REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MÁQUINA PARA REALIZAR EL ENSAYO DE RALLADO

Trabajo de Diploma

Autor: Raúl Rivero Bermúdez

Tutor: MSc. Juan Gabriel Noa Águila
Dr. Ivan Negrin Hernández

Cienfuegos, Junio 2015
"Año 57 de la Revolución"

DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

UNIVERSIDAD CIENFUEGOS
Carlos Rafael Rodríguez

Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

_____

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

_____
Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

_____
Vice Decano.

_____
Firma del Tutor
Nombre y Apellidos. Firma

_____
Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.

Pensamiento

El hombre debe transformarse al mismo tiempo que la producción progresa; no realizaríamos una tarea adecuada si fuéramos tan solo productores de artículos, de materias primas y no fuéramos al mismo tiempo productores de hombres.

Ché

Dedicatoria

Dedico este Trabajo de Diploma a mi familia y a todas las personas que contribuyeron a mi formación como Ingeniero.

RESUMEN

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales es un aspecto fundamental en los procesos de diseño y evaluación de estructuras y elementos de máquinas. Investigaciones recientes han demostrado que el ensayo de rayado es una alternativa viable para el conocimiento de algunas propiedades importantes de los materiales sin la utilización de métodos destructivos. En este trabajo se realiza un análisis de la bibliografía relacionada con este ensayo y se resumen los principales resultados obtenidos por los investigadores sobre esta temática. Se hace un análisis de la norma ASTM G 171 y se extraen los principales parámetros de trabajo que deben tener las máquinas destinadas a la realización del ensayo de rayado. Se realiza el diseño de la máquina y se simula su funcionamiento utilizando el software SOLIDSWORK. Con este mismo programa se realiza el chequeo de resistencia y rigidez de la máquina en el momento de trabajo con la carga máxima aplicada. También se realiza el chequeo a los tornillos y rodamientos de forma tradicional. Se fabricó una máquina para realizar el ensayo de rayado a partir de materiales reciclados y utilizando las máquinas herramienta disponibles. Después de fabricada se realiza el control de los principales parámetros de trabajo, para eso se realizó el ensayo en probetas de aluminio y se verifica que todo el proceso se encuentra dentro de lo establecido por la norma ASTM G 171. Se realiza una valoración económica de la máquina fabricada utilizando un programa de cálculo perteneciente a una empresa real de nuestro territorio y el mismo arroja que el precio de fabricación es de 226.31 CUC y 1720.70 CUP, mucho menor que el precio de una máquina similar si se compra que es de 30 500 euros.

Palabras clave: ensayo de rayado, tribología, máquina de ensayos, indentación.

ABSTRACT

The knowledge of the mechanical properties of the materials is a fundamental aspect in the design processes and evaluation of structures and elements of machines. Recent academic research has demostrated that scratch testing is a viable alternative for determining the strength and ductility of metals without the use of destructive methods. In this work is carried out an analysis of the bibliography related with this test and are extracted the main results obtained by the researchers on this thematic. An analysis of the ASTM G 171 standard is made and the main working parameters are extracted that should have the machines dedicated to the realization of the scratch test. The design of the machine is made and its operation is simulated, all this using the software SOLIDSWORK. With this same software is carried out the resistance and rigidity verification of the machine in the work moment with the applied maximum load. Is also carried out the checkup to the bolts and bearings in a traditional way. A scratch testmachine was manufactured using recycled materials and manipulating the available machines tool. After having manufactured was carried out the control of the main working parameters, for that the test was made in aluminum specimens and is verified that the whole process is inside that settled down by the ASTM G 171 standard. An economic valuation of the fabricated machine is carried out using a calculation software belonging to a real company of our territory and the same one gives as a result t that the cost of manufacture is of 226.31 CUC and 1720.70 CUP, much smaller that the price of a similar machine that is of 30 500 €.

Key words: scratch test, tribology, test machine, indentation.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

Objetivo general 3

Objetivos específicos 3

CAPITULO I. Marco teórico 4

1.1. Indentación 4

1.2. Ensayo de rayado 5

1.2.2. Instrumentación del ensayo de rayado 7

1.2.3. Papel de la fricción en el ensayo de rayado 9

1.2.4. Tendencias presentadas durante el ensayo de rayado 11

1.3. Comparación entre los ensayos de indentación y rayado 11

1.3.1. Sensibilidad y exactitud de las funciones analíticas 12

1.3.2. Tensiones representativas 12

1.3.3. Correlación de la dureza de rayado con la dureza de indentación 13

CONCLUSIONES CAPÍTULO I 15

CAPITULO II. Valoración de la norma ASTM G 171 16

Introducción 16

2.1. Alcance 16

2.2. Documentos de referencia 16

2.3. Terminología 16

2.4. Resumen del procedimiento de ensayo 17

2.5. Importancia y uso del procedimiento 18

2.6. Máquina de ensayo 19

2.6.1. Descripción general 19

2.6.2. Sistema para la medición del ancho de la huella 19

2.6.3. Fuerza de rayado (opcional) 19

2.7. Calibración 20

2.8. Procedimiento 20

2.8.1. Preparación de la probeta 20

2.8.2. Limpieza de la probeta 20

2.8.3. Inspección del indentador 21
2.8.4. Fuerza normal 21
2.8.5. Longitud de la huella y velocidad del ensayo 21
2.8.6. Conducción del ensayo 21
2.8.7. Medición del ancho de la huella 22
2.9. Cálculos 22
2.9.1. Número de dureza de rayado 22
2.9.2. Coeficiente de arrastre del indentador 23
2.10. Reporte 24
2.11. Precisiones y recomendaciones 25
2.12. Discusión 25
2.12.1. Geometría de penetración 25
2.12.2. Correlación del número de dureza de rayado con otras propiedades del material 26
2.2 Análisis estadístico de los resultados de los experimentos 26
CONCLUSIONES CAPÍTULO II 30
CAPITULO 3. Diseño de la máquina 31
Introducción 31
3.1. Selección de materiales 31
3.2. Diseño de la máquina 32
3.2.1. Chequeo de los tornillos 33
3.2.2. Chequeo de los rodamientos 35
3.2.3. Chequeo de resistencia de la estructura de la máquina 37
CONCLUSIONES CAPÍTULO III 41
CAPITULO IV. Fabricación de las piezas 42
4.1 Construcción de las Piezas 42
4.1.1 Base principal 42
4.1.2. Columna 44
4.1.3. Base columna 45
4.1.4. Patas 46
4.1.5. Carro superior 46
4.1.6. Brida de sujeción. 47
4.1.7. Laine de ajuste. 48

4.1.8. Base carro superior 48
4.1.9. Brazo 49
4.1.10. Grampa 50
4.1. 11. Barra 50
4.1.12. Porta indentador. 51
4.1.13. Base del deslizador. 52
4.1.14. Perno 52
4.1.15. Deslizador 53
4.1.16. Base del motor 53
4.1.17. Porta pesas 54
4.1.18. Bloque de engranajes 55
4.2. Montaje y ajuste de la máquina 56
4.2.1. Descripción detallada 57
4.2.2. Probeta para el ensayo 59
4.2.3. Pasos para la realización del ensayo 59
4.3. Valoración económica 59
CONCLUSIONES CAPÍTULO IV 62
CONCLUSIONES GENERALES 64
BIBLIOGRAFÍA 66
ANEXOS 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. *Valores del factor de desviación para un número de replicas menor que diez.* 27

Tabla 2.2. *Tamaño mínimo aceptable de la muestra para un 95% de confianza*. 28

Tabla 3.1. *Valores del factor f_o para cojinetes de bola.* 37

Tabla 3.2. *Principales datos del modelo para la simulación con el MEF*. 38

Tabla. 4.1. *Desglose de gastos de materias primas*. 60

Tabla 4.2. *Desglose de los gastos de tiempo, salario y energía*. 60

Tabla 4.3. *Costo total de la máquina según programa de cálculo*. 61

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1. *Esquema del comportamiento del material bajo el penetrador.* 4

Fig.1.2. *Representación esquemática del penetrador y de la huella.* 6

Fig.1.3. *Representación esquemática del penetrador y del perfil de la huella*. 8

Fig.2.1. *Medición del ancho de la huella en diferentes situaciones.* 22

Fig.2.2. *Se asume que el área proyectada es un semicírculo en la vista superior* 23

Fig. 3.1. *Modelo de la máquina diseñado en SOLIDSWORW y sus partes principales.* 33

Fig.3.2. *Tornillos que reciben cargas adicionales durante el ensayo.* 34

Fig.3.3. *Modelo utilizado para los chequeos de la máquina.* 38

Fig.3.4. *Desplazamientos de los diferentes elementos de la máquina.* 39

Fig.3.5. *Valores de tensiones equivalentes.* 40

Fig.4.1 *Base principal*. 42

Fig.4.2. *Fresadora horizontal, modelo 6P81Г.* 43

Fig.4.3. *Rectificadora de superficies, modelo 3E711B.* 43

Fig.4.5. *Taladro de columna.* 43

Fig.4.6. *Columna.* 44

Fig.4.7. *Base columna.* 45

Fig.4.8. *Máquina cepilladora.* 46

Fig.4.9. *Patas.* 46

Fig.4.10. *Carro superior*. 47

Fig.4.11. *Brida de sujeción.* 47

Fig.4.12. *Proceso de maquinado de la brida de sujeción*. 48

Fig.4.13. *Laine de ajuste*. 48

Fig.4.14. *Base carro superior*. 49

Fig.4.15. *a) Pivote del brazo. b) Platina del brazo*. 49

Fig.4.16. *Grampa*. 50

Fig.4.17. *Barra*. 50

Fig.4.18. *Porta indentadror*. 51

Fig.4.19. *Rectificado de las caras del porta indentador*. 51

Fig.4.20. *Base del deslizador*. 52

Fig.4.21. *Perno.* 52

Fig.4.22. *Deslizador*. 53

Fig.4.23. *Base del motor.* 54
Fig.4.24. *Porta pesas.* 54
Fig.4.25. *Bloque de engranajes.* 55
Fig.4.26. Resultado de los cálculos de los engranajes con el software. 56
Fig.4.27. Sistemas fundamentales de la máquina fabricada. 57
Fig.4.28. *Partes de la máquina fabricada.* 58
Fig.4.29. *Probetas para el ensayo.* 59

INTRODUCCIÓN

La caracterización de los materiales es muy importante en la ingeniería, tanto para el proceso de diseño como para predecir el comportamiento de piezas y estructuras cuando se someten a un sistema de cargas determinado. Los métodos tradicionales más utilizados para determinar las propiedades mecánicas de los materiales parten de la obtención de una probeta del material de la pieza o estructura, que posteriormente se somete a ensayos destructivos, siendo el más utilizado el ensayo de tracción. Estos métodos no se pueden aplicar cuando es necesario conocer las propiedades del material de un determinado elemento, no se pueden obtener probetas y no se puede destruir el elemento analizado. En estos casos es necesario aplicar métodos alternativos, estando los métodos que utilizan el contacto mecánico entre los más apropiados.

Durante los ensayos de contacto mecánico, la interacción entre el penetrador y el sustrato generan altas presiones que producen plasticidad localizada, manifestándose en este proceso las propiedades mecánicas del material que es penetrado. Las condiciones físicas del contacto, incluye las dimensiones de las asperezas, la lubricación, la velocidad relativa y las propiedades del material, tienen gran influencia en los resultados del ensayo. Esto ha permitido usar los ensayos de contacto mecánico para simular procesos de desgaste y tribológicos en general, el comportamiento plástico de materiales dúctiles y la fractura de materiales de comportamiento frágil. Los dos métodos más utilizados que utilizan el contacto mecánico para evaluar propiedades de materiales son la identación normal y el ensayo de rayado (scratch test).

La identación normal ha sido utilizada durante décadas para determinar la dureza de los materiales. En este proceso un penetrador de alta dureza es presionado contra la superficie del material analizado aplicándose una carga conocida, posteriormente se mide la huella dejada por la penetración. Por consiguiente, la dureza es una propiedad extrínseca de los materiales que caracteriza la resistencia a la deformación local producto de una carga aplicada. Estos ensayos de dureza pueden ser realizados en varias escalas (macro, micro y nano) y son incluidos dentro de los Ensayos No Destructivos (END) de los materiales.

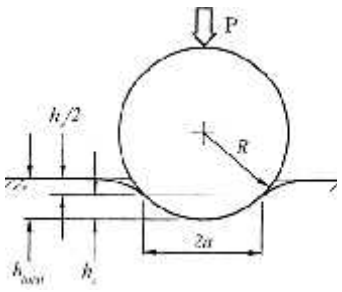


Fig.1. *Representación esquemática del ensayo de identación normal (*Wheeler, J. 2009*).*

El ensayo de rayado puede ser utilizado para la caracterización de los materiales. Durante el ensayo de rayado un penetrador rígido es presionado sobre un sustrato y se le aplica una fuerza tangencial, lo que produce un surco en la superficie del material analizado. La huella resultante se mide para determinar la dureza al rayado producto de una carga determinada. Como en el ensayo de identación normal, los resultados del ensayo de rayado pueden ser correlacionados con diferentes modos de deformación del material, y pueden ser realizados con variados tipos de escalas.

Fig.2. *Ensayo de rayado (Giradles, I. 2014).*

Para aplicaciones prácticas, la identación normal y el ensayo de rayado son utilizados para determinar propiedades mecánicas comunes de los materiales como el Módulo de Young (E) y la tensión de fluencia (σ), las que son comúnmente obtenidas con la realización del ensayo de tracción. Esto ha sido acompañado con el uso de algoritmos inversos derivados de la aplicación de métodos numéricos como el Método de los Elementos Finitos (FEM). Estos algoritmos han sido verificados mediante ensayos experimentales, lo que permite la obtención de propiedades mecánicas utilizando métodos de ensayos no destructivos (Palkovic, S. 2014).

Aunque los algoritmos inversos existen para ambos métodos experimentales, el ensayo de rayado es menos utilizado en la práctica que el ensayo de identación para la caracterización mecánica de los materiales. Esto es producto de que los equipos para realizar los ensayos, los principios físicos y los procedimientos para realizarlo son fáciles y simples de realizar. No obstante ser más complejo y el equipamiento más limitado, el ensayo de rayado ofrece varias ventajas sobre la identación normal [1, 2, 3]. Estas ventajas están dadas por el incremento de las tensiones plásticas y por tanto el volumen promovido en un solo experimento, esto provoca que tenga menos

sensibilidad a los errores experimentales. Se ha demostrado que materiales que tienen una dureza similar en el ensayo de identación normal, tienen un comportamiento totalmente diferente cuando se realiza el ensayo de rayado (Palkovic, S. 2014) . Por otra parte el ensayo de rayado es un método mucho más eficaz para determinar la adherencia de los recubrimientos con propiedades especiales (antifricción, anticorrosión, etc) sobre un sustrato determinado.

En nuestro país los equipos para realizar el ensayo de identación normal se encuentran habitualmente en los laboratorios de materiales, sin embargo no es común encontrar una máquina para la realización del ensayo de rayado. Esta limitación reduce la potencial aplicación de este ensayo, tanto en las investigaciones que se realicen como en la docencia que se imparte un nuestras universidades.

Producto de lo anteriormente expuesto el **Objetivo General** del presente trabajo es:

- Diseñar, fabricar y poner a punto una máquina que permita realizar el ensayo de rayado según la norma técnica ASTM G 171.

Objetivos específicos

- Realizar un estudio del estado actual de la aplicación del ensayo de rayado para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales.
- Hacer un análisis de la norma técnica ASTM G 171 que permita determinar los principales parámetros del ensayo de rayado, así como el campo de aplicación y los resultados que deben reportarse.
- Hacer el diseño de una máquina que permita la realización del ensayo de rayado según la norma técnica ASTM G 171, a partir de las condiciones materiales con que se cuenta.
- Fabricar la máquina diseñada a partir de materias primas recicladas y utilizando la base tecnológica disponible.
- Poner a punto la máquina fabricada, de forma tal que se garanticen los parámetros de ensayo establecidos por la norma técnica ASTM G 171.

CAPITULO I. Marco teórico

Los ensayos mecánicos que incluyen contacto son muy utilizados para determinar algunas de las propiedades fundamentales de los materiales. Estos se utilizan, sobre todo, en aquellos casos en los que no es posible obtener probetas para la realización de ensayos destructivos. Entre los ensayos más utilizados se encuentran el de indentación y el de rayado (scratch test).

1.1. Indentación

El ensayo de indentación es una herramienta importante para la caracterización de la superficie de materiales, tratamientos superficiales y recubrimientos. Es ampliamente utilizada, tanto para la medición de la dureza como para la investigación de aspectos en tribología (ASM HANDBOOK. 1992).

Este ensayo consiste en presionar un indentador de geometría determinada sobre la superficie de una muestra. La dureza H se evalúa a partir de la magnitud de la deformación plástica o permanente que queda sobre el material cuando el penetrador es retirado. La superficie deformada se determina midiendo directamente el área de la huella residual proyectada perpendicularmente a la aplicación de la fuerza y la dureza se calcula de acuerdo a la expresión:

$$H = \frac{P}{A} \qquad (1)$$

Donde P es la fuerza normal aplicada y A es el área residual de la huella cuando la carga es retirada.

El ensayo de indentación se realiza para determinar la respuesta plástica de los materiales. Durante el ensayo se observan dos modos diferentes de deformación, se presenta un hundimiento del material alrededor del penetrador (sink-in) o un apilamiento (pile-up) (Gómez Botero, M. 2005).

Fig.1.1. *Esquema del comportamiento del material bajo el penetrador en forma de hundimiento (a) y apilamiento (b).*

Los tipos de materiales y las condiciones para las cuales el apilamiento es más probable que ocurra han sido estudiados, deduciéndose que las propiedades fundamentales que inciden en su

aparición son la tensión de fluencia y el módulo de Young en la forma σ_y/E. En general, el apilamiento es mayor en materiales que presentan un valor bajo de esta relación y una capacidad pequeña o nula de endurecimiento por deformación, como por ejemplo los metales blandos trabajados en frío antes de la indentación. La capacidad de endurecimiento por deformación inhibe el apilamiento debido a que el material adyacente a la superficie del penetrador se endurece durante la deformación, constriñendo la fluencia del material hacia fuera de la superficie (Stilwell, N, 1961).

Estos ensayos suelen clasificarse de dos maneras: o bien según el rango de fuerzas aplicadas o bien según el método de medición empleado. El prefijo “macro” se utiliza para referirse a aquellos ensayos donde la carga es superior a 1 kgf; mientras que para el caso de ensayos en una escala “micro”, la carga será inferior a 0.5 kgf. Adicionalmente, algunos equipos son capaces de aplicar cargas tan bajas como los 0.01 kgf y, comúnmente, se refiere a ellos con el prefijo “nano”. Los ensayos Rockwell pertenecen a la escala macro, mientras que los ensayos Knoop se emplean a escala micro. El ensayo Vickers y el tipo Brinell, en donde se emplea una esfera, pueden usarse tanto en rangos micro como macro.

Gran cantidad de propiedades pueden determinarse a partir de los resultados suministrados por un ensayo de dureza. Entre estas propiedades se encuentran: resistencia a abrasión o desgaste, resistencia a deformación plástica, módulo de elasticidad, límite de elasticidad, ductilidad y tenacidad. Algunas de estas propiedades tienen relaciones numéricas con la dureza, y otras, como la tenacidad, están basadas en la observación de las grietas que envuelven a la huella de indentación (Esqué de los Ojos, D. 2006).

1.2. Ensayo de rayado

Aunque los ensayos de indentación son considerados actualmente para la medición de la dureza, el ensayo de rayado se utilizó inicialmente con este fin. La primera escala para la medición de la dureza fue establecida en 1820 por Frederich Mohs y consistía en una serie de diez minerales que van del talco (número 1) al diamante (número 10). Las escalas para medir dureza mediante el rayado precedieron a los ensayos de indentación por varios años, hasta que estos últimos se normalizaron y se convirtieron en normas internacionales para medir la dureza de los materiales (Mohs,F,2007). El ensayo de rayado continúa utilizándose como método que se aplica en investigaciones que estudian el mecanismo de desgaste abrasivo en la superficie de materiales y como el principal ensayo para evaluar la adhesión y el coeficiente de desgaste en recubrimientos (Kareer, Anna. 2010).

1.2.1. Ensayo de rayado macroscópico

El ensayo de rayado consiste en desplazar un penetrador, con una geometría específica, sobre la superficie de una probeta a velocidad controlada y con una fuerza normal conocida. Este ensayo puede realizarse de dos formas fundamentales teniendo en cuenta la forma de aplicación de la carga, puede aplicarse la fuerza de manera incremental a medida que se desplaza el penetrador, o se puede aplicar toda la carga al inicio y después realizar el desplazamiento. Para verificar la resistencia a la abrasión se recomienda aplicar la carga al inicio y realizar el desplazamiento después, se aplica a diferentes materiales y se comparan las huellas dejadas (Petersen, D., Link, R. 1997). El ancho de la huella es un valor que se puede medir por vía óptica después de realizado el ensayo. De la misma forma, el mecanismo de deformación puede ser comparado de forma cualitativa (Bull, S. 1997). Este ensayo también es utilizado regularmente para valorar la fuerza de adherencia de los recubrimientos con el substrato. En la configuración normal del ensayo, el penetrador se desliza sobre la superficie recubierta mientras se incrementa la carga hasta que ocurre el fallo. La carga en el momento del fallo del recubrimiento se toma como la carga crítica. Para el ensayo de rayado macroscópico se utiliza el penetrador tipo Rockwell, cónico y con un radio en la punta de 200μm (Fig. 1.2).

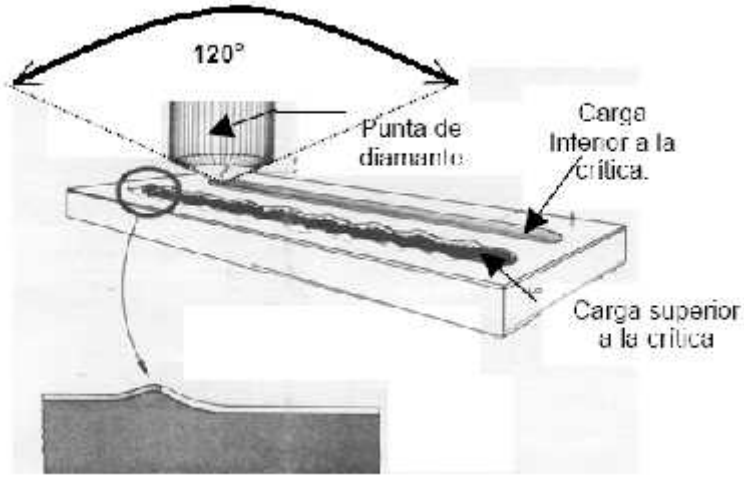


Fig.1.2. *Representación esquemática del penetrador y de la huella que se obtiene con cargas menores y mayores a la crítica (López Marrero, G. 2003).*

Este ensayo tiene la limitante de que la carga crítica no depende solo de la fuerza adhesiva del recubrimiento con el substrato, sino que también influyen otros factores intrínsecos como la magnitud de la carga aplicada, la velocidad y la geometría del penetrador; también influyen condiciones extrínsecas como pueden ser las propiedades del material y el coeficiente de fricción (Mohs, F. 2007).

El comportamiento de la fricción durante el ensayo de rayado puede ser investigado mediante la medición de la fuerza tangencial. El coeficiente de fricción puede ser determinado como la razón de la fuerza lateral y la fuerza normal durante el rayado. El gráfico de la fuerza de fricción contra la distancia de rayado puede indicar diferentes tipos de fallas; pequeñas oscilaciones en la medición de la fricción pueden corresponder a grietas mientras que grandes variaciones pueden ser motivo del desprendimiento de material. Un punto de inflexión grande en el gráfico puede indicar el inicio de la falla total del recubrimiento (Bellido, V. 1995).

1.2.2. Instrumentación del ensayo de rayado

En el ensayo de rayado, al igual que en el de indentación, se pueden presentar dos formas de deformación, puede aparecer hundimiento o apilamiento alrededor del penetrador, basado en la magnitud de la tensión elástica (σ_y/E) y el exponente de la tensión de endurecimiento (n). Esto ha permitido la determinación de funciones que relacionan las dimensiones del perfil de la huella del rayado con la tensión de fluencia (σ_y) y el exponente de la tensión de endurecimiento (n) para los materiales que cumplen con la ley de endurecerse al aparecer las deformaciones plásticas(Bellemare,S,2010). El procedimiento propuesto es aplicable a todos los materiales que cumplen con la ley mencionada y en los que predominen las deformaciones plásticas. Específicamente, los materiales que siguen la ley de elasticidad de Hooke y la fluencia de Von Mises teniendo además un comportamiento isotrópico al alcanzar la tensión que provoca deformación plástica, cumplen con la siguiente ecuación constitutiva:

$$\pm = \pm_y \left(1 + \frac{E}{\pm_y} £_p \right)^n \qquad (1.1)$$

Donde ε_p es la verdadera tensión plástica equivalente, σ_y es la tensión de fluencia inicial, E el módulo de Young y n es el exponente de la tensión de endurecimiento (Bellemare, S., Dao, M. 2008).

Durante el contacto ambos, el indentador y el material que es rayado, experimentan tensiones elásticas que pueden ser consideradas utilizando un módulo elástico efectivo que se define como:

$$E^* = \left[\frac{E}{(1-\neg^2)} + \frac{E_i}{(1-\neg_i^2)} \right] \qquad (1.2)$$

Donde E_i y υ_i son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del indentador. Por lo tanto, la distribución de tensiones y deformaciones pueden ser definidas por sus constantes elásticas, la tensión de fluencia y el exponente de la tensión de endurecimiento.

Durante el ensayo de rayado, el indentador es presionado sobre el material ensayado con una fuerza normal conocida, F_n, similar al ensayo de indentación normal. Conjuntamente una fuerza tangencial, F_t, es aplicada paralelamente a la superficie del material ensayado. Al incrementar la carga lateral el penetrador comienza a hundirse, y al desplazarse la parte trasera del indentador queda libre y solo la mitad anterior soporta la carga aplicada. Como el material desplazado fluye a lo largo de la superficie del cono, este comenzará a subir sobre la superficie no deformada. Eventualmente el penetrador alcanza una profundidad que se mantendrá constante con respecto a la superficie no deformada. Bajo esas condiciones, el perfil de la huella del rayado tendrá una profundidad constante, h_r, la altura del apilamiento (pile-up) sobre la superficie no deformada, h_p, y el ancho , $2a_r$, que es el diámetro del perfil medido entre las crestas del apilamiento, h_p *(Mohs,F,2007).* Las dimensiones características de la huella y la fuerza normal aplicada pueden ser usadas para derivar la razón de apilamiento (r_p) y la dureza normal de rayado (H_s):

$$r_p = \frac{h_p}{h_r} \tag{1.3}$$

$$H_s = \frac{F_n}{\left(\frac{®}{2}\right)a_r^2} \tag{1.4}$$

Por definición, la dureza normal de rayado es determinada usando solamente la mitad del área aparente de contacto porque la carga es soportada solamente por la parte frontal del indentador mientras se desliza. La correlación presentada en (Bellemare, S., et al. 2008) es apropiada solamente para materiales que presentan apilamiento de material durante el ensayo de rayado, porque en los materiales que presentan hundimiento de material es muy complicado medir el ancho de la huella ($2a_r$).

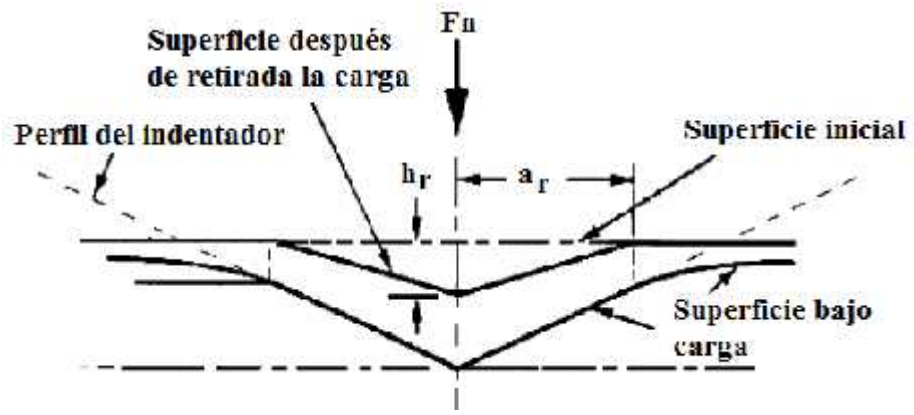


Fig.1.3. *Representación esquemática del penetrador y del perfil de la huella*.

