

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RODILLOS
ESTAMPADORES DE CERA DE ABEJA**

**JOSE DAVID PEREZ RUIZ
GEORGE CHARLES VILLAMIZAR CUBILLOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2004

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RODILLOS
ESTAMPADORES DE CERA DE ABEJA**

**JOSE DAVID PEREZ RUIZ
GEORGE CHARLES VILLAMIZAR CUBILLOS**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
LEONIDAS VASQUEZ CHAPARRO
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2004

DEDICATORIA

Debo reconocer que todo este gran esfuerzo no hubiera sido posible sin la ayuda de Dios, ya que fue el quien dio la provisión necesaria para alcanzar esta instancia, y quien colocó a personas idóneas en mi camino, quienes con sus consejos y experiencia me ayudaron a realizar este sueño.

A mi padre José Pérez Ortiz y a mi madre Elvira Ruiz, quienes nunca dudaron en extenderme la mano para solucionar los inconvenientes que se presentaron, y creyeron en mis capacidades, a ellos solo les tengo que decir gracias, pues el éxito no se mide alcanzando las metas al primer intento, mas si se logra al alcanzarlas con paciencia, fe y perseverancia, lo cual lo aprendí de ustedes.

José David Pérez Ruiz

DEDICATORIA

A mi Padre Salomón Villamizar, a mi Madre Elvia Lozano, a mi esposa Sandra Liliana vargas y a mi hijo Carlos Daniel, por su comprensión y apoyo permanente.

George Charles Villamizar Cubillos

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra forma nos apoyaron en la realización del presente trabajo de grado.

A Leonidas Vásquez, ingeniero mecánico, director del proyecto, por enseñarnos la importancia de enfrentar los retos.

A nuestros hermanos por su apoyo y confianza.

A Rolando Rodríguez y Fabián Robles quienes fueron una ayuda valiosísima.

A los amigos y familiares quienes nos motivaron con sus consejos y oraciones.

Al apicultor Eliécer Santamaría por la gran ayuda prestada durante la investigación y pruebas finales

Al profesor orlando Gómez, docente de la escuela de ingeniería metalúrgica,

Al señor julio cesar Ramírez, jefe de planta de pladesan

Al señor Daniel garavito, laboratorista de la planta de aceros de la UIS

A los técnicos de la escuela de ingeniería mecánica por sus consejos prácticos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. EL PROYECTO	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO	5
1.2.1 Objetivos generales	5
1.2.2 Objetivos específicos	6
2. OBTENCIÓN DE LA MIEL Y TRATAMIENTO DE LA CERA	7
2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA MIEL	7
2.2 DETALLES TÉCNICOS Y GEOMÉTRICOS DE LOS RODILLOS ESTAMPADORES DE CERA DE ABEJA	11
3. INVESTIGACION	15
3.1 ELABORACIÓN DE LA MATRIZ	17
3.2 ELABORACION DEL RODILLO	39
3.2.1 Pruebas para obtener la fuerza de estampado	42
3.2.2 Pruebas realizadas para calcular la fuerza de empuje	66
4. DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA LAMINADORA- ESTAMPADORA DE ESTAÑO	76
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA MÁQUINA	77

4.2 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LOS RODILLOS	90
4.3 ESTAMPADO DE LA CERA	98
5. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA MAQUINA	100
5.1 ESTRUCTURA	101
5.2 RODILLO DE LAMINACIÓN	105
5.3 RODILLO DE PRUEBAS	109
5.4 RODILLOS DE SOPORTE	112
5.4.1 Rodillos de soporte principal	112
5.4.2 Rodillos auxiliares de soporte	115
5.5 DISEÑO DE LOS COJINETES DE DESLIZAMIENTO (BUJES)	117
5.5.1 Calculo del ajuste entre la chumacera y el buje	119
5.5.2 Cálculo del torque de apriete de los tornillos	121
5.6 SISTEMA DE ELEVACIÓN	122
5.7 DISEÑO DE LA SOLDADURA EN EL PÓRTICO VERTICAL	123
5.7.1 Diseño de la parte superior de la soldadura	123
5.7.2 Cálculo del cordón de soldadura en la parte inferior	125
5.8 SELECCIÓN DEL ACTUADOR HIDRÁULICO (GATO)	126
5.9 DISEÑO DEL CONJUNTO MÓVIL (MATRIZ Y PORTAMATRIZ)	127
5.10 SISTEMA DE EMPUJE	130
5.10.1 Diseño del tornillo de potencia	130
5.10.2 Diseño de la tuerca de potencia	133
5.10.3 Selección del rodamiento axial	134
5.10.4 Selección del reductor	135
5.10.5 Selección del motor	136
5.10.6 Selección del acople	136
5.11 GRUPO DE GUÍAS	136
5.12 SELECCIÓN DE LAS POLEAS	138
5.13 DISEÑO DE LAS CUÑAS	139

5.14 DISEÑO DEL CALENTADOR	140
6. CONCLUSIONES	142
7. RECOMENDACIONES	144
BIBLIOGRAFÍA	145
ANEXOS	147

.

.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Colmenas en el campo	7
Figura 2. Revisión periódica de las colmenas	7
Figura 3. Almacenamiento de los cuadros	8
Figura 4. Desoperculización de los cuadros	8
Figura 5. Extracción de la miel	9
Figura 6. Almacenamiento de la cera	9
Figura 7. Lámina de cera	10
Figura 8. Laminadora y estampadora de cera	10
Figura 9. Lámina de cera estampada	11
Figura 10. Trabajo de las abejas sobre la lámina estampada	11
Figura 11. Máquina estampadora de cera	12
Figura 12. Detalle del alvéolo	13
Figura 13. Modelo preliminar de la matriz	18
Figura 14. Pruebas de Punzonado sobre la lámina HR	18
Figura 15. Desbaste preliminar y Punzonado	19
Figura 16. Efecto de remache en el lado posterior de la lámina	20
Figura 17. Electrodo de acero desgastado después de la electroerosión	21
Figura 18. Comparación entre el erosionado con el electrodo de cobre Y de acero	21
Figura 19. Segmento mecanizado del electrodo de cobre	23
Figura 20. Molde preliminar al electroerosionado	23
Figura 21. Base separadora de los segmentos	24
Figura 22. Desnivel presente en los segmentos	24
Figura 23. Base de cobre para alineado de la altura de los segmentos	25

Figura 24. Molde obtenido después de la electroerosión	25
Figura 25. Elementos utilizados en las pruebas preliminares	26
Figura 26. Efectos de los elementos aleantes sobre la resistividad Eléctrica del cobre	27
Figura 27. Problemas de herviduras, poros y oxidación en el electrodo	27
Figura 28. Electrodo en cera	28
Figura 29. Armado de los árboles	29
Figura 30. Cilindro para el depósito de yeso	29
Figura 31. Preparación del yeso y remoción de las burbujas en la máquina de vacío	30
Figura 32. Horno rotatorio	30
Figura 33. Fundidora al vacío	30
Figura 34. Árbol de electrodos de cobre	31
Figura 35. Costra de yeso presente en los electrodos	31
Figura 36. Descascaramiento de la superficie del electrodo	32
Figura 37. Cobre electrolítico en presentación granulada	32
Figura 38. Comparación entre los electrodos obtenidos	33
Figura 39. Torceduras presentes en el electrodo de cera	34
Figura 40. Plancha de cobre	34
Figura 41. Detalle de la adaptación para la entrada de corriente	35
Figura 42. Detalle de la disposición alveolar en la plancha	35
Figura 43. Desgarre de la punta de los alvéolos	36
Figura 44. Irregularidad presentada en la profundidad de erosionado	36
Figura 45. Aplastamiento de una zona de la plancha en el Electroerosionado	37
Figura 46. Prueba preliminar para la obtención de la matriz por CNC	37
Figura 47. Alvéolo regular obtenido por medio de una máquina CNC	38
Figura 48. Matriz obtenida por mecanizado y detalle de la misma	49

Figura 49. Máquina centrifugadora	40
Figura 50. Pasos para obtener el tubo de estaño de por centrifugado	40
Figura 51. Tubo utilizado para hacer el tubo de estaño por centrifugado	41
Figura 52. Tubo de estaño obtenido por centrifugación	41
Figura 53. Molde de aluminio para obtener las probetas de estaño	42
Figura 54. Probetas fallidas durante la prueba	43
Figura 55. Localización correcta de las fallas por tensión	43
Figura 56. Gráfico esfuerzo-deformación del estaño obtenido en la prueba	44
Figura 57. Laminilla de estaño y molde de acero para el estampado	45
Figura 58. Marcas dejadas por el alambre eléctrico sobre laminillas de estaño	46
Figura 59. Laminillas de estaño estampadas	47
Figura 60. Estampado sobre la camisa de estaño pegada con adhesivo	48
Figura 61. Detalle del adhesivo sobre el eje de acero	48
Figura 62. Desplazamiento tangencial en la camisa de estaño	49
Figura 63. Diagrama de equilibrio Fe-Sn	51
Figura 64. Diagrama de equilibrio Cu-Sn	52
Figura 65. Deshumectación de la capa de estaño	53
Figura 66. Cristales de hierro formados en la capa de estaño	54
Figura 67. Interfase metálica entre el hierro y el estaño	54
Figura 68. Interfases metálicas entre el cobre y el estaño	55
Figura 69. Muestra extraída a partir de un rodillo comercial	56
Figura 70. Acercamiento de la interfase estaño acero a 500X	57
Figura 71. Eje cobrizado	58
Figura 72. Camisa de estaño obtenida por inmersión	59
Figura 73. Comparación entre los dos tipos de camisa obtenido	60
Figura 74. Escoria presente en la camisa	61

Figura 75. Reflector	61
Figura 76. Contactor y pirómetro	62
Figura 77. Equipo de calentamiento	62
Figura 78. Adaptador de fuerza a la prensa y calentamiento del rodillo	63
Figura 79. Control de la temperatura usando dos termocuplas	64
Figura 80. Grabado obtenido durante la prueba de fuerza de estampa	64
Figura 81. Estampado longitudinal sobre el rodillo	65
Figura 82. Detalle del despegue de la camisa de estaño	66
Figura 83. Prototipo usado para determinar la fuerza de empuje	67
Figura 84. Detalle del abombamiento y despegue de la camisa de estaño	67
Figura 85. Eje de pruebas con orificios y ranuras	68
Figura 86. Detalle de la poca profundidad alcanzada por los alvéolos localizados sobre las ranuras y agujeros	69
Figura 87. Detalle del cobre adherido a la camisa de estaño	70
Figura 88. Moldes utilizados para obtener las láminas de estaño	72
Figura 89. Láminas estampadas	73
Figura 90. Lámina estampada con un grabado aceptable y su detalle	74
Figura 91. Problemas presentados por una incorrecta laminación	75
Figura 92. Marco vertical	77
Figura 93. Detalle del anclaje del marco vertical	78
Figura 94. Mesa del motor-reductor y detalle del anclaje	78
Figura 95. Rodillo de soporte y auxiliares	79
Figura 96. Disposición de la portamatriz y detalle de la guía de bronce	80
Figura 97. Portamatriz y tuerca de potencia	80
Figura 98. Disposición del marco horizontal	81
Figura 99. Rodamiento axial	82
Figura 100. Conjunto del motor, reductor y tornillo de potencia	83
Figura 101. Detalle del buje axial de bronce y la estrella de bronce	84

del acople	
Figura 102. Rodillo laminador sobre la matriz	85
Figura 103. Detalle de las guías verticales y del buje	85
Figura 104. Gato hidráulico con manómetro	86
Figura 105. Sistema de elevación	87
Figura 106. Finales de carrera	88
Figura 107. Caja de control	88
Figura 108. Calentador	89
Figura 109. Vista frontal de la máquina	89
Figura 110. Vista posterior de la máquina	90
Figura 111. Proceso de laminación del estaño	91
Figura 112. Disposición del deformímetro para la laminación y el Estampado	91
Figura 113. Proceso de estampado	93
Figura 114. Ubicación del calentador durante el estampado	94
Figura 115. Camisa de estaño arrollada con corte en zigzag	94
Figura 116. Eje de acero base	95
Figura 117. Depósito de adhesivo sobre el eje de acero	96
Figura 118. Camisa de estaño adherida al eje de acero	96
Figura 119. Rodillo fabricado durante el proceso	97
Figura 120. Estampadora de cera de abejas	98
Figura 121. Cera laminada y lista para ser estampada	99
Figura 122. Cera estampada	99
Figura 123. Esquema general de la máquina	101
Figura 124. Estructura de la máquina	102
Figura 125. Análisis nodal del pórtico vertical	103
Figura 126. Comportamiento elástico del pórtico vertical	103
Figura 127. Chequeo por resistencia	104

Figura 128. Análisis del pórtico horizontal por elementos finitos	105
Figura 129. Rodillo de laminación	105
Figura 130. Diagrama de cortante y momento del rodillo laminador	106
Figura 131. Esquema para la determinación de la flecha de un cilindro	108
Figura 132. Rodillo de pruebas	109
Figura 133. Disposición del calentador sobre el rodillo de pruebas	111
Figura 134. Diagrama de cortante y momento del rodillo de prueba	111
Figura 135. Rodillo del soporte principal	113
Figura 136. Diagrama de cortante y momento del rodillo de soporte principal	113
Figura 137. Rodillo de soporte auxiliar	115
Figura 138. Disposición de carga sobre los rodillos de soporte	116
Figura 139. Diagrama de cortante y momento del eje de soporte auxiliar	116
Figura 140. Chumacera compuesta y chumacera sencilla	118
Figura 141. Ajuste entre la chumacera y el buje	119
Figura 142. Fuerza de apriete entre el buje y la chumacera	121
Figura 143. Sistema de elevación	122
Figura 144. Cordón superior de soldadura en el pórtico vertical	123
Figura 145. Cordón inferior de soldadura en el pórtico vertical	125
Figura 146. Portamatriz y matriz tipo slab	128
Figura 147. Análisis de la portamatriz por elementos finitos	128
Figura 148. Análisis de la matriz por elementos finitos	129
Figura 149. Tornillo de potencia	130
Figura 150. Tuerca de potencia	133
Figura 151. Guías verticales y horizontales y horizontales	137
Figura 152. Detalle del buje de la guía vertical y su apoyo	137
Figura 153. Geometría de la cuña	139
Figura 154. Disposición del calentador	140

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tamaño de los rodillos comerciales	12
Tabla 2. Tamaños comunes de alvéolos según diferentes lugares	14
Tabla 3. Cajas horizontales más comunes de laminación y caja tipo slab	127

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Cera de abeja y equipos de estampado	147
Anexo B. Características dimensionales de los alvéolos	154
Anexo C. Propiedades del estaño	160
Anexo D. Principio de laminación	162
Anexo E. Listado de Planos	164

GLOSARIO

ABEJA: Insecto himenóptero *Apis melífera* sp.

ABEJA OBRERA: Abeja hembra reproductivamente incompleta.

ABEJA REINA: Es la abeja hembra sexualmente desarrollada, cuya función principal es depositar huevos fértiles en las celdas del panal y regir la vida de la colonia.

ALVEOLO: Geometría hexágono- piramidal donde la abeja deposita la miel y las larvas.

APICULTURA: Rama de la zootecnia que trata de la cría y producción de las abejas y sus productos.

APICULTOR: Persona dedicada a la apicultura.

APIARIO: Es el conjunto de colmenas instaladas en un lugar determinado.

ÁRBOL: Dispositivo sobre el cual se colocan los modelos de cera que han de servir a la fundición

CERA DE ABEJA: Secreción de glándulas situadas en el abdomen de las abejas y que utilizan para construir los panales.

CENTRIFUGADORA: Maquina destinada a depositar el material fundido sobre un molde, es otra alternativa diferente a la fundición en vacío.

COLMENA TÉCNICA O MODERNA: Es aquella cuyos panales son movibles para permitir su explotación racional de las abejas.

COLMENA RÚSTICA: Es aquella cuyos panales son fijos.

COLONIA: Comunidad social o familia constituida de varios miles de abejas obreras que generalmente tienen una reina con o sin zánganos, con panales, capaz de mantenerse y reproducirse.

CUADRO: Marco y/o cuadro de madera con alambres sobre el cual se fija la cera estampada para la formación del panal.

ELECTRODO: También conocido como electroútil, es la herramienta de trabajo de la electroerosionadora, y posee la forma del agujero que se quiere formar.

ENJAMBRE: Conjunto de abejas que abandonan la colmena original para establecerse en cualquier otro lugar.

LARVA: Estado de desarrollo comprendido entre el huevo y el estado de prepupa.

LAMINA DE FUNDACIÓN: laminas de cera estampada que se colocan en los cuadros móviles, fundiéndolas sobre los alambres de los cuadros

MIEL: Producto elaborado por las abejas a base de néctar de las flores, el cual almacenan en los panales.

NÚCLEOS DE ABEJAS: Colonia de abejas en desarrollo que consta de dos a cinco bastidores y que contienen cría de abejas y reservas alimenticias.

PANAL: Estructura formada por celdas de cera, que sirven como depósito de alimentos o que aloja crías.

PARÁSITO: Organismo que vive a expensas del hospedero del cual obtiene protección y sustento. Vive en el interior o sobre la superficie del individuo que lo alberga.

PAQUETES DE ABEJAS: Conjunto de abejas obreras con o sin abeja reina que se destinan para desarrollar colonias en colmenas.

REVESTIMIENTO: Mezcla de silicatos y yeso que se depositan sobre el cilindro para copiar la forma de la cera.

RODILLO: Elemento cilíndrico que posee el diseño necesario para estampar la cera.

ZÁNGANO: Abeja macho

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RODILLOS ESTAMPADORES DE CERA DE ABEJA.*

AUTORES:

José David Pérez Ruiz.

George Charles Villamizar Cubillos. **

PALABRAS CLAVES:

Laminas de cera estampada, rodillos, estaño, alveolo, laminación, estampado, colmenas tipo Langstroth.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo tiene por objeto la fabricación de rodillos para estampar cera de abeja, con el fin de dar solución a las necesidades de cera estampada que los apicultores del país tienen. Se realizó en primer lugar una investigación en lo referente a la fabricación de los rodillos y se estimó que el mejor método para su fabricación es por medio del estampado a partir de un molde con la disposición alveolar negativa. Por lo cual fue necesario investigar y probar diferentes métodos de fabricación del molde, como es el caso del punzonado, el electroerosionado, y el mecanizado, lográndose los mejores resultados por medio del mecanizado

La otra fase de la investigación fue acerca del desarrollo de técnicas de adherencia entre el estaño puro y su sustrato, con el fin de realizar el estampado sobre el estaño, con la desventaja de que se presentaron problemas de abombamiento y despegue de la camisa de estaño sobre su sustrato, ante lo cual se optó por laminar y estampar láminas de estaño, y fabricar los rodillos a partir de las mismas.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Leonidas Vasquez Ch.

Con base en los resultados obtenidos durante la investigación, se diseñó y construyó una máquina laminadora y estampadora de estaño con tecnología tipo slab, la cual posee varios subconjuntos dentro de los cuales se destacan el conjunto laminador, el sistema de empuje, el sistema de soporte, el grupo de guías, el conjunto móvil, la estructura, etc. Todo esto con el fin de obtener láminas de estaño con el grabado alveolar requerido. Con estas láminas se conforman los rodillos. A partir de estos, se ensamblan las máquinas estampadoras de cera, por medio de las cuales se obtienen las láminas de cera estampadas, lo que permite al apicultor armar las colmenas técnicas tipo Langstroth.

