los Materiales a Utilizar**

| Material                    | ASTM A 36                 | ASTM A 500 C              | AISI 1018              | AISI 1045              | AISI 4340              |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Densidad</b>             | 7850 (kg/m <sup>3</sup> ) | 7850 (kg/m <sup>3</sup> ) | 7870 Kg/m <sup>3</sup> | 7870 Kg/m <sup>3</sup> | 7840 Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Módulo Elástico</b>      | 200 Gpa                   | 140 Gpa                   | 205 GPa                | 200 GPa                | 210 GPa                |
| <b>Esfuerzo de Fluencia</b> | 250 MPa                   | 345 MPa                   | 370 MPa                | 530 MPa                | 855 MPa                |
| <b>Esfuerzo de Rotura</b>   | 410 MPA                   | 425 MPa                   | 440 MPa                | 630 MPa                | 965 MPa                |

Fuente: Fuente: SHIGLEY J. Diseño en Ingeniería mecánica 9 Ed

#### 4.7.2 FORMAS DE ACERO ASTM A36

El acero A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: planchas, perfiles estructurales, tubos, láminas. En la Figura 4.15 se muestra algunos ejemplos de perfiles.



**Figura 4. 15 Perfiles Acero ASTM A36**

#### 4.7.3 MÉTODO DE UNIÓN

Los métodos más comúnmente usados son los menos costosos y rápidos como la soldadura por arco metálico protegido, (SMAW, Shielded metal arc welding, ver Figura 4.16), soldadura con arco metálico y gas (GMAW, Gas metal arc welding), y soldadura oxiacetilénica. El acero A36 es también comúnmente atornillado y remachado en las aplicaciones estructurales: edificios, puentes, torres, etc.



**Figura 4. 16 Soldadura SMAW**

## 4.8 ELECTRODO A USARSE EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA MESA Y DEMÁS PARTES QUE CONFORMAN EL EQUIPO DE TREFILADO

Para realizar las soldaduras en los diferentes componentes del equipo, se utilizara dos tipos de electrodo, el E7018 para las uniones que soportaran mayor esfuerzo y el electrodo E6011 para las uniones que soporten menor esfuerzo, todas la uniones están especificadas en los planos del Anexo A.

### 4.8.1 PROPIEDADES DEL ELECTRODO E 7018

Es un electrodo de bajo hidrógeno, tiene una gran velocidad de aportación y deposita un material capaz de superar los más severos controles radiográficos, admite la soldadura en todas las posiciones y puede aplicarse con corriente alterna o con corriente continua y polaridad inversa. En la Tabla 4.25 se presenta las propiedades mecánicas de los electrodos.

**Tabla 4. 25 Propiedades Mecánicas E 7018 y E6011**

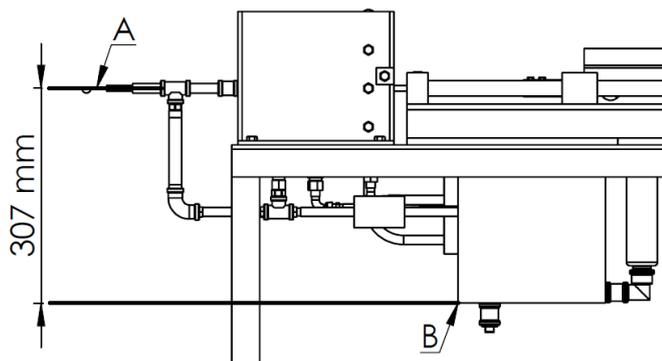
| <b>Electrodo</b>                 | <b>E7018</b> | <b>E6011</b> |
|----------------------------------|--------------|--------------|
| <b>Resistencia a la Tracción</b> | 482 MPa      | 427 MPa      |
| <b>Limite de fluencia</b>        | 393 MPa      | 345 MPa      |
| <b>Amperaje de operación</b>     | 120 - 150    | 80 - 120     |
| <b>Longitud</b>                  | 350 mm       | 350 mm       |

Fuente: (Budynas, 2012).

## 4.9 BOMBAS PARA LUBRICACIÓN Y REFRIGERACIÓN

### 4.9.1 BOMBA DE LUBRICACIÓN

La función de esta bomba sumergible es proporcionar un flujo y presión constante de aceite limpio a todos los componentes que tienen fricción durante el funcionamiento del equipo de trefilado Figura 4.17.



**Figura 4. 17 Esquema de ubicación de la bomba**

### **Ejemplo de cálculo de presión y potencia de la bomba**

En la Figura 4.15 se puede observar el esquema de ubicación de la bomba de lubricación.

$$\frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\rho g} + Z_A = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\rho g} + Z_B \quad (4.9)$$

$$\frac{V_A^2}{2g} = \frac{V_B^2}{2g}$$

$$\frac{P_A}{\rho g} + Z_A = \frac{P_B}{\rho g} + Z_B$$

$$\frac{P_{Atm}}{\rho g} + Z_A = \frac{P_{Atm}}{\rho g} + \frac{P_{Bomba}}{\rho g} + Z_B$$

$$P_{Bomba} = (Z_A - Z_B) \rho g$$

Donde:

V = Velocidad del fluido en la sección considerada (m/s)

P = Presión a lo largo de la línea de corriente (Pa)

z = Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia (m)

$P_{Atm}$  = Presión atmosférica (Pa)

$P_{Bomba}$  = Presión de la Bomba (Pa)

$\rho$  = Densidad del fluido ( $800 \text{ Kg/m}^3$ )

g = aceleración gravitatoria ( $9.8 \text{ m/s}^2$ )

Q = Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$$P_{Bomba} = (0.307 - 0) \text{ m} \left( 800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 2406 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{potencia}} = Q \times P_{\text{Bomba}}$$

$$P_{\text{potencia}} = 2.5 \times 10^{-5} \times 3008.6 = 0.06 \text{ W}$$

#### 4.9.2 BOMBA DE REFRIGERACIÓN

La función de esta bomba sumergible es proporcionar un flujo y presión constante de refrigerante al dado de trefilación durante el funcionamiento del equipo de trefilado Figura 4.18.



**Figura 4. 18 Bomba 40W**

En la tabla 4.26 se presentan las propiedades de la bomba sumergible que se utilizará en el equipo de trefilado.

**Tabla 4. 26 Propiedades de bomba sumergible 40W**

|                    |                |
|--------------------|----------------|
| hmax               | 180cm          |
| Tasa de flujo      | 500l/h         |
| Control de flujo   | afirmativa     |
| Conexión de salida | 1/4"           |
| Voltaje            | 120v, 220-240v |
| Frecuencia         | 50/60hz        |
| Vatios             | 40w            |

Fuente: Fichas Técnicas GIANT

**Se selecciona 2 bombas sumergibles de 40 W tanto para lubricar y refrigerar.**

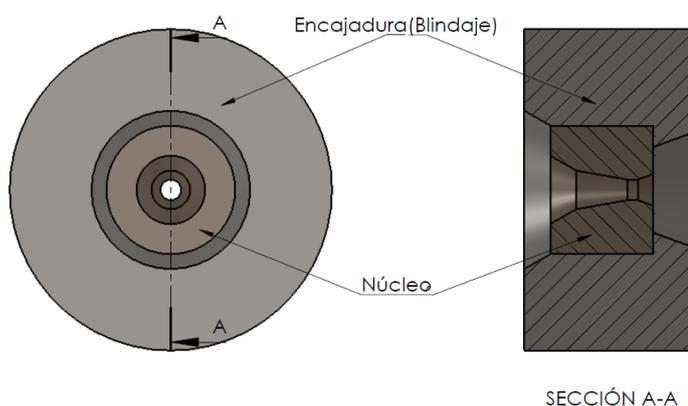
## CAPÍTULO 5

### DISEÑO DEL EQUIPO DE TREFILADO

#### 5.1 DISEÑO HILERA DE TREFILADO

Siendo el dado la herramienta de trabajo en el proceso de trefilado (Figura 5.1), es importante tomar en cuenta los diferentes parámetros en el diseño para su mejor aprovechamiento, de esta forma se procede con la selección de los parámetros que interviene en el dado, mediante las tablas presentadas en esta sección.

##### 5.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO



**Figura 5. 1 Dado de trefilado**

De los diferentes parámetros que intervienen en el proceso de trefilado, se consideran los siguientes: el material constitutivo del dado y el material que se va a trefilar ya que de ellos depende básicamente el dimensionamiento del dado.

Como ya se explicó en el capítulo anterior, el material del núcleo del dado será un acero de herramientas AISI D3, el cual es usado para trefilación de metales no ferrosos.

El acero en mención corresponde en el mercado local al acero BÖHLER ESPECIAL K100. Y para aumentar su dureza, será sometido al siguiente tratamiento térmico, obtenido del catálogo de aceros Böhler.

### Temple:

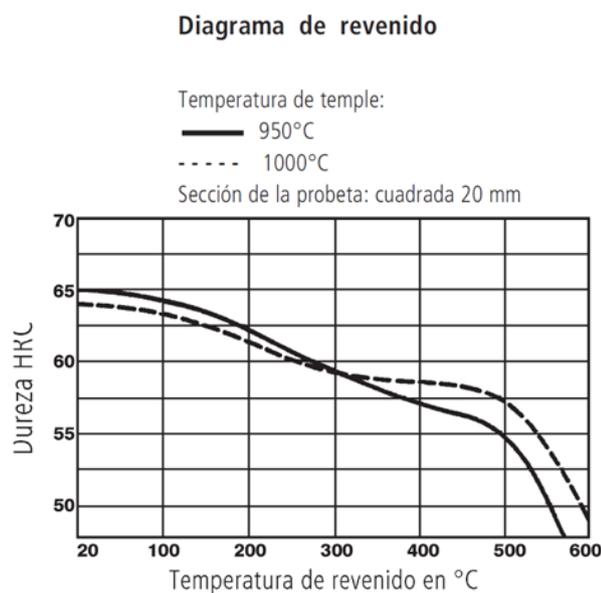
Consiste en el calentamiento del acero hasta una temperatura de Austenización (950°C), seguido de un tiempo de sostenimiento (30min) a dicha temperatura para que ocurra la transformación de la estructura.

Luego el acero es enfriado, en aceite a una velocidad tal que la dureza aumenta de manera considerable debido a la formación de martensita.

### Revenido:

Calentamiento hasta la temperatura de revenido (200°C) con permanencia en el horno: 1 hora por cada 20 mm de espesor de la pieza, pero como mínimo 2 horas y enfriamiento al aire, los valores aproximados de la dureza alcanzable después de revenido figuran en el diagrama de revenido. Figura. 5.2

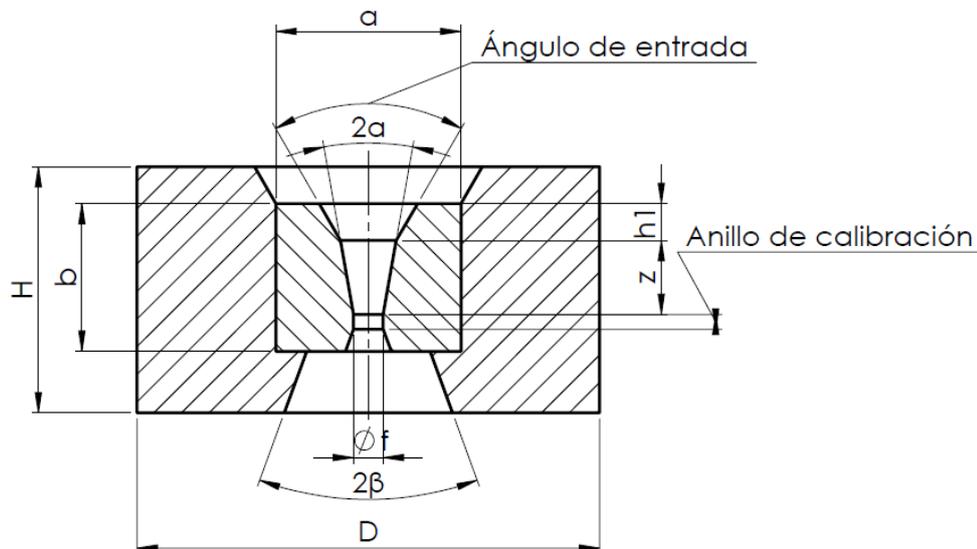
Después del tratamiento térmico se obtiene una dureza de 62 HRC.



**Figura 5. 2 Diagrama de revenido**

### 5.1.2 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL DADO

Para escoger los parámetros del dado se necesita el diámetro de la barra a ser trefilado, y con este dato ingresamos a las tablas para obtener las medidas del dado, en la Figura 5.3 se muestra los parámetros a determinar.



**Figura 5. 3 Parámetros que controlan el dado**

El primer parámetro a elegir es  $2\alpha$ , para este ángulo se debe elegir en función de la deformación ideal del material, ya que si  $2\alpha$  es demasiado pequeña existirá demasiada fricción por lo que se producirá mayor calor, dando como resultado alambre de mala calidad; y si  $2\alpha$  es demasiado grande se producirá una deformación desigual del material y puede causar roturas, en la Tabla 5.1 se muestra los valores del cono de entrada de las hileras según el tipo de alambre o barra y su diámetro.

**Tabla 5. 1 Tamaño del ángulo de reducción para diferentes materiales**

| Ø de entrada | Aluminio         | Cobre            | Latón            | Bronce           | Acero 0,1 % C    | Acero 0,35 % C   |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| mm           | 2 $\alpha^\circ$ |
| 0,20 - 0,49  | 20               | 18               | 12               | 10               | 10               | 8                |
| 0,50 - 0,99  | 20               | 18               | 12               | 10               | 10               | 8                |
| 1,00 - 1,49  | 20               | 18               | 12               | 10               | 10               | 8                |
| 1,50 - 1,99  | 20               | 18               | 14               | 10               | 10               | 8                |
| 2,00 - 2,99  | 20               | 18               | 14               | 12               | 12               | 10               |
| 2,50 - 2,99  | 20               | 18               | 14               | 12               | 12               | 10               |
| 3,00 - 3,99  | 20               | 18               | 16               | 14               | 14               | 12               |
| 4,00 - 4,99  | 22               | 20               | 18               | 16               | 16               | 14               |
| 5,00 - 5,99  | 22               | 20               | 18               | 16               | 18               | 16               |
| 6,00 - 6,99  | 22               | 20               | 20               | 18               | 20               | 18               |
| 7,00 - 7,99  | 24               | 22               | 20               | 18               | 20               | 18               |
| 8,00 - 8,99  | 24               | 22               | 20               | 20               | 20               | 18               |
| 9,00 - 9,99  | 24               | 22               | 20               | 20               | 20               | 20               |
| 10 - 10,99   | 24               | 22               | 20               | 20               | 20               | 20               |
| 11 - 12,00   | 24               | 22               | 20               | 20               | 20               | 20               |

Fuente: Apuntes del Ing. Hernán Ojeda

De acuerdo con la Tabla 5.1 los ángulos de reducción son:

- **2 $\alpha^\circ$  para el Aluminio: 24 $^\circ$**
- **2 $\alpha^\circ$  para el Cobre: 22 $^\circ$**

#### **Ángulo de salida (2 $\beta^\circ$ ):**

El valor de 2 $\beta$  es de 30 $^\circ$  - 60 $^\circ$  con una tolerancia de  $\pm 5^\circ$ , el valor de 2 $\beta^\circ$  es de 40 $^\circ$  para los dos dados.

En el núcleo se encuentra el ángulo de entrada, ángulo de salida, ángulo de reducción, campana, aproximación y anillo de calibración. Sus principales parámetros son: el diámetro del núcleo (a) y la altura del núcleo (b), sus valores se los puede apreciar en la Tabla 5.2

**Tabla 5. 2 Parámetros de la geometría del dado**

| $\Phi$ de salida | Dimensiones del núcleo |          | Dimensiones de la encajadura |          |
|------------------|------------------------|----------|------------------------------|----------|
|                  | Diámetro a             | Altura b | Diámetro D                   | Altura H |
| mm               | mm                     | mm       | mm                           | mm       |
| 5 - 10           | 30                     | 24       | 75                           | 40       |
| 9,1 - 14         | 35                     | 24       | 75                           | 40       |
| 13,1 - 16        | 40                     | 24       | 130                          | 45       |
| 15,1 - 18        | 45                     | 24       | 130                          | 45       |
| 17,1 - 22        | 50                     | 25       | 150                          | 50       |
| 21,1 - 24        | 55                     | 25       | 150                          | 50       |
| 23,1 - 28        | 60                     | 25       | 150                          | 50       |
| 27,1 - 30        | 65                     | 25       | 170                          | 55       |
| 29,1 - 34,5      | 70                     | 25       | 200                          | 60       |
| 34,6 - 37,5      | 75                     | 28       | 250                          | 60       |
| 37,6 - 40        | 80                     | 28       | 250                          | 60       |
| 40,1 - 45        | 85                     | 28       | 250                          | 60       |

Fuente: Apuntes del Ing. Hernán Ojeda.

De acuerdo con la Tabla 5.2 los valores asignados para los parámetros restantes son los siguientes:

**Diámetro del núcleo (a):** 30 mm

**Campana (h1):** 6 mm con un ángulo de 60° que sirve para que entre la mayor lubricación posible en el dado.

**Aproximación (z):** 10 mm

**Anillo de calibración:**

- Para el Aluminio: 3,3 mm
- Para el Cobre: 3,7 mm

**Altura del núcleo (b):** 24 mm

**Diámetro de la encajadura (D):** 75 mm

**Altura de la encajadura (H):** 40 mm

**Diámetro final ( $\Phi_f$ ):**

- Para el Aluminio: 6,6 mm

- **Para el Cobre:** 7,4 mm

### 5.1.3 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL DADO

#### 5.1.3.1 Parámetro Delta ( $\Delta$ ), (Wright, 2011).

Es la forma de la zona de deformación plástica en el dado la cual soporta el trabajo o esfuerzo de la operación.

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} * (1 + \sqrt{1 - r})^2 \quad (5.1)$$

Donde:

$\alpha$  = Ángulo de reducción expresado en radianes.

$r$  = reducción por paso, y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$r = 1 - \frac{A_f}{A_o} \quad (5.2)$$

- $r$  para el aluminio:

$$r = 1 - \frac{34,21}{41,28}$$

$$r = 0.17$$

- $r$  para el cobre recocido:

$$r = 0.14$$

Por lo tanto  $\Delta$  es:

- Para el aluminio:

$$\Delta = \frac{0,21}{0,17} * (1 + \sqrt{1 - 0,17})^2$$

$$\Delta = 4,51$$

- Para el cobre recocido:

$$\Delta = 5,04$$

Para comprobar que  $\Delta$  calculado es correcto, ingresamos a la Tabla 5.3, e interpolamos para determinar el  $\Delta$  de acuerdo a nuestros parámetros.

**Tabla 5. 3 Parámetros de la geometría del dado**

| Ángulo de reducción | % de Reducción |       |      |      |      |      |      |
|---------------------|----------------|-------|------|------|------|------|------|
|                     | 5              | 10    | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   |
| 2                   | 2,72           | 1,33  | 0,86 | 0,63 | 0,49 | 0,39 | 0,33 |
| 4                   | 5,44           | 2,65  | 1,72 | 1,25 | 0,97 | 0,79 | 0,65 |
| 6                   | 8,17           | 3,98  | 2,58 | 1,88 | 1,46 | 1,18 | 0,68 |
| 8                   | 10,89          | 5,30  | 2,44 | 2,51 | 1,94 | 1,57 | 1,30 |
| 10                  | 13,61          | 6,63  | 4,30 | 3,13 | 2,43 | 1,96 | 1,63 |
| 12                  | 16,33          | 7,95  | 5,16 | 3,76 | 2,92 | 2,36 | 1,95 |
| 14                  | 19,06          | 9,28  | 6,02 | 4,38 | 3,40 | 2,75 | 2,28 |
| 16                  | 21,78          | 10,60 | 6,88 | 5,01 | 3,89 | 3,14 | 2,60 |

Fuente: (Wright, 2011).

Interpolando se obtuvo un valor de:

- Para el aluminio:  $\Delta = 4,6$
- Para el cobre:  $\Delta = 5,20$

Donde:

Un valor bajo de  $\Delta$  implica una zona de deformación menor y más larga con mucho contacto con el dado, (trabajo de fricción excesivo).

Un valor alto de  $\Delta$  implica una zona de deformación corta con un contacto limitado con el dado, (excesivo trabajo redundante).

### 5.1.3.2 Presión del dado, (Wright, 2011)

$$P = \bar{Y}_f * \left( \frac{\Delta}{4} + 0.6 \right) \quad (5.3)$$

Donde:

$\bar{Y}_f$  = Esfuerzo de fluencia Promedio, (Grover, 2007).

$$\bar{Y}_f = \frac{K \times \epsilon^n}{1+n} \quad (5.4)$$

Donde:

K=Coeficiente de resistencia →Tabla 2.2

n=Factor de endurecimiento →Tabla 2.2

$$\bar{Y}_f = \frac{450 \times 0.17^{0.33}}{1+0.33} = 183.24 \text{ MPa}$$

$$P = 183.24 * \left( \frac{5,04}{4} + 0.6 \right) = 340.83 \text{ MPa}$$

### 5.1.3.3 Cálculo del factor de seguridad del dado

El número de dureza Brinell ofrece una manera muy conveniente de calcular con rapidez la resistencia última a la tensión ( $S_{ut}$ ) del material, a partir de la siguiente relación (Budynas, 2012):

$$S_{utK100} = 3.41 * HB \quad (5.5)$$

Donde

HB del K100 es de 685.

