

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



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA SEMIAUTOMÁTICA  
PARA EL LIJADO DE MUESTRAS METALGRÁFICAS PLANAS**

**PRESENTADO POR:**

**NELSON SANTOS LIMA JACO**

**ELMER ALEXANDER LÓPEZ CISNEROS**

**JUAN CARLOS LÓPEZ CORTEZ**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2003**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTORA**

**:**

**Dra. María Isabel Rodríguez**

**SECRETARIA GENERAL**

**:**

**Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO**

**:**

**Ing. Mario Roberto Nieto Lovo**

**SECRETARIO**

**:**

**Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DIRECTOR**

**:**

**Ing. Juan Antonio Flores Díaz**

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

**Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:  
Ingeniero Mecánico**

**Título :**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA SEMIAUTOMÁTICA  
PARA EL LIJADO DE MUESTRAS METALOGRAFICAS PLANAS**

**Presentado por :**

**NELSON SANTOS LIMA JACO  
ELMER ALEXANDER LÓPEZ CISNEROS  
JUAN CARLOS LÓPEZ CORTEZ**

**Trabajo de Graduación aprobado por:**

**Docente Director :**

**Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz**

**Docente Director :**

**Ing. Rigoberto Velásquez Paz**

**Docente Director :**

**Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández**

**San Salvador, diciembre de 2003**

**Trabajo de Graduación Aprobado por:**

**Docente Director : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz**

**Docente Director : Ing. Rigoberto Velásquez Paz**

**Docente Director : Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández**

## **AGRADECIMIENTOS**

En la vida existen momentos maravillosos con los cuales uno se siente satisfecho por el trabajo realizado, es por ello que me satisface el agradecer a:

### **DIOS TODOPODEROSO**

Por permitirme culminar una etapa de mi vida proporcionándome salud, sabiduría, paciencia y sobre todo alumbrarme en mi camino.

### **MIS PADRES DAVID ANTONIO LIMA RIVERA Y ANGELA ISABEL JACO**

Por ser los padres que siempre estarán a mi lado en todo momento apoyándome incondicionalmente y deseando que cada día sea mejor y por ser las columnas sobre las cuales me sostengo. No hay ni habrá forma en como pagarles todo lo que han hecho por mi, ni palabras que decir para poder expresar todo lo que siento, “GRACIAS PADRES, LOS AMO”.

### **MI HERMANO DAVID MAURICIO LIMA JACO**

Por apoyarme durante todo este trayecto y brindarme la confianza que no hay nada que pueda parar a una persona cuando quiere alcanzar una meta.

### **MI SOBRINO NELSON DAVID LIMA ROMERO**

Por llegar a este mundo y ser fuente de vida para mis padres y ser parte de mi inspiración para seguir adelante.

### **MIS TIOS Y TIAS**

Gracias por permitirme ser parte de ustedes y apoyarme durante toda mi vida; especialmente a José Miguel Jaco, Margarita Lima y Elsa Lima.

### **MIS PRIMOS Y PRIMAS**

Que no dudaron en ningún momento que podía llegar a culminar mi carrera y así brindarles una satisfacción a mi familia, especialmente a Maria Ester Lima, Jorge Lima,

William Lima, Alicia Lima, Oscar Lima, Karla Abarca, Maritza Jaco, Sonia Jaco, Mariela Jaco y Cindy Jaco.

### **DOCENTES DIRECTORES**

Por siempre estar dispuestos a colaborar y poner a disposición sus conocimientos para la realización del trabajo de graduación.

### **MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Juan Carlos López Cortez y Elmer Alexander López Cisneros, por creer en mi y en mi forma de trabajo y apoyarme en todo momento.

### **MIS AMIGOS**

En especial a los que forman parte de la Sociedad de Estudiantes de Ingeniería Mecánica (SEIM) que fueron parte fundamental en el año que egrese y sin los cuales no hubiese sido posible este sueño: Valeriano Valdez, Henry Cruz, Edwin Chicas, Efraín García, Roberto Villatoro, Carlos Solórzano, Ricardo Carranza, Misael Melgar, Luis Mozo, Oscar Ayala, Williams Machado, Mauricio Polanco, Juan Carlos Artiga, Herbert Salamanca, , Julio Escalante, Wilson Yáñez, Guillermo, Nelson Méndez, Elvis, Edwin Rivera, Leandro Orellana, Juan de Dios; si se me olvida un nombre por favor discúlpenme.

Oscar Macal, Julio Mejia, Oswaldo García, José García, gracias por apoyarme durante gran parte de mi vida y por no dudar que llegaría hasta a donde me encuentro.

**“Si haz culminado una obra sin errores, siéntete satisfecho y orgulloso por ser lo que eres, pero si no haz desarrollado la obra como querías, revisa que es lo que hiciste mal, que cuando comprendas que es lo que no te funcionó bien, te sentirás mas satisfecho y orgulloso de ser lo que eres”.**

NELSON SANTOS LIMA JACO

## **AGRADECIMIENTOS**

La culminación de mi carrera es el resultado del esfuerzo y el apoyo de muchas personas. Por tal motivo me es un placer agradecerle a:

### **DIOS TODOPODEROSO**

Por su amor, misericordia y sobre todo por proporcionarme sabiduría, iluminarme y permitirme llegar hasta esta instancia de mi vida.

### **MI MADRE NELY CISNEROS**

Porque en los momentos más difíciles y complicados de mi vida, me apoya y brinda su amor, te quiero mamá.

### **MI PADRE JUAN LÓPEZ**

Por haberme enseñado hacer una persona responsable y nunca negarme la oportunidad de superarme, te quiero papá.

### **MIS HERMANOS MILTON, PATRICIA Y JOSSELIN**

Por ser fuentes de entusiasmo para la culminación de mis estudios y por su apoyo; hermanos los quiero mucho.

### **MI SOBRINO CRISTIAN VLADIMIR LÓPEZ**

Por brindarme alegría y ser motivo de entusiasmo para toda mi familia.

### **MI ABUELA ELBA Y TIA MARIBEL**

Por su cariño y sus preocupaciones para que todas las cosas me salieran bien.

### **A MI FAMILIA EN GENERAL**

Principalmente a los que creyeron en mi y me ayudaron de alguna o de otra manera.

## **LA FAMILIA GUZMÁN**

Walter, Ulises, Salvador y Carmen que siempre estuvieron pendientes de la trayectoria de mis estudios superiores.

## **MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Nelson Santos y Juan Carlos, por soportar mi manera de trabajar, adaptarse a mi tiempo y tenderme la mano antes y durante el desarrollo del trabajo.

## **MIS DOCENTES DIRECTORES**

Por su ayuda, recomendaciones y empeño en el desarrollo del trabajo de graduación.

## **MIS AMIGOS**

En especial a Tommy Víctor y a aquellos que cuando pedí su ayuda nunca se negaron a proporcionármela.

## **MIS COMPAÑEROS**

Los estudiantes de ingeniería mecánica que sin negarse me aportaron ayuda en el momento que la solicite en especial a: Henry Cruz, Edwin Chicas, Efraín García, Oscar Ayala, Julio Escalante, Misael Melgar, Christopher López, Carlos Azucena, Raúl Argueta, Roberto Villatoro, Ricardo Carranza, Valeriano, Luis Mozo, Williams Machado, Juan Carlos Artiga, Wilson Yáñez, Guillermo, Lucas, Nelson Méndez, Elvis, Edwin Rivera, Mauricio Polanco; si no menciono algún nombre porque se me olvidó en el instante ruego me disculpen.

**Y todo lo que hagáis, hacedlo de corazón, como para el señor y no para los hombres; sabiendo que del señor recibiréis la recompensa de la herencia, porque a Cristo el Señor servís. COLOSENSES 3:23-24.**

ELMER ALEXANDER LÓPEZ CISNEROS



## AGRADECIMIENTOS

### A DIOS

Que sin la ayuda espiritual y teniendo la confianza de que todo lo que uno se propone poniendo fe en él todo se puede alcanzar, cuando nos presta vida para llegar a la meta propuesta.

### A MI FAMILIA

A mis padres **Jorge Alberto López Reyes** y **Reina Cortez**, que siempre estuvieron pendientes y me dieron el empuje en los momentos difíciles para seguir adelante.

A mis hermanos **Jorge Ernesto** y **Edwin Arnoldo**, que siempre los encontré cuando necesite de su ayuda, para poder seguir adelante y me alentaron para alcanzar mi objetivo.

A mis tíos que mantuvieron la fe para que siguiera con la frente en alto cuando tuve dificultades en el camino y así finalmente alcanzar lo que me había propuesto.

### A MIS AMIGOS

A todos ellos que en algún momento necesite de su ayuda y me la prestaron desinteresadamente; me apoyaron y me alentaron para seguir adelante para así alcanzar la meta.

Al **Ing. Gustavo Salomón Torres y su familia**, que siempre estuvo pendiente en el transcurso de la carrera, que me alentó y apoyo para que finalizara con éxito lo que me había propuesto.

A **Lic. Saúl Antonio García y familia**, por haberme tendido su mano desinteresadamente para finalizar mi carrera.

A mis compañeros de trabajo de graduación, **Nelson Santos Lima Joco** y **Elmer Alexander López Cisneros** que me supieron entender y comprender en los momentos difíciles y por haber compartido momentos gratos.

A los compañeros de la SEIM: Juan Carlos Artiga, Edwin Chicas, Valeriano Valdez, Efraín García, Lucas, Luis Mozo, Oscar Ayala, Julio Cesar Escalante, Williams Machado, Ricardo Carranza, Henry Cruz, Misael Melgar, Guillermo, Wilson Yáñez, Nelson Méndez, Roberto Villatoro, Merino Soriano.

Docentes directores: Dr. Jonathan Berrillos, Ing. Rigoberto Velásquez Paz, Ing. Oscar Marroquín, que con su conocimiento y experiencia que nos proporcionaron logramos el objetivo.

JUAN CARLOS

# ÍNDICE

	Pág.
1 MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS METALGRÁFICAS.....	1
1.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS METALGRÁFICAS PLANAS.....	6
1.3 TIPOS DE MÁQUINAS PARA EL LIJADO.....	8
1.4 PAPELES ABRASIVOS.....	11
1.5 DUREZA DE MATERIALES.....	18
1.5.1 PRUEBA BRINELL.....	19
1.5.2 PRUEBA ROCKWELL.....	20
1.5.3 PRUEBA VICKERS.....	22
1.5.4 PRECAUCIONES A CONSIDERAR EN LAS PRUEBAS DE DUREZA.....	23
1.6 TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO.....	24
1.6.1 RECOCIDO TOTAL.....	25
1.6.2 NORMALIZADO.....	26
1.6.3 TEMPLE.....	27
1.6.4 REVENIDO.....	34
2 DISEÑO DE LA MÁQUINA.....	37
2.1 PLANTEAMIENTO DE DISEÑO.....	37
2.2 PARÁMETROS DE DISEÑO.....	38
2.3 DIMENSIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS.....	39
2.4 DETERMINACIÓN DE LA CARGA.....	39
2.4.1 CÁLCULO DE FUERZA RESULTANTE.....	42
2.5 DISEÑO DEL DISCO PORTAMUESTRAS.....	43
2.5.1 CÁLCULO DEL TORQUE.....	43
2.5.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	44
2.6 DISEÑO DEL EJE DEL CABEZAL.....	51

2.7 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	56
2.8 DISEÑO DE PERNOS DE SUJECIÓN DE LA CUNA DEL RODAMIENTO.....	59
2.9 SELECCIÓN DEL MOTOR DEL CABEZAL.....	61
2.10 DISEÑO DEL DISCO PORTAPAPEL ABRASIVO.....	65
2.11 DISEÑO DEL EJE DE ACOPLE (DISCO PORTAMUESTRA).....	69
2.12 DISEÑO DEL EJE DE LA MESA.....	73
2.13 SELECCIÓN DEL MOTOR DE LA MESA.....	75
2.14 SELECCIÓN DE BANDAS.....	77
2.15 DISEÑO DEL DRENAJE.....	80
2.16 DISEÑO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LAS MUESTRAS Y LIMPIEZA DEL PAPEL ABRASIVO.....	81
2.17 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	81
2.18 DISEÑO DEL DISCO PARA ALINEAR MUESTRAS.....	82
2.19 DISEÑO DEL CIRCUITO NEUMÁTICO.....	82
2.20 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL.....	84
2.21 SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS.....	85
2.21.1 PULSADORES.....	85
2.21.2 RELÉS.....	86
2.21.3 RELÉS TEMPORIZADORES.....	87
2.22 SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS NEUMÁTICOS.....	87
2.22.1 SELECCIÓN DEL CILINDRO.....	88
2.22.2 SELECCIÓN DE ELECTROVÁLVULA.....	89
2.22.3 SELECCIÓN DE VÁLVULA REGULADORA DE FLUJO.....	90
2.22.4 SELECCIÓN DEL FILTRO-REGULADOR (F-R).....	90
2.22.5 SELECCIÓN DE MANGUERA.....	93
2.22.6 SELECCIÓN DE RACORES.....	94
3 ESTUDIO TÉCNICO.....	95
4 DETERMINACIÓN DE COSTOS.....	105
5 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	108

5.1 MANUAL DE OPERACIÓN.....	108
5.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO.....	109
6 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	110
6.1 GUÍA DE LABORATORIO.....	110
6.2 PROCESOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	111
CONCLUSIONES.....	113
RECOMENDACIONES.....	114
BIBLIOGRAFIA.....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Máquina cortadora ISOMET 1000.....	2
Fig. 1.2. Máquina embutidora SIMPLIMET 2000.....	3
Fig. 1.3. Máquina VIBROMET 2.....	8
Fig. 1.4. Máquina lijadora AUTOMET.....	10
Fig. 1.5. Máquina lijadora DUALPREP™.....	10
Fig. 1.6. Máquina lijadora VECTOR LC POWER HEAD.....	10
Fig. 1.7. Máquina lijadora METPREP™.....	11
Fig. 1.8. Máquina lijadora PHOENIX 4000.....	11
Fig. 1.9. Grano de Carburo de Silicio.....	12
Fig. 1.10. Grano de Alúmina Zirconia.....	12
Fig. 1.11. Grano de Óxido de Aluminio.....	13
Fig. 1.12. Grano de Óxido de Aluminio blanco.....	13
Fig. 1.13. Grano de Óxido de Aluminio café.....	14
Fig. 1.14. Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro marcado con los nombres comunes para las estructuras.....	26
Fig. 1.15. Efecto del carbono sobre la dureza de la austenita y la martensita. El área achurada de la curva superior representa el efecto de la austenita retenida.....	28
Fig. 1.16. Diagrama de transformación-isotérmica para un acero 1080 (eutectoide).....	29
Fig. 1.17. Diagrama T-I de acero 1050: 0.50% de C, 0.915 de manganeso. Tamaño de grano: de 7 a 8; austenizado a 1670 °F.....	30
Fig. 1.18. Curvas de enfriamiento sobrepuestas en diagrama hipotético T-I para un acero eutectoide. La porción achurado de la curva de enfriamiento indica la transformación.....	31
Fig. 1.19. Diagrama T-E de un acero 4340 : 0.42% de C, 0.78% de manganeso, 1.79% de níquel, 0.8% de cromo y 0.33% de molibdeno.....	33
Fig. 1.20. Productos de transformación de austenita y martensita para un acero eutectoide.....	35

Fig. 1.21. Efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza de un acero 4340.....	36
Fig. 2.1. Esquema de la máquina semiautomática para el lijado de muestra metalográficas.....	37
Fig. 2.2. Distribución de la carga sobre las muestras.....	40
Fig. 2.3. Diagrama de cuerpo libre de la muestra.....	40
Fig. 2.4. Dirección de las fuerzas de fricción en los discos portamuestras y portapapel abrasivo.....	41
Fig. 2.5. Fuerzas de fricción sobre el discos portamuestras.....	43
Fig. 2.6. Distribución de agujeros en el portamuestras.....	44
Fig. 2.7. Sección de viga empotrada del disco portamuestras, cotas en mm.....	45
Fig. 2.8. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano xy, cotas en mm.....	46
Fig. 2.9. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano xz, cotas en mm.....	46
Fig. 2.10. Momentos de flexión, cotas en mm.....	47
Fig. 2.11. Ubicación de la línea neutra.....	48
Fig. 2.12. Elemento de acoplamiento del portamuestras, cotas en mm.....	49
Fig. 2.13. Distribución de carga y diagrama de fuerza cortante y momento flexionante del eje del cabezal, cotas en mm.....	52
Fig. 2.14. Carga sobre los pernos, cotas en mm.....	59
Fig. 2.15. Sistema de carga del motor del cabezal.....	62
Fig. 2.16. Sección de viga empotrada del disco portapapel abrasivo, cotas en mm.....	66
Fig. 2.17. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano xy, cotas en mm.....	66
Fig. 2.18. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano xz, cotas en mm.....	67
Fig. 2.19. Ubicación de la línea neutra.....	67
Fig. 2.20. Viga circular hueca, cotas en mm.....	68
Fig. 2.21. Eje de acople entre el disco portamuestras y el eje del cabezal, cotas en mm.....	70

Fig. 2.22. Diagrama de cuerpo libre y de fuerza cortante y momento flexionante del eje, cotas en mm.....	71
Fig. 2.23. Distribución de carga y diagrama de fuerza cortante y momento flexionante del eje de la mesa, cotas en mm.....	74
Fig. 2.24. Sistema de carga del motor de la mesa, cotas en mm.....	76
Fig. 2.25. Estructura para el drenaje del agua, cotas en mm.....	80
Fig. 2.26. Estructura de la máquina semiautomática para el lijado de muestras Metalográficas.....	81
Fig. 2.27. Disco alineador de muestras, cotas en mm.....	82
Fig. 2.28. Circuito neumático de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas.....	83
Fig. 2.29. Circuito de control de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas.....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Datos técnicos de modelos de máquinas lijadoras.....	9
Tabla 1.2. Clasificación de lijas de acuerdo al tamaño de grano.....	14
Tabla 1.3. Períodos de tiempo de aplicación de carga.....	19
Tabla 1.4. Dureza Brinell de algunos materiales.....	20
Tabla 1.5. Escala de durezas Rockwell.....	22
Tabla 1.6. Tipos de ensayo de dureza Vickers.....	23
Tabla 1.7. Durezas promedio.....	27
Tabla 2.1. Especificaciones del motor del cabezal.....	65
Tabla 2.2. Especificaciones del motor de la mesa.....	77
Tabla 2.3. Características técnicas de pulsadores.....	86
Tabla 2.4. Requerimientos de contactos en los Relés del circuito de control.....	86
Tabla 2.5. Especificaciones de relés.....	86
Tabla 2.6. Especificaciones de relé temporizador.....	87
Tabla 2.7. Parámetros para determinar la ubicación del centro de masa.....	88
Tabla 2.8. Especificaciones del cilindro neumático.....	89
Tabla 2.9. Especificaciones de la electroválvula.....	90
Tabla 2.10. Especificaciones de la válvula reguladora de flujo.....	90
Tabla 2.11. Especificaciones de filtro-regulador (F-R).....	93
Tabla 2.12. Especificaciones de manguera.....	93
Tabla 2.13. Especificaciones de racores.....	94
Tabla 3.1 Hoja de proceso de mecanizado del disco portamuestras.....	95
Tabla 3.2 Hoja de proceso de mecanizado del eje del cabezal.....	97
Tabla 3.3 Hoja de proceso de mecanizado del drenaje.....	99
Tabla 3.4 Hoja de proceso de mecanizado del disco portapapel abrasivo.....	100
Tabla 3.5 Hoja de proceso de mecanizado del disco alineador de muestras.....	102
Tabla 3.6 Hoja de proceso de mecanizado del eje de la mesa.....	103
Tabla 4.1. Costos de elementos y materia prima, utilizados en la construcción de la máquina.....	105



Tabla 4.2. Costos de mano de obra directa para la construcción de la máquina.....	107
Tabla 4.3. Costos de mano de obra indirecta.....	107
Tabla 4.4. Inversión total en la construcción de la máquina.....	107
Tabla 5.1. Fuerzas sobre las muestras, según la presión de trabajo.....	109
Tabla 6.1. Variables utilizadas durante la prueba de laboratorio.....	111
Tabla 6.2. Parámetros de lijado del acero AISI 1020 en estado de entrega.....	112
Tabla 6.3. Parámetros de lijado del acero AISI 4340 templado y revenido.....	112
Tabla 6.4. Parámetros de lijado del aluminio.....	112
Tabla 6.5. Parámetros de lijado del bronce.....	112

## SIMBOLOGÍA

- $F_k$  Fuerza de fricción cinética
- $\mu_k$  Coeficiente de fricción cinético
- $N$  Fuerza normal a la superficie en contacto
- $T_{pm}$  Torque que generan las fuerzas de fricción en el centro del portamuestras
- $T_{pp}$  Torque que generan las reacciones en el centro del portapapel abrasivo
- $r$  Distancia entre el centro del disco portamuestras y el punto donde actúa la fuerza de fricción
- $n$  Numero de fuerzas, factor de seguridad
- $R$  reacción producida por la fuerza de fricción cinética
- $D$  Distancia entre el centro del disco portapapel abrasivo y el punto donde actúa la reacción producida por la fuerza de fricción cinética
- $L$  Excentricidad entre los centros de los discos
- $\omega_1$  Velocidad angular del disco portamuestras
- $\omega_2$  Velocidad angular del disco portapapel abrasivo
- $T_{rpm}$  Torque resultante que se genera en el centro del portamuestras
- $T_{rpp}$  Torque resultante que se genera en el centro del portapapel abrasivo
- $F_d$  Fuerza aplicada a las muestras
- $F_{RK}$  Resultante producida por las fuerzas de fricción cinética en condiciones críticas ( $30^\circ$ )
- $I_y$  Momento de inercia en el eje y
- $I_z$  Momento de inercia en el eje z
- $I_m$  Momento de inercia del motor
- $I_{yz}$  Producto de inercia
- $M_y$  Momento flexionante en el eje y
- $M_z$  Momento flexionante en el eje z
- $B$  Base de la sección respecto al eje en análisis
- $H$  Altura de la sección respecto al eje en análisis, altura de al soldadura
- $A$  Área de la sección transversal, área de la soldadura

Z	Distancia entre el centroide de la sección en análisis y el eje y
Y	Distancia entre el centroide de la sección en análisis y el eje z
$\bar{I}_{yz}$	Producto de inercia centroidal de la sección en estudio
$\sigma_x$	Esfuerzo axial por flexión
$\sigma_{\text{máx}}$	Esfuerzo máximo axial por flexión
$\sigma_{\text{mín}}$	Esfuerzo mínimo axial por flexión
$F_{\text{mín}}$	Fuerza mínima
$\tau_{\text{máx}}$	Esfuerzo cortante máximo
V	Fuerza cortante
$\Sigma_a$	Esfuerzo alternante
$\Sigma_m$	Esfuerzo medio
$S_n$	Límite de resistencia a la fatiga corregido
$S_u$	Esfuerzo último
$K_a$	Factor de superficie
$K_b$	Factor de tamaño
$K_c$	Factor de carga
$K_d$	Factor de temperatura
$K_e$	Factor de efectos diversos
$K_f$	Factor de concentración de esfuerzos a la fatiga
Q	Sensibilidad a la muesca
$K_t$	Factor de concentración de esfuerzos estático
D	Diámetro del portamuestras
$\tau_a$	Esfuerzo cortante alternante
$\tau_m$	Esfuerzo cortante medio
F	Fuerza axial
$d_1$	Diámetro interior de la viga
$d_2$	Diámetro exterior de la viga
$M_{C1}$	Momento de flexión en el concentrador uno de la viga
$M_{C2}$	Momento de flexión en el concentrador dos de la viga
$\sigma_{\text{nom}}$	Esfuerzo nominal

Pot Potencia del motor  
P<sub>nom</sub> Potencia nominal  
T<sub>am</sub> Torque de arranque del motor  
g Gravedad  
γ Peso específico

## 1 MARCO TEÓRICO

Siempre que se diseña y construye un elemento de máquina en forma individual o en serie, se debe de verificar las propiedades del material, y una forma fácil y económica es hacer una medición de la dureza para estimar la resistencia a la tracción del mismo; sin embargo, es preferible realizar un estudio metalográfico del material debido a que proporciona otra información de suma importancia como son: tamaño del grano, distribución de fases, inclusiones, poros, orientación preferente de los granos o fases, microgrietas, entre otros. Esta caracterización metalográfica se realiza con el fin de poder predecir el comportamiento de éstos materiales en una aplicación particular.

De lo anterior expuesto, es evidente la importancia de la metalografía para la industria, ya sea para corroborar propiedades de materiales metálicos o para determinar posibles causas de falla en elementos mecánicos y así poder reducir accidentes de trabajo y fallas prematuras.

### 1.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS METALGRÁFICAS

La preparación de muestras metalográficas consiste en una serie de procesos que van desde la elección, medición, trazado y corte de la sección a analizar que generalmente es una pequeña porción del material, para después ser embutida, lijado, pulida y posteriormente realizar un ataque químico de la muestra para poder ser observado en un microscopio.

**MEDICIÓN Y TRAZADO DEL MATERIAL.** Esta etapa de la preparación, comprende medir y trazar la porción del material destinado al estudio. Lo más importante en esta etapa es obtener el área necesaria del material.

**CORTE DEL MATERIAL.** Existen muchas definiciones de corte; una de ellas especifica que es el proceso donde el material es sometido a esfuerzos cortantes en una forma controlada, por medio de una herramienta de corte. Así, con la necesidad de obtener un mejor corte del material, el avance tecnológico ha permitido la fabricación de máquinas que realizan dicho trabajo. Con este tipo de máquina (Fig. 1.1) se tiene un corte más rápido y preciso, también se logra impedir cualquier distorsión previa en el material debido a altas temperaturas producidas durante este proceso, esto último se

obtiene realizando el trabajo con el avance de remoción de material adecuado y con la suficiente evacuación de calor.

Cuando no se cuenta con una de estas máquinas, el proceso se tiene que llevar a cabo manualmente, teniendo el cuidado de que el plano de corte sea paralelo al plano de la herramienta ( disco de corte).



Fig. 1.1. Máquina cortadora ISOMET 1000.

**EMBUTIDO.** Dado que las dimensiones del material a estudiar son pequeñas, por lo general, se realiza un embutido para poder manipular de mejor manera cada muestra. El embutido consiste en alojar la muestra en un material que por lo general es líquida o en polvo.

De igual manera que en la etapa de corte del material, en la actualidad existen máquinas que realizan el trabajo de embutido (Fig. 1.2), la cual utilizan resina fenólica en cantidades apropiadas, ésta tiene que ser llevada a una temperatura y a una presión determinada durante un período de tiempo para lograr que se ablande y compacte para que la muestra quede unido el material de estudio. Este tipo de embutido es conocido como, embutido en caliente.

Otra forma de realizar el embutido es en frío, en el cual se emplea resina poliéster con un catalizador. Ésta solución o mezcla se vierte en un recipiente de dimensión y geometría requerida para que pueda alojar la muestra. Casi siempre se utiliza una porción de tubo de cloruro de polivinilo (PVC) sellado en un extremo y en este se

coloca la muestra, seguidamente este extremo se coloca en una superficie plana y posteriormente se agrega la solución en una cantidad adecuada.



Fig. 1.2. Máquina embutidora SIMPLIMET 2000.

**LIJADO.** En esta etapa de la preparación de la superficie de la muestra se frota en una determinada dirección sobre papeles abrasivos de SiC (lijas) de granos cada vez más finos. Estos papeles se apoyan en una superficie plana (por ejemplo: vidrio), y el frotamiento continúa hasta que se observan en la superficie del material únicamente marcas de lijado correspondiente al papel abrasivo que se utiliza. La dirección de lijado se cambia  $90^\circ$  al pasar de un papel al siguiente más fino. El período de tiempo de lijado con determinado papel abrasivo después de haber desaparecido las ralladuras (marcas de lijado) del papel anterior, será mayor a medida que se pasa a papeles abrasivos de granos más finos. Resulta muy conveniente prolongar el lijado con determinado papel; aun cuando ya han desaparecido las marcas del papel anterior, todo con el objetivo de eliminar cualquier deformación plástica bajo la superficie, producida por una operación previa como puede ser maquinado o lijado a una presión excesiva.

Durante el proceso de deslizamiento de la muestra sobre el papel abrasivo, resulta muy indispensable la lubricación con agua o con una parafina líquida. Además, el efecto lubricante tiene otra importancia que es de evitar que las partículas abrasivas desprendidas del papel puedan contaminar la mesa de trabajo u otros papeles de granos más finos.

Es importante recalcar que en los laboratorios de metalografía, se clasifica el lijado en dos partes, el de desbaste y el fino. El lijado de desbaste se realiza utilizando papeles abrasivos del número 100 hasta el 600 y el fino del número 1000 hasta el 1500.

En la actualidad existen máquinas que realizan el proceso de lijado de forma semiautomática o automáticamente, controlando de manera precisa las variables siguientes:

- Carga aplicada en el lijado
- Tiempo que durará el lijado en cada papel
- La velocidad de rotación del disco portamuestras
- Flujo del líquido refrigerante.

Agregado a lo anterior, con estas máquinas se pueden lijar hasta 10 muestras de manera simultánea y obtener un sólo plano de corte en el material. Independientemente como se realice el lijado, manual o automáticamente, las operaciones deben de realizarse en una habitación independiente a la de pulido. En la etapa de pulido, las muestras y las manos del operario deben estar perfectamente lavadas y limpias.

**PULIDO.** En esta etapa, la superficie de la muestra lijada se pasa por unos paños impregnados con diferentes abrasivos. El tipo de paño y de abrasivo depende del material de la muestra, de las posibilidades y sofisticación de los equipos de pulido.