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BEESWAX EMBOSSING ROLLERS*

AUTHORS:

José David Pérez Ruiz.

George Charles Villamizar Cubillos. **

KEY WORDS:

Rolled foundation sheets, engraved sheets of tin, cells, rolling press, embossing roller machines, langstroth beehives, beeswax embossing rollers.

DESCRIPTION:

The objective of this work is the production of beeswax embossing rollers, to fulfill the needs of rolled foundation sheets of the beekeepers. Firstly a research was held out with regard to the production of rollers, and it was estimated that the best method of manufacture is the engraving from a mould with the respective cell arrangement. For this reason it was necessary to investigate and test different methods of mould fabrication, such as the engraving, electrospark machining and mechanization, gathering the best results by mechanization.

Secondly the other face of the investigation was based on the development of different techniques to obtain a strong adhesion between tin and the substratum. It was with the purpose of making rollers surfaced with the hexagonal cell mould. But there were some disadvantages related to dome shaped and removed surfaces of tin. Due to that it was necessary to laminate and to engrave sheets of tin, and manufacture the rollers from them.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Sciences Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Leonidas Vásquez Ch.

Based on the results gathered during the research, a rolling press and engraving tin machine was designed and built with slab technology. This machine has various groups, like the laminator group, pushing system, support system, guides group, mobile group, the structure, etc. all of this with the aim of obtaining sheets of tin with the pattern required, and with this sheets the rollers are formed. From them the Embossing roller machines are assembled. Finally the pure beeswax sheet passes between two precision engraved rollers which imprint the pattern onto the beeswax. And it allows the beekeepers to assemble the langstroth beehives.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país el manejo de la apicultura ha sido demasiado rudimentario hasta el momento, y ha sido relegado a un plano menor. Encontramos que casi todos los apicultores carecen de la tecnología para la producción de miel, y el mercado colombiano de la miel tiende a ser bastante informal. La comunidad objeto de este proyecto presenta una necesidad de estos rodillos estampadores de laminas de cera, que llene los requerimientos de calidad. Además que sea de fácil manejo y mantenimiento, esto permitirá la sostenibilidad del sistema y el desarrollo de la comunidad.

Este proyecto da solución a la necesidad de poder contar con rodillos estampadores que permitan obtener el volumen de miel y cera requerido por los apicultores del país. El Desarrollo de esta maquina, genera una mayor sostenibilidad económica, ya que reduce los costos y permite que a tiempo sean cambiadas y alimentadas las colmenas y así mejorar las condiciones de vida de la abeja para lograr buenas producciones de miel y cera, Esto generaría una mayor estabilidad económica en los apicultores, motivando a estos a continuar con esta labor, aumentando el gremio actual.

Otro problema que se ha observado es el mal manejo que se le da a la cera de abeja, en el sentido de que no se elaboran los correctos métodos de fundición y laminación de la misma, pues en la mayoría de los casos la cera recibe calor directamente de la fuente, y esto hace que la cera pierda sus propiedades físicas y que se volatilicen muchas de sus aromas principales.

A raíz de la falta de laminas de cera estampadas la abeja no cuenta con los alvéolos necesarios donde depositar la miel y esto hace que la abeja tenga que consumir esta miel y la convierta en cera, pero en el peor de los casos hay fugas de reinas, debido a que estas no cuentan con el medio donde colocar nuevas crías y las demás donde colocar miel, y como consecuencia la producción de miel se reduce.

Si no se cuenta con una máquina que cumpla con todos los requerimientos geométricos y funcionales, la calidad de estas no cumple las especificaciones, y se produce un retraso en el trabajo de las abejas. Actualmente los apicultores han desarrollado métodos rudimentarios para la elaboración de las láminas, sin alcanzar la calidad y el volumen requerido para que la actividad sea rentable.

Este proyecto se desarrolló de una forma progresiva, donde se muestran paso a paso los resultados y avances de la investigación y sus posteriores aplicaciones.

1. EL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

Es bien conocida la importancia de la apicultura para el ser humano, desde los beneficios obtenidos con la polinización de las flores, hasta todos los productos obtenidos de ella, como son la miel, la cera, los propóleos, jalea real, pigmentos, etc.

En nuestro país existe una economía al respecto, y en muchos lugares se está exportando miel a Norteamérica y otros destinos. Algunos de estos proyectos poseen apoyo del gobierno, y son rentables, ya que nuestro país cuenta con la presencia de pisos térmicos y la ventaja de la no existencia de estaciones, lo que permite que la actividad sea continúa.

El proceso de la obtención de cera y miel es un proceso con connotaciones interesantes ya que en procesos como el estampado de la cera, se encuentra una relación entre maquina - colmena bastante ligada en la actualidad.

Durante mucho tiempo los apicultores intentaron encontrar la forma de ayudar a las abejas con la producción de cera y miel, pero los resultados fueron insignificantes hasta que en 1844 Deauvoys invento el cuadro móvil rodeando por completo a cada uno de los panales de la colmena. En 1852, Langstroth patentó en Estados Unidos la colmena de la cual derivarían los otros modelos de colmenas de cuadros modernas.

En 1875, A.I. Root construyó en Estados Unidos la primera máquina estampadora de cilindros metálicos, de la cual derivarían las máquinas actuales. Desde ese entonces en varios lugares del mundo se han comenzado a fabricar las máquinas laminadoras y estampadoras de cera, con el fin de aumentar la producción y rentabilidad de la actividad apícola. Tal es el caso de empresas con bastante prestigio como es el caso de la rietsche de Alemania, la cual lleva más de 100 años fabricando estos rodillos. Lo que llama la atención respecto a este tema es que los mayores fabricantes de estas máquinas se encuentran en Europa y Norteamérica, mientras que en Suramérica solo lograron ser fabricados en 1983 en el Brasil, por una empresa llamada Apilani, la cual ganó el premio FIPEC del Banco de Brasil y la medalla de oro del Congreso Brasileño de Apicultura en Río de Janeiro por la fabricación de estos rodillos. Todo esto muestra la importancia de estos rodillos para esta actividad económica, y el reto que representa su fabricación.

En nuestro país la necesidad de estos rodillos no es desconocida, pues han existido intentos por obtener estos rodillos por métodos tales como el mecanizado pero los resultados han sido infructuosos ante la dificultad de obtener la compleja forma de los alvéolos formados por las abejas, ya que además de la geometría del alveolo se suman otros aspectos como lo son el reducido tamaño del alveolo el cual es de solo 5.1-5.5 mm de diámetro, el espacio entre cada alveolo que es de 0.5-0.8 mm. Y la gran cantidad de alvéolos que posee un rodillo estampador, ya que en un rodillo de solo 27 cm de largo y 85 mm de diámetro se encuentran organizados cerca de 3500- 4000 alveolos, dependiendo del tamaño del alveolo, y con la necesidad de que se

mantenga el mismo paso entre todos los alvéolos, lo que hace de la fabricación de estos rodillos un reto de manufactura.

Los apicultores del país, han derivado su sustento de la producción de miel, la falta de una tecnología apropiada y un manejo adecuado de las colmenas junto con una poca capacitación, no ha permitido la eficiencia de la apicultura; por otro lado no se aprovechan otros productos que se pueden extraer y así lograr mejores ingresos en la comunidad, empleos y aumento en la producción.

Sin embargo hay un problema específico que se presenta y es la falta de láminas estampadas de cera de abeja, por motivos tales como la falta de máquinas estampadoras, la poca mantenibilidad y sostenibilidad de las máquinas existentes y en el peor de los casos la necesidad de importar piezas fundamentales como los rodillos estampadores para el funcionamiento de las máquinas

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.2.1 Objetivos generales

- Ofrecer una tecnología sostenible que garantice la producción de láminas estampadas de cera requerida por la comunidad apícola de la región, para tecnificar la producción de la industria apícola y mejorar el nivel de vida de la población.
- Contribuir en investigaciones que relacionen la ingeniería mecánica con la actividad agrícola de nuestro país y sus subareas como es el caso

de la apicultura, ofreciendo soluciones prácticas y de calidad a sus necesidades.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir una maquina para manufacturar rodillos estampadores de láminas de cera de abeja. De 85mm de diámetro y 270mm de longitud a partir de materiales recomendados con una camisa exterior de estaño de 3 á 4 mm de espesor conformada por alvéolos de 5.4mm de diámetro circunscrito.
- Diseñar un proceso de manufactura relacionado con la fabricación de rodillos estampadores de cera, que compita con los precios actuales de los rodillos importados.
- Construir los rodillos a partir de un núcleo de acero 1045 por medio de torneado y la camisa exterior de estaño puro por centrifugado ó vertimiento del estaño fundido sobre el núcleo de acero.
- Montar los rodillos obtenidos sobre una maquina existente y estampar láminas de cera de abeja de 25 cm de ancho, de 2 a 5mm de espesor y de cualquier largo, para que sirvan como laminas de fundación para colmenas de abeja tipo langstroth.

2. OBTENCIÓN DE LA MIEL Y TRATAMIENTO DE LA CERA

2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA MIEL

Los pasos para elaborar buenos productos de miel de abejas son:

1. inicialmente las colmenas se encuentran en el campo, donde las abejas continuamente están depositando miel, y en algunos casos también depositando polen, gracias a las rejillas colocadas a la entrada.

Figura 1. Colmenas en el campo



Fuente: <http://www.beesource.com>

2. frecuentemente se revisan las colmenas para observar los avances en la producción de miel y cera, teniendo en cuenta que exista la suficiente operculización lo cual es un índice de una buena cantidad de miel.

Figura 2. Revisión periódica de las colmenas



Fuente: <http://www.beesource.com>

3. después de retirados los cuadros, estos son almacenados bajo sombra.

Figura 3. Almacenamiento de los cuadros



Fuente: <http://www.beesource.com>

4. después del almacenamiento los cuadros son introducidos en la maquina desoperculadora, donde se retira la capa superficial que protege a la miel.

Figura 4. Desoperculización de los cuadros



Fuente: <http://www.beesource.com>

5. el paso siguiente a la desoperculización, es el derretimiento de la cera y la extracción de la miel. En este paso se puede optar por derretir la cera ó centrifugar los cuadros con el fin de extraer la miel sin necesidad de dañar las celdillas presentes en el mismo.

Figura 5. Extracción de la miel



Fuente: <http://www.beesource.com>

6. la cera que es fundida se almacena en tanques donde es mantenida a su temperatura de fusión en espera de ser filtrada y posteriormente reutilizada.

Figura 6. Almacenamiento de la cera



Fuente: <http://www.beesource.com>

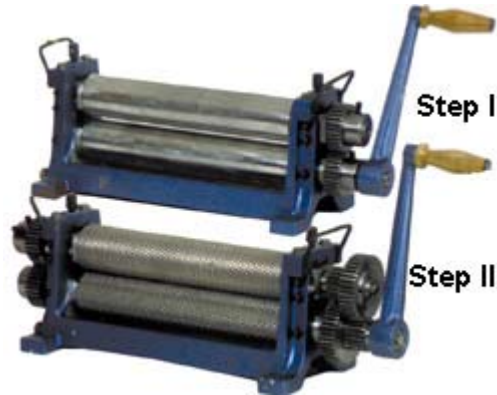
7. Después de obtenida la cera líquida se obtienen laminas aproximadamente planas al solidificarse sobre una superficie lisa.

Figura 7. Lamina de cera



8. después de obtenidas las laminas de cera, se hacen pasar por la maquina laminadora y posteriormente por la estampadora.

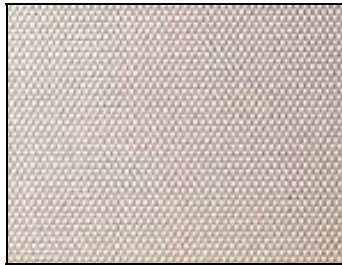
Figura 8. Laminadora y estampadora de cera



Fuente : [http:// www.swienty.com](http://www.swienty.com)

9. obteniéndose así las láminas de cera estampadas, las cuales llevan el grabado por lado y lado de la lámina permitiendo que de esta forma se cuente con la base para la fundación de la nueva colmena, ya que sobre estas laminas la abeja obrera construirá las celdillas, que posteriormente servirán para depositar la miel y las crías.

Figura 9. Lámina de cera estampada



Fuente: [http:// www.swienty.com](http://www.swienty.com)

10. con estas láminas se formarán los cuadros móviles que a su vez formaran las bases donde la abeja construirá la nueva colmena, Cerrándose así el ciclo.

Figura 10. Trabajo de las abejas sobre la lámina estampada



Fuente: [http://demasiado .com.cera](http://demasiado.com.cera)

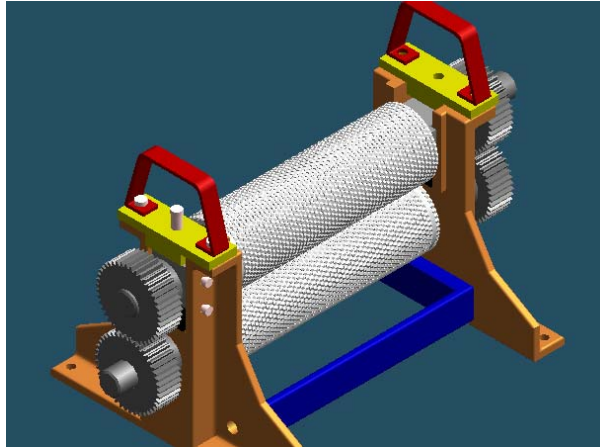
2.2 DETALLES TECNICOS Y GEOMETRICOS DE LOS RODILLOS ESTAMPADORES DE CERA DE ABEJA

En el proceso anterior se pudo apreciar que la maquina estampadora cumple un papel importantísimo en la producción de miel y cera. Pues es la que permite el último contacto con el resultado obtenido durante la temporada.

Es por esto que el interés de este proyecto es lograr la fabricación de estos rodillos a partir de las dimensiones estándar, para que en un futuro se

puedan obtener las maquinas estampadoras como la que se observa en la figura

Figura 11. Maquina estampadora de cera



De estas maquinas los tamaños comerciales vienen según la siguiente tabla.

Tabla 1. Tamaños de rodillos comerciales

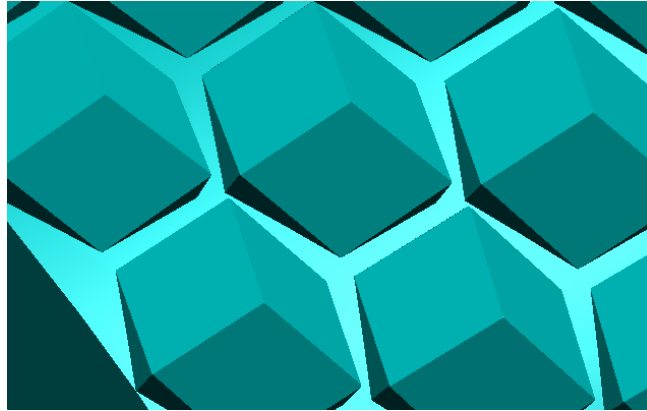
Nº	Largo de los rodillos	Diámetro de los Rodillos	Peso neto Kg.	Aprox. Bruto Kg.	Medidas aprox. del Cajón en cm. Largo x ancho x alto		
I	270mm	85mm	55	70	65	38	39
II	320mm	85mm	60	75	70	38	39
III	360mm	85mm	67	80	75	38	39
IV	450mm	85mm	80	100	85	38	39
IVa	480mm	85mm	84	105	90	38	39
V	550mm	85mm	98	118	95	38	39

Fuente: <http://www.padiway.com>

Los tamaños de los alvéolos varían mucho según la región ó país, aunque el tamaño de 5.4mm de diámetro del alveolo es el más común y en muchos lugares se considera estándar.

La geometría que se quiere alcanzar, es la del alveolo estándar de 5.4mm. Esta medida corresponde al diámetro que circunscribe al hexágono. El detalle de la geometría del alveolo se aprecia en la figura.

Figura 12. Detalle del alveolo



En esta figura se aprecia que el alveolo posee una forma de pirámide de tres techos de base hexagonal, la cual es una forma en cierta medida compleja. También se aprecia que entre el conjunto de tres alvéolos se encuentra una depresión, la cual corresponde al espacio del alveolo del otro rodillo, Funcionando de esta manera los rodillos como un sistema de macho-hembra. Los alvéolos se encuentran en muchas dimensiones pero la forma es prácticamente la misma pues estos deben cumplir con la función de que la huella que imprimen a la cera se parezca lo más posible a la hecha naturalmente por las abejas. En la tabla siguiente se aprecian algunas medidas de alvéolos, presentes en el mundo.

Tabla 2. Tamaños comerciales de los alvéolos según diversos lugares

Tipo	fuelle	Tamaño promedio del alvéolo en mm
cera	África	4.76
cera	África	4.89
cera	A.I. Root (circa 1929)	5.05
aluminio	desconocido	5.10
molino	A.I. Root (circa 1929)	5.12
cera	L.A. Honey (1989)	5.15
cera	Miller (circa 1888)	5.18
cera	México	5.18
cera 5-3/8"	A.I. Root (1989)	5.18
cera	Glorybee, OR	5.19
cera	Tom Industries, CA	5.19
cera	Honey Acres, WI	5.19
molino	A.I. Root (1989)	5.20
cera 8-3/8"	A.I. Root (1989)	5.20
plástico	Arnaba, HI	5.21
plástico	unknown	5.23
plástico	unknown	5.28
cera	W.T. Kelly, KY	5.28
molino	A.I. Root (circa 1910)	5.29
cera	Brushy Mountain	5.30
plástico	unknown	5.35
cera 8-5/16"	Dadant (med. brood)	5.36

3. INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de estos rodillos se encuentran numerosos interrogantes. Muchos de esos interrogantes corresponden a métodos de manufactura, otros corresponden a dimensiones, materiales etc. Ante todo surge la necesidad de saber cual es la forma más eficiente y económica de construir estos rodillos. Como ya se vio en el capítulo 2, estos rodillos normalmente se encuentran en el mercado, en forma de un núcleo de acero y una camisa de metal blando exterior que posee la disposición alveolar requerida. En indagaciones realizadas para conocer el material de la camisa estampada del rodillo se encontró que los materiales usados son bastante dúctiles. Por ejemplo estaño, aleaciones de estaño, aleaciones de estaño con contenido de antimonio o aleaciones de aluminio etc. Se encuentran marcas como la rietsche alemana que trabaja con aleaciones de estaño en sus camisas, sin embargo se halló en Sincelejo una máquina estampadora, al parecer de origen norteamericano que posee camisas de una aleación de antimonio.

Es importante aclarar, que para conocer el mejor método de conformar estos rodillos se buscó información en la Web, y se escribió a representantes de estas marcas como es el caso de padiway s.a de argentina, y su respuesta fue que esa información hace parte del “know how” de la empresa y por obvias razones no pueden suministrarla., ante esta dificultad se vio la necesidad de crear un “know how” propio para solucionar este desafío.