$S_{utK100}$  = Resistencia última a la tensión del Acero K100

$$S_{utK100} = 3.41 * 688 = 2346 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_{utK100}}{P}$$

Donde:

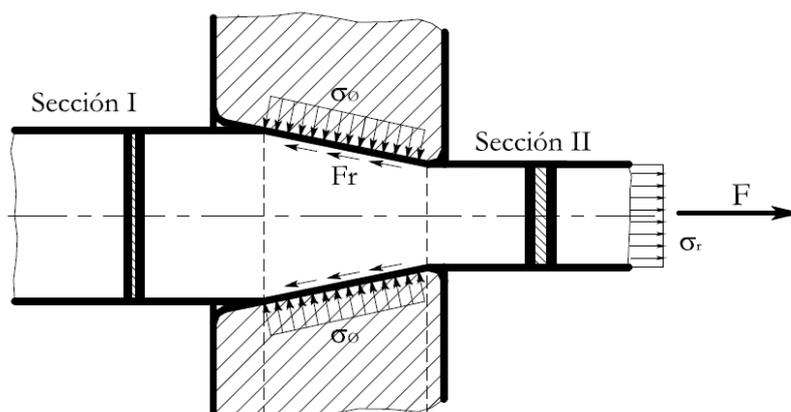
FS = Factor de Seguridad

P = Presión del dado (Mpa)

$$FS = \frac{2346}{340,83} = 6.7$$

## 5.2 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE IMPORTANCIA EN EL TREFILADO

En esta sección se revisará el cálculo de esfuerzos y fuerza en el proceso de trefilado, por lo que se requiere del coeficiente de resistencia  $K$  y exponente de endurecimiento por deformación  $n$  y el coeficiente de fricción  $u$  de las Tabla 2.1, y Tabla 2.2, además se utilizarán los ángulos de trefilado de los datos determinados anteriormente, en la Figura 5.4 se muestra cómo actúan estas variables.



**Figura 5. 4 variables del trefilado**

La fuerza de estirado (Heinz, 2006) se puede determinar con la siguiente fórmula:

$$F_{\text{est}} = \frac{A_f \cdot \sigma_d}{\eta v} \quad (5.6)$$

Donde:

$\sigma_T$  = Esfuerzo de Trefilado

$A_f$  = Área final de la barra

$\eta v$  = Eficiencia de deformación

### 5.2.1 CÁLCULO DEL ÁREA INICIAL Y FINAL

**Datos:**

Material: Cu 99.90% Electrolítico

$D_o$  = Diámetro Inicial (8.00 mm medida comercial)

$D_f$  = Diámetro Final (7.40 mm)

### Cálculos

$$A_o = \pi * \left(\frac{D_o}{2}\right)^2 \quad (5.7)$$

$$A_o = \pi * \left(\frac{8}{2}\right)^2 = 50.27 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \pi * \left(\frac{D_f}{2}\right)^2$$

$$A_f = \pi * \left(\frac{7.40}{2}\right)^2 = 43.01 \text{ mm}^2$$

### 5.2.2 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE TRABAJO EN FRÍO

Para este cálculo se utiliza la ecuación 2.1, obteniendo los siguientes resultados:

$$\%TF = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100$$

$$\%TF = \frac{50.27 - 43.01}{43.01} * 100\%$$

$$\%TF = 14.44 \%$$

Para cobre, aluminio, latón, bronce y aceros de bajo contenido de carbono el porcentaje de trabajo en frío es menor al 25%.

### 5.2.3 CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN REAL DEL MATERIAL ( $\epsilon$ ), (Grover, 2007).

Porcentaje instantáneo de cambio en la longitud de una probeta en un ensayo mecánico. Es igual al logaritmo natural de la relación de la longitud en cualquier instante con la longitud original.

$$\epsilon = \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (5.8)$$

$$\epsilon = \ln \frac{50.27}{43.01} = 0.17$$

### 5.2.4 CÁLCULO DEL ESFUERZO DE FLUENCIA PROMEDIO (YF)

Calculado en la sección 5.1.3.2.

### 5.2.5 CÁLCULO FACTOR PARA LA DEFORMACIÓN NO HOMOGÉNEA ( $\phi$ ), (Grover, 2007).

O también conocido como trabajo redundante, es el que contribuye a un excesivo endurecimiento por deformación, particularmente en la superficie del alambre o barra y limita el número de pasos y la reducción total que se puede dar antes que el recocido sea necesario, y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\phi = 0.88 + 0.12 \times \frac{D}{L_c} \quad (5.9)$$

### 5.2.6 CÁLCULO DE LA LONGITUD DE CONTACTO ( $L_c$ ), (Grover, 2007).

Hace referencia al contacto del trabajo con el troquel de trefilado, mm (in). Y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2 \times \sin \alpha} \quad (5.10)$$

$$L_c = \frac{8.00 - 7.40}{2 \times \sin 11^\circ} = 1.57 \text{ mm}$$

### 5.2.7 CÁLCULO DEL DIÁMETRO PROMEDIO (D), (Grover, 2007).

Es el valor promedio de los valores de los diámetros inicial y final y se representa en la ecuación.

$$D = \frac{D_o + D_f}{2} \quad (5.11)$$

$$D = \frac{8.00 + 7.40}{2} = 7.70 \text{ mm}$$

Por lo tanto la deformación no homogénea es:

$$\phi = 0.88 + 0.12 \times \frac{7.70}{1.57} = 1.48$$

## 5.2.8 CÁLCULO DE LA TENSION QUE SE PRODUCE EN EL TREFILADO

El esfuerzo de trefilado (Heinz, 2006) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \cdot \phi \cdot \epsilon \cdot \left[ 1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\epsilon} \right] \quad (5.12)$$

Donde:

$\epsilon$  = Deformación real del material

$\bar{Y}_f$  = Esfuerzo de fluencia promedio

$\phi$  = Factor para la deformación no homogénea o trabajo redundante

$\mu$  = Coeficiente de fricción (0.03) → Tabla 2.3

$\alpha = 11^\circ$  → Ángulo de reducción (Calculado en la sección 5.1.2)

$$\sigma_d = 183.24 \cdot 1.48 \cdot 0.16 \cdot \left[ 1 + \frac{0.03}{11} + \frac{2}{3} \cdot \frac{11}{0.16} \right]$$

$$\sigma_d = 82.91 \text{ MPa}$$

### Cálculo eficiencia de deformación

La eficiencia de deformación depende de:  $\alpha$ ,  $\mu$  y  $r$ , y se la puede determinar en la Figura 5.5.

Datos:

$$\alpha = 11^\circ$$

$$\mu = 0.03$$

$$r_{CuO} = 0.14$$

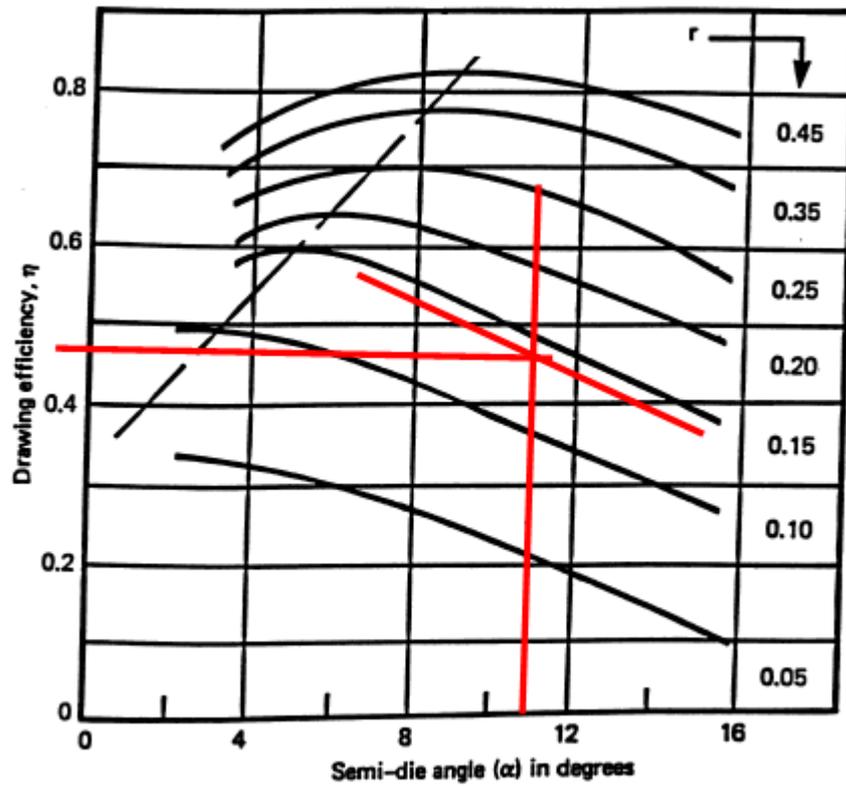


Figura 5. 5 Eficiencia de deformación, (Zabaras, 2000).

De esta forma se determinó que la  $\eta_v$  para el cobre recocido es:

$$\eta_v = 0.46$$

Consecuentemente la fuerza de estirado o trefilado es:

$$F_{\text{est}} = \frac{A_f * \sigma_d}{\eta_v}$$

$$F_{\text{est}} = \frac{43.01 * 82.91}{0.46}$$

$$F_{\text{est Cu}} = 7751.67 \text{ N}$$

En la Tabla 5.4 se presenta los resultados para los dos materiales.

**Tabla 5. 4 Fuerza de Trefilado y % de deformación**

| Material                     | Composición Material                           | Diámetro inicial | Diámetro final | Yf            | $\sigma_d$   | % de trabajo en frío | Fuerza de trefilación |             |
|------------------------------|--|------------------|----------------|---------------|--------------|----------------------|-----------------------|-------------|
|                              |  | Milímetro        | Milímetro      | MPa           | MPa          | %                    | N                     | Tf          |
| Aluminio                     | Al 5052 Prodax                                 | 7,20             | 6,60           | 148,05        | 72,87        | 16,00                | 5304,82               | 0,54        |
| <b>Cobre</b>                 | <b>C110 99.99%</b>                             | <b>8,00</b>      | <b>7,40</b>    | <b>183,24</b> | <b>82,91</b> | <b>14,44</b>         | <b>7751,66</b>        | <b>0,79</b> |
| Cobre                        | C110 99.99% O                                  | 8,00             | 7,40           | 74,98         | 33,92        | 14,44                | 3242,50               | 0,33        |
| <b>Yf</b>                    | Esfuerzo de fluencia promedio                  |                  |                |               |              |                      |                       |             |
| <b><math>\sigma_d</math></b> | Esfuerzo que se produce durante la trefilación |                  |                |               |              |                      |                       |             |

De esta forma la fuerza para el diseño es de 8000 N

### 5.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR

La potencia (Heinz, 2006) requerida en una operación de trefilado es la fuerza multiplicada por la velocidad de salida del trabajo.

$$P = F \times V \quad (5.13)$$

Donde:

P = Potencia en W

F = Fuerza de Trefilado

V = Velocidad de trefilado, se muestra en la Tabla 5.5.

La velocidad depende de la sección y propiedades del material.

**Tabla 5. 5 Velocidades de trefilado**

| Material                   | Diámetro | Velocidad |
|----------------------------|----------|-----------|
|                            | (mm)     | (m/min)   |
| Materiales no Ferrosos     | 5 - 10.  | 1 -4.     |
| Aceros bajo al carbono     | 10 - 20. | 8-17,5    |
| Aceros medianos al carbono | 20 - 50  | 6- 15.    |

Fuente: Ing. HERNÁN Ojeda, Procesos de Manufactura II.

**De esta forma la velocidad de trefilado para el cálculo de la potencia es de 4 m/min = 0.0667 m/s para materiales no ferrosos.**

$$P_{\max} = 8000N \times 0.0667 \text{ m/s} = 533.6 \text{ W}$$

Para seleccionar un reductor debe tomarse en cuenta que clase de motor lleva nuestra máquina: motor eléctrico, de combustión, o cualquier otro; la máquina que se va a mover; las horas diarias a operar, la velocidad de entrada al reductor, la velocidad de salida y el par de torsión requeridos.

$$\text{Potencia (P)} = FS \times W \quad (5.14)$$

Donde:

FS = Factor de Servicio

Según la Tabla 5.6 escogemos el siguiente factor de servicio

**Tabla 5. 6 Factores de servicio para selección de motor-reductores**

| Factores de Servicio |                               | Clasificación de Carga |       |                  |       |                |       |
|----------------------|-------------------------------|------------------------|-------|------------------|-------|----------------|-------|
|                      |                               | Uniforme               |       | Impacto moderado |       | Impacto fuerte |       |
| Motor primario       | Duración del servicio         | AGMA                   | Cyclo | AGMA             | Cyclo | AGMA           | Cyclo |
|                      | 1/2 hora al día (ocasional)   | 0,5                    | 0,5   | 0,8              | 0,8   | 1,25           | 1,2   |
| Motor eléctrico      | 3 horas al día (intermitente) | 0,8                    | 0,8   | 1                | 1     | 1,5            | 1,35  |
|                      | Hasta 10 horas al día         | 1                      | 1     | 1,25             | 1,2   | 1,75           | 1,5   |
|                      | 24 horas al día               | 1,25                   | 1,2   | 1,5              | 1,35  | 2              | 1,6   |

Fuente: Catálogo de Reductores de velocidad Marca Cyclo

$$P = 1,25 \times 533.6 = 667 \text{ W}$$

$$P = 0.89 \text{ HP}$$

**De esta forma la potencia del motorreductor es de 1HP.**

Cálculo de las rpm de salida del reductor (Heinz, 2006).

$$\text{rpm} = \frac{V \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{d \times \pi} \quad (5.15)$$

Donde:

V = velocidad de trefilado.

d = diámetro del eje de salida (0.0635m), calculado sección 5.6.2.

$$\text{rpm}_{\text{max}} = \frac{0.0667 \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{0,0635 \times \pi} = 20.05 \approx \mathbf{21RPM}$$

Cálculo del torque del reductor:

$$T = \frac{9550 \times P(\text{KW})}{\text{rpm}} \quad (5.16)$$

$$T = \frac{9550 \times 0.74570}{21} = \mathbf{339 \text{ N-m}}$$

Con estos parámetros, se ingresa a la Tabla 5.7 y se selecciona un motorreductor de una marca conocida (Transtecno), con las siguientes características:

**Tabla 5. 7 Parámetros de motor reductores marca Transtecno**

| 60 Hz - n1 1750 [min-1] |         |      |     |    |
|-------------------------|---------|------|-----|----|
| P1                      | n2      | M2   | sf  | i  |
| [kW]                    | [min-1] | [Nm] |     |    |
| 0.75                    | 21      | 339  | 1,3 | 80 |

Donde:

n1 [min-1] = Velocidad de entrada

n2 [min-1] = Velocidad de salida

i = Relación de reducción

P1 [kW] = Potencia en la entrada

M2 [Nm] = Par en la salida en función de P1

sf = Factor de servicio

## 5.4 DISEÑO DEL BASTIDOR

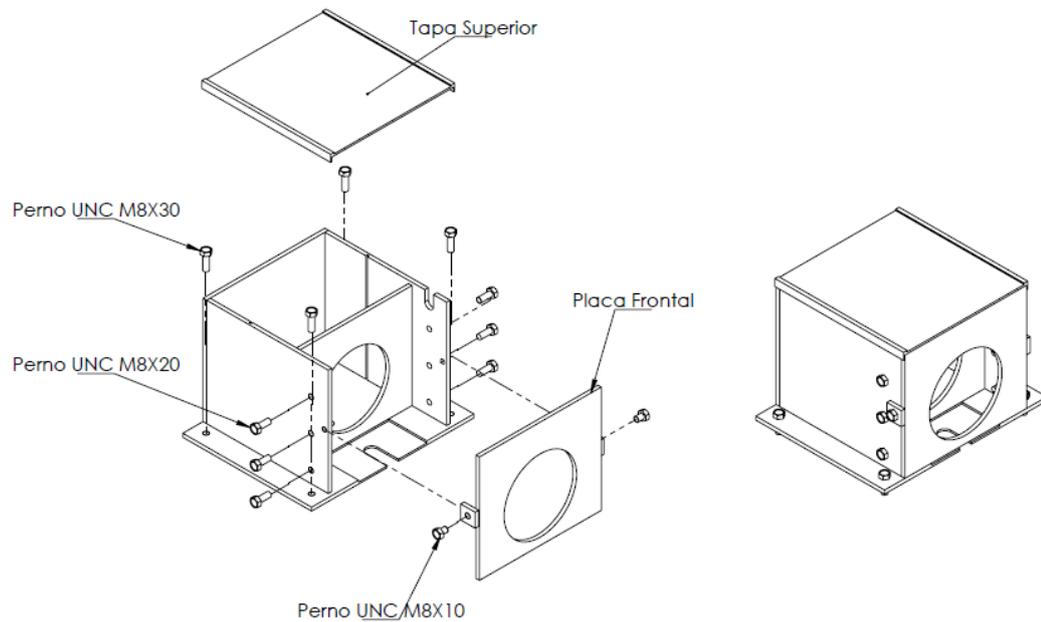
A partir de esta sección los factores de seguridad van a estar en el rango de  $FS > 1.5$  y tomando en cuenta que el factor de seguridad es solo una guía para tener un punto de partida en el diseño y obviamente queda sujeto al juicio del diseñador (Norton, 1999), en la Tabla 5.8, se presenta algunos criterios de factores de seguridad.

**Tabla 5. 8 Factores de Seguridad**

| Información                                     | Calidad de la Información                                 | Factor |
|---|---|--------|
| <b>Datos del Material</b>                       | Material utilizado fue probado                            | 1,3    |
|   | Datos representativos a partir de pruebas                 | 2      |
|   | Datos suficientemente representativos a partir de pruebas | 3      |
|   | Datos poco representativos a partir de pruebas            | 5      |
| <b>Entorno donde se utiliza</b>                 | Idénticas a las condiciones de prueba del material        | 1,3    |
|   | Entorno en condiciones normales                           | 2      |
|   | Entorno moderadamente agresivo                            | 3      |
|   | Entorno extremadamente agresivo                           | 5      |
| <b>Modelo de análisis de cargas y esfuerzos</b> | Modelos probados con experimentación                      | 1,3    |
|   | Modelos con precisión                                     | 2      |
|   | Modelos con aproximación                                  | 3      |
|   | Modelos con una burda aproximación                        | 5      |

Fuente: (Norton, 1999).

### 5.4.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO



**Figura 5. 6 Bastidor**

El bastidor sirve de almacenamiento del lubricante para la trefilación, a la vez que sirve de soporte de la caja porta hileras, debe ser lo suficientemente rígida y estable para facilitar la operación de trefilado. Está constituida por planchas de acero A36 de 6mm de espesor las cuales se unen mediante soldadura por arco eléctrico, utilizando como material de aporte electrodos E-7018.

En la parte superior se encuentra una tapa de acrílico, la cual impide que ingrese suciedad en la cavidad interna del bastidor, la parte frontal contiene una tapa que es juntada mediante 2 pernos UNC M8X10 la cual sirve para el fácil ingreso y salida de la caja porta hileras, Figura 5.6.

La caja porta hileras se sujeta mediante 6 pernos UNC M8X20, 3 en la parte lateral izquierda y 3 en la parte lateral derecha, y el bastidor va emperrado a la mesa de trabajo mediante 4 pernos UNC M8X25.

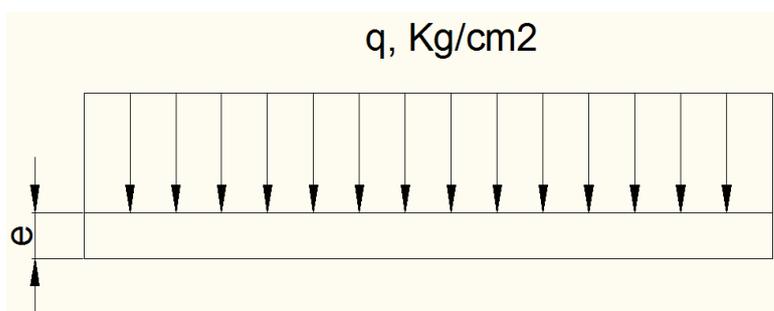
## 5.4.2 CÁLCULO EN DETALLE

### 5.4.2.1 Cálculo del espesor de la plancha

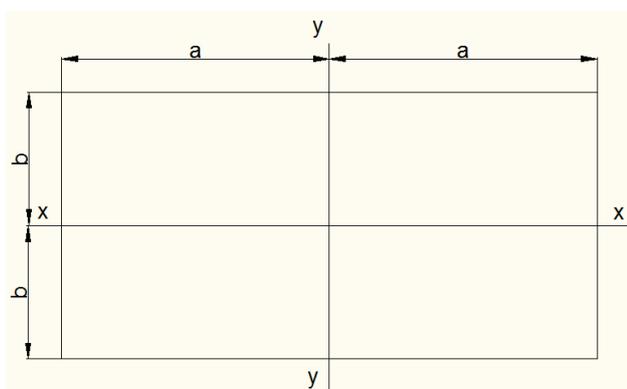
El material y las propiedades de nuestro diseño son:

- Acero ASTM A-36, ver Tabla 4.24.

En la Figura 5.7 se puede observar el diagrama de distribución de carga de la plancha de acero, y en la Figura 5.8 se observa un esquema de la plancha de acero.



**Figura 5. 7 Diagrama de distribución de carga**



**Figura 5. 8 Esquema de la plancha de acero**

Donde:

$q$  = Carga uniforme repartida sobre toda la placa ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )

$a$  = Longitud de la placa (10.5 cm)

$b$  = Alto de la placa (9.25 cm)

Peso = Peso carga aplicada (816 Kg)

$A$  = Área de la placa ( $\text{cm}^2$ )

El área de la plancha se determina con la ecuación 5.18.

$$A=2*a*2*b \quad (5.17)$$

$$A=2 \times 10.5 \times 2 \times 9.25$$

$$A= 388.5 \text{ cm}^2$$

La carga se determina mediante la ecuación 5.19.

$$q = \frac{\text{Peso}}{A} \quad (5.18)$$

$$q = \frac{816}{388.5}$$

$$q = 2.1 \text{ Kg/cm}^2$$

El cálculo de la tensión máxima admisible se realiza con la siguiente ecuación.