Los paños suelen ser de lana pura, seda, etc.; y los abrasivos, suspensiones de alúmina o magnesia de distintos tamaños. Recientemente se emplean pastas con polvo de diamante, clasificadas según el tamaño medio de las partículas de éste, expresado en micrómetros. Estas pastas se extienden sobre los paños, que se lubrican con líquidos especiales. Los paños de pulido se sujetan a un disco, que pueden girar o no; pero también pueden ir, sencillamente apoyados sobre un vidrio grueso, plano y limpio. El paño debe estar siempre húmedo y con suficiente abrasivo. Si el disco gira, la muestra también se moverá generando un movimiento circular sobre su propio eje pero en sentido contrario, y además se moverá en toda la periferia del disco; sí el disco no gira, se moverá como se ha indicado, pero girando sobre sí mismo de vez en cuando. En ambos casos, el propósito es que el pulido de la muestra se haga en todas las direcciones



para evitar arrastre entre fases de distintas dureza, o de inclusiones. Se debe de disponer de distintos juegos de paños para aceros y aleaciones de cobre y aluminio.

La experiencia en el laboratorio aconseja; en cada caso, la presión adecuada; y la observación repetida de la superficie da una idea del trabajo de la operación. Si se insiste demasiado tiempo en el pulido se producen sobre la superficie contornos romos en las distintas fases de dureza desigual, y este relieve hace difícil su examen a grandes aumentos. Si la presión ha sido excesiva, el material en la superficie fluye durante el pulido y desvirtúa la verdadera observación microscópica estructura dando imágenes confusas después del ataque.

El pulido electroquímico puede considerarse como una alternativa del pulido mecánico, pero no excluye a este. Los mejores resultados se obtiene siempre puliendo mecánicamente hasta el papel abrasivo más fino y acabando con un pulido electroquímico breve y en condiciones suaves. Para evitar la disolución selectiva de ciertas fases.

A continuación se detalla cómo debe realizarse el pulido para el bronce al estaño (4 % Sn), moldeado en arena. El pulido final se hace en alúmina gamma, suspendida en agua con unas gotas de solución acuosa de amoníaco al 5%. Se ataca con solución alcohólica de cloruro férrico disuelto en alcohol.

**ATAQUE QUÍMICO.** La superficie de una muestra pulida revelará una serie de hechos interesantes, como pueden ser grietas, inclusiones, fases, poros, etc. Aunque normalmente las muestras se tienen que atacar con un reactivo que actúa de forma selectiva sobre los diversos constituyentes estructurales (fases, límites de grano, impurezas, zonas deformadas, etc).

Antes del ataque de una muestra esta debe estar desengrasada y limpia. Esto particularmente importante en las muestras pulidas con pasta de diamante, ya que los líquidos lubricantes, y el medio en que está disperso el abrasivo contiene sustancias grasosas. El lavado con éter de petróleo, acetona y alcohol no suele ser suficiente para un perfecto desengrase. Sin embargo, éste será perfecto si se le pasa brevemente por un paño con alumina o manganesia húmeda. Un lavado posterior con abundante agua corriente y limpia, seguido de un secado con alcohol absoluto (100% alcohol), dejará la muestra dispuesta para ser atacada. El alcohol que se utiliza sobre la muestra después de

lavada puede ser de 96 grados, pero el secado final debe hacerse con alcohol absoluto; así, antes de evaporar el alcohol con una corriente de aire proveniente por ejemplo, de un secador de pelo, la muestra debe drenarse bien, apoyándola por el borde de la superficie pulida sobre un paño o papel absorbente limpio.

En materiales blandos conviene eliminar la acción de un ataque previo pasando la muestra de nuevo por el último paño. Así, se eliminarán las posibles alteraciones superficiales producidas durante el pulido, y la microestructura se revelará con más nitidez en un ataque final.

Todas las operaciones o etapas descritas tienen por objeto, dejar una superficie metálica plana, sus constituyentes microestructurales para ser observado en un microscopio.

## **1.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS METALOGRÁFICAS PLANAS**

El avance en la tecnología ha permitido que el desarrollo de la preparación de muestras metalográficas se realice de manera más rápida y eficiente, ya que éste se realiza por medio de máquinas automáticas o semiautomáticas. A continuación se detalla información de máquinas utilizadas en la preparación de muestras metalográficas planas.

### **MÁQUINA PARA CORTAR**

Los beneficios que se obtienen al utilizar este tipo de máquina (Fig. 1.1), se detallan en la sección 1.1. Algunas recomendaciones a tomar en cuenta, durante el uso de éstas son:

- Avance de corte adecuado
- Suficiente fluido para la evacuación de calor
- Velocidad de corte adecuado.

La empresa BUEHLER es una entre muchas que se dedican a la fabricación de dichas máquinas. Un modelo de máquina de esta empresa es la ISOMET 1000, la cual posee los siguientes datos técnicos:

- Velocidad de corte: 0 a 975 rpm

- Capacidad de corte: 38 mm (1.5 pulg)
- Carga de corte: 0 a 800 gramos.

### **MÁQUINA PARA EMBUTIR**

En la sección 1.1, se especifica como se realiza el proceso con una máquina (Fig. 1.2) de este tipo. Los cuidados que se tienen que tener presente durante se realiza el embutido son:

- Mantener la presión constante durante el proceso
- Ajustar a la temperatura adecuada
- Agregar la cantidad adecuada de resina fenólica, para obtener la altura deseada de la muestra.

Un modelo de este tipo de máquina es la SIMPLIMET 2000, la cual es fabricada por la empresa BUEHLER. Los datos técnicos de ésta se detallan a continuación:

- Operación completamente automática
- Diámetros de muestras: 25.4 mm (1 pulg), 38.1 mm (1.25 pulg), 45.7 mm (1.5 pulg), 50.8 mm (2 pulg) de diámetro
- Capacidad de embutir dos muestras
- Molde con capacidad de evacuar 1400 watt de calor a 115 V y 1600 watt a 220 V.

### **MÁQUINA PARA LIJAR**

Existe una gran diversidad de este tipo de máquinas y todo lo referente a éstas se detalla en la sección 1.3. Mientras que en la sección 1.1 se presenta como se realiza el proceso de lijado y las variables que se pueden controlar con éstas.

### **MÁQUINA PARA PULIR**

En la sección 1.1 se describe lo más importante referente al pulido. Las recomendaciones que se deben seguir cuando se realiza el proceso con este tipo de máquina (Fig. 1.3) son:

- Verificar que exista suficiente material abrasivo (alúmina) en los paños

- Colocar en cada proceso el número de muestras recomendadas para que la máquina funcione eficientemente.

La VIBROMET 2 es un modelo de máquina vibro-pulidora construida por la empresa BUEHLER. Los datos técnicos de ésta se detallan a continuación.

- Fácil desmontaje del recipiente que contiene el material abrasivo
- Diámetro del recipiente: 305 mm (12 pulg)
- Luz indicadora de vibración.



Fig. 1.3. Máquina pulidora VIBROMET 2.

### 1.3 TIPOS DE MÁQUINAS PARA EL LIJADO

En un principio el lijado de los materiales se realizaba manualmente, con diferentes papeles abrasivos los cuales permanecían estáticos, posteriormente se siguió realizando el proceso con la diferencia que el papel abrasivo se colocaba sobre un disco el cual giraba accionado por un motor y era el material el que permanecía sin movimiento.

Actualmente, existen muchas empresas que se dedican a la fabricación de máquinas utilizadas en laboratorios de metalografía, una de éstas es la máquina lijadora o Grinder/Polisher, que realizan el proceso de lijado de forma automática. Algunas de éstas empresas son: BUEHLER, PRESI, LEITZ, ALLIED. Cada empresa presenta una serie de modelos; teniendo siempre el control sobre la fuerza, el tiempo de lijado, la velocidad de rotación, entre otras variables.

En la siguiente tabla se presentan datos técnicos de algunos modelos de máquinas de las empresas BUEHLER y ALLIED.

Tabla 1.1. Datos técnicos de modelos de máquinas lijadoras.

Datos técnicos	Máquinas lijadoras, marca y modelo				
	BUEHLER AUTOMET	ALLIED DUALPREP	BUEHLER POWER HEAD	ALLIED METPREP	BUEHLER PHOENIX 4000
Configuración	Sistema de control automático	Sistema de control automático	Manejo de forma eléctrica	Sistema de control automático	Manejo electrónico
Material y diámetro del portaliija, mm (pulg)	Pletina de aluminio de 305 (12)	Pletina de aluminio o PVC de 200 (8)	Pletina de aluminio de 200 ó 250 (8 ó 9.8)	Pletina de aluminio de 250 ó 305 (10 ó 12)	Pletina de aluminio de 200 ó 250 (8 ó 9.84)
Cantidad de muestras	1 a 10	6	1 a 4	10	1 a 6
Diámetro de la muestra, mm (pulg)	40 a 50 (1.57 a 1.97)	25 a 30 (0.98 a 1.18)	30-40 (1.2-1.6)	30 a 50 (1.2 a 1.97)	25 a 50 (0.98 a 1.97)
Fuerza sobre la muestra, N (lb)	4.45 a 267.5 (1 a 60)	9.81 a 49.05 (2.2 a 11)	0 a 49.05 (0 a 11)	4.5 a 222.6 (1-50)	0 a 100.3 (0 a 22.5)
Velocidad de la Pletina, rpm	60	40 a 600	60	40 a 600	150 a 300
Potencia del motor, hp	2	0.5	1.8	1	0.65
Alimentación, V/Hz/fase	115/ 60/ 1 220/ 50/ 1	115/ 60/ 1 230/ 50-60/ 1	115/ 50- 60/ 1 230/ 50-60/ 1	115/ 60/ 1 230/ 60/ 1	220/ 60/ 3 415/ 50/ 3
Dimensiones: altura- ancho- profundidad mm-mm-mm (pulg-pulg-pulg)	414-229-432 (16.3-17-9)	711-355-736 (28-14-29)	210-381-400 (8.27-15-15.75)	635-381-787 (25-15-31)	575-600-650 (22.64-23.62-25.60)
Peso N (lb)	178.4 ( 40 )	713.5 (160)	169.5 (38)	713.5 (160)	167.2 (37.5)
Figura	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8



Fig. 1.4. Máquina lijadora AUTOMET.



Fig. 1.5. Máquina lijadora DUALPREP™.



Fig. 1.6. Máquina lijadora VECTOR LC POWER HEAD.



Fig. 1.7. Máquina lijadora METPREP™



Fig. 1.8. Máquina lijadora PHOENIX 4000.

#### 1.4 PAPELES ABRASIVOS

Los abrasivos revestidos, comúnmente llamados lijas, consisten de un dorso flexible al cual se encuentra adherido mediante una películas adhesivas una capa de granos abrasivos. También, los papeles abrasivos son usados en operaciones de desbaste y pulido de una gran variedad de materiales tales como: metal, madera, vidrio, plástico, entre otros.

Los granos abrasivos son propiamente la parte que efectúa el desbaste o remover partículas de la superficie del material. La efectividad de los mismos depende de la dureza, tenacidad y la forma del abrasivo. Los tipos de abrasivo usados de acuerdo a su

dureza son: carburo de silicio, alúmina zirconia, óxido de aluminio, óxido de aluminio blanco, óxido de aluminio café. Estos son:

- Carburo de silicio

Éste es un mineral sintético de color negro brillante (Fig. 1.9) y de elevada dureza. Durante su uso se fractura en partículas, lo cual produce aristas filosas que proporcionan una rápida y uniforme remoción del material a lijar.



Fig. 1.9. Grano de carburo de silicio.

- Alúmina zirconia

Es una mezcla de óxido de zirconia disuelto en óxido de aluminio (Fig. 1.10). El tipo usado para abrasivos revestidos (lijas) tiene una estructura microcristalina y se caracteriza por sus aristas filosas, su alta dureza y su elevada tenacidad posibilitan que las partículas más pequeñas del grano se fracturan de forma mucho más lenta que el óxido de aluminio regular; esto ocasiona un funcionamiento superior sobre una amplia gama de materiales, tales como: acero al carbono, bronce duros y una amplia variedad de aceros inoxidable, hierro maleable, acero nodular, aluminio, titanio, entre otros.

El abrasivo de alúmina zirconia es excelente donde se usan cargas de lijado elevadas y muy frecuente e igualmente efectivo en un sinnúmero de aplicaciones aun usando cargas de lijado moderadas.



Fig. 1.10. Grano de alúmina zirconia.

- Óxido de aluminio



Es un mineral sintético basado en la fusión de óxido de aluminio de alta pureza (Fig. 1.11), el cual ha sido tratado térmicamente a temperaturas muy elevadas para mejorar sustancialmente sus características de dureza y enfriamiento. Resultando, tiempos de vida más prolongados el uso de la lija y reduciendo los costos. Su aplicación se recomienda para operaciones de lijado en materiales de alta resistencia a la tracción como son: aceros y bronce duros. También, es muy efectivo para el desbaste de materiales de baja resistencia a la tracción como hierros grises, aceros de bajo carbono y aleaciones de aluminio y cobre.



Fig. 1.11. Grano de óxido de aluminio.

- Óxido de aluminio blanco

Es un abrasivo sintético y durable (Fig. 1.12) que se caracteriza por la larga vida de sus aristas filosas, recomendado para el lijado en la industria maderera en general.



Fig. 1.12 Grano de óxido de aluminio blanco.

- Óxido de aluminio café

Este grano abrasivo está formado por cristales de gran tamaño. Se caracteriza por sus aristas duras, filosas y tenaces (Fig. 1.13); se usa para el lijado y pulido de materiales de alta resistencia a la tracción, tales como aceros de alto carbono, aceros inoxidables, bronce duros, etc., siendo muy efectivo aun para el desbaste de un sin número de materiales de baja resistencia a la tracción como son: hierros grises, aceros de bajo carbono y aleaciones de aluminio y cobre.



Fig. 1.13 Grano de óxido de aluminio café.

El grano abrasivo más utilizado de los antes mencionados para el lijado de muestras metalográficas es el carburo de silicio, debido a que posee una dureza mayor que el de los otros abrasivos descritos.

### **TAMAÑO DE GRANO DE PAPEL ABRASIVO**

El tamaño de grano de las partículas abrasivas se identifica por un número; así en los papeles abrasivos este número se ubica en la parte posterior y cuando menor sea el número más basto es el abrasivo.

Los fabricantes de papeles abrasivos proporcionan el número de lija; así, de acuerdo al tamaño de grano se clasifican éstas como gruesa, media, fina y muy fina (ver Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Clasificación de lijas de acuerdo al tamaño de grano.

<b>Gruesa</b>	<b>Media</b>	<b>Fina</b>
50	100	1000
60	240	1200
70	400	1500
80	500	
90	600	

### **DORSOS DE LOS PAPELES ABRASIVOS**

Es la base que soporta los granos abrasivos, los cuales pueden ser: papel, tela, fibra vulcanizada o una combinaciones de éstos. Así:

## **Papel**

Los papeles empleados en la fabricación de abrasivos revestidos son durables, resistente e ideal para aplicaciones ligeras, sea en forma manual o con máquinas lijadoras. Esto es debido a que la superficie uniforme del papel empleado, proporciona mejores acabados. Existen varios pesos o espesores de papel, los cuales van desde el peso A (el más ligero) hasta el peso E (el más pesado).

Para aplicaciones en húmedo o con lubricantes que contengan agua se utilizan papeles impermeables impregnados con diferentes tipos de elastómeros sintéticos.

Los papeles ligeros se recubren con granos abrasivos finos, propios para el acabado final de los materiales. Los de peso intermedio se recubren con granos más gruesos, adecuados para pasos intermedios de lijado y el papel pesado se recubre con toda la gama de granos abrasivos y se recomienda para usarse en equipos de lijado manual.

## **Telas**

Las telas utilizadas pueden ser de algodón, poliéster o una combinación de ambas, y se procesan para lograr características necesarias que le permitan transformarse en un dorso adecuado para los abrasivos revestidos. Las telas empleadas como soporte de los abrasivos revestidos poseen características especiales, como lo son: peso, resistencia y flexibilidad, que les permite transformarse en un dorso adecuado para los abrasivos revestidos.

La tela “J”, jeans, es la más ligera y flexible, adecuada para operaciones manuales o en forma de bandas abrasivas para pulido; contrario a esto, la tela “X” (drill) está indicada para aplicaciones donde se recomiendan cargas de trabajo de intermedias a pesadas.

La tela “W” es impermeable, resistente y flexible, adecuada para trabajos en húmedo o con lubricantes que contengan agua.

**Fibra vulcanizada**

La fibra está constituida por capas vulcanizadas de celulosa de algodón que dan como resultado un dorso duro, resistente y flexible. Los respaldos de fibra vulcanizada se usan para operaciones de trabajo pesado en forma de discos abrasivos.

**Combinación (papel-tela)**

Es un dorso fabricado combinando papel de alta resistencia y tela ligera. Se recubre con granos abrasivos gruesos y se usa en lijadoras de tambor de alta velocidad para lijados severos y pulido de pisos.

**ADHESIVOS**

El adhesivo se aplica en dos películas independientes: la primera denominada engomado, cuya función es fijar el grano abrasivo al dorso y la segunda llamada reengomado, que refuerza la posición del abrasivo. Los tipos de adhesivos usados son: resinas y barnices.

Las resinas son adhesivos sintéticos resistentes al calor fabricados con base urea formaldehído, ideal para cargas moderadas de trabajo o con base fenol formaldehído, para resistir cargas severas de trabajo, en las que se genera una cantidad considerable de calor a causa de la fricción. Estos tipos de resinas pueden modificarse también con rellenos inertes para aumentar su duración y eficiencia de lijado.

Los barnices son adhesivos sintéticos compuestos por resinas fenólicas y sustancias insolubles en agua que les confieren características impermeables; por lo cual, son adecuados para trabajar con agua y con lubricantes que contengan la misma. En términos generales, las resina son rígidas y resistentes. Por lo anterior y de acuerdo a las necesidades de aplicación se utilizan las combinaciones de adhesivo en engomado y reengomado siguientes:

- Resina sobre resina: para acabados y desbastes intermedios y pesados en máquinas de lijado altamente eficientes.
- Resina sobre barniz: para aplicaciones con agua y con lubricantes que la contengan.

## **PROCESO DE MANUFACTURA**

En la manufactura de abrasivos revestidos se presentan dos procesos: fabricación y acabado. El proceso de fabricación, es una operación continua que consiste en la aplicación de adhesivos, su polimeración y el recubrimiento de granos abrasivos sobre el dorso. Esta última operación se lleva a cabo mediante dos sistemas: uno electrostático y otro por gravedad.

En el primero, los granos abrasivos cruzan un campo magnético que permite que el grano adquiera una carga eléctrica para así proyectarse hacia el dorso aplicado con adhesivo y quedar fijo con las aristas de corte expuestas, dando por resultado una superficie abrasiva adecuada. El material, así, procesado se puede recubrir según las necesidades de aplicación en forma cerrada o abierta. Además, los granos cubren totalmente la superficie del dorso y su uso es adecuado para superficies severas y para la mayor parte de las aplicaciones. La mayoría de los abrasivos revestidos tienen este tipo de recubierto.

En el segundo caso, cada grano abrasivo está espaciado a distancias determinadas cubriendo del 50% al 70% de la superficie. Este tipo produce más flexibilidad y resistencia a que la lija se tape con el material de desbaste. Como resultado del proceso de fabricación se obtienen rollos de gran tamaño y de diversos anchos denominados Jumbo, a partir de los cuales se inicia el proceso de acabado. Este proceso consiste en operaciones no continuas como: flexado, curado, humidificado y estabilizado, las cuales dan las características finales al producto en forma de Jumbo.

Finalmente, con la operación de corte el producto adquiere su presentación final en dimensiones y formas que pueden ser las de hojas, bandas, discos, rollos, discos sensibles a la presión, según las necesidades de uso de los consumidores.

## **ALMACENAMIENTO DE PAPEL ABRASIVOS**

En el lijado de muestras metalográficas, el almacenamiento de los papeles abrasivos tiene un rol muy importante al mantenerlos en ambientes adecuados; esto es debido a que no se degradan por lo que se pueden mantener almacenados por largos períodos de tiempo y cuando son utilizados, sus propiedades no varían significativamente. Entre los aspectos a considerar para el almacenamiento de los papeles abrasivos se tiene:

- Ambiente circundante
- Forma de almacenamiento

El ambiente, no debe de poseer mucha humedad, debido a que el adhesivo del papel abrasivo tiende a perder sus propiedades, dando como resultado el fácil desprendimiento de los granos abrasivos, los cuales ocasionarían ralladuras en la muestra metalográfica.

En cuanto a la forma de almacenamiento, si se apilan, debe realizarse colocando los papeles de grano más finos arriba y los de grano más gruesos abajo, esto es por el desprendimiento de granos que pueda ocurrir, ya que si los granos finos caen en los papeles abrasivos de grano grueso la influencia de estos al momento de lijar no es significativo, pero si ocurre lo contrario pueden haber ralladuras en la muestra metalográfica.

## 1.5 DUREZA DE MATERIALES

Una definición común de dureza es la resistencia a la penetración. La dureza es función de las propiedades mecánicas del material, sobre todo del límite de elasticidad.

Una superficie blanda es rayada con más facilidad que una dura. Así, un material duro como el diamante rayará uno blando como el grafito; mientras que la situación inversa nunca se producirá. La dureza relativa de los materiales se determina por la escala de Mohs, nombre del mineralogista alemán **Friedrich Mohs** que la ideó. En esta escala, diez minerales comunes están clasificados en orden creciente de dureza recibiendo los índices siguientes: talco, 1; yeso, 2; calcita, 3; fluorita, 4; apatita, 5; ortosa (feldespato), 6; cuarzo, 7; topacio, 8; corindón, 9; y diamante, 10. La dureza de una muestra se obtiene determinando qué material de la escala Mohs lo raya. Así, la galena, que tiene una dureza de 2.5, puede rayar el yeso y es rayado por la calcita. La dureza de un mineral determina en gran medida su durabilidad.

Existen muchas pruebas para determinar la dureza de los materiales. Las cuales proporcionan datos de los que se pueden derivar muchas propiedades mecánicas importantes.

Las pruebas de dureza se pueden llevar a cabo fácil y rápidamente, se usan ampliamente para controlar procesos, así como para inspeccionar y determinar la aceptación de materiales y componentes. Estas se basan en la aplicación lenta de una carga fija sobre un indentador que marca la superficie lisa de la probeta; una vez se retira la carga, se mide el área o bien la profundidad de la marca o indentación, lo cual indica la resistencia a la carga.

### 1.5.1 PRUEBA BRINELL

Este método fue creado por el ingeniero sueco **Johann Brinell [1900]**. Consiste en presionar sobre un material una bola de acero templado de diámetro determinado; ésta presión o carga se aplica mecánicamente o hidráulicamente hasta 29420 N (6600 lb) durante un período de tiempo determinado, tal como se presenta en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Períodos de tiempo de aplicación de carga.

Material	Tiempo, segundos
Hierros y aceros	10 a 30
Cobre, bronces y latones	30
Materiales muy blandos	120

Después de quitar la carga se mide en milímetros el diámetro de la impresión hecha por la bola. El número de dureza brinell (BHN), es el cociente de la carga P y el área de la penetración (Ec. 1.1).

$$BHN = \frac{2P}{\pi D \left( D - \left( D^2 - d^2 \right)^{1/2} \right)} \quad (1.1)$$

donde:

D: diámetro de la bola, mm

d: diámetro de la penetración, mm

P: carga aplicada, N

En la práctica, el BHN se lee directamente de una tabla en la que se enumeran valores diferentes de **d** para distintos valores de **P**. El ensayo Brinell, se puede aplicar perfectamente a materiales de perfil grueso de hierro o acero, pues las huellas obtenidas

son claras y de contornos limpios. En la Tabla 1.4, se presenta la dureza Brinell de algunos materiales.

Tabla 1.4. Dureza Brinell de algunos materiales.

<b>Material</b>	<b>BHN</b>
Acero para herramientas templadas	500
Acero dulce (0.10 % de C)	110
Bronces	100
Latones	50
Aleaciones de aluminio	25 a 30

La denominación de los ensayos Brinell se efectúa mediante la siguiente especificación; HBN (D/P/T). Donde D es el diámetro de la bola; P es la carga aplicada, y T es el tiempo de duración del ensayo.

Así por ejemplo: HBN (10/3000/30), quiere decir ensayo Brinell con la bola de 10 mm, carga aplicada de 3000 kg<sub>f</sub> (6600 lb) durante 30 segundos.

Los cuidados a tomar en cuenta para determinar el número de dureza Brinell son:

- La superficie de la pieza esté limpia, perfectamente plana, normal al eje de aplicación de la carga y lo más homogénea posible.
- El espesor de la pieza sea por lo menos, el doble del diámetro de la huella.
- La distancia del centro de la huella al borde de la pieza sea por lo menos, cuatro veces el diámetro de la huella.
- La distancia entre huellas debe ser por lo menos tres veces el diámetro de la huella.

### 1.5.2 PRUEBA ROCKWELL

La determinación de la dureza se basa también en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados; pero en lugar de determinar la dureza del material en función de la superficie de la huella que deja el cuerpo penetrante, se determina en función de la profundidad de la huella.

El número de dureza Rockwell; es un número obtenido por el aumento neto de la profundidad de la huella, el cual se produce cuando aumenta la carga sobre un penetrador a partir de una carga menor que se reportada. Los números de dureza



Rockwell se expresan siempre con un símbolo de escala, que indica el penetrador y la carga utilizada; por Ejemplo, 60 DRC indica un valor de dureza Rockwell 60 medido en la escala C.

Se usan varias combinaciones de penetradores y cargas, para adaptarse a materiales de diversas durezas y espesor. Entre los penetradores se pueden citar los siguientes:

- Los diamantes de forma cónica conocidos como Brale, el cual tiene un ángulo de abertura de  $120^\circ$  y una punta redondeada, con radio de  $0.2 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$  ( $0.0079 \pm 3.94 \times 10^{-4}$  pulg).
- Las bolas de acero endurecido o templado, cuyos diámetros varían entre 1.59 y 12.7 mm (1/16 y 1/2 pulg).

El penetrador de diamante permite determinar la dureza fácilmente de los aceros de mayor resistencia y para materiales blandos e incluso para los plásticos se utilizan las bolas de mayor tamaño.

Este ensayo requiere que se emplee una carga de 97.86 N (22 lb), para asentar firmemente el penetrador en la superficie de la muestra, esto se conoce como precarga. Después de la aplicación de ésta, se coloca en cero el calibrador de profundidad, luego se aplica y retira una carga mayor, llamada carga principal. El indicador de profundidad sirve para medir la penetración, se calibra de forma tal que su lectura se haga directamente en índices de dureza y no en pulgadas.

Las cargas más usuales para las pruebas estándar son: 60, 100 y 150 kg<sub>f</sub> (132, 220 y 330 lb) para materiales gruesos, y de 15, 30 y 45 kg<sub>f</sub> (33, 66 y 99 lb) para materiales delgados.

En la Tabla 1.5 se presentan las escalas de dureza Rockwell y la aplicación de éstas en varios materiales.

Tabla 1.5. Escala de durezas Rockwell.

Escala	Tipo de prueba	Tipo y tamaño del penetrador	Carga menor, N	Carga mayor, N	Escala del comparador		Aplicaciones
					Color	Colocación	
A	Normal	Cono de diamante	98.1	588.4	Negro	Fuera	Aceros nitrurados, ejes estirados en frío.
B	Normal	Bola de 1/16 pulg	98.1	981	Rojo	Dentro	Aceros de bajo carbono, reconocidos.
C	Normal	Cono de diamante	98.1	1471.5	Negro	Fuera	Aceros duros, con dureza superior a 100 RB o 20 RC
D	Normal	Cono de diamante	98.1	981	Negro	Fuera	Aceros cementados
E	Normal	Bola de 1/8 pulg	98.1	981	Rojo	Dentro	Metales blandos, como antifricción y piezas fundidas
F	Normal	Bola de 1/16 pulg	98.1	588.4	Rojo	Dentro	Bronce recocido
G	Normal	Bola de 1/16 pulg	98.1	1471.5	Rojo	Dentro	Bronce, fósforo y otros metales
H	Normal	Bola de 1/8 pulg	98.1	588.4	Rojo	Dentro	Fundición de hierro, Metales blandos de poca homogeneidad.
K	Normal	Bola de 1/8"	98.1	1471.5	Rojo	Dentro	Metales duros, con poca homogeneidad, fundición de hierro.

### 1.5.3 PRUEBA VICKERS

Es una prueba de dureza por penetración, en la cual se usa una máquina calibrada para aplicar una carga compresiva predeterminada, con un penetrador piramidal de diamante de base cuadrada y ángulos entre caras de 136° apoyado sobre la superficie del material bajo prueba. Para conocer la dureza después de retirar la carga, se miden las diagonales de la huella resultante.

La impresión de la prueba se mide utilizando un microscopio y ésta resulta tan pequeña que se le puede considerar como una medición microscópica de dureza. El número de dureza Vickers, es seguido por las siglas DV con un primer sufijo convencional y un segundo sufijo que indica el tiempo de aplicación de la carga.

Las pruebas de dureza Vickers, se efectúan con cargas desde 1.96 N hasta 98 N. En la práctica, el número de dureza Vickers se mantiene constante para cargas de 49 N o mayores. Para cargas menores el número de dureza varía dependiendo de la carga

aplicada. Existen tres tipos de ensayo de dureza Vickers (Tabla 1.6) caracterizados por diferentes intervalos de cargas de ensayo.

Tabla 1.6. Tipos de ensayo de dureza Vickers.