Los parámetros identificados en las ecuaciones (1.2), (1.3) y (1.4), así como la fricción adhesiva entre el penetrador y el material (μ_a), se introducen en las funciones para obtener la tensión de fluencia y el exponente de la tensión de endurecimiento del material ensayado. Estas funciones son derivadas en (Bellemare ,S., et al. 2008) mediante el uso del Método de los Elementos Finitos y tienen la siguiente forma:

$$\prod\sim(H_s, E^*, n, \ll_a) = \left(\frac{\pm_y}{E^*}\right) = \left[\left(\frac{H_s}{E^*}\right) \Big/ \left(\sim 1(n) + n\Gamma_{\sim 1}(\ll_a)\right)\right]^{\left[\frac{1}{(1+\sim 2(n)+\Gamma_{\sim 2}(\ll_a))}\right]} \tag{1.5}$$

$$\Pi\ (\Pi_{\sim}, n, \ll_a) = \left(\frac{h_p}{h_r}\right) = \frac{\Pi_{,RP}(n)\Gamma_{,RP}(\ll_a)}{\left[1+\left(\frac{\Pi_{\sim}}{X\ (n)\Gamma_X\ (\ll_a)}\right)\right]^{p\ (n)}} \tag{1.6}$$

Estas ecuaciones son aplicables para una gama amplia de propiedades de materiales que se encuentran entre los siguientes:

$$\left(4.8x10^{-5}\right)n^{-1.22} \langle \left(\frac{\pm_y}{E^*}\right) \rangle \left(5.5x10^{-2}\right)e^{-5.11\cdot n} \quad donde\ 0 \le n \le 0.5 \tag{1.7}$$

1.2.3. Papel de la fricción en el ensayo de rayado

Durante el ensayo de rayado, el coeficiente total de fricción (μ_{total}), este se encuentra mediante la razón de la fuerza tangencial (F_T) y la fuerza normal (F_N). El coeficiente total de fricción puede ser descompuesta en dos términos:

$$«_{total} = \frac{F_T}{F_N} = «_a + «_p \quad (1.8)$$

Donde μ_a es la fricción adhesiva por la interacción local entre el penetrador y el material base en el contacto normal, y μ_p es la fricción en el proceso de desplazamiento entre el metal base y la parte frontal del indentador (Palkovic, S. 2014). La fuerza adhesiva (μ_a) es gobernada por la relación entre las fuerzas tangenciales y normales por la ley de Amonton:

$$«_a = \frac{q}{p} \quad (1.9)$$

Donde *q* es la tracción tangencial y *p* es la tracción normal. La fricción adhesiva depende de los materiales en contacto y de las condiciones físicas de la interface como la lubricación, asperezas y velocidad relativa. Para la medición experimental de μ_a, se hacen múltiples ralladuras sobre la misma área con el indentador esférico causando que la fricción producto del desplazamiento (μ_p) sea cero, y la fricción total, $\mu_{total} = \mu_a$. En general, la fricción producto del desplazamiento depende de la geometría del indentador, de la profundidad de penetración y de las propiedades del material(Palkovic,S,2014). Por lo tanto, para un indentador cónico, para materiales con comportamiento rígido-plástico y asumiendo una presión de contacto constante la fuerza de fricción producto del desplazamiento se puede determinar como:

$$«_p = \frac{2}{®}\cot\left(\frac{¤}{2}\right) \quad (1.10)$$

Donde $\varphi/2$ es la mitad del ángulo del cono del indentador (Palkovic, S. 2014). Esto es limitado para materiales con comportamiento rígido-plástico ($\sigma_y/E^* \leq 0.2$) y en ausencia de fricción adhesiva. Si se produce un crecimiento significativo de μ_a y μ_p se obtendrán resultados significativamente desviados de los previstos en la ecuación (1.10) (Palkovic, S. 2014).

Habiendo definido los parámetros que relacionan la respuesta del desplazamiento y la fricción durante el ensayo de rayado, se muestran a continuación un grupo de observaciones obtenidas mediante la experimentación y la simulación numérica (Palkovic, S. 2014):

- Al incrementarse μ_a causará un aumento de μ_p si se incrementa la profundidad de penetración.
- Para $n < 0.35$, un incremento en μ_a provoca un decrecimiento en la dureza de rayado. Con el aumento de la profundidad del rayado, aumenta el ancho de la huella, decreciendo la

dureza de rayado como se muestra en la ecuación (1.4). En (Wrendenberg, F., Larsson,P. 2009) se plantea que la dureza de rayado disminuirá para cualquier valor del exponente de la tensión de endurecimiento, sin embargo esta obsevación no se validó a través de la comprobación experimental, como los resultados de (Bellemare ,S.et al. 2008).

- Para todos los valores de n, un incremento de μ_a provoca un incremento en la altura del apilamiento (pile-up) debido a una mayor penetración del indentador y un incremento en las fuerzas de interacción a lo largo de la cara del penetrador (Bellemare ,S.et al. 2008). Para grandes valores de μ_a, el aumento de la altura del pile-up y de las fuerzas de interacción puede causar la cortadura o maquinado del material, lo que evitaría la correcta medición de la respuesta dúctil que puede obtenerse (Blach, A., Kopalinsky, E. 1988). En (Bellemare ,S. et al. 2008) se limita el coeficiente de fricción a 0.3 si $n \leq 0.2$, 0.2 si $n < 0.35$ y 0.3 si $n > 0.35$, para prevenir inestabilidades en la simulación numérica.
- Para altos valores del coeficiente total de fricción, las fuerzas cortantes necesarias para rayar el material dan como resultado significativas tensiones residuales que pueden provocar la fractura del materia 1(Wrendenberg, F.et al. 2007), (Akono, A., Randall, N. 2012). Estas observaciones han llevado a que el ensayo de rayado sea utilizado como un método para determinar la resistencia a la fractura de varios materiales (Akono,A. et al. 2012).

1.2.4. Tendencias presentadas durante el ensayo de rayado

Además de la fricción existen otros parámetros que afectan el comportamiento del ensayo de rayado. Las siguientes tendencias han sido observadas durante la realización y simulación de los ensayos de rayado, las que permiten una mejor comprensión del proceso físico de deformación durante este ensayo:

- Un decrecimiento del exponente de la tensión de endurecimiento (n) causa un incremento en el apilamiento (pile-up). Esto es porque con menos tensión de endurecimiento en la zona de contacto es mayor la deformación tangencial de material al ser penetrado, y más material es desplazado alrededor del penetrador. Con más tensión de endurecimiento, la deformación se distribuye a un volumen mayor de material fuera de la interfaz del contacto (Bellemare , S. et al 2007).
- Un incremento en la relación (σ_y/E^*) provoca un decrecimiento en la altura del apilamiento (pile-up) porque se aumentan los niveles de las tensiones elásticas (Bellemare , S. et al. 2007).

- La respuesta del pule-up es mucho más dependiente de la tensión de endurecimiento del material que de la relación (σ_y/E^*). Además de eso, la tensión de fluencia afecta la magnitud de las tensiones plásticas alrededor del penetrador, mientras la tensión de endurecimiento afecta el material que se encuentra debajo del mismo (Bellemare ,S,2008).
- El modo de deformación cambia de apilamiento a hundimiento cuando el exponente de la tensión de endurecimiento crece de n = 0.5 y la relación $\sigma_y/E^* > 0.005$ (tensión elástica significativa) (Bellemare , S. et al. 2008).
- Un penetrador con un ángulo menor aumenta el riesgo del desprendimiento de partículas de material, pero si este ángulo aumenta se reduce la magnitud de las deformaciones plásticas (Bellemare , S. et al. 2010). Esto coincide con los modelos analíticos y los resultados experimentales obtenidos por otros (Blach, A.et al. 1988).

1.3. Comparación entre los ensayos de indentación y rayado

Después de establecido el modelo teórico y la instrumentación del ensayo de rayado, se puede ahora comparar con el método de indentación normal instrumentada y resaltar las ventajas del ensayo de rayado, y justificar de esta forma el diseño y fabricación de una máquina que permita realizar el ensayo de rayado según establece la norma ASTM G 171(ASTMG171,2009).

1.3.1. Sensibilidad y exactitud de las funciones analíticas

Los algoritmos propuestos en (Dao ,M., Chollacoop, N. 2001) para la indentación normal, fueron verificados mediante ensayos y se encontraron promediando 6 resultados en indentaciones de la tensión de fluencia y de la dureza, encontrándose ambos dentro del 10% del valor real. Sin embargo, las funciones para el análisis reverso mostraron ser muy sensibles a los parámetros de entrada, con un 4% de variación en estos produjeron un 96% de cambios en los resultados. Además, los algoritmos predicen una única solución para un número limitado de materiales con $n \leq 0.3$, y $\sigma_y/E^* < 0.03$ (Bellemare ,S. et al. 2007).

El algoritmo para el ensayo de rayado propuesto en (Bellemare , S. et al. 2010) muestra ser menos sensible al error experimental, y abarca un mayor número de propiedades de material como se muestra en la ecuación (1.7). Una variación del 5% en una de las propiedades de entada en las ecuaciones (1.5) y (1.6) provoca un error máximo de 22%. Además, los resultados experimentales mostraron que 20 de 22 casos cubren un amplio rango de propiedades del material al compararlos con los resultados de los ensayos de tracción (Bellemare , S. et al. 2010).

A lo planteado anteriormente se puede agregar que, un único ensayo de rayado puede ser utilizado para obtener los datos de cientos de puntos de indentación, estos pueden promediarse garantizándose así la confianza estadística de los resultados. Esto permite que el ensayo de rayado sea una solución más rápida que la indentación, que requiere la realización de ensayos múltiples. Finalmente, los algoritmos del ensayo de rayado están mejor preparados para predecir la tensión de endurecimiento por deformación plástica del material. Esto es porque el comportamiento del apilamiento (pile-up) durante el ensayo de rayado tiene una fuerte dependencia de *n*. Otra definición de *n* es la verdadera tensión a la que ocurre la inestabilidad plástica (Hertzberg, R. 1996) . En el ensayo de tracción, esta es la tensión plástica que se localiza cuando se produce la formación del cuello en la probeta. Por consiguiente, una buena aproximación de *n* permite una relativa comparación de la ductilidad de los materiales, lo que es un componente crítico en la ingeniería para el diseño y la verificación de estructuras existentes.

1.3.2. Tensiones representativas

Unos conceptos que fueron desarrollados desde los inicios de las investigaciones sobre indentación normal fueron los de tensión (σ_r) y deformación representativa (ε_r). Estos valores son usados para relacionar las propiedades de tensión-deformación del material mediante la indentación. Para el trabajo de los materiales con comportamiento totalmente plástico ($n = 0$), en (Tobor, D. 1956) se establece la siguiente relación para determinar la dureza por indentación:

$$H_N = C \pm_y \tag{1.11}$$

Donde σ_y es la tensión de fluencia, y C es una constante que es aproximadamente 3 para materiales con comportamiento rígido-plástico y depende de la geometría del indentador (Tabor, D,1956). Esta relación se derivó a partir de la observación de que cerca de las 2/3 partes de la presión principal durante el contacto normal es presión hidrostática, la que no contribuye a inducir el flujo plástico. En (Tobor, D. 1956) se determina la constante C para varios materiales y geometrías del indentador y se establece que esa relación se puede extender a los materiales que sufren endurecimiento ($n > 0$) si se reemplaza la tensión de fluencia por la tensión representativa (σ_r):

$$H_N = C \pm_r \tag{1.12}$$

Usando esta relación se determinó que la deformación representativa producida por la indentación normal es independiente del exponente de la tensión de endurecimiento (n) y está entre un 8 y un 10% (Tobor,D.1956). Siguiendo un criterio similar en (Dao, M.et al 2001) se determina la deformación representativa de 8.2% basado en la modelación numérica de 76 parámetros diferentes del material. Comparando estas deformaciones representativas para la indentación y el ensayo de rayado, en [20] se determinan deformaciones representativas del 33.6% para materiales con $n \leq 0.2$, $n \leq 0.35$ y $\sigma_r/E < 0.018$. Por consiguiente, la deformación representativa del material producida durante un solo ensayo de rayado es 3 ó 4 veces mayor que durante el ensayo de indentación, permitiendo esto una mejor comprensión de la respuesta plástica del material.

1.3.3. Correlación de la dureza de rayado con la dureza de indentación

En(Tobor,D,1956) se deriva una proporción entre la dureza de rayado y la dureza de indentación de 1.2. Sin embargo, estudios posteriores han demostrado que no existe una simple correlación entre la dureza de indentación y la de rayado debido a los diferentes efectos de la fricción y los efectos más significativos del endurecimiento por deformación en la respuesta del apilamiento (pile-up). En (Wrendenberg,F,2007) se usa simulación numérica para determinar que la relación entre la dureza de indentación y la de rayado converge a 1 para materiales con comportamiento rígido-plástico en ausencia de fricción adhesiva y baja deformación de endurecimiento ($n \leq 0.17$). Resultados experimentales muestran que esta relación está entre 1 y 1.75 aproximadamente (Wrendenberg, F.et al. 2009). En (Pasad, A., Dao, M. 2009) se reporta que la relación varía en un rango entre 1.6 y 0.58, y usan resultados numéricos sin fricción adhesiva para encontrar valores entre 1.2 y 1.6 para varios materiales con diferentes grados de plasticidad. Basándose en estos resultados, se puede plantear que no existe una correlación certera entre la dureza de rayado y la dureza de indentación. Sin embargo, usando una aproximación similar a la utilizada en (Bellemare, S. et al 2007), podrían desarrollarse algoritmos que permitan relacionar la deformación de endurecimiento con la tensión de fluencia inicial en los experimentos de dureza por indentación normal. Este trabajo puede proporcionar beneficios a los investigadores que quieran comparar el método del ensayo de rayado con otras técnicas de ensayos no destructivos.

CONCLUSIONES CAPÍTULO I

- Los ensayos mecánicos que incluyen contacto son muy utilizados para determinar propiedades fundamentales de los materiales sin necesidad de realizar ensayos destructivos, como por ejemplo el ensayo de tracción. Los ensayos por contacto más utilizados son los de indentación normal y el ensayo de rayado.
- El ensayo de indentación normal es más utilizado en la actualidad para la medición de la dureza superficial de los materiales. Aunque también puede utilizarse para obtener otras propiedades de la superficie de los materiales, tratamientos superficiales y recubrimientos con propiedades especiales.
- El ensayo de rayado se utiliza como método que se aplica en investigaciones que estudian el mecanismo de desgaste abrasivo en la superficie de materiales y como el principal ensayo para evaluar la adhesión y el coeficiente de desgaste en recubrimientos con propiedades especiales.
- Al realizar una comparación entre los ensayos de indentación normal y rayado se puede concluir que, aunque las máquinas utilizadas en la realización del primero son más simples, se justifica la fabricación de una máquina para la realización del ensayo de rayado por la mayor sensibilidad y exactitud de los resultados que se obtienen. Además esta máquina permitirá un aumento en la calidad de las investigaciones tribológicas que se pueden realizar.

CAPITULO II. Valoración de la norma ASTM G 171

Introducción

En este capítulo se hace el análisis de lo estipulado en la norma técnica ASTM G 171 con el objetivo de definir las partes fundamentales de la máquina para realizar el ensayo de rayado. De la misma manera se determinarán los parámetros de trabajo como son: velocidad de deslizamiento relativo entre la probeta y el penetrador, longitud y forma de la huella y carga normal que se debe aplicar. Todo esto permitirá establecer la forma y las dimensiones de la máquina que se pretende fabricar.

2.1. Alcance

Este método de ensayo cubre los procedimientos de laboratorio para determinar la dureza por rayado de la superficie de materiales sólidos. Dentro de ciertas limitaciones, este método de ensayo es aplicable a metales, cerámicas, polímetros y superficies recubiertas. El ensayo de rayado, como se describe en la norma ASTM G 171, no debe entenderse que es usado para determinar la adherencia de los recubrimientos solamente, ni usando un indentador específico.

Se consideran los valores en el Sistema Internacional de unidades. No se utilizan otras unidades de medida dentro de esta norma.

Esta norma puede incluir variados materiales, operaciones y equipamientos. No tiene el propósito de establecer lo relacionado con la seguridad, ni nada asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer condiciones de seguridad apropiados para la salud y determinar las limitaciones y regulaciones de su aplicabilidad antes de usarla.

2.2. Documentos de referencia

Norma ASTM G 40: Terminología referente a desgaste y erosión.

Norma ASTM G 117: Guía para el cálculo y reporte de las mediciones de precisión ínter laboratorios.

2.3. Terminología

Para la definición de los términos que se aplican en esta norma ver la ASTM G 40. Se tratarán los términos que son específicos de esta norma.

2.3.1. Número de dureza al rayado: Cantidad expresada en unidades de fuerza por unidades de área. Esta caracteriza la resistencia de la superficie del sólido a la penetración con desplazamiento del indentador con una configuración determinada, bajo fuerza normal y velocidad constantes. Se determina:

$$HS_P = \frac{k\,P}{w^2} \qquad (2.1)$$

Donde:

HS_P = número de dureza al rayado,

k = constante geométrica,

P = fuerza normal aplicada,

w = ancho de la huella.

La constante k puede incluir los factores de conversión para expresar HS_P en GPa, si P está en gramos-fuerza y w en µm, k = 24.98.

2.3.2. Fuerza de rayado: es la fuerza que se opone al movimiento relativo entre el indentador y la superficie que está siendo rayada, y la misma es perpendicular a la fuerza normal aplicada en el penetrador.

2.3.3. Coeficiente de arrastre del indentador: en el ensayo de rayado, es la relación adimensional entre la fuerza de rayado y la fuerza normal aplicada al indentador, se determina:

$$D_{SC} = \frac{F_{SCR}}{P}$$

Donde:

D_{SC} = coeficiente de arrastre del indentador,

F_{SCR} = fuerza de rayado,

P = fuerza normal.

2.4. Resumen del procedimiento de ensayo

Este ensayo consiste en la realización de una ralladura en una superficie sólida por un indentador de diamante con una geometría especificada, a lo largo de un recorrido determinado, con una fuerza normal constante y con velocidad constante. El promedio del espesor de la huella dejada se determina y ese valor se usa para calcular el número de dureza al rayado en unidades de presión.

Como una opción, se puede medir la fuerza de rayado durante la realización del ensayo y se puede usar para calcular el coeficiente de arrastre del indentador, que es una medida adimensional de la resistencia de la superficie ensayada a la deformación por el movimiento tangencial del indentador.

Este ensayo se realiza normalmente en condiciones sin lubricación y a temperatura ambiente; no obstante se puede realizar con diferentes condiciones de lubricación y elevadas temperaturas. Esta norma permite la realización del ensayo en ambas condiciones siempre y cuando las condiciones de ensayo sean reportadas totalmente.

El efecto de la humedad ambiental y otras condiciones atmosféricas pueden afectar los resultados en dependencia de la sensibilidad del material ensayado a las condiciones ambientales. Si tales efectos son detectados durante la realización del ensayo, deben tomarse medidas para controlar las condiciones ambientales y reportar las mismas.

2.5. Importancia y uso del procedimiento

Este método de ensayo consiste en la medición de la resistencia de las superficies sólidas a la deformación permanente bajo la acción de un penetrador. Consiste en presionar un indentador y desplazarlo sobre una superficie y la huella resultante se utiliza para calcular cierto número de dureza. El número de dureza de rayado, al contrario del número de dureza cuasi-estático, involucra una combinación diferente de propiedades de la superficie porque el indentador, en este caso un penetrador de diamante, se mueve tangencialmente a lo largo de la superficie. Por consiguiente, el estado tensional que aparece bajo el penetrador en el rayado difiere del producido en la indentación cuasi-estática. Los números de dureza de rayado son, en principio, una forma más apropiada de medir la resistencia al daño de la superficie del material en procesos como la abrasión producto del contacto de dos cuerpos que los números de la indentación cuasi-estática.

Este método de ensayo es aplicable a una gama amplia de materiales. Éstos incluyen metales, aleaciones, y algunos polímeros. El criterio principal es que en el proceso de rayado se produce una huella medible en la superficie que está siendo analizada, sin causar una fractura catastrófica ni un gran daño en la superficie del material. El dañado severo de la superficie analizada, tales como que el ancho de la huella no es claramente medible o que los bordes se cortan o se tuercen, invalida el uso de este método para determinar el número de dureza al rayado. Partiendo de que el grado y el tipo del daño superficial en el material pueden variar con la carga aplicada, la aplicabilidad de este ensayo en ciertos tipos de materiales puede ser limitada por la máxima carga a que pueden hacerse las mediciones del ancho de la huella válidas.

La resistencia de un material a la abrasión por un solo punto puede ser afectada por su sensibilidad al estado deformacional en el proceso de deformación. Por consiguiente, este ensayo se desarrolla a bajas velocidades de desplazamiento del penetrador. El uso de una baja velocidad de rayado minimiza también el efecto del calentamiento friccional.

Este ensayo usa las medidas del ancho de la huella resultante después de retirar el penetrador para calcular el número de dureza al rayado. Por consiguiente, este refleja la deformación permanente resultante del rayado y no el estado instantáneo de la combinación de las deformaciones elásticas y plásticas de la superficie.

2.6. Máquina de ensayo

2.6.1. Descripción general

La máquina consiste en un penetrador rígido y un dispositivo porta probetas, el sistema para la aplicación de la carga normal sobre el indentador mientras este se desplaza por la superficie de la probeta a velocidad constante y el equipamiento para medir el ancho de la huella. Opcionalmente, el aparato puede equiparse con un sensor para medir la magnitud de la fuerza de rayado.

El indentador será cónico con ángulo de 120 ± 5º y el cono terminará en una punta esférica con 200 ± 10 μm de radio. El material de la punta debe ser diamante. Un radio de la punta menor, producirá mayores tensiones de contacto bajo una fuerza normal dada. Si se utiliza un radio diferente al establecido en la norma, se debe indicar esto al reportar los resultados, y se declarará el radio del penetrador utilizado.

El proceso de desplazamiento se puede obtener moviendo la probeta y manteniendo fijo el indentador o manteniendo fija la probeta y moviendo el indentador, esto siempre a velocidad y fuerza normal constante. La estructura debe ser lo suficientemente rígida para resistir las cargas normales, laterales y tangenciales asociadas al proceso de rayado sin que aparezcan deflexiones elásticas o plásticas indebidas. El desplazamiento del penetrador puede ser en línea recta o en forma angular.

2.6.2. Sistema para la medición del ancho de la huella

Se debe establecer los medios para la medición del ancho de la huella de rayado. Este puede consistir en cualquier sistema óptico que permita aumentar la visión de la huella de forma tal que se pueda medir el ancho con precisión. El sistema debe ser capaz de medir el ancho de la huella con una precisión de por lo menos 2%. Por ejemplo, la resolución requerida para medir una huella de 50 μm de ancho promedio con un microscopio óptico será (0.02 x 50 μm) = 1.0 μm o mejor. Alternativamente, imágenes fotográficas o videos pueden ser usados siempre que las ampliaciones se calibren de forma apropiada.

2.6.3. Fuerza de rayado (opcional)

Se puede utilizar una celda de carga u otro sensor de fuerza para la medición de la fuerza de rayado. La norma no especifica el método para la medición, solo plantea que el sensor utilizado debe ser capaz de ser calibrado en la dirección de esta fuerza y en línea con el punto de contacto entre el penetrador y la superficie.

2.7. Calibración

Las partes de la máquina que requieren ser calibradas son: el sistema de aplicación de la fuerza normal, la velocidad de desplazamiento del indentador y opcionalmente el sensor de la fuerza de rayado.

La fuerza normal que se aplica sobre el indentador mientras se desplaza por la superficie se calibrará de manera tal que esta tenga una variación permisible del 1%. Por ejemplo una fuerza normal de 1 N puede ser aplicada con una exactitud de ± 0.01 N. Los medios para calibrar la máquina serán determinados por el diseñador, sin embargo el método para calibrar la aplicación de la carga se deberá reportar en el informe.

La velocidad del indentador sobre la superficie *s* puede calibrarse de cualquier manera conveniente, como cronometrar el tiempo *t* requerido para producir una huella de longitud *L*. Entonces:

$$s = \frac{L}{t} \qquad (1)$$

El sensor para medir la fuerza de rayado debe ser calibrado periódicamente en la dirección de la fuerza, y tan cercano como sea posible en la línea del punto de contacto entre el penetrador y la superficie de la probeta. El intervalo para la calibración se determinará por el usuario y debe garantizar lecturas exactas de la fuerza y compensar cualquier tendencia que pueda presentar la señal electrónica.

2.8. Procedimiento

2.8.1. Preparación de la probeta

La probeta para el ensayo se preparará de una manera tal que permita la realización del mismo correctamente, se pulirá para facilitar la observación y una correcta medición del ancho de la huella. Una superficie puede ser impropia para el ensayo de rayado si su rugosidad o porosidad es tal que los bordes de la huella son discontinuos o dentados, o si el penetrador salta en su desplazamiento. En una condición de pulido, la superficie estará tan libre como es posible de los defectos que pueden dejar los equipos de preparación y evitar la aparición de grietas y el desprendimiento de granos. Rugosidades superficiales de 0.02 a 0.05 μm Ra son típicos de las superficies pulidas. Las superficies pueden ser ensayadas al rayado sin preparación siempre que no se presenten las situaciones descritas anteriormente.

2.8.2. Limpieza de la probeta

El ensayo de rayado se le puede realizar a diferentes tipos de materiales, por ese motivo no se puede dar un tratamiento específico para la limpieza de las probetas. Estas se limpiarán de una manera tal que la superficie esté libre de virutas, grasa, huellas digitales u otros contaminantes.

Metales y aleaciones pueden limpiarse con solventes no polares. Los plásticos requerirán un limpiador alternativo para lentes u otros similares. No deben usarse solventes o limpiadores que alteren las propiedades de las superficies a ensayar. El método de limpieza, si se utiliza alguno, debe ser descrito en el reporte.

2.8.3. Inspección del indentador

La punta del indentador debe ser inspeccionada con un microscopio u otro método de inspección topográfico para asegurar que no hay ningún defecto (grietas, virutas) o material adherido producto del proceso de fabricación o de ensayos anteriores. El penetrador se limpiará con una tela suave mojada en acetona o con otro solvente. Residuos de aceite en el penetrador puede lubricar la superficie y reducir el ancho de la huella, lo que llevaría a obtener un número de dureza de rayado mayor que el real. Indentadores defectuosos pueden incrementar la fuerza de rayado y producir estrías en el fondo de la huella.

2.8.4. Fuerza normal

La fuerza normal se seleccionará de una magnitud tal que permita obtener una huella que se pueda medir sin dificultad, pero esta fuerza no debe ser tan grande que provoque fractura, desprendimiento de material, arranque del recubrimiento, o cualquier otro dañado serio de la superficie. Se pueden utilizar series de rayados a diferentes fuerzas normales para evaluar la resistencia del material al incremento de las tensiones localizadas.

2.8.5. Longitud de la huella y velocidad del ensayo

La longitud de la huella debe ser por lo menos de 5 mm. Esta huella no necesita ser linear, puede ser en forma de arco, como sería el caso de las máquinas que tienen un diseño rotatorio.

La velocidad del ensayo debe ser constante a lo largo de la zona donde se realizarán las mediciones. La velocidad puede variar en el rango de 0.2 a 5.0 mm seg^{-1}.

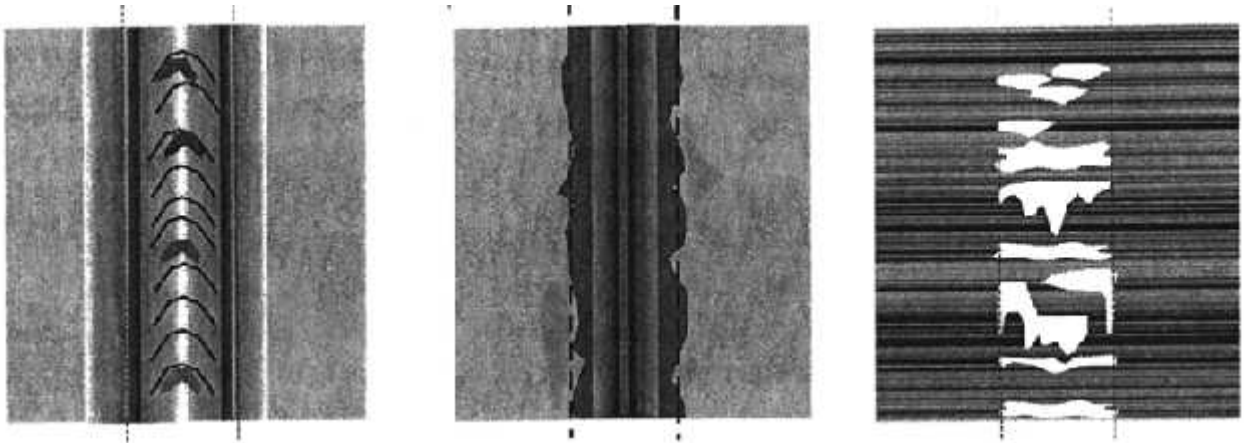
2.8.6. Conducción del ensayo

Primeramente se debe asegurar que la máquina esté nivelada y que el indentador se encuentre perpendicular a la superficie a ensayar. El penetrador se debe bajar suavemente para aplicar la carga, evitando así daños producto del impacto. Activar el mecanismo para garantizar la longitud de la huella deseada. Retirar el penetrador de la superficie después de terminar el ensayo. Para repetir el ensayo se debe tomar otra zona de la misma probeta separada al menos 5 veces el ancho de la primera huella y repetir las operaciones para obtener otra huella paralela a la primera. Se repetirá tantas veces como sea necesario, pero se deben realizar al menos tres ensayos para cada valor de fuerza normal.