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{max}}{FS} \quad (5.19)$$

El esfuerzo de fluencia del acero A36 ( $\sigma_{ym} = 250 \text{ Mpa}$ )

$$\sigma_{max} = 2551 \text{ Kg/cm}^2$$

El Factor de Diseño  $FS = 2$ , Datos del material.

$$\tau_{adm} = \frac{2551}{2}$$

$$\tau_{adm} = 1275.5 \text{ Kg/cm}^2$$

La ecuación 5.21 determina la relación entre dimensiones principales.

$$\eta = \frac{a}{b} \quad (5.20)$$

$$\eta = 1.135$$

Donde:

$\eta$  = Relación entre dimensiones principales

**Tabla 5. 9 Valor para Placa Empotrada**

| $\eta$   | Centro de la placa |             | Centro lado mayor   | $\psi$ |
|----------|--------------------|-------------|---------------------|--------|
|          | $\varphi_x$        | $\varphi_x$ | $\varphi_{y_{max}}$ |        |
| 1        | 0,53               | 0,53        | 1,234               | 0,255  |
| 1,5      | 0,48               | 0,88        | 1,82                | 0,394  |
| 2        | 0,31               | 0,94        | 1,92                | 0,431  |
| $\infty$ | 0,30               | 1           | 2                   | 0,455  |

Fuente: (Larburu, 1991).

Con el valor de  $\eta$  se ingresa a la Tabla 5.9. Placa Empotrada (en este caso por estar empernada). E interpolando linealmente se obtiene el siguiente valor.

$$\Psi_{y_{max}} = 1.39$$

Donde:

$\Psi_{y_{max}}$  = Tensión máxima en el centro del lado mayor.

Finalmente para obtener el espesor de la placa (Larburu, 1991), se efectúa el cálculo mediante la ecuación 5.22.

$$e = \sqrt{\frac{\Psi_{y_{max}} \times q \times b^2}{\tau_{adm}}} \quad (5.21)$$

$$e = 4.43 \text{ mm} \approx 5 \text{ mm}$$

**Pero se escoge una plancha de Acero de 6 mm ó 1/4", debido a que son medidas estándar y comerciales.**

### 5.4.2.2 Selección de pernos para sujetar el bastidor

Para la selección del perno adecuado se selecciona la clase del perno y se procede a realizar los siguientes cálculos:

Cálculo del área de esfuerzo de tensión:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.22)$$

Donde:

$\sigma$  = Resistencia de prueba ( $S_p = 380$  Mpa)

A = Área de esfuerzo de tensión

F = Fuerza de estirado (8000 N)

**Tabla 5. 10 Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino**

| Diámetro mayor nominal d, mm | Serie de paso grueso |   |   | Serie de paso fino |   |   |
|------------------------------|----------------------|---|---|--------------------|---|---|
|                              | Paso p, mm           | Área de esfuerzo de tensión $A_t$ mm <sup>2</sup> | Área del diámetro menor $A_r$ mm <sup>2</sup> | Paso p, mm         | Área de esfuerzo de tensión $A_t$ mm <sup>2</sup> | Área del diámetro menor $A_r$ mm <sup>2</sup> |
| 1.6                          | 0.35                 | 1.27  | 1.07  |                    |   |   |
| 2                            | 0.40                 | 2.07  | 1.79  |                    |   |   |
| 2.5                          | 0.45                 | 3.39  | 2.98  |                    |   |   |
| 3                            | 0.5                  | 5.03  | 4.47  |                    |   |   |
| 3.5                          | 0.6                  | 6.78  | 6.00  |                    |   |   |
| 4                            | 0.7                  | 8.78  | 7.75  |                    |   |   |
| 5                            | 0.8                  | 14.2  | 12.7  |                    |   |   |
| 6                            | 1                    | 20.1  | 17.9  |                    |   |   |
| 8                            | 1.25                 | 36.6  | 32.8  | 1                  | 39.2  | 36.0  |
| 10                           | 1.5                  | 58.0  | 52.3  | 1.25               | 61.2  | 56.3  |

Fuente: (Budynas, 2012).

$$A = \frac{8000}{380} = 21.05 \text{ mm}^2$$

Al consultar la Tabla 5.11 se encuentra que un tamaño estándar apropiado de perno clase 5.8 es M8.

Datos del perno a usar:

**Tabla 5. 11 Propiedades Mecánicas del perno**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Número de clase: 5.8       |  |
| Diámetro nominal: 8 mm     |  |
| Sp = 380 MPA               | Resistencia de prueba mínima             |
| Sy = 420 MPa               | Límite elástico mínimo                   |
| Sut = 520 MPa              | Resistencia mínima a la tensión          |
| At = 36,61 mm <sup>2</sup> | Área de esfuerzo a tensión               |
| E = 207000 MPa             | Módulo de elasticidad del perno de acero |

Fuente: (Budynas, 2012).

### **Carga límite del perno (Fp):**

Es la carga máxima (fuerza) que un perno puede soportar sin sufrir una deformación permanente, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F_p = S_p \cdot A_t \quad (5.23)$$

$$F_p = 380 \times 36.61$$

$$F_p = 13911.8 \text{ N}$$

### **Precarga del perno (Fi):**

Cuando se unen dos o más partes, los pernos deben apretarse suficientemente con el fin de evitar la separación de éstas cuando las fuerzas en el sistema sean aplicadas; esto se denomina **precarga del perno**.

Para conexiones reutilizables o cargas dinámicas se calcula mediante la siguiente ecuación (Budynas, 2012):

$$F_i = 0.75 \cdot F_p \quad (5.24)$$

$$F_i = 0.75 \times 13911.8$$

$$F_i = 10433.85 \text{ N}$$

**Longitud del perno (Lt):**

$$Lt = 2d+6 \rightarrow L \leq 125, d \leq 48\text{mm} \quad (5.25)$$

$$d = 8\text{mm}$$

$$Lt = 2(8) + 6$$

$$Lt = 22 \text{ mm}$$

**Tabla 5. 12 Tamaños estándar de pernos en milímetros**

0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.16, 0.20, 0.25,  
 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.0,  
 1.1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8,  
 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.0,  
 9.0, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 28, 30, 32,  
 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160,  
 180, 200, 250, 300

Fuente: (Budynas, 2012).

De la Tabla 5.12 se selecciona un perno de 25 mm de longitud.

**Momento de Apriete (T)**

Es el esfuerzo total realizado por una persona con una llave ordinaria, y se calcula mediante la ecuación:

$$T = k \cdot F_i \cdot \frac{D_{\text{nominal}}}{1000} \quad (5.26)$$

**Tabla 5. 13 Factores del par de torsión K**

| Condición del perno              | K    |
|----------------------------------|------|
| Sin recubrimiento, acabado negro | 0.30 |
| Galvanizado                      | 0.20 |
| Lubricado                        | 0.18 |
| Con recubrimiento de cadmio      | 0.16 |
| Con Anti-Seize Bowman            | 0.12 |
| Con tuercas Bowman Grip          | 0.09 |

Fuente: (Budynas, 2012).

Donde:

$k = 0.20$  Coeficiente de torsión, tomado de la Tabla 5.13.

$$T = 16.69 \text{ Nm}$$

#### 5.4.2.3 Distancia desde el borde de la placa al centro del perno

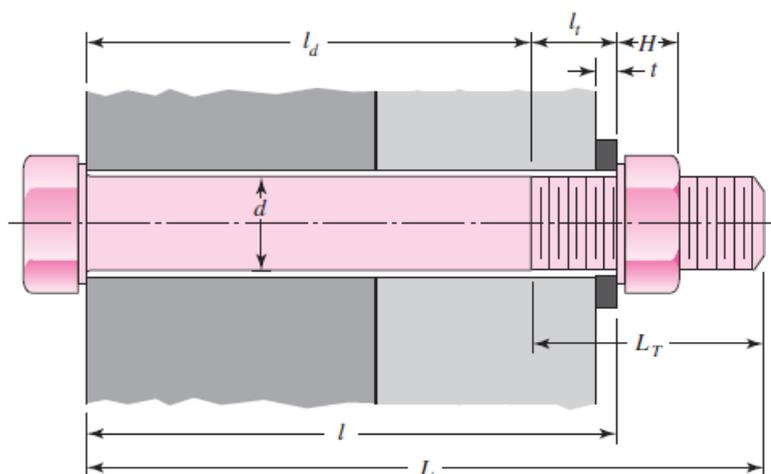
La distancia recomendada desde el borde de la tapa es:  $(1.6 - 2.5) \times$  Diámetro nominal del perno.

**Utilizando:**  $2.5 \times D_{\text{nominal}}$

$$D_{\text{borde}} = 2.5 \times D_{\text{nominal}} \quad (5.27)$$

**Dborde** = 20 mm      Distancia desde el borde de la placa al centro del agujero.

#### 5.4.2.4 Cálculo de los factores de rigidez del perno, $K_b$ , $K_m$ y $C$



**Figura 5. 9 Esquema de un perno**

En la Figura 5.9 se aprecia el procedimiento sugerido para determinar la rigidez del sujetador. (Budynas, 2012).

Espesor de la placa (h):

$$h = 6 \text{ mm}$$

Longitud roscada (LT): se calcula mediante la ecuación:

$$LT = 2 \times D_{\text{nominal}} + 6 \quad (5.28)$$

$$LT = 22 \text{ mm}$$

Longitud de la parte útil sin rosca (ld): se calcula mediante la ecuación:

$$l_d = L_{\text{total}} - LT \quad (5.29)$$

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

Agarre Efectivo (l1): consiste en el espesor de las placas más el espesor de las arandelas.

$$l_1 = 16.6 \text{ mm}$$

Longitud de la parte útil roscada (lt): se calcula mediante la ecuación:

$$l_t = l_1 - l_d \quad (5.30)$$

$$l_t = 13.6 \text{ mm}$$

Rigidez efectiva estimada del perno (Kb): se calcula mediante la ecuación:

$$K_b = \frac{A_t \times E}{l_t} \quad (5.31)$$

$$K_b = 557200 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Rigidez del elemento (Km): se calcula mediante la ecuación:

$$K_{m1} = \frac{0.5774 \times \pi \times E \times D_{\text{nominal}}}{2 \times \ln \left( \frac{0.5774 \times LT + 0.5 \times D_{\text{nominal}}}{0.5774 \times LT + 2.5 \times D_{\text{nominal}}} \right)} \quad (5.32)$$

$$K_{m1} = 1602000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

**Tabla 5. 14 Parámetros de la rigidez para varios materiales**

| Material usado      | Relación<br>de<br>Poisson | Módulo de elasticidad |      | A       | B       |
|---------------------|---------------------------|-----------------------|------|---------|---------|
|                     |                           | GPa                   | Mpsi |         |         |
| Acero               | 0.291                     | 207                   | 30.0 | 0.78715 | 0.62873 |
| Aluminio            | 0.334                     | 71                    | 10.3 | 0.79670 | 0.63816 |
| Cobre               | 0.326                     | 119                   | 17.3 | 0.79568 | 0.63553 |
| Hierro fundido gris | 0.211                     | 100                   | 14.5 | 0.77871 | 0.61616 |
| Expresión general   |                           |                       |      | 0.78952 | 0.62914 |

Fuente: (Budynas, 2012).

Los parámetros de la rigidez del acero se obtienen de la Tabla 5.14.

$$A = 0.78715$$

$$B = 0.62873$$

$$K_{m2} = E \times D_{nominal} \times A \times e^{\left(\frac{B \times D_{nominal}}{L T}\right)} \quad (5.33)$$

$$K_{m2} = 1638000 \frac{N}{mm}$$

Constante de rigidez (C): se calcula mediante la ecuación:

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_{m2}} \quad (5.34)$$

$$C = 0.254$$

#### 5.4.2.5 Cálculo del factor de seguridad del perno (FS)

Se calcula mediante la ecuación:

$$FS = \frac{F_i}{(1-C) \times F} \quad (5.35)$$

$$FS = 1.75$$

#### 5.4.2.6 Cálculo de la carga resultante sobre el perno (Fb)

Se calcula mediante la ecuación:

$$F_b = C \times F + F_i \quad (5.36)$$

$$F_b = 12465.85 \text{ N}$$

Esfuerzo Tensión ( $\sigma_b$ ) < Resistencia mínima de Prueba ( $S_p$ )

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} < S_p$$

Donde  $\sigma_b$  se calcula mediante la ecuación:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} \quad (5.37)$$

$$\sigma_b = 340.50 \text{ Mpa}$$

Por lo tanto es correcta la elección del perno

#### 5.4.2.7 Cálculo de factores de carga en la junta soldada

##### Método convencional para el metal de aporte

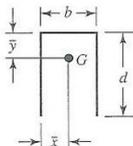
| Soldadura   | Área de la garganta  | Ubicación de G                                    | Segundo momento unitario del área                        |
|---|----------------------|---|--|
|  | $A = 0.707h(b + 2d)$ | $\bar{x} = b/2$<br>$\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$ | $I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$ |

Figura 5. 10 Propiedades flexionantes de las soldaduras de filete

(Budynas, 2012).

Factor de diseño

$$FS = 3$$

**Tabla 5. 15 Tamaño mínimo de soldadura de filete, h**

| Espesor del material de la parte unida más gruesa, pulg |             | Tamaño de la soldadura, pulg |
|---|-------------|------------------------------|
| Hasta 1/4 inclusive                                     |             | 1/8                          |
| Mayor que 1/4   | Hasta 1/2   | 3/16                         |
| Mayor que 1/2   | Hasta 3/4   | 1/4                          |
| Mayor que 3/4   | Hasta 1 1/2 | 5/16                         |
| Mayor que 1 1/2   | Hasta 2 1/4 | 3/8                          |
| Mayor que 2 1/4   | Hasta 6     | 1/2                          |
| Mayor que 6   |             | 5/8                          |

Fuente: (Budynas, 2012).

El tamaño del cateto de la soldadura de filete (h), se selecciona de la Tabla 5.15.

|              |  |
|--------------|--|
| h = 3.175 mm | Tamaño del cateto                            |
| b = 210 mm   | Longitud de cordón de soldadura longitudinal |
| d = 205 mm   | Longitud de cordón de soldadura transversal  |

Los siguientes parámetros se calculan mediante fórmulas que aparecen en la Figura 5.10.

Área de soldadura:

$$A = 0.707 \times h \times (b + 2d) \quad (5.38)$$

$$A = 1391.73 \text{ mm}^2$$

Ubicación del centro de gravedad:

$$\bar{X} = \frac{b}{2} = 105 \text{ mm} \quad (5.39)$$

$$\bar{Y} = \frac{d^2}{b+2 \times d} = 67.78 \text{ mm} \quad (5.40)$$

Segundo momento unitario del área (Iu):

$$I_u = \frac{2 \times d^3}{3} - 2 \times d^2 \times \bar{Y} + (b + 2 \times d) \times \bar{Y}^2 \quad (5.41)$$

$$I_u = 2.895E6 \text{ mm}^3$$

Segundo momento unitario (I):

$$I = 0.707 \times h \times I_u \quad (5.42)$$

$$I = 6.498E6 \text{ mm}^4$$

Cortante primario ( $\tau'$ ):

$$\tau' = \frac{F}{A} \quad (5.43)$$

$$\tau' = 5.75 \text{ MPa}$$

Cortante secundario ( $\tau''$ ):

$$dis = 65 \text{ mm}$$

$$\tau'' = \frac{F \times dis \times \frac{d}{2}}{I} \quad (5.44)$$

$$\tau'' = 8.20 \text{ MPa}$$

$$\tau = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} \quad (5.45)$$

$$\tau = 10.02 \text{ MPa}$$

Con base en una resistencia mínima y el criterio de energía de distorsión, el factor de seguridad es:

$$S_{sy} = 0.557 \times S_y \quad (5.46)$$

Donde:

$$S_y = 393 \text{ MPa} \quad \text{Resistencia a la fluencia del electrodo 7018}$$

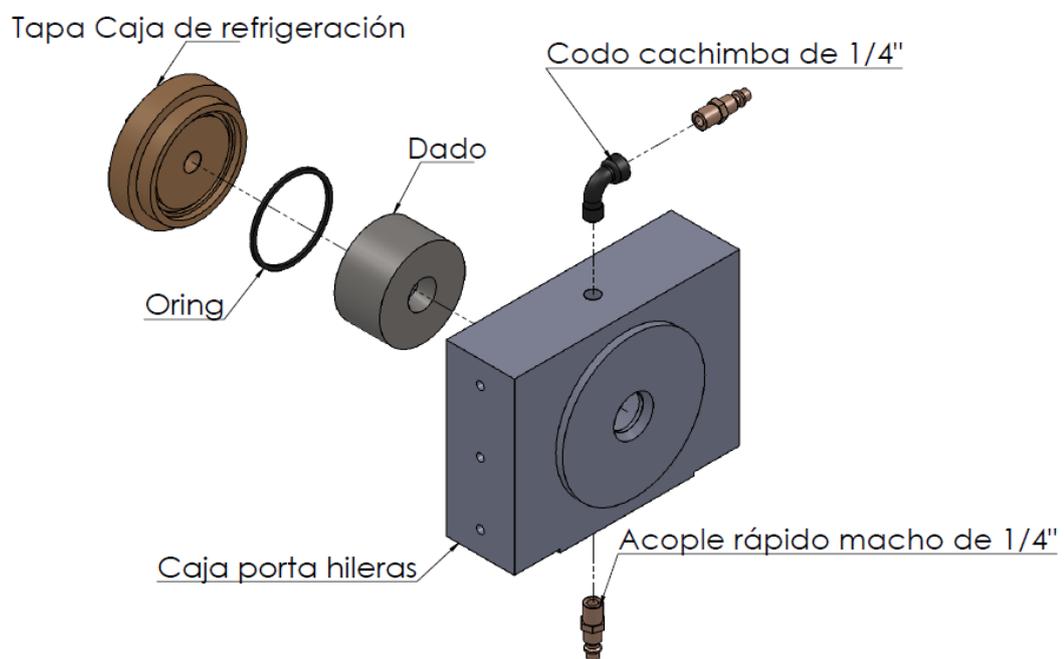
$$FS1 = \frac{S_{sy}}{T} \quad (5.47)$$

$$FS1 = 21$$

Como  $FS1 > FS$  el material de aporte tiene una resistencia satisfactoria.

## 5.5 DISEÑO DE LA CAJA PORTA HILERAS

### 5.5.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO



**Figura 5. 11 Caja porta hileras**

Esta caja sirve de almacenamiento y sujeción del dado de trefilado, a la vez que sirve como caja de almacenamiento de refrigerante, debe ser lo suficientemente rígida y estable para facilitar la operación de trefilado.

La caja porta hileras está construida en acero A36, y se sujetará con seis pernos M8X20, en la parte superior tiene una toma para el ingreso del refrigerante, y en la parte inferior tiene una toma para la salida del refrigerante, en la parte posterior contiene una tapa roscada la cual sirve

como medio de sujeción para que el dado quede fijo en la caja porta hileras, como se aprecia en la Figura 5.11

## 5.5.2 CÁLCULO EN DETALLE

### 5.5.2.1 Cálculo del número de pernos

$$N_{\max} = \frac{L}{3 \cdot D_{\text{nominal}}} \quad (5.48)$$

$$N_{\max} = \frac{150 \text{ mm}}{3 \cdot 8 \text{ mm}} = 6$$

$$N_{\min} = \frac{L}{6 \cdot D_{\text{nominal}}}$$

$$N_{\min} = \frac{150 \text{ mm}}{6 \cdot 8 \text{ mm}} = 3$$

Donde:

$N_{\max}$  = Número máximo de pernos

$N_{\min}$  = Número mínimo de pernos

$L$  = Altura de la caja porta hileras

$D_{\text{nominal}}$  = Diámetro nominal del perno

**Se elige 3 pernos por cada lado de la caja porta hileras**

### 5.5.2.2 Cálculo de factores de carga en la junta emperrada

**Cortante del perno:** se calcula mediante la ecuación:

$$\tau = \frac{F}{A_s} \quad (5.49)$$

Donde:

$$A_s = 3 \times \frac{\pi \cdot D_{\text{nominal}}^2}{4}$$

$$A_s = 150.79 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{8000}{150.79} = 53.05 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_{sy}}{\tau}$$

$$FS = 4$$

**Aplastamiento de los pernos:** se calcula mediante la ecuación:

$$\sigma_b = \frac{F}{A_b} \quad (5.50)$$

Donde:

$$A_b = 3 \times E_{\text{placa}} \times D_{\text{nominal}}$$

$E_{\text{placa}}$  = Espesor de la placa de acero = 6 mm

$$A_b = 144 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_b = \frac{8000}{144} = 55.56 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_p}{\sigma_b}$$

$$FS = 6.8$$

**Aplastamiento de los elementos:**

$$FS = \frac{S_{ym}}{\sigma_b}$$

$$FS = \frac{250}{55.56} = 4.5$$

**Fluencia del elemento**

$w = 60 \text{ mm}$  Ancho del elemento

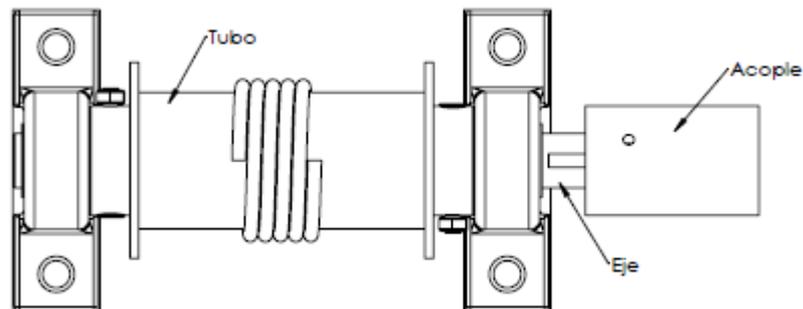
$$\eta = \frac{w \times E_{\text{placa}} \times S_{ym}}{F} \quad (5.51)$$

$$\eta = 11.25$$

Como se puede observar los factores de seguridad son aceptables, por lo tanto la junta resistirá la fuerza de estirado.