Designación	Símbolo de Dureza	Carga nominal de ensayo, N*
Ensayo de dureza Vickers	DV 5 a DV 100	49.03 a 980.7
Ensayo de dureza Vickers de baja carga	DV 0.2 a < DV 5	1.961 a 49.03
Ensayo de microdureza Vickers	< DV 0.2	< 1.961

\*1 kg<sub>f</sub> = 9.81 N

La dureza Vickers se calcula dividiendo la carga de ensayo entre el área proyectada de la huella, que se considera como una pirámide recta de base cuadrada y con el mismo ángulo en el vértice que el penetrador y calculado conforme a la Ec. 1.2.

$$DV = \frac{2 P \operatorname{sen} (\alpha / 2)}{d} = \frac{0.18909 P}{d} \quad (1.2)$$

donde:

DV: dureza Vickers

P: carga aplicada en N (1 kg<sub>f</sub> = 9.81 N)

d: diagonal media de la huella en mm.

$\alpha$  : ángulo formado por las caras del penetrador de diamante (136°).

#### 1.5.4 PRECAUCIONES A CONSIDERAR EN LAS PRUEBAS DE DUREZA

Para obtener un mejor resultado en la determinación de la dureza de un material es necesario tomar las consideraciones siguientes:

- Preparación de la probeta. Para determinar la dureza Brinell es apropiado tener una superficie desbastada. La prueba Rockwell requiere una superficie esmerilada o maquinada muy fino; mientras que la prueba Vickers, requiere que las probetas sean pulidas y atacadas químicamente, ya que se realizarán mediciones en un microscopio.
- Espesor de la probeta. La probeta debe tener un espesor de modo que la profundidad de deformación no ocupe todo el espesor de la misma dado que surgirá un dato erróneo en la prueba. En la prueba Brinell se utilizan las probetas de mayor espesor;

mientras que las más delgadas son aceptables para pruebas superficiales y de microdureza, debido a sus cargas ligeras.

- Proximidad de las impresiones entre ellas y el borde de la probeta. Puesto que el penetrador produce un endurecimiento de trabajo en frío en el metal en las cercanías de la impresión, las lecturas que se tomen demasiado cerca unas de otras producirá un dato erróneo. Por lo consiguiente, la distancia entre penetraciones deberá ser aproximadamente tres veces el diámetro del penetrador.
- Perpendicularidad de la dirección de aplicación de la carga en la superficie de la probeta. El movimiento del penetrador bajo la carga debe estar en ángulo recto con la superficie de la probeta. Cuando esta última no está en un ángulo recto con la dirección de aplicación de carga, resultan lecturas bajas.

## **1.6 TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO**

La definición de tratamiento térmico de acuerdo con el Metals Hand Book, consiste en una combinación de calentamiento y enfriamiento con tiempos determinados y aplicados a un metal o aleación en estado sólido, de tal forma que se producirán propiedades deseadas. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero.

Primero se calienta el material a una temperatura para formar austenita total o parcialmente en el material. Los materiales altamente esforzados producidos por trabajado en frío deben calentarse lentamente que los que se encuentran libres de esfuerzos para evitar distorsión. Se debe considerar la diferencia de temperatura que existe entre las secciones gruesas y delgadas de elementos de sección transversal variable y siempre que sea posible, se deben tomar en cuenta algunas medidas para ejecutar más lento el calentamiento de las secciones más delgadas para minimizar el esfuerzo térmico y la distorsión.

### 1.6.1 RECOCIDO TOTAL

Consiste en calentar el acero a la temperatura adecuada y luego enfriar lentamente, preferentemente en el horno o en cualquier material que sea aislante del calor.

El propósito del recocido es refinar el grano, proporcionar ductilidad, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas, y en algunos casos mejorar el maquinado del material tratado. Por ser el recocido un proceso de enfriamiento muy lento, llega a estar muy próximo al diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro (Fig. 1.14).

Si se tiene un acero hipoeutectoide o hipereutectoide en el proceso de calentamiento, no se tendrá transformación alguna, hasta llegar a la temperatura crítica inferior, las cuales corresponden a las líneas HJ y JK (Fig. 1.14), respectivamente. Cuando se cruza la línea HJ en el acero hipoeutectoide la perlita se transforman en pequeños granos de austenita por medio de la reacción eutectoide, y los granos grandes de ferrita primaria (proeutectoide) permanecen invariables. El enfriamiento desde esta temperatura no refinará el grano. Si se continúa el calentamiento hasta llegar a una temperatura por encima de la línea GJ, será posible que los granos grandes de ferrita se transformen en pequeños granos de austenita.

El enfriamiento subsiguiente en el horno dará lugar a pequeños granos de ferrita proeutectoide y pequeñas áreas gruesas de perlita laminar; por lo tanto, la temperatura de recocido adecuada es de  $\sim 30$  °C por encima de la línea GJ.

El refinamiento del tamaño del grano de acero hipereutectoide tiene lugar a  $\sim 30$ °C por encima de la línea de temperatura crítica inferior JK; si se realiza el calentamiento por encima de esta temperatura se producirán granos austeníticos más gruesos, los cuales al enfriarse se transformarán en grandes áreas perlíticas. La microestructura del acero hipereutectoide recocido consistirá en gruesas áreas de perlita laminar, rodeada de una red de cementita proeutectoide, lo que tiende a producir alta fragilidad. Por tal motivo, el recocido para estos aceros nunca debe consistir en un tratamiento térmico final.

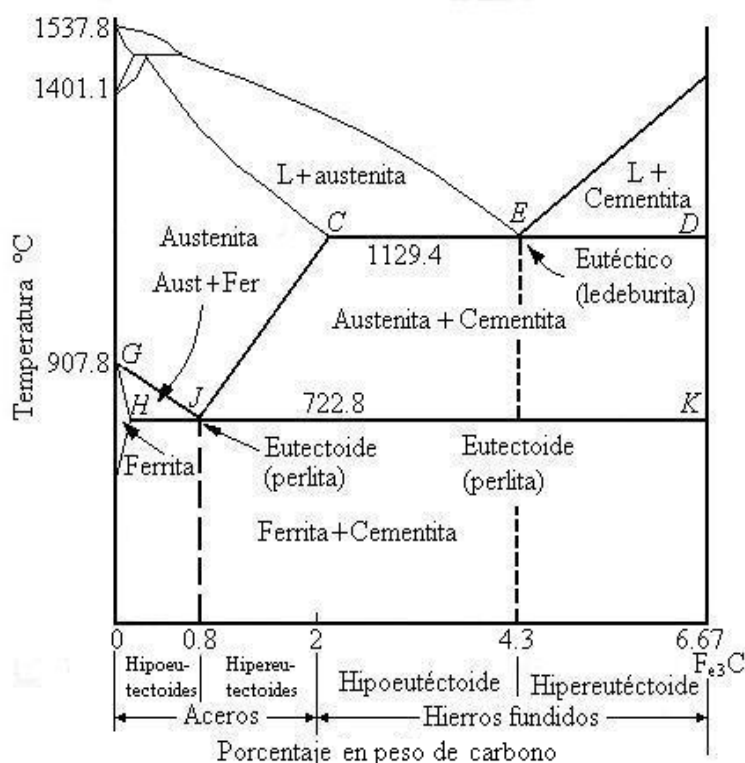


Fig. 1.14. Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro.

## 1.6.2 NORMALIZADO

El normalizado de un acero se lleva a cabo calentándolo a  $\sim 50^\circ\text{C}$  por encima de la línea crítica superior GJ o CJ (Fig. 1.14), seguido de un enfriamiento en aire inmóvil hasta la temperatura ambiente.

El propósito de la normalización es producir un acero más duro que el obtenido por recocido total. Por consiguiente, para algunas aplicaciones la normalización puede ser un tratamiento térmico final.

El incremento en la rapidez de enfriamiento al aire comparada con el enfriamiento en el horno afecta en varias formas la transformación de la austenita y de la microestructura. Como ya no se enfría en condiciones relativamente lentas, el diagrama hierro-carburo de hierro no puede utilizarse para predecir las proporciones de ferrita proeutectoide y perlita o cementita proeutectoide y perlita que existirán a temperatura ambiente.

Debido a que existe menos tiempo para la transformación; en consecuencia, habrá menor cantidad de constituyentes proeutectoides en los aceros normalizados que en los aceros recocidos. Por consiguiente, los aceros normalizados presentan una mayor dureza que los aceros recocidos, como puede observarse en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Durezas promedio.

Acero	Tratamiento Térmico	Durezas		
		Knoop	Rockwell-C	Brinell
AISI 1020	Recocido	142	44	129
	Normalizado	117	48	162
AISI 4140	Recocido	352	35	322
	Normalizado	686	58	589
AISI 4340	Recocido	246	23	230
	Normalizado	375	38	379
	Templado	707	58	585
AISI 1080	Recocido	297	28	271
	Normalizado	353	34	326

### 1.6.3 TEMPLE

Bajo rapidez de enfriamiento lentas o moderadas, los átomos de carbono pueden difundir hacia fuera de la estructura austenítica; de esta forma los átomos de carbono se mueven ligeramente para llegar a ser una estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc). Esta transformación tiene lugar mediante un proceso de nucleación y crecimiento, dependiendo del tiempo. Con un aumento adicional en la rapidez de enfriamiento, no existe tiempo suficiente para que el carbono se difunda de la solución y aunque tienen movimiento los átomos de hierro, la estructura resultante no puede llegar a ser bcc, ya que el carbono está atrapado en la solución. A la estructura resultante se le llama martensita, que es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en la estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Esta estructura reticular altamente distorsionada es la principal razón de la alta dureza del material; al proceso mediante el cual se obtiene esta estructura se conoce como temple.

La martensita es siempre más dura que la austenita y la dureza se incrementa si se aumenta el contenido de carbono, como se puede apreciar en la Fig. 1.15. En la cual la dureza de la martensita aumenta rápidamente al principio con el incremento en el

contenido de carbono, alcanzando casi 60 RC al 0.40 % de C. Más allá de este punto, la pendiente de la curva tiende a cero y en la composición eutécticoide (0.80 % de C) la dureza es de 65 RC. Este efecto se debe a que los aceros con más carbono pueden retener más austenita.

Durante muchos años se creía que la transformación martensítica era única para los aceros; sin embargo, se ha encontrado este tipo de transformación en aleaciones como hierro-níquel, cobre-zinc y cobre-aluminio; por lo tanto, la transformación se conoce como un tipo básico de reacción en estado sólido y el término martensita ya no se limita a la metalurgia del acero.

El propósito básico del endurecimiento es producir una estructura totalmente martensítica, lo cual se logra con la rapidez crítica de enfriamiento (la variación de la temperatura respecto al tiempo °C/s) que evitará la formación de los productos más suaves de transformación. La cual se determina por la composición química y el tamaño de grano austenítico del acero que es una propiedad importante, ya que indica que tan rápido debe enfriarse éste para formar sólo martensita.

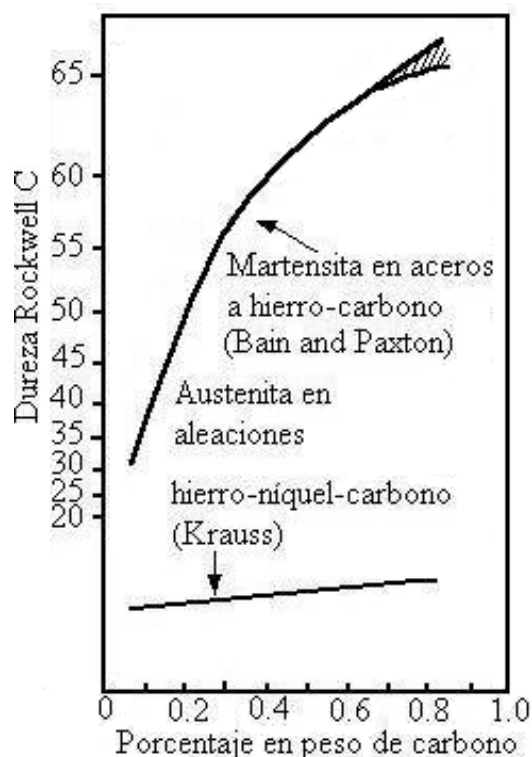


Fig. 1.15. Efecto del carbono sobre la dureza de la austenita y la martensita.



## DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA

El tiempo y la temperatura de transformación tienen una profunda influencia en los productos de transformación y las subsecuentes propiedades del acero. Como la austenita es inestable por debajo de la temperatura crítica inferior (línea HJ), es necesario saber cuanto tiempo necesitará para empezar a transformarse a una temperatura subcrítica específica, cuanto tiempo requerirá para estar completamente transformada y cual será la naturaleza del producto de transformación. La mejor forma de comprender los diagramas de transformación isotérmica es estudiar la composición eutectoide (0.8 % de C), ya que no existe un constituyente proeutectoide presente en la microestructura.

El resultado del experimento se puede apreciar en la Fig. 1.16, en la cual el área a la izquierda del principio de la transformación consta de austenita inestable y el área a la derecha de la línea de fin de transformación, es el producto al que se transformará la austenita a temperatura constante; mientras que el área entre el principio y el fin de la transformación, marcada por las tres fases austenita y perlita (ferrita y cementita).

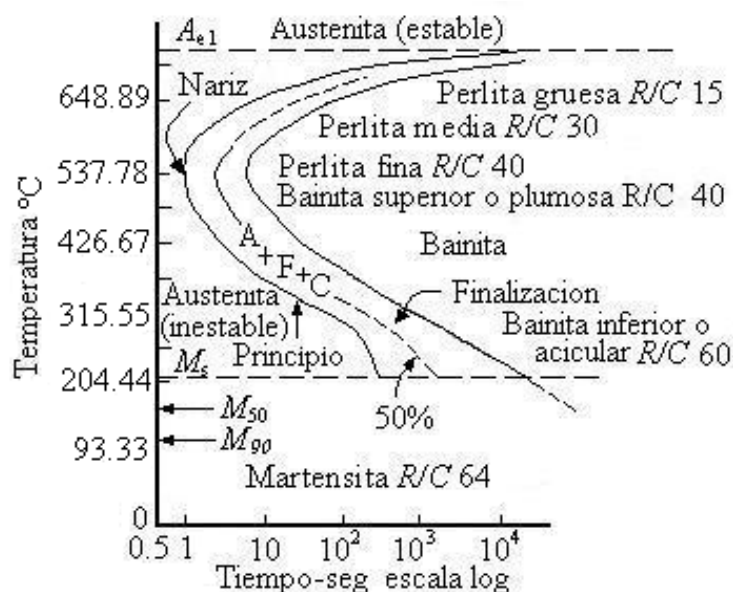


Fig. 1.16. Diagrama de transformación-isotérmica para un acero 1080 (eutectoide).

El punto al principio de la línea de transformación más alejado de la izquierda se conoce como nariz del diagrama. En todos los diagramas, excepto para el acero eutectoide, existe una línea adicional por encima de la región de la nariz (Fig. 1.17); la primera línea indica el principio de la transformación de austenita a ferrita, la segunda el principio de la transformación de austenita a perlita.

El área entre las líneas se marca como  $\gamma + \alpha$  (austenita más ferrita proeutectoide). Por lo general, ambas líneas se unen en la región de la nariz. La temperatura  $M_s$  se indica con una línea horizontal. Las flechas que apuntan a la escala de temperatura señalan la temperatura a la que se ha transformado la austenita a martensita en el valor de 50 y 90%.

El producto de transformación por encima de la nariz es perlita. Por debajo de la línea HJ se forma perlita laminar con dureza 15 RC y conforme baja la temperatura de transformación aumenta la dureza, hasta obtener una perlita fina con una dureza de 40 RC.

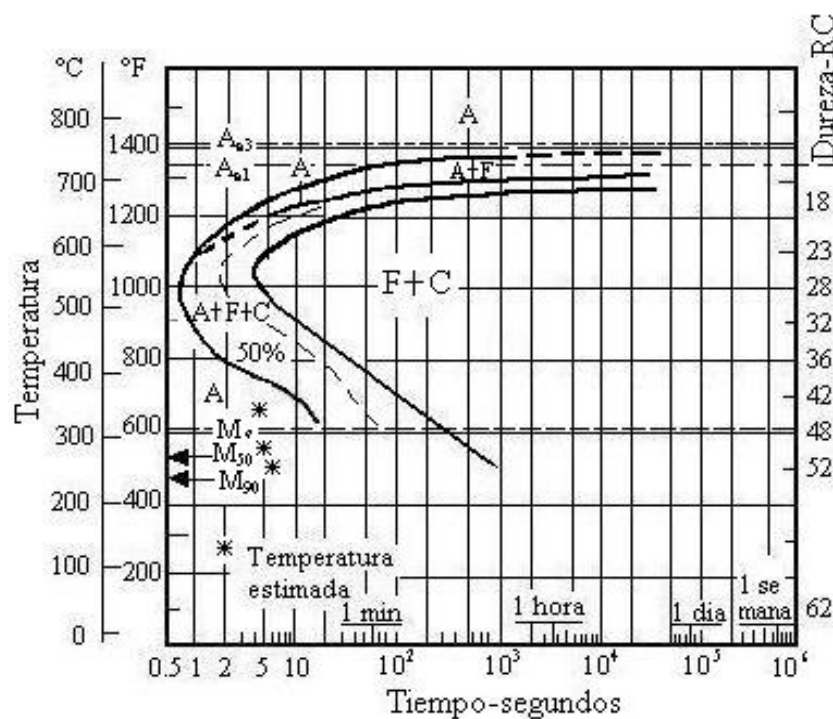


Fig. 1.17. Diagrama T-I de acero 1050: 0.50% de C, 0.915 de Mn. Tamaño de grano: de 7 a 8; austenizado a 910 °C.

Entre la región de la nariz a  $510\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura  $M_s$  aparece un nuevo agregado de ferrita y cementita llamado **bainita**. A temperaturas mayores del intervalo de transformación, parece perlita y se conoce como bainita superior o plumosa, con una dureza de 40 RC (Fig. 1.16); a bajas temperaturas parece martensita y se conoce como bainita inferior o acicular con dureza de 60 RC.

### CURVAS DE ENFRIAMIENTO Y EL DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA (T-I)

Una curva de enfriamiento se determina experimentalmente colocando un termopar en un lugar definido en una muestra y luego se mide la variación de la temperatura con el tiempo.

Dado que las coordenadas del diagrama T-I son las mismas que para una curva de enfriamiento, es posible sobreponer varias curvas de enfriamiento en éste. Como se observa en la Fig. 1.18.

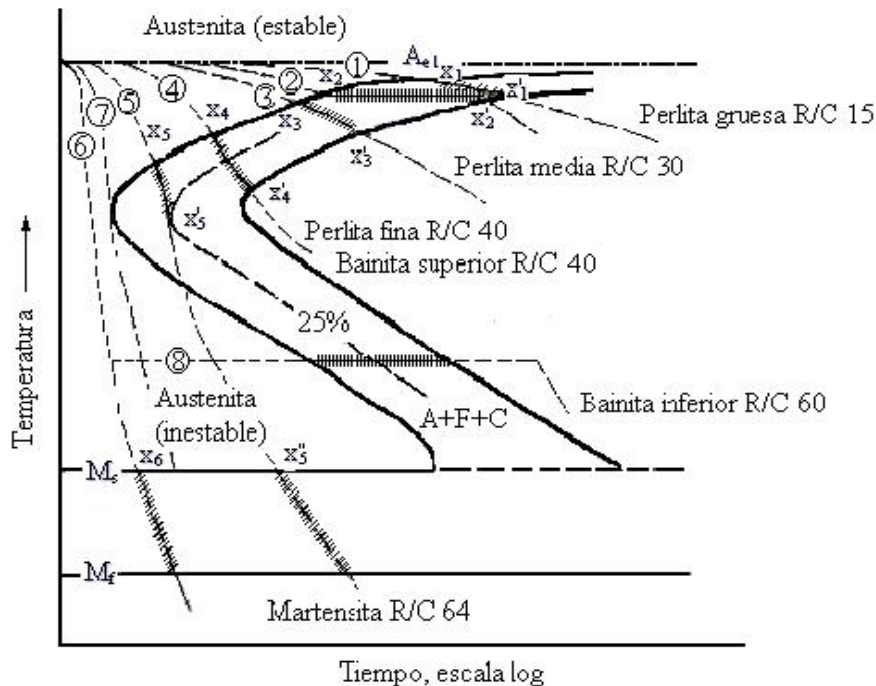


Fig. 1.18. Curvas de enfriamiento superpuestas en el diagrama hipotético T-I para un acero eutectoide. La porción achurado de la curva de enfriamiento indica la transformación.

La curva de enfriamiento 1 tiene una rapidez de enfriamiento muy lenta, típica de un recocido. La transformación empezará cuando la curva de enfriamiento cruce el principio de la transformación de austenita a perlita en el punto  $X_1$ . El producto de la transformación a esa temperatura será perlita muy gruesa y la transformación continuará hasta el punto  $X'_1$ , en un acero hipoeutectoide se tendrá además ferrita proeutectoide. Por debajo de la temperatura  $X'_1$ , la rapidez de enfriamiento no tendrá efecto en la microestructura.

La curva de enfriamiento 2 corresponde a un enfriamiento isotérmico; el proceso se lleva a cabo enfriando el material rápidamente desde arriba del intervalo crítico hasta una temperatura predeterminada y manteniéndolo durante el tiempo indicado a temperatura constante para producir la transformación completa. En comparación con el recocido total, en este enfriamiento se produce una microestructura de mayor dureza y principalmente homogénea.

La curva 3 tiene una rapidez de enfriamiento mayor que la del recocido (curva 1) y puede considerarse como una normalización. La transformación empezará en el punto  $X_3$ , con la formación de perlita gruesa en un tiempo más corto que el de recocido. La transformación estará completa en  $X'_3$  al formar perlita media. Al igual que en los casos anteriores si es un acero hipo se presentará además ferrita proeutectoide.

La curva de enfriamiento 4 es típica de un temple en aceite, tiene una rapidez mayor que las descritas anteriormente y la microestructura será una mezcla de perlita media y fina.

La curva 5 es típica de una rapidez de enfriamiento intermedia; empezará su transformación a perlita fina o ferrita proeutectoide en  $X_5$ , en un tiempo relativamente corto. Esta transformación continuará hasta que la curva sea tangente a algún porcentaje transformado en  $X'_5$ . Por debajo de esta temperatura se mantendrá en esta condición hasta que se cruce la línea  $M_S$  en  $X''_5$ , la austenita restante se transformará en martensita a medida que disminuya la temperatura.

La curva de enfriamiento 6 es típica de un enfriamiento drástico, es lo suficientemente rápida para evitar la transformación en la región de la nariz; se conserva austenita hasta que se intercepta la línea  $X_6$  en  $M_S$ .

La estructura final será completamente martensita si la temperatura ambiente es inferior a la de final de transformación martensítica ( $M_f$ ).

La curva 7 que es tangente a la nariz, es la rapidez crítica de enfriamiento aproximadamente para este acero.

Hasta el momento se ha tratado con el diagrama T-I para ceros al carbono; para aceros aleados las fases que se forman son las mismas que para aceros al carbono. En los diagramas T-I para aceros aleados la forma de las curvas es diferente con respecto al del acero al carbono, esto es debido a los elementos de aleación que lo constituyen, tal como se presenta en la Fig. 1.19, en la cual se presenta una unión igual a la de las curvas S y y aparece una parte diferente que se conoce como rodilla del diagrama, en la cual se observa la rapidez crítica de enfriamiento.

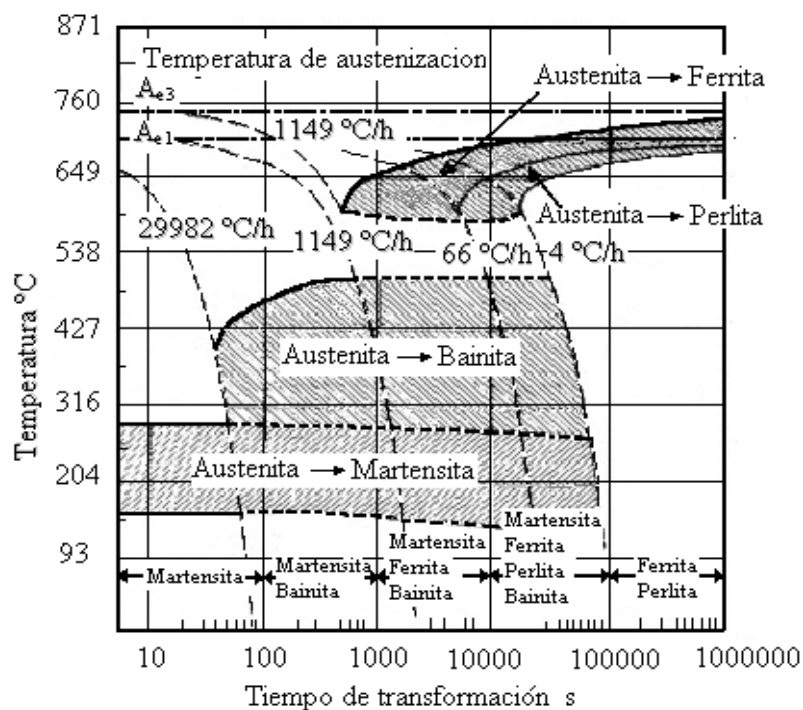


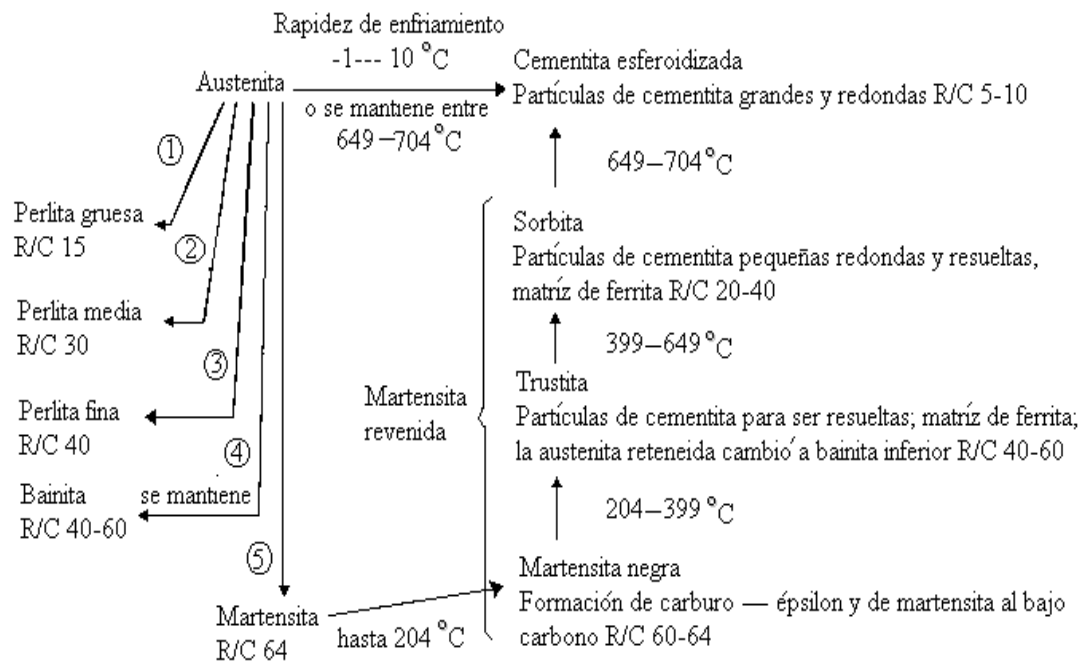
Fig. 1.19. Diagrama T-E de un acero 4340: 0.42 % de C, 0.78 % de Mn, 1.79 % de Ni, 0.8 % de Cr y 0.33 % de Mo.

#### 1.6.4 REVENIDO

En la condición martensítica sin tratamiento térmico posterior, el acero es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones. La formación de martensita origina grandes esfuerzos residuales en el acero; por lo tanto, después del temple siempre lo sigue un tratamiento de revenido, el cual consiste en calentar el acero a una temperatura menor que la crítica inferior. El propósito del revenido es liberar los esfuerzos residuales y mejorar la ductilidad y tenacidad; esto, generalmente, se obtiene a consecuencia de la dureza o de la resistencia.

La martensita es una solución sólida saturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Esta es una condición meta estable; pero cuando se aplica energía a través del revenido, el carbono se precipitará como carburo de hierro y la estructura martensítica se transforma en bcc. Habrá difusión y unión del carburo conforme aumenta la temperatura de revenido.

En la Fig. 1.20, se puede observar el proceso de transformación de un acero eutectoide desde la austenita a 648.9-704.4 °C, con una rapidez de enfriamiento de 30-50 °F/h hasta obtener martensita. Además, se presentan las características que adquiere el acero al realizar el tratamiento de revenido a diferentes temperaturas.



① Rapidez de enfriamiento  $-17^{\circ}\text{C/s}$     ③ Rapidez de enfriamiento  $16^{\circ}\text{C/s}$     ⑤ Rapidez mayor que  $121^{\circ}\text{C/s}$

② Rapidez de enfriamiento  $-7^{\circ}\text{C/s}$     ④ Rapidez de Temple

Fig. 1.20. Productos de transformación de austenita y martensita para un acero eutectoide.

Lo anteriormente expuesto, se relaciona únicamente con aceros al carbono; para aceros aleados el proceso es el mismo, con la diferencia que esta transformación martensítica se realiza en un intervalo diferente de temperatura que para aceros al carbono; por ejemplo, entre  $427$  a  $649^{\circ}\text{C}$ . Así como también, se obtienen otros resultados en cuanto a dureza, como puede apreciar en la Fig. 1.21.