Gracias a la colaboración de algunos apicultores de la región, se pudo obtener el préstamo de rodillos de máquinas comerciales y así detallarlos para

obtener pistas acerca de cómo fue el proceso de manufactura utilizado en su conformación, en lo cual se hallan puntos interesantes como el hecho de que:

- poseen una camisa de metales blandos de alta ductilidad
- La camisa es continua.
- La geometría de la disposición alveolar no es convencional y por lo tanto posee cierto nivel de complejidad

Estos hechos prácticos permiten establecer algunas hipótesis en cuanto a su manufactura:

- El método de conformación de los alvéolos en la camisa no fue por mecanizado por métodos tales como el fresado.
- El hecho de que exista una camisa sobre el núcleo de acero da básicamente dos opciones: la primera consiste en que la camisa de estaño sea colocada al cubrir el eje con una lámina de estaño previamente estampada, empalmando los alvéolos de los extremos. Y la segunda es que la camisa de estaño o de otro material fue colocada por estañado en caliente, y posteriormente estampada.
- El método obtenido para conformar la disposición alveolar de la camisa pudo ser por medio de un proceso de laminado - estampado sobre una matriz o molde que posee esta disposición alveolar. Esto se facilita ya que los materiales usados en las camisas son blandos y bastante dúctiles, lo que es un indicio de que se facilitan para el estampado.

Ante estas hipótesis acerca de la construcción de los rodillos se vio la necesidad de desarrollar un proceso de laminado - estampado para conformar los rodillos, el cual necesita de seis elementos básicos:

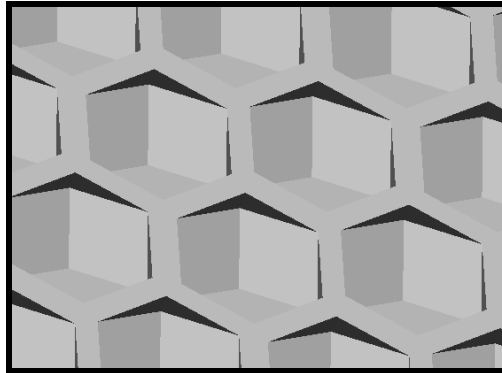
- Una matriz o molde que posea la disposición alveolar negativa
- Un rodillo de acero con la camisa lista para ser estampada
- Un sistema de potencia que ejerza la fuerza necesaria para deformar la camisa hasta la profundidad requerida
- Un sistema de potencia que suministre el movimiento horizontal a la matriz durante el recorrido del estampado
- Sistema de calentamiento del rodillo
- Estructura de la máquina

De estos elementos se encuentra que hay unos que solo con un proceso de diseño quedan definidos, como es el caso de la estructura, los sistemas de suministro de potencia y el sistema de calentamiento. Pero hay otros que si requieren de un proceso de investigación en lo que respecta a sus dimensiones y manufactura, como es el caso de la matriz y el rodillo, lo cual se expondrá en los puntos que siguen.

3.1 ELABORACIÓN DE LA MATRIZ

La forma de la matriz se puede apreciar en la figura 13. Para construir esta matriz se indagó en diversos talleres de la ciudad, con equipos manuales y computarizados y el común de todos, era que no se podía por arranque de material o que por lo menos era muy costoso y demorado. Ante lo cual hubo que investigar más a fondo los diferentes métodos de manufactura existentes en la industria.

Figura 13. Modelo preliminar de la matriz



El primer intento consistió en fabricar la matriz por medio de desbaste preliminar y posterior punzonado, para lo cual se aprovechó la forma hexagonal de las llaves hexagonales brístol y se mecanizó su punta a fin de obtener en ella los planos necesarios del alvéolo. Luego se prosiguió a templar la punta con soplete y un enfriamiento rápido en agua, con lo que se obtuvo una alta dureza en la misma.

Se realizaron pruebas inicialmente en láminas cold rolled de bajo calibre, pero estas se deformaron con bastante facilidad. Después se probó con láminas hot rolled y los resultados fueron en cierta forma aceptables, con el inconveniente de que la lámina que logró recibir el punzonado no era de mucho espesor.

Figura 14. Pruebas de Punzonado sobre lámina HR



En la figura 14 se aprecian varias pruebas realizadas. Para efectuar estas pruebas, primero se taladró sobre la lámina (ver figura 15), teniendo en cuenta que la broca coincidiera con el Angulo y el diámetro circunscrito que el alveolo requiere.

Figura 15. Desbaste preliminar y Punzonado



Después del taladrado se prosiguió a punzonar y se obtuvieron formas tales como la de la figura, en la cual se aprecian los planos requeridos. Los inconvenientes de este método son básicamente 3. El primero es que el punzón templado solo alcanzó a realizar tres punzonados exitosos antes de que fallara a compresión. El segundo es que se observa una depresión en el área de contorno del punzonado como se aprecia en la figura 15. El tercer problema es que se generó un efecto remache en el lado opuesto de la lámina como se aprecia en la figura 16, debido al desplazamiento de material generado por el punzonado, lo que es un indicio de que era necesario una lámina de mayor espesor, lo que trae implícito el hecho de que esta clase de punzón duraría menor tiempo, a menos que se fabricaran punzones de materiales más resistentes y con otros tratamientos térmicos, perdiéndose así la ventaja que se poseía con los anteriores punzones ya que al ser hechos a partir de llaves brístol traían gratuitamente el mecanizado del hexágono, aunque con la desventaja de que las medidas del hexágono tenían que adaptarse a los tamaños comerciales de estas llaves

Figura 16. Efecto remache en el lado posterior de la lámina



Ante estos hechos fue necesario indagar acerca de otros métodos más prácticos y efectivos para obtener la matriz. Por lo cual se encontró la opción de la electroerosión¹. Para la cual se necesitaba tener electrodos metálicos, preferiblemente buenos conductores de la electricidad. Debido a que los electrodos deben tener una base hexagonal, se aprovechó nuevamente las llaves brístol, para que sirvieran de electrodos.

Por recomendación de los técnicos de pladesan, que manejan una electroerosionadora manual de marca aritech, se conoció que los electrodos normalmente están hechos de cobre electrolítico o de grafito, pero que existía una posibilidad de que el acero funcionara como electrodo. Se realizaron pruebas sobre una pieza de acero A36 y los resultados fueron pésimos, pues pasaron 3 horas y la profundidad alcanzada por el electrodo no había superado las dos décimas de milímetro, ante lo cual fue necesario parar el proceso y observar el electrodo, hallándose un desgaste bastante pronunciado en el electrodo, como se puede observar en la figura 17.

¹ BEGEMAN, Myron. Manufacturing processes.sixth edition. New York: Jhon wiley and sons, 1969.P.648-649.

Figura 17. Electrodo de acero desgastado después de la electroerosión



Esto se presentó, aún teniendo las consideraciones de que el proceso se realizó a solo 3 amperios, amperaje al cual se hacen los trabajos de acabado en los que el desgaste de un electrodo de cobre es mínimo. Después se probó con un electrodo de cobre electrolítico y en tan solo 15 minutos se alcanzó una profundidad de 1.6 mm. Esta diferencia se aprecia en la figura 18, en donde se encuentran los dos erosionados.

Figura 18. Comparación entre el erosionado con el cobre y con el acero



Ante esta evidencia quedó claro que era necesario elaborar electrodos en cobre o en grafito. En el mercado solo se encontró elementos comerciales de cobre electrolítico, tales como varillas y láminas, pero no se hallaron perfiles hexagonales puesto que el cobre no es muy usado como elemento estructural, por lo cual no viene en esa presentación, como si vienen el bronce y el acero.

Debido a estas complicaciones se elaboró el electrodo a partir de varilla de sección circular de 3/8" de diámetro (la más pequeña disponible), de 12 cm de largo.

Los pasos para la elaboración del electrodo fueron los siguientes:

1. Tornear la varilla hasta 5.4 mm de diámetro, es decir hasta el diámetro que circunscribe al hexágono.
2. Fresar las seis caras del hexágono, colocando la varilla torneada sobre el cabezal divisor, y disponerlo de forma tal que rote a intervalos de 60°
3. Después de obtenido el perfil hexagonal, se corta la varilla en ocho segmentos y se prosigue a obtener los planos necesarios para obtener la pirámide de base hexagonal, para lo cual fue necesario colocar el cabezal divisor a 60° de inclinación respecto al plano horizontal y disponerlo para que girara cada 120°, y posteriormente fresando las caras con un movimiento horizontal de la fresadora. El ángulo de inclinación de 60° del cabezal se debe a que la profundidad esperada por la pirámide es de 1.6mm la cual para un diámetro de 5.4 mm necesita de un ángulo de 30°. El valor de 1.6 mm se debe a mediciones hechas sobre una plancha plana estampadora inglesa, a partir de la cual se estableció que el valor de la altura de la pirámide era aproximadamente 1.6mm.

Es importante destacar que, la longitud de la varilla con que se trabajo fue de tan solo 12cm, porque al ser el cobre un material no muy resistente y la varilla final de tan solo 5.4 mm de diámetro, era riesgoso usar una longitud mayor debido a la posibilidad de pandeo. Además, mientras mayor sea la longitud de la varilla, más difícil será el fresado, y menores las garantías de obtener un perfil con seis caras exactas. Además de esto, es importante destacar que el

solo mecanizado de este perfil de solo 12 cm demoró 6 horas y su valor fue de 50000 pesos, con lo que se concluye que este método es muy costoso. En la figura 19 se aprecia uno de los segmentos mecanizados

Figura 19. Segmento mecanizado del electrodo de cobre



Ante la dificultad de este proceso para fabricar los electrodos por mecanizado, se optó por obtenerlos a partir de fundición, sobre un molde que poseyera la forma de los mismos, pero en negativo, es decir una coquilla metálica. Para esto se mecanizó una pieza, en donde se realizaría el proceso, la cual se observa en la figura 20. Esta pieza es de acero hot rolled 1020

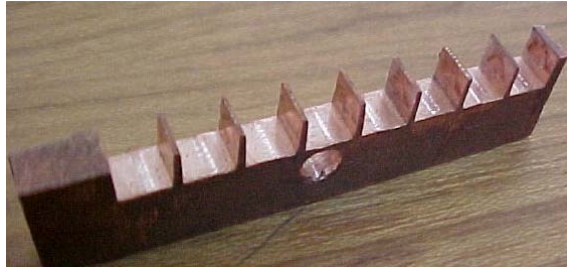
Figura 20. Molde preliminar al electroerosionado



La forma de elaborar el molde, consistió en electroerosionar esta pieza a partir de los electrodos de cobre anteriormente mecanizados. Para lo cual, fue necesario mecanizar una pequeña base que los separara al paso requerido de

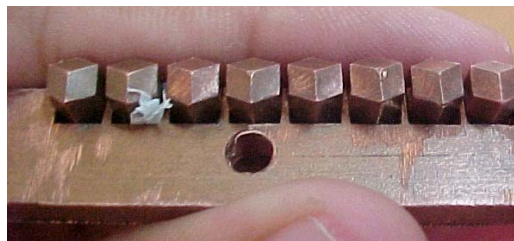
5.4mm. Esta pieza se fabricó utilizando una fresadora CNC, la pieza se muestra en la figura 21

Figura 21. Base separadora de los segmentos



La manufactura de esta pieza fue demorada y de mucho cuidado, ya que los separadores que se observan en la figura son de un espesor de tan solo 7 décimas de milímetro. Después se ensamblaron los segmentos hexagonales y se presentó que no todos quedaron al mismo nivel, como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Desnivel presente en los segmentos



Por lo cual se taladró sobre una placa de cobre, agujeros con el mismo diámetro del hexágono, a una profundidad de 5 mm para alinear y nivelar los electrodos a una misma altura, como se observa en la figura 23. Donde después se soldaron para fijarlos a la base y entre si.

Figura 23. Base de cobre para alineamiento de la altura de los segmentos



Después de obtenido el electrodo se montó una varilla de bronce como se observa en la figura 23 derecha, para que sirviera de agarre al husillo de la máquina. Después comenzó el proceso de electroerosión el cual demoró 13 horas y se presento en 2 etapas; una de desbaste y otra de acabado. En la primera el amperaje aumentó progresivamente de 2 a 5 amperios, y en la segunda se trabajo con 3 amperios, lo que proporcionó un acabado bastante bueno. De esta forma se obtuvo el molde que se muestra en la figura 24, el cual se hizo a una profundidad de 2.1 mm, para que al realizar la fundición, se obtuvieran electrodos con un margen de altura mayor a 1.6mm.

Figura 24. Molde obtenido después de la electroerosión



En la figura 25, se observa el equipo de pruebas preliminares de punzonado y electroerosión.

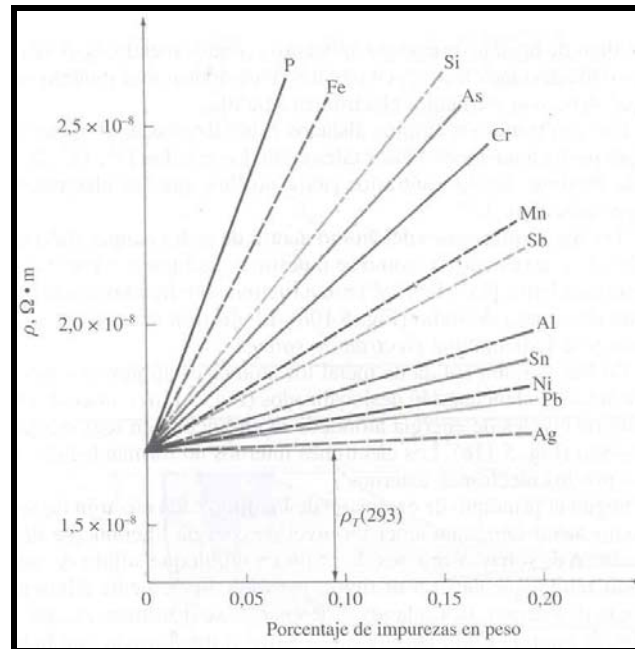
Figura 25. Elementos utilizados en las pruebas preliminares



Después de obtenido el molde con la disposición alveolar requerida, se utilizó este molde como coquilla metálica para verter sobre el, el cobre fundido, y de esta forma obtener los electrodos con los cuales elaborar la matriz por medio de electroerosión. Durante el proceso de fundición del cobre sobre la coquilla, se quiso añadir un 3- 4 % de silicio para que el cobre ganara propiedades de colabilidad necesarias para que el metal adoptara la forma del molde sin problemas. Pero después de observar la figura 26 de resistividad eléctrica del cobre² cuando esta aleado con otros materiales, se observó en esta, que el silicio es un elemento que aumenta considerablemente la resistividad eléctrica del cobre con cantidades de tan solo 0.001- 0.015% , ante lo cual un 3-4% de silicio sería desastroso para la conductividad del cobre. Sin embargo se realizaron 3 pruebas, cada una fundiendo cobre y aleando el cobre solamente con el silicio remanente en el crisol del horno.

² SMITH, William. fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Tercera edición. madrid: Mc graw hill. 1998. P.150-151.

Figura 26. Efectos de los elementos aleantes sobre la resistividad eléctrica del cobre



Fuente : SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Tercera edición. Madrid: Mc graw hill. 1998. P.151

El resultado fue en cada uno de los casos desastroso pues se generaron herviduras, poros y oxidación en la pieza fundida, y no se copió la forma del molde, como se aprecia en la figura 27.

Figura 27. Problemas de herviduras, poros y oxidación en el electrodo



Después de estos resultados se quiso convertir el molde en una coquilla, la cual necesitaba de una tapa y un diseño especial según la necesidad, además de un horno de inducción y con atmósfera controlada, preferiblemente al vacío, para poder trabajar con seguridad al cobre, ya que los metales puros, y

en especial el cobre requieren de condiciones especiales para ser fundidos y obtener resultados satisfactorios. Ante esto se indagó acerca de la existencia de un horno de estas características en la ciudad, y la búsqueda fue estéril hasta que gracias a la escuela de diseño industrial se logró un contacto con el CDPJ (centro de desarrollo productivo para la joyería) en donde cuentan con una fundidora de inducción al vacío donde normalmente la utilizan para fundir oro y plata, y en raras ocasiones han trabajado con cobre. Esta máquina tiene un rango de calentamiento máximo de 1200°C, lo que permite cubrir estrictamente el punto de fusión del cobre, el cual es de 1086°C.

Los pasos para obtener los electrodos son los siguientes:

1. se obtienen los moldes en cera a partir de la coquilla metálica³, vertiendo la cera fundida sobre la coquilla, teniendo en cuenta algunas consideraciones tales como el hecho de depositar una película de silicona para que sirva de desmoldante, y calentando el molde a una temperatura cercana a los 60°C, para evitar que la cera se pegue a la coquilla y que el molde en cera sufra torceduras por un enfriamiento rápido. En la figura 28 se pueden apreciar los moldes obtenidos y los problemas tales como las torceduras.

Figura 28. Electrodo en cera



³ LASHERAS, José maría. procedimientos de fabricación y control. Tercera edición. Barcelona: Ediciones cedel. Vol. 1. 1970. P.119-130.

2. El segundo paso consistió en armar los árboles, al colocar los electrodos en cera sobre un tronco de cera, que sirviera como vertedero. Esto se observa en la figura 29

Figura 29. Armado de los árboles



Este árbol se introdujo en un cilindro metálico hueco recubierto con cinta, para evitar el escape del yeso que posteriormente sería depositado. Como se observa en la figura 30.

Figura 30. Cilindro para el depósito de yeso



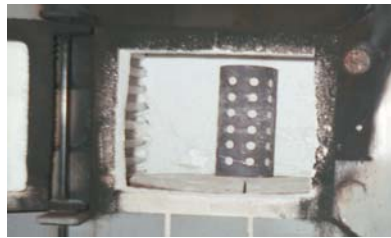
3. Luego siguió la preparación del yeso y su introducción en la máquina de vacío para remover las burbujas, las cuales son perjudiciales en el acabado de las piezas. Ver figura 31

Figura 31. Preparación del yeso y remoción de las burbujas en la máquina de vacío



4. Luego de llenado el cilindro con yeso, se esperó 15 minutos para que ocurriera el fraguado, y posteriormente se retiró la cinta del cilindro. Después, se introdujo este conjunto en el horno rotatorio durante 8 horas, como se ve en la figura 32.

Figura 32. Horno rotatorio



5. El siguiente paso consistió en llevar el cilindro de yeso a la fundidora y esperar a que el cobre alcanzara el punto de fusión, para luego depositarlo al vacío sobre el cilindro de yeso. Ver figura 33

Figura 33. Fundidora al vacío



Después de todo el proceso se obtuvieron los siguientes árboles

Figura 34. Árbol de electrodos de cobre



Pese a que en general la apariencia de los electrodos obtenidos en los árboles es aceptable, se presentaron tres problemas serios:

1. El primer problema encontrado fue debido a una capa ó costra sobre los alvéolos, de la cual se desconoce aún su causa, pues no se sabe si se debió a oxidación del cobre ó alguna reacción que sufrió el yeso cuando alcanzo estas altas temperaturas, lo cual generaría esta capa sobre el cobre. Para quitarla se sumergieron los árboles en ácido sulfúrico durante 15-20min, pero el resultado fue el mismo. Ver figura 35.