## 5.6 DISEÑO SISTEMA MOTRIZ POR WINCHE ELÉCTRICO

En la figura 5.12 un esquema del Winche a diseñar y posteriormente a construir,

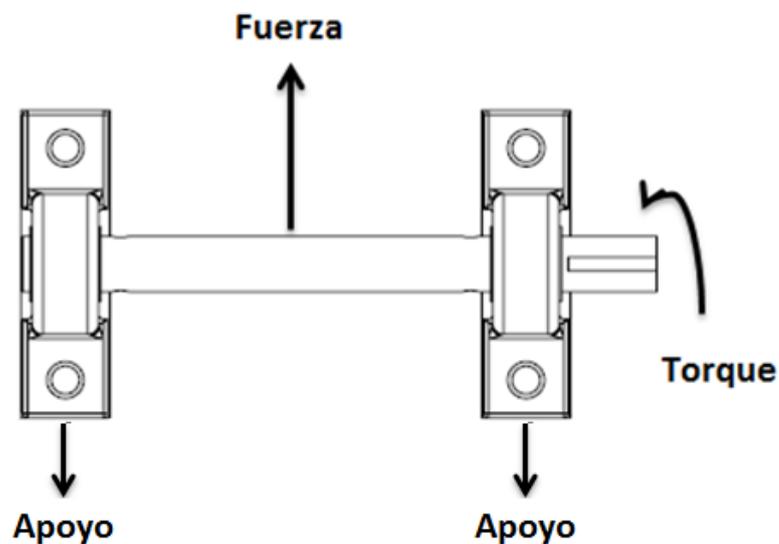


**Figura 5. 12 Esquema Winche**

### 5.6.1 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EJE DEL WINCHE

El material del eje para el winche es de AISI 1040 CD por ser un material utilizado con frecuencia para la fabricación de ejes. Para este cálculo se realizará iteraciones, con distintos diámetros de ejes, y de acuerdo a su factor de seguridad se escogerá el mas apropiado.

Las propiedades del electrodo se muestran en las Tablas 4.25, y en la Figura 5.13 se presenta un esquema de la ubicación del eje.



**Figura 5. 13 Esquema Eje**

Datos:

Potencia = 0.7457 Kw.

RPM = 21 máxima.

d = 1" diámetro del eje

Sy<sub>1040</sub> = 490 MPa.

c = d/2.

El eje va a estar sometido a cortante máximo por torsión ( $\tau_{adm}$ ) y flexión ( $\sigma_{adm}$ ) (Budynas, 2012), por lo tanto se calcula de la siguiente manera:

$$\tau_{adm} = \frac{T * c}{J} \quad (5.52)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{M * c}{I} \quad (5.53)$$

Donde:

T=Torque Motorreductor

M=Momento máximo eje , tubo

I=Inercia del eje, tubo

J=Segundo momento polar del eje, tubo

c=distancia del punto de análisis del esfuerzo

**Cálculo de Torque máximo.**

$$T = \frac{9550 * PKw}{RPM}$$

$$T = \frac{9550 * 0.7457}{21} * 1000$$

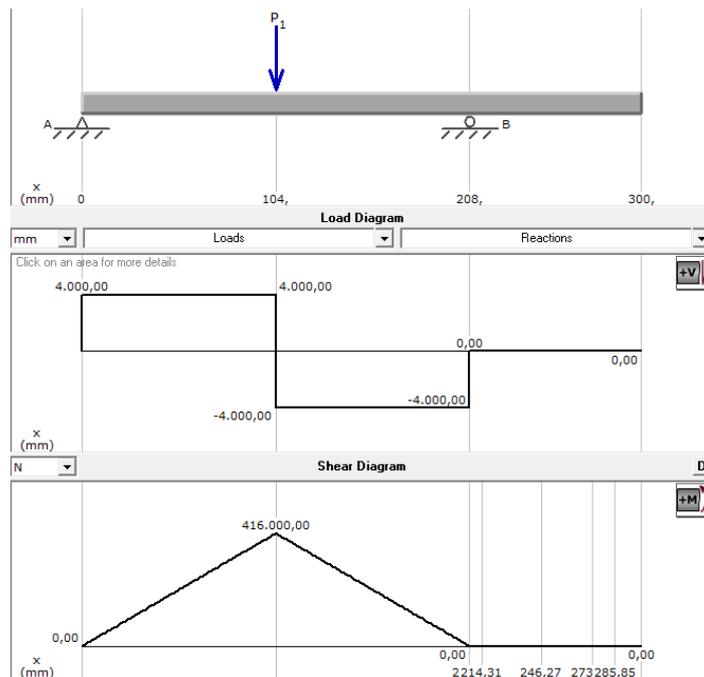
T=355165.79 N mm

### Cálculo de Momento máximo.

De acuerdo al esquema 5.13 se procede a realizar el modelo en MD Solid.

Donde:

$P_1 = F \rightarrow$  Fuerza de Trefilado



**Figura 5. 14** Diagrama de momento Eje

De la figura 5.14 se obtiene:

$M=416000$  N mm

**Cálculo del momento de inercia y segundo momento polar del eje de sección redonda.**

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (5.54)$$

$$I = \frac{\pi \cdot 25.4^4}{64} = 20431.71 \text{ mm}^4$$

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad (5.55)$$

$$J = \frac{\pi \cdot 25.4^4}{32} = 40863.43 \text{ mm}^4$$

Reemplazando en las ecuaciones 5.52, 5.53 respectivamente obtenemos:

$$T_{adm} = \frac{355165.79 \cdot 12.7}{40863.43}$$

$$T_{adm} = 110.382 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{416000 \cdot 12.7}{20431.71}$$

$$\sigma_{adm} = 258.58 \text{ MPa}$$

**Para determinar el factor de seguridad, se lo realiza por la teoría del esfuerzo de Von Mises.** (Budynas, 2012).

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_{adm})^2 + 3 \cdot (T_{adm})^2} \quad (5.56)$$

$$\sigma' = \sqrt{(258.58)^2 + 3 \cdot (110.38)^2}$$

$$\sigma' = 321.58 \text{ MPa}$$

$$FS_{eje} = \frac{S_{y1040CD}}{\sigma}$$

$$FS_{eje} = \frac{490}{321.58}$$

$$FS_{eje} = 1.8 \rightarrow \text{Ultima iteración.}$$

**Tabla 5. 16 Iteraciones eje del carrete**

| Iteraciones | Diámetro eje |           | Esfuerzo a flexión | Esfuerzo a torsión | Esfuerzo Máximo | FS          |
|-------------|--------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------|
|             | mm           | plg       | MPa                | MPa                | MPa             |             |
| 1           | 15,88        | 5/8"      | 794,35             | 452,13             | 1115,46         | 0,44        |
| 2           | 19,05        | 3/4"      | 459,70             | 261,65             | 645,52          | 0,76        |
| 3           | 22,23        | 7/8"      | 289,29             | 164,66             | 406,24          | 1,21        |
| <b>4</b>    | <b>25,40</b> | <b>1"</b> | <b>193,93</b>      | <b>110,38</b>      | <b>272,33</b>   | <b>1,80</b> |

Como se puede observar en la Tabla 5.16 en la iteración 4 el factor de seguridad es aceptables por lo que se tomará el diámetro de 25.4 mm y una longitud de 300 mm para el eje.

### 5.6.2 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL TUBO

Para el diseño del carrete se lo va a realizar con un tubo de acero ASTM A 500 (tubo laminado en caliente con costura grado C, con un diámetro no mayor a 3 pulgadas por el poco espacio para el montaje, en la Figura 5.15 se presenta un esquema del carrete.

Datos:

Potencia = 0.7457 Kw.

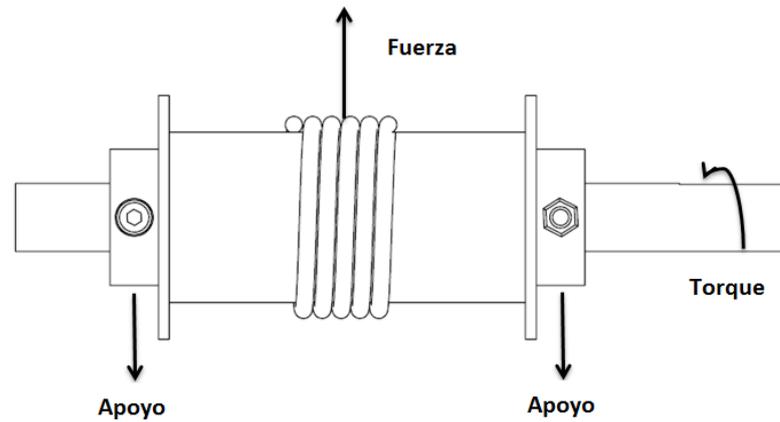
RPM = 21 máxima.

D tubo = 2 1/2" (tercera iteración)

$Sy_{500} = 345$  MPa.

$c = D/2$ .

$T=355165.79$  N mm

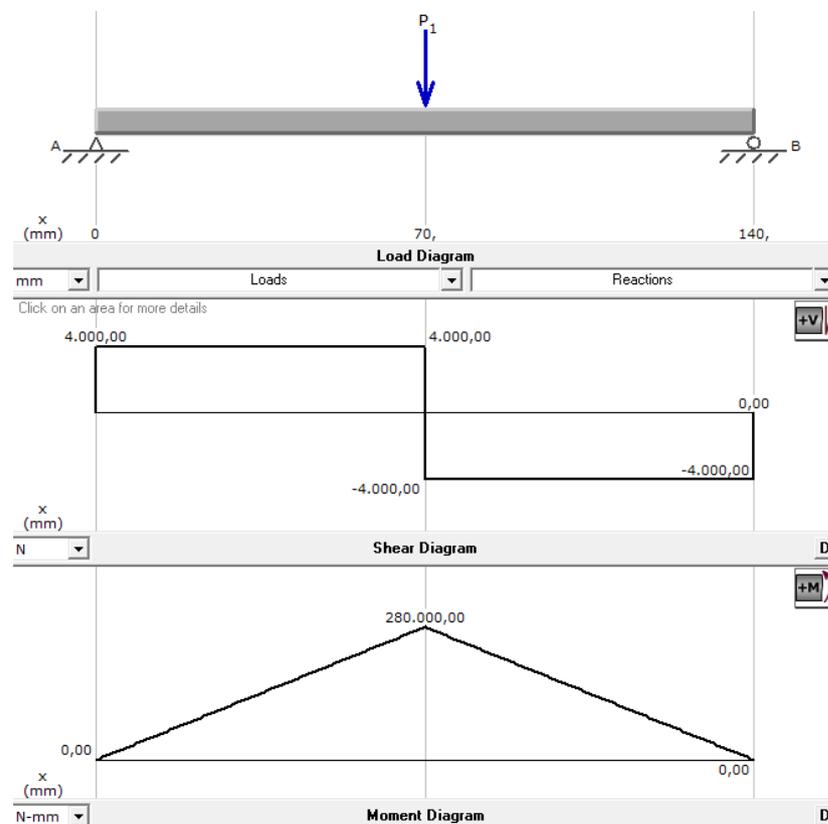


**Figura 5. 15 Esquema carrete**

El tubo va a estar soldado al eje, debido a esto va a estar sometido a cortante máximo por torsión y flexión, por lo tanto se calcula con las ecuaciones 5.52 y 5.53.

### **Cálculo de Momento máximo.**

De acuerdo a la Figura 5.15 se procede a realizar el modelo en MD Solid.



**Figura 5. 16 Diagrama de momento tubo**

De la Figura 5.16 se obtiene:

$$M=280000 \text{ N mm}$$

**Cálculo del momento de inercia y segundo momento polar del tubo de sección redonda.**

$$I = \frac{\pi*(D^4 - d^4)}{64} \quad (5.57)$$

$$I = \frac{\pi*(63.5^4 - 61.5^4)}{64}$$

$$I = 95898.34 \text{ mm}^4$$

$$J = \frac{\pi*(D^4 - d^4)}{32} \quad (5.58)$$

$$J = \frac{\pi*(63.5^4 - 61.5^4)}{32}$$

$$J = 191796.69 \text{ mm}^4$$

Reemplazando en las ecuaciones 5.52, 5.53 respectivamente obtenemos:

$$T_{adm} = \frac{355165.78 * 31.75}{191796.69}$$

$$T_{adm} = 58.794 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{210000 * 31.75}{95898.34}$$

$$\sigma_{adm} = 137.73 \text{ MPa}$$

**Para determinar el factor de seguridad, se lo realiza por la teoría del esfuerzo de Von Mises, ecuación 5.56.**

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_{adm})^2 + 3*(T_{adm})^2}$$

$$\sigma' = \sqrt{(103.30)^2 + 3*(58.74)^2}$$

$$\sigma' = 171.29 \text{ MPa}$$

$$FS_{\text{tubo}} = \frac{S_{y500}}{\sigma'}$$

$$FS_{\text{eje}} = \frac{345}{171.29}$$

$$FS_{\text{eje}} = 2.03$$

**Tabla 5. 17 Iteraciones Tubo winche**

| Iteraciones | Diámetro eje |               | Esfuerzo a flexión | Esfuerzo a torsión | Esfuerzo Máximo | FS          |
|-------------|--------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------|
|             | mm           | plg           | MPa                | MPa                | MPa             |             |
| 1           | 38,01        | 1 1/2"        | 297,64             | 169,40             | 417,96          | 0,71        |
| 2           | 50,80        | 2"            | 163,33             | 92,96              | 229,35          | 1,27        |
| <b>3</b>    | <b>63,50</b> | <b>2 1/2"</b> | <b>103,30</b>      | <b>58,79</b>       | <b>145,05</b>   | <b>2,03</b> |
| 4           | 76,20        | 3"            | 71,17              | 40,51              | 99,94           | 2,95        |

En la Tabla 5.17 se puede observar un Factor de seguridad aceptable en la iteración 3, de esta forma las medidas del tubo son: 68.5 mm de diámetro y 140 mm de longitud (medida elegida empíricamente).

### 5.6.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LA JUNTA POR SOLDADURA EN EL WINCHE

En esta sección solo se procederá a verificar si el factor de seguridad es mayor que 2, caso contrario se busca otro tipo de soldadura, en la Figura 5.17 se muestra donde se realizará la soldadura, para formar el carrete.

Datos:

Material de aporte (electrodo E7018, Syele = 445 MPa).

Datos:

$$F = 8000 \text{ N}$$

$$\text{Diámetro tubo (D)} = 68.5 \text{ mm}$$

$T \rightarrow$  Torque = 355.166 N m calculado en la sección 5.6.1.

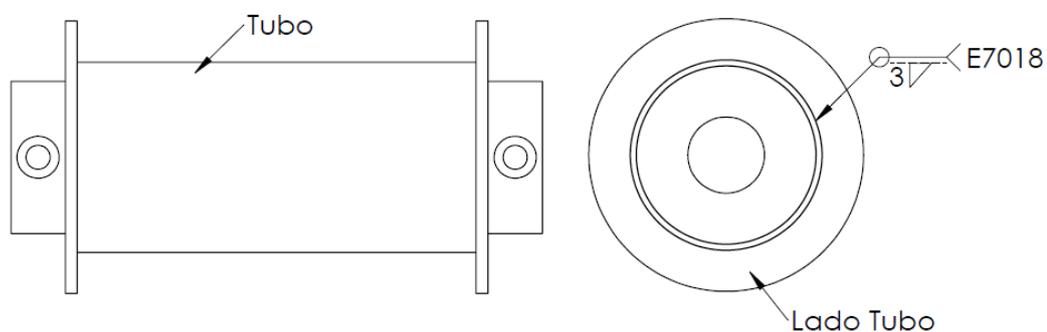
$r$  = radio exterior donde va la soldadura

$$r = D/2 = 31.75 \text{ mm}$$

$h$  = altura del filete = 3 mm

$J$  = Segundo momento polar

$J_u$  = segundo momento polar unitario



**Figura 5. 17 Esquema de las soldaduras en el carrete**

**Cálculo de los factores de seguridad para la unión entre el tubo y la placa.**

Para el segundo momento polar unitario de área. (Budynas, 2012).

$$J_u = 2 \cdot \pi \cdot r^3 \quad (5.59)$$

$$J_u = 2 \cdot \pi \cdot 31.75^3$$

$$J_u = 201158.990 \text{ mm}^3$$

$$J = 0.70 \cdot h \cdot J_u \quad (5.60)$$

$$J = 0.70 \cdot 3.175 \cdot 201158.990$$

$$J = 426501.23 \text{ mm}^4$$

Esfuerzo admisible en la junta:

$$T_{adm} = \frac{T^*r}{J} \quad (5.61)$$

$$T_{adm} = \frac{355166 \cdot 31.75}{426501.23}$$

$$T_{adm} = 26.44 \text{ MPa}$$

Con base en el criterio de energía de distorsión el factor de seguridad es:

$$FS = \frac{0.577 \cdot S_{y \text{ electrodo}}}{T_{adm}} \quad (5.62)$$

$$FS = \frac{0.577 \cdot 445}{26.44}$$

$$FS = 9.71$$

**La resistencia de la soldadura cumple con el objetivo de  $FS > 2$ .**

#### 5.6.4 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL CABLE

F: 8000 N

**Tabla 5. 18 Tipos de cable de acero**

| GRADO   | NOMBRE COMÚN           | RESISTENCIA NOMINAL A LA TRACCIÓN (Kg/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---|
| Grado 1 | Acero de tracción      | 120 - 140   |
| Grado 2 | Arado suave            | 140 - 160   |
| Grado 3 | Arado                  | 160 - 180   |
| Grado 4 | Arado mejorado         | 180 - 210   |
| Grado 5 | mejorado               | 210 - 245   |
| Grado 6 | Siemens - Martin       | 70 mínimo   |
| Grado 7 | Alta resistencia       | 100 mínimo  |
| Grado 8 | Extra alta resistencia | 135 mínimo  |

Seleccionamos el cable de grado 4 con resistencia nominal a la tracción ( $S_{y_{alam}} = 1764 \text{ Mpa}$ ), según la Tabla 5.18.

Según la Tabla 5.19 escogemos el factor de seguridad de  $n = 6$ .

**Tabla 5. 19 Factores de diseño para cables de acero**

| <b>APLICACIÓN</b>                                     | <b>FACTOR</b> |
|---|---------------|
| Tirantes de cable o torones (trabajo estático)        | 3 a 4         |
| Cables principales para puentes colgantes             | 3 a 3.5       |
| Cables de suspensión (péndulo para puentes colgantes) | 3.5 a 4       |
| Cables de tracción para teleféricos y andariveles     | 5 a 6         |
| Cada cable de operación de una grúa almeja            | 4 a 5         |
| Palas mecánicas - excavadoras                         | 5             |
| Cable de arrastre en minas                            | 4 a 5         |
| Cable de izaje en minas (vertical e inclinado)        | 7 a 8         |
| Grúas tecles y polipastos industriales                | 6 (mínimo)    |
| Ascensores - elevadores - para personal               | 12 a 15       |
| Ascensores - elevadores - para material y equipos     | 7 a 10        |
| Grúas con crisoles calientes de fundición             | 8 (mínimo)    |

$$FS = \frac{S_{y_{alam}}}{\tau_{adm}}$$

$$\tau_{adm} = \frac{1764}{6} = 294 \text{ MPa}$$

$$d = \sqrt{\frac{F}{\frac{\pi}{4} * \tau_{adm}}} \quad (5.63)$$

$$d = \sqrt{\frac{8000}{\frac{\pi}{4} * 294}} = 5.9 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm}$$

Donde:

$S_{y_{alam}}$  = Resistencia nominal a la tracción del cable de acero

$d$  = Diámetro del cable de acero

**Tabla 5. 20 Propiedades del cable de acero 6X19**

| CLASIFICACIÓN 6X19 ALMA DE ACERO<br>ACERO DE ARADO MEJORADO Y |       |                                     |  |                            |
|---|-------|-------------------------------------|--|----------------------------|
| Diámetro  |       | Peso aprox.<br>en Kgs.<br>por metro | Resistencia a la<br>ruptura en toneladas |                            |
| mm  | pulg. |                                     | Arado<br>Mejorado                        | Arado<br>Extra<br>Mejorado |
| 6.4   | 1/4   | 0.17                                | 2.67                                     | 3.08                       |

Fuente: Catálogo de Leoncables

En la Tabla 5.20 se observan las propiedades del cable a usarse.

### Cálculo de la longitud del cable de acero

Radio del tambor (r):

$$r = 31.75 \text{ mm}$$

El perímetro del tambor (P), se calcula mediante la ecuación:

$$P=2*\pi*r \tag{5.64}$$

$$P=2*\pi*31.75=199.5 \text{ mm}$$

Longitud del tambor (l = 130 mm) Ver Figura 5.15.

El número de vueltas (N), que el cable dará en el tambor se calcula mediante la ecuación:

$$N=\frac{l/2}{d} \tag{5.65}$$

$$N=\frac{65}{6.4}=10$$

La longitud del cable (LC) se calcula mediante la ecuación:

$$LC = \frac{N \cdot P}{1000} \quad (5.66)$$

$$LC = \frac{10 \cdot 199.5}{1000} = 2 \text{ m}$$

### 5.6.5 DISEÑO ACOPLE EJE MOTOR Y CARRETE

Debido que la máquina no trabaja a grandes revoluciones y el elevado costo de los acoplos, en esta sección se diseñará un bocín para unir el eje del carrete y el eje del motorreductor, diámetro estimado acople o bocín 2 pulgadas, donde se determinará  $FS > 2$ .

#### Cálculo de la longitud de la cuña.

Para el cálculo de la longitud se requiere del ancho y altura de la cuña, que se obtiene por Tabla, (Shigley página 374).

Para el eje del carrete:

$$t = 1/4.$$

$$h = 3/16.$$

Material de la cuña: AISI 1045 HR, (recomendado por Shigley), donde su  $S_y = 530 \text{ MPa}$ , se empleará un factor de seguridad de 2, (recomendado por Norton).