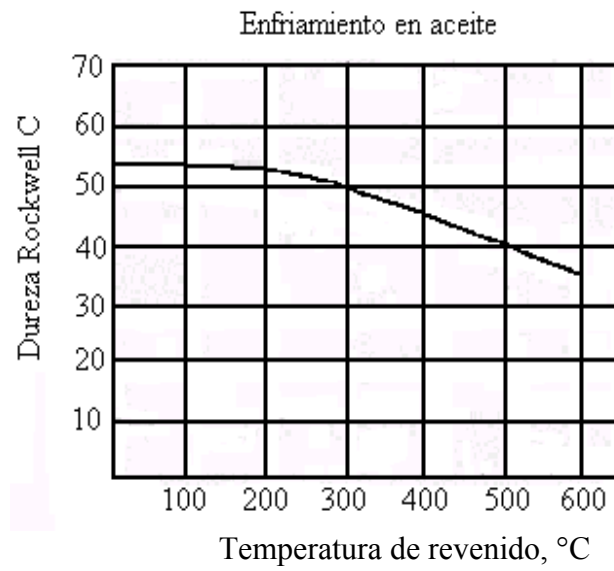


Fig. 1.21. Efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza de un acero AISI 4340.



## 2 DISEÑO DE LA MÁQUINA

En este capítulo se presenta detalladamente el diseño de los dispositivos mecánicos, neumáticos y eléctricos que forman la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas. Es importante mencionar que se asume un factor de seguridad para cada elemento, de acuerdo al funcionamiento y el tipo de cargas a las que están sometidos. El diseño se centraliza en determinar un esfuerzo máximo en cada elemento, para luego seleccionar un material que tenga una resistencia a carga máxima mayor a la calculada y con ello determinar el nuevo factor de seguridad.

En la Fig. 2.1 se presenta el esquema de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas.

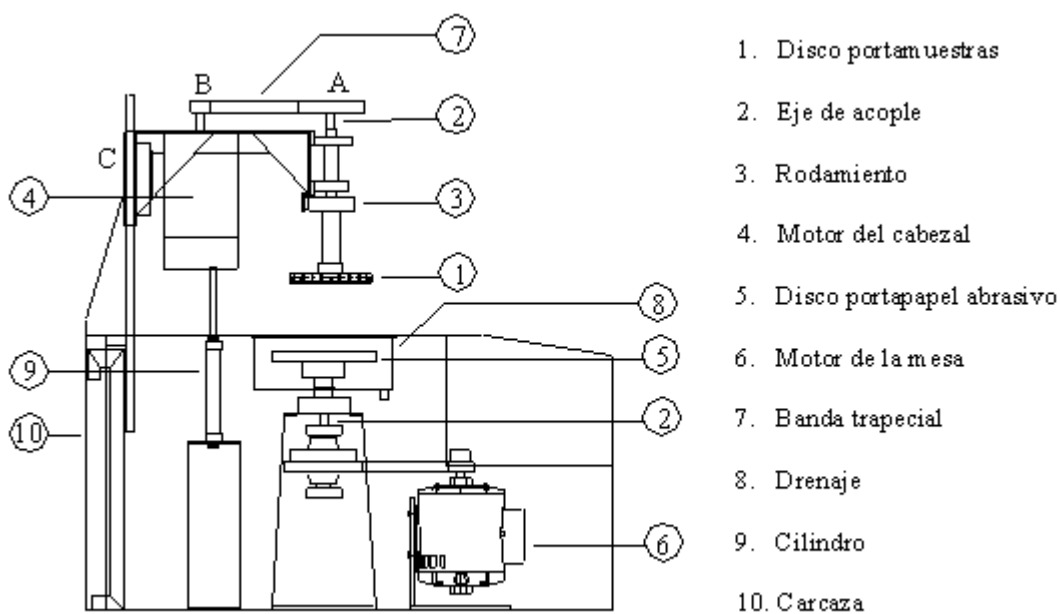


Fig. 2.1. Esquema de la máquina semiautomática para el lijado de muestra metalográficas.

### 2.1 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO

Se diseñará una máquina semiautomática que realice simultáneamente el proceso de lijado de ocho muestras. Estas muestras serán sujetadas mecánicamente en un disco que gira a una velocidad determinada y luego se desplazadas verticalmente hacia abajo por medio de un sistema mecánico, el cual será accionado de forma neumática,

presionando las muestras contra un disco que sujeta mecánicamente el papel abrasivo y gira a una determinada velocidad.

La máquina semiautomática permitirá controlar: el tiempo del proceso de lijado de las muestras, la energización de los motores y la velocidad del motor que hace girar el disco portamuestras. La velocidad del motor que produce el giro del disco portapapel abrasivo podrá variarse por medio de una transmisión de banda y poleas.

La evacuación de las partículas que surgen durante el proceso de lijado entre el papel abrasivo y las muestras como también la evacuación de calor, se realizará mediante un flujo continuo de agua controlado manualmente.

## **2.2 PARÁMETROS DEL DISEÑO**

Para llevar a cabo el diseño se requiere conocer los parámetros bajo los cuales se realizará el proceso de lijado. Dichos parámetros son definidos por los usuarios de la máquina y por criterios del diseñador de acuerdo a características de funcionamiento que se requieren o desean en la máquina. Entre los parámetros comúnmente utilizados se tienen: tipo de carga, velocidad, tiempo, espacio disponible, factor de seguridad, etc.

Los parámetros bajo los cuales iniciará el diseño de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas son:

- Velocidad de los discos portamuestras y portapapel abrasivo: la velocidad máxima del disco portamuestras debe de ser 518 rpm y la del disco portapapel abrasivo 575 rpm. Teniendo en consideración la velocidad de la pletina de aluminio de las máquinas que se presentan en el capítulo 1.
- Tiempo del proceso de lijado: el tiempo debe ajustarse entre un período de 180 a 600 segundos, para una mejor control del proceso de lijado.
- Carga aplicada durante el proceso: la carga debe ajustarse a determinada magnitud y la mayor carga aplicada a cada muestra deberá ser de 44.6 N (10 lb). Teniendo en consideración la carga que se aplica a las muestras de las máquinas presentadas en el capítulo 1.

### **2.3 DIMENSIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS**

Las características de las muestras que serán sometidas al proceso de lijado, es una de las partes fundamentales en el diseño de una máquina de este tipo.

Entre las características que destacan en una muestra se tiene: forma geométrica, diámetro, altura. Las características a considerar en el dimensionamiento de la muestra son:

- Forma geométrica: la muestra embutida tendrá una forma cilíndrica.
- Diámetro: considerando el embutido en caliente o frío que se realiza en un laboratorio de metalografía, la muestra embutida tendrá un diámetro 30 mm (1.18 pulg).
- Altura: la muestra embutida debe tener una altura mínima de 25 mm (0.98 pulg), ya que después del proceso de lijado la muestra tiene que ser introducida en un contrapeso para ser pulida en la máquina vibro-pulidora. En éste proceso se recomienda que las muestras sobresalgan 3 mm (0.12 pulg) de la superficie del contrapeso.

### **2.4 DETERMINACIÓN DE LA CARGA**

Considerando que 44.6 N (10 lb) es la carga máxima que debe ser aplicada a cada muestra, es necesario aplicar una carga de 356.7 N (80 lb) para obtener la carga requerida en éstas.

Con el propósito de lograr una mejor distribución de carga, las muestras se colocan espaciadas de forma equidistante en un mismo radio. La Fig. 2.2, presenta la fuerza aplicada sobre cada muestra.

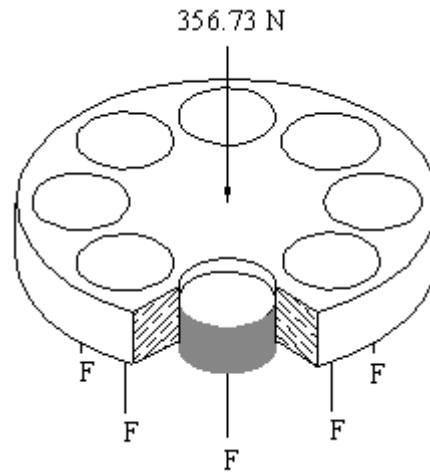


Fig. 2.2. Distribución de carga sobre las muestras.

Las muestras al entrar en contacto con el papel abrasivo, producen una fuerza de fricción, tal como se presenta en la Fig. 2.3.

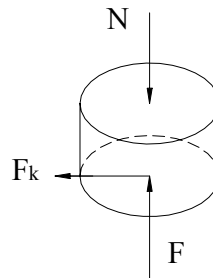


Fig. 2.3. Diagrama de cuerpo libre de la muestra.

Las consideraciones para calcular la fuerza de fricción entre el papel abrasivo y las muestras son:

- Constante en el tiempo
- Es la misma para cada muestra
- No existen imperfecciones en la superficie de las muestras.

La Ec. 2.1, se utiliza para determinar la fuerza de fricción.

$$F_k = \mu_k N \quad (2.1)$$

donde:

$F_k$ : fuerza de fricción cinética

$\mu_k$ : coeficiente de fricción cinético

$N$ : fuerza normal a la superficie en contacto

En la Fig. 2.3 se observa que  $N$  es igual a  $F$  e igual a 44.6 N (10 lb); dado que no se cuenta con el valor promedio del coeficiente de fricción entre el papel abrasivo y el tipo de muestra a lijar, se tomará para mayor seguridad en el diseño el coeficiente de fricción cinético más alto (0.6), el cual se produce entre bronce y latón<sup>(1)</sup>. Por lo tanto, la fuerza de fricción es :

$$F_k = 0.6 (44.6) = 26.8 \text{ N (6 lb)}$$

La fuerza actúa en un mismo punto tanto en el elemento que porta las muestras como en el que sujeta el papel abrasivo, la dirección de ésta se obtiene por medios gráficos. Las velocidades tangenciales con respecto al centro de los discos generan una velocidad relativa entre el papel abrasivo (punto de contacto) y la muestra; en sentido contrario pero en la misma dirección de dicha velocidad actúa la fuerza de fricción en los elementos. En la Fig. 2.4 se presenta la dirección de cada una de las fuerzas en el instante que la muestra 1 se encuentra a  $0^\circ$ .

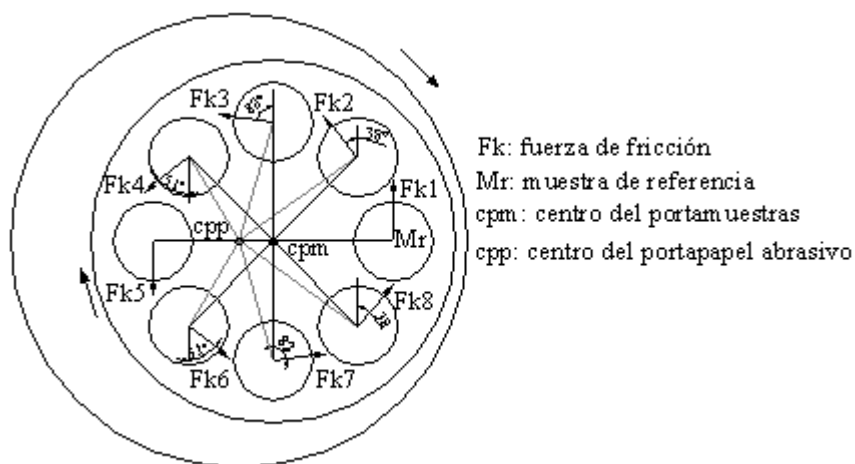


Fig. 2.4. Dirección de las fuerzas de fricción en los discos portamuestras y portapapel abrasivo.

<sup>(1)</sup> Tabla de coeficientes de fricción cinéticos, Raymond A. Serway, Física Tomo I, Tercera edición, pág. 115.

Los centros de los discos portamuestras y portapapel se encuentran excéntricos, el torque que se genera al trasladar las fuerzas de fricción al centro de los mismos, no serán iguales; por lo que se requiere un cálculo de estos en forma separada. Por estar girando estos elementos, es necesario determinar en que ángulo ( $0 < \theta < 45^\circ$ ) la muestra de referencia genera la fuerza resultante mayor.

#### 2.4.1 CÁLCULO DE FUERZA RESULTANTE

La fuerza de fricción resultante se calcula para un instante de tiempo en el proceso de lijado, dado que ambos discos se encuentran rotando. Al realizar el cálculo para cada elemento por separado, se determina la fuerza resultante en el centro de éstos.

El cálculo inicia tomando como punto de partida una muestra en el instante que se encuentra a cero grados (ver Fig. 2.4). Descomponiendo cada fuerza de fricción en su componente horizontal y vertical, y luego sumando cada reacción en su respectivo eje (x o y), se tiene:

$$\Sigma F_x = R_x$$

$$R_x = -F_{k2}(\text{sen}38^\circ) - F_{k3}(\text{sen}82^\circ) - F_{k4}(\text{sen}51^\circ) + F_{k6}(\text{sen}51^\circ) + F_{k7}(\text{sen}82^\circ) + F_{k8}(\text{sen}38^\circ)$$

$$F_k = F_{k2} = F_{k3} = F_{k4} = F_{k6} = F_{k7} = F_{k8} = 26.8 \text{ N (6 lb)}$$

$$R_x = 0 \text{ N (0 lb)}$$

$$\Sigma F_y = R_y$$

$$R_y = F_{k1} + F_{k2}(\text{cos}38^\circ) + F_{k3}(\text{cos}82^\circ) - F_{k4}(\text{cos}51^\circ) - F_{k5} - F_{k6}(\text{cos}51^\circ) + F_{k7}(\text{cos}82^\circ) + F_{k8}(\text{cos}38^\circ)$$

$$R_y = 15.97 \text{ N (3.58 lb)}$$

La fuerza resultante en éste instante es:

$$F_{kr} = 15.97 \text{ N (3.58 lb)} \uparrow 90^\circ$$

Siguiendo el mismo procedimiento, se determinó la fuerza resultante en los instantes de tiempo que la muestra de referencia se encontraba a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ . Así, los resultados se presentan a continuación.

Resultado a  $15^\circ$

$$F_{kr} = 15.97 \text{ N (3.58 lb)} \searrow 78.9^\circ$$

Resultado a  $30^\circ$

$$F_{kr} = 15.97 \text{ N (3.58 lb)} \searrow 78.9^\circ$$

A  $45^\circ$ ; se repite todo lo calculado a  $0^\circ$  y así sucesivamente se vuelven a repetir los resultados. Por lo tanto, la magnitud en cualquier instante de tiempo es la misma.

## 2.5 DISEÑO DEL DISCO PORTAMUESTRAS

### 2.5.1 CÁLCULO DEL TORQUE

En la Fig. 2.5 se presentan las fuerzas de fricción generadas en el disco portamuestras en el instante que la muestra de referencia se encuentra a  $0^\circ$ .

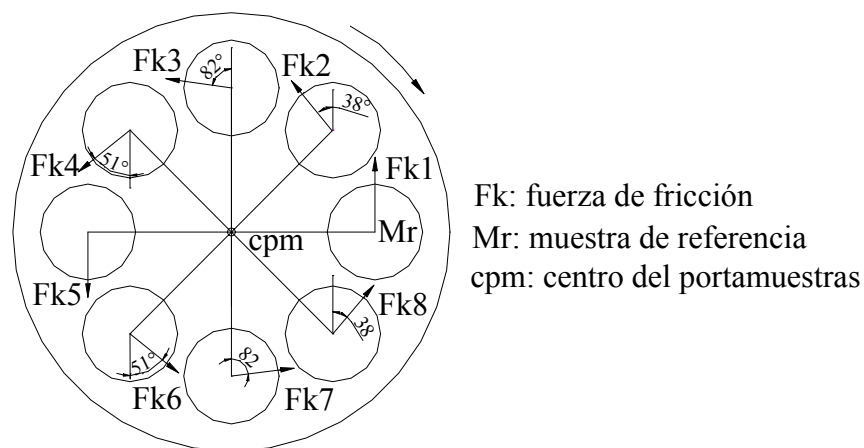


Fig. 2.5. Fuerzas de fricción sobre el disco portamuestras.

El torque se calcula mediante la ecuación siguiente.

$$T_{pm} = Fk(r) \tag{2.2}$$

donde:

$T_{pm}$ : torque que generan las fuerzas de fricción en el centro del portamuestras

$r$ : distancia entre el centro del disco y el punto donde actúa la fuerza de fricción

$Fk$ : fuerza de fricción cinética.

La fuerza de fricción no es perpendicular a la línea que une el centro del disco con el punto de aplicación de la fuerza (Ver Fig. 2.5). Mediante medios gráficos se determinó la componente de la fuerza que actúa perpendicular a dicha línea, bajo esta

forma se asegura que  $r$  permanecerá constante a la línea de acción de la fuerza. Sustituyendo en la Ec. 2.3 se obtiene el resultado siguiente.

$$T_{pm} = 0.0525 (26.8) (1 + \cos 7^\circ + \cos 8^\circ + \cos 7^\circ + 1 + \cos 7^\circ + \cos 8^\circ + \cos 7^\circ)^{(1)}$$

$$T_{pm} = 11.2 \text{ N} \cdot \text{m} (98.8 \text{ lb} \cdot \text{pulg}).$$

### 2.5.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL

A partir de el número de muestras a lijar simultáneamente (8 muestras) y el diámetro de la muestra; como también las dimensiones del pliego de papel abrasivo existente en el mercado y el diámetro de la pletina de aluminio de las máquinas citadas en el capítulo 1, se establece un diámetro de 200 mm (7.87 pulg) para el portamuestras.

Tomando en cuenta la altura (25 mm) de la muestra y que la sujeción de ésta se realizará con prisioneros de 6.35 mm (0.25 pulg) de diámetro, el espesor del portamuestras será de 20 mm (0.79 pulg).

La distribución de los agujeros en el disco para fijar las muestras deben tener una separación de  $45^\circ$  y sus centros deben estar ubicado a un radio de 52.5 mm (2.1 pulg) del portamuestras. Esto con el fin de lograr que el orificio donde se ubicará el prisionero tenga más de 10 mm (0.39 pulg) de longitud (Fig. 2.6).

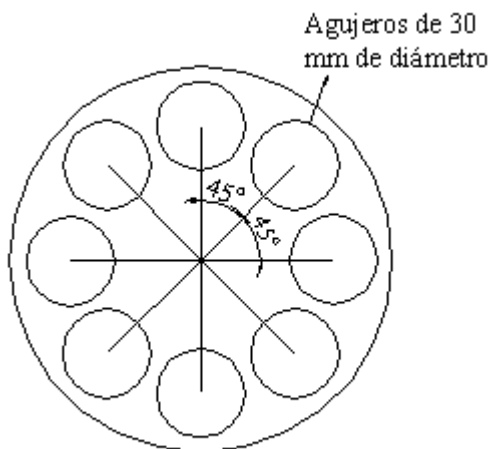


Fig. 2.6. Distribución de agujeros en el portamuestras.

<sup>(1)</sup> ángulos obtenidos mediante dibujos a escala.



En condiciones ideales la carga de diseño se distribuye en las 8 muestras y la fuerza de rozamiento actúa en cada una de éstas. Pero en condiciones críticas, puede ocurrir que la carga de diseño se aplique sólo en una muestra, debido a la mala alineación de éstas o a que sólo se instala una.

El disco podría fallar en el centro, ya que en éste es donde existe menor área. Por lo tanto, para llevar a cabo el diseño se tomará una sección del portamuestras en forma de viga con un ancho igual al diámetro del agujero donde se ubican las muestras, un espesor similar al del portamuestras y una longitud igual al radio de éste. Luego, ésta se analizará suponiendo que se encuentra empotrada y que la carga de diseño actúa en una sólo muestra (Fig. 2.7).

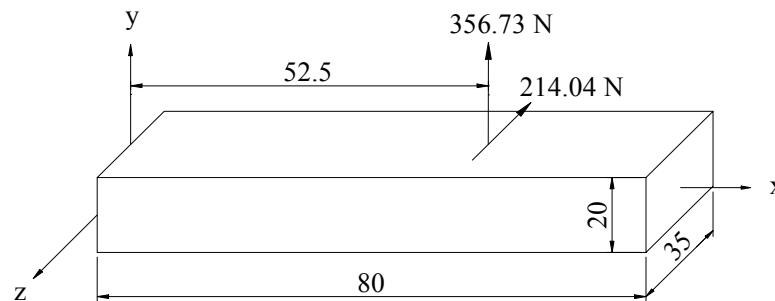


Fig. 2.7. Sección de viga empotrada del disco portamuestras, cotas en mm.

En la Fig. 2.7 se observa que cada fuerza produce un momento flexionante en la viga. Por lo tanto, en las Figs. 2.8 y 2.9, se presentan los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante.

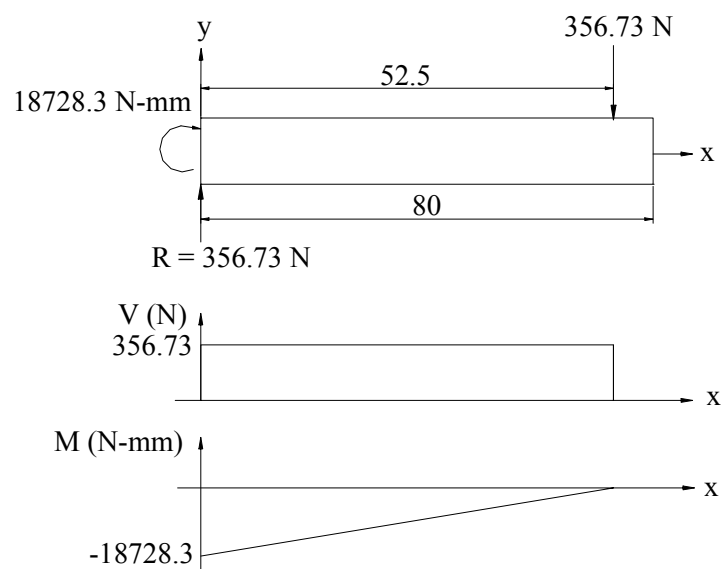


Fig. 2.8. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano  $xy$ , cotas en mm.

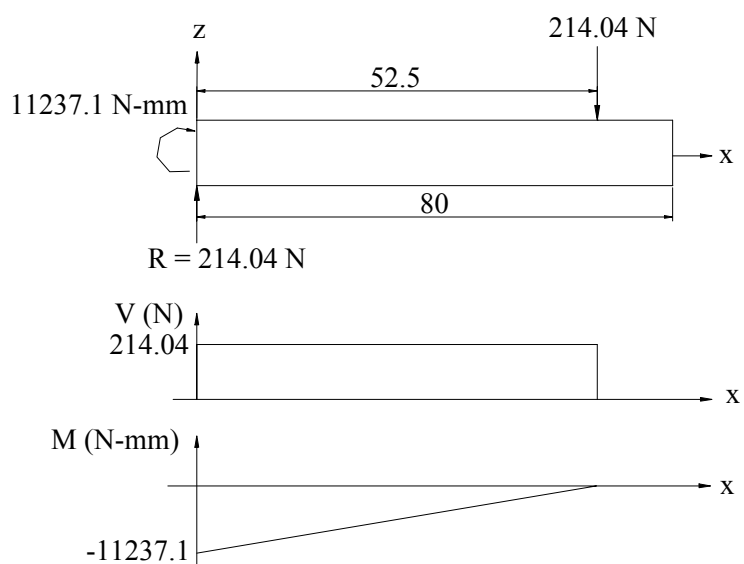


Fig. 2.11. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano  $xz$ , cotas en mm.

En la Fig. 2.10, se presentan los momentos de flexión trasladados a la sección transversal de la viga.

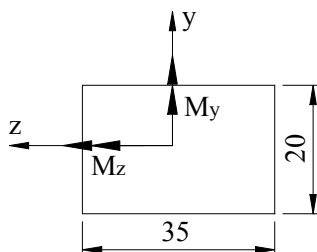


Fig. 2.10. Momentos de flexión, cotas en mm.

El momento de inercia de la sección transversal de la viga (Fig. 2.10), se calcula con la siguiente ecuación.

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \quad (2.3)$$

donde:

I: momento de inercia de la sección

b: base

h: altura

Sí:  $b = 20 \text{ mm}$  (0.79 pulg) y  $h = 35 \text{ mm}$  (1.38 pulg), se tiene:

$$I_y = 71458.3 \text{ mm}^4 \text{ (0.17 pulg}^4\text{)}$$

Sí:  $b = 35 \text{ mm}$  (1.38 pulg) y  $h = 20 \text{ mm}$  (0.79 pulg), se tiene:

$$I_z = 23333.3 \text{ mm}^4 \text{ (0.06 pulg}^4\text{)}$$

$I_{yz} = 0$ , la sección transversal de la viga es simétrica respecto a los dos ejes.

La Ec. 2.5 relaciona los momentos de flexión de la viga (Fig. 2.10) y es conocida como fórmula general de la flexión.

$$\sigma_x = - \left( \frac{M_y I_{yz} + M_z I_y}{I_y I_z - I_{yz}^2} \right) y + \left( \frac{M_z I_{yz} + M_y I_z}{I_y I_z - I_{yz}^2} \right) z \quad (2.4)$$

donde:

$I_y$ : momento de inercia en el eje y

$I_z$ : momento de inercia en el eje z

$I_{yz}$ : producto de inercia

$M_y$ : momento flexionante en el eje y

$M_z$ : momento flexionante en el eje z

y, z: coordenadas

Aplicando la Ec. 2.4, se tiene:

$$\sigma_x = (-0.48 y + 0.26 z) \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (2.5)$$

En la línea neutra los esfuerzos son cero, sustituyendo en la Ec. 2.6, se tiene:

$$z = 1.85 \cdot y$$

$$\theta = \text{tag}^{-1}(0.5405) = 28.4^\circ$$

La Fig. 2.11 presenta la ubicación de la línea neutra.

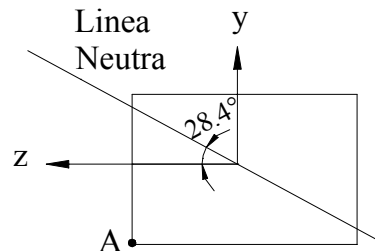


Fig. 2.11. Ubicación de la línea neutra.

Sustituyendo en la Ec. 2.5 las coordenadas del punto A (punto más alejado de la línea neutra en la Fig. 2.13), e igual a -10 mm (0.39 pulg) y z a 17.5 mm (0.69 pulg), se tiene:

$$\sigma_x = 9.35 \text{ MPa} (1.35 \text{ kpsi})$$

Empleando la teoría de la energía de la máxima distorsión (Ec. 2.6), el esfuerzo máximo utilizado en esta teoría se obtiene de la ecuación siguiente.

$$\sigma_{\text{máx}} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.6)$$

donde:

$\sigma_x$ : esfuerzo axial por flexión

$\tau_{xy}$ : esfuerzo cortante por torsión

En la sección transversal de la viga no se produce esfuerzo cortante por torsión, al sustituir en la Ec. 2.7 el esfuerzo axial por flexión, se tiene:

$$\sigma_{\text{máx}} = 9.35 \text{ MPa (1.35 kpsi)}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{\text{máx}}} \quad (2.7)$$

donde:

$\sigma_{\text{máx}}$ : esfuerzo máximo

$S_y$ : resistencia de fluencia

Sustituyendo en la Ec. 2.7 el esfuerzo máximo y el factor de seguridad de 1.5, se tiene:

$$S_y = 14.03 \text{ MPa}$$

El material seleccionado para construir el portamuestras es aluminio ( $S_y = 20$  MPa), ya que es resistente a la corrosión, su peso específico y costo es bajo comparado con materiales que tienen la misma característica. Además, tiene una resistencia de fluencia mayor que el calculado con los esfuerzo de trabajo.

Al sustituir el esfuerzo de fluencia del aluminio en la Ec. 2.7 se obtiene el factor de seguridad recalculado siguiente:

$$n = 2.1$$

El portamuestras debe ser integrado como elemento único un acople que permita la sujeción del portamuestras al eje de transmisión de potencia. En la Fig. 2.12, se presenta la configuración del acople a diseñar y las cargas a la que estará sometido.

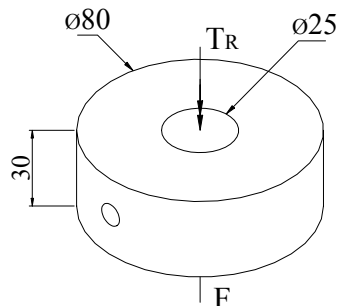


Fig. 2.12. Elemento de acoplamiento del portamuestras, cotas en mm.