Figura 35. Costra de yeso presente en los electrodos



2. Otro problema que se presentó, fue un descascaramiento del cobre y por ende una pérdida de acabado y precisión en los electrodos de cobre lo cual es totalmente negativo para fabricar una matriz por el método de la electroerosión, ya que en este proceso el más mínimo defecto en el electrodo, es transmitido también a la matriz. En la figura 36 se aprecia el problema

Figura 36. Descascaramiento de la superficie del electrodo



Para solucionar estos inconvenientes se realizó otra prueba con cobre electrolítico en presentación granulada, el cual es de más fácil fundición. Ver figura 37.

Figura 37. Cobre electrolítico en presentación granulada



Con esta nueva prueba se esperaba que se solucionaran los problemas de descascaramiento y de la costra presente en la superficie del electrodo. Pese a que la apariencia del nuevo electrodo fue mucho mejor (ver figura 38), ya que

no se presentó el problema del descascaramiento y el color del nuevo electrodo fue mucho más claro, no se logró quitar la costra de yeso, lo que hace pensar que el yeso usado en joyería es recomendable solo para oro y plata, mas no para el cobre, en vista de los problemas presentados, por lo tanto sería necesario usar otro yeso especial, el cual es desconocido por los joyeros de la zona.

Figura 38. Comparación entre los electrodos obtenidos



En la figura 38, se aprecia el detalle del electrodo obtenido a partir del cobre electrolítico granulado.

3. Además de estos problemas, se presentaron otros de no menor importancia como es el caso de curvatura longitudinal en el electrodo lo que evitaría que al momento de electroerosionar, todos los alvéolos alcanzaran la misma profundidad, ya que los del centro alcanzarían primeramente la profundidad programada de 1.6mm e inmediatamente el sensor de profundidad de la máquina daría la orden de terminar, evitando de esta forma que los demás alvéolos alcancen la profundidad requerida.

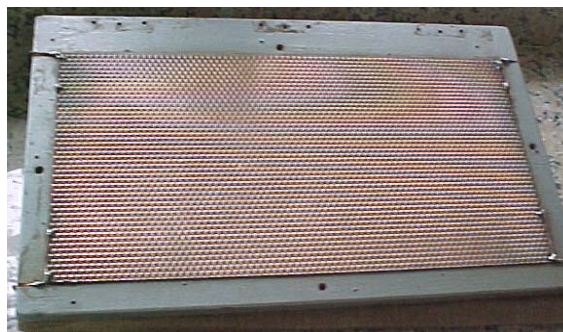
Esta curvatura es ocasionada desde el mismo momento en que se vertía la cera fundida sobre el molde, como se puede observar en la figura 39.

Figura 39. Torceduras presentes en el electrodo de cera



Ante todas estas circunstancias, las posibilidades de fabricar la matriz se redujeron, pero al averiguar, se consiguió una plancha metálica de tamaño similar al requerido y con la disposición alveolar necesaria, con la gran ventaja de que la plancha es de una aleación con un gran contenido de cobre lo que facilita en gran manera su utilización como electrodo. Ver figura 40.

Figura 40. Plancha de Cobre

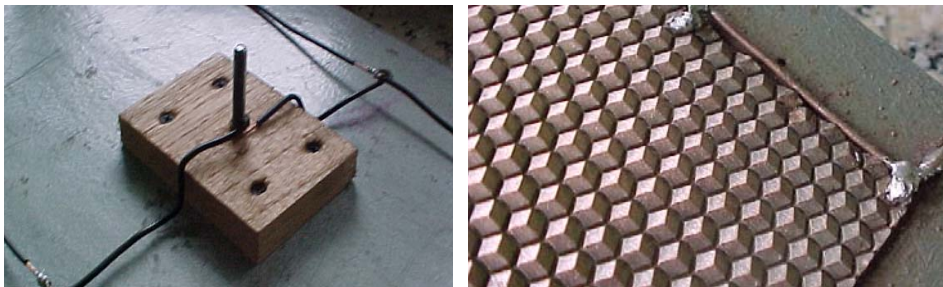


Esta plancha viene en forma de una lámina en aleación de cobre sobre una placa de madera. Aquí vale la pena constar que esta plancha posee más de

20 años, y que en ningún momento es un artículo comercial, es decir no se consigue fácilmente, por lo cual fue muy raro haberla encontrado.

Es importante aclarar, que esta plancha tiene la desventaja de que su lámina de cobre esta hecha de un calibre muy delgado, a lo sumo 3 décimas de milímetro, lo cual es negativo en el proceso de electroerosión, ya que tanto el electrodo como el material a erosionar sufren desgaste, aunque claro está el electrodo lo sufre en mucha menor magnitud. A esta plancha se le adaptó una entrada de corriente como se muestra en la figura 41.

Figura 41. Detalle de la adaptación para la entrada de corriente



En la figura 42 se observa la disposición alveolar, la cual posee en apariencia lo necesario para funcionar como un electrodo

Figura 42. Detalle de la disposición alveolar en la plancha

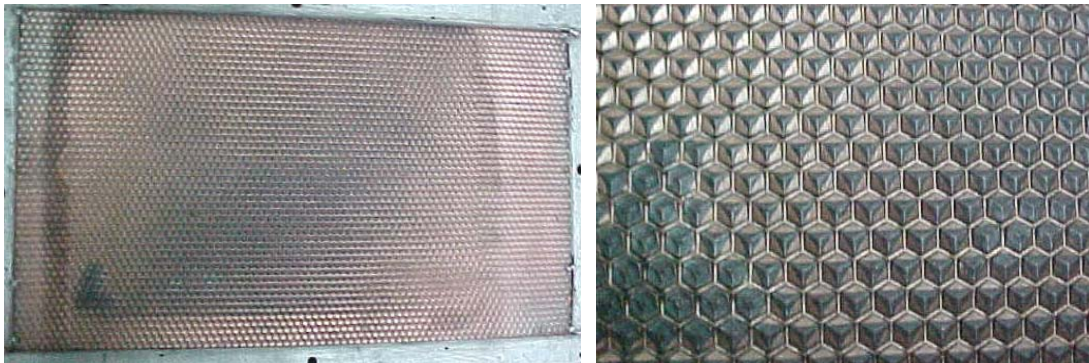


Después de intentar electroerosionar la placa de acero con la plancha, se encontraron varios defectos en el proceso. El primero consistió en que las puntas de los alvéolos se desgastaron como se aprecia en la figura. El segundo problema fue que la erosión no se presentó uniformemente y hubo zonas que alcanzaron más profundidad que otras, esto se aprecia en la figura 43, donde se ve que hay regiones que tienen más superficie negra que otras, lo que indica mayores zonas quemadas en unos alvéolos respecto a otros, y también se observa que hay una zona que se aplastó quizás debido a que el agarre entre el husillo y la madera fue muy débil y permitió libertad para que se efectuara un choque sucesivo entre la plancha y la placa de acero.

Figura 43. Desgaste en la punta de los alvéolos



Figura 44. Irregularidad presentada en la profundidad de erosionado



El detalle de la zona aplastada se ve en la figura 45, donde se aprecia que además del aplastamiento, que se separó el metal de la tabla, esta sopladura quizás se debió a que el líquido dieléctrico se introdujo entre el metal y la madera y quitó la adherencia entre estos.

Figura 45. Aplastamiento de una zona de la plancha en el electroerosionado



Ante todas estas dificultades no se insistió más por el método de la electroerosión, y se optó por intentarlo por mecanizado en un centro de mecanizado CNC. Al principio se realizaron pruebas y se obtuvieron cavidades muy irregulares debido a consideraciones erróneas en la herramienta, como se observa en la figura 46.

Figura 46. Prueba preliminar para la obtención de la matriz por CNC



Después de solucionar esos problemas se obtuvieron cavidades bastante aceptables como se observa en la figura 47, con lo que se optó por utilizar este método de manufactura.

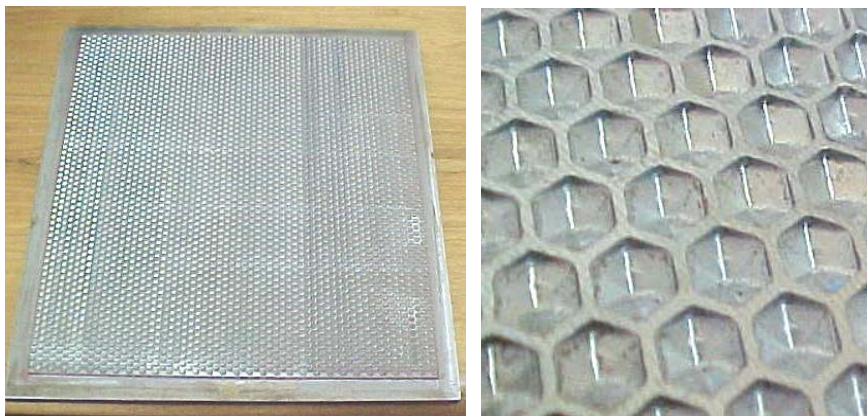
Figura 47. Alvéolo regular obtenido por medio de una máquina CNC



Aunque el cálculo del programa mastercam estimó una duración de 48 horas en el mecanizado de la matriz, el tiempo requerido fue de 12 días. Esto se debió en gran manera a que como el buril utilizado tenía en la punta un diámetro de tan solo un milímetro, se presentaron continuos desafilamientos y roturas en la punta del buril, lo que obligo a utilizar porcentajes de rendimiento en velocidad menores al establecido en la estimación del tiempo, lo que conllevó a hacer el proceso más demorado.

La matriz obtenida tiene un área total de 32 * 34cm y el área grabada es de 31*29cm. Con estas medidas se tiene en cuenta el ancho y el perímetro del rodillo que son de 27cm. En la figura 48 se aprecia la matriz y un detalle de la misma.

Figura 48. Matriz obtenida por mecanizado y detalle de la misma



3.2 ELABORACION DEL RODILLO

La elaboración de los rodillos requiere de varios pasos importantes. Estos rodillos están compuestos normalmente de una capa blanda, normalmente de aleación de estaño, la cual posee el grabado especial que se imprime posteriormente sobre la cera. Para estos fines se hicieron pruebas para colocar el estaño sobre el acero, de las cuales se sacaron varias conclusiones importantes.

La parte más importante y al mismo tiempo poco conocida en la fabricación de los rodillos, es lograr la suficiente adherencia entre el estaño y el sustrato para la cual se necesitaron muchas pruebas. Inicialmente se intentó elaborar un tubo de estaño por centrifugación para colocarlo posteriormente por ajuste forzado sobre el rodillo de acero. En la figura 49 se observa la máquina centrifugadora.

Se encontró que el estaño tiene un rango de elasticidad tan pequeño que se requeriría de un traslape de tan solo 1 centésima de milímetro para obtener un ajuste entre la camisa y el rodillo sin llegar a deformar plásticamente el estaño, por lo tanto la prueba se hizo enfriando el eje e introduciendo la camisa de estaño por medio de una prensa en el eje de acero, después se esperó a que el rodillo alcanzara la temperatura ambiente y se observó que el estaño no logró un ajuste con el acero, y simplemente se deformó plásticamente alcanzando el diámetro del eje.

Figura 49. Máquina centrifugadora



En las figuras siguientes se aprecian los pasos para obtener el tubo por centrifugación

Figura 50. Pasos para obtener el tubo de estaño por centrifugado



El primer paso consistió en disponer internamente el recipiente donde se depositaría el estaño, el cual consta de un tubo de acero en dos mitades, con extremos cónicos para colocar los anillos de presión. Es importante destacar que este recipiente se inserta dentro de la maquina centrifugadora porque esta no cuenta con las medidas necesarias para la camisa de estaño. En la figura 51 se observa el recipiente donde se deposita el estaño.

Figura 51. Tubo utilizado para obtener el tubo de estaño por centrifugado



Después de colocado el recipiente dentro del cilindro centrifugador se prosiguió a calentarlo para obtener una buena colada del estaño en el molde, como se aprecia en la figura 50. Después de calentado se coloca el vertedor, el cual es una especie de puente entre el metal fundido y el molde, ver figura 50. Y luego se deposita el metal fundido sobre el vertedor, obteniéndose de esta forma el tubo de estaño. En la figura 52 se observa el tubo obtenido sobre un eje de acero.

Figura 52. Tubo de estaño obtenido por centrifugación



Con este proceso se obtuvieron los tubos ó camisas de estaño que se usaron en las pruebas de ajuste, y la prueba con el adhesivo loctite. Después de encontrar que el rodillo no podía ser encamisado con estaño por medio de ajuste forzado, se prosiguió a usar un adhesivo de alta resistencia loctite recomendado para pegar objetos cilíndricos concéntricos de metal. Para este fin se depositó el adhesivo sobre la camisa de estaño y sobre el eje de acero y

se esperó 24 horas a que el pegante fraguara. La primera impresión fue buena pues la camisa de estaño no se pudo retirar con facilidad del eje. Después de esto se realizaron pruebas de presión para determinar la fuerza requerida para estampar el estaño y formar una huella uniforme en la camisa de estaño.

3.2.1 Pruebas para obtener la fuerza de estampado. La intención de realizar esta prueba radica en la necesidad de conocer la fuerza necesaria para obtener el grabado sobre una hilera de la camisa de estaño.

* **Caracterización del estaño.** Debido a la importancia del estaño en este proyecto, se consideró conveniente realizar una prueba de tracción, con el fin de observar el comportamiento del estaño nacional, con los datos normalmente encontrados en la literatura.

La prueba se realizó en la maquina instron de ingeniería civil, esta maquina posee un rango de 0 - 1000 kgf, lo cual es apropiado para el estaño.

El área de la probeta es de 37.11mm^2 en la zona de interés, y su geometría se hizo según la norma técnica colombiana para ensayos metálicos a temperatura ambiente (NTC 2). Las probetas se hicieron a partir de un molde de aluminio (ver figura 53) sobre el cual se vertió el estaño fundido. Después de solidificado el estaño se prosiguió a mecanizarlo con el fin de obtener una sección constante en la probeta.

Figura 53. Molde de aluminio para obtener las probetas de estaño



Al contar con las dimensiones exigidas se realizó la prueba con una velocidad de 0.33mm/sg. Este procedimiento se realizó sobre 5 probetas, de las cuales algunas presentaron resultados negativos como es el caso de incrustaciones, rompimientos fuera de la zona confiable etc. como se observa en la Fig. 54.

Figura 54. Probetas fallidas durante la prueba



También se lograron obtener buenos resultados en algunas probetas, las cuales presentaron continuidad en la grafica, y la falla se localizó en la zona media, como se observa en la figura 55. Es por esto que los resultados significativos se hicieron a partir de los datos obtenidos en dichas probetas.

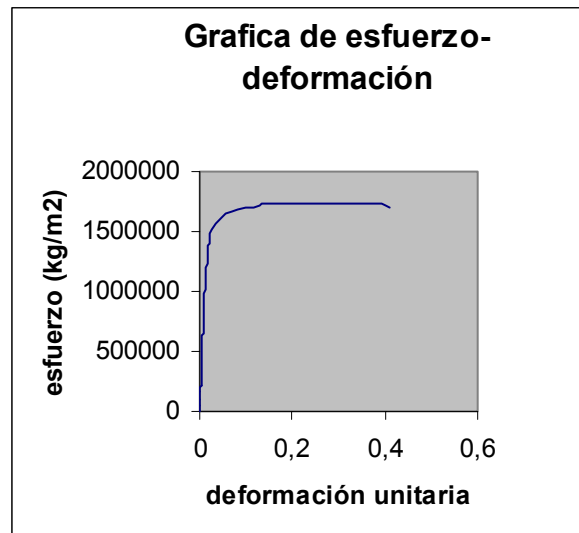
Figura 55. Localización correcta de la falla por tensión.



La grafica obtenida mostró que el estaño puro conseguido en Colombia presento un buen régimen elástico y plástico. También se observa que la zona de fluencia no fue clara y que el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo crítico son bastante similares. Además de esto, se alcanza a ver el descenso en el esfuerzo

presente en la zona de estricción. Durante esta prueba se lograron apreciar algunas facetas del estaño en lo que respecta a su comportamiento bajo cargas de tracción, ya que a diferencia de otros metales, el estaño presentó un arrugamiento en la zona útil, lo que es característico de este metal. También se apreció el lloro del estaño⁴, lo cual es un comportamiento típico del estaño, que consiste en un crujido presente durante su deformación. En la Figura 56, se aprecia la grafica de esfuerzo deformación.

Figura 56. Grafico esfuerzo deformación del estaño obtenido en la prueba

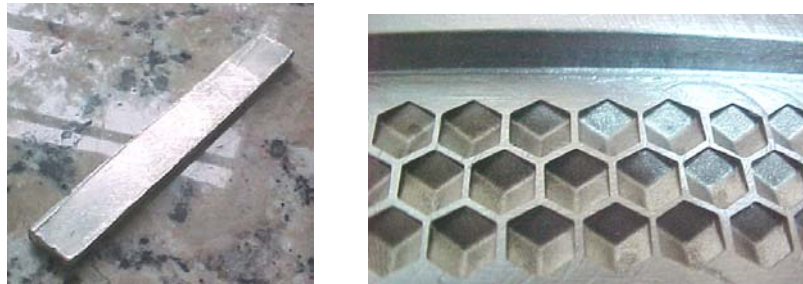


* **Prueba hecha sobre laminilla de estaño.** El primer intento para hallar la fuerza de estampado se realizó utilizando la coquilla inicial de prueba hecha por el método de electroerosión. Para este fin se utilizaron laminillas de estaño de 2cm*8cm*0.35cm, ver figura 57, ya que este es el tamaño aproximado de la parte grabada en el primer molde obtenido, es decir la coquilla inicial, (ver figura 57). Se utilizó esta coquilla pues hasta el momento

⁴ METALS HANDBOOK COMMITTEE. Metals handbook: Properties and selection of metals. Eight edición. New York. Vol 1, American society for metals, 1961. P. 1131 - 1146.

no se contaba con la matriz. Para realizar esta prueba fue necesario pegar con silicona la barra de estaño a la parte grabada de la coquilla, para garantizar que el estampado fuera lo mas fácil posible. En esta prueba se utilizó la maquina universal para ensayos mecánicos de la escuela de ingeniería civil de la uis, y se dispuso para un rango de fuerza de 0-20 toneladas

Figura 57. Laminilla de estaño y molde de acero para el estampado

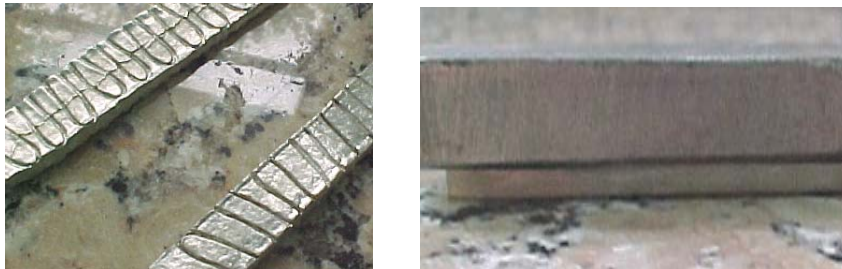


Pese a que el área a estampar era muy pequeña en comparación al área de una hilera en el rodillo, la idea de esta prueba consistía en hallar un valor de fuerza y posteriormente realizar una interpolación de las áreas y fuerzas, despejando de esta manera un valor aproximado de la fuerza, para poder tener un criterio con el cual comenzar el diseño de la maquina estampadora. Inicialmente se hicieron pruebas en frío y se encontró que la fuerza era de 8 a 10 toneladas la cual es muy elevada para estampar un área tan pequeña, por lo cual se pensó en realizar la prueba en caliente, aunque este valor tan grande se debió también a que parte del estaño no quedó sobre la parte grabada, lo que contribuyó a obtener un valor erróneo y elevado. Para realizar la prueba en caliente se utilizaron resistencias hechas con alambre de constantán, las cuales se colocaban en forma de sándwich recubiertas por encima y por debajo con papel aislante para que las resistencias no disiparan calor hacia la prensa y menos aún tuvieran contacto con el estaño el cual es muy buen conductor de la electricidad y el calor, esperando que de esta

forma se utilizara el calor generado en calentar el estaño. Para este fin se utilizó un variador de corriente con el que usando 3 amperios se logró generar suficiente calor en las resistencias, ya que al ser estas de un alambre de poco diámetro se calientan fácilmente ante el paso de una corriente alta. Por otro lado la temperatura de la prueba se controlaba con una termocupla.