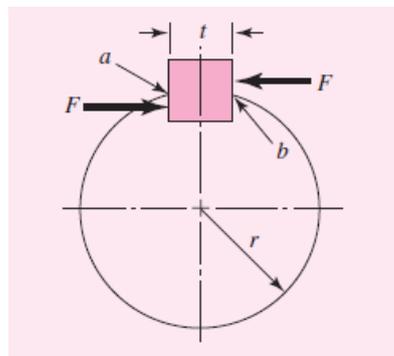


Figura 5. 18 Fuerza aplicada en el eje

A partir de la Figura 5.18, la fuerza  $F$  en la superficie del eje (Budynas, 2012) es:

$$F = \frac{T}{r} \quad (5.67)$$

Donde:

$T$  = Torque calculado sección 5.6.1

$r$  = radio eje motorreductor 35 mm

$$F = \frac{355165.79}{25.4/2}$$

$$F = 27965.81 \text{ N}$$

Mediante la teoría de la energía de distorsión, la resistencia al cortante es

$$S_{sy} = 0.577 \cdot S_y \quad (5.68)$$

$$S_{sy} = 0.577 \cdot 530$$

$$S_{sy} = 305.81 \text{ MPa}$$

La falla por cortante a lo largo del área  $ab$  produce un esfuerzo (Budynas, 2012):

$$\tau = \frac{F}{t \cdot l} \quad (5.69)$$

Donde:

$F$  = fuerza superficie eje

$t$  = ancho cuña

$l$  = longitud cuña

$FS$  = Factor de seguridad

Sustituyendo este esfuerzo por la resistencia dividida entre el factor de seguridad (Budynas, 2012), se obtiene:

$$\frac{S_{sy}}{FS} = \frac{F}{t \cdot l} \quad (5.70)$$

$$\frac{305.81}{2} = \frac{27965.81}{6.350 \cdot l}$$

$$l = 28.80 \text{ mm}$$

Para la resistencia al aplastamiento, se utiliza el área de la mitad de la cara de la cuña.

$$\frac{S_y}{FS} = \frac{F}{t \cdot l/2}$$

$$\frac{530}{2} = \frac{27965.8}{6.350 \cdot l/2}$$

$$l = 33.23 \text{ mm}$$

**De esta forma la longitud de la cuña para el acople es 35 mm.**

### **Factor de Seguridad Acople**

Diámetro estimado: 50.8 mm (2").

Diámetro interno: 35 mm (eje motorreductor) + ranura cuña = 40 mm

Sy1018 → Tabla 4.24

El acople está sometido a cortante máximo por torsión  $\tau_{adm}$ , y se calcula de acuerdo en la sección 5.6.1.

$$\tau_{adm} = \frac{T \cdot c}{J}$$

$$J = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32}$$

$$J = \frac{\pi(50.8^4 - 35^4)}{32}$$

$$J = 402487.38 \text{ mm}^4$$

$$T_{adm} = \frac{355165.78 \cdot 25.4}{402487.78}$$

$$T_{adm} = 38.443 \text{ MPa}$$

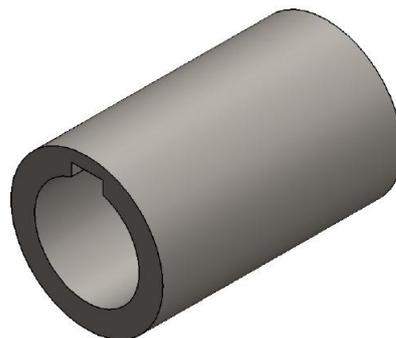
Se aplica la teoría del esfuerzo cortante máximo para materiales dúctiles (AISI1018 buena ductilidad).

$$FS = \frac{S_{y1018}}{2 \cdot T_{adm}} \text{ (Budynas, 2012).}$$

$$FS = \frac{370}{2 \cdot 38.443}$$

$$FS = 4.81$$

**Como se puede observar el factor de seguridad es mayor a 2 por lo tanto el acople se fabricará como en la Figura 5.19.**



**Figura 5. 19 Acople**

### **5.6.6 SELECCIÓN DE LA CHUMACERA**

Determinado el diámetro del eje del carrete, en la sección anterior, en esta parte se procederá a determinar la carga nominal dinámica  $C_{10}$  para

poder ingresar a un catálogo de chumaceras y observar si el diámetro de 25.4 mm soporta la carga que se aplica a la chumacera.

Considerando el caso de la compañía SKF, que clasifica a sus cojinetes para un millón de revoluciones de manera que la vida  $L_{10}$  es  $60L_{RN}n_R = 1 \times 10^6$ , y se desea una vida de 5000 horas a 21 RPM con una carga de 8000 N y una confiabilidad del 90%.

$$C_{10} = F_D * \left( \frac{L_D n_D 60}{L_{10}} \right)^{1/a} \quad (5.71) \quad (\text{Budynas, 2012})$$

Donde:

$F_D$  = Fuerza radial aplicada a la chumacera.

$L_D$  = Vida deseada en horas.

$n_D$  = Velocidad en rpm.

$a$  = factor constante de 3 para cojinetes de bolas.

$L_{RN}n_R 60$  = vida nominal  $L_{10}$ .

Donde  $F_d$  es:

$$F_D = \frac{F_{est}}{2} = \frac{8000}{2} = 4000 \text{ N}$$

Por lo tanto la carga nominal dinámica  $C_{10}$  es:

$$C_{10} = 4 * \left( \frac{5000 * 21 * 60}{10^6} \right)^{1/3}$$

$$C_{10} = 7.38 \text{ KN}$$

Con el diámetro del eje ingresamos a un catálogo de chumaceras y comparamos si el  $C_{10}$  Calculado es menor que el  $C_{10}$  establecido por el catálogo.

**Tabla 5. 21 Dimensiones y clasificaciones de carga para cojinetes de bola**

| Diámetro interior, mm | Diámetro exterior, mm | Ancho, mm | Radio del entalle, mm | Diámetro de los hombros, mm |       | Clasificación de la carga, KN |       |
|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|-------|-------------------------------|-------|
|                       |                       |           |                       | ds                          | dH    | Ranura Profunda C10           | C0    |
| 10                    | 30                    | 9         | 0,60                  | 12,50                       | 27,00 | 5,07                          | 2,24  |
| 12                    | 32                    | 10        | 0,60                  | 14,50                       | 28,00 | 6,89                          | 3,10  |
| 15                    | 35                    | 11        | 0,60                  | 17,50                       | 31,00 | 7,80                          | 3,55  |
| 17                    | 40                    | 12        | 0,60                  | 19,50                       | 34,00 | 9,56                          | 4,50  |
| 20                    | 47                    | 14        | 1,00                  | 25,00                       | 41,00 | 12,70                         | 6,20  |
| 25                    | 52                    | 15        | 1,00                  | 30,00                       | 47,00 | 14,00                         | 6,95  |
| 30                    | 62                    | 16        | 1,00                  | 35,00                       | 55,00 | 19,50                         | 10,00 |
| 35                    | 72                    | 17        | 1,00                  | 41,00                       | 65,00 | 25,50                         | 13,70 |
| 40                    | 80                    | 18        | 1,00                  | 46,00                       | 72,00 | 30,70                         | 16,60 |
| 45                    | 85                    | 19        | 1,00                  | 52,00                       | 77,00 | 33,20                         | 18,60 |
| 50                    | 90                    | 20        | 1,00                  | 56,00                       | 82,00 | 35,10                         | 19,60 |

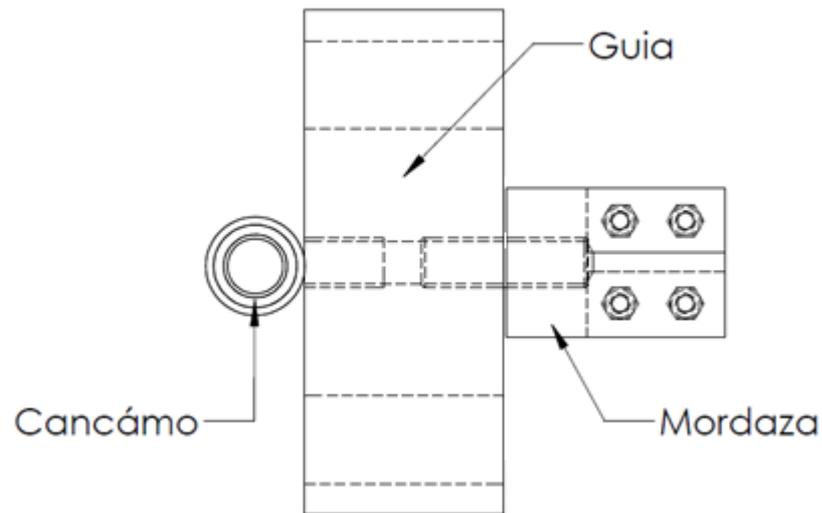
Fuente: (Budynas, 2012).

Como se puede observar en la Tabla 5.21 el C10 calculado  $<$  C10 nominal, por lo tanto la chumacera soportara la fuerza aplicada.

## 5.7 SISTEMA DE EXTRACCIÓN

### 5.7.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

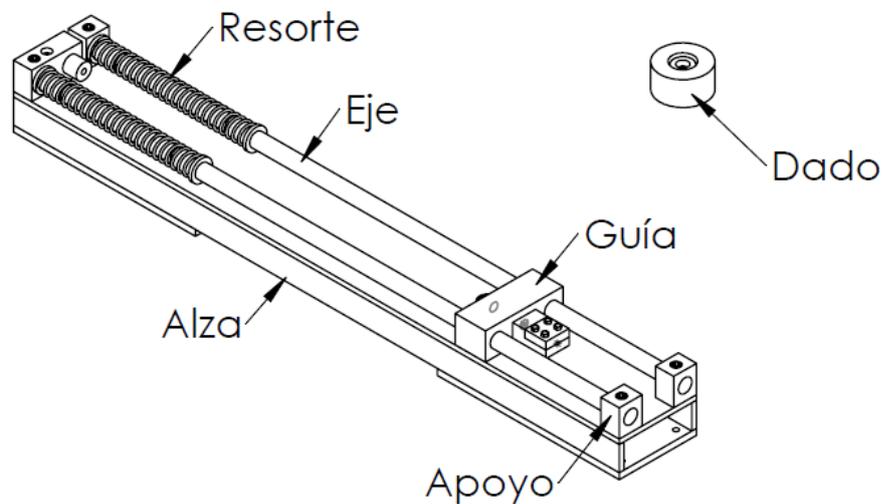
Para extraer la barra del dado se lo realizará mediante sujeción de una mordaza que es soldada a una guía, en la Figura 5.20 se muestra el esquema de sistema de sujeción de la barra a ser trefilada, y este sistema será alado por un cable sujeto por grilletes a un cáncamo y todo esto será guiado por ejes como se muestra en la Figura 5.21.



**Figura 5. 20 Esquema Guía de extracción**

### 5.7.2 DIMENSIONAMIENTO SISTEMA DE EXTRACCIÓN

El dimensionamiento se lo realizara proporcional al dado de trefilado como se presenta en la Figura 5.21.



**Figura 5. 21 Sistema de extracción de las barras**

Este sistema va ser sujeto a la mesa por medio de pernos, las dimensiones y propiedades de estos se presentan en la Tabla 5.11, y el cálculo se realizó como en la sección 5.4.2.2.

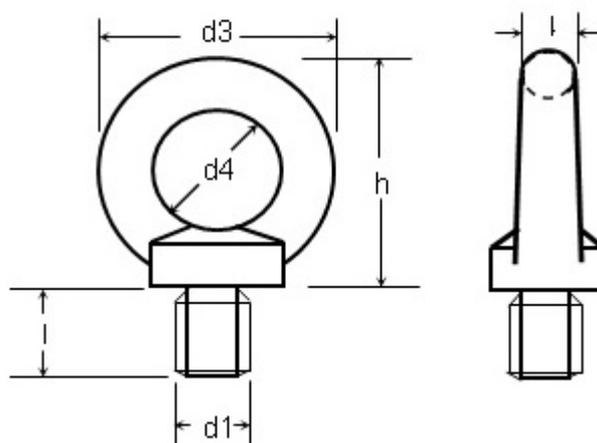
### 5.7.3 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL CÁNCAMO

El análisis se lo realizará en los filetes del cáncamo por ser el punto más crítico, porqué las partes roscadas de este y de la tuerca o longitud rocada de una conexión están sometidas a cortante, porque los filetes se encargan de transmitir la fuerza de tracción del perno o espárrago.

En la Tabla 5.22 se presenta las propiedades métricas del cáncamo adquirido para la máquina.

**Tabla 5. 22 Dimensiones cáncamo**

| Rosca métrica d1 | Medidas en mm |    |    |    |      |
|------------------|---------------|----|----|----|------|
|                  | d3            | d4 | h  | k  | l    |
| M12 x 1,75       | 54            | 30 | 53 | 12 | 20,5 |



Fuente: Catalogo de cáncamos S.A.

#### 5.7.3.1 Cálculo de las áreas de los filetes para el cáncamo y perforación roscada

El área  $A_{ba}$  de un perno y de una tuerca son diferentes. La Figura 5.22 muestra el área de la raíz de un filete del perno, la cual es aproximadamente igual al perímetro de un círculo de diámetro  $d_r$ , es decir multiplicado por el ancho del filete en la raíz,  $W_i p$ , el cual se ha expresado en función del paso

de la rosca, donde  $W_i$  es una constante que depende del tipo de rosca, en la Tabla 5.23 se muestra los valores de  $W_i$  y  $W_o$ .

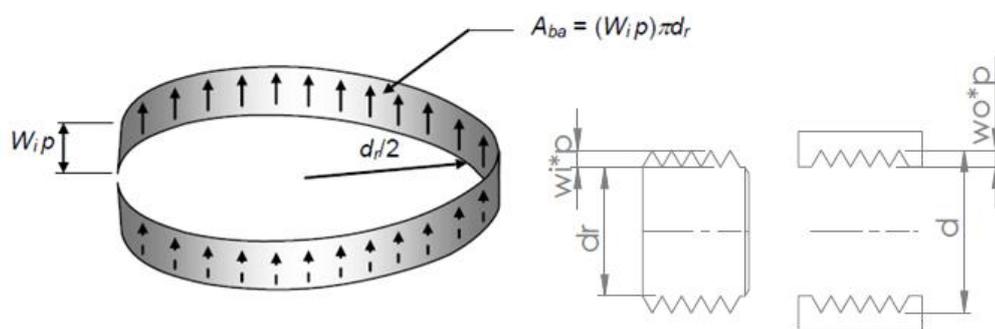
$$A_{ba} = \pi \cdot d_r \cdot (W_i \cdot p) \quad (5.72)$$

Donde:

$A_{ba}$  = Área filete de un perno

$d_r$  = diámetro menor

$W_i$  = porcentaje de paso diámetro menor



**Figura 5. 22 Área de la raíz de un filete de un perno sometida a cortante**

Donde  $d_r$  se calcula de la siguiente manera (Norton, 1999):

$$d_r = d - 1.226869 \cdot p \quad (5.73)$$

$$d_r = 12 - 1.226869 \cdot 1.75$$

$$d_r = 9.85 \text{ mm}$$

$$A_{ba} = \pi \cdot 9.85 \cdot (0.80 \cdot 1.75)$$

$$A_{ba} = 43.34 \text{ mm}^2$$

El área a cortante de la tuerca (longitud perforada guía) es diferente a la del cáncamo, ya que el ancho del filete en la raíz es diferente y el diámetro de la zona a cortante de la tuerca es mayor, para la tuerca tenemos:

$$A_{bat} = \pi \cdot d \cdot (W_o \cdot p) \quad (5.74)$$

Donde:

d = diámetro mayor

Wo = porcentaje de paso para el diámetro mayor

$$A_{bat} = \pi \cdot 12 \cdot (0.88 \cdot 1.75)$$

$$A_{bat} = 58.06 \text{ mm}^2$$

**Tabla 5. 23 Coeficientes Wi y Wo para roscas estándar**

| Tipo de filete   | Wi   | Wo   |
|------------------|------|------|
| UNS/ISO          | 0,8  | 0,88 |
| Cuadrada         | 0,5  | 0,5  |
| Acmé             | 0,77 | 0,63 |
| Diente de sierra | 0,9  | 0,83 |

Fuente: (Norton, 1999).

### 5.7.3.2 Cálculo del esfuerzo máximo por cortante en el cáncamo y la perforación en la guía

El esfuerzo máximo por cortante puede calcularse como el esfuerzo promedio, que es igual a la fuerza total que se transmite del perno a la tuerca, es decir  $F_{bt}$ , que es de 8000 N, dividida por el área total de la raíz del filete,  $A_{ba}$ .

#### Factor de seguridad en la rosca del cáncamo.

$$S_{permp} = \frac{F_{bt}}{A_{ba}} \tag{5.75}$$

$$S_{permp} = \frac{8000}{43.34}$$

$$S_{permp} = 184.61 \text{ Mpa}$$

$$FS = \frac{S_{yc}}{S_{perm}}$$

Donde  $S_{yc}$  es el esfuerzo de fluencia del material del cáncamo que es de acero al carbono C 15 (AISI 1018), de 370 Mpa.

$$FS = \frac{370}{184.61}$$

$$FS = 2.00$$

**Factor de seguridad de la longitud perforada de la guía.**

$$S_{perm} = \frac{Fbt}{Abat}$$

$$S_{perm} = \frac{8000}{58.06}$$

$$S_{perm} = 137.79 \text{ Mpa}$$

$$FS = \frac{S_{yg}}{S_{perm}}$$

Donde  $S_{yg}$  es el esfuerzo de fluencia del material de la guía que es de acero AISI 1045, de 530 Mpa ver Tabla 4.24.

$$FS = \frac{530}{192.91}$$

$$FS = 3.85$$

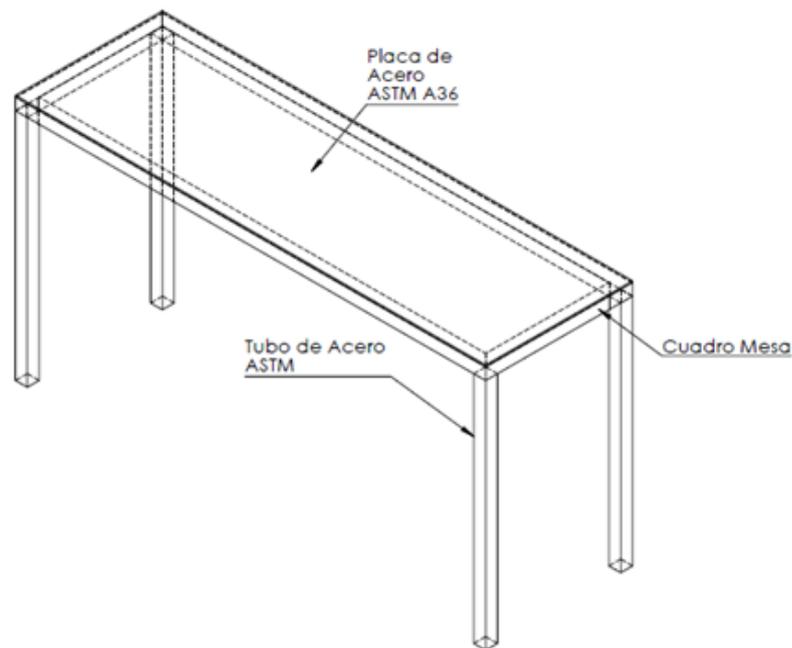
**Como se puede observar factores de seguridad aceptables.**

## **5.8 DISEÑO DE LA MESA PARA EL EQUIPO DE TREFILADO**

### **5.8.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO**

Para este diseño se consideró las longitudes de los componentes a instalar en la mesa (Bastidor de trefilado, motorreductor, tambor.), y la longitud de la barra ya trefilada, por lo tanto el ancho es de 400 mm, largo

1500 mm y 850 mm de altura para esta dimensión, se tomó en cuenta la medida de la máquina cizalladora manual que se encuentra en el laboratorio de procesos de manufactura de la universidad, ver Figura 5.23, para el perfil se escogió un tubo cuadrado de acero ASTM A 500 C por ser más económico que un ángulos. Para las dimensiones se realizó 3 iteraciones para poder observar el factor de seguridad, y de esta forma escoger el espesor adecuado.



**Figura 5. 23 Esquema Mesa**

### **5.8.2 CARGAS**

Para la fuerza, se aplica una carga distribuida para cada estructura del cuadro que es el peso del equipo de trefilado, para la placa base se determinó el peso con un espesor de 6 mm, ver Tabla 5.24.

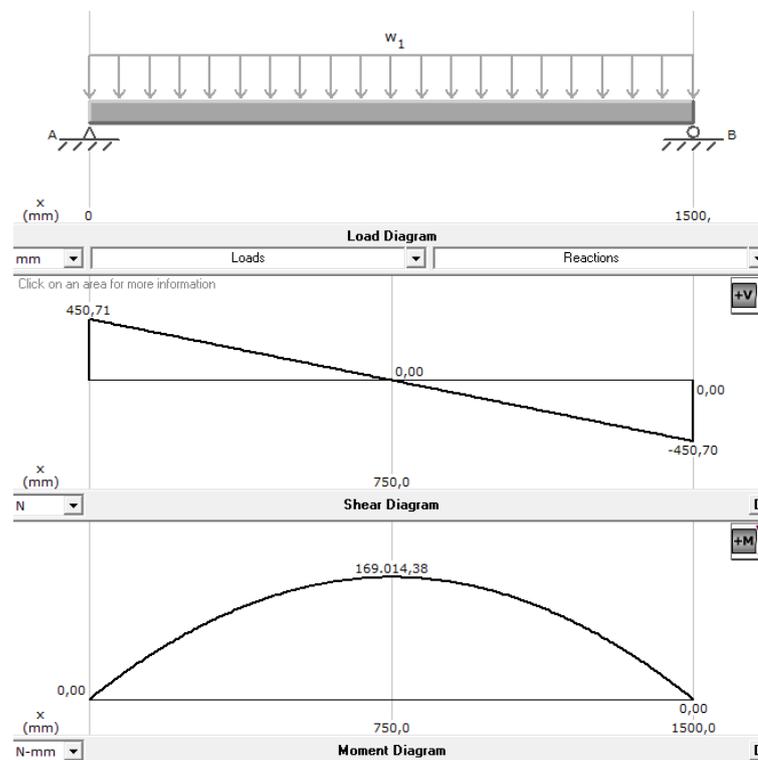
**Tabla 5. 24 Carga a ser aplicada en la mesa**

| Conjuntos del equipo                    | Peso (gr) | Carga (Kg) | Carga (N)     |
|---|-----------|------------|---------------|
| Mecanismo de extracción del Material    | 32914,78  | 32,91      | 322,84        |
| Caja porta hilera                       | 28787,19  | 28,79      | 282,35        |
| Motor                                   | 15000,00  | 15,00      | 147,12        |
| Tambor                                  | 6218,55   | 6,22       | 60,99         |
| Sistemas de Refrigeración y Lubricación | 8982,48   | 8,98       | 88,10         |
| <b>Carga total sin placa base</b>       |           |            | <b>901,41</b> |

Propiedades obtenidas por medio de SolidWorks

### 5.8.3 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL ESPESOR DE LA PLACA BASE

Para este cálculo se aplica la carga de 901.41 N, que son 600.94 N/m de forma distribuida en 1500 mm, en la Figura 5.24 se muestra las reacciones y momento máximo para los cálculos.