El cálculo del esfuerzo cortante por torsión se basa en el análisis de barras circulares huecas. El momento polar de inercia ( $I_p$ ), se obtiene de la Ec. 2.9.

$$I_p = \frac{\pi (d_2^4 - d_1^4)}{32} \quad (2.8)$$

donde:

$d_1$ : diámetro menor de la barra

$d_2$ : diámetro mayor de la barra

Sustituyendo en la Ec. 2.8, se tiene

$$I_p = \frac{\pi (80^4 - 25^4)}{32}$$

$$I_p = 3982889 \text{ mm}^4 (9.57 \text{ pulg}^4)$$

El esfuerzo cortante máximo en la barra se calcula con la ecuación siguiente:

$$\tau_{\max} = T_{pm} \cdot r / I_p \quad (2.9)$$

donde:

$T_{pm}$ : torque resultante generado en el centro del portamuestras

$I_p$ : momento polar de inercia de la sección transversal

$r$ : radio crítico de la sección transversal

Se conoce que  $r$  es igual a 40 mm (1.57 pulg) y  $T_{pm}$  es igual a 10968.4 N·mm (96.8 lb·pulg), al sustituir en la Ec. 2.10, se tiene:

$$\tau_{\max} = 10968.4 (40) / 3982889.1$$

$$\tau_{\max} = 0.11 \text{ MPa} (0.016 \text{ kpsi})$$

El esfuerzo de compresión generado por la carga se determina con la ecuación siguiente:

$$\sigma_x = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

donde:

$A$ : área de compresión

$F$ : fuerza axial

Sustituyendo en la Ec. 2.10, se tiene:

$$\sigma_x = \frac{80}{4535.67}$$

$$\sigma_x = 0.018 \text{ MPa (0.0026 kpsi)}$$

Aplicando la Ec. 2.6, se obtiene el esfuerzo máximo.

$$\sigma_{\text{máx}} = 0.19 \text{ MPa (0.027 kpsi)}$$

El material seleccionado es aluminio, por el motivo que el acople forma un sólo elemento con el disco portamuestras. Al sustituir el esfuerzo de fluencia de éste en la Ec. 2.8 se obtiene el factor de seguridad.

$$n = 105.$$

## 2.6 DISEÑO DEL EJE DEL CABEZAL

La fuerza que transmite la banda trapezoidal es a la que está sometido el eje, esta se obtiene en la polea de menor diámetro anclada a la flecha del motor; conociendo la potencia, la velocidad nominal de éste y aplicando la ecuación potencia es igual a torque por velocidad sobre una constante (63000), se tiene que el torque es de 2068.1 N·mm (18.25 lb·pulg). La fuerza tangencial en la polea motriz, se calcula con la ecuación siguiente:

$$T = F \cdot r \tag{2.11}$$

donde:

F: fuerza tangencial

r: radio de la polea

T: torque del motor

Sustituyendo el radio de la polea 38.1 mm (1.5 pulg) en la Ec. 2.11, se tiene que F es igual a 54.3 N (12.18 pulg). La acción de la fuerza tangencial sobre la polea anclada al eje produce un torque en el centro de éste. A continuación se calcula sustituyendo el radio de dicha polea 127 mm (5 pulg) y la fuerza tangencial en la Ec. 2.12.

$$T = 6896.1 \text{ N·mm (60.87 lb·pulg)}$$

En la Fig. 2.13 se presenta el esquema de distribución de cargas y el diagrama de fuerza cortante y momento flexionante.

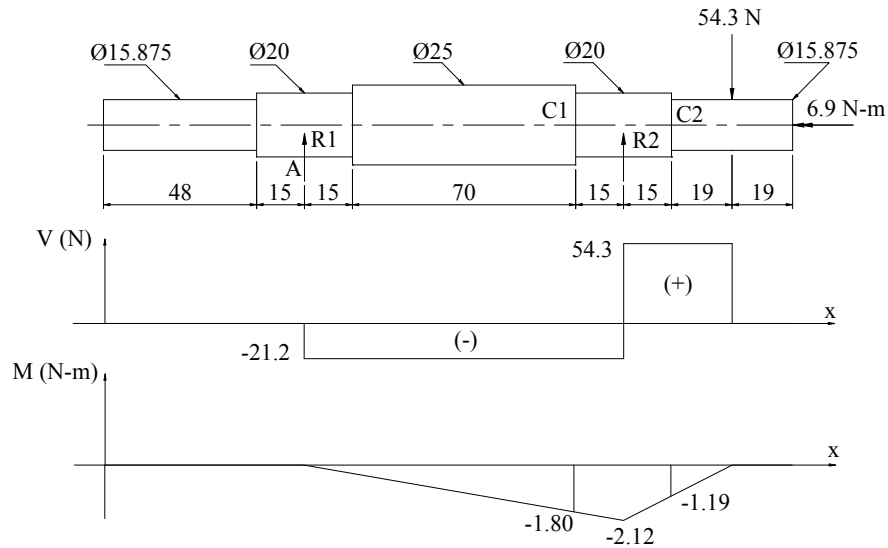


Fig. 2.13. Distribución de carga y diagrama de fuerza cortante y momento flexionante del eje del cabezal, cotas en mm.

$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$R1 + R2 - 54.3 = 0$$

$$\curvearrowright \Sigma M = 0$$

$$0.1(R2) - 0.139(54.3) = 0$$

$$R2 = 75.5 \text{ N (16.93 lb)}$$

Al sustituir en la ecuación obtenida de la sumatoria de fuerzas en y, se tiene:

$$R1 = -21.2 \text{ N (4.75 lb)}$$

El esfuerzo en los concentradores C1, C2 y en la sección de R2, se obtiene por medio de la ecuación siguiente.

$$\sigma_{\text{máx}} = K_t \left( \frac{32 M}{\pi d^3} \right) \quad (2.12)$$



donde:

$K_t$ : factor de concentración de esfuerzo estático

d: diámetro del eje

M: momento flexionante

El radio de muesca en los concentradores C1 y C2 es de 2.5 mm; utilizando la tabla A-15<sup>(1)</sup>, se tiene:

$$K_t = 1.55 \text{ (en C1)}$$

$$K_t = 1.36 \text{ (en C2)}$$

$$K_t = 1.0 \text{ (en R2)}$$

En la Fig. 2.13, se observa la magnitud del momento flexionante en cada sección, empleando el diámetro menor de los concentradores y aplicando la Ec. 2.12, se obtiene:

$$\sigma_{\text{máx}} = 3.55 \text{ MPa (en C1)}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 4.12 \text{ MPa (en C2)}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 2.70 \text{ MPa (en R2)}$$

El análisis se realiza en la sección del concentrador C2, ya que en ésta se produce el máximo esfuerzo. Esta misma sección está sometida al torsor mostrado en la Fig. 2.13, al asumir que el extremo opuesto del eje de donde se encuentra ubicada la carga torsionante (6.9 N·m) está empotrado.

La rotación del eje ocasiona que los momentos estacionarios de flexión y torsión produzcan, un esfuerzo por flexión completamente invertido o alternante (Ec. 2.13) y uno torsional estable o medio (Ec. 2.14).

$$\sigma_{xa} = \frac{32 M_a}{\pi d^3} \quad (2.13)$$

donde:

$M_a$ : momento de flexión estacionario

d: diámetro del eje

---

<sup>(1)</sup>Diagrama de factores de concentración de esfuerzo teórico (Tabla A-15), Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 848.

$$\tau_{xym} = \frac{16 T_m}{\pi d^3} \quad (2.14)$$

donde:

$T_m$ : momento torsión estacionario

$d$ : diámetro del eje

Aplicando la teoría de la energía de la máxima distorsión, los esfuerzos alternante y medio, se obtienen de las Ecs, 2.15 y 2.16, respectivamente.

$$\sigma_a = \sigma_{xa} = \frac{32 M_a}{\pi d^3} \quad (2.15)$$

donde:

$\sigma_{xa}$ : esfuerzo por flexión alternante

$$\sigma_m = \sqrt{3\tau_{xym}} = \sqrt{\frac{48 T_m}{\pi d^3}} \quad (2.16)$$

donde:

$\tau_{xym}$ : esfuerzo por torsión medio

Sustituyendo en las Ecs. 2.15 y 2.16 el diámetro (15.875 mm), el momento de flexión estacionario (momento de flexión en C2) y el momento de torsión estacionario, se tiene:

$$\sigma_a = 3.03 \text{ MPa (0.44 kpsi)}$$

$$\sigma_m = 0.0051 \text{ MPa (0.036 kpsi)}$$

El límite de resistencia a la fatiga corregido, se calcula con la ecuación siguiente:

$$S_n = \frac{S'_n K_a K_b K_c K_d}{K_f} \quad (2.17)$$

donde:

$S'_n$ : resistencia a la fatiga

$K_a$ : factor de superficie

$K_b$ : factor de tamaño

$K_c$ : factor de carga

$K_d$ : factor de temperatura

$K_f$ : factor de concentración de esfuerzos a la fatiga

A continuación se calcula cada uno de los factores de la Ec. 2.17, asumiendo una resistencia última de 400 MPa (57.6 kpsi).

$$S'_n = 0.5 S_{ut}$$

$$S'_n = 200 \text{ Mpa}$$

$K_a = a (S_{ut})^{b(1)}$ ; suponiendo un acabado de superficie maquinado, el valor de  $K_a$  es igual a 0.92

$K_b = (d / 7.62)^{-0.1133}$ ;  $d$  es el diámetro (15.875 mm) del eje en el concentrador de esfuerzos; por lo tanto  $K_b$  es igual a 0.92

$K_c = 0.577^{(2)}$ ; es debido a que el eje está sujeto a carga flexionante y torsionante; siendo la segunda más crítica

$K_d = 1.01^{(3)}$ ; asumiendo que la máquina trabajará en un ambiente que estará a 50 °C.

$$K_f = 1 + q (K_t - 1) \quad (2.18)$$

donde:

$q$ : sensibilidad a la muesca

$K_t$ : factor de concentración de esfuerzo teórico

Recordando el radio de muesca del concentrador, se determina que la sensibilidad<sup>(4)</sup> es de 0.71, anteriormente se determinó  $K_t$ , sustituyendo en la Ec. 2.18 se tiene:

$$K_f = 1.26.$$

Al sustituir en la Ec. 2.18 el valor de cada uno de los factores, se determina el límite de resistencia a la fatiga corregido.

$$S_n = 78.29 \text{ MPa (11.27 kpsi)}$$

---

<sup>(1)</sup>Factor de acabado de superficies (Tabla 7-4), <sup>(2)</sup>Factor de carga, <sup>(3)</sup>Factor de temperatura (Tabla 7-5), <sup>(4)</sup>Diagramas de sensibilidad a la muesca (Fig. 5-16), Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 318, pág. 320, pág. 321, pág. 244, respectivamente.

Aplicando la relación de Goodman modificada (Ec. 2.19) con un factor de seguridad de 1.5, se obtiene la resistencia última.

$$\frac{\sigma_a}{S_n} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (2.19)$$

donde:

$\sigma_a$ : esfuerzo alternante

$\sigma_m$ : esfuerzo medio

$S_n$ : resistencia a la fatiga corregida

$S_{ut}$ : resistencia última

Sustituyendo en la Ec. 2.19, se tiene:

$$S_{ut} = 0.0082 \text{ MPa (0.0012 kpsi)}$$

El acero de más baja resistencia que supera la resistencia última calculada es el AISI 1020, la construcción del eje se realizará con éste, ya que es un material comercializado en el mercado nacional y su precio es bajo comparado con otros aceros. Este tiene una resistencia de fluencia ( $S_y$ ) de 210 MPa (30.24 kpsi) y una resistencia última ( $S_{ut}$ ) de 380 MPa.

Aplicando la resistencia última del acero AISI 1020 y sustituyendo en la Ec. 2.17, el nuevo límite de resistencia a la fatiga corregido es 76.06 MPa (10.95 kpsi). Empleando la Ec. 2.19, se recalcula el factor de seguridad.

$$n = 25.1.$$

## 2.7 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Los rodamientos son fabricados para soportar cargas puramente radiales, axiales o una combinación de ambas. En este caso el rodamiento está sometido a una combinación de cargas.

La ecuación siguiente se utiliza para determinar la carga equivalente.

$$F_e = XVF_r + YF_a \quad (2.20)$$

donde:

$F_r$ : carga radial aplicada

$F_a$ : carga axial aplicada

X: factor radial

Y: factor axial

V: factor de rotación

La fuerza axial aplicada es la que se transmite a las muestras (356.73 N) y la carga radial (15.6 N) es la resultante generada por la fricción entre el papel abrasivo y las muestras en el instante crítico ( $0^\circ$ ).

El factor de rotación corrige las diversas condiciones de rotación; se toma el valor de uno para el caso de giro del aro interior. A continuación se detallan los pasos para la selección de éste.

1. Asumir los factores radial (X)<sup>(1)</sup> y empuje (Y).

X=0.56

Y=1.55

Sustituyendo en la Ec. 2.20; se tiene:

$F_e = 590.74 \text{ N (132.48 lb)}$

2. Cálculo de la carga dinámica.

$$C = F_e \left( \frac{L_d}{1 \times 10^6} \right)^{1/K} \quad (2.21)$$

donde:

$F_e$ : carga radial equivalente

K: factor para el tipo de cojinete (K es igual a 3 para cojinetes de bolas)

$L_d$ : vida requerida de diseño

$$L_d = 60 \cdot n \cdot L_{10} \quad (2.22)$$

donde:

$L_{10}$ : duración nominal

n: velocidad angular

---

<sup>(1)</sup> Factores de carga radial equivalentes para cojinetes de bola (Tabla 11-2), Joseph Edward Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 521.

Se toma un valor de  $L_{10}^{(1)}$  igual a 20000 h, asumiendo que la máquina se diseña para un servicio de 8 h que no siempre se utiliza permanentemente. La velocidad (n) es la establecida en los parámetros de diseños; sustituyendo en la Ec. 2.22, se tiene:

$$L_d = 60 (300) 20000$$

$$L_d = 360 \times 10^6 \text{ horas}$$

Sustituyendo en la Ec. 2.21, se tiene:

$$C = 4194.16 \text{ N (940.59 lb)}$$

### 3. Selección de alternativas de rodamientos y cálculo de la carga estática.

Tomando en cuenta el diámetro del eje 40 mm (1.57 pulg) y la carga dinámica, se procede a seleccionar en base a la carga estática en el catálogo general SKF<sup>(2)</sup>.

$$C_o = 40000 \text{ N (8970.44 lb)}$$

### 4. Cálculo de la relación $F_a/C_o$

$$\frac{F_a}{C_o} = 0.009 \text{ (se utiliza 0.014 si } F_a/C_o < 0.014)$$

### 5. Determinar el valor de $e^{(3)}$ .

De la relación  $F_a/C_o$ , se determina que  $e$  es igual a 0.19

### 6. Análisis de la relación $F_a/F_r^{(3)}$

Si se cumple la desigualdad  $(F_a/F_r) \geq e$ , se asegura el uso de la Ec. 2.20 y permite encontrar un nuevo valor de  $Y$ .

$$Y = 2.30$$

### 7. Análisis del valor de $Y$

---

<sup>(1)</sup>Recomendaciones de duración de cojinetes para diversas clases de maquinaria (Tabla 11-5); Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 524.

<sup>(2)</sup> Catálogo general SKF N<sup>o</sup> 3000 Sp; Diciembre 1975, Pág. 316.

<sup>(3)</sup>Factores de carga radial equivalente para cojinetes de bolas (Tabla 11-2); Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 521.

Como Y resulta ser diferente del asumido, se retorna al paso 1, considerando el nuevo valor de Y. Al realizar nuevamente el procedimiento se selecciona el rodamiento con las siguientes especificaciones.

Marca: SKF

Designación: 51107 X.

## 2.8 DISEÑO DE PERNOS DE SUJECIÓN DE LA CUNA DEL RODAMIENTO

Los pernos sometidos a la carga crítica, son los que sujetan la cuna del rodamiento de bola que soporta la carga axial del eje del cabezal. Esta carga es la máxima aplicada a las muestras 356.75 N (80 lb), cuando la máquina está en funcionamiento, la carga mínima 66.87 N (15 lb) se produce cuando la máquina no está funcionando. En la Fig. 2.14, se presenta una vista en planta de la cuna del rodamiento.

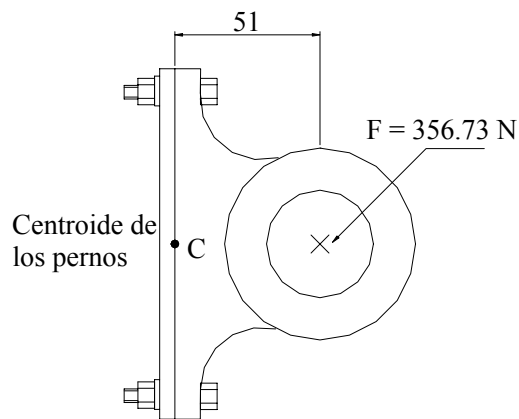


Fig. 2.14. Carga sobre los pernos, cotas en mm.

Las reacciones de fuerza cortante y momento flexionante, máxima y mínima en el centroide del grupo de pernos son:

$$V_{\text{máx}} = 356.73 \text{ N (80 lb)}$$

$$M_{\text{máx}} = 356.73 (0.051) = 18.2 \text{ N}\cdot\text{m (160.69 lb}\cdot\text{pulg)}$$

$$V_{\text{mín}} = 66.87 \text{ N (15 lb)}$$

$$M_{\text{mín}} = 66.87 (0.051) = 3.41 \text{ N}\cdot\text{m (30.11 lb}\cdot\text{pulg)}$$

La acción de los momentos flexionantes sobre los pernos es omitido debido a la magnitud de éstos. Las reacciones cortantes generan la fuerza cortante primaria máxima y mínima, las cuales se calculan con la ecuación siguiente.

$$F' = \frac{V}{n} \quad (2.23)$$

donde:

n: número de pernos

V: fuerza cortante

Sustituyendo el número de pernos (2) y las reacciones cortantes en la Ec. 2.23, se tiene:

$$F'_{\text{máx}} = 178.37 \text{ N (40 lb)}$$

$$F'_{\text{mín}} = 33.44 \text{ N (7.49 lb)}$$

La ecuación siguiente permite calcular los esfuerzos cortante máximo y mínimo en cada perno.

$$\tau = \frac{F'}{A} \quad (2.24)$$

donde:

F' : fuerza cortante primaria

A : área del perno

Utilizando un perno M6 (área igual a  $2.83 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ), al sustituir en la Ec. 2.24, se obtienen los esfuerzos cortantes máximo y mínimo en el perno.

$$\tau_{\text{máx}} = 6.31 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{mín}} = 1.18 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos alternante y medio, se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\tau_a = \frac{\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}}{2} \quad (2.25)$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{\text{máx}} + \tau_{\text{mín}}}{2} \quad (2.26)$$

Al sustituir en las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$\tau_a = 2.57 \text{ MPa (0.37 kpsi)}$$

$$\tau_m = 3.75 \text{ MPa (0.54 kpsi)}$$



Los factores para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga corregido se calculan a continuación, asumiendo una resistencia última de 250 MPa (36 kpsi).

$K_a = a (S_{ut})^{b(1)}$ ; asumiendo un acabado de superficie maquinado,  $K_a$  es igual a 1.0

$K_b = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.1133}$ ;  $d$  es el diámetro (6 mm) del perno, por lo tanto  $K_b$  es igual a 1.0

$K_c = 0.577^{(2)}$ ; el perno está sometido a carga cortante

$K_d = 1.01^{(3)}$ ; se asume que la máquina trabajará en un ambiente a 50 °C (122 °F)

$K_f = 1^{(4)}$ ; no existe concentrador de esfuerzos

Sustituyendo en la Ec. 2.17, se tiene:

$$S_n = 72.84 \text{ MPa ( 10.49 kpsi)}$$

Utilizando un factor de seguridad de 1.5 y sustituyendo en la Ec. 2.19 de la línea de Goodman, se obtiene la resistencia última.

$$S_{ut} = 5.94 \text{ MPa (0.86 kpsi)}$$

La sujeción de la cuna del rodamiento se hace con pernos milimétricos clase 4.6<sup>(5)</sup>, estos presentan la resistencia última más baja de los pernos en general, pero supera en gran manera a la calculada anteriormente, la resistencia última es de 400 MPa (57.9 kpsi). Aplicando la Ec.2.17 se obtiene un nuevo límite de resistencia a la fatiga corregido 107.23 MPa (15.44 kpsi). Al sustituir en la Ec. 2.19 se calcula el factor de seguridad.

$$n = 30.$$

## 2. 9 SELECCIÓN DEL MOTOR DEL CABEZAL

Una representación esquemática del sistema de carga al que están sometido los motores, propicia un buen inicio para seleccionar estos. Por lo anterior, en la Fig. 2.15,

---

<sup>(1)</sup>Factor de acabado de superficies (Tabla 7-4), <sup>(2)</sup>Factor de carga, <sup>(3)</sup>Factor de temperatura (Tabla 7-5), <sup>(4)</sup>Factor de efectos diversos, <sup>(5)</sup>Especificaciones mecánicas métricas para pernos, Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 318, pág. 320, pág. 321, pág. 322, pág. 388, respectivamente.

se representa el sistema de carga de los motores de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas.

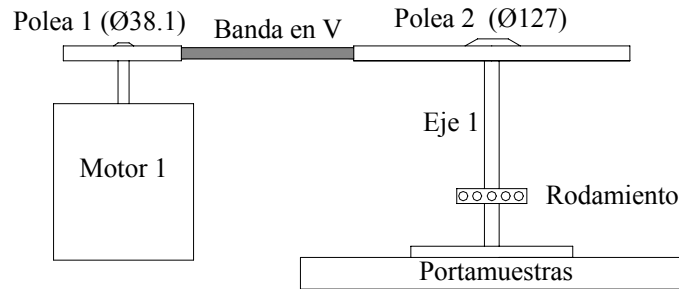


Fig. 2.15. Sistema de carga del cabezal, cotas en mm.

Los parámetros a considerar para la selección del motor son:

- Tiempo de arranque del sistema ( $\Delta t$ ): se requiere que el sistema tarde 3 segundos en arrancar para entrar en funcionamiento normal; es decir, el motor gire a las revoluciones establecidas.
- Velocidad de los motores ( $\omega$ ): la velocidad de estos será variable ya que el motor del cabezal estará conectado a un variador de frecuencia y el motor de la meza a una transmisión por poleas, pero para fines de análisis se toma la velocidad mayor a la que podrá girar cada eje del motor, 1725 rpm el motor del cabezal y 1725 rpm el motor de la mesa. Así, se han destinado estas velocidades tomando en cuenta la velocidad mayor a la que giran algunos motores de las máquinas lijadoras citadas en el capítulo 1.
- Torque de carga ( $T_c$ ): es la carga que actúa sobre el motor, su valor es 11.2 N·m (98.8 lb·pulg)

El torque de arranque del motor ( $T_{am}$ ) se calcula con la ecuación siguiente, la cual se obtiene del sistema de carga del motor.

$$T_{am} = \left( \frac{n}{\eta} \right) T_c + \frac{\left( I_{p1} + I_m + \left( I_{p2} + I_{eje} + I_{pm} \right) \frac{n^2}{\eta} \right) \omega}{\Delta t} \quad (2.27)$$

donde:

$T_c$ : torque de carga

$n$ : relación de velocidades

$\eta$ : eficiencia de la transmisión

$I_{p1}$ : momento de inercia de la polea 1

$I_{p2}$ : momento de inercia de la polea 2

$I_m$ : momento de inercia del motor

$I_{eje}$ : momento de inercia del eje

$I_{pm}$ : momento de inercia del portamuestras

$\Delta t$ : tiempo de arranque del sistema

$\omega$ : velocidad del motor

- Momento de inercia del portamuestras

Cabe considerar que el portamuestras se construirá de aluminio. El cálculo del momento de inercia se realizará con la ecuación siguiente.

$$I = (\pi \cdot e \cdot r^4 \cdot \gamma) / g \quad (2.28)$$

donde:

$e$ : espesor del portamuestras

$r$ : radio del portamuestras

$\gamma$ : peso específico del aluminio<sup>(1)</sup>

$g$ : gravedad, 9.81m/s<sup>2</sup> (386.4 pulg/s<sup>2</sup>)

Sustituyendo en la Ec. 2.28 el radio (80 mm) y el espesor (20 mm). La inercia del portamuestras es:

$$I_{pm} = 6.98 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \text{ (0.06 lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

- Momento de inercia del eje

En esta caso el eje se construirá de acero AISI 1020 y para fines de análisis se considera como una barra sólida de 25 mm (0.98 pulg) de diámetro y 216 mm (8.50

---

<sup>(1)</sup>Pesos específicos y Densidades de masa Tabla H-1, Gere-Timoshenko, Mecánica de materiales Segunda edición, pág. 794.

pulg) de largo. El peso específico del acero ( $\gamma$ )<sup>(1)</sup> se obtiene de tablas, al sustituir en la Ec. 2.28, se tiene:

$$I_{eje} = 1.3 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \quad (1.15 \times 10^{-3} \text{ lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

- Momento de inercia del motor

Este valor es establecido por criterios del diseñador; para este caso se ha considerado un momento de inercia de:

$$I_m = 0.25 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \quad (2.207 \text{ lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

- Momento de inercia de la polea

Cabe destacar que la polea se construirá de aluminio (diámetro igual a 38.1 mm) y se considera como un disco sólido de espesor 12 mm (0.47 pulg). Al sustituir en la Ec. 2.28, se tiene:

$$I_{p1} = 1.33 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \quad (1.18 \times 10^{-4} \text{ lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

Siguiendo el mismo procedimiento, se determina la inercia de la otra polea (Ver Fig. 2.15), teniendo presente que el espesor es igual para ambas poleas, el resultado se presenta a continuación:

$$I_{p2} = 1.66 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \quad (0.015 \text{ lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

El torque de carga ( $T_c$ ) es el que se produce en el centro del portamuestras, la relación de velocidad ( $n$ ) es de 0.3 y considerando una eficiencia ( $\eta$ ) en la transmisión del 95%. Al sustituir en la Ec. 2.27, se tiene:

$$T_{am} = 18.72 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (165.28 \text{ lb}\cdot\text{pulg})$$

Las especificaciones del motor seleccionado se presentan a continuación, las cuales se obtienen de tablas por medio del torque de arranque.

---

<sup>(1)</sup>Pesos específicos y Densidades de masa Tabla H-1, Gere-Timoshenko, Mecánica de materiales Segunda edición, pág. 794.

Tabla 2.1. Especificaciones del motor del cabezal.

Especificaciones	Datos
Torque de arranque	19.82 N·m (175 lb·pulg)
Torque nominal	13.22 N·m (116.7 lb·pulg)
Tensión de accionamiento	230 VAC
rpm	1725
Potencia	0.5 hp

## 2.10 DISEÑO DEL DISCO PORTAPAPEL ABRASIVO

### CÁLCULO DEL TORQUE

Las fuerzas de fricción que producen el torque en el centro del disco portapapel abrasivo son las mismas que se generan en el centro del disco portamuestras (Ver Fig. 2.4), pero en sentido opuesto. Tomando como punto de referencia el centro del disco cada fuerza produce un torque; al igual que en el análisis del portamuestras, la línea que une el punto de aplicación de la fuerza y el centro del disco no es perpendicular a la línea de acción de la fuerza. Por lo tanto, es necesario determinar la componente de la fuerza que es perpendicular a dicha línea.

La componente de la fuerza y la distancia entre la línea de acción de ésta y el centro del disco, se determinan por medios gráficos de la Fig. 2.4. Al sustituir valores en la ecuación siguiente, se obtiene el torque en el centro del disco.

$$T_{pp} = \sum R_{ki} d_i \quad (2.29)$$

donde:

$R_{ki}$  : reacciones producida por las fuerzas de fricción cinética

$d_i$  : distancia entre el centro del disco portapapel abrasivo y el punto donde actúan la componente de la reacción

$$T_{pp} = -0.0675 (26.8) - 0.064 (26.5\cos 3^\circ) - 0.0546 (26.5\cos 8^\circ) - 0.0433 (26.5\cos 8^\circ) - 0.0375 (26.8) - 0.0433 (26.5\cos 8^\circ) - 0.0546 (26.5\cos 8^\circ) - 0.064 (26.5\cos 3^\circ)^{(1)}$$

$$T_{pp} = -11.34 \text{ N} \cdot \text{m} (-100.12 \text{ lb} \cdot \text{pulg})$$

<sup>(1)</sup>Ángulos obtenidos de un dibujo a escala

## SELECCIÓN DEL MATERIAL

El análisis del disco portapapel abrasivo es similar al del portamuestras (sección 2.5), con la diferencia que algunas dimensiones de la viga que se obtiene del portapapel abrasivo (Fig. 2.16) y la ubicación de las fuerzas debido a la excentricidad cambian.

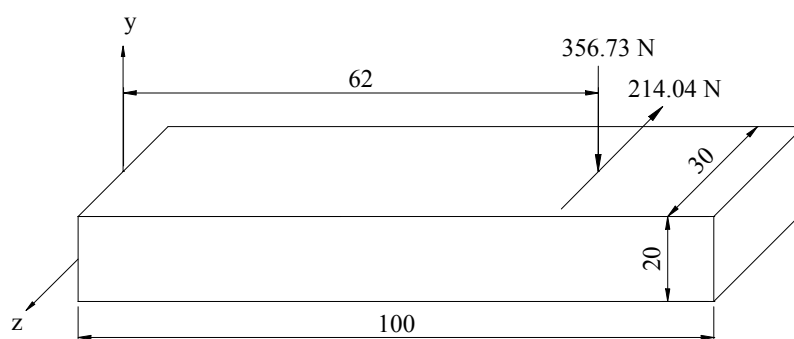


Fig. 2.16. Sección de viga empotrada del disco portapapel abrasivo, cotas en mm.

Los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante debido a las fuerzas, se presentan en las Figs. 2.17 y 2.18.

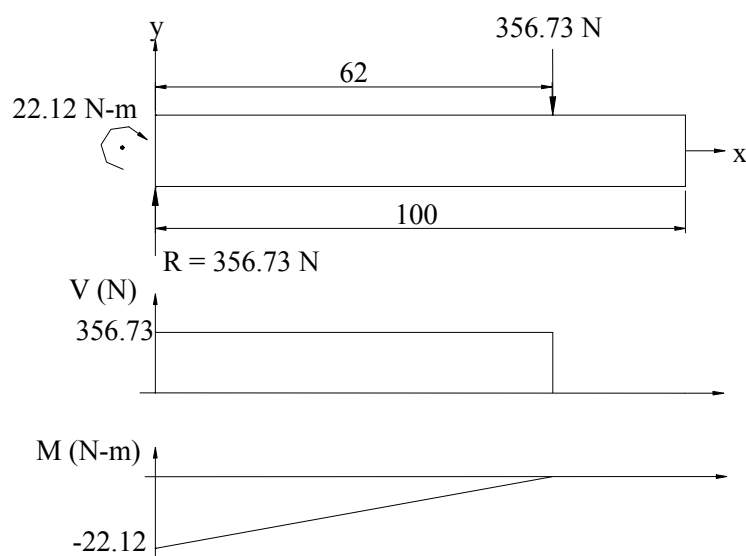


Fig. 2.17. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano xy, cotas en mm.