2.8.7. Medición del ancho de la huella

Usando un microscopio u otro equipo de amplificación de imagen calibrado, medir el ancho de cada huella en tres zonas equidistantes a lo largo de su longitud. El ancho de la huella se determinará ópticamente como se muestra en la Fig. 2.1. No debe medirse el ancho de la huella cerca del inicio ni el final de la misma para eliminar el efecto de la aceleración y desaceleración del penetrador.

Las características de la superficie que será ensayada, como son la rugosidad superficial, el color, grado de difusión de la luz, magnitud de la deformación plástica y reflexión pueden dificultar la localización exacta de los bordes de la huella. En general las huellas finas presentan una mayor dificultad en la medición del ancho que las más anchas. En muchos casos es necesario usar métodos especiales de iluminación, como son la iluminación oblicua, luz polarizada o microscopios con interferencia diferencial que provoca suficiente contraste para medir el ancho de la huella ópticamente. El uso de métodos especiales de iluminación para la medición del ancho debe ser reportado.



a) b) c)

Fig.2.1. *Medición del ancho de la huella en diferentes situaciones. a) Material plástico que presenta reflexión y sombras. b) Metal con bordes irregulares. c) Material cerámico con discontinuidad en la huella* (Bellemare, S.et al. 2007).

2.9. Cálculos

2.9.1. Número de dureza de rayado

El número de dureza de rayado se calcula dividiendo la fuerza normal aplicada por el área proyectada del contacto en el rayado. El área proyectada será entonces un semicírculo que tendrá un diámetro igual al ancho de la huella como se muestra en la Fig.2.2. Entonces:

$$HS_P = \frac{8P}{® w^2} \qquad (2)$$

Donde:

HS_P = número de dureza de rayado (Pa),

P = fuerza normal (N),

w = ancho de la huella (m).

Si la fuerza se aplica directamente por un peso muerto (*m)* en gramos y el ancho de la huella (*x*) es medido en μm, entonces la ecuación (2) dará el número de dureza de rayado en GPa y toma la forma:

$$HS_P = 24.98\frac{m}{x^2} \qquad (3)$$

Fig.2.2. *Se asume que el área proyectada es un semicírculo en la vista superior* (Bellemare, S. et al. 2007)**.**

Como el estado tensional en la punta del penetrador es función de la geometría del contacto y de la fuerza aplicada, la magnitud del número de dureza de rayado depende entonces del radio de la punta y de la fuerza normal. Como la punta del indentador se establece en la norma no es necesario reportarlo.

2.9.2. Coeficiente de arrastre del indentador

El coeficiente de arrastre del indentador (D_{SC}) es la relación adimensional entre la fuerza de rayado y la fuerza normal, y se calcula:

$$D_{SC} = \frac{F_{scr}}{P} \qquad (4)$$

Donde:

D_{SC} = coeficiente de arrastre del indentador,

F_{scr} = promedio de la fuerza de rayado a lo largo de la longitud de la huella (N),

P = Fuerza normal en el indentador (N).

El coeficiente de arrastre del indentador *(D_{SC})* es similar en definición al coeficiente de fricción dinámico, pero no significa lo mismo. D_{SC} se refiere específicamente a la resistencia que ofrece la superficie ensayada al desplazamiento del material delante del penetrador. Por consiguiente, en general no es igual al coeficiente de fricción del diamante (material típico del indentador) al desplazarse sobre el material ensayado.

2.10. Reporte

Se debe reportar lo siguiente:

Caracterización del penetrador: Si el radio de la punta es diferente a 200 μm ± 10 μm se debe reportar. Este reporte debe indicar el número de dureza de rayado que se obtuvo bajo condiciones no normalizadas, por este motivo estos resultados no deben ser comparados con los que se obtienen con indentadores normalizados de diámetro de la punta de 200 ± 10 μm.

Probetas: Se debe proporcionar la información suficiente para su caracterización como son: composición química, proceso de fabricación, tratamiento superficial y rugosidad superficial. Puede darse las designaciones comerciales de los materiales si se entiende necesario. En el caso de superficies recubiertas debe indicarse el espesor de la capa.

Condiciones de ensayo y método de medición: Se debe reportar la (o las) fuerza normal utilizada (N), velocidad de desplazamiento (mm s^{-1}) y longitud de la huella. También se debe reportar el tipo de máquina utilizada para realizar el ensayo, incluyendo si es un modelo comercial, y el método utilizado para medir el ancho de la huella.

Número de dureza de rayado: Se reportará el promedio del número de dureza de rayado en GPa, obtenido con un mínimo de tres rayas en cada probeta. Así, se realizarán un total de nueve mediciones en cada probeta a la fuerza normal determinada (esto es, tres rayas por probeta y tres mediciones en cada huella).

Reportes opcionales: Se podrá informar el promedio del coeficiente de arrastre del indentador, que se obtendrá de la medición de la fuerza de rayado en cada ensayo. Se indicará los medios usados para la medición y el cálculo de la fuerza de rayado.

Observaciones: Se reportará la presencia de grietas u otros defectos asociados con el rayado.

Como la fuerza normal se incrementa para muchos materiales, existe un incremento de la tendencia a la formación de microfracturas, virutas, y otras formas de daños superficiales. En ocasiones es muy importante informar estas situaciones. Si la magnitud del daño es significativa, como la producción de grandes virutas, entonces el número de dureza de rayado no puede considerarse válido.

2.11. Precisiones y recomendaciones

Precisión: La precisión para determinar la dureza de rayado depende de las características del material o el recubrimiento dado. En algunos materiales es relativamente fácil definir el borde de la huella. En otros casos, es mucho más difícil identificar el borde de la huella. Partiendo de que estas mediciones dependen de la morfología del borde de la huella, no es posible definir en términos absolutos la precisión de este método de ensayo. Nótese también que cualquier incertidumbre en la medición del ancho de la huella tiene una influencia cuadrática en el cálculo del número de dureza de rayado.

Repetibilidad y reproducibilidad: La repetibilidad de los resultados de los ensayos de rayado dependen de la magnitud de la fuerza normal, la exactitud del sistema de medición del ancho, las características deformacionales del material ensayado, y de la correcta localización de los bordes de la huella. La fuerza normal menor, el mínimo ancho de la huella, y por consiguiente, un máximo efecto de los errores de medición en la repetibilidad del número de dureza de rayado. La legibilidad óptica (por ejemplo el contraste) de los bordes de la huella y la naturaleza del daño inducido del rayado en la superficie de ensayo afectará la reproducibilidad de los resultados. Por ejemplo, el microscopio del sistema de medición tiene una precisión de 0.5 μm, pero el borde de la huella tiene una variación por ondulación cinco veces mayor que eso. La reproducibilidad general de este método no se ha establecido.

2.12. Discusión

El ensayo de rayado es uno de los ensayos micro mecánicos más utilizados para caracterizar la superficie de los materiales. El valor del número de dureza de rayado, como se mencionó anteriormente, puede ser afectado por varios factores entre los que se encuentran, la forma y dimensiones del indentador, la fuerza normal aplicada, velocidad de rayado, limpieza de la superficie, y uniformidad del material ensayado. Como en otros tipos de dureza, este no mide una sola propiedad fundamental de los materiales, sino que refleja la influencia conjunta de varias propiedades del material que responden a las condiciones de carga y la geometría del penetrador impuesta en el ensayo. Por consiguiente, no se debe intentar comparar los números de dureza de rayado de diferentes materiales a menos que las condiciones de ensayos sean las mismas.

2.12.1. Geometría de penetración

Como la geometría del indentador que se utiliza es cónica con punta esférica, a cierta profundidad de penetración, la geometría del perfil de la huella cambia. La profundidad a la que la punta redondeada se une con la porción cónica del indentador puede ser llamada como profundidad de transición geométrica (z_{gt}) y puede ser calculada a partir del radio de la punta (r) y el ángulo del cono α (grados) como se muestra a seguir:

$$z_{gt} = r(1 - \cos \bar{}_{\deg}) \quad (5)$$

Donde:

$$\bar{}_{\deg} = \frac{1}{2}(180 - \sim_{\deg}) \quad (6)$$

Un penetrador con radio 200 µm y ángulo del cono de 120º tiene z_{gt} = 26.8 µm. Como comparación, otro penetrador con radio 210 µm y ángulo del cono 123º tiene z_{gt} = 25.4 µm.

No hay datos conocidos que indiquen que efectos significativos tendrán en los números de dureza de rayado el excederse la profundidad de transición geométrica. Sin embargo, cuando se interpretan los resultados del ensayo de rayado teniendo un rango de profundidades de penetración, y cuando se observa el daño inducido, se puede considerar que posiblemente tiene efecto la zona de transición de cono a esfera en la distribución de tensiones y las características del flujo de material.

2.12.2. Correlación del número de dureza de rayado con otras propiedades del material

La correlación del número de dureza de rayado con otras propiedades del material, como la resistencia al desgaste abrasivo, dependerá de la magnitud de la respuesta de la superficie ensayada si es sometida a la misma combinación de propiedades que determinan el número de dureza de rayado del material. Por lo tanto el usuario de la norma debe establecer su o sus propias correlaciones entre el número de dureza de rayado y las características de desgaste que le interesan.

El uso del número de dureza de rayado en estudios fundamentales de deformación del material requiere de la medición de cantidades adicionales asociadas con la morfología de la huella de rayado, y se necesitarán métodos alternativos para computar la resistencia a la abrasión por un punto.

2.2 Análisis estadístico de los resultados de los experimentos

Los resultados del ensayo experimental se validan a través de los siguientes parámetros estadístico -matemáticos:

- Media Aritmética de los Resultados $(\bar{\mu})$ o $(\bar{y})$

Ha de señalarse que estos parámetros representan la media de una propiedad evaluada durante los experimentos.

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{n} \quad (7)$$

- Desviación Media Cuadrática o Desviación Estándar de la Media (S) ***o*** (σ)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y-\bar{y})^2}{n-1}} \qquad (8)$$

$$S = \frac{R}{d_2} \text{ Para número de ensayos (corridas) entre 1 y 10} \qquad (9)$$

Donde:

n – Número de experimentos (corridas experimentales)

$\sum_{i=1}^{n}(y-\bar{y})^2$ - Suma del cuadrado de las desviaciones

R – Diferencia entre el valor más alto y el más bajo de las medias en las corridas experimentales (n)

d_2 – Factor de desviación (Tabla 2.5)

- Desigualdad Cuadrática o Variabilidad del Procedimiento de Ensayo (V)

A este parámetro también se le conoce como Coeficiente de Variación; se da en %.

$$V = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \qquad (10)$$

Tabla 2.1. *Valores del factor de desviación (d_2) para un número de replicas menor que diez.*

Factor de desviación para la desviación estándar estimada en el rango del tamaño básico de la muestra.

Tamaño de la Muestra (n)	Factor de Desviación (d_2)	($1/d_2$)
2	1.128	0.8865
3	1.693	0.5907
4	2.059	0.4857
5	2.326	0.4299
6	2.534	0.3946
7	2.704	0.3698
8	2.847	0.3512
9	2.970	0.3367
10	3.078	0.3249

El tamaño de la muestra (n) se puede determinar como:

$$n = \left(1.96 \cdot \frac{V}{e}\right)^2 \text{ Para un nivel del 95\% de confianza} \qquad (11)$$

Donde:e – Error permisible de la muestra o muestreo

- **Error Absoluto de la Media Aritmética** $\left(e_{\bar{y}}\right)$

$$e_{\bar{y}} = \frac{t \cdot S}{\sqrt{n-1}} \tag{12}$$

Donde: t – Desviación normada, determinada durante una distribución normal en dependencia del número de ensayos o tamaño de la muestra

- Error relativo para la Media Aritmética $\left(e_{r\bar{y}}\right)$

$$e_{r\bar{y}} = \frac{e_{\bar{y}}}{\bar{y}} \cdot 100 \tag{13}$$

$$e_{r\bar{y}} = \frac{t \cdot V}{\sqrt{n-1}} \cdot 100 \tag{14}$$

Por la tabla 2.4 se determina el tamaño mínimo de la muestra para un 95% de nivel de confianza, lo que indica un 5% de probabilidad de que la diferencia entre la muestra estimada (media aritmética $\bar{y}$) y el valor obtenido del promedio de todos los valores, para un número elevado de pruebas (réplicas), no exceda el error relativo permisible de la muestra.

Durante la calibración de la instalación experimental los ensayos se deben hacer con un número de muestra igual seis (6). Por lo que el coeficiente de variación de la media de los datos experimentales no debe sobrepasar el 6%. De ser superior al valor señalado la prueba no se considera válida y por ende la instalación experimental no calibrada (ver tabla 2.2).

Tabla 2.2. *Tamaño mínimo aceptable de la muestra (n) para un 95% de confianza*.

Coeficiente de Variación V (%)	**Error Relativo permisible de la muestra e_{rp} (%)**								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**10**
1	4	1							
2	16	4	**2**	**1**					
3	35	9	**4**	**3**	**2**	1			
4	62	16	**7**	**4**	**3**	2	2		
5	96	24	**11**	**6**	**4**	3	2	2	1
6		35	**16**	**9**	**6**	4	3	2	2
7		47	**21**	**12**	**8**	6	4	3	2
8		62	**28**	**16**	**10**	7	5	4	3
9		78	**35**	**20**	**13**	9	7	5	4
10		96	**43**	**24**	**16**	11	8	6	4

Por ejemplo: Si el coeficiente de variación (V) de múltiples pruebas (réplicas) es el 6%, el tamaño mínimo de muestras pudiera ser 6; todo esto con el objetivo de garantizar un 5% de error permisible. Es importante señalar que si el número de pruebas (réplicas) 6 no genera un

coeficiente de varianza menor o igual al 6%, la prueba no se considera válida, por lo que se debe tomar una acción correctiva con los resultados.

CONCLUSIONES CAPÍTULO II

- El ensayo de rayado se utiliza para terminar la dureza de rayado de la superficie de una amplia gama de sólidos, entre los que se encuentran metales, cerámicas, polímeros y superficies recubiertas. En el caso de las superficies recubiertas, es el método más utilizado para medir la adherencia de recubrimiento al sustrato.
- La máquina para realizar el ensayo de rayado debe incluir como elementos fundamentales un indentador rígido, un dispositivo porta probetas, sistema para la aplicación de la carga normal, y el sistema para garantizar el movimiento relativo entre el penetrador y la probeta. El equipamiento para la medición del ancho de la huella se puede incluir en la máquina o puede estar independiente de ella. Opcionalmente se puede agregar a la máquina un sensor para medir la fuerza de rayado.
- El indentador debe ser cónico con ángulo de 120 ± 5º y el cono terminará en una punta esférica con 200 ± 10 μm de radio, lo que coincide con el penetrador utilizado para medir dureza en el método Rockwell. El proceso de desplazamiento se puede obtener moviendo la probeta y manteniendo fijo el indentador o manteniendo fija la probeta y moviendo el indentador, esto siempre a velocidad y fuerza normal constante. El desplazamiento relativo puede ser en línea recta o en forma circular.
- La longitud de rayado se fija en un límite mínimo de 5 mm, no se establece el límite máximo, y puede tener forma lineal o forma de arco en dependencia del tipo de movimiento de la máquina. La velocidad de rayado debe ser constante y variar en un rango de 0.2 a 5.0 mm seg^{-1}. La magnitud de la fuerza normal aplicada no se establece en la norma, sólo se plantea que esta debe ser de una magnitud tal que permita obtener una huella que se pueda medir sin dificultad, pero esta fuerza no debe ser tan grande que provoque fractura, desprendimiento de material, arranque del recubrimiento, o cualquier otro dañado serio de la superficie.
- El reporte final del ensayo debe incluir los siguientes aspectos:
    - Características del penetrador.
    - Propiedades de las probetas.
    - Condiciones de ensayo y métodos de medición.
    - Número de dureza de rayado.
    - Presencia de grietas u otros defectos asociados con el rayado.

CAPITULO 3. Diseño de la máquina

Introducción

Según las conclusiones del capítulo anterior, la norma permite la realización del ensayo de rayado con cierta flexibilidad en varios parámetros como son: magnitud de la carga aplicada, velocidad de desplazamiento relativo entre el penetrador y la probeta, longitud de la huella y la forma del movimiento relativo (lineal o circular).

Para la máquina que se pretende fabricar se determina que la misma tendrá las siguientes características:

- El sistema de aplicación de la carga permitirá un amplio margen de fuerza normal. La aplicación de la carga será constante, es decir se aplica al inicio del ensayo y se mantendrá igual durante la realización del mismo.
- Se garantizarán tres velocidades de desplazamiento relativo entre la probeta y el indentador dentro del rango establecido por la norma. El movimiento relativo se garantiza mediante el movimiento de la probeta. Esta se moverá en un solo sentido a velocidad constante.
- La longitud de la huella puede llegar hasta los 25 mm.
- El desplazamiento relativo será lineal.
- Aunque la norma permite la utilización de cualquier indentador (siempre y cuando se especifique el reporte final), en la máquina proyectada se utilizará el recomendado, es decir el correspondiente al método de medir dureza Rockwell.

3.1. Selección de materiales

Para la selección de los materiales se tomaron en cuenta ciertos aspectos que fueron de importancia antes de su adquisición, tales como:

- La capacidad del material para poder trabajar bajo las condiciones del ensayo.
- La factibilidad a ser mecanizado por medio de las máquinas y herramientas disponibles.
- La disponibilidad.

Los materiales utilizados para la construcción de la máquina debían tener una resistencia a las cargas que serían sometidos. Luego con esta información se procedió a buscar materiales que cumplen con esto para revisar su existencia y las dimensiones en las que se encuentran disponibles.

Como las dimensiones de la máquina, y por lo tanto de sus piezas, son relativamente pequeñas se tuvieron varias opciones entre las partes de máquinas y estructuras destinada a materias primas.

Entre estos desechos se pudo obtener planchas y laminados de diferentes materiales, que fueron analizados con el objetivo de seleccionar los más adecuados para la fabricación de la máquina.

El análisis químico se realizó mediante Espectroscopia de Emisión Atómica en un equipo "Spektrometrie" en el laboratorio de la Empresa Planta Mecánica de Santa Clara. A partir de la composición química se determina el material al cual correspondería según la nomenclatura comercial. Se seleccionan los siguientes materiales:

- Acero AISI 1045: Mn (%)=0,7; C (%)=0,44; Si (%)=0,25. Acero fino al carbono de alta calidad; templabilidad garantizada. Gran pureza lograda con un proceso especial de fabricación y estricto control de calidad. Se aplica para la construcción de maquinaria en general para partes y piezas expuestas a exigencias medianas, desgaste por fricción, etc. Fácil de conseguir y económico.
- Acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3 Con C(%)=0.2; SI(%)=0.2 ; Mn(%)=0.5 y las siguientes propiedades mecánicas $\sigma\beta$=45Kgf/mm^2 , σf=25Kgf/mm^2; σ%=25 , laminado en caliente , ya que presenta buena soldabilidad debido a su bajo (%) de carbono (Guliáev,A,1983).
- Acero de construcción mejorables 40x forjado (según las normas GOST 4543 – 71) GRUPO Ц con C(%)=0.35¯0.44 ;Cr(%)=0.8¯1.1,por ser un material que presenta buenas características para la fabricación de piñones debido a sus propiedades mecánicas , pero además se puede mejorar mediante tratamientos térmicos (Guliáev,A,1983).

3.2. Diseño de la máquina

Como se plantea anteriormente, la norma permite cierto margen en los parámetros para la realización del ensayo. Partiendo de eso se procedió al diseño de una máquina que garantice los aspectos presentados en la Introducción de este capítulo y que sea lo más simple posible para garantizar su fabricación utilizando la menor cantidad de recursos y las máquinas disponibles.

Para el proceso de diseño se utilizó el software SOLIDSWORKS. Primeramente se modelaron las piezas y se conforma a partir de estas el ensamble. En la Fig.3.1 se muestra la máquina proyectada y sus partes fundamentales. Utilizando este mismo software se simuló el funcionamiento de la máquina antes de iniciar su fabricación.

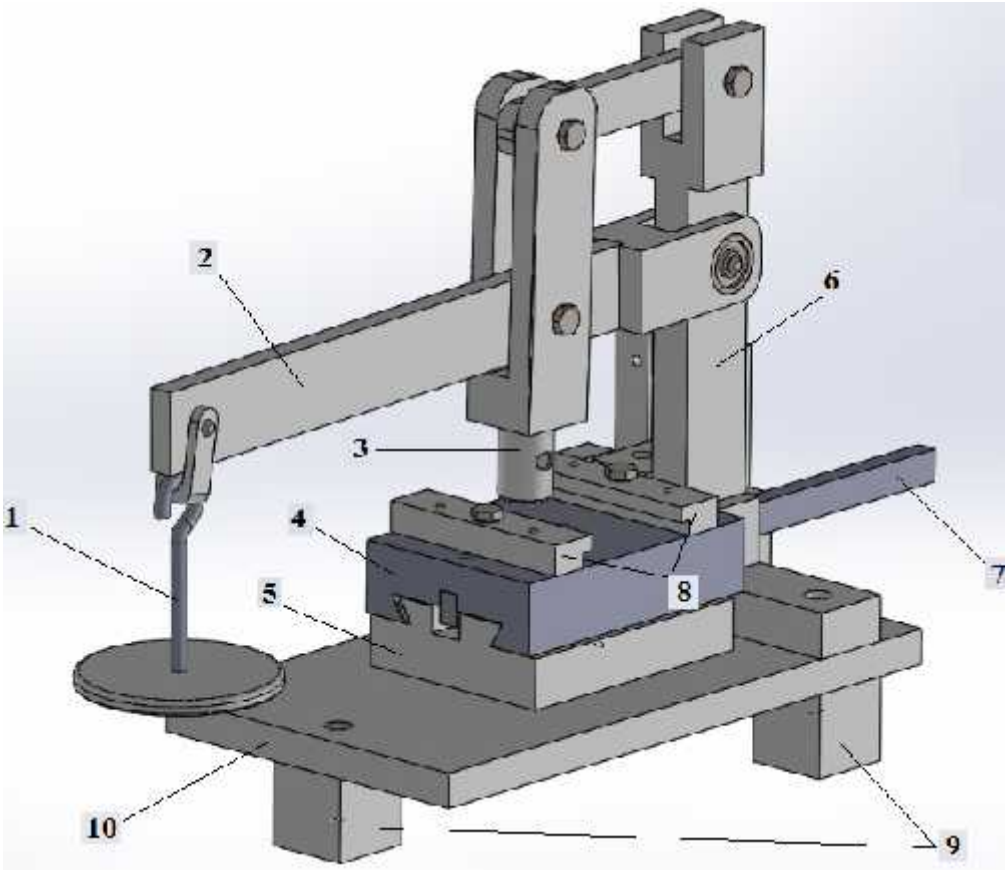


Fig. 3.1. *Modelo de la máquina diseñado en SOLIDSWORW y sus partes principales.*

Partes fundamentales de la máquina diseñada:

1- Porta pesas.

2- Brazo.

3- Porta indentador.

4- Carro superior.

5- Base del carro superior.

6- Columna.

7- Cremallera.

8- Bridas.

9- Patas.

10- Base.

3.2.1. Chequeo de los tornillos

En la máquina se utilizan 29 tornillos desglosados de la siguiente manera: 4 M4, 4 M5 y 21 M 6. De estos tornillos 17 se destinan a la unión de diferentes elementos de la máquina, no recibiendo ninguna carga adicional durante el funcionamiento de la misma. Los tornillos que reciben carga durante la realización del ensayo son los que se muestran en la Fig.3.2. Como se aprecia, los

tornillos trabajarán como pasadores, por tal motivo no se realizará el chequeo de la rosca y solo se realizará el chequeo a cortante y a aplastamiento.

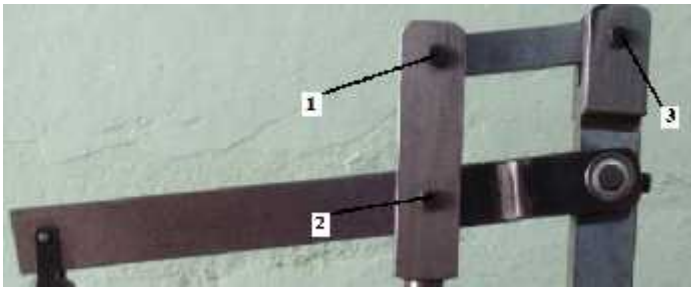


Fig.3.2. *Tornillos que reciben cargas adicionales durante el ensayo.*

El tornillo más cargado corresponde al número 2, pues va a soportar directamente la carga aplicada sobre la probeta. La carga máxima con la que se realizarán los ensayos será de 100 N, por tal motivo se tomará la misma para hacer los chequeos al tornillo.

Chequeo a cortante:

$$\tau_{max} = \frac{Q}{Ac} \leq [\tau]$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Como diámetro se asume el diámetro de fondo de la rosca, en este caso 5 mm.

$$A = \frac{\pi \cdot 5^2}{4} = 19.64\ mm^2$$

$$\tau_{max} = \frac{100\ N}{19.64\ mm^2} = 5\ MPa$$

Los tornillos son de acero CT3 con una tensión de fluencia de 250 MPa. Se toma un factor de seguridad de 2 según recomendaciones de (Mott,R,210) para el cálculo de la tensión tangencial permisible:

$$\tau_y \approx 0.6\sigma_y = 0.6 \cdot 250 = 150\ MPa$$

$$[\tau] = \frac{\tau_y}{n} = \frac{150\ MPa}{2} = 75\ MPa$$

Como se aprecia la tensión aplicada es mucho menor que la permisible, por lo que los tornillos resistirán con amplio margen las cargas de cortante.

Chequeo a aplastamiento:

$$\sigma_{ap} = \frac{P}{A_{ap}} \leq [\sigma]_{ap}$$

Donde:

A_{ap} = Área de aplastamiento.

$$A_{ap} = d \cdot ¢$$

Donde:

d = diámetro de fondo del tornillo,

δ = espesor de la plancha (en este caso el espesor del brazo de aplicar la carga).

$$A_{ap} = 5 \cdot 9 = 45\ mm^2$$

$$\pm_{ap} = \frac{100\ N}{45\ mm^2} = 2.22\ MPa$$

La tensión permisible a aplastamiento se calcula:

$$[\pm]_{ap} = 2 \cdot [\pm]$$

Tomando el factor de seguridad igual a 2 se determina la tensión permisible:

$$[\pm] = \frac{\pm_y}{n} = \frac{250}{2} = 125\ MPa$$
$$[\pm]_{ap} = 2 \cdot 125 = 250 MPa$$

Al igual que en el chequeo a cortante, el tornillo soporta con holgura las tensiones de aplastamiento que se producirán en el momento de carga máxima.

3.2.2. Chequeo de los rodamientos

En el caso de rodamientos que trabajen a bajas velocidades o en oscilación el proceso de selección se basa en el cálculo a cargas estáticas (Garcia, A., González,. G.2007), , (Aguirrebeitia, J., Vallelo, J. 2010). Bajo estas condiciones pueden producirse deformaciones permanentes en los elementos rodantes y camino de rodadura de los cojinetes de rodamiento. Para estos cálculos existen normas internacionales e inclusive una norma cubana que se basa en la norma ISO 76:2006 (NC-ISO76:2006). Precisamente en esa norma se basan los cálculos realizados en este trabajo.

Los rodamientos utilizados fueron recuperados de una máquina fuera de servicio. Bajo esa condición se seleccionaron y posteriormente se les realizará el cálculo a cargas estáticas.

Los rodamientos se encuentran en los puntos de contacto del cuadrilátero articulado mostrados en la Fig.3.2 y coinciden con los puntos donde se ubican los tornillos. En los puntos 1, 2 y 3 se colocaron rodamientos tipo SKF 624. Se realizará el chequeo en el rodamiento ubicado en el punto 2, pues al igual que los tornillos es el que recibe más carga durante el proceso de trabajo.

$$C_{or} = f_0 \cdot i \cdot Z \cdot D_w^2 \cdot \cos \sim$$

Donde:

C_{or} = Capacidad nominal de carga estática (N),

i = número de hileras de elementos rodantes en un cojinete,

Z = número de elementos rodantes en una sola hilera.