**Figura 5. 24 Cortante y momentos con carga distribuida de la placa**

En la siguiente Tabla 5.25 se presenta las propiedades y dimensiones de la placa base a ser determinado, aplicando los conceptos del capítulo 3 de Shigley, tomando en cuenta que la placa es de acero ASTM A 36, ver Tabla 4.24 para sus propiedades.

**Tabla 5. 25 Propiedades y dimensiones placa base**

| Dimensiones | Espesor | Área            | Inercia         | C   |
|-------------|---------|-----------------|-----------------|-----|
| mm          | mm      | mm <sup>2</sup> | mm <sup>4</sup> | mm  |
| 1500X400    | 3       | 1200            | 900             | 1,5 |
| 1500X400    | 4       | 1600            | 2133,33         | 2   |
| 1500X400    | 6       | 2400            | 7200,00         | 3   |

Datos:

Momento máximo (M): 169014.38 N mm

Cortante (V): 450.71 N

A = Área

I = Inercia placa

C = punto de análisis

Esfuerzo en flexión.

$$\sigma_x = \frac{M \cdot C}{I} \quad (5.76)$$

$$\sigma_x = \frac{169014.38 \cdot 3}{7200}$$

$$\sigma_x = 70.42 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Cortante

$$\tau_{xy} = \frac{V}{A} \quad (5.77)$$

$$\tau_{xy} = \frac{450.71}{2400}$$

$$\tau_{xy}=0.19 \text{ MPa}$$

Aplicamos la teoría de Von Mises, Ecuación 5.56.

$$\sigma_{adm} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{adm} = \sqrt{70.42^2 + 3 \cdot 0.19^2}$$

$$\sigma_{adm} = 70.42 \text{ MPa}$$

Por lo tanto el factor de seguridad es de.

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{adm}}$$

$$FS = \frac{250}{70.42}$$

$$FS = 3.55$$

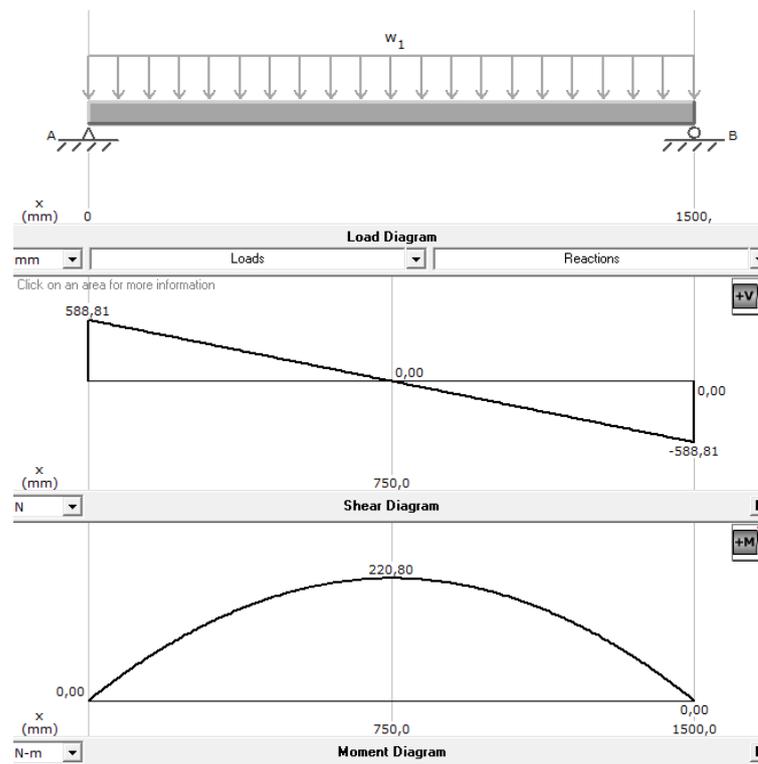
Al realizar las respectivas iteraciones, ver Tabla 5.26, podemos concluir que con el espesor de 6 mm la placa soporta la carga aplicada, por lo tanto la medida para adquirir es de 1500X400X6 mm.

**Tabla 5. 26 Iteraciones espesor placa base**

| <b>Espesor</b> | <b>Esfuerzo en flexión</b> | <b>Esfuerzo cortante</b> | <b>Esfuerzo de Von Mises</b> | <b>Factor de seguridad</b> |
|----------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <b>mm</b>      | <b>Mpa</b>                 | <b>Mpa</b>               | <b>Mpa</b>                   |                            |
| 3              | 281,69                     | 0,38                     | 281,69                       | 0,89                       |
| 4              | 158,45                     | 0,28                     | 158,45                       | 1,37                       |
| 6              | 70,42                      | 0,19                     | 70,42                        | <b>3,55</b>                |

### 5.8.4 CÁLCULO FACTOR DE SEGURIDAD Y DIMENSIONES DEL CUADRO SUPERIOR DE LA MESA

La carga a aplicar en los tubos es de **901.41 N + peso placa de 1500X400X6 = 1177.63**, pero, como es una carga distribuida es por unidad de longitud, por lo tanto la carga es 785.08 N/m, en la Figura 5.25 se presenta el cortante y momento máximo para el cálculo de los respectivos esfuerzos.

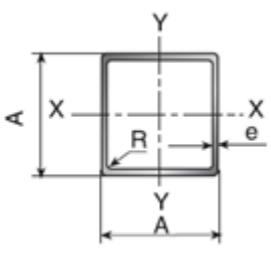


**Figura 5. 25 Diagramas de cortante y momento**

Material: Acero ASTM A 36, ver propiedades en la Tabla 4.24, y en la Tabla 5.27 se muestran las propiedades y dimensiones de los tubos cuadrados.

**Tabla 5. 27 Propiedades y dimensiones para tubos cuadrados**

| Dimensiones | Área (mm <sup>2</sup> ) | Inercia (mm <sup>4</sup> ) | C (mm) |
|-------------|-------------------------|----------------------------|--------|
| 25X25X2     | 174                     | 14800                      | 12,5   |
| 30X30X2     | 214                     | 27100                      | 15     |
| 40X40X2     | 294                     | 69300                      | 20     |



Fuente: Catálogo de tubos y perfiles CINTAC.

Datos:

Momento máximo (M): 220803.75 N-mm

Cortante (V): 588.81 N

Esfuerzo en flexión.

$$\sigma_x = \frac{M \cdot C}{I}$$

$$\sigma_x = \frac{220803.75 \cdot 20}{69300}$$

$$\sigma_x = 63.72 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Cortante

$$\tau_{xy} = \frac{V}{A}$$

$$\tau_{xy} = \frac{588.81}{294}$$

$$\tau_{xy} = 1.53 \text{ MPa}$$

Aplicamos la teoría de Von Mises.

$$\sigma_{adm} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{adm} = \sqrt{63.72^2 + 3 \cdot 1.53^2}$$

$$\sigma_{adm}=63.78 \text{ MPa}$$

Por lo tanto el factor de seguridad es de.

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{adm}}$$

$$FS = \frac{345}{63.78}$$

$$FS=5.40$$

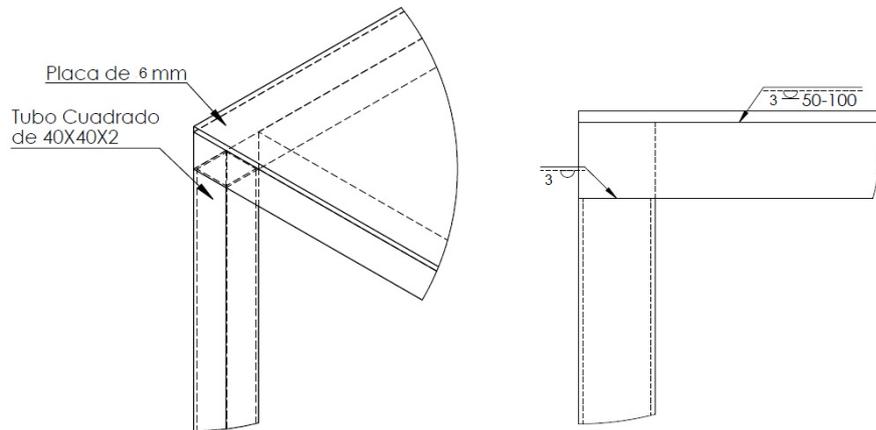
Como se puede observar en la Tabla 5.28 los tres factores de seguridad son aceptables, de esta forma el tubo cuadrado sería 25X25X2, pero no se elige este tubo se elige el 40X40X2 por estética.

Tabla 5. 28 Iteraciones cuadro superior mesa

| Dimensiones<br>mm | Esfuerzo en<br>flexión<br>Mpa | Esfuerzo<br>cortante<br>Mpa | Esfuerzo de<br>Von Mises<br>Mpa | Factor de<br>seguridad |
|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 25X25X2           | 186,49                        | 2,59                        | 186,54                          | 1,85                   |
| 30X30X2           | 122,22                        | 2,11                        | 122,27                          | 2,82                   |
| 40X40X2           | 63,72                         | 1,53                        | 63,78                           | 5,41                   |

### 5.8.5 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA SOLDADURA ENTRE LA PATA Y EL CUADRO DE LA MESA

La soldadura se realizará con una suelda eléctrica y electrodo 7018, y el material de unión es de acero ASTM A 500 C, en la siguiente Figura 5.26 se muestra las soldaduras que se realizarán y en las Tablas 4.24 y 4.25 se muestra las propiedades del material y del electrodo.



**Figura 5. 26 Soldaduras para la mesa de trefilado**

Para la primera soldadura se realizará en las cuatro patas que soportaran una fuerza de 8 KN en cada elemento que es la fuerza que se necesita para trefilar la barra.

Electrodo a usar E6011 → Tabla 4.25

Resistencia de la soldadura a esfuerzo de corte, (Budynas, 2012).

$$T_{adm} = \frac{F}{h \cdot l} \quad (5.78)$$

Donde:

l=longitud de la soldadura

h=Altura de la soldadura

Por lo tanto:

F=8000 N

h=2 mm

l=40 mm

$$T_{adm} = \frac{8000}{2 \cdot 40}$$

$$T_{adm} = 100 \text{ MPA}$$

Con base en una resistencia mínima y el criterio de energía de distorsión, (Budynas, 2012), el factor de seguridad en el material de aporte es:

$$S_{sy} = 0.6 \cdot S_{y \text{electrodo}} \quad (5.79)$$

$$S_{sy} = 0.6 \cdot 345$$

$$S_{sy} = 207 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_{sy}}{T_{adm}}$$

$$FS = \frac{207}{100}$$

$$FS = 2.07$$

Con base en una resistencia mínima, el factor de seguridad en el material de unión es:

$$FS = \frac{S_{ytubo}}{T_{adm}}$$

$$FS = \frac{345}{100}$$

$$FS = 3.45$$

**Factores de seguridad aceptables.**

### **5.8.6 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA SOLDADURA ENTRE LA PLACA BASE Y EL CUADRO DE LA MESA**

Para la segunda soldadura se realizará en la placa base que es de acero ASTM A36 de 6 mm de espesor y la estructura de tubo cuadrado de acero

ASTM A 500 C, esta soldadura se la realizará con electrodo 6011, en la figura 5.26 se muestra un esquema de la soldadura, en las Tablas 4.24 y 4.25 se muestra las propiedades del material y del electrodo.

Resistencia de la soldadura a esfuerzo de corte.

$$T_{adm} = \frac{F}{h \cdot l}$$

Donde:

l=longitud de la soldadura

h=Altura de la soldadura

Por lo tanto:

$$F=8000 \text{ N}$$

$$h=2 \text{ mm}$$

$$l=50 \text{ mm}$$

$$T_{adm} = \frac{8000}{2 \cdot 50}$$

$$T_{adm} = 80 \text{ MPA}$$

Con base en una resistencia mínima y el criterio de energía de distorsión, el factor de seguridad en el material de aporte es:

$$S_{sy} = 0.6 \cdot S_{yelectrodo}$$

$$S_{sy} = 0.6 \cdot 345$$

$$S_{sy} = 207 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_{sy}}{T_{adm}}$$

$$FS = \frac{207}{80}$$

**FS=2.5**

Con base en una resistencia mínima, el factor de seguridad en el material de unión es:

$$FS = \frac{S_{yplaca}}{T_{adm}}$$

$$FS = \frac{250}{80}$$

**FS=3.12**

**Como se puede observar los factores de seguridad son aceptables, por lo tanto la soldadura resistirá la fuerza de estirado.**

## **CAPÍTULO 6**

### **CONSTRUCCIÓN, FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS**

#### **6.1 CONSTRUCCIÓN**

El objetivo de este capítulo es presentar la construcción en detalle de las piezas que forman el equipo de trefilado por medio de hojas de procesos, hojas de montaje, y a través de los manuales, instruir y mostrar al estudiante como funciona y opera la máquina.

##### **6.1.1 PLANOS EQUIPO DE TREFILADO**

En el Anexo A se presenta en detalle cada parte del equipo de trefilado, además en el anexo B se presenta los planos eléctricos del panel de control.

##### **6.1.2 HOJAS DE PROCESOS**

Las hojas que detallan los procesos en el taller para la fabricación de los elementos se presentan en el Anexo C.

- Hoja de procesos N1: Fabricación de la hilera.
- Hoja de procesos N2: Fabricación de la encajadura de la hilera.
- Hoja de procesos N3: Fabricación del bastidor.
- Hoja de procesos N4: Fabricación Carreto del Winche.
- Hoja de procesos N5: Fabricación Mordaza y Guía.
- Hoja de procesos N6: Fabricación Mesa del equipo de trefilado.

##### **6.1.3 HOJAS DE MONTAJE**

Una vez finalizada la construcción de las diferentes piezas, se procederá al ensamblaje, por tal motivo se requiere un esquema, donde indique el orden de montaje de las piezas, ver Anexo D.

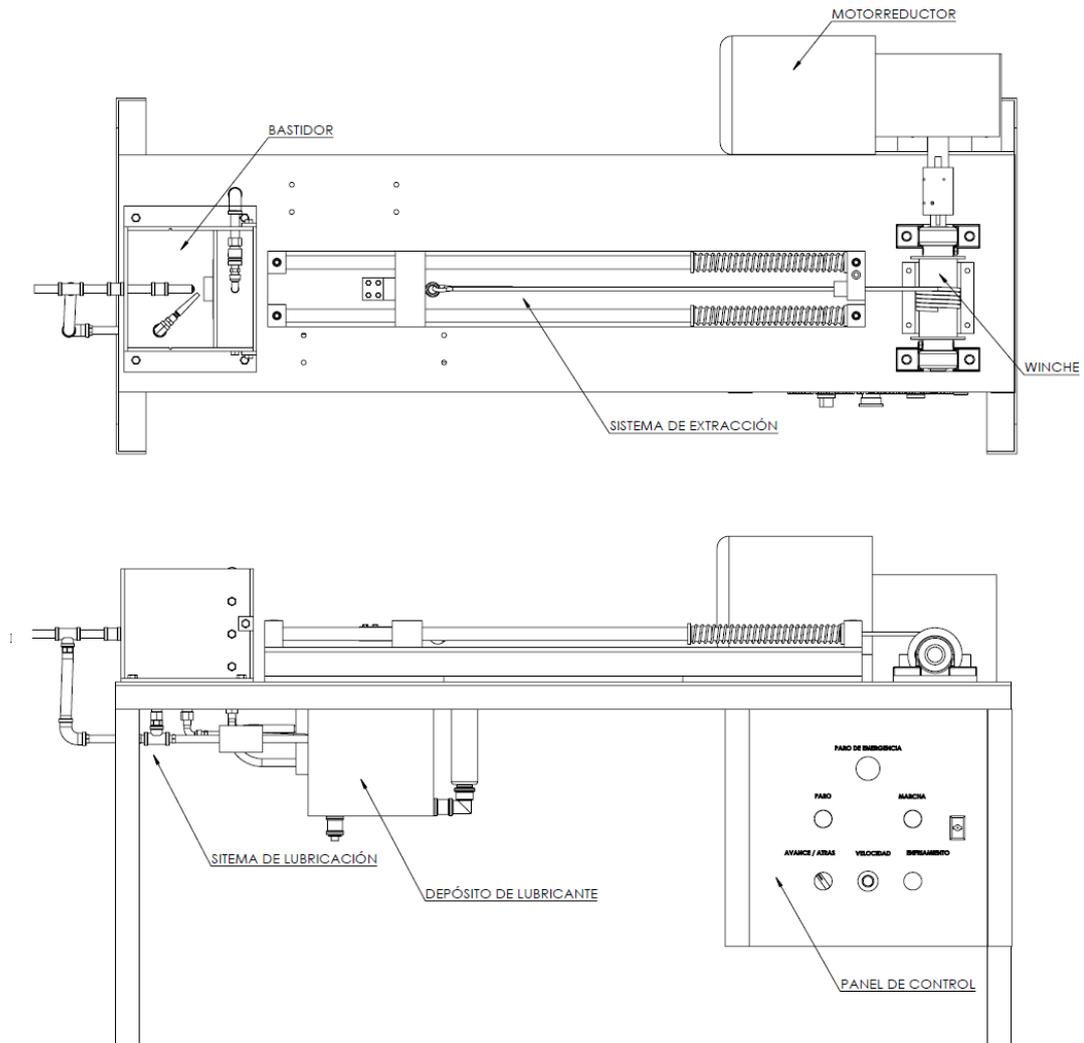
- Hoja de montaje N1: Esquema Bastidor
- Hoja de montaje N2: Esquema Sistema de extracción.
- Hoja de montaje N3: Esquema Winche.
- Hoja de montaje N4: Esquema Mesa del equipo de trefilado.

## **6.2 FUNCIONAMIENTO**

### **6.2.1 CARACTERÍSTICAS**

El equipo de trefilado está compuesto por (Ver Figura 6.1.):

- Motorreductor
- Panel de control
- Winche
- Bastidor
- Sistema de extracción
- Depósito de lubricación y refrigeración



**Figura 6. 1 Máquina de trefilación**

### 6.2.1.1 Motorreductor

El reductor es ortogonal Modelo CM90 con  $i = 80$ , 21 RPM a la salida además cuenta con un torque de 339 N-m y un factor de servicio de 1.3, todo esto está ensamblado a un motor siemens de 1 HP trifásico, ver figura 6.2.



**Figura 6. 2 Motorreductor**

### 6.2.1.2 Panel de control

El panel de control es una caja o gabinete que contiene los dispositivos de conexión, maniobra, comando, medición, protección, alarma y señalización, con sus cubiertas y soportes correspondientes, para cumplir una función específica dentro de un sistema eléctrico. Este panel cuenta con un variador de velocidad de 1 HP de 220V Sinamics G110 y un panel de programación básico Sinamics G 110, también posee todos los mandos necesarios para operar la máquina de forma fácil, ver Figura 6.3.



**Figura 6. 3 Panel de control**

### 6.2.1.3 Winche

Este dispositivo es acoplado al motorreductor y permite extraer la barra de forma directa es decir la fuerza de extracción actúa directamente al encender la máquina, también cuenta con un retenedor para que el cable se enrolle fácilmente, ver Figura 6.4.



Figura 6. 4 Figura 6.4 Winche

### 6.2.1.4 Bastidor

En el bastidor se encuentra la herramienta de trabajo (dado de trefilado) dependiendo del material que se trefile, también se encuentra la guía de barras y un dispositivo que inyecta lubricante directamente al material a trefilar, ver Figura 6.5.

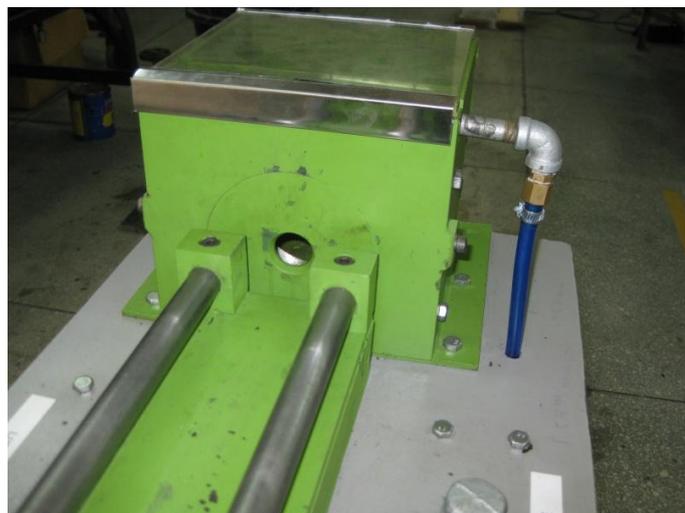


Figura 6. 5 Bastidor

### 6.2.1.5 Sistema de extracción

Esta parte del equipo permite desplazar la guía con la mordaza de forma fácil y segura, también permite que estén concéntricos la mordaza con el dado, ver Figura 6.6.



**Figura 6. 6 Sistema de extracción**

### 6.2.1.6 Depósito de lubricación y refrigeración

Son depósitos donde se encuentran bombas de recirculación que permiten lubricar la barra a trefilar y refrigerar el dado, ver Figura 6.7.