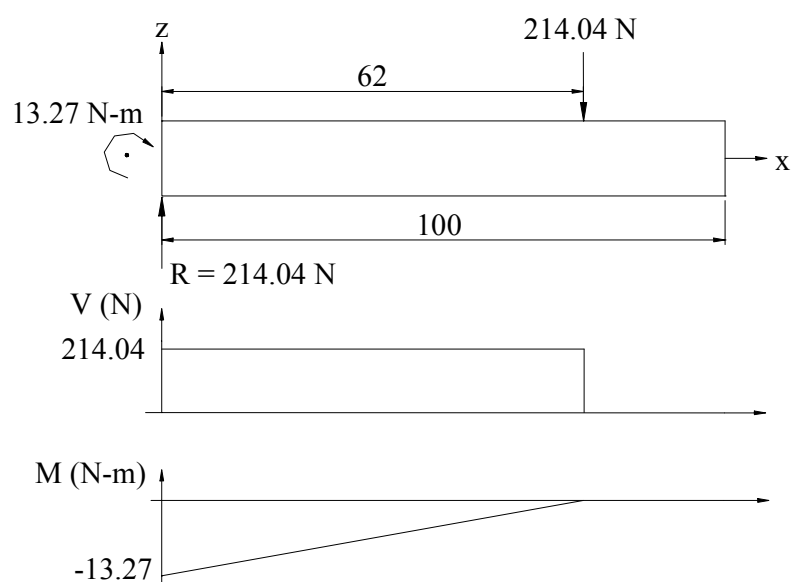


Fig. 2.18. Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante en el plano xz, cotas en mm.

Los momentos flexionantes trasladados a la sección transversal de la viga, se observan en la Fig. 2.10.

Utilizando la Ec. 2.4 y los mismos valores de los momentos de inercia calculados en el diseño del portamuestras (viga con las mismas dimensiones transversales), se tiene:

$$\sigma_x = (0.948 y - 0.186 z) \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (2.30)$$

La posición de la línea neutra se determina con la Ec. 2.30. En la Fig. 2.19 se presenta la ubicación de ésta.

$$y/z = 0.196$$

$$\theta = \text{tag}^{-1}(0.196) = 11.1^\circ$$

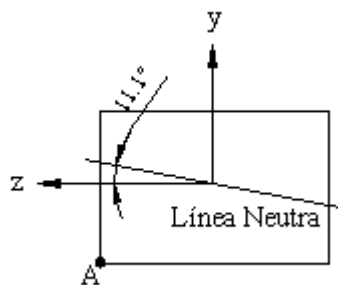


Fig. 2.19. Ubicación de la línea neutra.

En el punto A (y, z) de la Fig. 2.19 se produce el esfuerzo por flexión máximo, el cual tiene las coordenadas (-10 mm, 17.5 mm). Aplicando la Ec. 2.31, se tiene:

$$\sigma_x = -12.74 \text{ MPa} (-1.84 \text{ kpsi})$$

Sustituyendo en la Ec. 2.6 el esfuerzo por flexión, se obtiene el esfuerzo máximo.

$$\sigma_{\text{máx}} = 12.7 \text{ MPa} (1.83 \text{ kpsi})$$

El límite de resistencia de fluencia se obtiene al sustituir en la Ec. 2.7 el esfuerzo máximo y un factor de seguridad de 1.25.

$$S_y = 15.88 \text{ MPa} (2.29 \text{ kpsi})$$

El material seleccionado para construir el portamuestras es aluminio ( $S_y = 20 \text{ MPa}$  (2.88 kpsi)), ya que es resistente a la corrosión, su peso específico y costo es bajo comparado con materiales que tienen la misma característica. Además, tiene una resistencia de fluencia mayor que la calculada con los esfuerzo de trabajo.

Al sustituir la resistencia de fluencia del aluminio en la Ec. 2.7 se recalcula el factor de seguridad.

$$n = 1.26$$

En el disco diseñado anteriormente, tiene que integrarse un elemento que permita el acoplamiento de éste al eje de transmisión. En la Fig. 2.20, presenta el elemento a diseñar y las carga que actúan sobre éste.

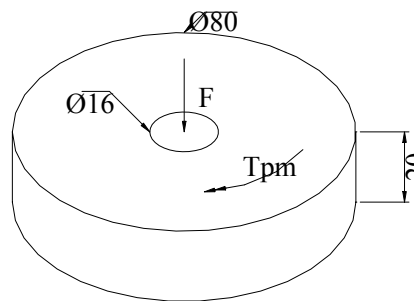


Fig. 2.20 Viga circular hueca, cotas en mm.

En la Fig. 2.20 se observa que la viga está sometida a carga axial y de torsión. Sustituyendo en la Ec. 2.8, se tiene que  $I_p$  es igual a  $4 \times 10^6 \text{ mm}^4$  (9.61 pulg<sup>4</sup>); con r



igual a 40 mm (1.57 pulg),  $T_{pm}$  igual a 11.34 N·m (100.12 lb·pulg) y aplicando la Ec. 2.9 se determina el esfuerzo cortante máximo.

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0.11 \text{ MPa (0.016 kpsi)}$$

El esfuerzo de compresión generado por la carga axial se determina con la Ec. 2.10.

$$\sigma_x = \frac{80}{4825.5}$$

$$\sigma_x = 0.017 \text{ MPa (0.0024 kpsi)}$$

Al sustituir en la Ec. 2.6, el esfuerzo cortante máximo por torsión y el esfuerzo de compresión, se obtiene el esfuerzo máximo

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 0.19 \text{ MPa (0.028 kpsi)}$$

El material seleccionado es el aluminio, por el motivo que el acople forma un sólo elemento con el disco portapapel abrasivo. Al sustituir el esfuerzo de fluencia de éste en la Ec. 2.7 se obtiene un factor de seguridad de:

$$n = 105.$$

### **2.11 DISEÑO DEL EJE DE ACOPLA ( DISCO PORTAMUESTRAS)**

El eje servirá de acople entre el disco portapapel abrasivo y el eje del cabezal. Por estar ensamblado con el disco portamuestras estará sometido al torque que actúa en el centro de éste, al mismo tiempo actuará una fuerza de 15.6 N (3.5 lb) que produce flexión y otra de 356.73 N (80 lb) que origina esfuerzos de compresión.

La Fig. 2.21, presenta la configuración del eje y las cargas a las que está sometido.

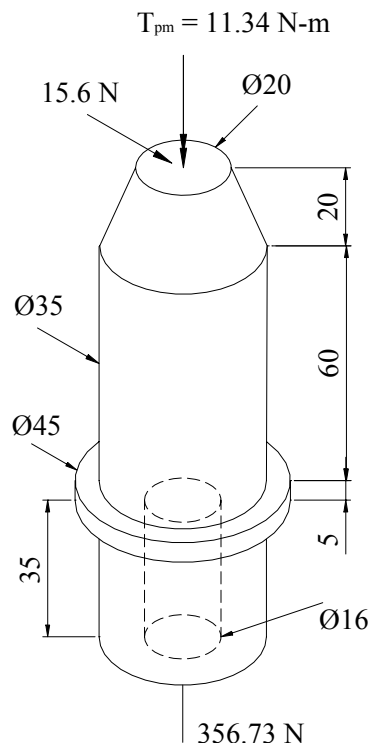


Fig. 2.21. Eje de acople entre el disco portamuestras y el eje del cabezal, cotas en mm.

El torque y la carga que actúa longitudinalmente, producen el esfuerzo medio. A continuación se calcula éste.

En la Fig. 2.21, puede observarse que independientemente de la sección, todo el eje está sometido a la fuerza 356.73 N (80 lb). Por lo tanto, se determina el esfuerzo para el área menor (área del extremo del cono  $314.2 \text{ mm}^2$  ( $0.49 \text{ pulg}^2$ )). El esfuerzo de compresión se calcula con la Ec. 2.10.

$$\sigma_x = 1.14 \text{ MPa (0.16 kpsi)}$$

Los esfuerzos cortantes de torsión son más críticos en una sección hueca que en una sólida. Por lo tanto, el esfuerzo cortante máximo producido por el torsor se calcula en la sección hueca con la Ec. 2.19. Mientras que el momento polar de inercia se obtiene de la Ec. 2.8.

$$I_p = 140889.5 \text{ mm}^4 (0.34 \text{ pulg}^4)$$

$$\tau_{\text{máx}} = 1.43 \text{ MPa (0.21 kpsi)}$$

Sustituyendo en Ec. 2.6 el esfuerzo axial por compresión y el esfuerzo cortante por torsión, se obtiene el esfuerzo medio.

$$\sigma_m = 2.73 \text{ MPa (0.4 kpsi)}$$

El esfuerzo alternante es producido por la carga que actúa transversal al eje. En la Fig. 2.22, se presenta el diagrama de cuerpo libre y de fuerza cortante y momento flexionante del eje.

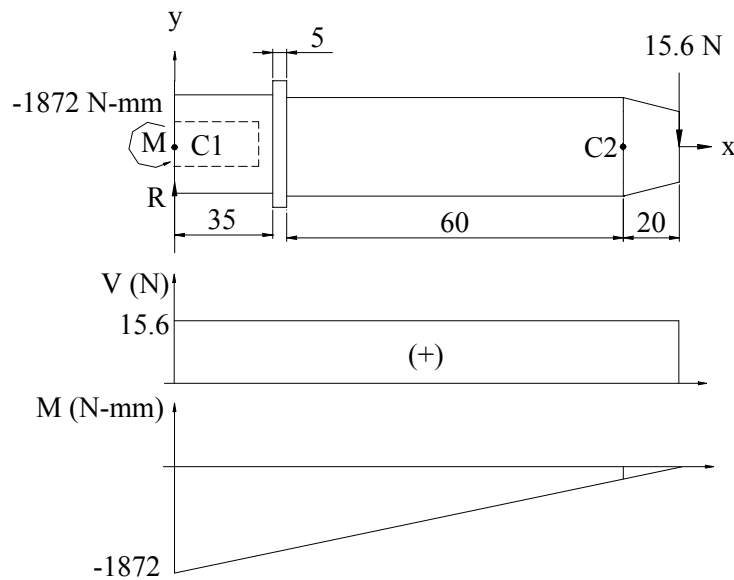


Fig. 2.22. Diagrama de cuerpo libre y de fuerza cortante y momento flexionante del eje, cotas en mm.

$$\curvearrowright \sum M = 0$$

$$M_{C1} - 15.6(120) = 0$$

$$M_{C1} = 1872 \text{ N}\cdot\text{mm (16.53 lb}\cdot\text{pulg)}$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$R - 15.6 = 0$$

$$R = 15.6 \text{ N (3.5 lb)}$$

El esfuerzo nominal<sup>(1)</sup> y el concentrador de esfuerzos ( $K_t$ )<sup>(1)</sup>; en C1, se determina asumiendo que la sección hueca tiene un agujero transversal (a) de 1/16 pulg.

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{32 M_{C1} D}{\pi A (D^4 - d^4)} \quad (2.31)$$

donde:

D : diámetro mayor de la sección hueca

d: diámetro menor de la sección hueca

$M_{C1}$  : momento de flexión en el concentrador 1

A: constante que se obtiene con los diámetros de tabla A-16<sup>(1)</sup>

Interpolando para a/D igual a 0.05 en la Tabla A-16, se obtiene:

$$A = 0.90$$

$$K_t = 2.52$$

Sustituyendo en la Ec. 2.31, se tiene:

$$\sigma_{\text{nom}} = 0.52 \text{ MPa (0.08 kpsi)}$$

Aplicando el factor de concentración de esfuerzos ( $K_t$ ), se obtiene que el esfuerzo máximo en el concentrador es:

$$\sigma_{\text{máx}} = K_t (\sigma_{\text{nom}}) \quad (2.32)$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 1.31 \text{ MPa (0.2 kpsi)}$$

El esfuerzo máximo en el concentrador C1, se considera como esfuerzo alternante.

$$\sigma_a = 0.82 \text{ MPa (0.12 kpsi)}$$

En C1 la sensibilidad<sup>(2)</sup> a la muesca es 1 debido a que no existe radio de muesca,  $K_t$  calculado anteriormente tiene un valor de 2.52. Sustituyendo en la Ec. 2.18, se tiene:

$$K_f = 2.52$$

---

<sup>(1)</sup>Factores de concentradores de esfuerzos para barra circular (Tabla A-16), <sup>(2)</sup>Diagrama de sensibilidad a la muesca para aceros (Figura 5-16), Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, págs. 852, 244, respectivamente.

El límite de resistencia a la fatiga corregido, se calcula con la Ec. 2.17, asumiendo una resistencia última de 400 MPa (57.6 kpsi), se tiene:

$$S_n = 40 \text{ MPa (5.76 kpsi)}$$

El factor de seguridad asignado al eje es 1.5; debido a que por él se transmitirá potencia a velocidades bajas; la resistencia última que se genera de las cargas se calcula con la Ec. 2.19.

$$S_{ut} = 4.23 \text{ MPa (0.61 kpsi)}$$

El material seleccionado para la construcción del eje de acople es el acero AISI 1020, por tener una resistencia última mayor que el que exige la carga, su costo es bajo comparado con otros aceros y es de fácil obtención en el mercado nacional. Sustituyendo en la Ec. 2.19 la resistencia última del acero, se obtiene un factor de seguridad de:

$$n = 36.$$

## **2.12 DISEÑO DEL EJE DE LA MESA**

El análisis para obtener las cargas del eje es similar al realizado en el diseño del eje del cabezal (sección 2.6). Produciendo la misma fuerza y torque, ya que las especificaciones del motor de la polea motriz y las dimensiones de la polea son iguales (ver en la Fig. 2.23); así también la disposición de las cargas, el diagrama de fuerza cortante y momento flexionante del eje.

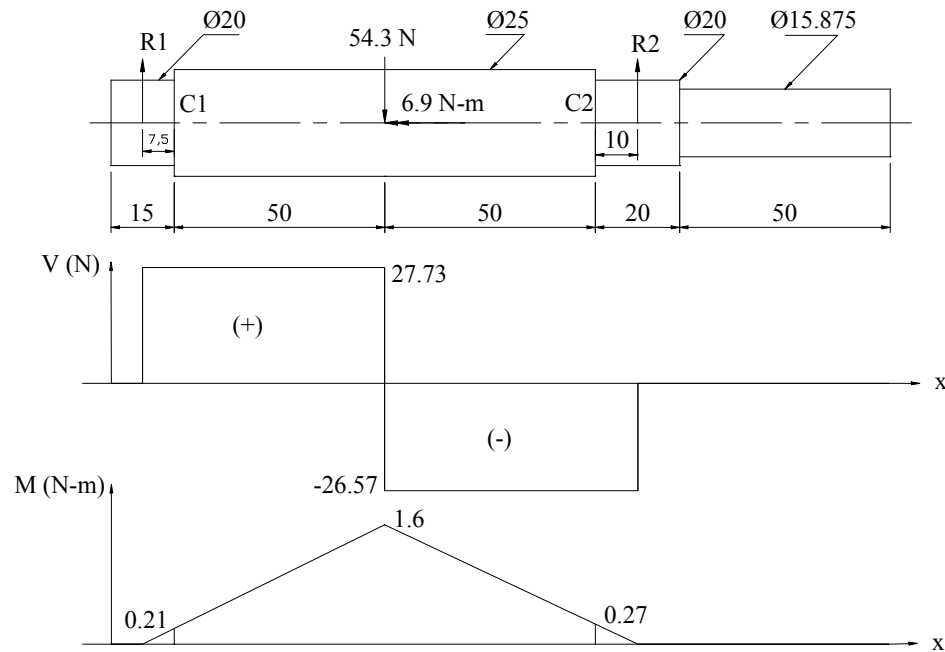


Fig. 2.23 Distribución de carga y diagrama de fuerza cortante y momento flexionante del eje de la mesa, cotas en mm.

$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 - 54.3 = 0$$

$$\curvearrowright \Sigma M = 0$$

$$0.118(R_2) - 0.0575(54.3) = 0$$

$$R_2 = 26.57 \text{ N (5.96 lb)}$$

Sustituyendo en la ecuación obtenida de la sumatoria de fuerzas en y, se tiene:

$$R_1 = 26.57 \text{ N (5.96 lb)}$$

Retomando el procedimiento realizado en el diseño del eje del cabezal (sección 2.6), se determina que los esfuerzos máximos en los concentradores (C1 y C2) y en la sección de aplicación de la fuerza son:

$$\sigma_{\text{máx}} = 0.42 \text{ MPa (0.061 kpsi), en C1}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 0.53 \text{ MPa (0.076 kpsi), en C2}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 1.04 \text{ MPa (0.15 kpsi), en la sección de aplicación de carga.}$$

Los esfuerzos por flexión completamente invertido y torsional estable se calculan en la sección donde se aplica la carga (Fig. 2.23) con las Ecs. 2.13 y 2.14,

respectivamente, esta sección tiene un diámetro de 25 mm (0.98 pulg). Sustituyendo, se obtiene:

$$\sigma_{xa} = 1.04 \text{ MPa (0.15 kpsi)}$$

$$\tau_{xym} = 2.25 \text{ MPa (0.32 kpsi)}$$

Utilizando la teoría de la energía de la máxima distorsión, los esfuerzos alternante y medio, se obtienen de las Ecs, 2.15 y 2.16, respectivamente.

$$\sigma_a = 1.04 \text{ MPa (0.15 kpsi)}$$

$$\sigma_m = 0.003 \text{ MPa (0.0004 kpsi)}$$

Los factores del límite de resistencia a la fatiga calculados en la sección 2.6, mantienen su valor bajo la utilización de los mismos criterios, a excepción de  $K_b$  que cambian debido al diámetro y  $K_f$  a la no existencia de concentrador de esfuerzos en la sección. El valor de  $K_b$  es de 0.87 y el de  $K_f$  es igual a 1. Sustituyendo los factores en la Ec. 2.18, se tiene:

$$S_n = 93.29 \text{ MPa (13.43 kpsi)}$$

Aplicando la Ec. 2.19 con un factor de seguridad de 1.5, se determina la resistencia última.

$$S_{ut} = 0.005 \text{ MPa (0.0007 kpsi)}$$

Al igual que el eje del cabezal, la construcción de éste se hará con acero AISI 1020 por tener una resistencia última mayor a la calculada. A partir de la resistencia última del acero y sustituyendo en la Ec 2.17, el nuevo límite de resistencia a la fatiga corregido es 84.87 MPa (12.22 kpsi). Empleando la Ec. 2.19 se recalcula el factor de seguridad.

$$n = 81.6.$$

### **2.13 SELECCIÓN DEL MOTOR DE LA MESA**

En la figura siguiente se presenta el sistema de carga al que está sometido el motor.

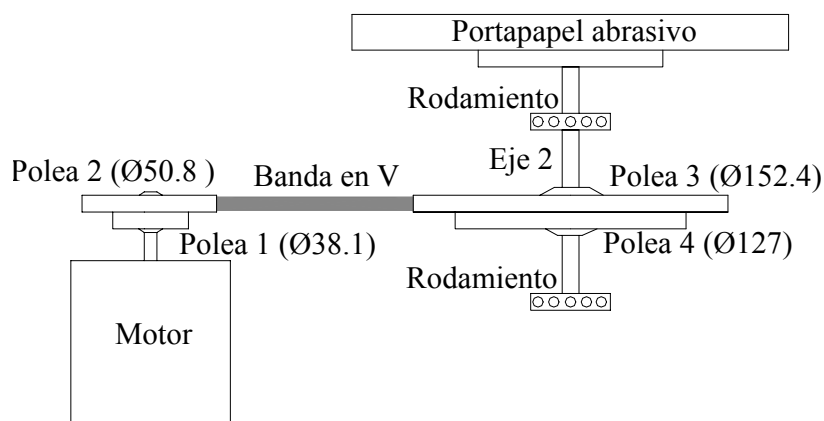


Fig. 2.24. Sistema de carga del motor de la mesa, cotas en mm.

A continuación se calcula el momento de inercia de los elementos de la transmisión.

- Momento de inercia del portapapel abrasivo.

El portapapel abrasivo se construirá de aluminio; teniendo un diámetro de 200 mm (7.9 pulg) y un espesor de 20 mm (0.79 pulg). Sustituyendo  $e$ ,  $r$ ,  $\gamma$  y  $g$  en la Ec. 2.28, se tiene:

$$I_{pp} = 0.017 \text{ N}\cdot\text{mm}\cdot\text{s}^2 \text{ (0.15 lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

- Momento de inercia de las poleas.

Las poleas son de aluminio ( $\gamma$ )<sup>(1)</sup> y todas tienen un espesor ( $e$ ) de 12 mm (0.47 pulg), los radios pueden observarse en la Fig. 2.24. Sustituyendo en la Ec. 2.28, se tiene:

$$I_{P1} = 1.33 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \text{ (1.18} \times 10^{-4} \text{ lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

$$I_{P2} = 4.26 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \text{ (3.76} \times 10^{-4} \text{ lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

$$I_{P3} = 3.45 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \text{ (0.03 lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

$$I_{P4} = 1.66 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \text{ (0.015 lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

- Momento de inercia del eje de la mesa.

El eje se ha considerado para facilitar el cálculo de la inercia, como una barra sólida de 25 mm (0.98 pulg) de diámetro y 185 mm (7.28 pulg) de largo. Este será

<sup>(1)</sup>Pesos específicos y Densidades de masa Tabla H-1, Gere-Timoshenko, Mecánica de materiales Segunda edición, pág. 794.



construido de acero AISI 1020 por su peso específico ( $\gamma$ )<sup>(1)</sup>; así, se obtiene de tablas.

Aplicando la Ec. 2.28, se tiene:

$$I_{eje} = 1.11 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2 \quad (9.83 \times 10^{-4} \text{ lb}\cdot\text{pulg}\cdot\text{s}^2)$$

El torque de carga ( $T_c$ ) es el que se produce en el centro del portapapel abrasivo, la inercia del motor es la misma ocupada en la sección 2.9, la relación de velocidad ( $n$ ) es de 0.33 y considerando una eficiencia ( $\eta$ ) en la transmisión del 95%. Sustituyendo en la Ec. 2.28, se tiene:

$$T_{am} = 19.15 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (169.05 \text{ lb}\cdot\text{pulg})$$

Las especificaciones del motor seleccionado se presentan a continuación, las cuales se obtienen de tablas por medio del torque de arranque.

Tabla 2.2. Especificaciones del motor de la mesa.

Especificaciones	Datos
Torque de arranque	19.82 N · m (175 lb·pulg)
Torque nominal	13.22 N · m (116.7 lb·pulg)
Tensión de accionamiento	120 VAC
rpm	1725
Potencia	05 Hp

## 2.14 SELECCIÓN DE BANDAS

La selección se hace para una banda trapecial o en V por las razones siguientes:

- Permite distancia más cortas entre centros
- Pueden montarse bandas en paralelo en poleas ranuradas

A continuación se detallan los parámetros de diseño para la selección de la banda:

- Diámetros de poleas: considerando el espacio disponible y la relación de velocidades, se tiene:

$$d_m = 38.1 \text{ mm} \quad (1.5 \text{ pulg}), \text{ diámetro de la polea motriz}$$

$$d_i = 127 \text{ mm} \quad (5 \text{ pulg}), \text{ diámetro de la polea impulsada}$$

<sup>(1)</sup> Pesos específicos y Densidades de masa Tabla H-1, Gere-Timoshenko, Mecánica de materiales Segunda edición, pág. 794.

- Distancia entre centros: la restricción de espacio obliga a diseñar con una distancia entre centros de 250 mm (9.84 pulg).
- Velocidad del motor: la velocidad nominal es de 1725 rpm.

En la Fig. 2.24 se puede observarse un esquema de la transmisión que se realiza con la banda. La sección de la banda seleccionada es la A<sup>(1)</sup>, ya que presenta un intervalo de potencia a transmitir muy variable. A continuación se calcula con la Ec. 2.33, la capacidad del motor a instalar para asegurar que la banda no resbale ni se rompa.

$$P = \frac{(F_1 - F_2)V}{550} \quad (2.33)$$

donde:

$F_1$ : fuerza en el lado tenso de la banda

$F_2$ : fuerza en el lado flojo de la banda

$V$ : velocidad tangencial

La fuerza en el lado tenso de la banda se calcula con la Ec. 2.34, mientras que en el lado flojo ( $F_2$ ) se obtiene con la Ec. 2.35.

$$F_1 = S_{ad} A_t \quad (2.34)$$

donde:

$A_t$ : resistencia de la banda

$S_{ad}$ : área de la banda

$$\frac{F_1 - K}{F_2 - K} = e^{\mu\theta} \quad (2.35)$$

donde:

$\mu$ : coeficiente de fricción

$\theta$ : ángulo de contacto

$K$ : precarga

---

<sup>(1)</sup> Secciones de bandas trapeziales (o en V) estándares (Tabla 17-6), Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 760.

El material de la banda es poliamida el cual tiene una resistencia de 83 MPa (11.95 kpsi) y un peso específico de 10884.4 N/m<sup>3</sup> (0.04 lb/pulg<sup>3</sup>). La sección es A con un área de 76.5 mm<sup>2</sup> (0.12 pulg<sup>2</sup>). Aplicando la Ec. 2.34 se tiene:

$$F_1 = 6242.7 \text{ N (1400 lb)}$$

Un esquema a escala de la configuración de las poleas, fue necesario para determinar el ángulo de contacto, teniendo como resultado 2.79 rad. El coeficiente de fricción ( $\mu$ )<sup>(1)</sup> del material de la banda es de 0.5.

La constante K, se obtiene de la siguiente ecuación.

$$K = \gamma V^2 b t / g \quad (2.36)$$

donde:

$\gamma$ : peso específico del material de la banda

V: velocidad tangencial

b: ancho de la banda

t: espesor de la banda

g: gravedad

$$K = 59.13 \text{ N (13.26 lb)}$$

Sustituyendo en la Ec. 2.35, se tiene:

$$F_2 = 1403.4 \text{ N (314.7 lb)}$$

Aplicando la Ec. 2.33, se obtiene:

$$P = 22.3 \text{ hp}$$

La potencia calculada es mayor que la del motor, lo que asegura que la banda no resbala ni falla.

---

<sup>(1)</sup> Propiedades de algunos materiales para bandas (Tabla 17-2), Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica Quinta Edición, pág. 758.

## 2.15 DISEÑO DEL DRENAJE

Esta parte de la máquina, tiene como objetivo recolectar y evacuar el agua utilizada para la refrigeración de las muestras y el papel y remoción de partículas generadas durante el proceso de lijado.

La recolección del agua se realizará mediante cilindros concéntricos y la evacuación por medio de manguera hacia la parte posterior de la máquina. En la Fig. 2.25 se presenta la disposición de los cilindros.

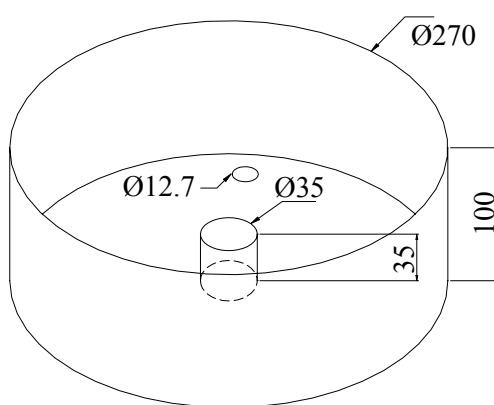


Fig. 2.25. Estructura para el drenaje del agua, cotas en mm.

Las consideraciones para llevar a cabo el diseño son:

- Este elemento debe tener la suficiente capacidad (volumen) para retener y evacuar el agua.
- El material con el que será fabricado debe tener buena resistencia a la corrosión.

El diámetro del cilindro mayor depende principalmente del diámetro del porta papel abrasivo (200 mm (7.87 pulg)). Por lo tanto; para lograr una separación de 35 mm (1.38 pulg) entre el perímetro interno del cilindro mayor y el perímetro del porta papel abrasivo, el diámetro del cilindro se estableció de 270 mm (10.63 pulg). Mientras que la altura se estableció de 100 mm (3.94 pulg), tomando en cuenta que el agua será evacuada constantemente.

El diámetro del cilindro menor y su altura; se fijo mediante el supuesto que se obstruye el agujero de evacuación y se obliga a la recolección de cierta cantidad de agua,

llegando con esto, a la conclusión que se requiere un diámetro de 40 mm (1.57 pulg) y una altura igual a 25 mm, para recolectar una cantidad de agua de más de 3 litros.

El diámetro del agujero de evacuación será de 12.7 mm (0.5 pulg), para impedir cualquier obstrucción del drenaje.

## **2.16 DISEÑO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LAS MUESTRAS Y LIMPIEZA DEL PAPEL ABRASIVO**

El sistema tiene como propósito, evacuar el calor y las partículas (residuos del papel abrasivo) que se originan durante el proceso de lijado. Los parámetros a tomar en cuenta para el diseño del sistema de refrigeración son:

- Que el flujo de refrigerante (agua) sea variable, para tener control de la evacuación de calor y la limpieza de partículas.
- La parte del sistema (un ducto) que proporcionará el refrigerante entre las muestras y el papel abrasivo, no permita ningún grado de libertad.
- Que el sistema permita la alimentación de refrigerante sin ningún problema.