D_w = Diámetro de la bola (mm),

α = Ángulo de contacto nominal del cojinete (º)

f_o = factor que depende de la geometría de los componentes y del esfuerzo de contacto.

Para el caso analizado:

i = 1, Z = 7, D_w = 2, α = 35º (estos datos se toman de un catálogo de la SKF (Catálogo SKF,2015)

El factor f_o se determina según: (Garcia, A. et al. 2007)

$$D_{pw} = \frac{(D+d)}{2}$$

$$\frac{D_w \cdot \cos\sim}{D_{pw}}$$

Donde:

D = Diámetro exterior del rodamiento,

d = diámetro interior del rodamiento,

D_{pw} = diámetro primitivo.

$$D_{pw} = \frac{(13+4)}{2} = 8.5$$

$$\frac{2 \cdot \cos 35}{8.5} = 0.19$$

Tabla 3.1. *Valores del factor f_o para cojinetes de bola* (Catálogo SKF,2015).

$\frac{D_{pw}\cos\alpha}{D_{pw}}$	Factor f_o		
	Cojinetes radiales de bolas		Cojinetes axiales de bolas
	contacto radial y angular	autoalineante	
0	14.7	1.9	61.6
0.01	14.9	2	60.8
0.02	15.1	2	59.9
0.03	15.3	2.1	59.1
0.04	15.5	2.1	58.3
0.05	15.7	2.2	57.5
0.06	15.9	2.2	56.7
0.07	16.1	2.2	55.9
0.08	16.3	2.3	55.1
0.09	16.5	2.3	54.3
0.1	16.4	2.4	53.5
0.11	16.1	2.4	52.7
0.12	15.9	2.4	51.9
0.13	15.6	2.5	51.2
0.14	15.4	2.5	50.4
0.15	15.2	2.6	49.6
0.16	14.9	2.6	48.8
0.17	14.7	2.7	48
0.18	14.4	2.7	47.3
0.19	14.2	2.8	46.5
0.2	14	2.8	45.7

Con ese valor en la tabla anterior se toma $f_o = 14.2$.

$$C_{or} = 14.2 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 2^2 \cdot \cos 35$$
$$C_{or} = 325.7\ N$$

Como se aprecia la capacidad nominal de carga estática del rodamiento utilizado es de 325.7 N y la máxima carga a la que será sometido es de 100 N, por lo que se puede utilizar el rodamiento SKF 624.

3.2.3. Chequeo de resistencia de la estructura de la máquina

Para realizar los chequeos de la estructura y los elementos de la máquina se utiliza el software SOLIDSWORK. Se realiza el mallado del modelo de forma automática como se muestra en la Fig.3.3 y se colocan las condiciones de contorno. Se asume que la máquina está empotrada en la base de los soportes inferiores, se aplica la carga vertical de 100 N en el extremo del brazo de carga y 100 N horizontal en el extremo del porta indentador. El resto de los datos del modelo se muestran en la Tabla 3.2 que se obtiene del software.

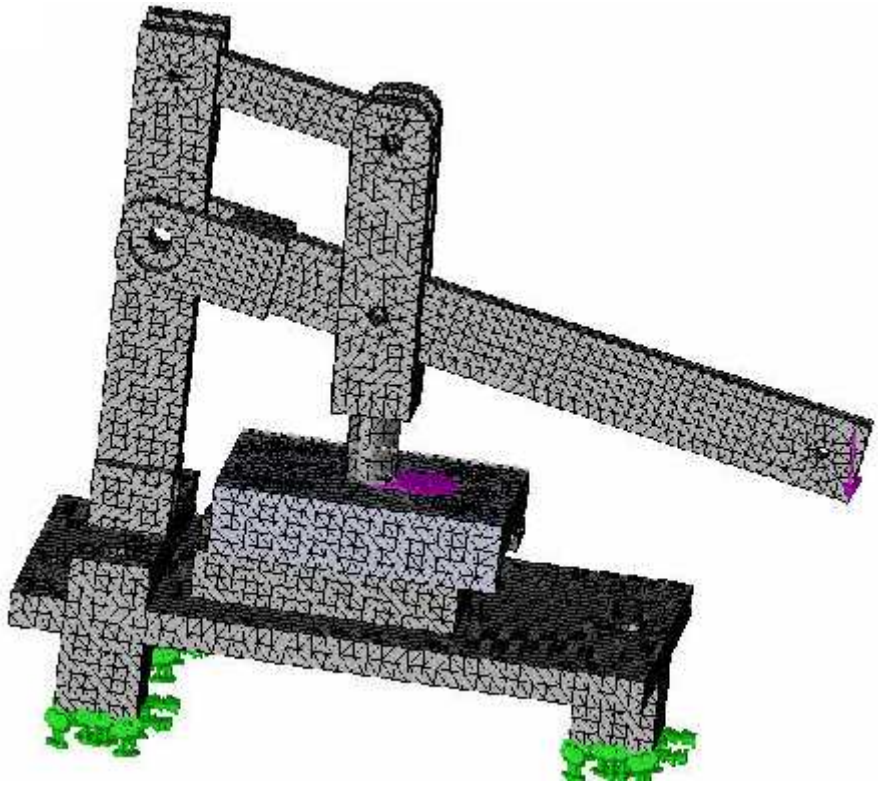


Fig.3.3. *Modelo utilizado para los chequeos de la máquina.*

Tabla 3.2. *Principales datos del modelo para la simulación con el MEF.*

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Jacobian points	4 Points
Element Size	5.40395 mm
Tolerance	0.270198 mm
Mesh Quality	High
Total Nodes	121467
Total Elements	77156
Time to complete mesh(hh;mm;ss):	00:00:22

En la Fig.3.4 se muestran las deformaciones de los diferentes elementos de la máquina al aplicarse la carga máxima.

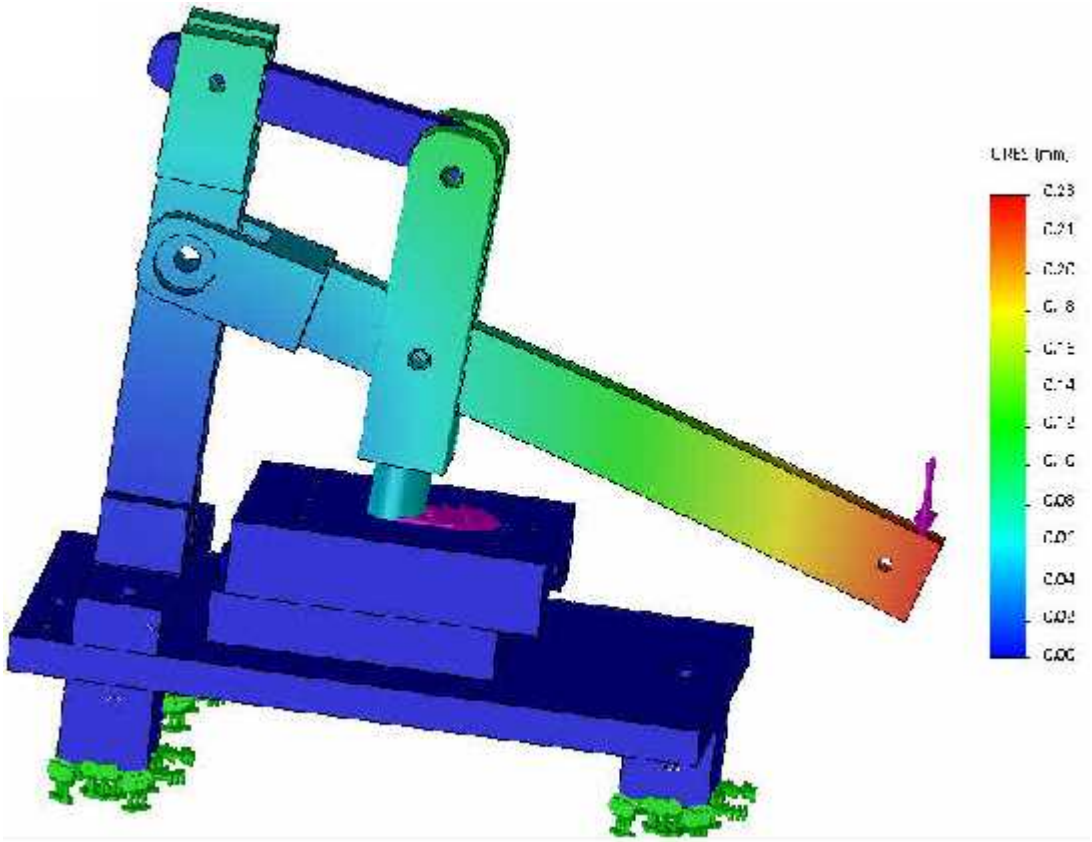


Fig.3.4. *Desplazamientos de los diferentes elementos de la máquina.*

Como se aprecia el desplazamiento máximo se encuentra en el extremo del brazo y es de 0.23 mm cuando se aplica una carga de 100 N. El resto de los elementos sufren poca deformación, por lo que se puede afirmar que la máquina tiene una buena rigidez.

En la Fig.3.5 se muestran los resultados correspondientes a las tensiones equivalentes que aparecen durante el trabajo de la máquina con los valores máximos de las cargas aplicadas.

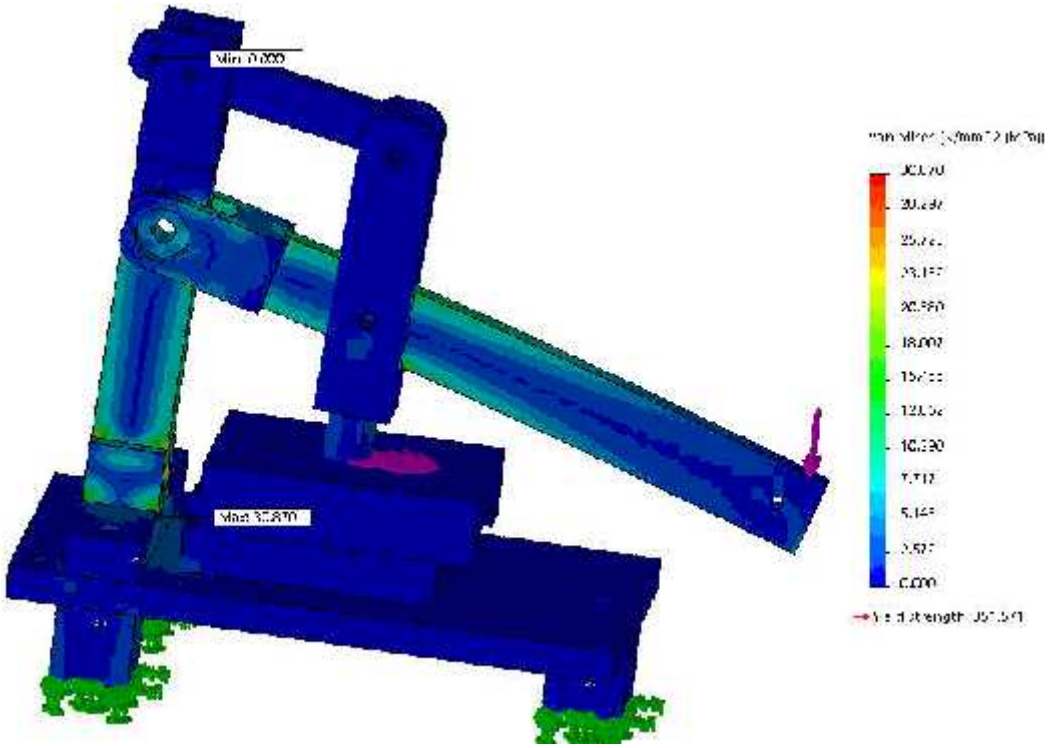


Fig.3.5. *Valores de tensiones equivalentes obtenidos con el Método de los Elementos Finitos.*

Como se aprecia el valor máximo de las tensiones aparece en el extremo inferior de la columna y tiene un valor de 30.87 MPa, lo que es mucho menos que la tensión permisible del material.

CONCLUSIONES CAPÍTULO III

- Se determina diseñar una máquina que cumpla con lo estipulado en la norma ASTM G 171, pero que sea lo más simple posible. Los parámetros fundamentales de la máquina a fabricar serán:
  - El sistema de aplicación de la carga permitirá un amplio margen de fuerza normal.
  - Se garantizarán tres velocidades de desplazamiento relativo entre la probeta y el indentador.
  - La longitud de la huella puede llegar hasta los 25 mm.
  - El desplazamiento relativo será lineal.
  - Se empleará el indentador correspondiente al método de medir dureza Rockwell.
- Para el diseño de la máquina se utiliza el software SOLIDSWORK. Se modelan las piezas, se ensamblan y se simula el funcionamiento de la misma, lo que garantiza saber que trabajará correctamente una vez fabricada.
- Se seleccionan los materiales para la fabricación de la máquina a partir de materias primas recicladas. Estos materiales se identificaron a partir del análisis químico mediante Espectroscopia de Emisión Atómica y se clasificaron según la nomenclatura comercial.
- Se realiza el chequeo de resistencia y de rigidez de la máquina utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF) y se pudo verificar que los valores de tensiones y deformaciones son aceptables. No obstante se realiza el chequeo tradicional de los tornillos y rodamientos en la zona de mayor carga, verificándose que no hay dificultades con estos elementos tampoco.

CAPITULO IV. Fabricación de las piezas

4.1 Construcción de las Piezas

Luego de haber finalizado la etapa de selección del diseño final, los Cálculos, la selección de los materiales, y los planos de cada pieza se procede a la construcción de las mismas. Para ello se utilizo el taller del POLITECNICO RAUL SUARES de SANTA CLARA donde se encuentran las maquinas herramienta necesarias para la fabricación de las piezas.

A continuación se describe el proceso de fabricación utilizado en la construcción de cada una de estas.

4.1.1 Base principal

Para la construcción de la BASE se empleo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3.

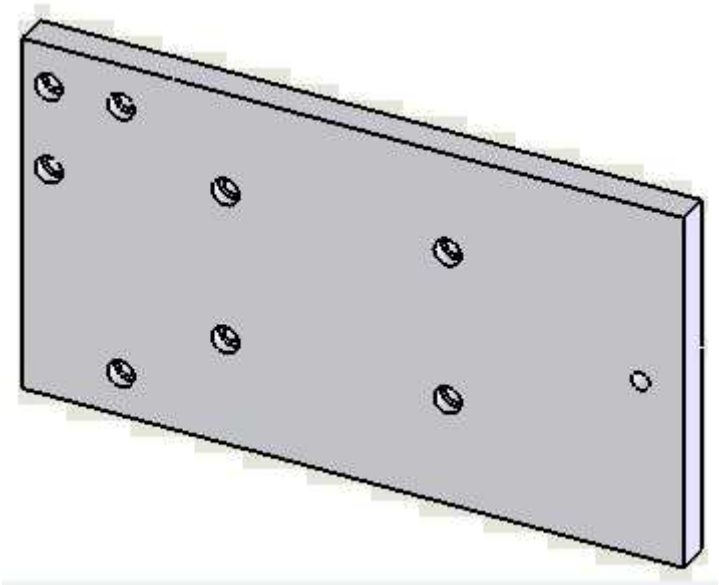


Fig.4.1 *Base principal*.

Este semiproducto fue oxicortado con una sobre medida de 5 mm de longitud por caras para posteriormente ser maquinado en la fresadora a las medidas de 247x135 de longitud y ancho teniendo en cuenta quedara escuadra, luego se eliminaron las rebabas dejadas por la fresa para ser montada en la rectificadora de superficies para limpiarle una cara, este material tenia 14 mm de espesor, después se invierte y se le da la medida de 13 mm de espesor. Luego se trazaron los agujeros para después ser llevada al taladro para taladrar 9 agujeros, compuesto cada uno de 2, uno a 6.5 mm pasante y otro a 10x5 mm de profundidad. Las máquinas utilizadas para estos procesos fueron las siguientes.

Fig.4.2. *Fresadora horizontal, modelo 6P81Г de fabricación URSS.*

Fig.4.3. *Rectificadora de superficies, modelo 3E711B de fabricación URSS .*

Fig.4.5. *Taladro de columna de fabricación URSS.*

4.1.2. Columna

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3 Con C(%)=0.2; SI(%)=0.2 ; Mn(%)=0.5 y las siguientes propiedades mecanicas σβ=45Kgf/mm^2 , σf=25Kgf/mm^2; σ%=25 , laminado en caliente .

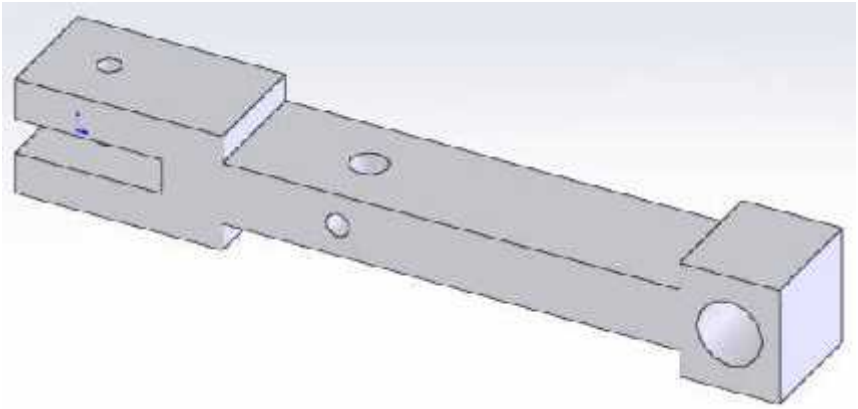


Fig.4.6. *Columna.*

Esta pieza se elaboro a partir de una barra de 32x32x203 mm de longitud previamente cortada en una segueta mecánica. Se colocó, centró y fijo en la mordaza de la fresadora horizontal, fijada esta con tornillos de sujeción a la mesa, quedando la pieza en posición perpendicular a la herramienta de corte. Provista la máquina en su usillo principal de un disco de corte de acero rápido o P 18 con 250x5mm de diámetro y ancho , Se tomo tangencia con la pieza y se refrentó a una profundidad de 1 mm, teniendo en cuenta la perpendicularidad de esta cara con la cara superior centrada, a continuación se invierte, se coloca la pieza dejando fuera de la mordaza aproximadamente 9 mm de altura respecto a la cara superior y 10 mm de longitud fuera de la mordaza, se centra y fija para fresar a dar la longitud total de la pieza, y elaborar una ranura a una profundidad de 7x119 mm de longitud en varias pasadas manteniendo 38 mm desde la cara refrentada. Se invierte y se procede de igual forma para elaborar la ranura de la cara posterior. Seguidamente se rota la mordaza 90^0, se coloca la pieza apoyada en una paralela (para evitar se descentre la misma debido al esfuerzo del corte provocado por el disco), a una distancia de 40 mm hacia fuera y se fija, controlando la simetría, se procede a maquinar una ranura de 9 mm de espesor por 38 mm de longitud en varias pasadas, luego se eliminan las rebabas producidas por el frezado y se lleva a la rectificadora. Se apoya una de las caras ranuradas hacia arriba y se rectifica manteniendo 10.5 mm desde la ranura de 9 mm, se vira y se hace lo mismo quedando la pieza a 30 mm. Después se coloca con la ranura de 9 mm perpendicular a la mesa y se toma tangencia con la pieza y se le quitan 0.5 mm en varias pasadas, se pone esta cara hacia abajo y se le quitan 0.5 mm mas quedando a 31 mm. Luego se coloca con la ranura perpendicular a la piedra

y se rectifica controlando 7 mm de profundidad hasta la salida de la piedra teniendo cuidado con las caras de la misma, después se hace lo mismo quedando 16 mm en la columna. A continuación se trazan los agujeros M6, Ø 9.5 mm y Ø17 mm. Posteriormente se taladran los agujeros de Ø5 mm, Ø9.5 mm y se pasa el macho M6, se rota la pieza, se taladra el Ø17 mm .

4.1.3. Base columna

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3 Con C(%)=0.2; SI(%)=0.2 ; Mn(%)=0.5 y las siguientes propiedades mecanicas $\sigma\beta$=45Kgf/mm^2 , σf=25Kgf/mm^2; σ%=25 , laminado en caliente .

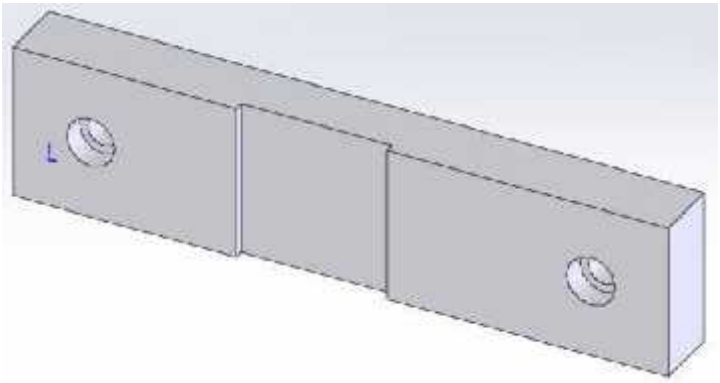


Fig.4.7. *Base columna.*

Esta pieza se fabrico a partir de un semiproducto previamente oxicortado con 5 mm de sobre medida en largo, ancho y un espesor de 14 mm. Se monto en la mordaza del re - cortador, se centro y fijo, luego tomando tangencia con la cuchilla, se retiro de la pieza y se le dio la profundidad de corte (1mm), se conecto el automático y se le dieron varias pasadas hasta limpiar la superficie teniendo en cuenta la sobre medida. Posteriormente se desmonto, se coloco con la cara maquinada hacia abajo auxiliándome de una paralela para lograr un paralelismo entre la cara maquinada y la que esta por maquinar, se fijo, asentó y se procedió al maquinado teniendo en cuenta la medida de 31.5 mm. Se desmonto, se colocó dejado fuera de la mordaza 10 mm aproximadamente, auxiliándome de una paralela para lograr perpendicularidad entre la cara apoyada y la cara a maquinar, se fijó, asentó y se procedió al maquinado de la longitud de la pieza, teniendo en cuenta la sobre medida, después de limpia esta cara se desmontó y se invirtió, dejando en esta ocasión 5 mm aproximadamente de longitud entre la cara de la pieza y la mordaza auxiliándome de una paralela y dejando fuera 10 mm aproximadamente para dar la longitud total, se fija, asienta y se procede a dar la longitud total de la pieza. A continuación se comienza a elaborar una ranura para el asiento de la columna de 2.5 mm de profundidad por 30 mm de longitud controlando 52 mm desde la cara de la longitud total, con otra cuchilla más

idónea para este trabajo. Luego se elimina los cantos agudos producto del maquinado y se pasa a la rectificadora plana, se coloca la cara de la ranura de 2.5 mm x 30 mm hacia arriba y se rectifica en varias pasadas hasta lograr 2 mm entre la cara maquinada y el fondo de la ranura, se invierte y rectifica hasta lograr 13 mm, luego se rota la pieza 90^0 y custodiándola con 3 paralelas se rectifica a limpiar, se invierte y da la media de 31mm. Posteriormente se trazan los agujeros y se llevan al taladro para taladrar 2 agujeros de Ø 6.5 mm pasantes y dos de Ø 10 mm x 5 mm de profundidad según trazo.

Fig.4.8. *Máquina cepilladora horizontal de fabricación URSS.*

4.1.4. Patas

Estas 3 piezas se elaboraron a partir de una barra de 32 x 32 previamente cortadas en una segueta mecánica con 5 mm de sobre medida en su longitud; de un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3. Se montaron en la mordaza del recortador con las caras cortadas hacia arriba se centraron, fijaron y maquinaron a limpiar, se invirtieron y se colocaron estas caras limpias sobre una paralela en la mordaza se fijaron y asentaron para maquinarlas a 31.5 mm de longitud, se eliminaron los cantos agudos con una lima y se llevaron a la rectificadora plana para limpiar las caras y darles la longitud total a las patas de 31 mm. Después se trazaron en el centro del cuadrado teniendo en cuenta esta medida de 31 mm para que quedaran las 3 a la misma altura y se taladraron 2 agujeros Ø5 mm pasantes y 2 agujeros Ø11 mm x14 mm de profundidad. Luego se les paso el macho M6 .

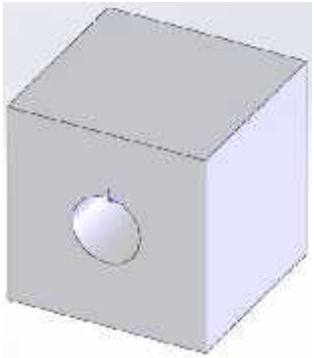


Fig.4.9. *Patas.*

4.1.5. Carro superior

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un Acero AISI 1045.

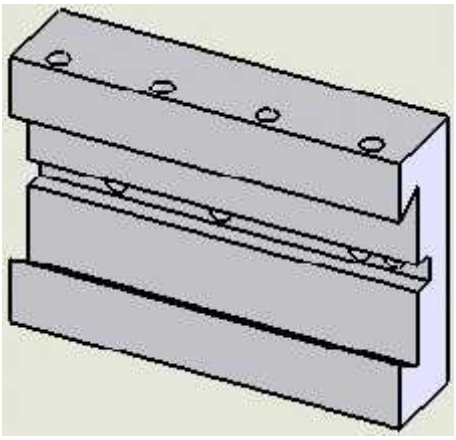


Fig.4.10. *Carro superior*.

Este semiproducto tenía 122x88x30 mm de espesor previamente oxicortado, se montó en la mordaza del recortador para darle las siguientes dimensiones 112 x78 x27 mm de espesor y escuadrarlo, se desmontó y se volvió a montar apoyado en dos paralelas dejando fuera de la mordaza 12 mm aproximadamente, se asentó, fijó y controló la alineación de una de las caras de 112 mm respecto al movimiento principal de la máquina, se limpió esta cara y se procedió a realizar una ranura de 10 mm x112 mm de largo teniendo en cuenta 18.5 mm desde la cara lateral centrada y 42 mm de longitud a partir de esta medida en varias pasadas. Luego se inclinó el carro 30^0 respecto a la vertical y se procedió a realizar la cola de milano. Acto seguido se inclinó el carro en el otro sentido igual a 30^0 y se procedió igual. Después se puso el carro a 90^0 y se procedió a realizar la ranura de 8 mm x7 mm de profundidad a lo largo de la pieza en varias pasadas con una cuchilla idónea para esto, se eliminaron los cantos agudos y posteriormente se llevo a la rectificadora plana, se colocó con la cola de milano hacia el plato magnético y se rectifico la cara superior controlando 26.3 mm desde la base, se invirtió y se le dio la medida de 26 mm . Después se trazaron todos los agujeros según el plano y se paso al talado para barrenarlos y hacerle la rosca según plano.

4.1.6. Brida de sujeción.

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3.

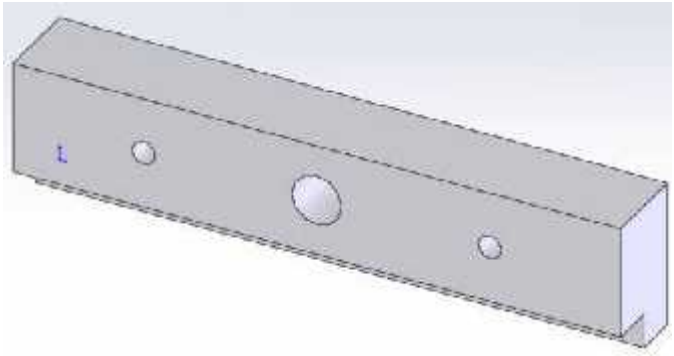


Fig.4.11. *Brida de sujeción*.

Este semiproducto tenía un espesor de 13 mm, fue oxicortado con 5 mm de sobre medida y posteriormente llevado al recortador para darle la medida según plano en su longitud y ancho. Luego se limpió la cara superior y elaboró un escalón de 5 mm de profundidad por 4.5 mm de longitud a lo largo de la pieza, controlando 14.5 mm. A continuación se le eliminaron los cantos agudos y llevó a la rectificadora plana, se colocó en la mesa con el escalón hacia arriba y rectificó a mantener 4.5 mm de profundidad al escalón según plano, se invirtió y rectificó a 11.5 mm .Posteriormente se trazaron los agujeros de Ø 6.5 mm y Ø3 mm y se taladraron.

Fig.4.12. *Proceso de maquinado de la brida de sujeción*.

4.1.7. Laine de ajuste.

Para la fabricación de esta pieza se utilizó un Acero AISI 1045.