**Figura 6. 7 Depósitos de lubricación y refrigeración**

## **6.2.2 MANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Anexo E.

## **6.3 PRÁCTICAS DE LABORATORIO**

Anexo F.

- Trefilación de barras de Aluminio y Cobre Recocido
- Ensayo de Dureza
- Ensayo de Tracción en materiales no ferrosos
- Preparación y análisis metalográfico de materiales no ferrosos

## **6.4 SIMULACIÓN BARRA DE TREFILADO**

Anexo G

## **6.5 PRUEBAS**

### **6.5.1 PRUEBA DE TREFILACIÓN A VARIAS VELOCIDADES**

El equipo de trefilado funciona a diferentes velocidades con o sin carga y dependiendo el tipo de material a trefilar como se indica en la Tabla 6.1.

Tabla 6. 1 Velocidades para trefilar aluminio y cobre recocido

| VELOCIDADES PARA EL ALUMINIO |                             |                             |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| # DE PERILLA                 | VELOCIDAD SIN CARGA (m/min) | VELOCIDAD CON CARGA (m/min) |
| 3                            | 1,64                        | 1,34                        |
| 4                            | 2,00                        | 1,64                        |
| 5                            | 2,29                        | 2,03                        |
| 6                            | 2,82                        | 2,34                        |
| 7                            | 3,25                        | 2,66                        |
| 8                            | 3,60                        | 2,70                        |
| 9                            | 3,64                        | 2,90                        |

| VELOCIDADES PARA EL COBRE RECOCIDO |                             |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| # DE PERILLA                       | VELOCIDAD SIN CARGA (m/min) | VELOCIDAD CON CARGA (m/min) |
| 5                                  | 2,29                        | 2,06                        |
| 7                                  | 3,25                        | 2,57                        |
| 9                                  | 3,64                        | 3,00                        |

### 6.5.2 FOTOS PRUEBAS MÁQUINA



Figura 6. 8 Prueba de Velocidades

## 6.6 RESULTADOS

### 6.6.1 PRUEBA DE TREFILACIÓN A VARIAS VELOCIDADES

**Tabla 6. 2 Resultado de barras de aluminio trefiladas**

| TREFILACIÓN EN BARRAS DE ALUMINIO |            |            |            |            |            |       |       |          |                 |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|----------|-----------------|
| Nº                                | Do<br>(mm) | Df<br>(mm) | Lo<br>(mm) | Lf<br>(mm) | L1<br>(mm) | V%    | R%    | t<br>(s) | # DE<br>PERILLA |
| 1                                 | 7,12       | 6,68       | 280        | 326        | 318,10     | 16,43 | 11,98 | 14,51    | 3               |
| 2                                 | 7,14       | 6,66       | 281        | 328        | 322,96     | 16,73 | 12,99 | 14,97    | 3               |
| 3                                 | 7,16       | 6,68       | 281        | 323        | 322,83     | 14,95 | 12,96 | 14,29    | 3               |
| 4                                 | 7,10       | 6,60       | 280        | 329        | 324,03     | 17,50 | 13,59 | 14,55    | 3               |
| 5                                 | 7,14       | 6,64       | 281        | 330        | 324,91     | 17,44 | 13,52 | 8,25     | 6               |
| 6                                 | 7,16       | 6,68       | 278        | 328        | 319,39     | 17,99 | 12,96 | 8,07     | 6               |
| 7                                 | 7,10       | 6,64       | 279        | 324        | 319,00     | 16,13 | 12,54 | 8,59     | 6               |
| 8                                 | 7,10       | 6,66       | 281        | 328        | 319,36     | 16,73 | 12,01 | 8,40     | 6               |
| 9                                 | 7,16       | 6,62       | 282        | 332        | 329,88     | 17,73 | 14,51 | 6,81     | 9               |
| 10                                | 7,10       | 6,66       | 276        | 326        | 313,67     | 18,12 | 12,01 | 7,00     | 9               |
| 11                                | 7,10       | 6,60       | 282        | 331        | 326,35     | 17,38 | 13,59 | 6,73     | 9               |
| 12                                | 7,10       | 6,62       | 279        | 323        | 320,93     | 15,77 | 13,06 | 6,88     | 9               |

**Tabla 6. 3 Resultado de barras de cobre recocido trefiladas**

| TREFILACIÓN EN BARRAS DE COBRE RECOCIDO |            |            |            |            |            |       |       |          |                 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|----------|-----------------|
| Nº                                      | Do<br>(mm) | Df<br>(mm) | Lo<br>(mm) | Lf<br>(mm) | L1<br>(mm) | V%    | R%    | t<br>(s) | # DE<br>PERILLA |
| 1                                       | 8,00       | 7,44       | 276        | 312        | 319,11     | 13,04 | 13,51 | 9,13     | 5               |
| 2                                       | 8,00       | 7,40       | 276        | 312        | 322,57     | 13,04 | 14,44 | 9,07     | 5               |
| 3                                       | 7,96       | 7,40       | 277        | 314        | 320,51     | 13,36 | 13,58 | 9,15     | 5               |
| 4                                       | 8,00       | 7,44       | 277        | 314        | 320,27     | 13,36 | 13,51 | 7,41     | 7               |
| 5                                       | 7,98       | 7,46       | 282        | 320        | 322,68     | 13,48 | 12,61 | 7,39     | 7               |
| 6                                       | 7,96       | 7,40       | 281        | 318        | 325,14     | 13,17 | 13,58 | 7,44     | 7               |
| 7                                       | 8,00       | 7,46       | 278        | 315        | 319,70     | 13,31 | 13,04 | 6,20     | 9               |
| 8                                       | 7,98       | 7,46       | 276        | 313        | 315,82     | 13,41 | 12,61 | 6,38     | 9               |
| 9                                       | 8,00       | 7,44       | 277        | 314        | 320,27     | 13,36 | 13,51 | 6,10     | 9               |

**Donde:**

Do: Diámetro inicial

Df: Diámetro final

Lo: Longitud inicial

Lf: Longitud final experimental

L<sub>1</sub>: Longitud final teórica

L%: Porcentaje de alargamiento

R%: Porcentaje de trabajo en frío

t: Tiempo que se demora en trefilar la barra

# De Perilla: Indica la velocidad a la cual va ser trefilada la barra

## CÁLCULOS

Longitud final ( $L_1$ )

El aumento de la longitud está en razón inversa con la reducción de sección. Durante la trefilación nunca utilizar la superficie, sino el diámetro de la barra.

$$L_1 = \frac{D_o^2 \cdot L_o}{D_f^2} \quad (6.1)$$

$$L_1 = \frac{8,00^2 \cdot 276}{7,44^2} = 319,11 \text{ mm}$$

Porcentaje de alargamiento (L%)

Cálculo partiendo de la longitud conocida

$$L\% = \frac{L_f - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad (6.2)$$

$$L\% = \frac{312 - 276}{276} \cdot 100 = 13,04 \%$$

Porcentaje de Trabajo en frío (R%)

$$R\% = \frac{A_o - A_f}{A_o} \cdot 100 \quad (6.3)$$

$$R\% = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D_o^2 - \frac{\pi}{4} \cdot D_f^2}{\frac{\pi}{4} \cdot D_o^2} \cdot 100$$

$$R\% = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot 8,00^2 - \frac{\pi}{4} \cdot 7,44^2}{\frac{\pi}{4} \cdot 8,00^2} \cdot 100 = 13,51 \%$$

## 6.6.2 ENSAYO DE TRACCIÓN A BARRAS TREFILADAS

### 6.6.2.1 Barras de Cobre recocido

Tabla 6. 4 Datos Barras de Cobre Recocido

| DATOS |                |          |          |                         |              |
|-------|----------------|----------|----------|-------------------------|--------------|
| Barra | Diámetro<br>mm | Lo<br>mm | Lf<br>mm | Área<br>mm <sup>2</sup> | Carga<br>Kgf |
| ST    | 8              | 40       | 67,60    | 50,26                   | 1344         |
| 4     | 7,6            | 40       | 55,27    | 45,36                   | 1378         |
| 6     | 7,6            | 40       | 56,64    | 45,36                   | 1372         |
| 7     | 7,6            | 40       | 56,78    | 45,36                   | 1376         |

| mm  | Kg   |
|-----|------|
| 200 | 2000 |
| 8   | 80   |

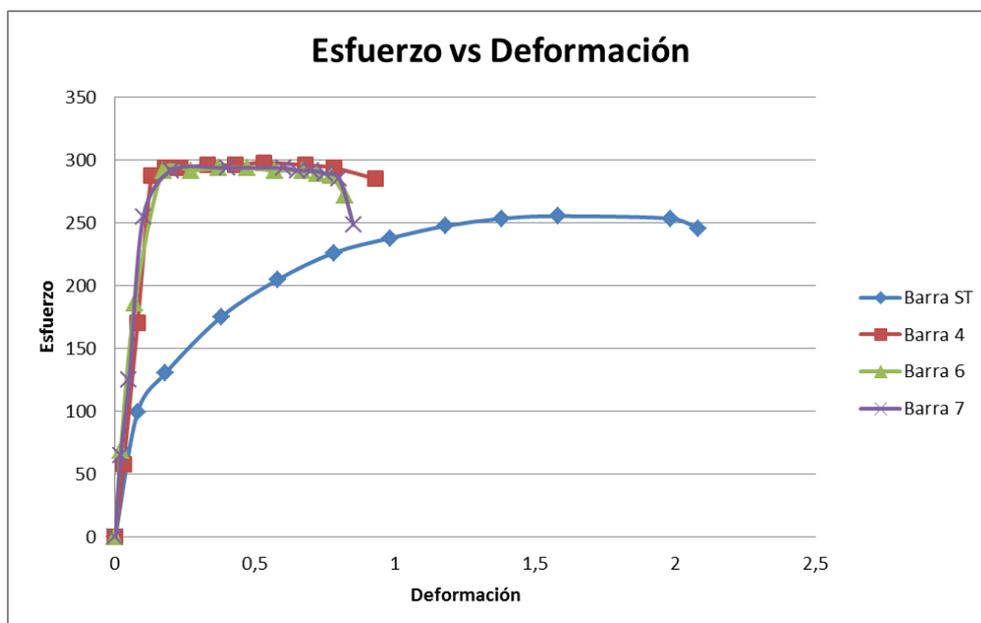


Figura 6. 9 Gráfica Esfuerzo – Deformación Barras de Cobre

Tabla 6. 5 Resultado Ensayo de Tracción Cobre Recocido

| Barra Cobre | Carga Rotura |          | Punto de Fluencia | Punto Máximo | Área<br>mm <sup>2</sup> |
|-------------|--------------|----------|-------------------|--------------|-------------------------|
|             | Kgf          | N        | N                 | N            |                         |
| ST          | 1209         | 11848,20 | 8820              | 12838        | 50,26                   |
| 4           | 1243         | 12181,40 | 13034             | 13524        | 45,36                   |
| 6           | 1237         | 12122,60 | 13230             | 13328        | 45,36                   |
| 7           | 1241         | 12161,80 | 11564             | 13328        | 45,36                   |

| Barra Cobre | Resistencia a la Rotura<br>MPa | Resistencia a la Fluencia<br>MPa | Resistencia a la Tracción<br>MPa | Porcentaje de Alargamiento<br>% |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ST          | 235,72                         | 175,47                           | 255,41                           | 69,00                           |
| 4           | 268,53                         | 287,32                           | 298,13                           | 38,18                           |
| 6           | 267,23                         | 291,64                           | 293,80                           | 41,60                           |
| 7           | 268,10                         | 254,92                           | 293,80                           | 41,95                           |

## 6.6.2.2 Barras de Aluminio

Tabla 6. 6 Datos Barras de Aluminio

| DATOS |                |          |          |                         |              |
|-------|----------------|----------|----------|-------------------------|--------------|
| Barra | Diámetro<br>mm | Lo<br>mm | Lf<br>mm | Área<br>mm <sup>2</sup> | Carga<br>Kgf |
| ST    | 6,04           | 51,06    | 54,10    | 28,65                   | 756          |
| 1     | 5,66           | 100      | 112,75   | 25,16                   | 856          |
| 2     | 5,82           | 58,02    | 61,32    | 26,60                   | 848          |
| 3     | 5,73           | 80,17    | 83,44    | 25,79                   | 720          |

| mm  | Kg   |
|-----|------|
| 200 | 2000 |
| 3   | 30   |

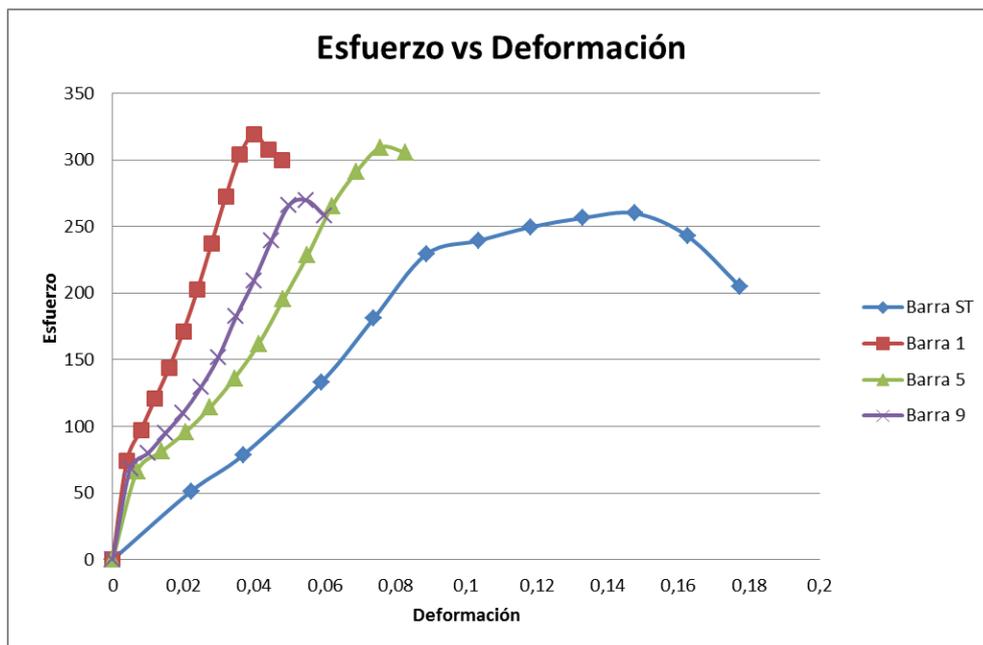


Figura 6. 10 Gráfica Esfuerzo – Deformación Barras de Aluminio

Tabla 6. 7 Resultado Ensayo de Tracción Aluminio

| Barra<br>Aluminio | Carga Rotura |         | Punto de<br>Fluencia | Punto<br>Máximo | Área<br>mm <sup>2</sup> |
|-------------------|--------------|---------|----------------------|-----------------|-------------------------|
|                   | Kgf          | N       | N                    | N               |                         |
| ST                | 621          | 6085,80 | 6860                 | 7448            | 28,65                   |
| 1                 | 721          | 7065,80 | 7644                 | 8036            | 25,16                   |
| 5                 | 713          | 6987,40 | 7056                 | 8232            | 26,60                   |
| 9                 | 585          | 5733,00 | 6860                 | 6958            | 25,79                   |

| Barra<br>Aluminio | Resistencia<br>a la Rotura | Resistencia a<br>la Fluencia | Resistencia<br>a la Tracción | Porcentaje de<br>Alargamiento |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|                   | MPa                        | MPa                          | MPa                          |                               |
| ST                | 212,40                     | 239,43                       | 259,95                       | 5,95                          |
| 1                 | 280,83                     | 303,81                       | 319,39                       | 12,75                         |
| 5                 | 262,66                     | 265,24                       | 309,44                       | 5,69                          |
| 9                 | 222,33                     | 266,03                       | 269,83                       | 4,08                          |

Como se puede observar los valores en rojo son sin trefilar y al compararlos con los de valores en azul (barras trefiladas), se puede concluir que el trabajo en frío realizado al cobre recocido y aluminio, cumple con los efectos del conformado como se indica en la sección 2.3.1.

- Incremento de la resistencia a la tracción
- Disminuye la ductilidad y elasticidad.
- Incremento de la Fragilidad

Al comprar la gráfica 6.9 y 6.10 se demuestra que al realizar más trabajo en frío se incrementa la fragilidad del material, debido a que las barras de aluminio no fueron recocidas.

### 6.6.3 ENSAYO DE DUREZA A BARRAS TREFILADAS

#### 6.6.3.1 Barras de Cobre Recocido

**Tabla 6. 8 Resultado Ensayo De Dureza Barras de Cu Recocido**

| Barras de Cobre | Medida 1    | Medida 2    | Medida 3    | HRF          | HRB      | HB       |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------|----------|
| <b>ST (Re)</b>  | <b>41,8</b> | <b>47,3</b> | <b>40,1</b> | <b>43,07</b> | <b>0</b> | <b>0</b> |
| 1               | 60,6        | 79          | 78,4        | 72,67        | 27,34    | 65,34    |
| 5               | 77,7        | 71,9        | 81          | 76,87        | 34,95    | 70,95    |
| 8               | 82,2        | 74,8        | 82,4        | 79,80        | 40,17    | 75       |

#### 6.6.3.2 Barras de Aluminio

**Tabla 6. 9 Resultado Ensayo de Dureza de Barras de Aluminio**

| Barras de aluminio Probeta | Medida 1    | Medida 2    | Medida 3    | HRF          | HRB         | HB          |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| <b>ST</b>                  | <b>66,8</b> | <b>67,5</b> | <b>64,7</b> | <b>66,33</b> | <b>13,8</b> | <b>56,8</b> |
| 2                          | 64,2        | 68,4        | 68,7        | 67,10        | 18,1        | 60,1        |
| 6                          | 70,6        | 64,5        | 71,8        | 68,97        | 20,94       | 61,94       |
| 8                          | 74,3        | 71          | 74,3        | 73,20        | 28,4        | 66          |

En el caso del ensayo de dureza se cumple con el incremento de dureza a las barras de cobre recocido y el aluminio.

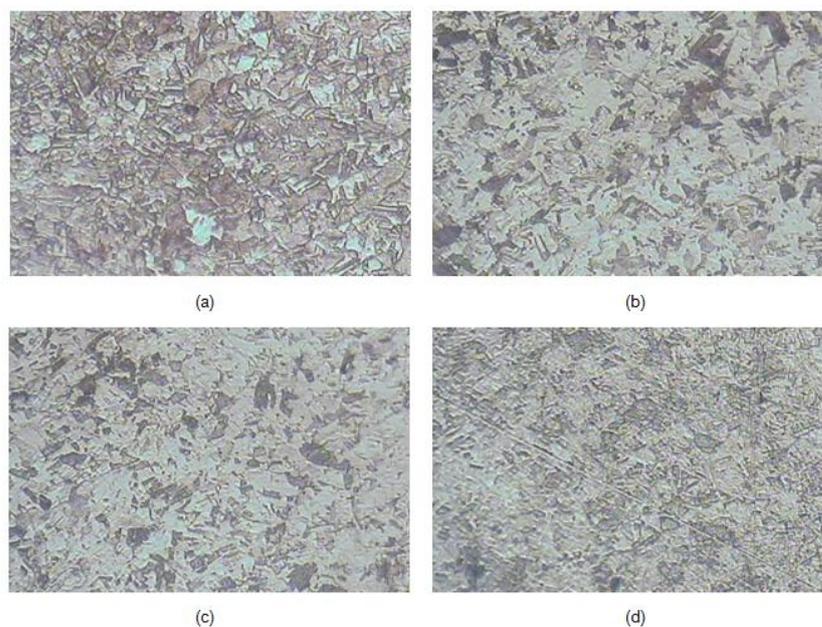
## 6.6.4 ENSAYO DE ANÁLISIS METALOGRÁFICO A BARRAS TREFILADAS

El reactivo, (ASTM, 2005) que corresponde para el ataque químico de las probetas de cobre es:

- 1 g  $K_2Cr_2O_7$
- 4 mL  $H_2SO_4$
- 50 mL Agua Destilada

Este reactivo se lo aplica durante 5 minutos.

En la Figura 6.1 se muestra gráficamente la deformación que sufre la estructura cristalina del cobre recocido.



**Figura 6. 11 Estructura de grano del cobre recocido, producido por el trabajo en frío (100x)**

**Tabla 6. 10 Análisis de Microfotografías del cobre recocido**

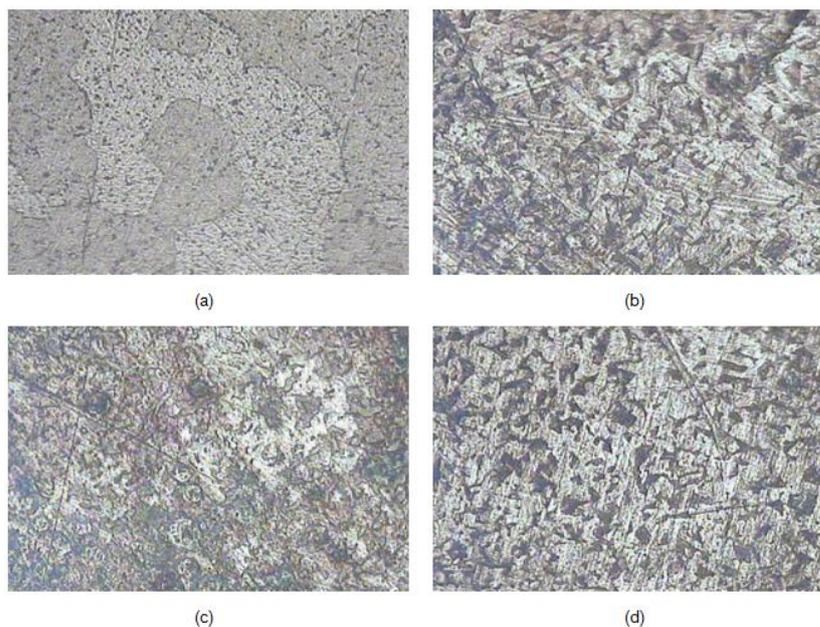
| ITEM | N° PROBETA                           | %TRABAJO EN FRÍO | V (m/min) | CONCLUSIÓN  |
|------|--------------------------------------|------------------|-----------|---|
| a    | Barra de cobre recocida sin trefilar |                  |           | En la microfotografía se observan granos de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados. |
| b    | 3                                    | 13,58            | 2,06      | En las microfotografías se observan granos de similar tamaño orientados al azar y de bordes rectos y alargados. |
| c    | 5                                    | 12,61            | 2,6       |   |
| d    | 7                                    | 13,04            | 3,05      |   |

El reactivo que corresponde para el ataque químico de las probetas de aluminio es:

- 1 mL HF
- 200 mL Agua Destilada

Este reactivo se lo aplica durante 5 minutos.