El problema en esta prueba se presentó cuando el papel aislante se rompió ante la acción de la fuerza ejercida sobre el alambre de la resistencia y sobre el estaño, lo que produjo un enfriamiento acelerado de la laminilla de estaño, evitando que la prueba se realizara a una temperatura aproximadamente constante, con la consecuencia implícita de un dato de fuerza poco confiable. En la figura 58 izquierda se observan las marcas dejadas por el alambre de constantán sobre la laminilla de estaño. En la figura 58 derecha se observa la platina de acero y la laminilla de estaño debajo en la disposición usada en la prensa para entregar la fuerza de estampado.

Figura 58. Marcas dejadas por el alambre eléctrico sobre la laminilla de estaño



En la figura 59 se observan dos grabados hechos sobre las laminilla los cuales son bastante buenos, también es necesario aclarar que el ancho de la laminilla de arriba aumentó en 1,5mm y la laminilla de abajo en 4mm, lo que corresponde a la masa desplazada durante el estampado. Claro esta que la laminilla de arriba solo requirió 3 ½ Ton y la de abajo requirió de 6Ton de

fuerza. En esta prueba pese a los problemas de enfriamiento se logró bajar la fuerza de estampado a 5-6Ton, lo que mostró las ventajas del calentamiento, pero con la incertidumbre aún de un valor muy elevado y dudoso.

Figura 59. Laminillas de Estaño estampadas



* **Prueba hecha sobre la camisa con adhesivo.** La segunda prueba se realizó sobre la camisa que había sido colocada con el adhesivo, para este fin se utilizó la maquina universal para ensayos mecánicos de la escuela de ingeniería civil, y se hizo una adaptación al módulo de compresión para poder ejercer la fuerza al rodillo.

Durante el desarrollo de la prueba hubieron problemas que obligaron a detener la prueba, como es el hecho de que el estaño empezó a despegarse del eje, pues la acción de la fuerza de deformación radial y longitudinal superó a la fuerza de adhesión. Aunque se logró obtener un grabado sobre el estaño, este grabado no alcanzó la profundidad requerida, ni la calidad suficiente como para que el dato medido de la fuerza pudiera ser representativo. En la

figura 60 se aprecia el grabado obtenido en esta prueba sobre la camisa de estaño. Aquí se observa que no se alcanzó la profundidad deseada.

Figura 60. Estampado sobre la camisa de estaño pegada con adhesivo



En la figura 61 se aprecia el adhesivo y también se observa el despegue del Estaño con el acero. El adhesivo es la capa de color verde

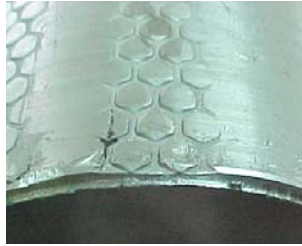
Figura 61. Detalle del adhesivo sobre el eje de acero



En la figura 62 se aprecia el desplazamiento tangencial que presenta el estaño, este desplazamiento se debe básicamente a que el material desplazado por el estampado hace que la camisa obtenga un diámetro mayor después de realizado el estampado, es por esta razón que es de vital importancia generar una adhesión tan fuerte entre la camisa de estaño y el eje, que permita

contrarrestar esta acción de desplazamiento de masa tangencial y obligarla a que sea un desplazamiento longitudinal.

Figura 62. Desplazamiento tangencial en la camisa de estaño



* **Pruebas de soldadura y estañado en caliente.** Ante estos inconvenientes se observó la necesidad de mejorar el proceso de adhesión del estaño con el acero, ante lo cual se averiguaron las técnicas para depositar una capa de estaño sobre un sustrato (en este caso acero ó cobre).

La aplicación de los recubrimientos de estaño y las aleaciones de estaño en la fabricación de artículos de metal por el método de sumergido del metal en el estaño fundido, es un proceso de bastante antigüedad. Y ha sido la mano derecha de los fabricantes y artesanos durante mucho tiempo. Su amplio uso se debe principalmente a su inherente simplicidad y mínimos requerimientos en planta⁵.

La principal aplicación de este proceso es proveer una superficie higiénica y protectora, así como una buena presentación para artículos que normalmente se encuentran con una presentación bastante rustica, tales como el acero, el cobre y los latones. Los recubrimientos hechos de estaño puro son ampliamente usados en el empaqueo de alimentos, en el hogar y en la industria alimenticia en general. Los recubrimientos de estaño plomo son

⁵ HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London: Edward arnold, 1960. P.151

aplicados en usos bastante similares a los usados con estaño puro y encuentran bastante acogida donde la no toxicidad no es esencial, usando de esta manera un recubrimiento mucho mas económico. El uso de estos recubrimientos esta muy ligado también a los elementos eléctricos, para facilitar la soldadura y otros procesos.

El proceso de estañado es particularmente aplicable a aceros de medio contenido de carbono y aceros de baja aleación, así como a cobre, latones, bronce a base de estaño y fundiciones de hierro.

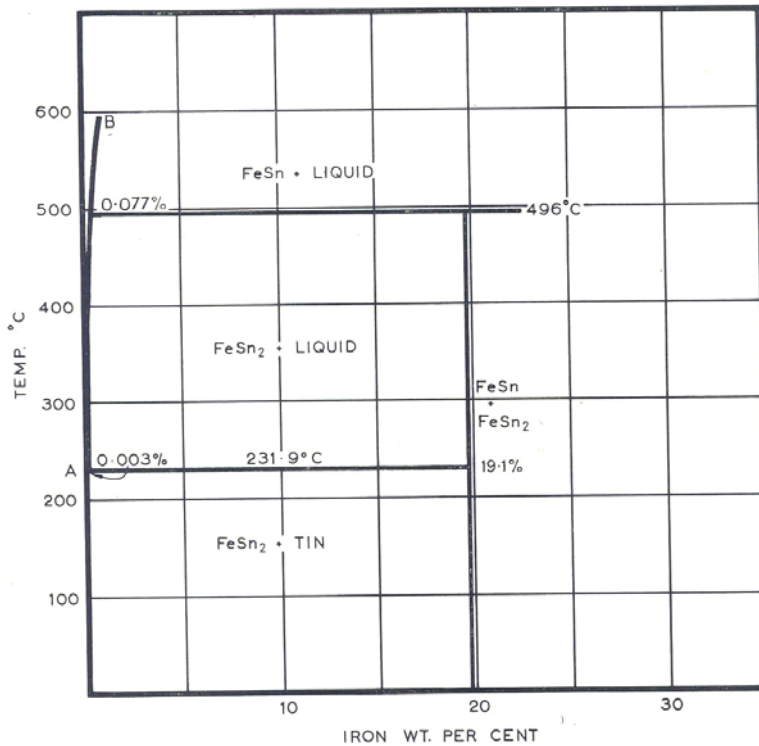
El rango de espesor del recubrimiento obtenido por este método esta entre 0.0015 plg hasta 0.0003 plg, y en algunas plantas con sistemas modernos de centrifugación se logra obtener espesores de hasta 0.0001 plg. Este rango de estañado impone algunas limitaciones en los procesos cuando se requieran capas más delgadas o más gruesas. El estañado en caliente normalmente se realiza al sumergir el material en un baño de estaño fundido, esta operación usualmente requiere unos pocos segundos para efectuarse. Los artículos también pueden ser estañados por mojado. Esto se logra aplicando el estaño fundido, o en polvo sobre la superficie previamente calentada y preparada. Este procedimiento es muy usado para estañar piezas de gran tamaño, las cuales serían muy difíciles de manipular para sumergirlas en estaño fundido, y además se requeriría de un recipiente demasiado grande y con una cantidad excesiva de estaño, lo cual junto a la necesidad de mantener el estaño fundido haría el proceso muy costoso.

En la forma más fácil del proceso, el artículo que va a ser estañado es cuidadosamente limpiado con ácidos por medio de un chorro de este, y luego se sumerge en el baño de metal. Después de la inmersión en el baño, el

artículo se limpia de las rugosidades y excesos, después de esto se le permite enfriarse. Las temperaturas de estañado oscilan entre 240-325°C. Esto se entiende mejor al apreciar el diagrama de equilibrio hierro estaño y cobre estaño.

La producción de un recubrimiento requiere la formación de una delgada capa de aleación entre la capa externa de estaño y el sustrato, el cual puede ser de hierro, cobre, etc. Haciendo que el recubrimiento consista esencialmente de dos partes. En el caso del hierro ó acero, la capa intermetálica es un compuesto de FeSn_2 como se puede apreciar en el diagrama de la figura 63, y en el caso del cobre y sus aleaciones, la capa intermetálica esta compuesta de Cu_6Sn_5 también conocido como fase η , y otra capa de Cu_3Sn conocida como fase ϵ . Como se aprecia en el diagrama de la figura 64.

Figura 63. Diagrama de Equilibrio Fe-Sn

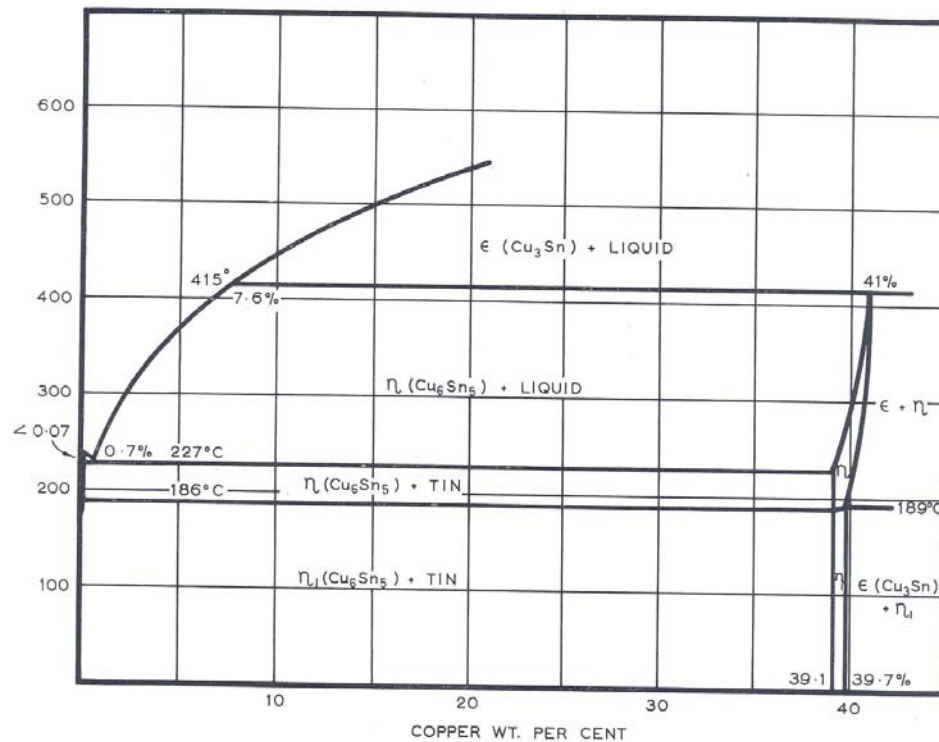


Fuente: HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London: Edward arnold, 1960. P.153

Cuando el estañado se ha realizado satisfactoriamente, una capa brillante de aleación cubre el sustrato, y esta a su vez es cubierta por una capa de estaño puro. La perfección de un estañado en caliente por sumergido depende esencialmente de la preparación de la superficie antes del estañado, la forma en que se realiza el estañado, la pureza del estaño, y finalmente del control del enfriamiento.

Una preparación inadecuada de la superficie puede llevar a la formación de una capa de compuesto aparentemente continua, pero el estaño puro en realidad no ha formado una capa uniforme sobre esta.

Figura 64. Diagrama de Equilibrio Cu-Sn



Fuente: HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London: Edward Arnold, 1960. P.154

Este es uno de los principales defectos que ocurre durante el estañado en caliente, el cual se observa cuando la pieza es removida del baño de estaño, ya que aunque en el momento la capa es continua y uniforme, después de

drenar el exceso de metal esta se rompe y se convierte en gotas y realces, y aunque entre las gotas de estaño el metal de base no quede expuesto, es claro que en esta zona la capa es muy delgada, y el recubrimiento no cumple con su función protectora. Este fenómeno se aprecia en la figura 65.

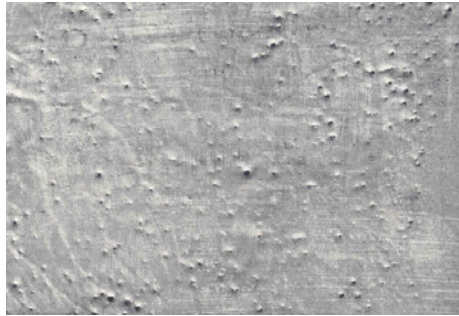
Figura 65. Deshumectación de la capa de Estaño



Fuente : HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London: Edward Arnold, 1960. P.155

Según el diagrama acero estaño se puede observar que la línea AB y su proximidad al punto de 100% de estaño, nos indican que la solubilidad del acero en el estaño a temperaturas usuales de estañado es bastante baja, y para efectos prácticos es nula. Pues de hecho un baño de estaño el cual ha sido usado para estañar artículos ferrosos por un tiempo razonable, es una solución saturada de acero en estaño a la temperatura de operación. Cuando el estaño se solidifica, todo este hierro disuelto se precipita como FeSn_2 , pero la cantidad presente es tan pequeña que su efecto es inapreciable en el recubrimiento. Aunque cualquier contaminación de hierro en el estaño normalmente aparece como cristales de FeSn_2 como se aprecia en la figura 66.

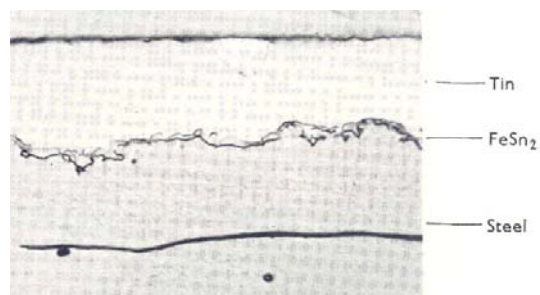
Figura 66. Cristales de hierro formados en la capa de Estaño



Fuente : HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London: Edward Arnold, 1960. P.155

La capa de aleación formada en la superficie de un artículo ferroso como se muestra en la figura 67, es normalmente compacta físicamente, y la difusión del hierro en el estaño es bastante lenta. Así, aunque su formación inicial puede ser rápida, esta crece en espesor demasiado lento. También existen posibilidades de que se genere una aleación de hierro -estaño, debido a la interacción entre el acero o fundición del molde y el estaño. El sobrecalentamiento particularmente puede causar una formación de compuesto a causa de que la masa de FeSn_2 es disuelta por el estaño menos rápido que lo que toma atacar al hierro fresco.

Figura 67. Interfase metálica entre el hierro y el estaño

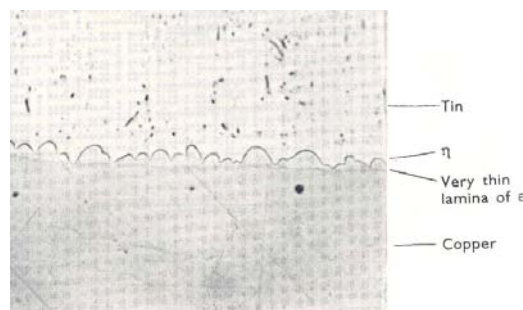


Fuente : HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London: Edward Arnold, 1960. P.156

El otro caso importante es entre el cobre y el estaño, en el que la rata de reacción es mucho más rápida que entre el hierro y el estaño. Una capa de

cobre - estaño como se ve en la figura 68, se forma sobre la superficie de cobre cuando este se sumerge en estaño fundido, pero a diferencia del compuesto hierro-estaño, esta capa se incrementa bastante rápido. Volviendo al diagrama de equilibrio entre el cobre estaño, se encuentra que la solubilidad del cobre en estaño a temperaturas normales de estañado es bastante elevada, y que por encima del 0.7% de cobre la temperatura de la solidificación primaria crece cuando aumenta el contenido de cobre. Así, una aleación fundida que contiene un 2% de cobre comenzará a formar cristales de la fase η a unos 280°C. Implícitamente, esta el hecho de que una aleación no estará completamente líquida a una temperatura normal de estañado, por ejemplo 260°C. Sobre el rango de temperatura a que ocurre la solidificación, el baño es en parte sólido y en parte líquido, y poco a poco este se vuelve más pastoso a medida que la temperatura desciende hasta 227°C. A medida que la cantidad de cobre en el baño se incrementa la pastosidad a cualquier temperatura particular dentro del rango mencionado anteriormente, también aumenta.

Figura 68. Interfases metálicas entre el cobre y el estaño



Fuente : HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London: Edward Arnold, 1960. P.157

Durante el enfriamiento hasta 227°C la mayoría del cobre en el baño se separa en partículas de cobre estaño, generando así una aleación eutéctica (0.70%), la cual se solidifica brillantemente a esta temperatura. Demasiada cantidad de

cobre en un baño de estaño podría causar que las capas se volvieran rugosas y de pobre color, lo que haría necesario procesos posteriores de pulido con el agravante de obtener una capa más delgada y de esta manera menor protección contra la corrosión.

Ante esta evidencia se tomó una muestra de un rodillo industrial con el fin de estudiar la interfase presente en el mismo y observar que clase de proceso pudo haberse utilizado en su manufactura. La muestra que se tomó consta de un pedazo de acero adherido a un fragmento de estaño, posteriormente se llevó la muestra a los laboratorios de la escuela de ingeniería metalúrgica, donde se realizó un proceso de pulido y encapsulamiento en baquelita, pudiéndose de esta forma hacer una prueba metalográfica, como se observa en la figura 69

Figura 69. Muestra extraída a partir de un rodillo comercial.



Después de obtenida la probeta, con los requerimientos necesarios para desarrollar la prueba, se llevó al microscopio donde se tomaron cuatro fotos a diferentes acercamientos, la primera a 50X, la segunda a 100X, la tercera a 200X y la cuarta a 500X. En estas fotos se aprecia claramente el cambio de material pero solo hasta la foto de 500X es posible apreciar los detalles

presentes en el cambio de material, sin apreciarse interfase de aleación entre las dos capas, ya que solo se aprecian efectos de rugosidad entre los límites de grano más no se observa difusión.