## **2.17 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA**

Es un conjunto de partes que acoplados entre sí, representa la base sobre la cual son ensamblados los demás elementos que forman la máquina, dando a esta una figura estética y protege al usuario de cualquier riesgo a que se exponga cuando este en funcionamiento. En la Fig. 2.26, se presenta la estructura.

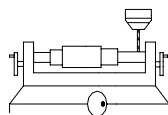


Fig. 2.26. Estructura de la máquina semiautomática  
Para el lijado de muestras metalográficas planas.

### 2.18 DISEÑO DEL DISCO PARA ALINEAR MUESTRAS

La función de este elemento es asegurar que la parte saliente de las muestras sobre el disco que las contiene sea la misma para todas, con el objetivo que la carga sea aplicada sobre toda la superficie de las muestras.

Este elemento no está sometido a ninguna carga que influya en su diseño. Los parámetros a considerar para dimensionarlo son: características del disco portamuestras y longitud que se requiere que sobresalga la muestra 3 mm (0.079 pulg) de la superficie del mismo. La Fig. 2.27, presenta el dimensionamiento del disco.

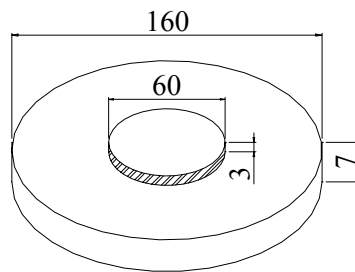


Fig. 2.43. Disco alineador de muestras, cotas en mm.

Este elemento se construirá de aluminio, ya que es un material que presenta buena resistencia a la corrosión, se maquina sin problema y el costo es bajo respecto a otros materiales que presentan las mismas características.

### 2.19 DISEÑO DEL CIRCUITO NEUMÁTICO

El circuito (Fig. 2.28) debe ser capaz de ejecutar las siguientes funciones.

- Mantener la carga constante sobre las muestras por medio de un cilindro neumático.
- Regula la velocidad de extensión del cilindro neumático.
- Ajustar la carga por medio de un regulador de presiones.
- Transmitir señales al circuito de control.

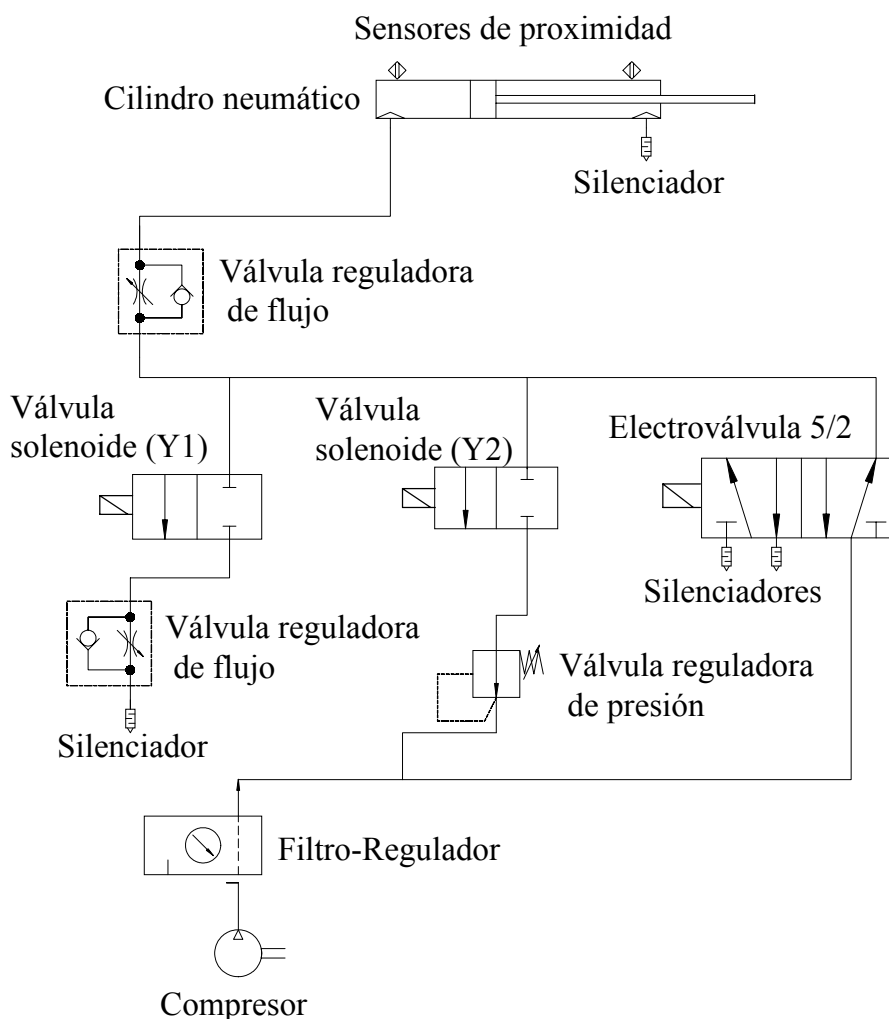


Fig. 2. 28. Circuito neumático de la máquina semiautomática para el lijado De muestras metalográficas.

## FUNCIONAMIENTO

La Fig. 2.28 presenta las condiciones iniciales del circuito, en este instante llega aire comprimido a la cámara del cilindro con área mayor (**VS1** abierta, **VS2** cerrada). Al recibir señal eléctrica de parte del circuito de control a la bobina **Y2**, se acciona la electroválvula generando que la alimentación de aire comprimido llegue a la cámara del lado del vástago (**VS1** cerrada, **VS2** abierta). El circuito permanece en éstas condiciones hasta se desenergizo la bobina **Y2**; es decir, hasta que el tiempo de lijado programado en el circuito de control se cumpla y por ende el cilindro regresa a su posición inicial (extendida).

## 2.20 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL

Un sistema de control es una interconexión de componentes que proporciona una respuesta deseada del mismo sistema.

Los objetivos a alcanzar con el sistema de control (Fig. 2.29) de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas son:

- Ajustar y controlar el tiempo que la carga actúa sobre las muestras durante el proceso de lijado.
- Que la máquina realice un ciclo único; una vez pulsada la marcha, el sistema entra en funcionamiento y realiza el proceso de lijado una sola vez.
- Que el proceso de lijado pueda ser interrumpido en cualquier instante de tiempo, por medio de un paro de emergencia.

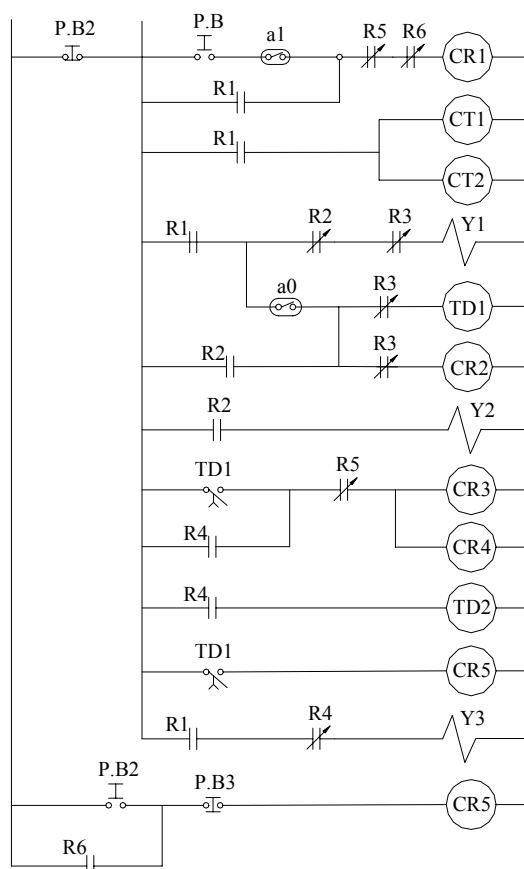


Fig. 2.29. Circuito de control de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas.



### **Funcionamiento**

Para comenzar la operación de trabajo de la máquina lijadora, es necesario que el cilindro se encuentre extendido, lo que se logra con la apertura de la válvula del compresor que suministra el aire y conectando la energía eléctrica, que energiza inmediatamente la válvula solenoide **V1** que permite el paso del fluido.

Oprimiendo el interruptor **PB1** ( pulsador) se envía un pulso de corriente que pasa por el contacto **a<sub>1</sub>** que energiza la bobina **CR1**, logrando con esto que comiencen a trabajar los motores y retrayendo el cilindro completamente para comenzar el trabajo de lijado.

Cuando el cilindro se encuentra en la posición de retracción éste conmuta el contacto **a<sub>0</sub>**, el que permite el paso de corriente por el contacto **R4** que energiza el contador para el tiempo de lijado por medio de **TD1** y a la vez conmuta la bobina **CR2** que cierra la válvula **V1** y abre la válvula **V2**.

Cuando se conmuta el contador **TD1** y este llega al tiempo pre-establecido este permite el paso por su contacto auxiliar **TD1** el cual deja pasar corriente por el contacto **R4** normalmente cerrado energizando la bobina **CR3**.

Esta bobina hace que le llegue corriente a un segundo contador que gobierna la bobina **CR4** que es la que para todo el sistema después de haber realizado el trabajo de lijado.

## **2.21 SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS**

La mayor parte de los dispositivos eléctricos a seleccionar se observan en el circuito de control (Fig. 2.29). En las secciones siguientes se detallan las características y especificaciones de éstos.

### **2.21.1 PULSADORES**

La máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas utilizará tres pulsadores. El primero con accionamiento con un contacto normalmente abierto para hacer funcionar la máquina, el segundo, que es al paro de emergencia con dos contactos, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado y el tercero, que es el botón para restaurar el sistema y que vuelva a funcionar la máquina. La Tabla 2.3, detalla características de los pulsadores seleccionados.

Tabla 2.3. Características técnicas de pulsadores.

Pulsadores	Catálogo	I (A)	Serie	Contactos
PB1	SIEMENS	10	IEC 947-5-1	1 NO
PB2	SIEMENS	10	IEC 947-5-1	1 NO, 1 NC
PB3	SIEMENS	10	IEC 947-5-1	1 NO

### 2.21.2 RELÉS

En el circuito de control (Fig.2.29) puede observarse que la máquina requiere de cinco relé para el funcionamiento previsto. Estos deben tener el siguiente juego de contactos, Ver Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Requerimiento de contactos en los relés del circuito de control.

Relé	Contactos (NO)*	Contactos (NC)**	Número de contactos
CR1	2	1	3
CR2	1	2	3
CR3	0	2	2
CR4	1	1	2
CR5	1	1	2

\*NO, Normalmente Abierto

\*\*NC, Normalmente Cerrado

Para seleccionar los relés se requiere además del número de contactos, los siguientes parámetros.

- Accionamiento con corriente alterna (AC)
- Corriente de servicio en los contactos, mayor de 5 A
- Tensión de accionamiento, 110 V

La Tabla 2.5 presentan la especificaciones de los relés seleccionados.

Tabla 2.5. Especificaciones de relés.

Relé	Catálogo	Serie	Tensión de accionamiento	Corriente en contactos
CR1 CR2	Radio shack RSU 12131306	JQX-53FF	120 V	10 A
CR3 CR4	Radio shack RSU 12131264	JQX-53FF	120 V	10 A

### 2.21.3 RELÉS TEMPORIZADORES

Son elementos que conmutan y controlan con poca energía; por tal motivo, son utilizados en muchos sistemas de control. Tienen como propósito fundamental conmutar o desconmutar los contactos después de un tiempo determinado y ajustable, a partir de la energización de la bobina.

La máquina requiere 1 relé temporizador para controlar el tiempo de lijado, con retardo en la conexión.

Los requerimientos necesarios para seleccionar el relé se detalla a continuación.

- Accionamiento con corriente alterna (AC)
- Tensión de accionamiento, 120 V
- Corriente nominal de servicio, mayor de 1 A
- Rango de ajuste de tiempo, 120 a 600 s

El número de contactos es otra característica a tomar en consideración para seleccionar el relé; como se observa en el circuito de control se requiere de un contacto normalmente abierto. La Tabla 2.6 detalla las especificaciones del relé.

Tabla 2.6. Especificaciones del relé temporizador.

Especificaciones	Relé
	Retardo en la conexión
Catálogo	SIEMENS
Serie	7PU20 40
Número de pedido	7PU20 40-3B H3
Corriente en contactos	2 A
Tensión de accionamiento	110 – 120 V
Frecuencia	50 / 60 Hz
Intervalo de tiempo	36 –3600 s
Número de contactos	1

### 2.22 SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS NEUMÁTICOS

La Fig. 2.28 presenta los dispositivos neumáticos a seleccionar.

### 2.22.1 SELECCIÓN DEL CILINDRO

El parámetro más crítico para realizar la selección de un cilindro, es la carga que transmite a través del vástago. El requisito de carga en la carrera mas crítica (extensión) para este es de 216.3 N (48.5 lb). La tabla 2.7 presenta los parámetros para determinar la ubicación del centro de masa de la parte superior de la máquina, que es el punto de aplicación de la carga.

Tabla 2.7 Parámetros para determinar la ubicación del centro de masa.

Elemento	Nombre	Masa ( $m_i$ ), kgm	$X_i$ , mm	$\sum m_i * X_i$
1	Portamuestras	0.80	378.7	302.96
2	Eje de acople	1.27	378.7	480.95
3	Rodamiento5	1.36	378.7	515.03
4	Motor	8.92	109.2	974.06
A	Polea	0.26	378.7	98.46
B	Polea	0.16	109.2	17.47
C	Guía	0.30	62.7	18.81
--	Otros	--	--	4660.04

$$X \sum m_i = \sum m_i X_i \quad (2.37)$$

donde:

$m$ : masa del elemento

$X$ : distancia sobre el eje X de referencia al centro de masa del elemento

$$X (43.21) = 7067.78$$

$$X = 163.57 \text{ mm (6.44 pulg)}$$

Otros parámetros que se utilizan para la selección se detallan a continuación:

- Presión del sistema: cuando el medio de trabajo es aire comprimido, la presión no debe de exceder de 0.6 MPa (0.082 kpsi).
- Estilo de montaje. De acuerdo a la forma de aplicar la carga, el montaje a utilizar debe ser el fijo en línea central.
- Tipo de cilindro: el movimiento del vástago debe ser controlado en dos sentidos, el cilindro que proporciona esta condición es el de doble efecto, con una cabeza saliente del vástago roscada y con embolo magnético.

- Carrera del cilindro: este parámetro no es de gran relevancia, ya que la carrera puede ser adaptada a las condiciones de operación de la máquina.

A partir de éstos parámetros y consultando catálogos de marcas reconocidas; se selecciona un cilindro con las siguientes especificaciones (Tabla 2.8).

Tabla 2.8. Especificaciones del cilindro neumático.

Descripción	Especificación
Catálogo	SMC
Serie	CD85N25-125C-B
Modelo	FSIT56339
Máxima presión de operación	147 1.0 MPa (psi)
Velocidad del vástago	2 – 29.5 pulg / s (50 – 750 mm / s)
Fuerza de empuje	491 N (110 lb)
Diámetro del vástago	10 mm (0.40 pulg)
Diámetro del embolo	25 mm (0.98 pulg)
Área efectiva	412.3 mm (16.23 pulg)
Diámetro de puertos	6.35 mm UNF (1/4 pulg)
Carrera	127 mm (5 pulg)
Tolerancia de la carrera	±1.0 mm (±0.04 pulg)

### 2.22.2 SELECCIÓN DE ELECTROVÁLVULA

Las razones principales para seleccionar la válvula direccional son: mantener el control de la extensión y retracción del cilindro por medio de una señal, que sea capaz de manejar el flujo del sistema.

Los requerimientos para seleccionar éste dispositivo son:

- Que este provista de 5 salidas y 2 posiciones, conocida comúnmente como 5/2
- Accionamiento con solenoide y retorno por resorte
- Voltaje de accionamiento de 120 AC

De acuerdo con la información proporcionada y con la comparación de catálogos, se selecciona una válvula con las siguientes especificaciones (Tabla 2.9).

Tabla 2.9. Especificaciones de la electroválvula.

Descripción	Especificación
Catálogo	SMC
Serie	VFR
Modelo	2100
Tipo	2110
Máxima presión de operación	0.9 MPa (130 psi)
Mínima presión de operación	0.2 MPa (29 psi)
Lubricación	No requiere
Voltaje de accionamiento	110 VAC
Tiempo de respuesta	15 ms
Diámetro de puertos	1/4 pulg (6.35 mm)
Coefficiente de variación de flujo (CV)	1.8

### 2.22.3 SELECCIÓN DE VÁLVULA REGULADORA DE FLUJO

Controla la velocidad del embolo del cilindro, ya sea la extensión o retracción de éste, el control se hace mediante el estrangulamiento del flujo. En la Tabla 2.10, se presentan las especificaciones técnicas de la válvula seleccionada.

Tabla 2.10 Especificaciones de la válvula reguladora de flujo.

Descripción	Especificación
Catálogo	SMC
Serie	(N)AS
Modelo	3001F
Presión máxima de operación	0.7 MPa (100 psi)
Presión mínima de operación	0.1 MPa (14.5 psi)
Tipo de regulación	Manual
Diámetro de acoplamiento	6.35 mm (1/4 pulg)

### 2.22.4 SELECCIÓN DEL FILTRO-REGULADOR (F-R)

Para seleccionar este elemento debe considerarse lo siguiente:

- El medio de transmisión de potencia (aire comprimido).
- Presión a regular en el sistema.

Para realizar la selección de forma adecuada es necesario calcular el flujo y la presión a utilizar en el sistema. A continuación se calculan éstos parámetros.

En primer lugar resulta necesario definir la velocidad de desplazamiento del cilindro. En general para gobernar la velocidad de éste sólo se manipula el caudal. Para lograr la regulación de la velocidad de desplazamiento de un cilindro pueden emplearse prácticamente tres métodos:

- Ajuste del caudal de alimentación
- Ajuste del caudal de escape
- Ajuste de la presión de escape

El método más utilizado es regular el caudal de escape; ya que provoca un desplazamiento del cilindro más suave, lo único que hace es retener el aire de la cámara.

La velocidad media del embolo en los cilindros puede variar entre 0.05 a 1.5 m/s (1.97 a 59.1 pulg/s). Con esto se establece que la velocidad de retracción ( $V_R$ ) del embolo del cilindro en la máquina es 50.8 mm/s (2 pulg/s) y la de extensión ( $V_E$ ) 127 mm/s (5 pulg/s). El cilindro que cumple con estas velocidades; se detallan sus especificaciones en la Tabla 2.6.

Calculando los caudales de aire comprimido que requiere el cilindro para realizar la retracción y extensión del embolo, se tiene:

#### **Caudal de retracción**

$$Q_R = A V_R \quad (2.38)$$

donde:

A: área efectiva (área del embolo menos la del vástago)

$V_R$ : velocidad de retracción del embolo

Sustituyendo en la Ec. 2.36, se tiene:

$$Q_R = 1.46 (2)$$

$$Q_R = 2.92 \text{ pulg}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

#### **Caudal de extensión**

$$Q_E = A V_E \quad (2.39)$$

donde:

A: área del embolo (Ver las especificaciones del cilindro)

$V_e$ : velocidad de extensión del embolo

Sustituyendo en la Ec. 2.39, se tiene

$$Q_E = 1.77 \text{ (5)}$$

$$Q_E = 8.85 \text{ pulg}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

La presión que requiere el sistema para retraer el vástago y ejercer una fuerza de 356.7 N (80 lb) se calcula a continuación:

$$P_R = F / \text{Área efectiva} = 80 / 1.46$$

$$P_R = 0.38 \text{ MPa (0.055 kpsi)}$$

El sistema será alimentado con una presión de 4 bar (58.8 psi). La caída de presión entre la alimentación y el puerto del cilindro para retraer el embolo es de 0.03 MPa (0.0044 kpsi); por lo tanto el caudal que permite la válvula direccional se determina con la siguiente ecuación

$$Q = C_V (\Delta P (P + 1 - \Delta P))^{1/2} (6.844) \text{ (dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.40)$$

donde:

$C_V$ : coeficiente de variación de caudal de la válvula direccional

$\Delta P$ : caída de presión

$P$ : presión de alimentación relativa

Sustituyendo en la Ec. 2.40, se tiene:

$$Q = 1.8 (0.31 (3 + 1 - 0.31))^{1/2} (6.844)$$

$$Q = 1443.8 \text{ pulg}^3 \cdot \text{s}^{-1} (23.66 \text{ dm}^3/\text{s})$$

El caudal ideal que requiere el sistema, se calcula con la ecuación siguiente.

$$Q_n = Q_w (P_w / P_n) \quad (2.41)$$

donde:

$Q_w$ : caudal de trabajo

$P_w$ : presión atmosférica

$P_n$ : presión que se requiere en el sistema



Sustituyendo en la Ec.2.41, se tiene:

$$Q_n = 3.14 \text{ pulg}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

En la Tabla 2.11, se presentan las especificaciones técnicas del F-R seleccionado.

Tabla 2.11. Especificaciones de filtro-regulador (F-R).

Descripción	Especificación
Catálogo	SMC
Serie	(N)AC
Modelo	NAW2000
Máxima presión de operación	1 MPa (145 psi)
Intervalo de regulación	0.05 – 0.85 MPa (8 – 125 psi)
Flujo máximo proporcionado	500 l N / min
Filtración	Partículas de 5 $\mu\text{m}$
Diámetro de los puertos	6.35 mm (1/4 pulg)

### 2.22.5 SELECCIÓN DE MANGUERA

La restricción principal para seleccionar la manguera, es el diámetro de los puertos de él o los elementos a ser conectados, así como la resistencia que está presenta a la presión del sistema.

Con las características antes mencionadas, las especificaciones del tipo de manguera a utilizar, se detallan en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Especificaciones de manguera.

Descripción	Especificación
Catálogo	SMC
Serie	TS
Modelo	0604
Diámetro exterior	6.35 mm (1/4 pulg)
Diámetro interior	4 mm (0.16 pulg)
Presión máxima de operación	0.8 MPa (116 psi)
Temperatura de operación	- 20 a 60 °C
Material	Nylon 12

### 2.22.6 SELECCIÓN DE RACORES

Los racores son los que se colocan en los puertos de entrada-salida de los elementos del sistema de mando con el fin de hacer efectiva las uniones entre estos; por tanto la única característica a cumplir es tener un diámetro igual al que se está utilizando para los elementos que componen el sistema de mando.

En la Tabla 2.13, se presentan las características de los racores seleccionados.

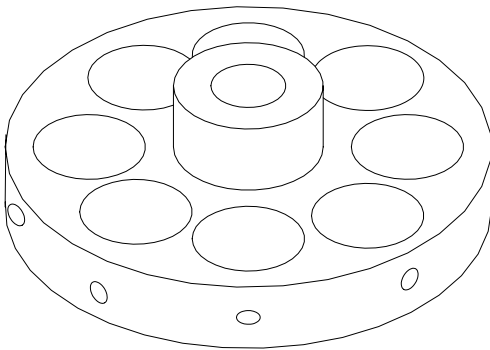
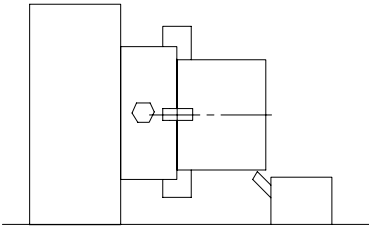
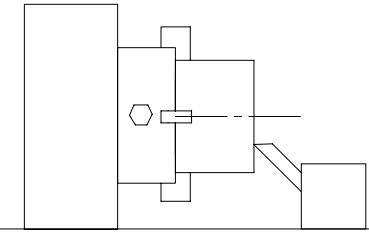
Tabla 2.13. Especificaciones de racores.

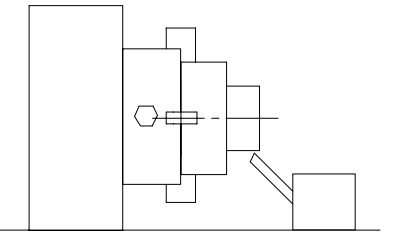
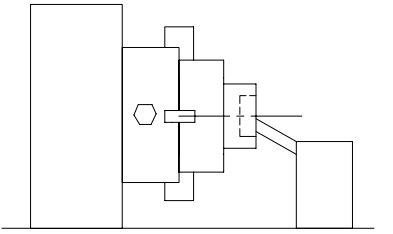
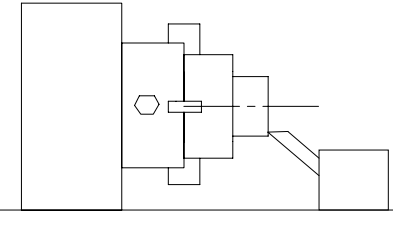
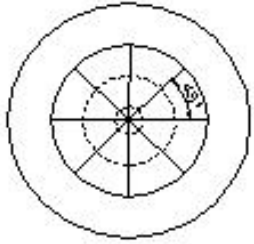
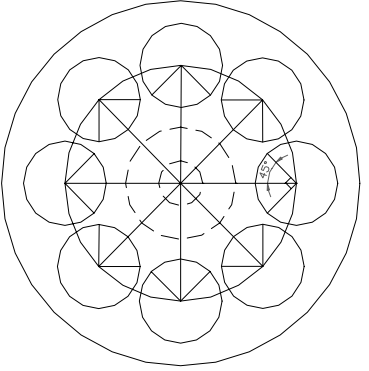
Descripción	Especificación
Catalogo	SMC
Serie	KQ2
Modelos	KQH06-U03
Presión máxima de operación	0.1 MPa (145 psi)
Temperatura de operación	0 a 60 °C
Tubo aplicable	6.35 mm (1/4 pulg)
Rosca	6.35 mm (1/4 pulg)
Peso	25 g

### 3. ESTUDIO TÉCNICO

Esta etapa del trabajo tiene como objetivo establecer el proceso técnico sobre el cual se construirá cada uno de los dispositivos diseñados que integran la máquina. En las Tablas 3.1 a 3.8 se presentan las hojas de proceso, las cuales indican las principales etapas de cada proceso, con el fin de que pueda ser construida o reconstruida.

Tabla 3.1. Hoja de proceso de mecanizado del disco portamuestras.

Hoja de proceso # 1		Plano # 2	Nº de piezas: 1
Nombre del elemento: Disco portamuestras	Material: Aluminio 6061	Dimensiones en bruto: Ø165X60 mm (Ø6.5X2.36 pulg)	
			
Etapa Nº	Denominación de la etapa	Esquema	Maquinaria y/o Herramienta
01	Cilindrar a un diámetro de 130 mm (5.12 pulg)		1. Fresadora 2. Fresa
02	Refrentar		1. Torno 2. Buril

03	Cilindrar a un diámetro de 40X20 mm (1.57X0.79 pulg)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Torno</li> <li>2. Buril</li> </ol>
04	Perforar en el centro del diámetro de 40 mm (1.57 pulg) un agujero de Ø16X20 mm (0.63X0.79 pulg)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Torno</li> <li>2. Buril</li> </ol>
05	Refrentar		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Torno</li> <li>2. Buril</li> </ol>
06	Trazar en el Ø130 mm (5.12 pulg) un círculo de 52.5 mm (2.07 pulg) de radio, dividir el círculo en 8 partes (45°) y trazar líneas.		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calibrador</li> <li>2. Goniómetro</li> <li>3. Compás</li> <li>4. Marcador</li> </ol>
07	Con centro en los puntos de intersección entre el círculo y las líneas, trazar círculos de 16 mm de radio . Luego trazar 2 líneas a 45° con referencia en el centro del círculo de 16 mm y hacia el centro del Ø130 mm (5.12 pulg).		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calibrador</li> <li>2. Goniómetro</li> <li>3. Compás</li> <li>4. Marcador</li> </ol>

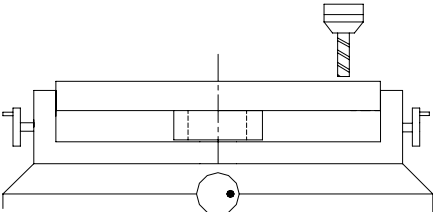
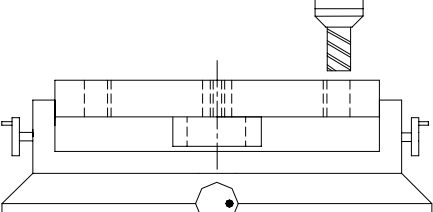
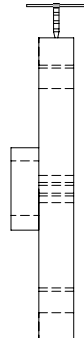
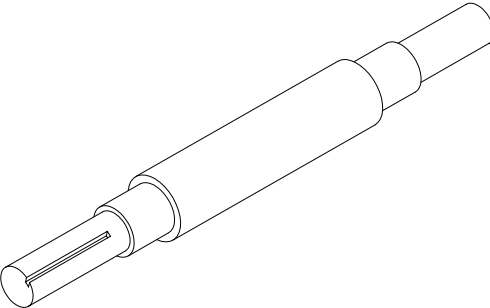
08	Hacer un agujero de 4 mm de diámetro con centro en los puntos de intersección del círculo de 16 mm de radio y las 2 líneas a 45°.		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Taladro de banco</li> <li>2. Broca de 5 mm</li> </ol>
09	Realizar agujeros de 16 mm (0.63 pulg) mm de radio con centro en la intersección entre las líneas y el círculo de 52.5 mm (2.07 pulg) de radio.		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Taladro de banco</li> <li>2. Broca de 30 mm</li> </ol>
11	Hacer agujeros para prisioneros con centros a la mitad del espesor y sobre la prolongación de las líneas espaciadas 45°, luego pasar el machuelo de 4 mm (0.16 pulg)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Taladro</li> <li>2. Broca</li> <li>3. Machuelo</li> <li>4. Bandeador</li> </ol>

Tabla 3.2. Hoja de proceso de mecanizado del eje del cabezal.