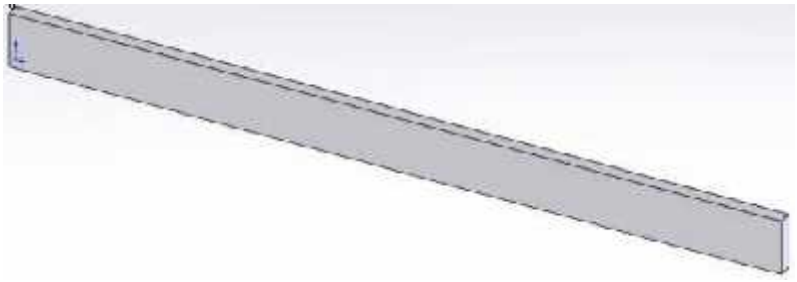


Fig.4.13. *Laine de ajuste*.

Este semiproducto fue cizallado a 10x113 mm y tenia un espesor de 3 mm. Luego se maquinó en la fresadora a la medida de 8 mm teniendo en cuenta el paralelismo de las caras, se eliminaron los cantos agudos y se montó en la mesa de la rectificadora para darle la medida de 2 mm. Después se insertó entre el carro superior y su base y se trazó para avellanarle 4 agujeros de sujeción. Acto seguido se avellanó en el taladro.

4.1.8. Base carro superior

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un Acero AISI 1045.

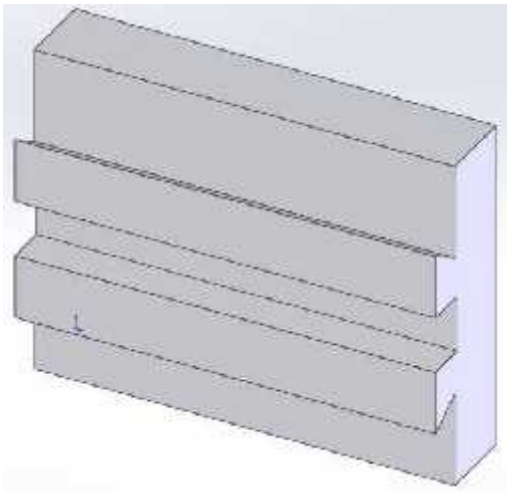


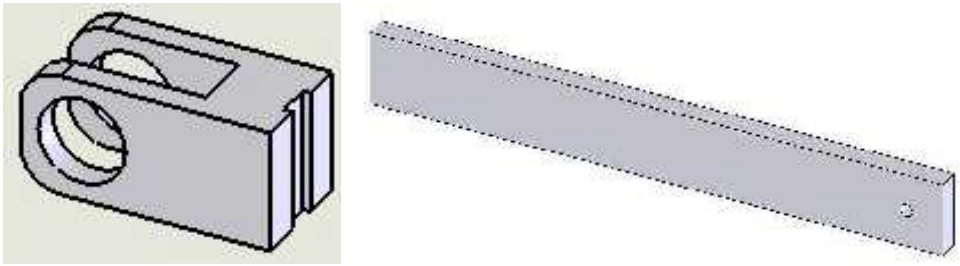
Fig.4.14. *Base carro superior*.

Este semiproducto tenía 113x88x30 mm de espesor previamente oxicortado, se montó en la mordaza del recortador para darle las siguientes dimensiones 103 x79 x27 mm de espesor y escuadrarlo, se desmontó y volvió a montar apoyado en dos paralelas dejando fuera de la mordaza 12 mm aproximadamente, se asentó, fijó y controló la alineación de una de las caras de 103 mm respecto al movimiento principal de la maquina, se limpió la cara superior y se procedió a realizar un escalón de 8.5 mm de profundidad x103 mm de largo teniendo en cuenta 17.5 mm desde la cara lateral centrada, A continuación se inclinó el carro 30^0 respecto al eje vertical y se maquinó la cola de milano. Posterior a esto se procedió de igual forma controlando 61.5 mm desde la cara centrada, después se elaboró una ranura de13.5x11 mm de profundidad controlando

33 mm desde la cara centrada, se eliminaron los cantos agudos para pasar a rectifica la cara de esta ranura controlando 8 mm según plano. Se invirtió y rectifico a 27 mm. Luego se trazaron 4 agujeros M6 según plano, para a continuación taladrar los 4 agujeros Ø5 mm y pasarle el macho.

4.1.9. Brazo

Para la fabricación de estas dos piezas se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3.



a) b)

Fig.4.15. *a) Pivote del brazo. b) Platina del brazo*.

Para el pivote se utilizó un semiproducto de 32x32x68 mm previamente cortado en la segueta mecánica. A continuación se llevó a la fresadora horizontal para darle un longitud total de 63 mm teniendo en cuenta quedara escuadra, elaborarle una ranura de 16x43 mm teniendo en cuenta 7 mm desde la cara y la simetría. Este ranurado se realizó con un disco de cote de 250x5 mm de P18 en varias pasadas. Después se invirtió y se elaboro la ranura de 9x2 mm de ancho teniendo en cuenta la simetría. A continuación se rectificó y posteriormente se taladró el agujero de Ø22H7 controlando la perpendicularidad de este con las caras rectificadas.

La platina del brazo se elaboro de una platina que tenía 32x10x 240 mm previamente cortado a segueta, se llevó a la fresadora y se le dió 31x10x236.5 mm. Posteriormente se eliminaron los cantos agudos y se rectificaron las dos caras hasta quedar en 9 mm.

Posteriormente se unieron estas dos piezas mediante un proceso de soldadura y a continuación se taladraron los agujeros de Ø13H7 y Ø5 mm .

4.1.10. Grampa

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3.

Este semiproducto tenía 79x10x2 mm de espesor previamente cizallada, se eliminaron los cantos agudos y se procedió al doblado teniendo en cuenta las medidas del plano. A continuación se trazó el agujero de Ø6 mm y taladró. Luego en la piedra se le redondearon las puntas .

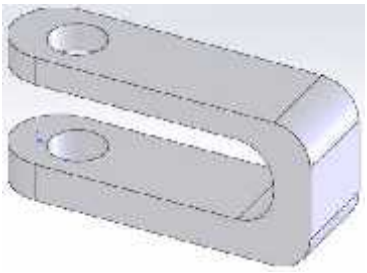


Fig.4.16. *Grampa*.

4.1. 11. Barra

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3.

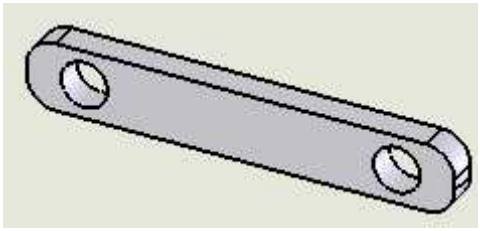


Fig.4.17. *Barra*.

Esta pieza se elaboró de un semiproducto de 25x10x123 mm previamente cizallado, se llevó al recortador y se le dieron las dimensiones de 19.5 x 10 x 119 mm. A continuación se rectificaron las caras y los cantos controlando las medidas del plano. Posteriormente se taladraron los dos agujeros Ø13H7 y se redondearon las esquinas de la pieza en la piedra.

4.1.12. Porta indentador.

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3.

Esta pieza se elaboro a partir de una palanquilla de 32x32x157 mm de longitud previamente cortada en una segueta mecánica. A continuación fue maquinada en su longitud a 152 mm controlando la perpendicularidad con las caras, (en la fresadora horizontal). Posteriormente se elaboró la ranura de 9x105 mm controlando la simetría. Seguidamente en el torno provisto de un plato 4 muelas independientes se torneó el Ø20x28 mm, taladró agujero de centro, Ø6x24 mm , Ø10x9 mm y biseló. Luego se rectificaron las caras según plano. Después se trazaron dos agujeros M6 y uno M5, se taladraron los Ø5 mm pasantes y Ø4.2 mm hasta el agujero Ø6mm. Luego se pasaron los machos respectivos.

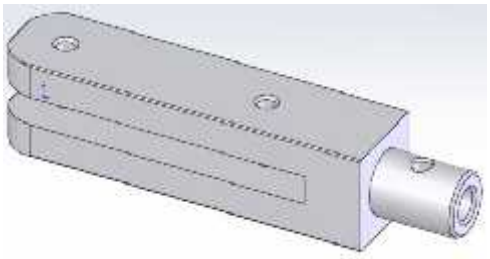


Fig.4.18. *Porta indentadror*.

Fig.4.19. *Rectificado de las caras del porta indentador*.

4.1.13. Base del deslizador.

Para la fabricación de esta pieza se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯ 75) CT3 Con C(%)=0.2; SI(%)=0.2 ; Mn(%)=0.5 y las siguientes propiedades mecanicas $\sigma\beta=45Kgf/mm^2$, $\sigma f=25Kgf/mm^2$; $\sigma\%=25$, laminado en caliente .

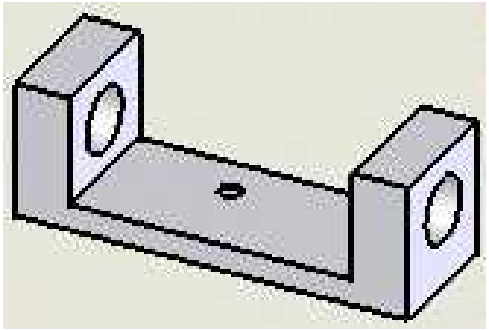


Fig.4.20. *Base del deslizador*.

Esta pieza se elaboró a partir de un semiproducto de 32x32x93 mm de largo. Se maquinó en la fresadora horizontal provista en su usillo principal de un disco de 250x5 mm de P18, primeramente se procedió elaborar su longitud y después la ranura por donde se mueve el

deslizador. A continuación se rectifican las caras y posteriormente se taladran los agujeros Ø15H7 y M6 según plano

4.1.14. Perno

Para la fabricación de esta pieza se utilizó una barra de acero AISI 1045 de Ø16x110 mm de longitud, posteriormente fue maquinado en el torno y después rectificado. A continuación la secuencia de torneado y rectificado.

Fig.4.21. *Perno.*

Secuencia de torneado

A---Colocar, centrar y fijar dejando fuera del plato 10 mm aproximadamente.

Refrentar a limpiar.

Taladrar agujero de centro.

B--- colocar entre plato y punto dejando fuera del plato 98 mm aproximadamente y fijar.

Cilindrar Ø15.5 mm.

Biselar 2x45$^{0.}$

Invertir

C ---Colocar, centrar y fijar por el Ø15.5 mm dejando fuera del plato 25 mm.

Fefrentar a dar 88 mm de longitud.

Biselar 2x45^{0}.

Rectificado en la rectificadora sin centro.

A—Ajustar la maquina.

Rectificar $Ø15m6^{+0.018}_{-0.007}$.

4.1.15. Deslizador

Para la fabricación de esta pieza se utilizó un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯75) CT3.

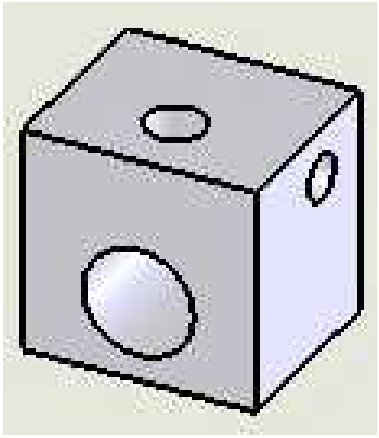


Fig.4.22. *Deslizador*.

Este semiproducto tenía 32x32x32 mm inicialmente después de cortado en la segueta mecánica. A continuación se maquinó en el recortador a 32x32x27.5 mm de largo. Luego se rectificó controlando las medidas del plano. Posteriormente se taladraron los agujeros Ø15H7 ,Ø6.5 mm y Ø6.75 mm, para la rosca M8 .

4.1.16. Base del motor

Para la fabricación de esta pieza se utilizó un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯75) CT3. A continuación se llevó al recortador para darle las medidas de 97x48x7.5 mm de espesor. Luego se elaboró la ranura de 27x2 mm de profundidad teniendo en cuenta la simetría. Después se llevo a la fresadora para maquinarle las ranuras de 6.5 y 10x2 mm teniendo en cuenta las medidas del plano. Posteriormente se eliminaron los cantos agudos, rectificaron las caras controlando 7 mm de espesor, trazaron los agujeros de Ø3.3 mm para M4, se taladraron estos y pasaron el macho.

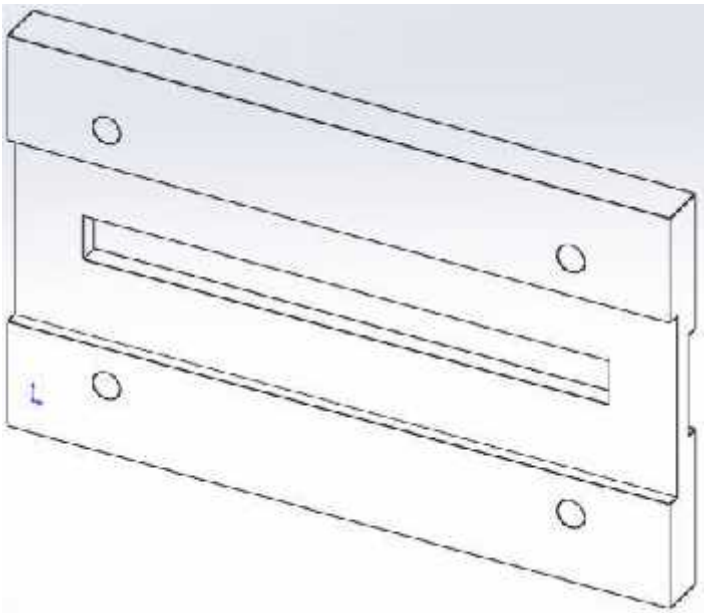


Fig.4.23. *Base del motor*.

4.1.17. Porta pesas

El porta pesas es una unidad ensamblada compuesta de dos elementos, el gancho y el plato.

Para el gancho se utilizo un acero común del grupo A--I (GOST 5781¯75) CT3. Este material era un alambrón de Ø5.5 x110 mm, se cilindró en el torno a un Ø4.9 mm y se le elaboró la rosca con un dado. Posteriormente se doblo teniendo en cuenta un radio de 7 mm .

a) b)

Fig.4.24. *Porta pesas. a) Plato. b) Gancho*.

El plato se fabricó de acero AISI 1045. Para el mismo se utilizó un semiproducto de Ø80x10 mm previamente cortado en la segueta mecánica (Se maquino en el torno).

Secuencia de torneado.

A----- Se coloco , fijo y centro en el plato tres muelas auto entrante .

- Se refrentó la cara a limpiar.
- Se refrentó hasta un Ø30 x 2 mm de profundidad .
- Se taladró agujero de centro.
- Se taladró a Ø4.2 mm.
- Se pasó el macho M5.
- Se cilindró hasta Ø 75 mm en varias pasadas.
- Se biseló 1x45^0 en Ø75 mm.

B----- Se invitó.

- Se colocó, fijó y centró.
- Se refrentó a mantener 5.5 mm en la galleta.
- Se elaboró un radio de 2 mm en el Ø75 mm.
- Se biseló 1x45^0 el Ø4.2 mm .

4.1.18. Bloque de engranajes

Para la fabricación de este bloque de engranajes se utilizo un acero mejorable 40X forjado que tenía inicialmente un Ø65x50 mm de longitud, posteriormente se torneó y talló en una talladora (piñón amortajador) por el método de generación.

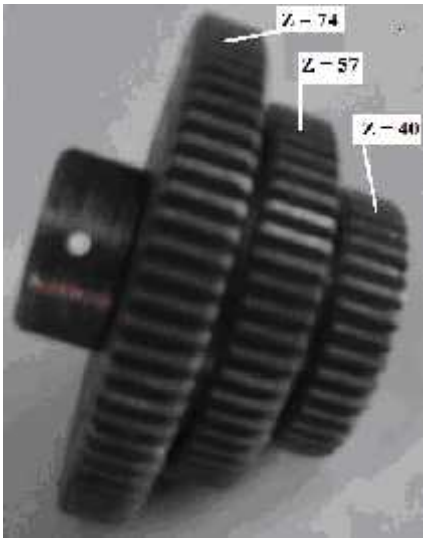


Fig.4.25. *Bloque de engranajes.*

Para la fabricación de esta piña se utilizo un acero mejorable 40X forjado que tenía inicialmente un Ø65x50 mm de longitud, posteriormente se torneó y talló en una talladora (piñón amortajador) por el método de generación.

Secuencia de torneado

A--- Colocar, fijar y centrar al aire dejando fuera del plato 20 mm aproximadamente.

Refrentar a limpiar.

Cilindrar hasta Ø22x10 mm de longitud en varias pasadas.

Biselar $1x45^0$ el Ø22 mm.

Invertir

B ---- Colocar por el Ø22 mm, fijar y centrar al aire en el plato universal sin pegar la cara al plato para poder cilindrar el Ø60.8 mm sin llegar al plato.

Refrentar a mantener 30 mm desde la cara.

Cilindrar hasta Ø60.8 mm en varias pasadas.

Cilindrar hasta Ø47.2x22 mm de longitud en varias pasadas.

Cilindrar hasta Ø33.6x11 mm de longitud en varias pasadas.

Elaborar ranura hasta Ø39x3 mm controlando 22 mm desde la cara refrentada.

Elaborar ranura hasta Ø25x3 mm controlando 11 mm desde la cara refrentada.

Taladrar agujero de centro.

Taladrar Ø5.8 mm pasante.

Pasar rima fija Ø6H7.

Biselar los Ø60.8, 47.2, 33.6 y 6 mm a $1x45^0$

Secuencia de tallado.

Fijar en la maquina por el Ø6H7 mm apoyando la cara del Ø22 mm a un buje paralelo contra el plato centrar y fijar.

Ajustar la máquina para tallar el piñón de Z =74, con módulo = 0.8.

Tallar los dientes controlando el diámetro primitivo, el largo tangente base, la cantidad de dientes a medir y la longitud de la cuerda constante (59.2 mm, $20.904^{-0.111}_{-0.284}$ mm, z = 9 dientes, $1.11^{-0.118}_{-0.303}$ mm) respectivamente.

Ajustar la máquina para tallar el piñón Z = 57, módulo = 0.8.

Tallar los dientes controlando los parámetros anteriores.

Ajustar la máquina para tallar el piñón de Z = 40, módulo = 0.8.

Tallar los dientes controlando los parámetros anteriores.

Eliminar las rebabas.

Trazado

Trazar un punto a 5 mm desde la cara del Ø22 mm y marcarlo.

Taladrado.

Taladrar un agujero Ø2.5 mm en el trazado.

4.2. Montaje y ajuste de la máquina

La máquina que se fabricó para el ensayo de rayado cuenta con dos sistemas fundamentales, un sistema de aplicación de la carga mediante un brazo al que se le ponen diferentes pesas y otro de desplazamiento lineal constante provisto de un moto reductor, un bloque de tres piñones y una cremallera.

Dimensiones principales y peso de la máquina

- Largo 480 mm (0.480 m)
- Ancho 270 mm (0.270 m)
- Alto 270mm (0.270m)
- Peso 14.5 kg

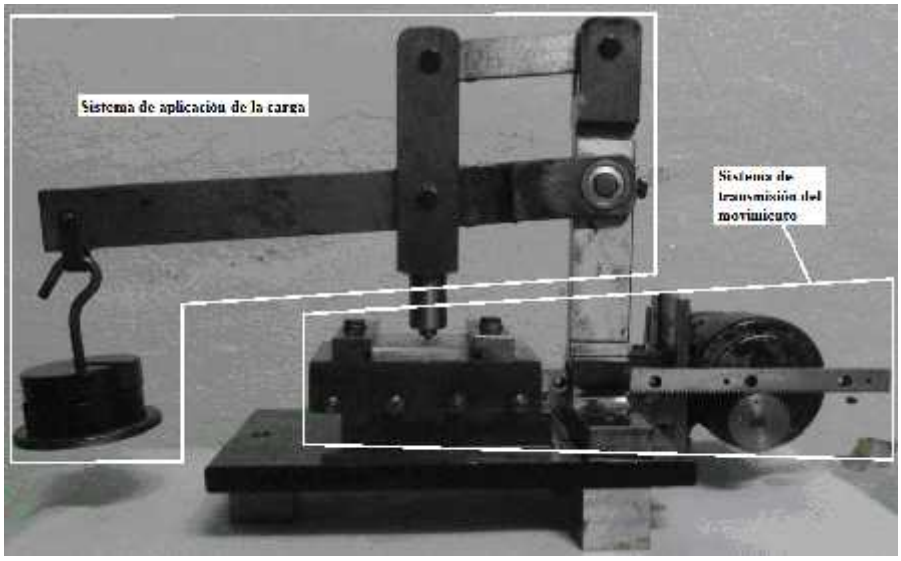


Fig.4.27. *Sistemas fundamentales de la máquina fabricada.*

4.2.1. Descripción detallada

El sistema de aplicación de la carga esta compuesto por una columna sujeta a una base principal mediante dos tornillos M6 que enroscan en las patas, a su vez forma parte de un polígono compuesto de tres piezas más que garantiza la aplicación de la carga perpendicular a la probeta (brazo, porta indentador y barra). El brazo esta acoplado a la columna mediante un eje donde se alojan dos rodamientos permitiendo un movimiento de rotación respecto a este punto en el plano. El porta indentador se fija al brazo paralelo a la columna permitiendo un movimiento de traslación paralelo a esta debido a un rodamiento que se encuentra alojado en el brazo. La barra se fija paralela al brazo por un extremo al porta indentador y el otro a la columna. Este conjunto de piezas garantiza la rigidez del sistema en el momento de aplicación de la carga y también en el momento de aplicarle el desplazamiento lineal. En le extremo del brazo se coloca el porta pesas donde se aplica la carga.

El motor reductor que garantiza este desplazamiento lineal constante esta compuesto por un motor eléctrico de corriente alterna con una tensión de 110 V, 0.5 A, 19 W y 3170 rpm, el reductor tiene una relación de transmisión 1/528 ó sea el motor eléctrico rota 3170 rpm y el árbol de salida del reductor rota 6 rpm. Este moto reductor tiene en su árbol de salida de tres piñones que garantizan el desplazamiento lineal necesario para el ensayo de rayado mediante una cremallera que se fija al carro superior y este a su vez se desliza linealmente por su base mediante colas de milano.

La máquina esta compuesta por veintidós piezas, de estas cuatro son uniones ensambladas, un moto reductor y artículos normalizados como tornillos, tuercas y rodamientos. A continuación el orden del ensamble.

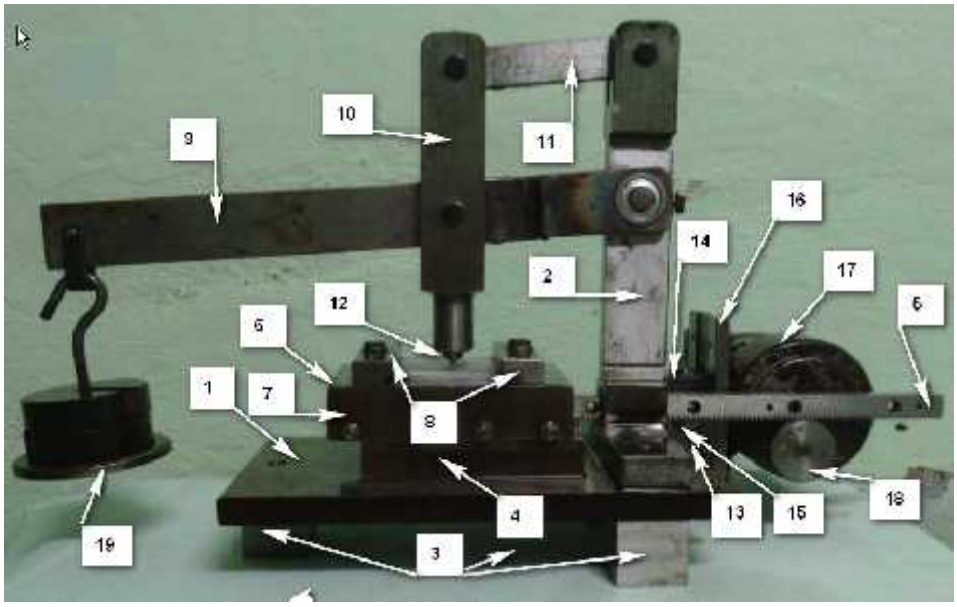


Fig.4.28. *Partes de la máquina fabricada.*

Partes:

1) Base principal
2) Columna
3) Patas
4) Base del carro superior
5) Cremallera
6) Carro superior
7) Laine de ajuste
8) Bridas de sujeción
9) Brazo
10) Porta indentador
11) Barra
12) Indentador
13) Base del deslizador
14) Deslizador
15) Perno
16) Base del motor

17) Moto reductor

18) Bloque de engranajes

19) Porta pesas

4.2.2. Probeta para el ensayo

La probeta debe cumplir los siguientes requerimientos.

- Dimensiones 50x50x5 mm aproximadamente.
- No debe tener más de 0.05µmm de error de paralelismo.
- La rugosidad superficial (Ra) debe estar entre 0.02 y 0.05µmm.

Fig.4.29. *Probetas para el ensayo.*

Montaje de la probeta

La probeta se coloca deslizándose por la superficie del carro superior y se fija con las bridas de sujeción.

4.2.3. Pasos para la realización del ensayo

- Se ajusta el piñón según sea la velocidad de desplazamiento deseada.
- Se retira el porta pesas del brazo.
- Se fija el brazo con el tornillo de sujeción.
- Se coloca y fija la probeta.
- Se desplaza el carro superior controlando que el indentador quede aproximadamente 15 mm separado de la brida de sujeción.
- Se le quita la fijación al brazo.
- Se coloca el porta pesas con la carga.
- Se presiona el interruptor para iniciar el desplazamiento controlando no choque el porta indentador con la brida de sujeción.

4.3. Valoración económica

En este acápite se realiza una valoración económica del costo de producción de la máquina fabricada. El análisis se realiza en una hoja de cálculo Excel que se utiliza en una empresa de la ciudad de Santa Clara. Es importante señalar que el costo que se obtiene utilizando este método

de cálculo es superior al real pues se asumen gastos que no se tuvieron realmente y que se expondrán en el desarrollo.

Primeramente se tienen en cuenta los gastos de materia prima, Tab. 4.1.

Tabla. 4.1. *Desglose de gastos de materias primas*.

	A	B	C	D	E	F	G
1	COSTEO						
2							
3	DESGLOSE DE GASTOS DIRECTOS DE MATERIAS PRIMAS						
4	Descripción	U.M	Cant	$ USD/Unid	$ MN/Unid	Totales CUC	Totales CUP
5	Acero	Kg	8	$4,10	$0,00	$32,80	$0,00
6	Bronce	Kg	0	$6,00	$0,00	$0,00	$0,00
7	Aluminio	Kg	0	$4,25	$0,00	$0,00	$0,00
8	Laton	Kg	0	$3,74	$0,00	$0,00	$0,00
9	Hierro Fundi	Kg	0	$1,10	$0,00	$0,00	$0,00
10	Hilo de arrastre	Kg	0	$4,00	$0,00	$0,00	$0,00
11	Cobre	Kg	0	$6,04	$0,00	$0,00	$0,00
12	Columnas	U	0	$5,45	$0,00	$0,00	$0,00
13	Bujes	U	0	$1,38	$0,00	$0,00	$0,00
14	Expulsores	U	0	$1,10	$0,00	$0,00	$0,00
15	Tornillos	U	29	$0,30	$0,00	310,44	$0,00
16	Resortes	U	0	$1,00	$0,00	$0,00	$0,00
17	Pasadores	U	0	$0,25	$0,00	$0,00	$0,00
18	Topes	U	0	$0,00	$0,00	$0,00	$0,00
19	Cancamos	U	0	$0,00	$0,00	$0,00	$0,00
20	Goma	M^2	0	$200,00	$0,00	$0,00	$0,00
21	Sellos	U	0	$0,00	$0,00	$0,00	$0,00
22	Tubo de Acero Cuadrado	Mt	0	$2,00	$0,00	$0,00	$0,00
23	Chapa Acero Inoxidable	Kg	0	$4,00	$0,00	$0,00	$0,00
24	Chapa Acero	Kg	0	$1,00	$0,00	$0,00	$0,00
25	Teflon	Kg	0	$0,00	$0,00	$0,00	$0,00
26	Rodamientos	U	5	$8,60	$0,00	$43,00	$0,00
27	Electrodo Soldar Comente	Kg	0,1	$2,00	$0,00	$0,20	$0,00
28	Electrodo Soldar Especial	Kg	0	$25,00	$0,00	$0,00	$0,00
29	Caja de molde	U	0	$0,00	$0,00	$0,00	$0,00
30							
31					SUBTOTAL	$86,87	$0,00

Como se aprecia en la tabla anterior se considera que el acero utilizado se compra al igual que los rodamientos. Realmente estas materias primas son recuperadas, es decir se utilizan restos de laminados que se encontraban destinados a materias primas. Los rodamientos también fueron retirados de una máquina en desuso que será reciclada. Por tal motivo el gasto real corresponde a una varilla de soldar que se utilizó.