Figura 70. Acercamiento de la interfase estaño-acero a 500X



Inicialmente se pensó que era posible depositar el estaño al verterlo fundido sobre el núcleo, pero esta hipótesis no se concretó pues el estaño simplemente se solidificaría y no alcanzaría a formar una capa de aleación con el sustrato. Por esta razón se buscó una solución al problema dentro de los procesos usados en la industria, y se encontró que el metalizado podía ser una alternativa viable. Esta técnica requiere de un equipo llamado rototeck y del metal a depositar en polvo. Después de averiguar en el mercado se encontró que el proceso era demasiado costoso, pues el solo hecho de depositar una pulgada cuadrada de 3mm de espesor costaba 80000 pesos, y el rodillo supera unas cien veces esta área. Ante esta noticia se intentó soldar el estaño sobre el núcleo, para lo cual era necesario cobrizar la superficie del núcleo y obtener

así mucha mas facilidad en la adhesión del estaño. En la figura 71 se aprecia el núcleo cobrizado.

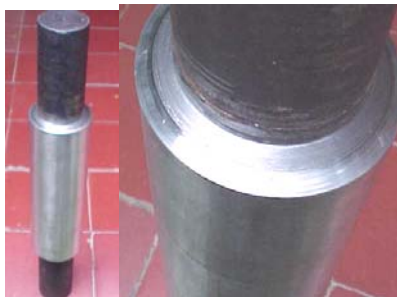
Figura 71. Eje cobrizado



Para esto se necesitaba que el material de aporte (estaño) estuviera en presentación de barritas, y el problema es que el estaño comercial para soldar viene con un alto contenido de plomo (de 30 a 60%) y como es conocido, el plomo es altamente dañoso para la salud, lo cual no permitió que estas barras se usaran, lo que trajo la posterior necesidad de obtener las barritas por medios propios, ya que el estaño puro viene en presentación de lingotes. Para lo cual se utilizo una coquilla, la cual después de calentada a unos 200°C recibe el estaño fundido. Después de solidificadas, estas placas se cortaron en una cizalla obteniéndose barritas similares a las barras comerciales. Al tener los elementos básicos para soldar, se precalentó el rodillo ya que este es un paso fundamental en la soldadura. Y luego se prosiguió a soldar. Los inconvenientes se presentaron cuando el núcleo se enfrió rápidamente, ya que al ser una masa tan grande, el calor suministrado por la llama no contrarrestaba al calor perdido por convección. Debido a estas razones no fue posible soldar el estaño por los métodos convencionales de soldadura. Todo esto llevó a investigar más acerca de la forma de adherir correctamente el estaño sobre el núcleo.

El paso siguiente consistió en realizar el estañado en caliente, para lo cual se aprovechó el cobrizado que ya se tenía. Posteriormente se hicieron muchas láminas con la coquilla metálica. También fue necesario hacer un recipiente especial Donde se colocó el rodillo, quedando de esta manera un espacio entre el recipiente y el rodillo. Después de introducido el rodillo, se calentó el conjunto hasta una temperatura de unos 800°C ya que el rango de la energía de activación del cobre se presenta a 700-900°C, lo cual es el rango de temperatura al que el cobre permite difusión atómica⁶ con otro metal, presentándose así una adhesión entre los metales. Después de calentar el conjunto se introdujeron las laminillas de estaño en el espacio entre el recipiente y el núcleo de acero, y debido a la alta temperatura con que se contaba, el estaño depositado se fundía y subía por inmersión. De esta forma se obtuvo una camisa de estaño sobre el núcleo de acero aunque claro está que las cualidades de la adhesión no estaban aún claras, y tocaba realizar pruebas antes de avalar este procedimiento. En la figura 72 se observa el rodillo obtenido por este método y un detalle del mismo.

Figura 72. Camisa de estaño obtenida por inmersión



En la figura 73 se puede apreciar una comparación del rodillo nuevo con el anterior y se observa que la mejora es bastante notable, ya que a simple vista

⁶ SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Tercera edición. Madrid : Mc graw hill, 1998. P. 122.

el estaño parece estar firmemente unido al núcleo de acero, y prácticamente no se nota el cambio de metales. Cabe destacar aquí también, que el núcleo de acero contaba con orificios y canales, con lo que se pretendía obtener una ventaja mecánica, esto quiere decir, que se quería ayudar a la adhesión por medio de agarre del estaño sobre el núcleo, ya que al depositarse este sobre las cavidades, evitaría que la camisa deslizará fácilmente sobre el núcleo.

Figura 73. Comparación entre los dos tipos de camisa obtenidos



En este proceso también ocurrieron defectos como es el caso de la existencia de escoria en la colada, ver figura 74, lo que posteriormente se vio reflejado en el rodillo, ya que la camisa presentó deposición de escoria en la zona superior, lo que es altamente negativo para la camisa ya que no se podría realizar un grabado correcto de los alvéolos sobre esta zona, y además se podría romper la camisa en esta zona ante la acción del estampado y del laminado. Este problema se debió básicamente a una mala limpieza del metal fundido y a impurezas presentes en el molde y en el núcleo. Después de obtenida esta camisa fue posible realizar la prueba para obtener la fuerza de estampado. En la figura 74 se observa la escoria presente en la camisa

Figura 74. Escoria presente en la camisa



* **Prueba hecha sobre la camisa colocada por inmersión.** Después de obtenida la camisa por inmersión en estañado en caliente, se pensó en realizar la prueba necesaria para obtener la fuerza de estampado. Para esta prueba fue necesario elaborar un calentador. Este calentador consta de unas resistencias en paralelo las cuales alcanzan una temperatura máxima de 700°C, colocadas dentro de un reflector o pantalla cilíndrica, como se observa en la figura 75.

Figura 75. Reflector



La idea de esta disposición, es lograr un calentamiento por radiación sobre el rodillo, ya que entre el perímetro de resistencias y el rodillo queda una luz de tan solo 5 mm y al ser estas encerradas en un cilindro, la superficie del reflector se comporta prácticamente como una superficie negra, lo que permite aprovechar en mayor magnitud el calor generado por radiación, aunque claro está que existen pérdidas hacia el ambiente por la parte exterior

del reflector y por los extremos de las resistencias. El calentador es alimentado por una corriente de 20 amperios y un voltaje de 110V, teniendo en cuenta que para este circuito se usa un pirómetro en el cual se ajusta la temperatura deseada, ver figura 76.

Figura 76. Contactor y pirómetro



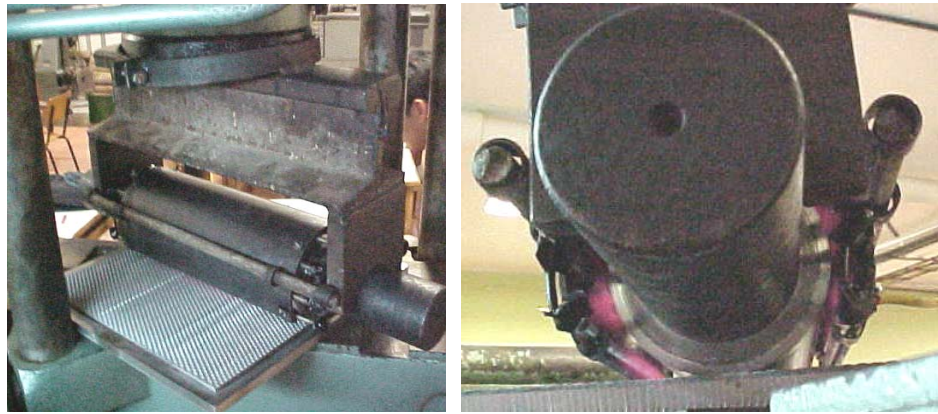
En la figura 76 también se observa el contactor. Este conjunto permite que por medio de una termocupla conectada al pirómetro se mida la temperatura del rodillo y cuando se alcance la temperatura ajustada, el pirometro envíe una señal eléctrica al contactor y este deje de enviar corriente al calentador, permitiendo que de esta forma se controle la temperatura en el rodillo, hasta el momento en que la temperatura descienda y el pirometro envíe otra señal al contactor permitiendo nuevamente un paso de corriente hacia las resistencias para continuar con el calentamiento del rodillo. En la figura 77 se observa el equipo de calentamiento.

Figura 77. Equipo de calentamiento



Además de esto, fue necesario elaborar un adaptador a partir de un perfil en I, al cual se le soldó una abrazadera, la cual permite agarrar la estructura a la prensa, Como se observa en la figura 78. Además de esto se observa que esta adaptación posee en sus extremos unas placas perforadas que le entregan la fuerza al rodillo, Y también posee unas guías para colocar unas barras que permiten ubicar el calentador en una posición aproximadamente concéntrica con relación al rodillo.

Figura 78. Adaptador de fuerza a la prensa y calentamiento del rodillo



Después de colocado el adaptador de fuerza, se encendió el calentador y se esperó a que se alcanzara una temperatura de 80°C. En la figura 78 se puede ver el efecto de las resistencias sobre el rodillo. Mientras se efectuaba el calentamiento, se tuvo el cuidado de mantener la termocupla del calentador unida a la camisa de estaño en la zona cercana a la interfase con el acero, y asimismo se usó otra termocupla auxiliar para tener un punto de comparación. La termocupla auxiliar se colocó en el extremo opuesto de la termocupla del calentador, Como se ve en la figura 79. Después de alcanzar la temperatura estimada se prosiguió a ejercer la fuerza. Cabe destacar que fue necesario utilizar un deformímetro. Para este efecto se colocó su cuerpo en el bastidor de la maquina, por medio de un imán, y el vástago de profundidad

se colocó sobre el carro móvil para de esta forma medir la profundidad de estampado y controlar la medición de la fuerza. Ya que la utilidad de esta prueba consistía en obtener el valor de la fuerza al alcanzar una profundidad de 1.6mm.

Figura 79. Control de la temperatura usando dos termocuplas



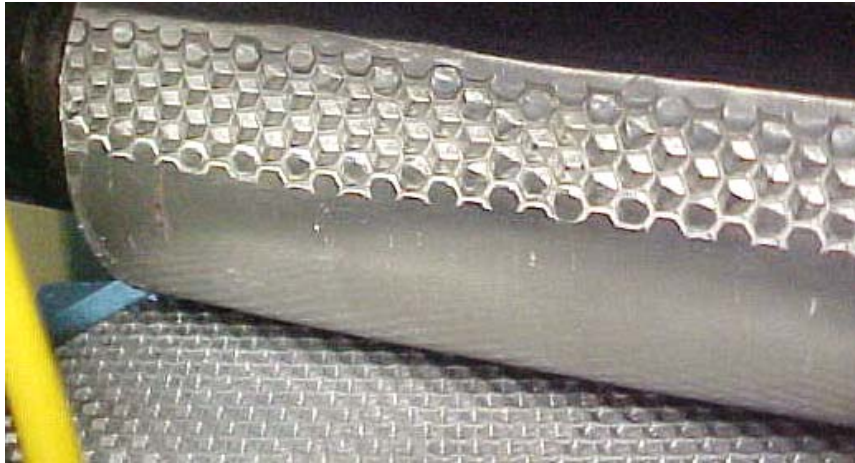
Al alcanzar la profundidad requerida, se descargó la maquina y se observó el resultado del estampado, en la figura 80 observa que el grabado fue bastante bueno y se alcanzó prácticamente la profundidad requerida

Figura 80. Grabado obtenido durante la prueba de fuerza de estampa



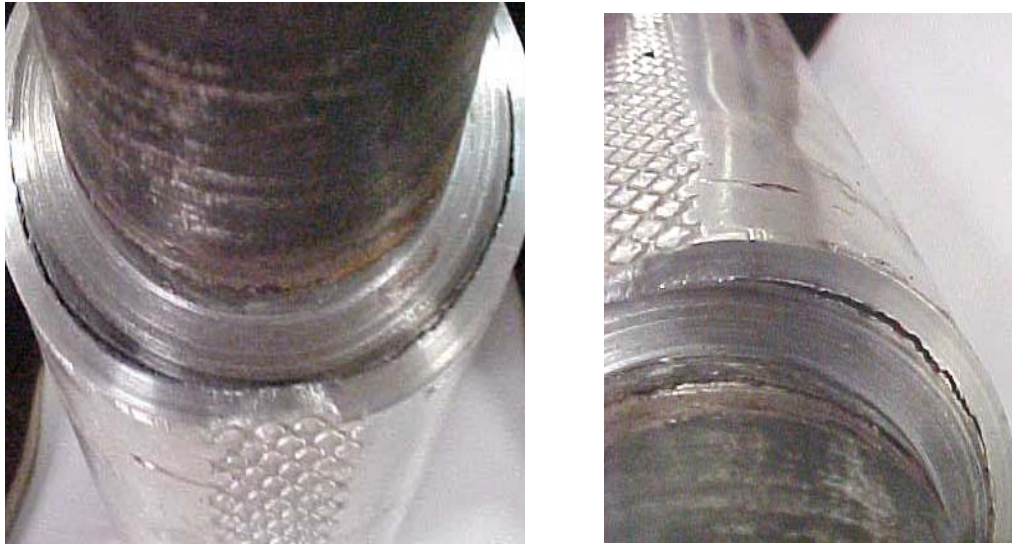
Pese a que el grabado fue bueno, se presentó un ensanchamiento del grabado hacia los extremos, es decir que se formaron más de dos hileras estampadas hacia el extremo, lo cual se generó posiblemente debido a la flexión del eje de acero. Este defecto se aprecia en la figura 81.

Figura 81. Estampado longitudinal sobre el rodillo



Al descargar el rodillo de la prueba se observó otro aspecto importante, y es el desplazamiento tangencial de masa, este desplazamiento se aprecia claramente en el extremo que posee la mayor área grabada, y también se encuentra aquí que el estaño logró separarse del núcleo, lo que hace pensar que la adhesión entre el estaño y el cobre no fue suficiente para resistir la fuerza de desplazamiento, o que el cobre se desprendió del acero ante la acción de la fuerza. Esto se aprecia en la figura 82. El valor medido de la fuerza fue de 15 toneladas, y se consideró que este es un valor representativo para la fuerza de estampado a 80°C, aún con los inconvenientes presentados, ya que el grabado fue bueno y se alcanzó la profundidad requerida en casi toda la longitud, compensándose las zonas bajas con las zonas donde hubo exceso de estampado.

Figura 82. Detalle del despegue de la camisa de estaño



3.2.2 Pruebas realizadas para calcular la fuerza de empuje. Para calcular la fuerza de empuje fue necesario adaptar un pórtico a la estructura principal, sobre el cual se colocó un actuador hidráulico de 20 toneladas de capacidad. Este cilindro hidráulico posee un manómetro, el cual permitió conocer la presión requerida para efectuar el empuje. La presión medida en la prueba fue de 120 bares, y según las dimensiones del cilindro, esta presión se traduce en una fuerza de 3.4 ton. Durante el proceso de laminado-estampado se observó que no existieron resbalones o desplazamientos entre el rodillo y la matriz, lo que indicó que para el proceso no es necesario un sistema de engrane entre el rodillo y la matriz. El proceso se llevó a cabo a una temperatura de 120°C, al calentar el rodillo a 150°C en un horno eléctrico, y posteriormente colocarlo en la máquina, manteniendo su temperatura por medio de soplete, y midiéndola con una termocupla. En la figura 83 se puede apreciar el montaje que se necesitó para desarrollar la prueba.

Figura 83. Prototipo usado para determinar la fuerza de empuje



Pese a que la prueba anterior sirvió para determinar la fuerza de empuje, también sirvió para conocer los inconvenientes que se presentaron al realizar el laminado-estampado, como consecuencia del desplazamiento de material, generado principalmente por la laminación, ya que al producirse una reducción en el espesor de la lámina se generó un alargamiento en su perímetro, lo que trajo por consecuencia, que el estaño se desprendiera del acero, venciendo así la fuerza de adhesión existente entre estos, trayendo como consecuencia un abombamiento de la lamina de estaño sobre el eje de acero, y así mismo un mal acabado y presentación del rodillo. Este resultado se observa en la figura 84.

Figura 84. Detalle del abombamiento y despegue de la camisa de estaño



El eje de acero utilizado en la prueba, posee ranuras y orificios, con el fin de obtener una ventaja mecánica. Como se aprecia en la figura 85.

Figura 85. Eje de pruebas con orificios y ranuras



Cuando se mecanizó el eje de acero, se pensó que las ranuras y orificios proporcionarían un mayor agarre entre el estaño y el acero, ya que el estaño se deposita sobre estos canales y orificios, lográndose así alcanzar una mayor resistencia al deslizamiento. Pero el resultado obtenido después de la prueba mostró que aunque sí se logra cierta resistencia al deslizamiento, esta ventaja no es suficiente para evitar el abombamiento. Además se observó que los alvéolos que se encontraban encima de los agujeros y ranuras, no alcanzaron la misma profundidad que los alvéolos que se encontraban sobre la parte maciza del eje. Ante lo cual se puede pensar que durante la solidificación del estaño sobre el acero, este se contrajo, permitiendo que quedara un pequeño espacio entre el acero y el estaño, ya que al no existir un sustrato de cobre sobre el eje de acero en estas zonas (pues las ranuras y orificios se hicieron después del cobrizado), fue muy difícil crear una adhesión entre el estaño y el eje, que permitiera que el estaño se encontrara firmemente distribuido sobre el eje. En la figura 86 se aprecian las líneas claras donde se presentó este problema. Y se alcanza a ver que en estas los alvéolos solo alcanzaron a una pequeña profundidad de estampado.

Figura 86. Detalle de la poca profundidad alcanzada por los alvéolos localizados sobre las ranuras y agujeros



Después de un análisis externo de la camisa de estaño, se hizo un corte longitudinal y se retiró la camisa del eje de acero. Al abrirse la camisa se observaron varios fenómenos que pudieron generar la poca adhesión entre la camisa y su eje:

- Se encontró gran cantidad de óxido en el eje de acero (ver figura 85), lo cual se debió a las condiciones en que se dio el proceso, es decir, atmósfera rica en oxígeno, demasiado tiempo de exposición de la superficie del eje de acero, debido a que las pruebas iniciales se realizaron calentado el eje por medio de soplete y al ser el eje de gran masa, el enfriamiento fue muy rápido y la rata de calor suministrado por el soplete era insuficiente
- Cuando se efectuó la segunda prueba, la capa de cobre se encontraba debilitada, debido a que fue necesario quitar la capa de óxido existente de la primera prueba, lo que ocasionó que durante el proceso de limpieza se removiera conjuntamente gran cantidad del cobre depositado sobre el acero
- También se observó una gran cantidad de cobre adherida firmemente a la camisa de estaño (ver figura 87) lo que permite concluir que la adhesión entre el cobre y el estaño fue más fuerte que la adhesión electrolítica entre el cobre y el acero, ya que entre el estaño y el cobre se generó una aleación

de Cu_6Sn_5 y Cu_3Sn . Las cuales son bastante fuertes y suficientes para vencer la adhesión entre el cobre y el acero. Por lo tanto se haría necesario usar una camisa de bronce para evitar este fenómeno, debido a que el bronce estaría unido por ajuste forzado al eje de acero y de esta manera las aleaciones anteriormente nombradas se formarían sobre un sustrato de bronce muy profundo el cual no se arrancaría, evitando así que la camisa de estaño se deslice fácilmente sobre el núcleo.