Hoja de proceso # 2		Plano # 6	N° de piezas: 1
Nombre del elemento: Eje del cabezal	Material: Acero AISI 1020	Dimensiones en bruto: Ø40X225 mm (Ø1.5X8.85 pulg)	
			

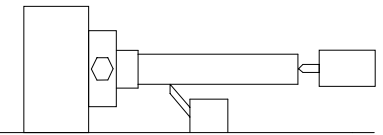
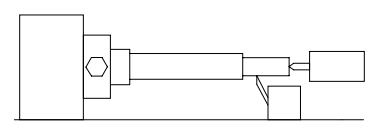
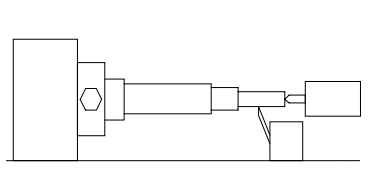
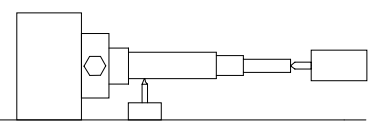
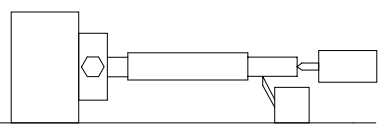
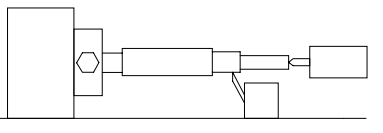
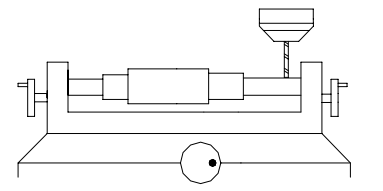
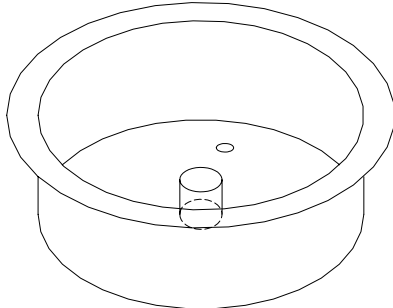
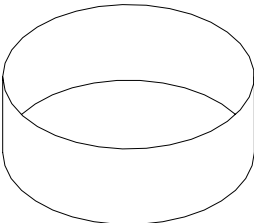

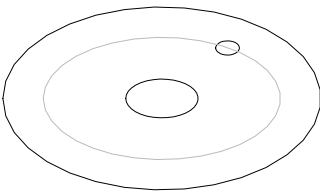
Etapa N°	Denominación de la etapa	Esquema	Maquinaria y/o Herramienta
01	Cilindrar a $\varnothing 25 \times 225$ mm ( $\varnothing 0.98 \times 8.86$ pulg)		1. Torno 2. Buril
02	Cilindrar desde un extremo a $\varnothing 20 \times 78$ mm ( $\varnothing 0.79 \times 3.07$ pulg)		1. Torno 2. Buril
03	Cilindrar desde el extremo a $\varnothing 15.875 \times 48$ mm ( $\varnothing 0.79 \times 1.89$ pulg)		1. Torno 2. Buril
04	Cortar hasta obtener un eje de 216 mm (8.5 pulg)		1. Torno 2. Buril de corte
05	Cilindrar el extremo no maquinado a $\varnothing 20 \times 68$ mm ( $\varnothing 0.79 \times 2.68$ pulg)		1. Torno 2. Buril
06	Cilindrar desde el extremo a $\varnothing 15.875 \times 38$ mm ( $\varnothing 0.625 \times 1.50$ pulg)		
07	Hacer una ranura de $4 \times 2 \times 40$ mm ( $0.15 \times 0.08 \times 1.5$ pulg) en el extremo de $\varnothing 15.875 \times 48$ mm ( $0.625 \times 1.89$ pulg)		1. Fresadora 2. Fresa

Tabla 3.3. Hoja de proceso de mecanizado del drenaje.

Hoja de proceso # 3		Plano # 9	N° de piezas: 1
Nombre del elemento: Drenaje	Material: Lámina galvanizada	Dimensiones en bruto: 2X1m (78.78X39.37 pulg)	
			
Etapa N°	Denominación de la etapa	Esquema	Maquinaria y/o Herramienta
01	Cortar una porción de 850X100 mm (33.5X3.94 pulg) y formar un cilindro de 270 mm (10.63 pulg); unir con soldadura de estaño los extremos		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Guillotina</li> <li>2. Metro</li> <li>3. Pistola</li> <li>4. Estaño</li> <li>5. Pasta</li> </ol>
02	Cortar una porción de 110X35 mm (4.33X1.38 pulg) y formar un cilindro de 35 mm (1.38 pulg); unir con soldadura de estaño los extremos		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Guillotina</li> <li>2. Metro</li> <li>3. Pistola</li> <li>4. Estaño</li> <li>5. Pasta</li> </ol>
03	Cortar un anillo de 270 mm (10.63 pulg) de diámetro exterior y 35 mm (1.38 pulg) de diámetro interior. Luego hacer un agujero de 12.7 mm (0.5 pulg) con centro sobre una línea de Ø225 mm (8.86 pulg)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Plasma</li> <li>2. Compás</li> <li>3. Metro</li> <li>4. Taladro</li> <li>5. Broca</li> </ol>

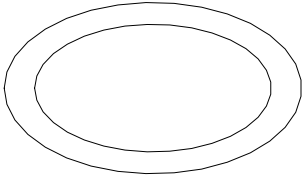
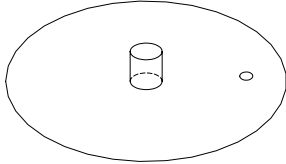
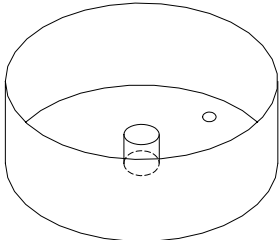
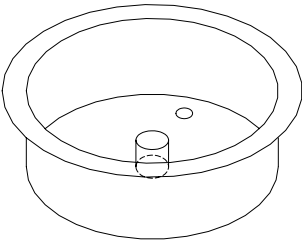
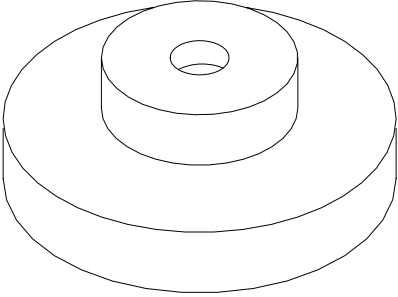
04	Cortar un anillo de 320 mm (12.60 pulg) de diámetro exterior y 270 mm (10.63 pulg) de diámetro interior		1. Plasma 2. Compás 3. Metro
05	Soldar la pieza del paso 2 con la del paso 3		1. Pistola 2. Estaño 3. Pasta
06	Soldar la pieza del paso 1 con la del paso 5		1. Pistola 2. Estaño 3. Pasta
07	Soldar la pieza del paso 4 con la del paso 6		1. Pistola 2. Estaño 3. Pasta

Tabla 3.4. Hoja de proceso de mecanizado del disco portapapel abrasivo.

Hoja de proceso de # 4		Plano # 7	Nº de piezas: 1
Nombre del elemento: Disco porta papel abrasivo	Material: Aluminio 6061	Dimensiones en bruto: 200X65 mm (8 X2.5 pulg)	
			



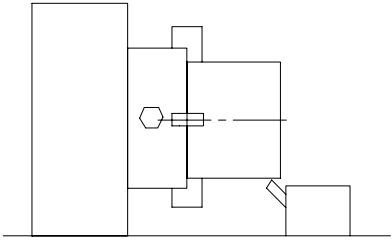
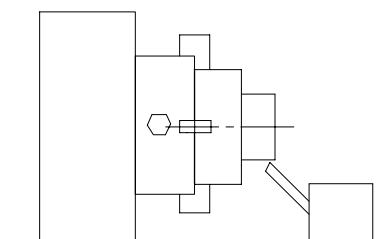
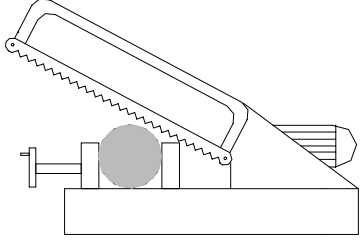
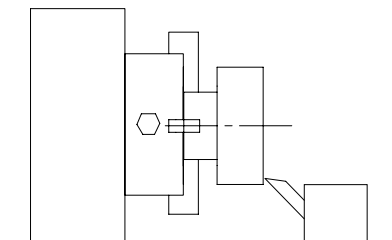
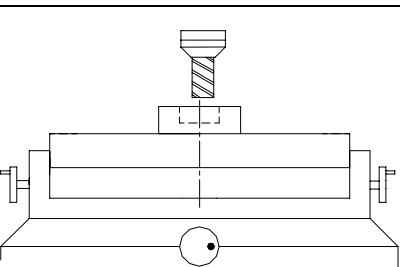
Etapa N°	Denominación de la etapa	Esquema	Maquinaria y/o Herramienta
01	Cilindrar a $\text{Ø}200$ mm (7.87 pulg)		1. Torno 2. Buril
02	Cilindrar un extremo a $\text{Ø}80 \times 25$ mm (3.15X0.98 pulg)		1. Torno 2. Buril
03	Cortar el extremo de $\text{Ø}200$ mm (7.87 pulg) a un espesor de 23 mm (0.91 pulg)		1. Sierra alternativa 2. Calibrador
04	Refrentar el extremo de $\text{Ø}200$ mm (7.87 pulg), hasta obtener un espesor de 20 mm (0.79 pulg)		1. Torno 2. Buril
05	Hacer una perforación de $\text{Ø}35 \times 25$ mm (1.38X0.79 pulg) en el centro del extremo de $\text{Ø}80 \times 25$ mm ( $\text{Ø}3.15 \times 0.98$ pulg)		1. Fresadora 2. Fresa

Tabla 3.5. Hoja de proceso de mecanizado del disco alineador de muestras.

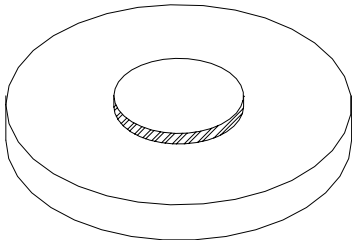
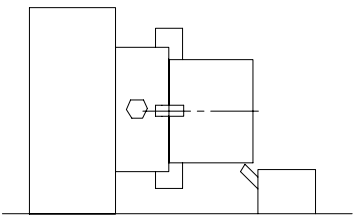
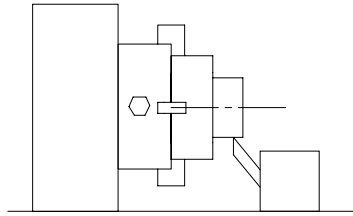
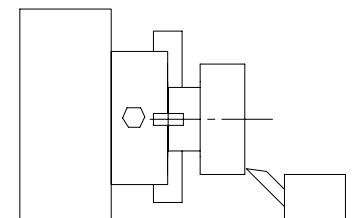
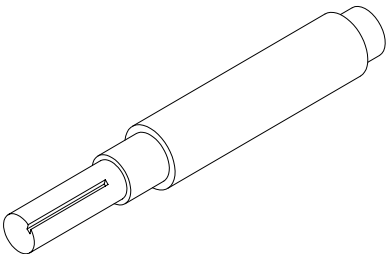
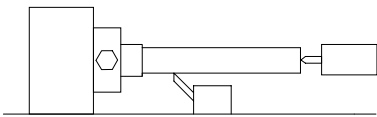
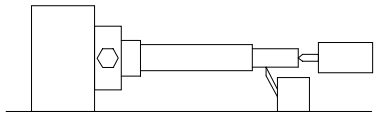
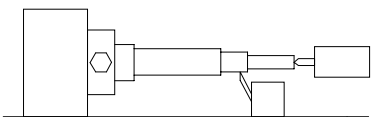
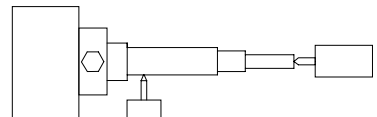
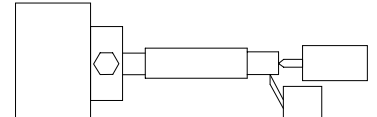
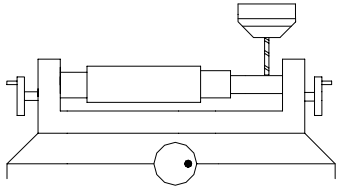
Hoja de proceso # 5		Plano # 10	N° de piezas: 1
Nombre del elemento: Disco alineador de muestras	Material: Aluminio 6061	Dimensiones en bruto: Ø165X30 mm (Ø6.5X1.18 pulg)	
			
Etapa N°	Denominación de la etapa	Esquema	Maquinaria y/o Herramienta
01	Cilindrar a Ø130X12 mm (Ø5.12X0.47 pulg)		1. Torno 2. Buril
02	Cilindrar un extremo a Ø80X3 mm (Ø3.15X0.12 pulg)		1. Torno 2. Buril
03	Refrentar el extremo de Ø130 mm (Ø5.12 pulg), hasta obtener un espesor de 7 mm (0.28 pulg)		1. Torno 2. Buril

Tabla 3.6. Hoja de proceso de mecanizado del eje de la mesa.

Hoja de proceso # 6		Plano # 8	N° de piezas: 1
Nombre del elemento: Eje de la mesa	Material: Acero AISI 1020	Dimensiones en bruto: Ø40X200 mm (Ø1.5X7.87 pulg)	
			
Etapa N°	Denominación de la etapa	Esquema	Maquinaria y/o Herramienta
01	Cilindrar a Ø25 X 190 mm (Ø 0.98X7.48pulg)		1. Torno 2. Buril
02	Cilindrar un extremo a 20X70 mm (Ø0.79X2.76 pulg)		1. Torno 2. Buril
03	Cilindrar el mismo extremo a Ø15.875X50 mm (Ø0.625X1.97 pulg)		1. Torno 2. Buril
04	Cortar el extremo de Ø25 mm (0.98 pulg), a una longitud de 115 mm (4.53 pulg)		1. Torno 2. Buril
05	Cilindrar el extremo a Ø20X15 mm (Ø 0.79X0.59 pulg)		1. Torno 2. Buril

06	Hacer una ranura de 4X2X40 mm (0.15X0.08X1.5 pulg) en el extremo de $\varnothing 15.875$ mm (0.625 pulg)		<ol style="list-style-type: none"><li>1. Fresadora</li><li>2. Fresa</li></ol>
----	--	--	---

#### 4 DETERMINACIÓN DE COSTOS

En el diseño se determinó el material y las dimensiones de cada componente mecánico de la máquina. Además, se seleccionaron los dispositivos eléctricos y neumáticos que complementan ésta. Así, en la valorización de los recursos económicos para la construcción de la máquina se consideran los factores siguientes:

- Materia prima: materiales que forman parte del producto terminado (máquina lijadora).
- Mano de obra directa: se utiliza para transformar la materia prima en producto terminado.
- Mano de obra indirecta: se utiliza para realizar los estudios y la asesoría pertinente.

En la Tabla 4.1 se presentan los costos de los elementos mecánicos, neumáticos y eléctricos. Además, los costos de materia prima.

Tabla 4.1. Costos de elementos y materia prima, utilizados en la construcción de la máquina.

Elemento	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Cilindro neumático	1	124.11	124.11
Electroválvula	1	120.00	120.00
Válvula reguladora de flujo	2	4.8	4.8
Filtro-regulador de presión (F-R)	1	65.00	65.00
Válvula reguladora de presión	1	56.00	56.00
Válvula solenoide	2	10.06	20.12
Manómetro	1	11.00	11.00
Racor	6	1.58	3.16
Tee	2	4.82	9.64
Silenciador	2	1.36	2.72
Manguera	6	1.52	9.12
Censor magnético	2	19.21	38.42
Relé	5	10.00	50.00
Timer	2	10.00	20.00
Relé temporizador (on-delay)	1	73.45	73.45
Pulsadores	2	10.00	10.00
Contactores	2	19.21	19.21
Alambre eléctrico, bornera, otros	--	5.00	5.00
Rodos fijos	2	5.50	11.00
Rodos locos	2	6.75	13.50
Polea de aluminio de 1 pulg	2	4.25	4.25

Tabla 4.1. Costos de elementos y materia prima, utilizados en la construcción de la máquina. (continuación)

Polea de aluminio de 2 pulg	1	5.50	5.50
Polea de aluminio de 5 pulg	2	7.50	7.50
Polea de aluminio de 6 pulg	1	12.00	12.00
Faja A28	1	1.57	1.57
Faja A29	1	1.57	1.57
Rodamiento cónico	2	28.00	56.00
Rodamiento de bola	4	4.37	17.48
Ángulo de 1x 1 x 1/8 pulg	1	4.11	4.11
Ángulo de 1½ x 1½ x 1/8 pulg	1	5.00	5.00
Lamina de 1/8 pulg	1	17.14	17.14
Lamina de 3/64 pulg	2	13.00	26.00
Tubo cuadrado de 1¼ pulg	1	4.50	4.50
Pintura negra anticorrosiva	1	2.00	2.00
Pintura martillada	1	4.00	4.00
Pletina 7½ x 1/4x8 pulg	1	4.00	4.00
Pletina 8½ x 1/4x8 pulg	1	6.00	6.00
Tocho de aluminio (Ø8x3 pulg)	2	55.00	110.00
Bronce (Ø4x4 pulg)	1	6.00	6.00
Acero AISI 1020 (Ø2x20 pulg)	1	5.00	5.00
Acero AISI 1020 (Ø4x4 pulg)	1	6.50	6.50
Pernos, prisioneros, otros	--	4.00	4.00
Herramientas (fresa, brocas, etc.)	--	16.00	16.00
Motor monofásico	1	87.50	87.50
Motor trifásico	1	140.00	140.00
Variador de frecuencia	1	428.00	428.00
Sub-total (1)			1647.87

El costo de la mano de obra directa utilizado para la construcción de algunos elementos diseñados de la máquina, se detalla en la Tabla 4.2.

La inversión de mano de obra indirecta, se detalla en la Tabla 4.3.

El costo total en la construcción de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas, se presenta en la Tabla 4.4.

Tabla 4.2. Costos de mano de obra directa para la construcción de la máquina.

Elemento construido	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Disco portamuestras	1	194.29	194.29
Drenaje	1	18.00	18.00
Disco portapapel abrasivo	1	114.29	114.29
Disco alineador de muestras	1	45.71	45.71
Acople rápido	1	114.29	114.29
Eje	2	80.00	160.00
Estructura para drenaje	1	18.00	18.00
Guía antigiro	1	57.14	57.14
Estructura de la máquina	--	228.57	228.57
Circuito de mando	1	57.14	57.14
Circuito de control	1	120.00	120.00
Pintura	--	20.00	20.00
Sub-total (2)			1147.43

Tabla 4.3. Costos de mano de obra indirecta.

Rubro	Costo (\$)
Asesoría técnica: se tendrán 3 asesores trabajando durante 16 meses, 1 hora a la semana con un salario de \$10.00/hora.	2070.00
Salario de trabajo intelectual: trabajando 4 meses con un salario de \$5.00/h. Cuatro horas diarias (tres personas), 3 días a la semana.	3240.00
Costo de digitación e impresión de texto: el costo por página digitada e impresa es de \$0.35. Estimando un total de 350 páginas.	122.50
Sub-total (3)	5432.5

Tabla 4.4. Costo total en la construcción de la máquina.

Rubro de inversión	Costo (\$)
Materia prima	1647.87
Mano de obra directa	1147.43
Mano de obra indirecta	5432.5
Costo Total	8227.80

## **5. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

### **5.1 MANUAL DE OPERACIÓN**

Con el propósito de asegurar un funcionamiento adecuado de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas y el de disminuir fallas por mal uso de ésta, se presenta la secuencia de pasos a seguir para efectuar el proceso de lijado.

1. Energizar el circuito de neumático
2. Energizar el circuito de control (110 V)
3. Regular la presión inicial a 0.56 MPa (80 psi)
4. Regular la presión de trabajo, según la Tabla 5.1
5. Desmontar el disco portamuestras
6. Colocar y fijar las muestras en el disco portamuestras, utilizando el disco alineador
7. Montar el disco portamuestras
8. Colocar y fijar con el bastidor el papel abrasivo correspondiente en el disco portapapel abrasivo
9. Colocar el elemento que evita salpicadura de agua
10. Ajustar el tiempo de lijado
11. Suministrar y ajustar el refrigerante
12. Presionar botón de marcha
13. Presionar el boton FWD, en los primeros 5 segundos después de presionar el boton de marcha
14. Programar la velocidad del motor del cabezal
15. La máquina deja de funcionar al cumplirse el tiempo de ajuste.
16. Presionar el boton STOP
17. Suprimir el flujo de agua
18. Desmontar el portamuestras y observar las muestras, verificar si es necesario otro proceso de lijado
19. Si es necesario otro proceso de lijado regresar al paso 10, sino continuar con el paso siguiente
20. Desmontar el elemento que protege contra salpicaduras
21. Quitar el papel abrasivo utilizado
22. Colocar y fijar con el bastidor el papel abrasivo siguiente en el disco portapapel



23. Repetir el procedimiento desde el paso 10

24. Desenergizar el circuito de neumático

25. Desenergizar el circuito de control

**Nota:** en caso de problemas o si se detecta un desperfecto en el proceso de lijado presione el paro de emergencia. Para continuar con el uso de la máquina presionar antes que el botón de marcha, el botón restaurar.

Tabla 5.1. Fuerzas sobre las muestras, según la presión de trabajo.

Presión de trabajo, MPa (psi)	$F_{sc}$ , N (lb)	$F_{sm}$ , N (lb)
0.455 (66)	215.82 (48.50)	0 (0)
0.448 (65)	209.77 (47.14)	6.05 (1.36)
0.441 (64)	206.43 (46.39)	9.38 (2.11)
0.434 (63)	203.05 (45.63)	12.77 (2.87)
0.427 (62)	199.67 (44.87)	16.15 (3.63)
0.420 (61)	196.28 (44.11)	19.53 (4.39)
0.413 (60)	192.90 (43.35)	22.91 (5.15)
0.406 (59)	189.43 (42.57)	26.38 (5.93)
0.399 (58)	186.09 (41.82)	29.68 (6.67)
0.393 (57)	182.81 (41.06)	33.06 (7.43)
0.386 (56)	179.33 (40.30)	36.49 (8.20)

## 5.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO

Las fallas en servicio de cualquier maquinaria o equipo, se pueden evitar o disminuir, adoptando un programa de mantenimiento. Los tipos de mantenimiento ejecutados en una máquina o en un equipo son: mantenimiento predictivo, preventivo, correctivo y proactivo.

De los tipos de mantenimiento, el que se puede adaptar de forma satisfactoria a las necesidades de mantenimiento de la máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas, es el preventivo, el cual no es más que el realizar una serie de intervenciones periódicas para así evitar fallas durante el servicio de ésta.

Se recomienda intervenciones antes de utilizar la máquina, y por otro lado en forma trimestral y anual.

**Antes de utilizar la máquina**

- Revisar si existen fugas de aire y agua
- Revisar alineamiento

**Trimestral**

- Revisar todos los elementos de sujeción (pernos, prisioneros, etc.); de estar desapretados, darles el respectivo aprete
- Engrasar las partes móviles

**Anual**

- Revisar los soporte de los rodamientos.
- Revisión general de los motores.
- Pintar estructura de máquina con anticorrosiva.

**6. PRUEBAS EXPERIMENTALES**

En esta etapa se presenta la guía de laboratorio a utilizar para realizar el proceso de lijado en un material en particular. Como también el valor de las variables carga, velocidad y tiempo; más adecuadas para realizar el proceso en los materiales siguientes: acero AISI 1020 recocido, acero AISI 4340 templado y revenido, aluminio 6160, bronce fosforado.

**6.1 GUÍA DE LABORATORIO****Introducción:**

La realización de un buen estudio metalográfico en un material está relacionada con efectuar un buen lijado de las muestras. Este se realiza haciendo pasar la muestra por papeles abrasivos de grano cada vez más fino. Por lo general, se inicia el lijado con papel abrasivo número 100 y se finaliza con un papel número 600. En la actualidad existen máquinas semiautomáticas que realizan el proceso de lijado de una manera más rápida y eficiente.

**Objetivo general:**

Realizar correctamente el proceso de lijado de diferentes materiales, utilizando la máquina semiautomática.

**Material y equipo:**

- Papel abrasivo número 100, 150, 200, 400, 500, 600.
- Máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas planas

**Desarrollo:**

Revisar en la sección 5.1, el manual de operación de la máquina y utilizar la Tabla 6.1 para la tabulación de las variables. Es necesario que con el papel abrasivo número 100 se logre una sola cara en las muestras, hasta cumplir con lo anterior se puede pasar al papel abrasivo de número mayor, lo que podría llamarse un pre-lijado.

Tabla 6.1. Variables utilizadas durante la prueba de laboratorio.

Material	Parámetros			Observaciones
	Carga, N	Tiempo, s	Velocidad, rpm	
Acero AISI 1020 recocido				
Acero AISI 4340 bonificado				
Aluminio 6160				
Bronce fosforado				

**6.2 PROCESO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES**

El proceso de lijado se realizó en los materiales siguientes: aceros AISI 1020 recocido, 4340 templado y revenido (bonificado), aluminio 6160 y bronce fosforado. Para cada proceso de un material en específico se varió el tiempo, mientras que la carga de lijado y la velocidad permanecieron constante. En la sección 5.1 se presenta el manual de operación de la máquina

En las Tablas 6.2 a 8.5 se presentan los parámetros bajo los cuales se desarrolló las pruebas de lijado para cada material.

Tabla 6.2. Parámetros de lijado del acero AISI 1020 recocido.

Material	Parámetros				Prueba número
	Carga, N	Tiempo, s	$V_{pm}$ , rpm	$V_{pp}$ , rpm	
Acero AISI 1020 recocido	22.91	600/lija	232	518	P1
	22.91	320/lija	232	518	P2
	22.91	300/lija	232	518	P3

Tabla 6.3. Parámetros de lijado del acero AISI 4340 bonificado.

Material	Parámetros				Prueba número
	Carga, N	Tiempo, s	$V_{pm}$ , rpm	$V_{pp}$ , rpm	
Acero AISI 4340 bonificado	36.49	720/lija	232	518	P1
	36.49	600/lija	232	518	P2
	36.49	480/lija	232	518	P3

Tabla 6.4. Parámetros de lijado del aluminio.

Material	Parámetros				Prueba número
	Carga, N	Tiempo, s	$V_{pm}$ , rpm	$V_{pp}$ , rpm	
Aluminio 6160	6.05	360/lija	232	518	P1
	6.05	240/lija	232	518	P2
	6.05	180/lija	232	518	P3

Tabla 6.5. Parámetros de lijado del bronce.

Material	Parámetros				Prueba número
	Carga, N	Tiempo, s	$V_{pm}$ , rpm	$V_{pp}$ , rpm	
Bronce fosforado	6.05	360/lija	232	518	P1
	6.05	240/lija	232	518	P2
	6.05	180/lija	232	518	P3

De las pruebas que se realizaron, se observaron en el microscopio óptico (1020 y 4340) las muestras que se lijaron con la máquina y se compararon con las lijadas a mano; el resultado de la comparación es que se reveló la misma microestructura

Finalmente de las pruebas realizadas se determina que las cargas aplicadas durante el lijado o los tiempos de lijado pueden ser disminuidos, tal como se planteó anteriormente, en base a las observaciones visuales de las muestras preparadas con la máquina hasta con lija 600 y continuadas hasta la observación en el microscopio óptico, y comparada dicha microestructura con la observada en muestras preparadas en forma manual.

## CONCLUSIONES

Se logró diseñar y construir una máquina semiautomática para el lijado de muestras metalográficas, cumpliendo con los objetivos planteados inicialmente; así, el número de muestras que se pueden ligar en un proceso completo son 8, la carga aplicada puede variar de 0.389 a 0.455 MPa, el tiempo de lijado se puede ajustar en cada papel de 5 a 360000 s.

Se realizaron satisfactoriamente pruebas de lijado tanto en aceros AISI 1020 recocido y AISI 4340 bonificado como también en aleaciones de aluminio 6160 y bronce fosforado, efectuando para cada material 3 pruebas a carga y velocidades constantes variando el tiempo de lijado.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio que permita determinar la magnitud de la vibración producida en la máquina, y así disponer de un mecanismo que permita minimizarla.
- Aumentar la gama de variación de velocidad en el disco portapapel abrasivo.
- Realizar pruebas que permitan alcanzar valores óptimos de lijado para diferentes materiales.
- Construir otros discos portamuestras que permitan una mayor versatilidad en el uso de la máquina.

## BIBLIOGRAFÍA

- Introducción a la metalurgia física  
Sydney h. Avner  
Segunda Edición, 1988  
Editorial McGraw-Hill
- Preparación de muestras metalográficas para el estudio de aleaciones binarias  
Mauricio Estrada, Luis Pérez  
Mayo 1985
- Introducción a la neumática  
Antonio Guillén Salvador  
Edición original publicada por Marcombo, Barcelona España, 1999  
Editorial Alfaomega
- The pneumatics catalog  
SMC  
North American Edition, January 2000
- Diseño en Ingeniería Mecánica  
Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke  
Quinta Edición, 1990  
Editorial McGraw-Hill
- Mecánica de materiales  
Gere-Timoshenko  
Segunda Edición, 1986  
Grupo Editorial Iberoamérica

- Automatización Neumática y Electroneumática  
Salvador Millan  
Edición original publicada por Marcombo, Barcelona España, 1995  
Editorial Alfaomega