En la Tabla 4.2 se presentan los gastos de tiempo, salario y energía.

Tabla 4.2. *Desglose de los gastos de tiempo, salario y energía*.

Costeo Pag 7

DESGLOSE DE LOS GASTOS DE TIEMPO, SALARIO y ENERGIA

PROYECTO	T(Minutos)	T(Horas)	Horas	Cosumo Horario	KW-H Consumido	Tarifa	Valor
Diseño		40	40,00	0,00	0,00	15	$600,00
Tecnologia	0	24	24,00	0,00	0,00	10	$240,00
Dibujo	0	16	16,00	0,00	0,00	8	$128,00
FABRICACION	T(Minutos)	T(Horas)	Horas	Cosumo Horario	KW-H Consumido	Tarifa	G.Sal
Corte		16,00	16,00	1,50	24,00	0,83	$14,21
Torno	0,00	0,00	0,00	9,05	72,40	1,45	$11,71
Fresa	0,00	24,00	24,00	10,64	255,36	1,46	$35,14
Rectificadora	0,00	8,00	8,00	12,59	100,72	1,46	$11,61
Afiladora	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	1,46	$0,00
Mandriladora	0,00	0,00	0,00	13,00	0,00	1,46	$0,00
Tal. Coordenada	0,00	0,00	0,00	4,25	0,00	1,45	$0,00
Cepillo	0,00	0,00	0,00	57,00	0,00	1,45	$0,00
Recortador	0,00	24,00	24,00	7,50	180,00	1,46	$35,04
Mortajadora	0,00	0,00	0,00	1,40	0,00	1,46	$0,00
Centro de Maquinado	0,00	0,00	0,00	27,00	0,00	1,60	$0,00
Centro de Fresado	0,00	0,00	0,00	17,00	0,00	1,60	$0,00
Fresadora CNC	0,00	0,00	0,00	16,00	0,00	1,60	$0,00
Electroerosión Hilo	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	1,60	$0,00
Ajuste	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	1,60	$0,00
Trat. Termico	0,00	0,00	0,00	44,17	0,00	1,46	$0,00
Soldadura	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,46	$1,46
Pailería	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	$0,00
Estampado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,37	$0,00
Mecanico Rep.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	$0,00
Pantografo	0,00	0,00	0,00	1,12	0,00	1,37	$0,00
Taladro	0,00	4,00	4,00	4,00	16,00	1,46	$5,84
Herr. Rep.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	$0,00
			85,85		648,48		$116,28

Como se aprecia en esta tabla se incluyen los gastos de diseño, tecnología y dibujo y se asume que estos son realizados por la empresa, siendo estos trabajos realizados por el autor en su tiempo libre. Los tiempos de maquinado se trataron de tomar lo más exactamente posible.

En la Tabla 4.3 se muestra el resultado del cálculo total.

Tabla 4.3. *Costo total de la máquina según programa de cálculo*.

"ANEXO DE CONTRATO" — PREFACTURA

DATOS DEL CLIENTE

CLIENTE		CIUDAD	Santa Clara
CODIGO		TELEFONO	
CONTACTO		CORREO	
CARGO		FAX	
DIRECCION			

DATOS DEL SUMINISTRADOR

UEB "SERVICIOS INDUSTRIALES"

DIRECCION

TELEFONO

DESCRIPCION, CANTIDAD Y PRECIO

	Cant	Precio CUC	Precio CUP	Importe.CUC	Importe.CUP	Importe T
Construccion	1	$226,31	$752,70	$226,31	$752,70	$979,01
Proyecto	1	$0,00	$968,00	$0,00	$968,00	$968,00
				$226,31	$1.720,70	$1.947,01

FORMA DE PAGO

GARANTIA

OTROS DATOS Y CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO QUE SE OFERTA

Como se puede apreciar el costo de fabricación de la máquina, inclusive teniendo en cuenta los gastos que se incluyen y no son reales, es de 226.31 CUC y 1 720.70 CUP.

En el Anexo I se incluye una prefactura de compra de una máquina para realizar este ensayo y el precio de la misma, sin incluir el costo de transportación ni del especialista que hay que traer para la instalación y puesta a punto de la misma es de 30 500 Euros.

CONCLUSIONES CAPÍTULO IV

- Se realizó la fabricación de las piezas diseñadas utilizando las máquinas herramienta disponibles. Se respetó las tolerancias dimensionales y de forma y posición establecidas a partir de una correcta tecnología de fabricación.
- Se realizó el ensamble de la máquina y se comprobó que la misma trabaja correctamente. Con ese fin se realizó un ensayo de rayado en una probeta de aluminio y se verificó que todos los parámetros de funcionamiento están dentro de los establecidos por la norma ASTM G 171.
- La valoración económica da como resultado que el costo de fabricación de la máquina, según procedimiento empleado en una empresa real, es de 226.31 CUC y 1720.70 CUP. La oferta para la compra de una máquina de este tipo a una empresa española muestra que su precio es de 30 500 euros sin tener en cuenta la transportación y el viaje de un asesor para el montaje y puesta a punto de la misma. Como se puede apreciar el ahorro resulta considerable, sobre todo teniendo en cuenta la situación económica que tiene nuestro país.

CONCLUSIONES GENERALES

- Como resultado del análisis de la bibliografía relacionada con este tema se concluye que los ensayos mecánicos que incluyen contacto son muy utilizados para determinar propiedades fundamentales de los materiales sin necesidad de realizar ensayos destructivos. Los ensayos por contacto más utilizados son los de indentación normal y el ensayo de rayado. El ensayo de rayado se utiliza como método que se aplica en investigaciones que estudian el mecanismo de desgaste abrasivo en la superficie de materiales y como el principal ensayo para evaluar la adhesión y el coeficiente de desgaste en recubrimientos con propiedades especiales.
- Al analizar la norma ASTM G 171 se define que la máquina para realizar el ensayo de rayado debe incluir como elementos fundamentales un indentador rígido, un dispositivo porta probetas, sistema para la aplicación de la carga normal, y el sistema para garantizar el movimiento relativo entre el penetrador y la probeta. El equipamiento para la medición del ancho de la huella se puede incluir en la máquina o puede estar independiente de ella. Opcionalmente se puede agregar a la máquina un sensor para medir la fuerza de rayado. La longitud de rayado se fija en un límite mínimo de 5 mm, no se establece el límite máximo, y puede tener forma lineal o forma de arco en dependencia del tipo de movimiento de la máquina. La velocidad de rayado debe ser constante y variar en un rango de 0.2 a 5.0 mm seg^{-1}. La magnitud de la fuerza normal aplicada no se establece en la norma.
- Se diseña una máquina que cumple con lo estipulado en la norma ASTM G 171, siendo este diseño bastante simple. Los parámetros fundamentales de la máquina a fabricar serán:
  - El sistema de aplicación de la carga permitirá un amplio margen de fuerza normal.
  - Se garantizarán tres velocidades de desplazamiento relativo entre la probeta y el indentador.
  - La longitud de la huella puede llegar hasta los 25 mm.
  - El desplazamiento relativo será lineal.
  - Se empleará el indentador correspondiente al método de medir dureza Rockwell.
- Se realizó la fabricación de las piezas diseñadas utilizando las máquinas herramienta convencionales disponibles. Para la fabricación de las piezas se utilizó materiales reciclados a los que se les realizó análisis químico para conocer a qué material correspondía. Se realizó el ensamble de la máquina y se comprobó que la misma trabaja correctamente. Con ese fin se realizó un ensayo de rayado en una probeta de aluminio y se

verificó que todos los parámetros de funcionamiento están dentro de los establecidos por la norma ASTM G 171.

- La valoración económica da como resultado que el costo de fabricación de la máquina, según procedimiento empleado en una empresa real, es de 226.31 CUC y 1720.70 CUP. La oferta para la compra de una máquina de este tipo a una empresa española muestra que su precio es de 30500 euros sin tener en cuenta la transportación y el viaje de un asesor para el montaje y puesta a punto de la misma. Como se puede apreciar el ahorro resulta considerable, sobre todo teniendo en cuenta la situación económica que tiene nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirrebeitia, J., Vallejo, J., Abasolo, M., Avilés, R., Fernández, I. (2010). *Capacidad de carga estática generalizada en rodamientos de vuelco de contacto angular de 4 puntos.* XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. España.

Akono, A., randall, N. Ulm, F. (2012). *Experimental determination of the fracture toughness via microscratch tests*: Application to polymers, ceramics and metals. Journal of Materials Reserch. Vol. 27.

ASM HANDBOOK.(1992). Volume 18, *Friction, Lubrication and Wear Technology*.

ASTM G 171. (2009). *Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus.*

Bellemare, S., Dao, M., Suresh, S. (2008) *Effects of mechanical properties and surface friction on elasto-plastic sliding contact*. Mechanics of Materials. Vol. 40.

Bellemare, S., Dao, M., Suresh, S. (2007). *The frictional sliding response of elasto-plastic materials in contact with a conical indenter*. International Journal of Solids and Structures. Vol. 44.

Bellemare, S., Dao, M., Suresh, S. (2010). . *A new method for evaluating plastic properties*. Acta Materialia. Vol. 58.

Bellido, V., Stefanopoulos., Deguilhen, F. (1995). *Friction monitored scratch adhesión testing.* Surfaces Coatings Technology. Vol. 74-75.

Black, A., Kopalinsky, E., Oxley, P. (2007). *On the numerics and correlation of scratch testing.* Journal of Machanics of Materials and Structures. Vol. 2.

Bull, S. (1997), *Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test*. Tribology International. Vol. 30.

Catálogo SKF on line. (2015). *Recuperado:* http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ Consultado 12-05-2015.

Dao, M., Chollacoop, N., Van Vliet, K., Venkatesh, T., Suresh, S. (2001). *Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented shaip indentation*. Acta Materialia. Vol. 49.

Esqué de los Ojos D. (2006). *Una ecuación de dureza para ensayos de indentación esférica*. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cataluña.

García, A., González, G., García. M. (2007). *Capacidad de carga estática en rodamientos*. Normalización y tendencias. Revista Ingeniería Mecánica. Vol.1.

Giradles, I.(2009). *Nanoindentation under Dynamic Conditions*. (Tesis de Doctorado). Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.

Gómez Botero, M. (2005). *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona.

Guliáev, A. (1983). *Metalografía.* Editorial Mir.

Hertzberg, R. (1996). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4th Ed. John Wiley & Sons.

Kareer Anna. (2010). *Nano scratch hardness and the lateral size effect.* Tesis de Doctorado. University of Leicester.

López Moreno, G. (2013). *Caracterización tribológica de películas de ZrN depositadas mediante técnica PVD*. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela.

Mohs F., Haidinger. (2007), *Treatise on mineralogy, or, The natural history of the mineral kingdom*. Vol. 1. Edingburg. Printed for A. Constable.

Mott, R. (2010). *Diseño de elementos de máquinas*. PEARSON Educación.

NC-ISO 76: (2006). *Cojinetes de Rodamiento* – Capacidad de carga estática.

Palkovic,S. (2014). Development of a Portable Scratch Test Device for Probing Strength, Ductility and Structural Distress in Metal Materials. (Tesis de Maestría). Massachusetts Institute of Technology.

Petersen, D., Link, R., Rutheford K., Hutchings, I. (1997). *Theory and application of a micro-scale abrasive wear test*. Journal of Testing and Evaluation. Vol 25.

Prasad, A., Dao, M., Suresh, S. (2009). *Steady-state frictional sliding contact on surfaces of plastically graded materials.* Acta materialia. Vol. 57.

Stilwell, N., Tabor D, (1961). *Elastic recovery of conical indentations*. Proceedings of the Physical Society, vol. 78, no 2.

Tabor, D. (1956). *The physical meaning of indentation and scratch hardness*. Br J Appl Phys. Vol. 7. No 159.

Wheeler, J (2009). *Nanoindentation under Dynamic Conditions.* (Tesis de Doctorado). Universidad de Cambridge.

Wrendenberg, F., Larsson, P. (2009). *Scratch testing of metals and polymers*: Experimentals and numerocs. Wear. Vol. 266.

ANEXOS

OFERTA Nº 15/0527.1

PRESUPUESTO (PRECIOS EXWORK MICROTEST MADRID):

DESCRIPCIÓN	IMPORTE
IMPORTE MTR3/50-50/NI	30.500,00 €
IMPORTE OPCIÓN IMAGEN	14.850,00 €
IMPORTE OPCIÓN EMISIÓN ACÚSTICA (Average)	4.950,00 €
OPCIÓN EMISIÓN ACÚSTICA CON PROCESADOR DIGITAL DESEÑALES Y SOFTWARE AEWIN	8.650,00 €
TOTAL (IVA no incluido)	s/opciones

CONDICIONES:

REQUISITOS DE INSTALACIÓN (A PROPORCIONAR POR EL USUARIO):

MESA O BANCADA SOPORTE A LA ALTURA DE TRABAJO PARA EL EQUIPO Y ACCESORIOS: TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN (adaptado) 127Vac, 60Hz, o 220Vac, 50Hz, 1
FASE + TIERRA (PARA UNA POTENCIA DE AL MENOS 1kw), CON AL MENOS 5-6 TOMAS DISPONIBLES POR EQUIPO (REGLETA O SIMILAR).

GARANTÍA:

1 AÑO

PRECIOS:

EXWORK MADRID, España.
Gastos de transporte: NO INCLUIDOS (a cotizar aparte)
Gastos de instalación, puesta en marcha y adiestramiento: no incluye los gastos de desplazamiento y estancia de un técnico en las instalaciones del usuario final.

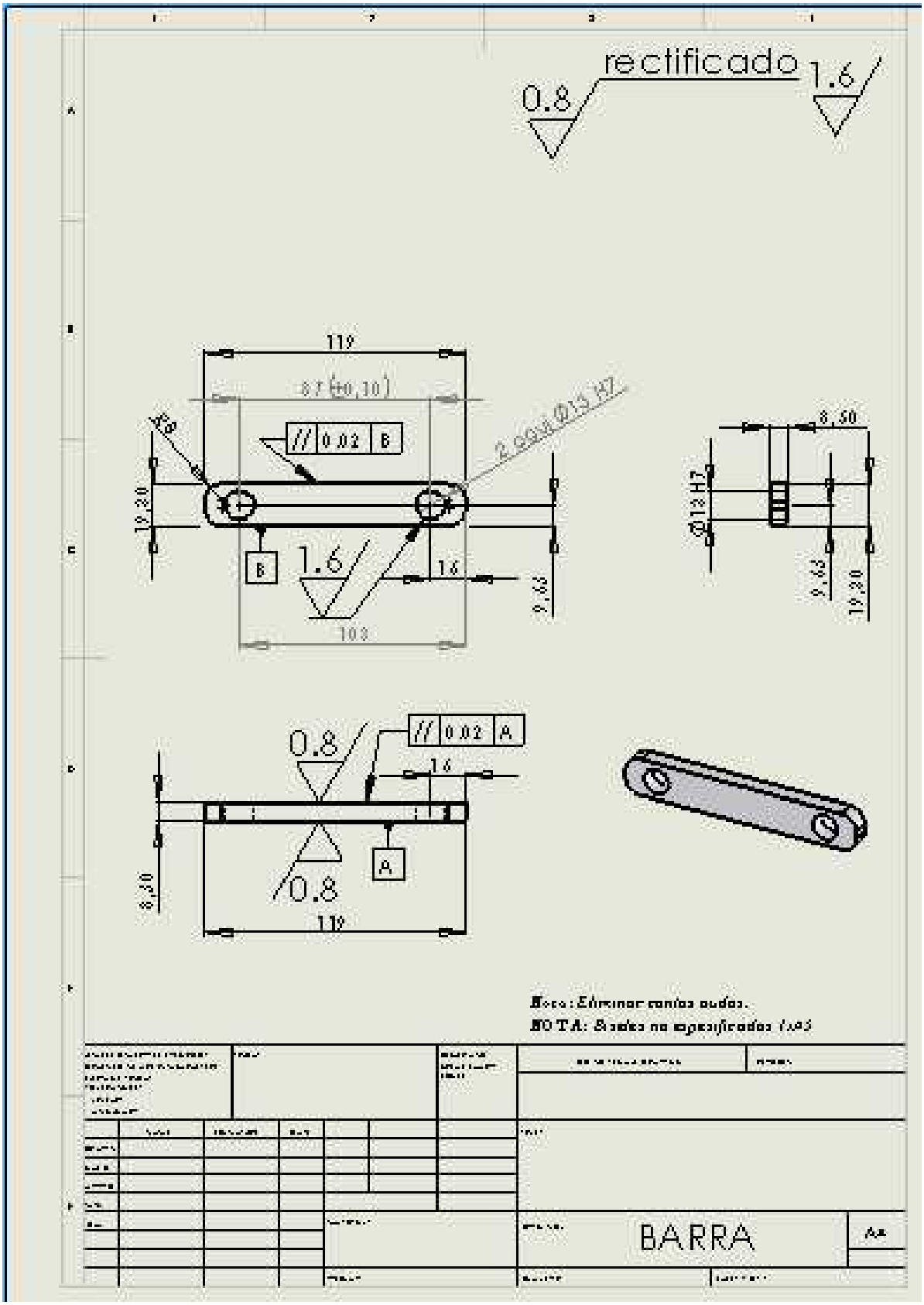
PLAZO DE ENTREGA ESTIMADO: 12 semanas

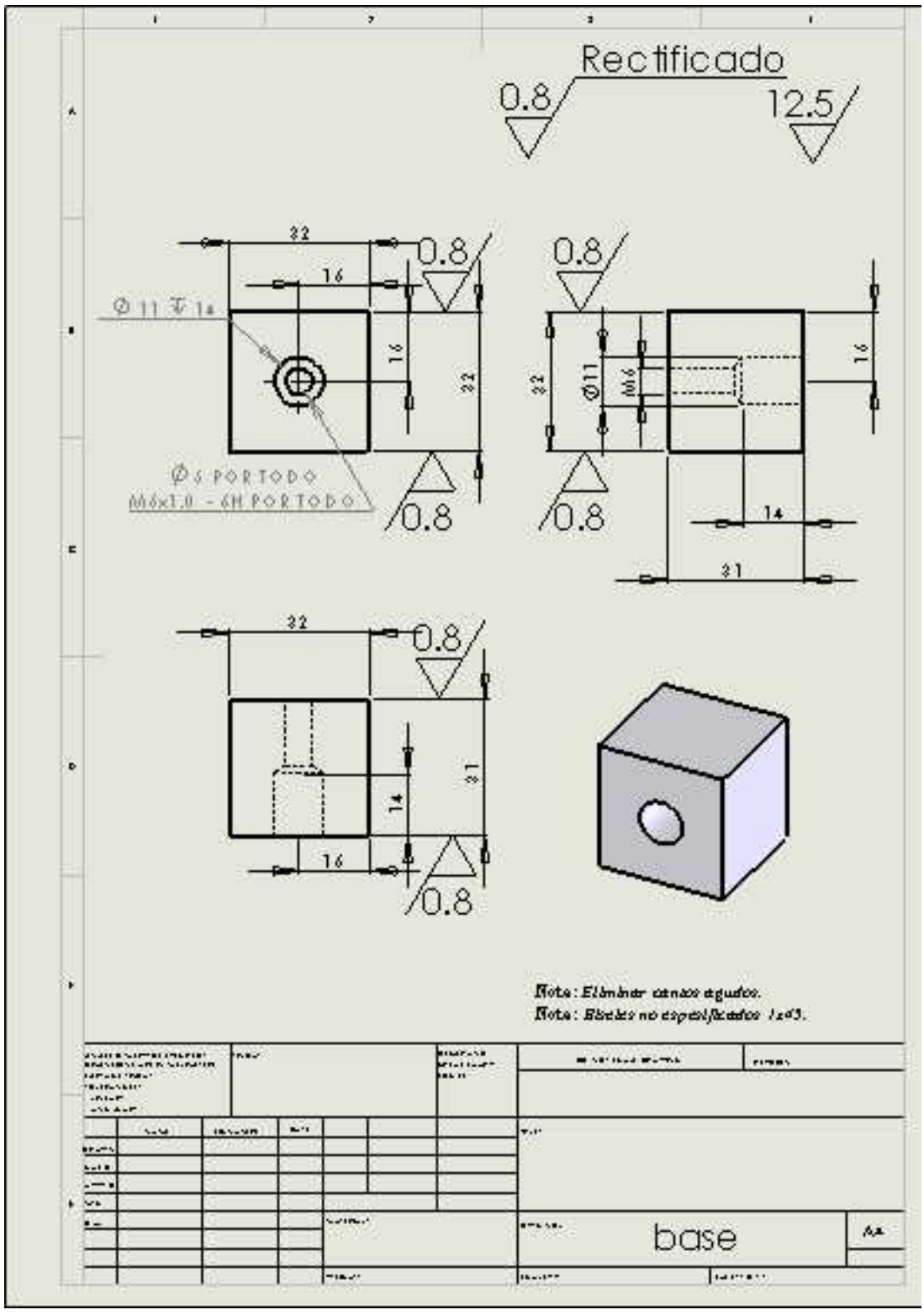
FORMA DE PAGO: (A CONFIRMAR) En el momento del pedido por transferencia o carta de crédito a la vista irrevocable.

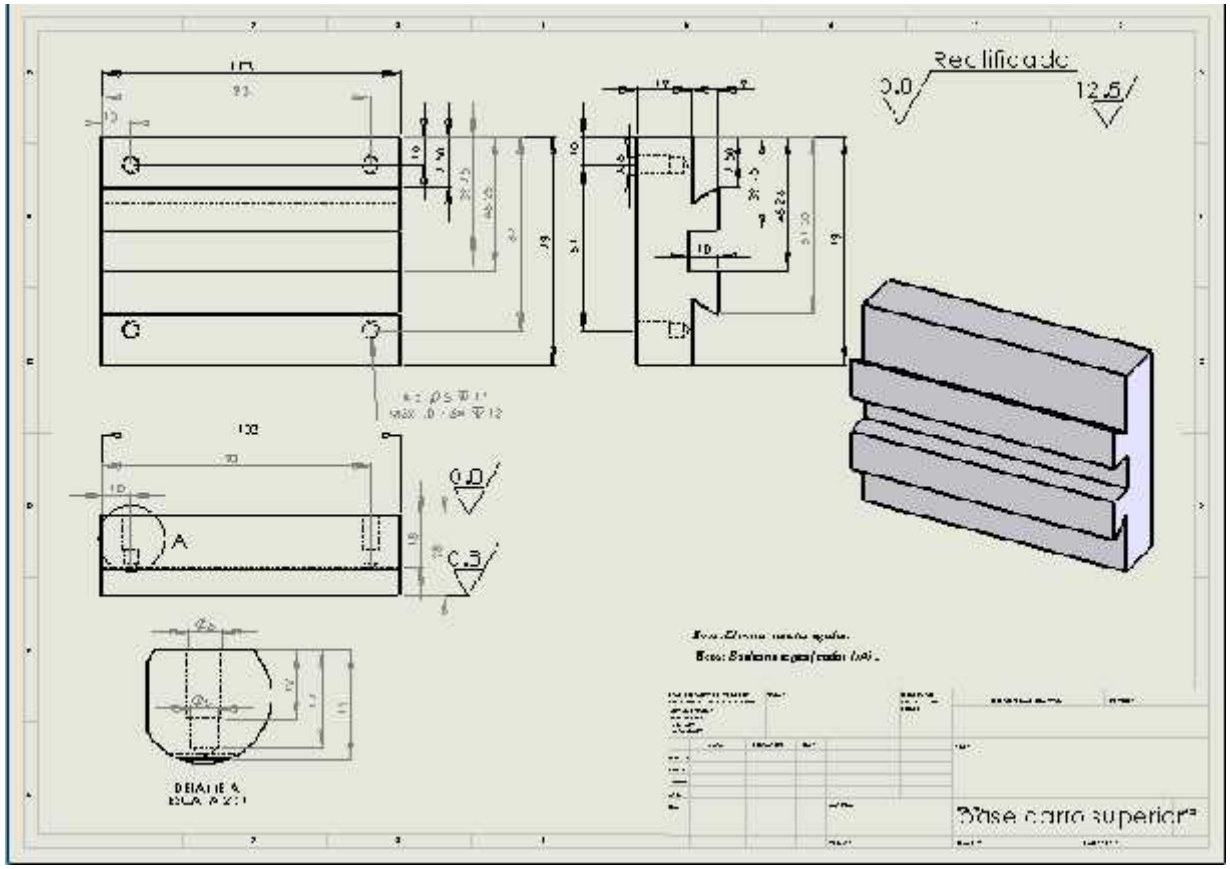
Validez de la oferta: 3 meses

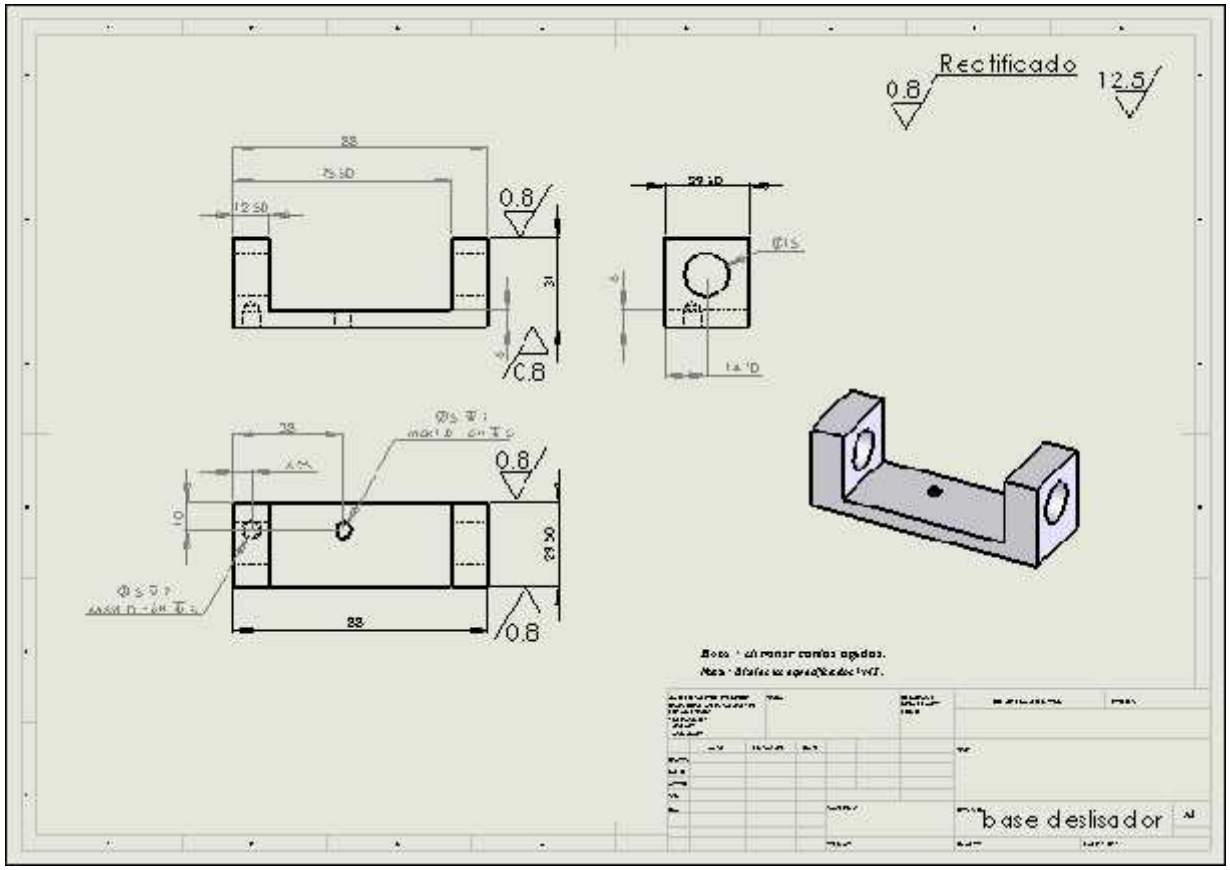
Atentamente,

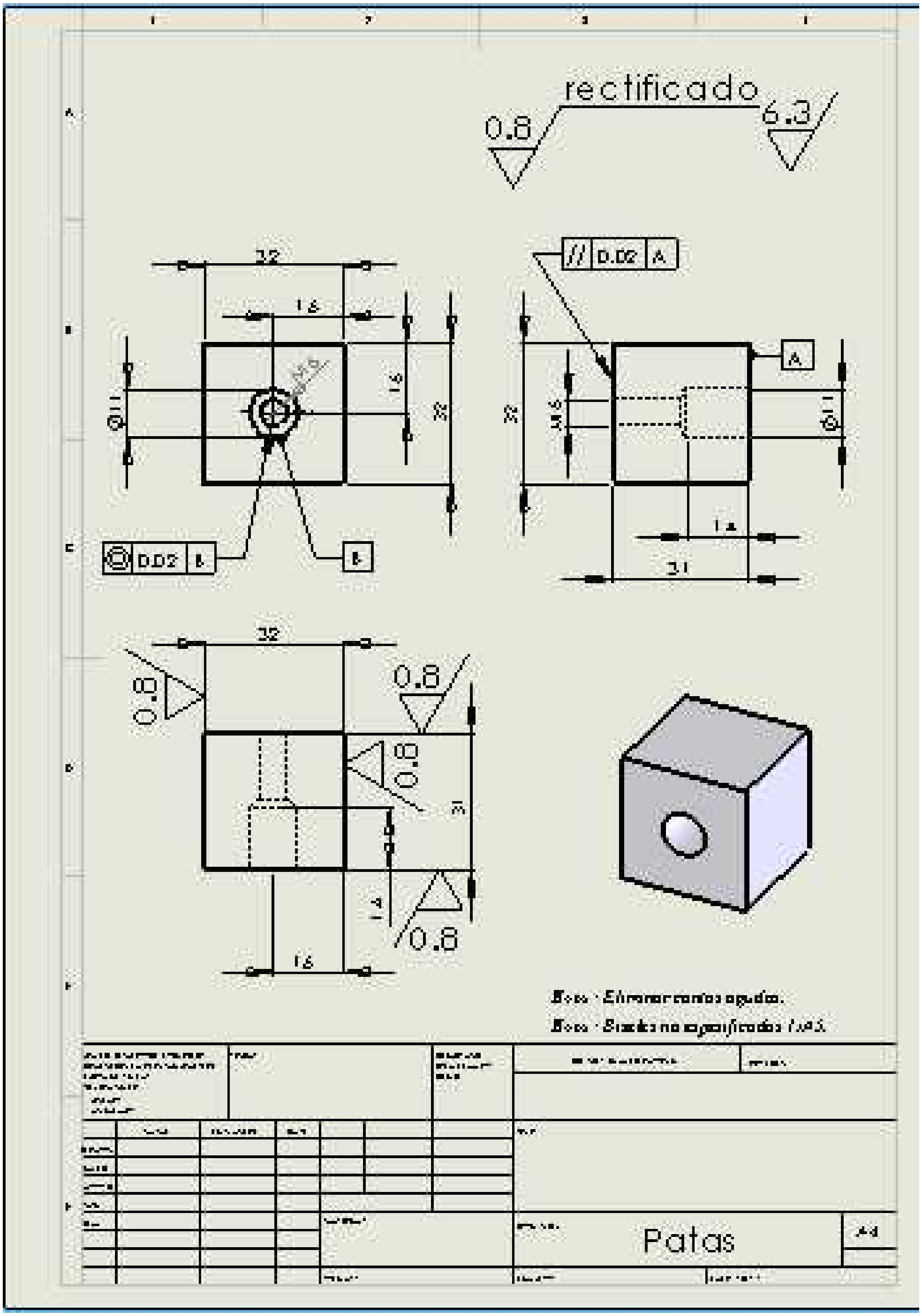
Miguel López Almorox
MICROTES
T, S.A.