Figura 87. Detalle del cobre adherido a la camisa de estaño



Ante estas evidencias, fue necesario encontrar otra alternativa para lograr el estampado sobre el estaño, por lo cual se optó por hacer laminas planas de estaño, las cuales después de ser laminadas poseían mejores propiedades mecánicas para el estampado. Esto debido a que el estaño posee una dureza de 5 BHN cuando esta fundido, y esta dureza se reduce en un 60% cuando el material sufre una reducción de área del 80%. Para hacer las láminas de un tamaño cercano al exigido se elaboraron dos tipos de molde. El primero consiste en una coquilla metálica, que posee 2 tapas que van unidas por medio de tornillos (ver figura 88 izquierda). Entre las dos tapas se encuentra un empaque de asbesto. Después de calentada la coquilla en un horno se prosigue a verter el estaño fundido sobre esta, con el cuidado de

proporcionar calor a la coquilla por medio de un soplete, ya que esta coquilla presenta el inconveniente de que disipa muy rápido el calor, pues su área es muy grande (32cm * 32cm), ocasionando que el estaño tienda a solidificarse rápidamente, ya que el espacio entre tapas es de tan solo 5mm, lo que genera que varias capas superpuestas y discontinuas de estaño se formen sobre el molde, evitándose así la obtención de una lámina continua y apta para el laminado - estampado. Claro está, que si se controla bien el proceso y el estaño se deposita dentro del rango de temperatura recomendado (250-300°C), es posible obtener las láminas de estaño por fundición uniformes y lisas. El otro molde (ver figura 88 derecha) que se utilizó, es mucho más sencillo y fácil de manipular, ya que no posee tapa. En este molde es posible controlar aproximadamente el espesor de la lámina de estaño, ya que el exceso se puede retirar fácilmente. Otra ventaja de este molde es su tamaño, ya que solo mide 19cm * 22cm. Y aunque este tamaño es inferior al tamaño de la lámina requerida, después del proceso de laminación esta lámina alcanzará las dimensiones exigidas. Las desventajas de este molde se presentan cuando se necesita que el espesor de la lámina a obtener sea constante, ya que se necesita colocar el molde sobre una superficie bastante nivelada. Este problema no se presenta en el molde de coquilla, pues este posee un espacio fijo entre las tapas, lo que permite que todas las láminas salgan del mismo espesor. Otra desventaja del molde sin tapa es que casi siempre se presenta un enfriamiento rápido en el centro de la cara expuesta al aire, y este enfriamiento genera una contracción en el estaño, lo que posteriormente ocasiona hundimientos en el centro de la lámina, y de esta manera una pérdida de acabado para los alvéolos del centro, y posibles fracturas prematuras al momento de estampar o laminar.

La razón de obtener las láminas de estaño por estos métodos radica en que el estaño puro, solo se consigue en el mercado en forma de lingotes. Y por lo tanto es necesario elaborar moldes con las formas requeridas.

Figura 88. Moldes utilizados para obtener las láminas de estaño



El paso siguiente a la obtención de las láminas, fue el de la laminación. En esta etapa, la lámina se hizo pasar repetidas veces por el rodillo, hasta obtener el espesor adecuado. Pese a que la máquina fue diseñada para estampar, también funciona como laminadora en un sentido. Esto se logra quitando la matriz, y colocando una placa plana con las mismas dimensiones de la matriz, con lo cual se logra tener una disposición de slab⁷, el cual es uno de los métodos de laminación existentes en la industria. Debido a la inexistencia o poca disposición de trenes laminadores en la ciudad, se hizo necesario utilizar la máquina como laminadora.

Se realizaron varias pruebas de estampado con láminas de diferentes espesores, con el fin de comparar el acabado y la maleabilidad de las láminas;

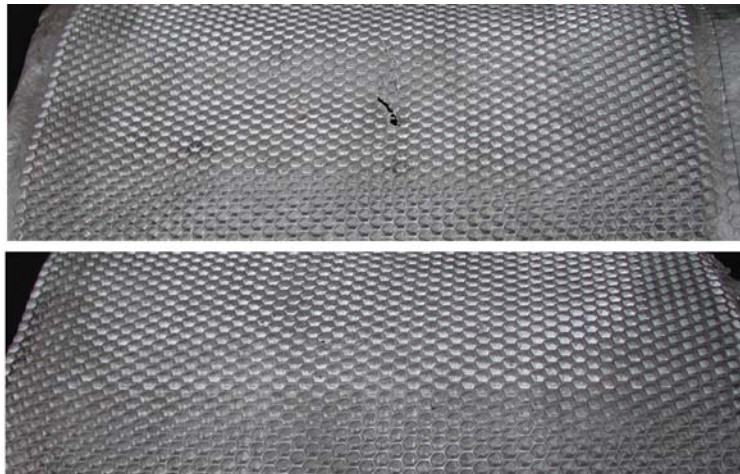
⁷ TSELIKOV, A, I. Trenes de laminación. Bilbao: Ediciones urmo, 1970. P. 23.

La primera lámina tenía 3.5mm de espesor, y la segunda tenía 2.5 mm. En ambos casos las láminas pudieron ser estampadas sin ningún problema, pero se encontró que se generaron los siguientes inconvenientes:

- En la primera lámina se produjo una grieta en la mitad del molde debido que el proceso de laminado-estampado agravó y extendió una fisura existente desde el momento de la fundición, ya que esta lámina fue obtenida con el molde sin tapa
- Se encontró que en los extremos laterales de las láminas, las hileras de alvéolos alcanzaron la profundidad requerida. Para la primera lámina se alcanzaron 9 hileras por lado bien estampadas. Para las segunda 12 hileras con buena respuesta

En ambos casos el centro de la lámina no alcanzó la profundidad requerida, pero aún así, se logró obtener el paso constante entre cada alvéolo. En la figura 89 se observan las láminas.

Figura 89. Láminas estampadas



Finalmente, se realizó una prueba con una lámina de 2mm de espesor, con la intención de que la máquina no necesitara mucha fuerza para obtener el

estampado, esta lámina presentó buenas propiedades después de ser laminada. Luego, se calentó a 180°C, se estampó y se observó que el resultado obtenido fue bastante bueno, ya que la lámina no solo obtuvo un buen grabado, sino también presentó buena maleabilidad, lo cual se necesita para formar los rodillos a partir de éstas láminas.

Figura 90. Lámina estampada con un grabado aceptable y su detalle

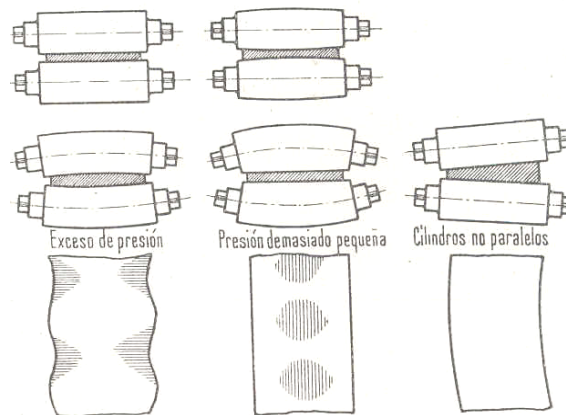


En el detalle de ésta lámina (figura 90) se puede apreciar que la calidad del alvéolo se mejoró, también se observa que se mantiene correctamente el paso entre cada alvéolo, ya que no se ven alvéolos superpuestos, ni alvéolos entre cortados. El resultado de esta lámina permitió concluir que la mejor forma de obtener láminas estampadas con buen acabado, es contar con una lámina de poco espesor, con buena continuidad y con un buen calentamiento previo al proceso de estampado.

Todas las láminas estampadas presentaron en mayor o menor magnitud, poca profundidad del alvéolo en el centro de la lámina y esto se explica porque aún los cilindros más rígidos se deforman elásticamente bajo la presión de laminación, lo cual se puede contrarrestar al darle al cilindro una forma adecuada. Esta forma consiste en un abombamiento del cilindro, haciéndolo de mayor diámetro en el centro que en los extremos; la diferencia

de diámetro depende de las dimensiones del cilindro y la presión de laminación y oscila entre 0.02 y 0.5mm⁸. Un determinado abombamiento corresponde a una aleación definida y a una presión de laminación completamente determinada. Si el abombamiento es pequeño o la presión de laminación es demasiado grande, la chapa resulta más gruesa en el centro que en los extremos y además estos resultan ondulados. Por el contrario, si el abombamiento es excesivo o la presión demasiado pequeña, la chapa resulta mas delgada en el centro y ondulada (ver figura 91). Es por esto que si se estima bien la reducción conveniente, se pueden obtener láminas perfectamente planas, y posteriormente uniformemente estampadas. Como los cilindros se dilatan por el calor y se calientan más en el centro que en los extremos, se produce así un abombamiento térmico que puede aprovecharse. Las superficies (tablas) de los cilindros se deterioran con el tiempo y deben rectificarse, esta operación se realiza normalmente en una rectificadora o torno CNC que permite dar a los cilindros el abombamiento necesario.

Figura 91. Problemas presentados por una incorrecta laminación



Fuente: ZEEDERLER, Alfred. Aleaciones ligeras. Madrid: Aguilar, 1955. P.185.

⁸ ZEERLEDER, Alfred. Aleaciones ligeras. Madrid: Aguilar, 1955. P.184.

4. DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA LAMINADORA-ESTAMPADORA DE ESTAÑO

Gracias a los resultados obtenidos durante la investigación fue posible establecer los parámetros y las condiciones de diseño que debía cumplir la maquina encargada de generar la forma necesaria sobre el estaño. Entre estos parámetros se destacan los siguientes:

- Tener la capacidad de laminar el estaño previamente fundido, esto debido a que el estaño puro solo se consigue en presentación de lingotes lo cual hace necesario contar con moldes para aproximar su forma mediante fundición, y además de esto se presenta la inexistencia de maquinas laminadoras en la región.
- Estampar láminas planas de estaño ya que para estampar directamente los rodillos es necesario una adherencia especial entre el estaño y su sustrato de acero lo cual se logra con equipo profesional para estañado en caliente, el cual no se encuentra en Colombia.
- Lograr una lamina estampada de al menos 27cm*27cm.
- Contar con un marco vertical capaz de resistir una fuerza de estampado de 25 toneladas.
- Contar con un marco horizontal que resista la fuerza de empuje de hasta 6 toneladas.
- Utilizar un calentador plano para disminuir la resistencia mecánica del estaño al estampado.
- Diseñar un sistema de empuje que permita realizar el estampado con una velocidad de avance dentro de un rango de 1 a 2 mm por segundo.

En base a estas condiciones de diseño y otros parámetros geométricos se diseñó y construyó una maquina para laminar estaño y para estampar las laminas según la matriz ó molde principal.

4.1 DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS DE LA MAQUINA

La maquina cuenta con un marco principal que se muestra en la figura 92, este marco esta hecho a partir de viga IPE 240 de acero A36, soldado en sus extremos con soldadura MIG 70-S6.

Figura 92. Marco vertical



Todo este marco se encuentra atornillado a una base metálica hecha a partir de lámina 3/16" A36 con dobleces de 5 cm. Cada base sostiene una de las patas del marco, y el marco posee un flanche en cada extremo por donde

pasan cuatro tornillos M14, los cuales permiten la sujeción de la pata del marco a la base, como se observa en la figura 93

Figura 93. Detalle del anclaje del marco vertical



Sobre esta base también se localiza la mesa soporte del reductor y el motor la cual es de forma trapezoidal, como se observa en la figura 94. Esta mesa esta hecha a partir de lamina 3/16" y también posee dobleces laterales de 5 cm. Cuenta también con una extensión adicional para el motor hecha de la misma lámina.

Figura 94. Mesa del motor-reductor y detalle del anclaje



La base de la mesa soporte esta soldada a un flanche de lámina 3/16" con Soldadura MIG 70-S6 y esta unida a la base por medio de tornillos de 1/2".

Este marco también, posee dos extensiones horizontales en la parte inferior hechos a partir de viga C de 4 pulgadas, las cuales funcionan como base para sostener los rodillos auxiliares los cuales reposan sobre rodamientos de bolas p207, mientras que el rodillo de soporte se encuentra sobre el marco principal sobre bujes de bronce dentro de chumaceras de acero como se aprecia en la figura 95. Estos rodillos se encuentran alineados horizontalmente para garantizar que el movimiento de la portamatriz sobre estos sea suave y uniforme.

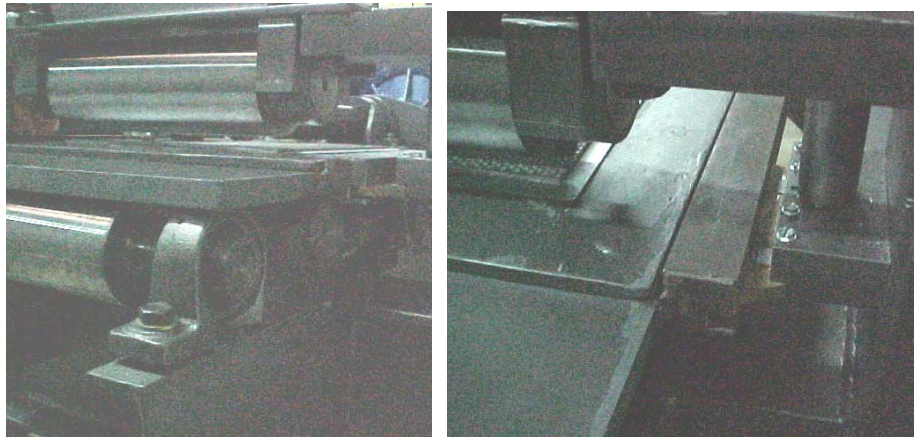
Figura 95. Rodillo de soporte y auxiliares



En la figura 95, también se aprecian las guías de bronce, las cuales tienen la función de permitir movimiento horizontal a la portamatriz brindándole además restricciones laterales. Estas guías se encuentran atornilladas a los topes inferiores de las guías verticales.

Sobre estos rodillos y guías desliza libremente la portamatriz como ya se mencionó anteriormente, todo esto se aprecia en la figura 96, la portamatriz esta hecha a partir de una placa de $\frac{3}{4}$ " de espesor y 45cm*77cm, la cual posee un espacio hueco en su zona central para albergar la matriz y dos perfiles cuadrados ranurados en sus costados por donde deslizan las guías de bronce.

Figura 96. Disposición de la portamatriz y detalle de la guía de bronce



Sobre la portamatriz también se encuentra atornillada con tornillos M14, la tuerca de potencia la cual posee una base plana de lamina A36 de $\frac{1}{4}$ " de espesor y pie de amigos en su zona posterior. Estos detalles se aprecian en la figura 97

Figura 97. Portamatriz y tuerca de potencia



La estructura de la maquina también cuenta con un marco horizontal Trapezoidal, hecho de 2 extensiones de perfil U de 4" de 77.7 cm de largo con soportes de lamina de 3/8", y con un apoyo en la parte angosta de 20cm*15cm, hecho a partir de placa de 5/8" con pie de amigos de 5/8" soldado sobre el perfil en U, el cual posee correderas en sus flanches de apoyo, sobre las que pasan tornillos de 1/2" permitiendo de esta forma la fijación de este pórtico al marco principal como se observa en la figura 98. La función de este pórtico radica en la necesidad de absorber la fuerza de reacción sobre el tornillo de potencia al ejercerse la fuerza de empuje para realizar el laminado y el estampado del estaño. Las uniones en el marco son por medio de soldadura MIG 70-S6.

Figura 98. Disposición del marco horizontal



Sobre este pórtico se encuentra un rodamiento axial de referencia 51207, el cual absorbe la carga axial del tornillo de potencia, este rodamiento axial esta dentro de una chumacera hecha según recomendaciones del manual de rodamientos de FAG. Y es la chumacera la que a su vez se encuentra

atornillada al marco horizontal por medio de tornillos M7 rosca ordinaria. Cabe destacar que la chumacera es hueca debido a la necesidad de que el tornillo de potencia tenga comunicación con el acople, lo cual se vera mas adelante. En la figura se puede observar que una de las pistas del rodamiento se encuentra ajustada a la chumacera, mientras el resto del rodamiento es móvil y se coloca encima del tornillo de potencia, esto se observa en la figura 99.

Figura 99. Rodamiento axial



Como ya se mencionó anteriormente, la función del tornillo de potencia es la de entregar la fuerza necesaria a la portamatriz para que se desarrolle la laminación y el estampado, es por esto que la maquina cuenta con un motor siemens de 1 caballo de potencia a 1800 revoluciones por minuto y un reductor sin fin corona de marca leroy-somer de relación 60-1 con capacidad de torque máximo de 42 kg*m, los cuales poseen poleas de 2"y 6" respectivamente unidos por medio de una correa, esta con el fin de poseer una unión sencilla y segura ante sobrecargas que pudiesen afectar al reductor

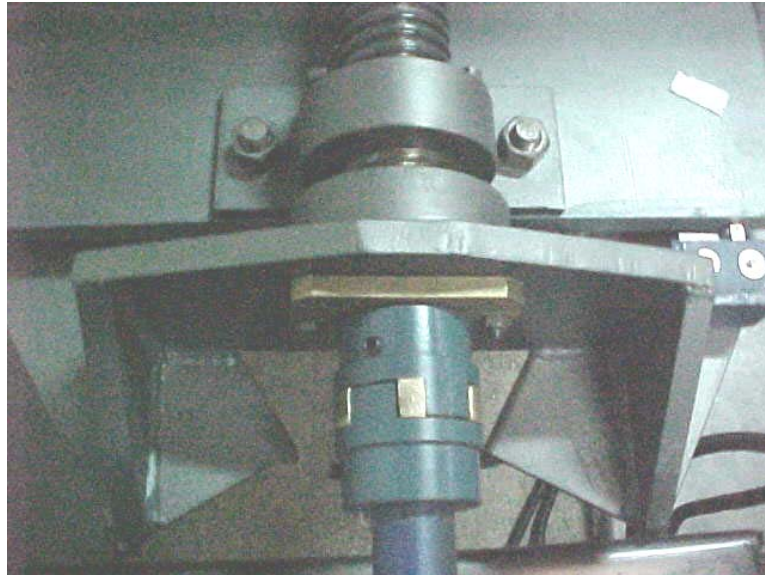
o al motor. El reductor se encuentra unido al tornillo de potencia por medio de un acople tipo estrella. El cual posee una estrella de bronce en vez de una estrella de caucho como normalmente se consiguen en el mercado, esto se debe a que debido al alto torque presente durante el laminado y el estampado la estrella de caucho se deformaba y producía un efecto de cuña que tendía a separar el reductor del tornillo de potencia, lo cual generaba cargas flectoras perjudiciales para el tornillo y sobre todo para el reductor, con el agravante adicional de que la estrella de caucho se dañaba al final de cada proceso de laminado y estampado. Este conjunto se aprecia en la figura 100.

Figura 100. Conjunto del motor, reductor y tornillo de potencia



Durante el avance, el tornillo de potencia se apoya sobre el rodamiento axial, pero al momento del retorno el tornillo se apoya por medio de una ranura interna sobre un buje axial de bronce, el cual se seleccionó debido a que durante el retorno de la portamatriz, la carga es mucho menor en comparación a la del avance. Como se ve en la figura 101.