En la Figura 6.2 se muestra gráficamente la deformación que sufre la estructura cristalina del Aluminio.



**Figura 6. 12 Estructura de grano del aluminio, producido por el trabajo en frío (100x)**

**Tabla 6. 11 Análisis de Microfotografías del Aluminio**

| ITEM | N° PROBETA                     | %TRABAJO EN FRÍO | V (m/min) | CONCLUSIÓN   |
|------|--------------------------------|------------------|-----------|--|
| a    | Barra de aluminio sin trefilar |                  |           | En la microfotografía se observan granos de diferentes tamaños, de bordes rectos y curvados.                     |
| b    | 1                              | 11,98            | 1,35      | En las microfotografías se observan granos de similar tamaño orientados al azar, de bordes curvados y alargados. |
| c    | 5                              | 13,52            | 2,4       |  |
| d    | 10                             | 12,01            | 2,79      |  |

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 7.1 COSTOS DE PRODUCCIÓN

##### 7.1.1 COSTOS DIRECTOS

Los costos directos son todos aquellos necesarios para la producción del equipo de trefilado.

##### 7.1.1.1 Costos de materiales

**Tabla 7. 1 Costos de materiales del Equipo de Trefilado**

| COMPONENTE                     | MATERIAL                      | DIMENSIONES              | CANTIDAD | P. UNIT. | P. TOTAL. |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------|----------|-----------|
| <b>Mesa de trefilado</b>       |                               |                          |          |          |           |
| Placa Superficie Mesa          | ASTM A36                      | 1500x400x6 (mm)          | 1        | 85,25    | 85,25     |
| Cuadro mesa                    | Tubo Cuadrado<br>ASTM A 500 B | 40x40x2 (mm)<br>x 6000mm | 2        | 19,46    | 19,46     |
| Patas Mesa                     |                               |                          |          |          |           |
| Tubo Centro                    | ASTM A 36                     | 50x50x2 (mm) x<br>6000mm | 1        | 20,32    | 20,32     |
| Ángulo Base                    |                               |                          |          |          |           |
| Cuadro base motor              | ASTM A 36                     | 400x250x6 (mm)           | 2        | 15,25    | 30,50     |
| Placa mesa motor               | Tol Galvanizado               | 1220 x 1220 (mm)         | 1        | 12,25    | 12,25     |
| Cubiertas Mesa                 | <b>Sistema de extracción</b>  |                          |          |          |           |
| Placa Superficie alza          | ASTM A 36                     | 1000x130x8 (mm)          | 1        | 60,00    | 60,00     |
| Placa lados alza               | ASTM A 36                     | 1000x600x8 (mm)          | 2        | 8,00     | 16,00     |
| Placa base Alza                | ASTM A 36                     | 300x130x10 (mm)          | 1        | 7,52     | 7,52      |
| Ejes guía                      | AISI 1018                     | Ø5/8" x 1000mm           | 2        | 6,55     | 13,10     |
| Guía                           | ASTM A 36                     | 50x50x130 (mm)           | 1        | 5,25     | 5,25      |
| Apoyo A                        | AISI 1045                     | 50x50x50 (mm)            | 3        | 3,54     | 10,62     |
| Apoyo B                        | AISI 1045                     | 50x50x100 (mm)           | 1        | 4,25     | 4,25      |
| Cáncamo                        | Acero Forjado                 | M12 x1,25                | 1        | 26,49    | 26,49     |
| Llave tipo torno               | AISI 306                      | 1/2"                     | 1        | 10,00    | 10,00     |
| Mordaza                        | ASTM A 36                     | 50x50x80 (mm)            | 1        | 4,15     | 4,15      |
| Resortes                       | ASTM A 227                    |                          | 2        | 7,50     | 15,00     |
| Bocines                        | ASTM A 36                     | Φ 1" x 40 (mm)           | 4        | 1,25     | 5,00      |
| Cubierta Sistema de extracción | Acrílico                      | 500X750X3 mm             | 1        | 27,65    | 27,65     |
| Pernos allen                   | Grado 12                      | M8 x 60 (mm)             | 4        | 0,40     | 1,60      |
| Pernos Cabeza Hexagonal        | Grado 8                       | M8 x 30 mm               | 8        | 0,65     | 5,20      |

| <b>Winche</b>                                 |               |                     |    |        |        |
|---|---------------|---------------------|----|--------|--------|
| Lados Winche                                  | AISI 1045     | Ø3" x 1"            | 2  | 6,25   | 12,50  |
| Tubo Winche                                   | ASTMA 500 B   | 2 1/2" x 1000 mm    | 1  | 14,00  | 14,00  |
| Chumaceras de banco                           | F250          | Ø 1"                | 2  | 6,78   | 13,56  |
| Alzas winche                                  | ASTMA 36      | 150 x 30x 10 (mm)   | 2  | 1,26   | 2,52   |
| Acople  | ASTMA 36      | 1 1/2" x 3"         | 1  | 5,23   | 5,23   |
| Retenedor Cable                               | ASTMA 36      | 130 x 130 x100 (mm) | 1  | 37,09  | 37,09  |
| Grapas  | Galvanizado   | 1/4"                | 20 | 0,25   | 5,00   |
| Eje winche                                    | AISI 1018     | 1" x 300 mm         | 1  | 4,25   | 4,25   |
| Guardacable                                   | Galvanizado   | 1/4"                | 2  | 1,10   | 2,20   |
| Pernos Allen                                  | Acero         | M8 x 50 mm          | 2  | 0,35   | 0,70   |
| Pernos Cabeza Hexagonal                       | Acero         | 1/2" x 1 1/2"       | 4  | 0,28   | 1,12   |
| Cable   | Aral mejorado | Ø1/4"               | 4  | 1,10   | 4,40   |
| Pernos allen                                  | Grado 12      | M8 x 100 mm         | 4  | 0,85   | 1,12   |
| <b>Sistema Motriz</b>                         |               |                     |    |        |        |
| Motorreductor Ortogonal modelo CM 90          | -             | 1HP                 | 1  | 776,16 | 776,16 |
| Variador de velocidad de 1HP                  | -             | 1HP                 | 1  | 188,58 | 188,58 |
| Panel de programación básico                  | -             |                     | 1  | 32,18  | 32,18  |
| Cable sucre trifásico                         | -             | #14                 | 8  | 2,50   | 20,00  |
|   | -             | #12                 | 2  | 2,25   | 4,50   |
| Enchufe eléctrico Trifásico                   | -             | 220 V               | 1  | 8,55   | 8,55   |
|   | -             | 110V                | 4  | 1,25   | 5,00   |
| <b>Panel de Control</b>                       |               |                     |    |        |        |
| Gabinete eléctrico trefiladora                | -             | 400X400X200 mm      | 1  | 430,40 | 430,40 |
| <b>Sistema de Lubricación y Refrigeración</b> |               |                     |    |        |        |
| Placas, depósito del Lubricante               | ASTM A36      | 220 x 160 x 3 mm    | 2  | 22,15  | 22,15  |
|   |               | 217 x 204 x 3 mm    | 2  |        |        |
|   |               | 210 x 160 x 3 mm    | 1  |        |        |
| Placas, depósito de Refrigeración             | ASTM A 36     | 160 x 160 x 3 mm    | 2  |        |        |
|   |               | 160 x 156 x 3 mm    | 3  |        |        |
| Unión   | Galvanizado   | 1/2"                | 4  | 0,45   | 1,80   |
| Codo cachimba                                 | PVC           | 1/2"                | 2  | 0,45   | 0,90   |
| Medidor Nivel                                 | PCV           |                     | 1  | 0,25   | 0,25   |
|   |               |                     | 1  | 0,25   | 0,25   |
| Tomas de Liquido                              | Acero         | 1/4" x 2"           | 4  | 1,50   | 6,00   |
| Neplos con espigas                            | Bronce        | 1/4"                | 7  | 4,45   | 31,15  |
| T   | Galvanizado   | 1/4"                | 2  | 0,55   | 1,10   |
| Codo cachimba                                 | Acero 304     | 1/4"                | 3  | 0,45   | 1,35   |
| Abrazaderas HSS5                              | Bronce        | 1/2"                | 20 | 0,30   | 6,00   |
| Codo  | Galvanizado   | 1/4"                | 1  | 0,45   | 0,45   |
| Neplo   | Galvanizado   | 1/4" x 8 mm         | 1  | 0,75   | 0,75   |
| Acople rápido hembra                          | Bronce        | 1/4"                | 5  | 5,20   | 26,00  |
| Manguera                                      | Plástico      | Ø1/4" x 3000 mm     | 1  | 0,50   | 0,50   |
| Filtro  | Plástico      | 800 micras          | 1  | 1,50   | 1,50   |
| BOMBA P/FUENTES 40 PW                         | Plástico      | 1000 lt/min         | 1  | 34,35  | 34,35  |
| BOMBA P/FUENTES 80 PW                         | Plástico      | 2000 lt/min         | 1  | 35,32  | 35,32  |
| Pernos cabeza Hexagonal                       | Grado 8       | M8 x 30 mm          | 8  | 0,35   | 2,80   |

| <b>Bastidor</b>              |                     |                  |    |       |         |
|------------------------------|---------------------|------------------|----|-------|---------|
| Placas para Bastidor         | ASTM A36            | 210X185X6 mm     | 4  | 25,25 | 25,25   |
|                              |                     | 198X180X6 mm     | 1  |       |         |
|                              |                     | 25X24X6 mm       | 2  |       |         |
|                              |                     | 280X222X6 mm     | 1  |       |         |
| Tapa Bastidor                | Acrílico            | 220X210X6 mm     | 1  | 3,45  | 3,45    |
| Acople rápido macho          | Bronce              | 1/4"             | 4  | 1,50  | 6,00    |
| Acople rápido hembra         | Bronce              | 1/4"             | 1  | 5,20  | 5,20    |
| Codo cachimba                | Hierro Fundido      | 1/4"             | 1  | 0,50  | 0,50    |
| Unión                        | Hierro Fundido      | 1/4"             | 2  | 0,40  | 0,80    |
| Neplo adaptador              | Galvanizado         | 1/4"             | 3  | 0,40  | 1,20    |
| Perno cabeza hexagonal       | Grado 8             | M8X30 mm         | 4  | 0,20  | 0,80    |
| Perno cabeza hexagonal       | Grado 8             | M8X20 mm         | 6  | 0,20  | 1,20    |
| Perno cabeza hexagonal       | Grado 8             | M8X10 mm         | 2  | 0,15  | 0,30    |
| <b>Hileras</b>               |                     |                  |    |       |         |
| Núcleo                       | Acero K100          | Ø30X25 mm        | 2  | 5,10  | 10,20   |
| Encajadura                   | SAE 1040            | Ø80X41 mm        | 2  | 8,25  | 16,50   |
| <b>Caja de Refrigeración</b> |                     |                  |    |       |         |
| Tocho Cuadrado               | ASTM A36            | 200X155X75 mm    | 1  | 35,75 | 35,75   |
| Tocho Redondo                | ASTM A37            | Ø100X45 mm       | 1  | 18,25 | 18,25   |
| Acople rápido macho          | Bronce              | 1/4"             | 2  | 1,50  | 3,00    |
| Codo cachimba                | Hierro Fundido      | 1/4"             | 1  | 0,50  | 0,50    |
| Oring                        | Caucho              | Ø3X500 mm        | 1  | 0,50  | 0,50    |
| <b>Otros</b>                 |                     |                  |    |       |         |
| Electrodos                   | 6011                | 1/8"             | 50 | 0,22  | 11,00   |
| Electrodos                   | 7018                | 3/16"            | 20 | 0,35  | 7,00    |
| Disco                        | Desbaste            | 2 1/2"           | 1  | 2,75  | 2,75    |
|                              | Flat                | 2 1/2" x 80 grid | 4  | 4,25  | 17,00   |
|                              | Corte               | 7" X 1/8"        | 4  | 2,85  | 11,40   |
| Brocas                       | HSS                 | 1/8"             | 8  | 1,25  | 10,00   |
|                              |                     | 1/4"             | 4  | 2,25  | 9,00    |
|                              |                     | 3/8"             | 2  | 2,75  | 5,50    |
|                              |                     | 1/2"             | 2  | 3,50  | 7,00    |
|                              |                     | 8 mm             | 4  | 1,95  | 7,80    |
|                              |                     | 5 mm             | 1  | 1,75  | 1,75    |
|                              |                     | 6 mm             | 1  | 5,65  | 5,65    |
| Machuelos                    | HSS                 | M7               | 1  | 16,24 | 16,24   |
|                              |                     | 1/4"             | 1  | 5,75  | 5,75    |
| Escariador Cónico            | HSS                 | 6 - 7 mm         | 1  | 24,12 | 24,12   |
| Pernos Cabeza Hexagonal      | Grado 8,2           | 1/4" x 1"        | 24 | 0,22  | 5,28    |
| Barras suelda                | Bronce              | 1/8" x 1m        | 6  | 1,25  | 7,50    |
| Borax                        |                     | 1/8"             | 1  | 1,50  | 1,50    |
| Lubricante                   | ISO 32              | Litros           | 6  | 5,75  | 34,50   |
| Tratamiento térmico          | K100                | Kg               | 1  | 4,85  | 4,85    |
|                              | Barras de cobre     | Kg               | 3  | 4,85  | 14,55   |
| Barras                       | Cobre electrolitico | Ø 5/16"          | 5  | 20,25 | 101,25  |
|                              | Aluminio            | Ø 7mm            | 16 | 5,25  | 84,00   |
| <b>TOTAL</b>                 |                     |                  |    |       | 2651,83 |

### 7.1.1.2 Costos de mano de obra

**Tabla 7. 2 Costos de mano de obra del Equipo de Trefilado**

| <b>TRABAJO</b>                         | <b>TOTAL (USD)</b> |
|--|--------------------|
| Mesa de trefilado                      | 40,00              |
| Sistema de extracción                  | 430,00             |
| Winche                                 | 125,00             |
| Panel de Control                       | 40,00              |
| Sistema de Lubricación y Refrigeración | 20,00              |
| Bastidor                               | 177,00             |
| Hileras                                | 200,00             |
| Caja de Refrigeración                  | 393,00             |
| Barras                                 | 80,00              |
| <b>TOTAL</b>                           | <b>1505,00</b>     |

### 7.1.1.3 Costos de acabados

**Tabla 7. 3 Costo total de acabados**

| <b>CANTIDAD</b> | <b>UNIDAD</b> | <b>P. UNIT.</b> | <b>P. TOTAL</b> |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1lt.            | Pintura Negra | 5,75            | 5,75            |
| 1lt.            | Pintura Ploma | 6,75            | 6,75            |
| 1lt.            | Pintura Verde | 6,75            | 6,75            |
| 1lt.            | Pintura Fondo | 7,25            | 7,25            |
| 4lt.            | Thinner       | 0,70            | 2,80            |
| 1gal.           | Gasolina      | 1,48            | 1,48            |
|                 | Otros         | 5,00            | 5,00            |
| <b>TOTAL</b>    |               |                 | <b>35,78</b>    |

## 7.1.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos son los que no se atribuyen directamente a la producción del equipo de trefilado, sino a la parte operativa del taller y producción.

### 7.1.2.1 Costo de uso de taller

**Tabla 7. 4 Costo total de uso de taller**

| <b>EQUIPO DE TREFILADO</b>     | <b>VALOR (USD)</b> |
|--------------------------------|--------------------|
| Uso de máquinas y herramientas | 100,00             |
| <b>TOTAL</b>                   | <b>100,00</b>      |

### 7.1.2.2 Costo de transporte

**Tabla 7. 5 Costo de transporte**

| <b>RUBRO</b>                         | <b>VALOR (USD)</b> |
|--------------------------------------|--------------------|
| Transporte de Piezas Maquinadas      | 40,00              |
| Transporte de materiales             | 100,00             |
| Transporte del equipo de trefilación | 10,00              |
| <b>TOTAL</b>                         | <b>250,00</b>      |

### 7.1.3 COSTO TOTAL

El costo total es la suma de los costos directos e indirectos que intervienen en la fabricación del equipo de trefilado.

**Tabla 7. 6 Costo total**

|                        |                |
|------------------------|----------------|
| Costo de materiales    | 2651,83        |
| Costo de mano de obra  | 1505,00        |
| Costo de acabados      | 35,78          |
| Costo de uso de taller | 100,00         |
| Costo de transporte    | 250,00         |
| <b>TOTAL (USD)</b>     | <b>4542,61</b> |

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

- Se ha logrado cumplir con el objetivo de diseñar y construir un equipo para el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos, logrando grandes resultados al obtener una eficiencia mecánica del 65.09%.
- El equipo fue probado en su totalidad realizando pruebas a 40 barras de aluminio de  $\varnothing$  7.20 mm y 20 barras de cobre recocido de  $\varnothing$  8.00 mm de 350 mm de longitud para todas las barras, a varias velocidades, obteniendo como velocidad máxima de trefilado 3 m/min.
- Al investigar el material para la construcción del núcleo del dado se encontró que el tungsteno es ideal para realizar el proceso de trefilado, pero es un material que no se encuentra en el mercado nacional, por tal motivo se seleccionó un acero K100 tratado térmicamente con una dureza de 62 HRC
- Todas las opciones de metales no ferrosos, para su producción y posteriormente su distribución son conformadas en frío y posteriormente tratadas térmicamente, por tal motivo se realizó un recocido (a 350° C durante un hora para el cobre) para librar tensiones y de esta forma poder utilizar en nuestro proyecto.
- Al investigar el tipo de lubricante para el proceso de trefilado se concluye que este depende del material a trefilar, de la velocidad, de la forma de lubricar, y de la disponibilidad en el mercado nacional, de esta manera se selecciona un aceite ISO 32 como lubricante.

- Al realizar el proceso de trefilado con un trabajo en frío del 15 % para las barras de cobre recocido y aluminio Prodax se obtuvo un incremento del 13 % y 19% en su resistencia a la rotura respectivamente y del 44 % 10% en su dureza pero disminuyendo su alargamiento un 65% y 45%.

De esta forma se cumple con los efectos de trefilado que son los siguientes:

- Incremento de la resistencia del material
  - Aumento de la dureza del material
  - Disminución del porcentaje de alargamiento
- El equipo de trefilado de metales no ferrosos realiza un trabajo en frío máximo del 20% para barras de cobre recocido y aluminio Prodax de diámetro entre 6 - 8 mm y una longitud máxima de 500 mm, obteniendo un excelente acabado superficial y optimas propiedades mecánicas.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

- El bastidor debe estar alineado tanto horizontal como verticalmente de tal forma que la barra corra perpendicular al dado.
- El equipo de trefilado realiza el conformado en frío solo para metales no ferros de un diámetro estándar de 7 a 8 mm y una longitud máximo 500 mm y con un trabajo en frío máximo del 20%.
- Si la calidad de la superficie de la barra se está deteriorando o la ovalización es demasiado grande se deben enviar los núcleos de acero K100 a rectificar.

- Para realizar el trefilado de barras de cobre es recomendable realizar un recocido para aliviar las tensiones y facilitar el proceso de conformado.
- Prevenir la presencia de agua o impurezas en el aceite lubricante y verificar el normal funcionamiento de la bomba de lubricación, ya que el lubricante protege las hileras y realza la superficie del producto acabado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson.
- ASTM, N. A. (2005). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. United States of America: ASTM.
- Bawa, H. (2004). *Procesos de Manufactura*. India: McGraw-Hill.
- Bohler, E. (2010). *Manual de aceros para trabajo en frío*. Austria.
- Budynas, R. (2012). *Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.
- Callister, W. (2002). *Introducción e Ingeniería de los Materiales*. México: Reverté.
- Dieter, J. (2003). *Handbook of Workability and Process Design*. United States of America: ASM International.
- Esteves, G. (2008). *Su manual sobre hilas de trefilado*. España: Capellades Disseny.
- Gere, J. M. (2008). *Mecánica de Materiales*. México: Cengage Learning.
- Grover, M. (2007). *Fundamentos de la manufactura Moderna*. México: McGraw-Hill.
- Handbook, A. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials*. United States of America: The Material Information Company.
- Heinz, T. (2006). *Metal Forming Process*. Alemania: Springer-Verlag.
- Kalpakjian, S. (2002). *Manufactura Ingeniería y Tecnología*. México: Pearson Education.
- Larburu, N. (1991). *Máquinas Prontuario*. España: Paraninfo.
- Mangonon, P. (2001). *Ciencia de los Materiales Selección y Diseño*. México: Pearson Education.
- Molera, P. (1991). *Tratamientos Térmicos de los metales*. España: Colección Productiva.
- Norton, R. (1999). *Diseño de Máquinas*. México: Pearson.
- Schey, J. (2002). *Procesos de Manufactura*. México: McGraw-Hill.
- Serway, R. (1992). *Física General*. México: McGraw-Hill.
- Smith, W. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. España: McGraw-Hill.
- Tschaetsch, H. (2005). *Metal Forming Practice*. Germany: Springer.
- Wright, R. (2011). *Wire Technology Process Engineering and Metallurgy*. United States of America: Elsevier.
- Zabarás, N. (2000). *The Ideal Work Method for the Analysis of forming processes*. United States of America: Spring.

# ANEXOS