rectificado
0.8
1.6
119
97 (±0,10)
// 0.02 B
2 agujeros Ø13 H7
10,20
B
1.6
16
9,63
103
8,50
Ø13 H7
9,63
19,20
0.8
// 0.02 A
16
A
8,30
119
Nota: Eliminar cantos vivos.
NOTA: Grados no especificados ±0,5
BARRA
A4

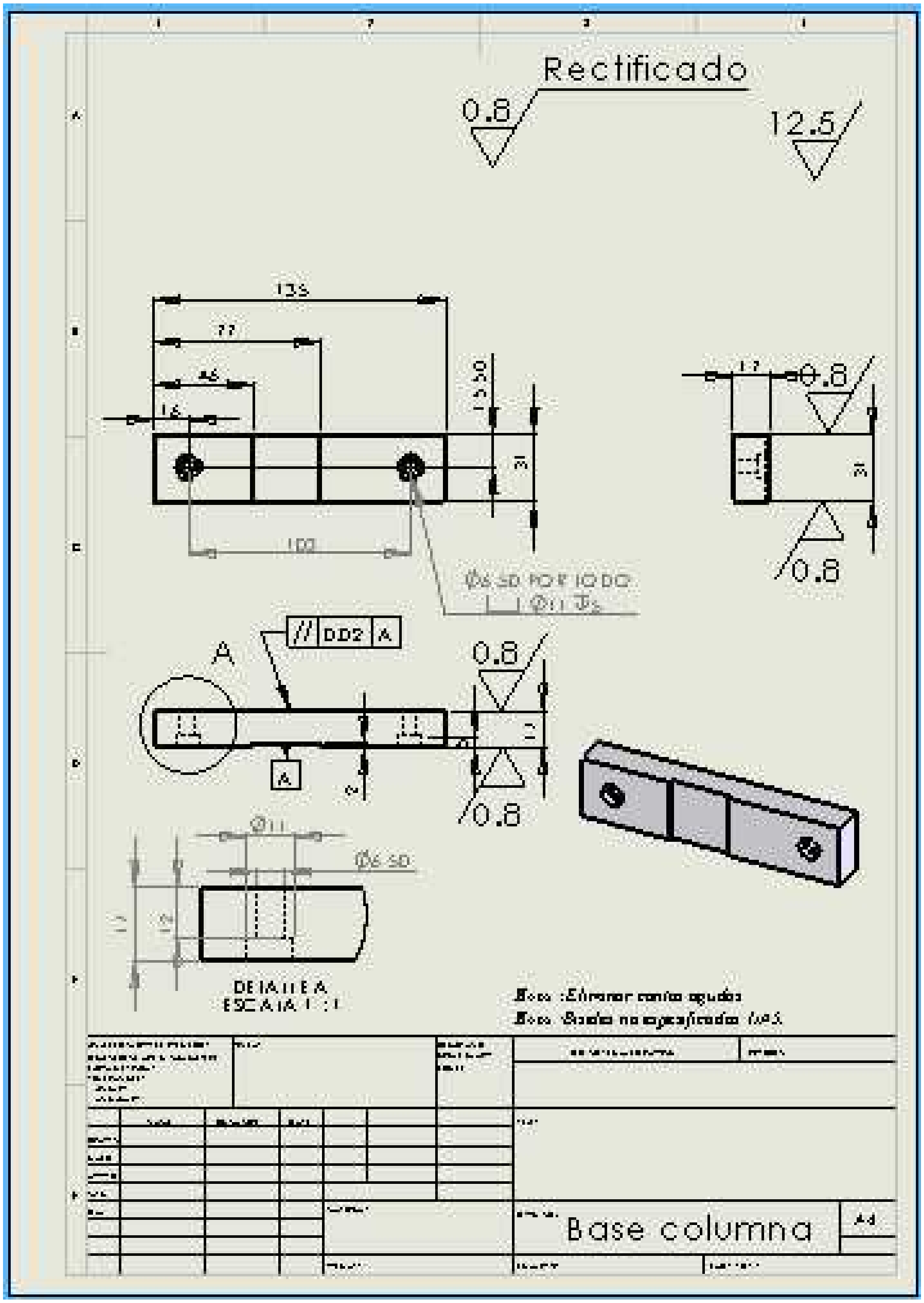

Rectificado
0.8
12.5
32
16
0.8
Ø 11 ↧ 14
16
32
Ø 5 PORTODO
M6x1.0 - 6H PORTODO
0.8
0.8
32
Ø11
M6
16
14
31
0.8
32
0.8
21
14
16
0.8
Nota: Eliminar cantos agudos.
Nota: Bloche no especificados 1x45.
base


Rectificado
0.0
12.5
A
0.0
6.3
Base carro superior

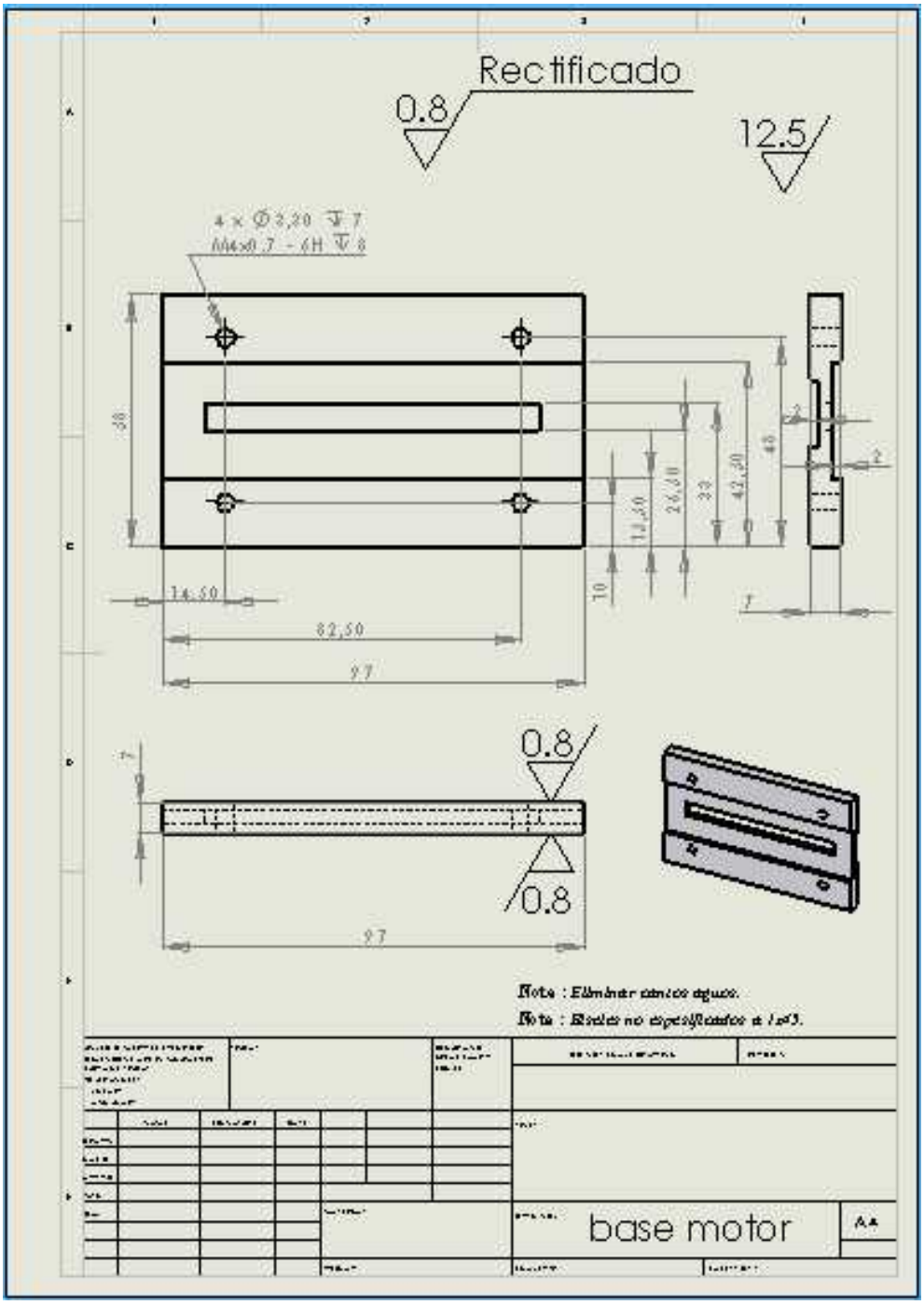

Rectificado
0.8
12.5
0.8
6.8
0.8
0.8
base deslisador

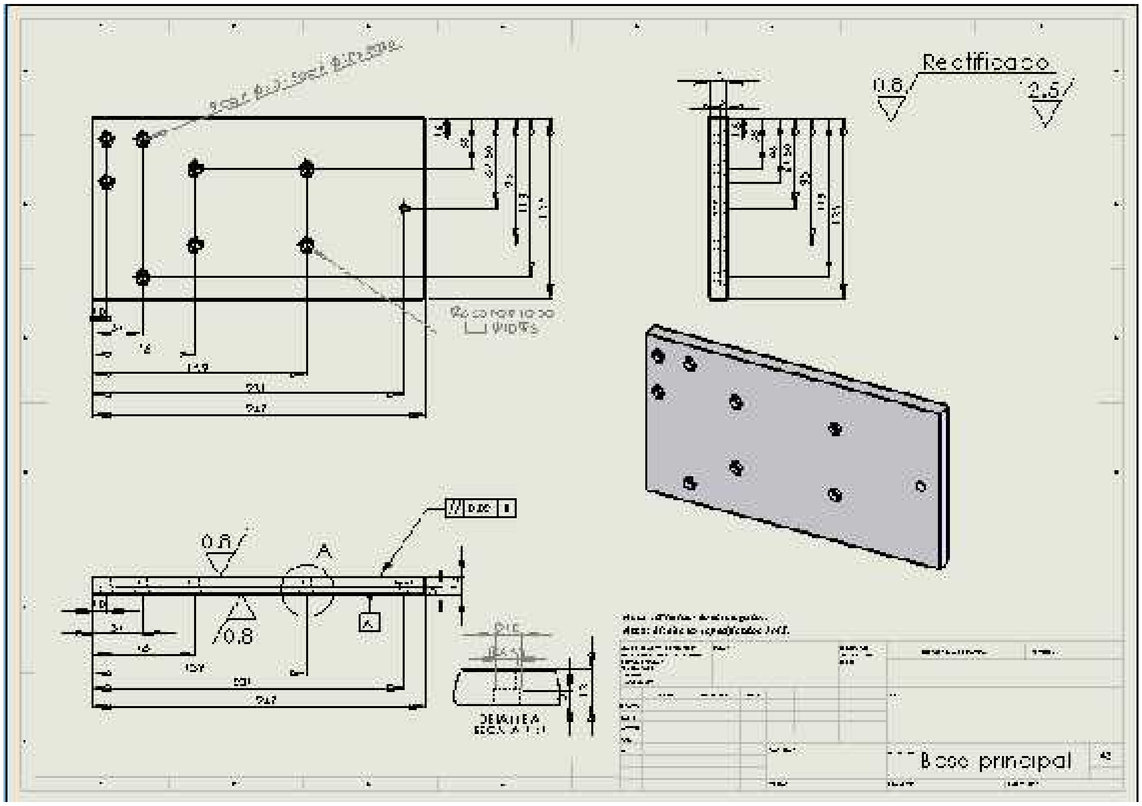


rectificado
0.8
6.3
32
16
28
0.02
A
B
31
14
Patas
A4

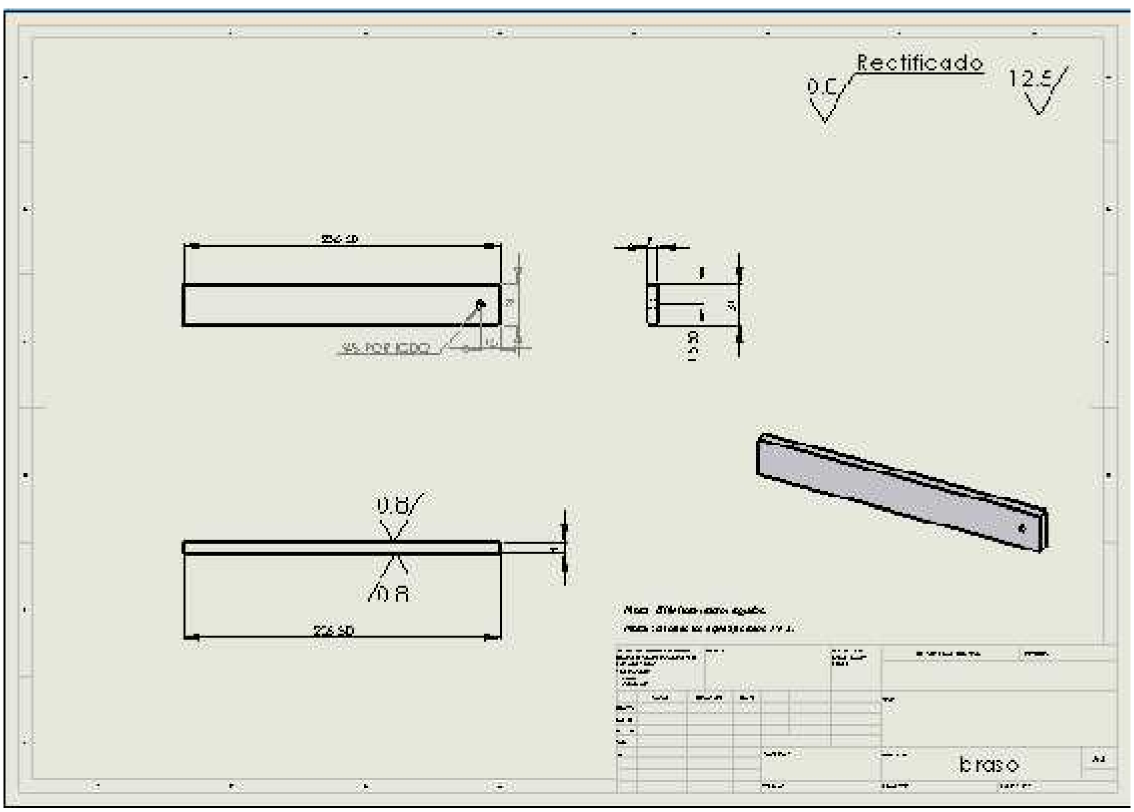


Rectificado
0.8
12.5
135
77
46
16
31
102
0.8
A
0.8
0.8
Ø11
Ø6.5D
Base columna
A4

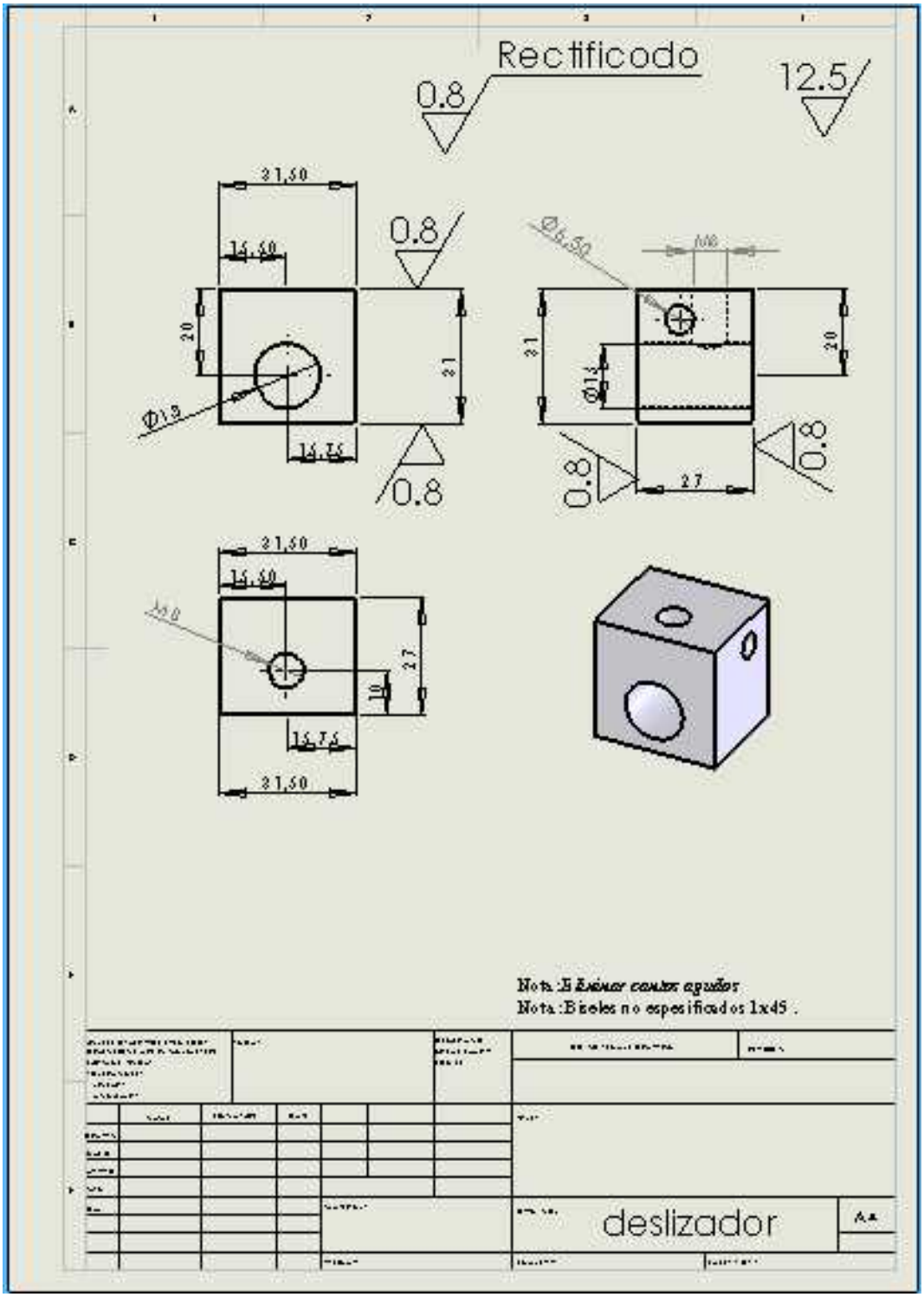

Rectificado
0.8
12.5
4 x Ø3,20 ↧7
M4x0,7 - 6H ↧8
38
14,50
82,50
97
10
12,50
26,50
33
42,50
45
7
2
0.8
0.8
97
Nota : Eliminar cantos agudos.
Nota : Radios no especificados a 1mm.
base motor
A4

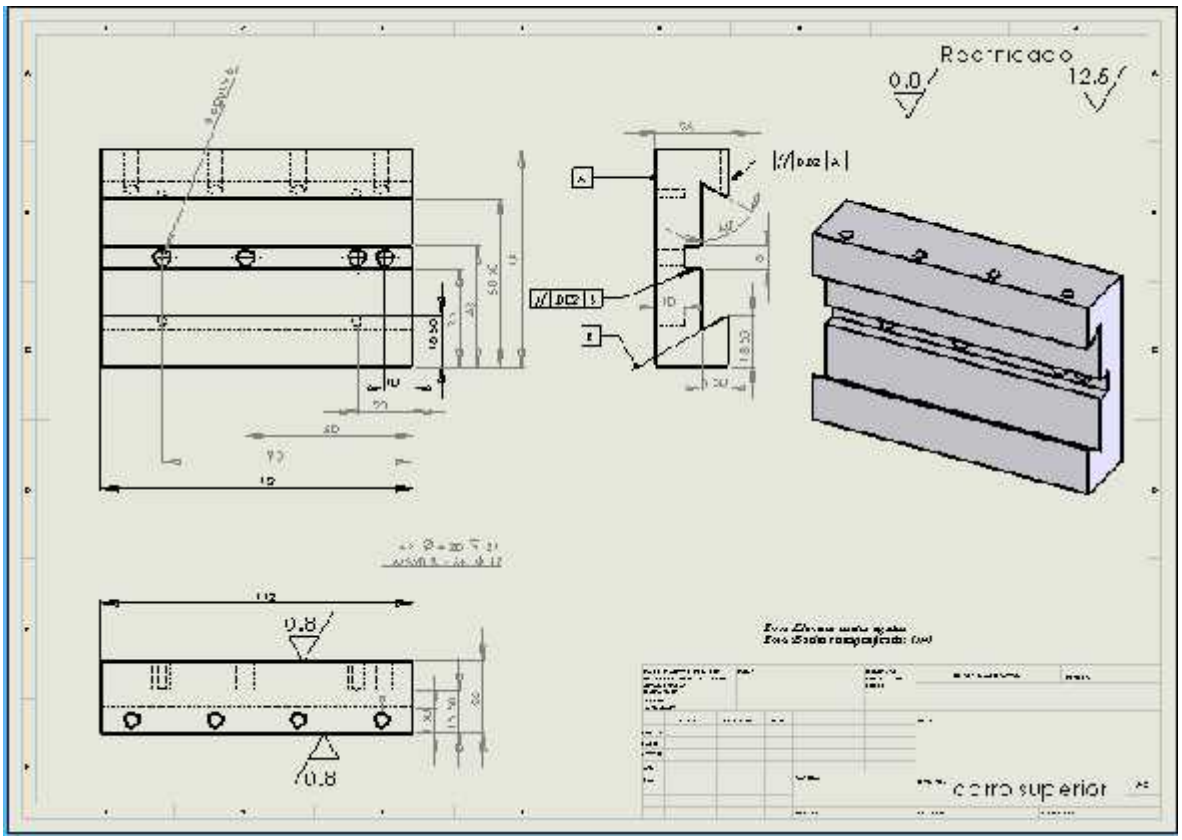


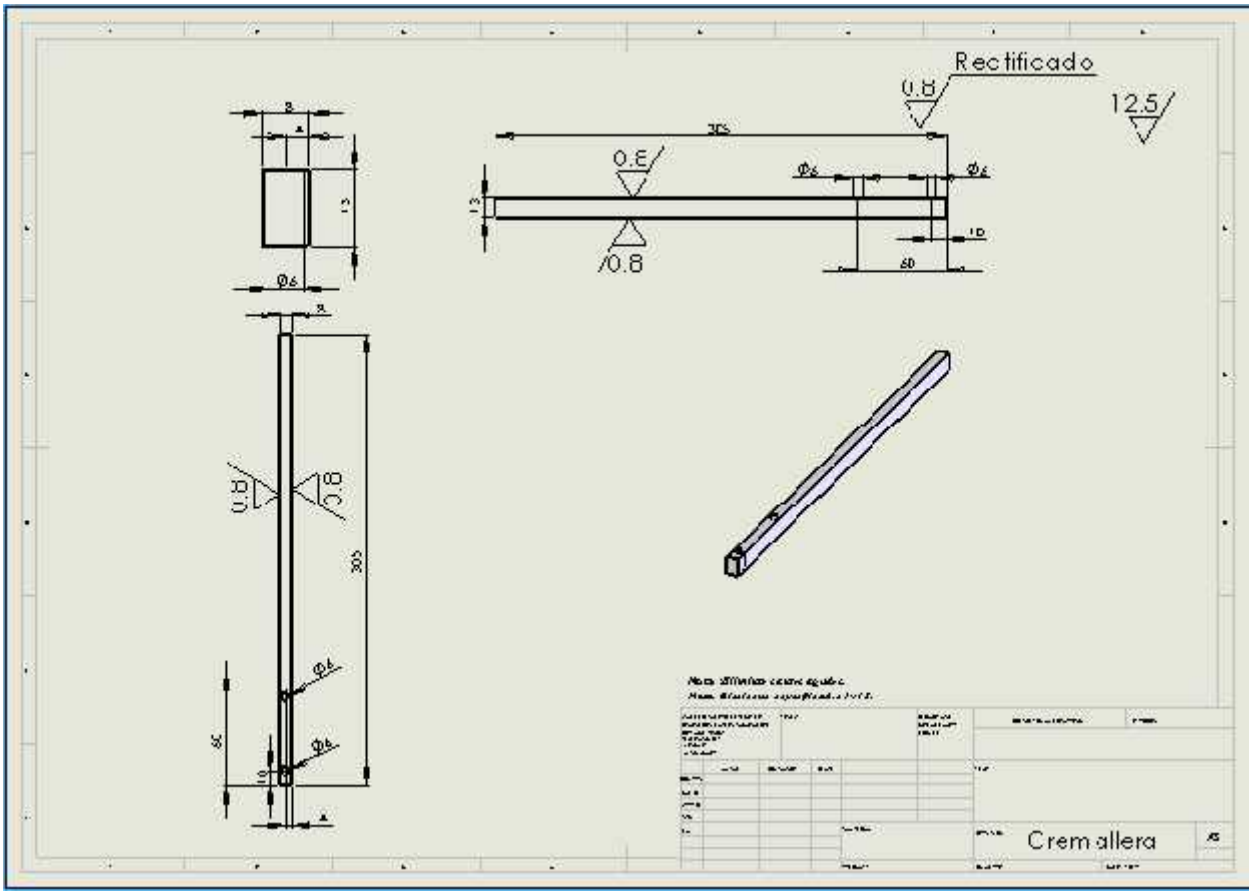
Rectificado
0.8
2.5
0.8
A
0.8
247
231
DETALLE A
Base principal

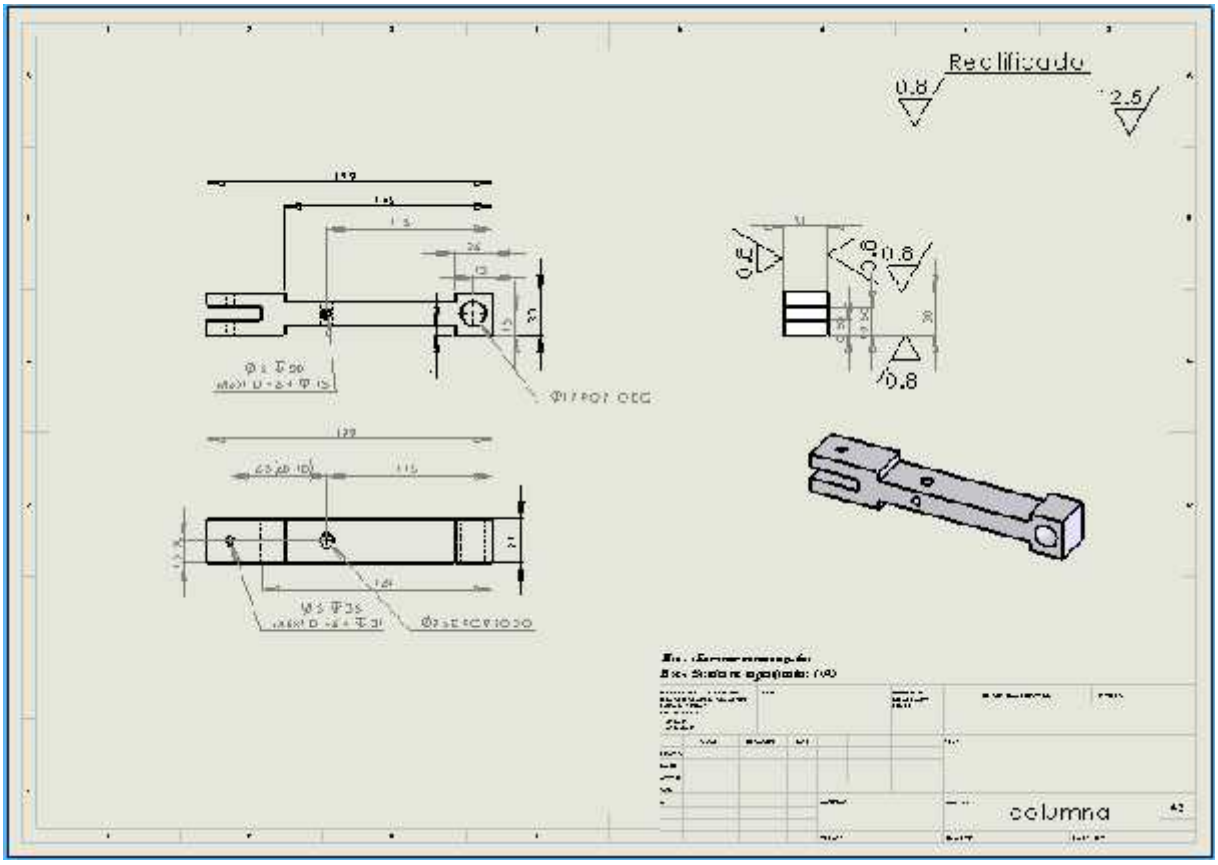


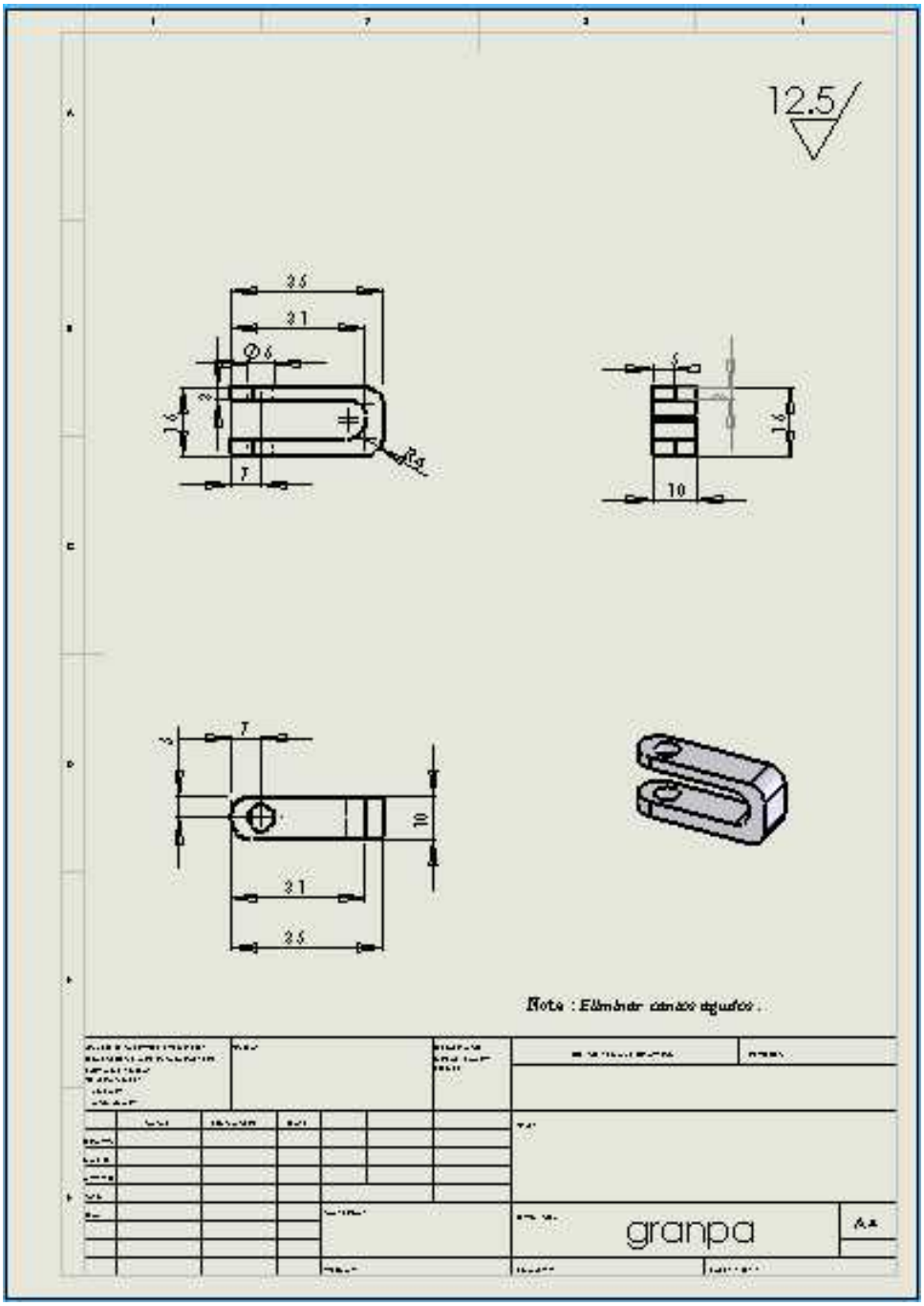
Rectificado
12.5
0.8
0.8
braso

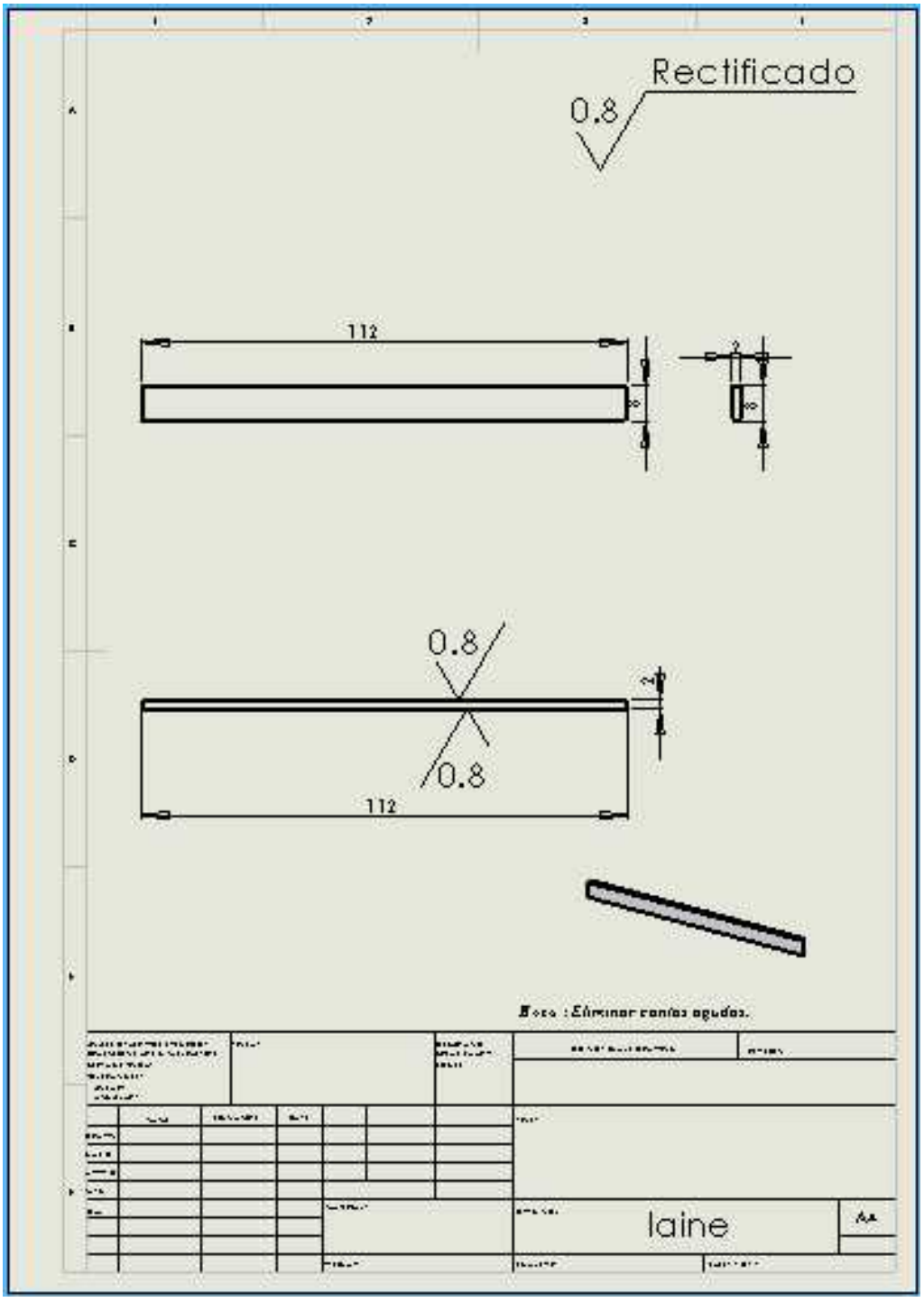

Rectificodo
0.8
12.5
31,50
15,50
20
31
Ø13
15,75
0.8
Ø6,50
Ø15
27
10
Nota :Eliminar cantos agudos
Nota :Biseles no espesificados 1x45 .
deslizador
A4

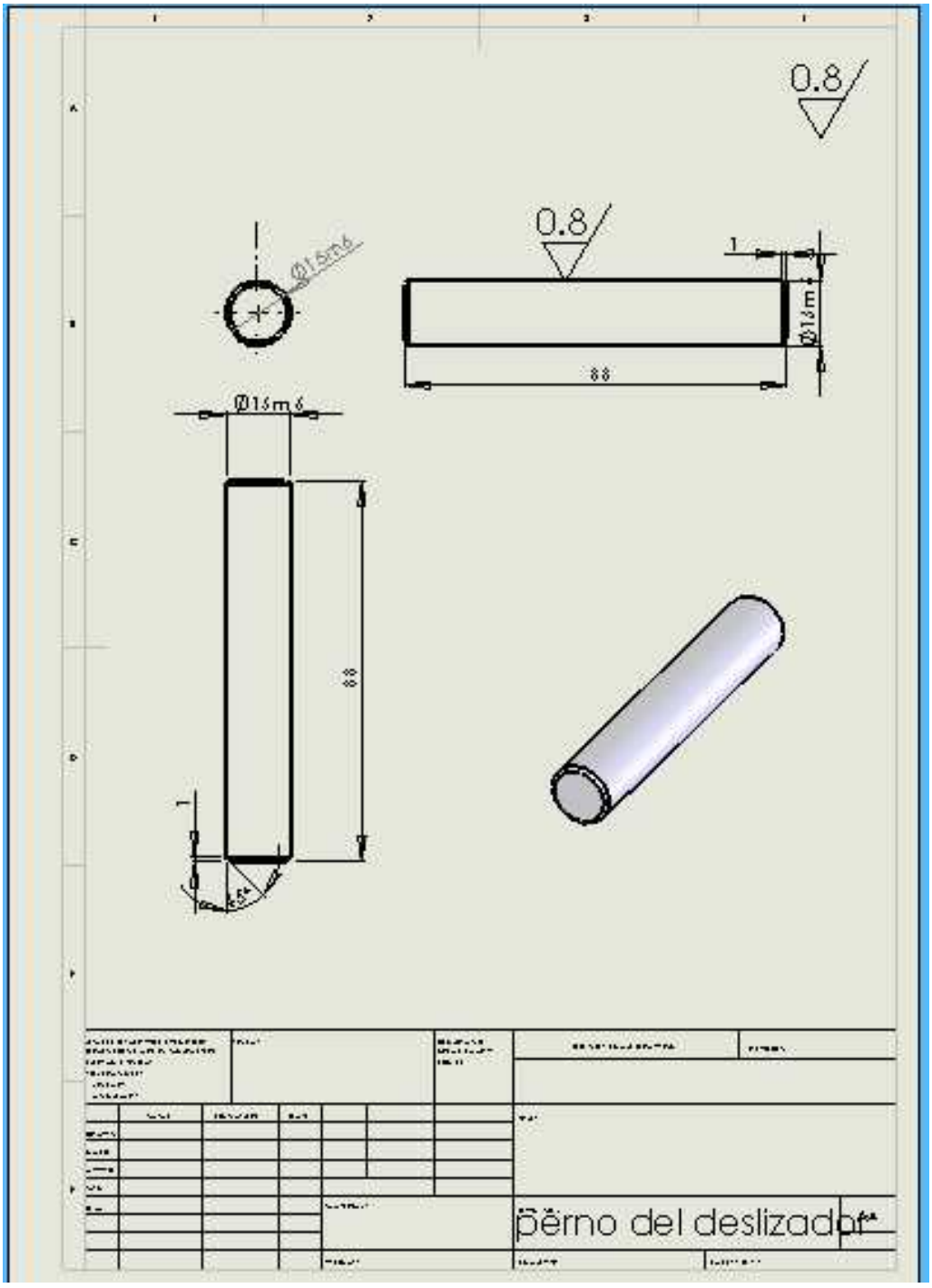

Rectificado
0.8
12.5
0.8
/0.8
Barra superior

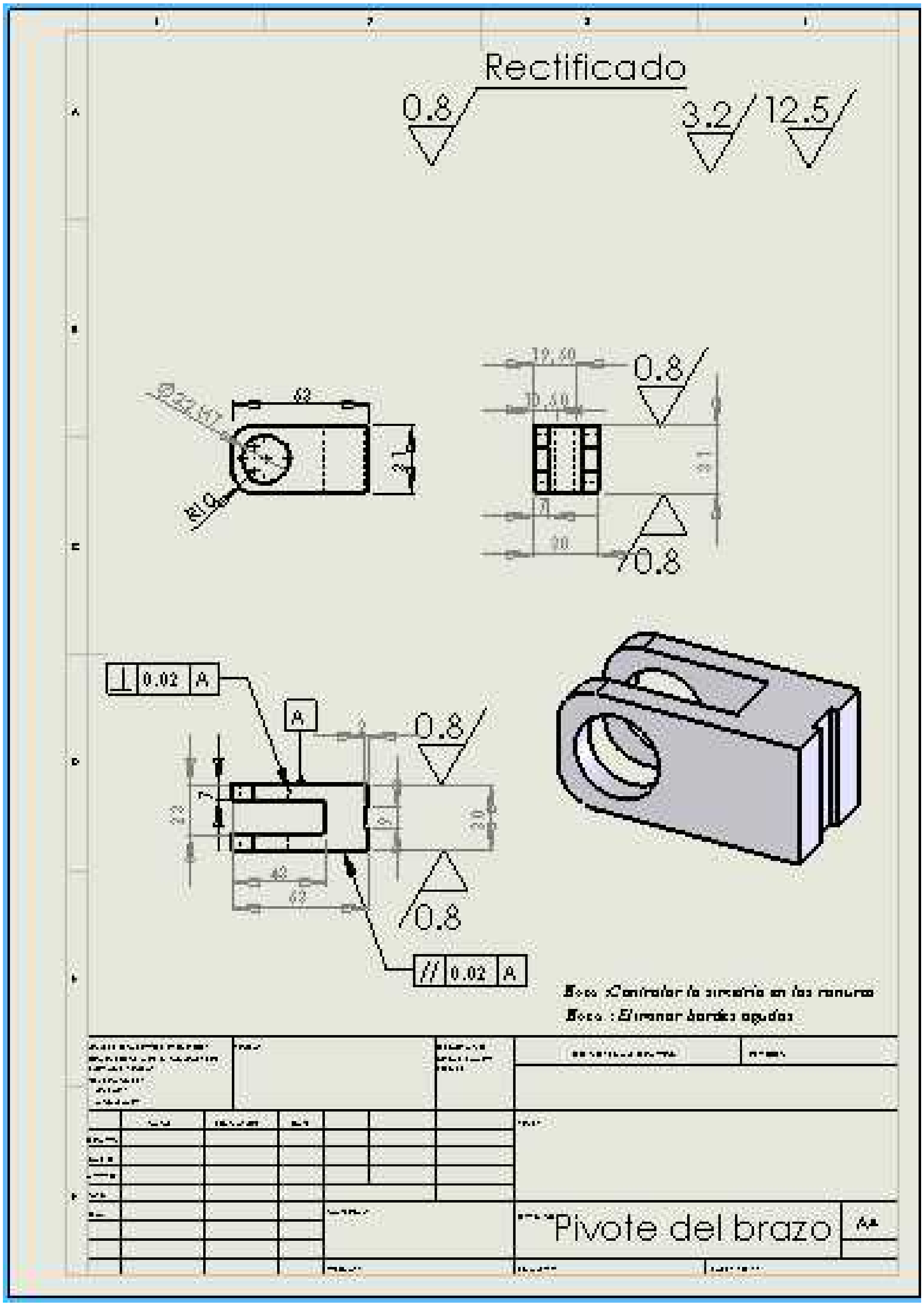

Rectificado
0.8
12.5
0.8
/0.8
0.8
0.8
Cremallera

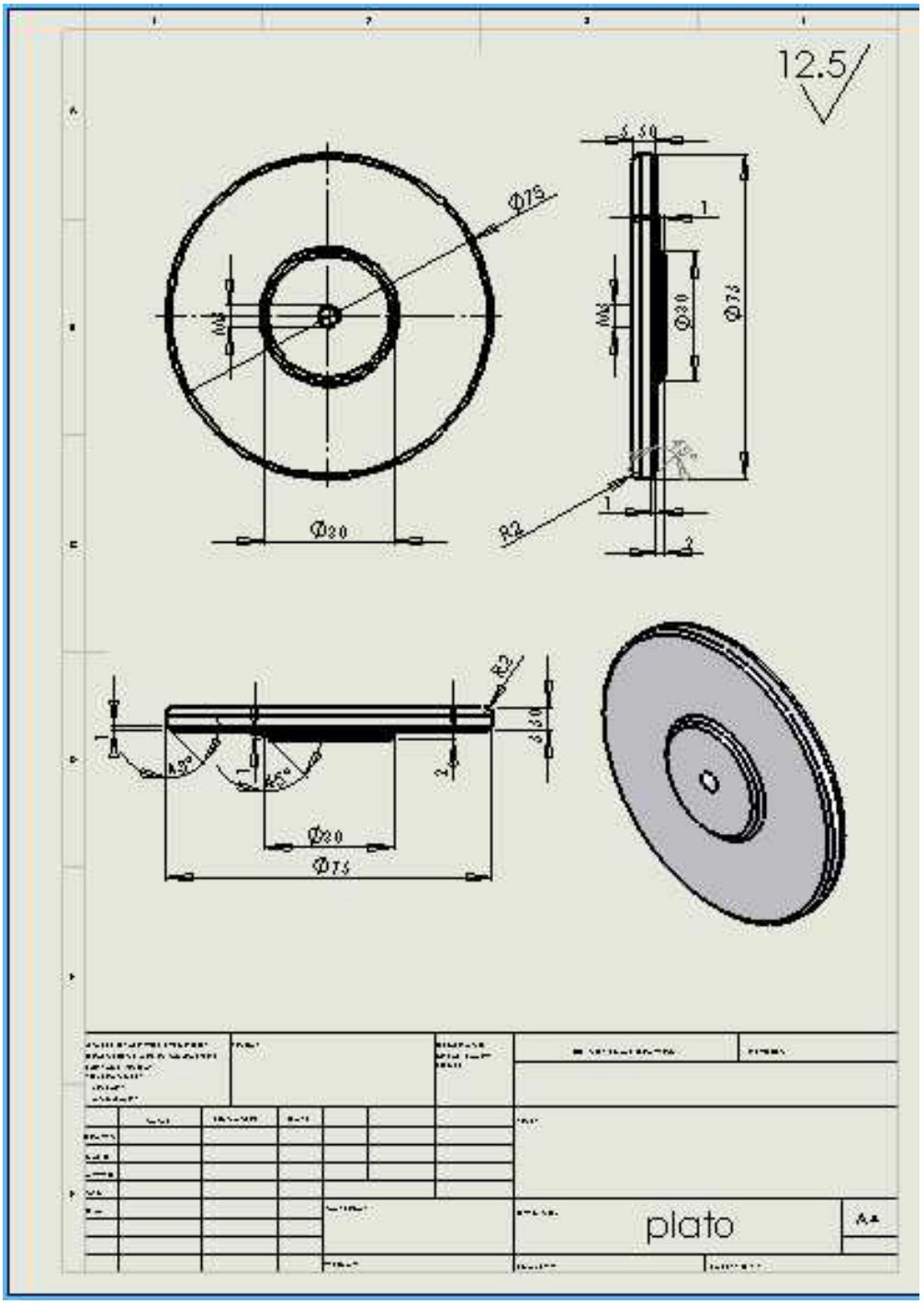

Rectificado
0.8
2.5
0.8
0.8
0.8
columna

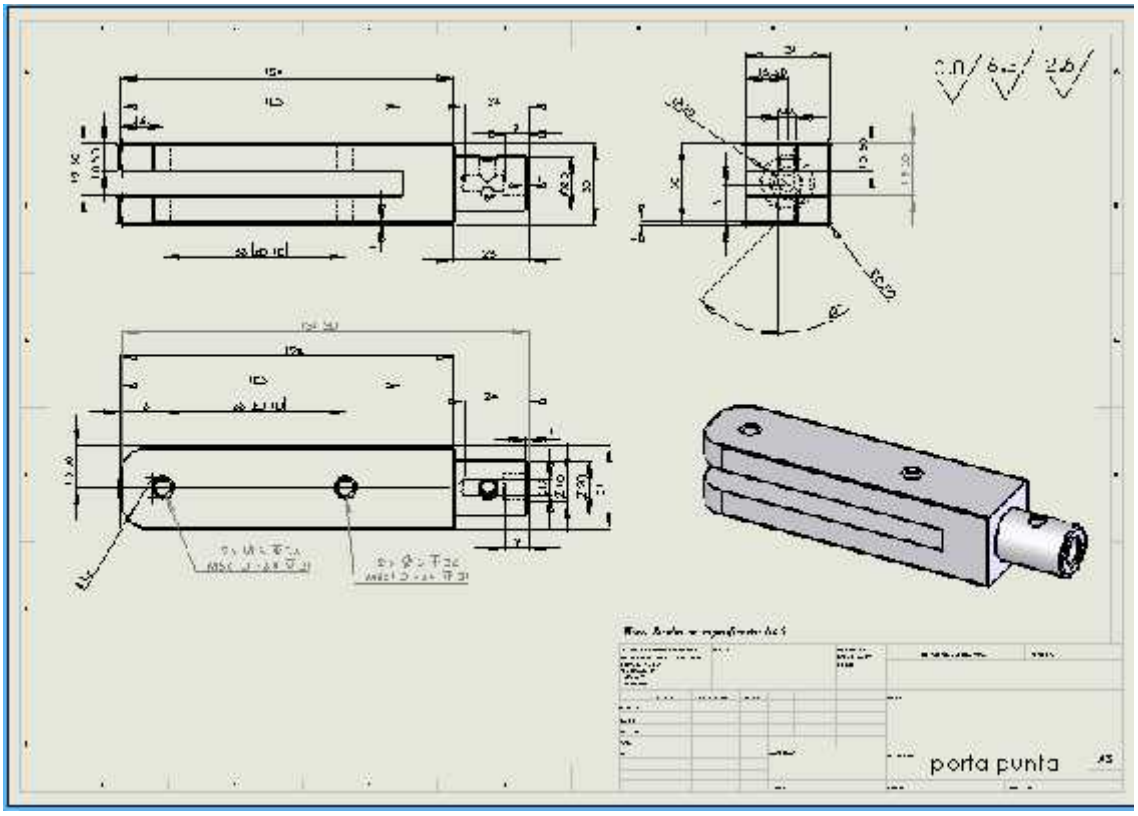

12.5
35
31
Ø6
16
2
7
R4
5
16
10
7
10
31
35
Nota : Eliminar cantos agudos .
granpa

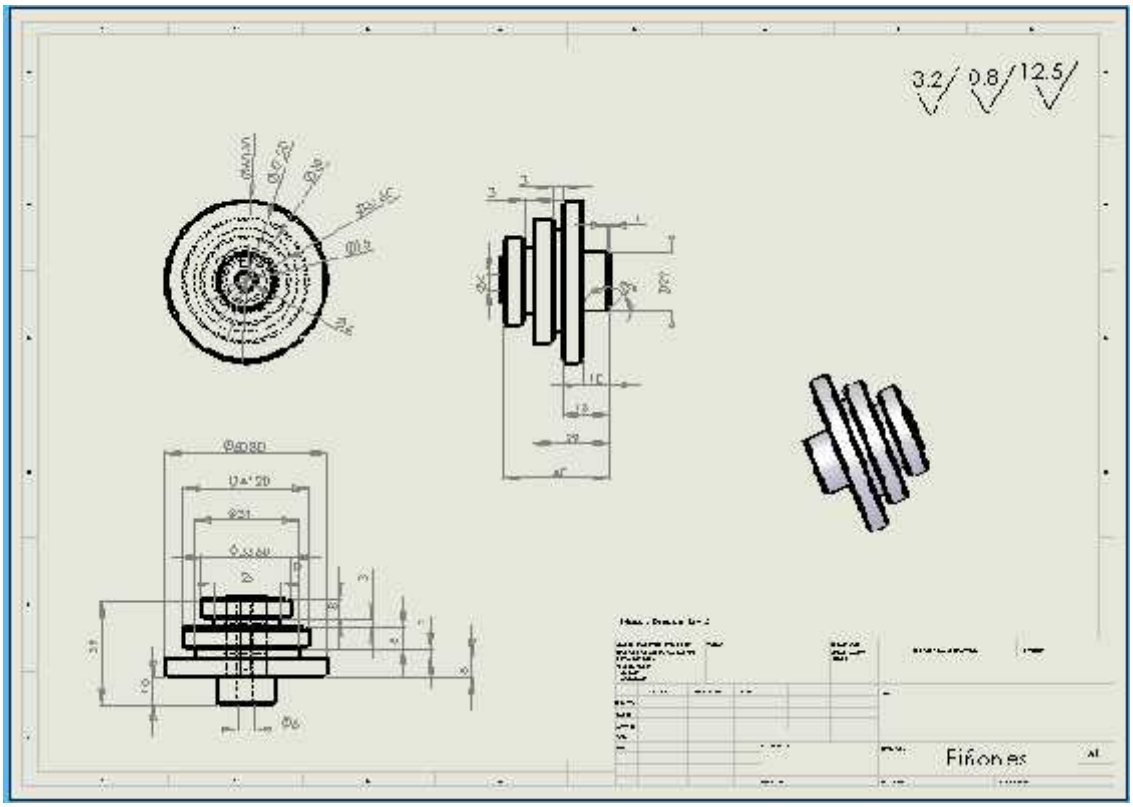

Rectificado
0.8
112
0.8
0.8
112
laine


0.8
0.8
Ø16m6
1
Ø16m6
88
Ø16m6
88
1
45°
Pèrno del deslizador


Rectificado
0.8
3.2
12.5
0.8
0.8
0.02
A
A
0.8
0.8
0.02
A
Controlar la simetría en las ranuras
Eliminar bordes agudos
Pivote del brazo


12.5
Ø75
Ø20
R2
Ø20
Ø75
plato
A4


porta punta


3.2/ 0.8/ 12.5/
Fiñones