Figura 101. Detalle del buje axial de bronce y la estrella de bronce del acople



Otra parte importante de la máquina es el conjunto de laminación, el cual consta de un rodillo, chumaceras compuestas con bujes de bronce, viga de soporte, apoyos de los bujes verticales, guías verticales, topes para las guías y el gato hidráulico.

El rodillo de laminación, está hecho a partir de acero 1045 (Hot rolled); este no es cilíndrico, pues los rodillos de laminación requieren una leve curvatura o barriga para contrarrestar los efectos de la deflexión debido a la carga requerida para la laminación y el estampado. Posee una diferencia de 0.1mm entre el radio central y el radio de los extremos. Esta curvatura se logró por medio de un torno CNC. Este rodillo se encuentra apoyado en dos chumaceras compuestas, las cuales poseen bujes de bronce y al mismo tiempo estas chumaceras se encuentran atornilladas a la viga de soporte, por medio de tornillos M18 de rosca fina, como se observa en la figura 102.

Figura 102. Rodillo laminador sobre la matriz



La viga de soporte es del mismo material y dimensiones del marco vertical; esta mide 45cm y está atornillada en sus extremos a los apoyos de los bujes verticales con tuercas de seguridad en la parte superior. Estos bujes se encuentran dentro de tubos metálicos los cuales a su vez están soldados a los apoyos, y la función de estos tubos es dar rigidez al buje. En la figura 103, se observa el detalle de la disposición del buje dentro del tubo metálico.

Figura 103. Detalle de las guías verticales y el buje



Sobre la viga de soporte se encuentra el gato hidráulico encargado de entregar la fuerza de laminación y estampe; este posee una capacidad de 30Ton de fuerza y tiene instalado un manómetro con una carátula de 0-10000psi, para tener una referencia de la fuerza ejercida durante la operación. Como se ve en la figura 104.

Figura 104. Gato hidráulico con manómetro.



Este conjunto de laminación desliza sobre las guías verticales, con el fin de permitir el cambio de las láminas, el cambio de la placa de laminación por la matriz, y también con la finalidad de acercar el rodillo de laminación a las láminas de estaño, así como también, para efectos de mantenimiento y lubricación del rodillo. Es por esto, que se necesita un sistema de elevación y descenso del conjunto de laminación, por lo cual se cuenta con un sistema de poleas y guaya las cuales funcionan como un malacate permitiendo que este suba o baje a voluntad. El sistema de malacate está compuesto de un reductor sinfín-corona con manivela el cual tiene un pequeño tambor sobre el cual se arrolla la guaya. Este reductor tiene una relación de 40:1 y una capacidad de torque de 55lb*plg. Esta guaya sube pasando por dos poleas de aluminio con soportes de acero las cuales están atornilladas al marco vertical. Después de pasar por la segunda polea, la guaya baja hasta encontrar dos poleas de

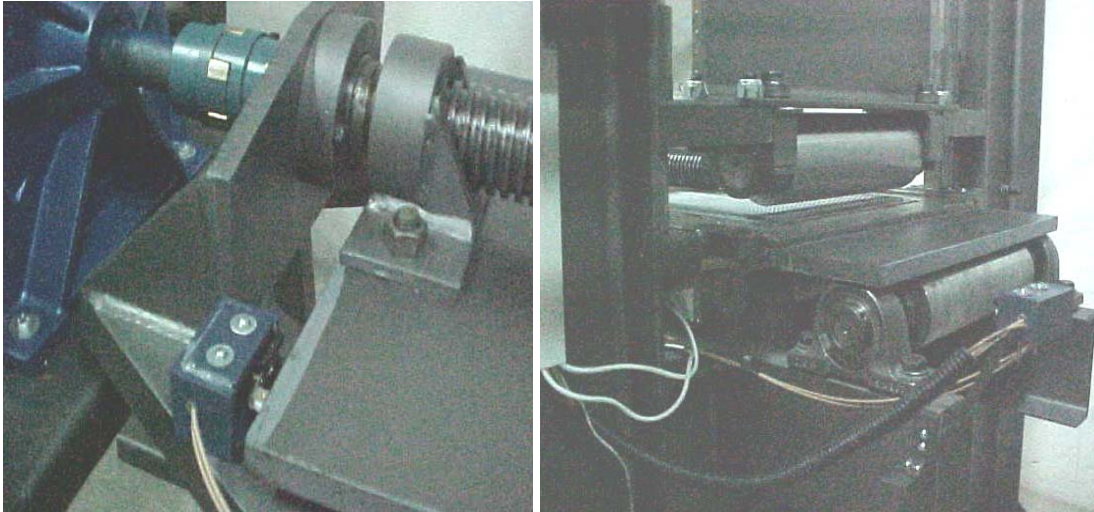
aluminio con soporte de acero atornilladas simétricamente sobre la viga de soporte, para que la fuerza necesaria para levantar el conjunto de laminación sea uniforme. Así mismo, el marco principal posee dos poleas de teflón en su parte superior con el fin de obtener ventaja mecánica, y evitar que la guaya interfiera con la fuerza ejercida por el gato hidráulico. En un extremo de la guaya esta posee un gancho que le permite apoyarse fijamente al marco de la estructura. Esto se aprecia en la figura 105.

Figura 105. Sistema de Elevación



Además, de las partes mencionadas anteriormente, la máquina posee un sistema de control del movimiento de la portamatriz por medio de finales de carrera, colocados estratégicamente al inicio y al final del desplazamiento de la portamatriz, los cuales son normalmente cerrados. Estos se observan en la figura 106. El control del avance de la portamatriz consta de un inversor de giro que permite al motor cambiar su dirección para efectos de avanzar o retroceder la portamatriz. Por esto se tiene un circuito de control conformado por el inversor de giro, un contactor y los finales de carrera. Este control se encuentra en una caja localizada en la parte posterior de la máquina

Figura 106. Finales de carrera



En la caja de control también se encuentra el control de temperatura conformado por un pirómetro, contactor y termocupla. La caja de control también cuenta con fusibles para evitar daños por corriente, y el calentador posee un interruptor para apagarlo después del proceso. El pirómetro permite mantener la temperatura del estaño, a un valor previamente determinado. En la figura 107 se aprecia la caja de control.

Figura 107. Caja de control



El calentador está compuesto de ocho resistencias en paralelo, cada una de 250W a 110V. Estas se encuentran apoyadas sobre una lámina de 1/8" y con un recubrimiento exterior de asbesto. Además, con un orificio en el centro por donde pasa la termocupla. Los apoyos del calentador están formados con platina de 1/8" dobladas y reposando en sus extremos sobre dos placas circulares las cuales poseen imanes que le permiten al calentador localizarse fácilmente sobre la lámina de estaño durante el estampado, y retirarse durante el laminado de la misma. Este calentador se aprecia en la figura 108.

Figura 108. Calentador



La vista frontal de la máquina aprecia en la figura 109 y la posterior en la figura 110.

Figura 109. Vista frontal de la máquina

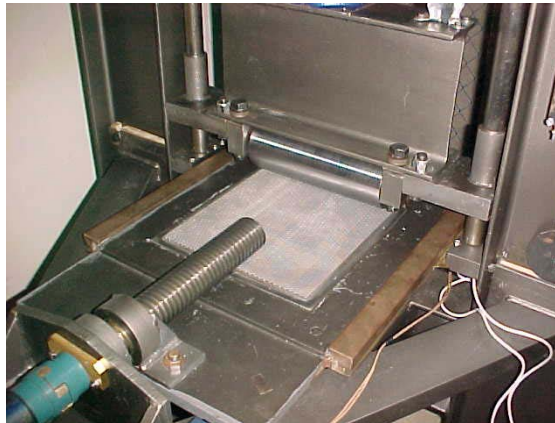


Figura 110. Vista posterior de la máquina



4.2 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LOS RODILLOS

El proceso de fabricación de los rodillos comienza con la obtención de las láminas de estaño al fundirlas sobre los moldes mencionados anteriormente. Para la obtención de estas, es muy importante controlar el proceso de fundición y tener en cuenta varios aspectos importantes para contar con una lamina de buena calidad. Entre estos aspectos encontramos que es necesario eliminar al máximo la escoria presente en la colada para evitar rupturas sobre la lamina durante la laminación y el estampado, contar con un vertimiento suave sobre la coquilla metálica para evitar las burbujas y herviduras en el producto, así como también es importante enfriar lentamente la coquilla después de la colada, ya que esto permitirá que la solidificación de la lamina sea lo mas uniforme posible, y no se generen zonas de cristalización rápida.

El paso siguiente es la laminación, por lo cual la lamina de estaño previamente obtenida por fundición se coloca en la maquina sobre una superficie plana contenida dentro de la portamatriz como se observa en la figura 111.

Figura 111. Proceso de laminación del estaño



Después de colocada la lámina sobre la superficie plana, se verifica que la portamatriz se encuentre en su posición de inicio, lo que implica que esta esté pulsando el primer final de carrera.

El siguiente paso es descender el conjunto de laminación hasta que el rodillo laminador haga contacto con la lámina de estaño. Después de esto se desenrosca el vástago del gato hidráulico hasta hacer contacto con la viga superior del marco vertical, posteriormente se cierra la válvula del gato y se coloca el deformímetro en cero, el cual se adhiere magnéticamente a la columna del marco principal, y el embolo de desplazamiento en contacto con la viga principal del conjunto de laminación como se muestra en la figura 112.

Figura 112. Disposición del deformímetro para la laminación y estampado.



Después de disponer lo necesario par comenzar la laminación, se opera el gato con el fin de proveer un espesor determinado a la lámina. Es importante aclarar que al inicio se cuenta con una lámina de 3-4 mm de espesor, la cual se va adelgazando progresivamente con varas pasadas de laminación las cuales oscilan entre 0.3-0.4 mm, hasta que la lamina alcance el espesor de 2 mm. Durante cada pasada, la presión oscila entre 3000-3500 psi y la fuerza entre 9 y 12 toneladas.

Es importante notar que por cada pasada es necesario elevar el conjunto de laminación para regresar la portamatriz a la posición inicial y luego disponer nuevamente el deformímetro en cero cuando se obtenga el contacto entre el rodillo y la lamina, ya que la maquina fue diseñada para ser de simple efecto, es decir que solo lamina y estampa en un sentido, pues esta no posee un rodamiento axial de doble efecto el cual es muy costoso y requiere de un montaje especial.

Después de alcanzado el espesor de 2 mm en la lámina de estaño se cambia la placa plana por la matriz de estampado, para lo cual es necesario elevar nuevamente el conjunto de laminación. Con esta nueva disposición se prosigue a estampar la forma de la matriz sobre el estaño, lo cual se logra al descender nuevamente el conjunto de laminación hasta hacer contacto con la lámina, y se da reset al deformímetro para que este se ubique en cero. Por experiencias obtenidas durante el estampado de láminas se observó que este proceso a diferencia de la laminación no puede efectuarse en varios pasos, ya que los alvéolos se superponen unos sobre otros dañándose completamente el trabajo. Todo esto obliga a que el proceso de estampado se realice a una profundidad un poco mayor de 1,6mm que es la altura máxima del alveolo, pues la experiencia mostró que por fenómenos de expansión de la lamina y elasticidad de los materiales es necesario suministrar un poco mas de

profundidad que la requerida por el alveolo, pues los primeros alvéolos se obtuvieron con el déficit de unas décimas de profundidad.

La disposición de la lámina para el proceso de estampado se observa en la figura 113, donde se aprecia también la matriz y el rodillo.

Figura 113. Proceso de estampado



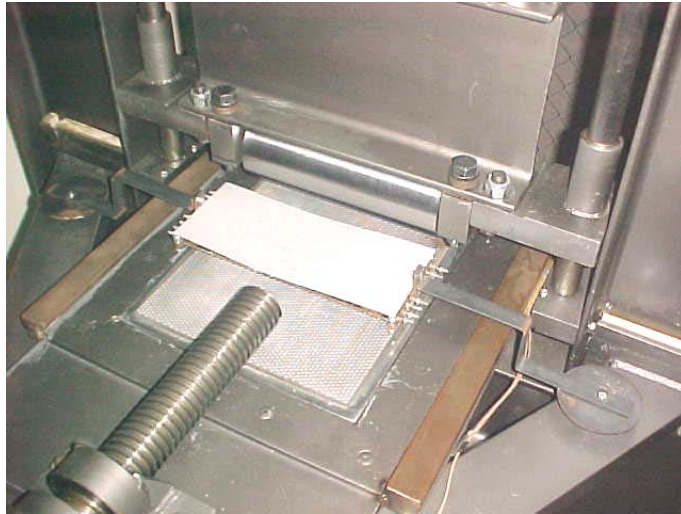
Para efectuar el estampado se calienta la lámina utilizando el calentador anteriormente mencionado, pues la resistencia al estampado es bastante considerable al requerirse una profundidad de 1,6mm lo que conlleva a colocar la termocupla en la zona media de la lámina de estaño y disponer el pirómetro a una temperatura de 90-100°C. Esto con el fin de controlar el calentamiento del estaño ya que este posee un punto de fusión de tan solo 230°C.

El calentador posee la ventaja de ser móvil lo que facilita que este se remueva durante la laminación y se coloque durante el estampado, esta movilidad se logra gracias a que el calentador cuenta con dos imanes en sus extremos.

El calentador posee un agujero en su zona media por donde se hace pasar la termocupla que posteriormente hará contacto con la lamina de estaño.

La disposición del calentador sobre la matriz se aprecia en la figura 114.

Figura 114. Ubicación del calentador durante el estampado



Después de obtenida la lamina estampada, esta se corta en zig-zag por sus extremos según la disposición alveolar, y posteriormente se arrolla sobre el eje de acero que le servirá de base obteniéndose la camisa o vamis grabadora del rodillo estampador de cera de abeja, esto se logra gracias a que la camisa de estaño queda con muy buena maleabilidad, como se observa en la figura 115.

Figura 115. Camisa de estaño arrollada con corte en zigzag



El eje de acero es hueco ya que está hecho a partir de tubo de perforación, tapas laterales y un eje interno de apoyo para los engranajes y los bujes. Todo esto con el fin de disminuir el peso de los rodillos en relación al peso de los rodillos comerciales los cuales están hechos de un núcleo macizo de acero. En la figura 116 se observa el eje de acero y un detalle del mismo.

Figura 116. Eje de acero base.



El paso siguiente consiste en depositar el adhesivo sobre el eje de acero con el fin de generar adherencia entre la camisa de estaño y el mismo. Para este fin se seleccionó el adhesivo sikaflex 221 de sika, el cual fue seleccionado para esta aplicación, y se depositó en forma de líneas intermitentes de 3-4 cm. de longitud a lo largo del eje pues esta es la forma recomendada para un óptimo desempeño, ya que de esta forma se obtienen pequeños espacios de aire entre cada línea que permiten obtener un buen curado y por ende una buena adhesión.

Lo anteriormente mencionado se aprecia en la figura 117, donde se observa que se utilizó color blanco para el adhesivo pues este ofrece mejor presentación

Figura 117. Deposito de adhesivo sobre el eje de acero.



Después de depositado el adhesivo se coloca la camisa de estaño sobre el eje y se verifica que el empalme sea correcto en sus extremos, y posteriormente se envuelve el conjunto en cinta pegante transparente con el fin de mejorar la unión entre los dos objetos, evitando así un posible desempalme y por ende una mala adhesión. Estos pasos se aprecian en la figura 118

Figura 118. Camisa de estaño adherida al eje de acero



Para alcanzar un buen curado es necesario esperar un día, y luego es posible remover la cinta de la camisa de estaño

De esta manera se fabrican los rodillos estampadores de cera de abeja, los cuales están listos para ser colocados en el bastidor y de esta manera lograr el estampado de la cera, como se observa en la figura 119.

Figura 119. Rodillos fabricados durante el proceso



4.3 ESTAMPADO DE LA CERA

Después de contar con los rodillos estampadores es posible dar paso a la última etapa del proceso la cual consiste en estampar cera de abeja. Para este propósito los rodillos obtenidos se instalan en el bastidor y se calibran entre si. Estos están unidos por medio de engranajes idénticos permitiendo obviamente una sincronización en el movimiento. Ver figura120.

Figura 120. Estampadora de cera de abeja



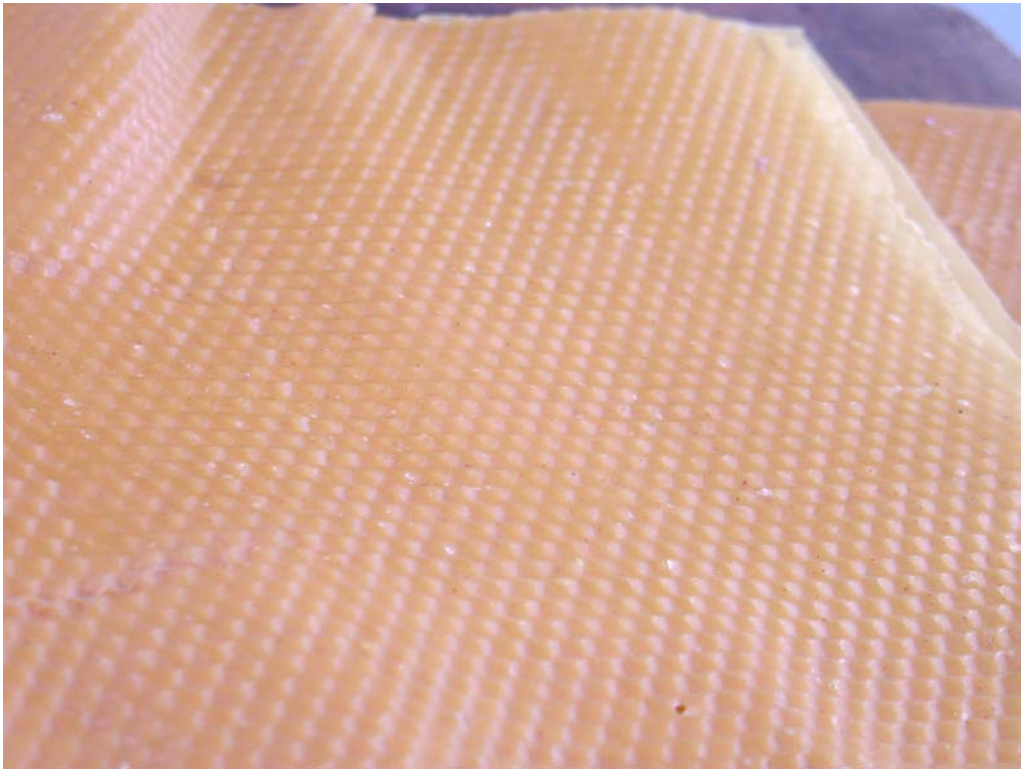
El segundo paso consiste en obtener láminas de cera con las dimensiones recomendadas, en este caso 25cm*40cm. En la figura 121 se aprecian las dimensiones de la cera laminada y el instante en que va a ser estampada al hacerla pasar por los rodillos.

Después de pasar la lámina de cera por los rodillos estampadores, esta adquiere el grabado necesario para la fundación de la colmena, y los pasos siguientes hacen parte de las tareas del apicultor en lo concerniente al armado de los cuadros móviles, las alzas y las colmenas.

Figura 121. Cera laminada y lista para ser estampada



Figura 122. Cera estampada.



5. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA MAQUINA

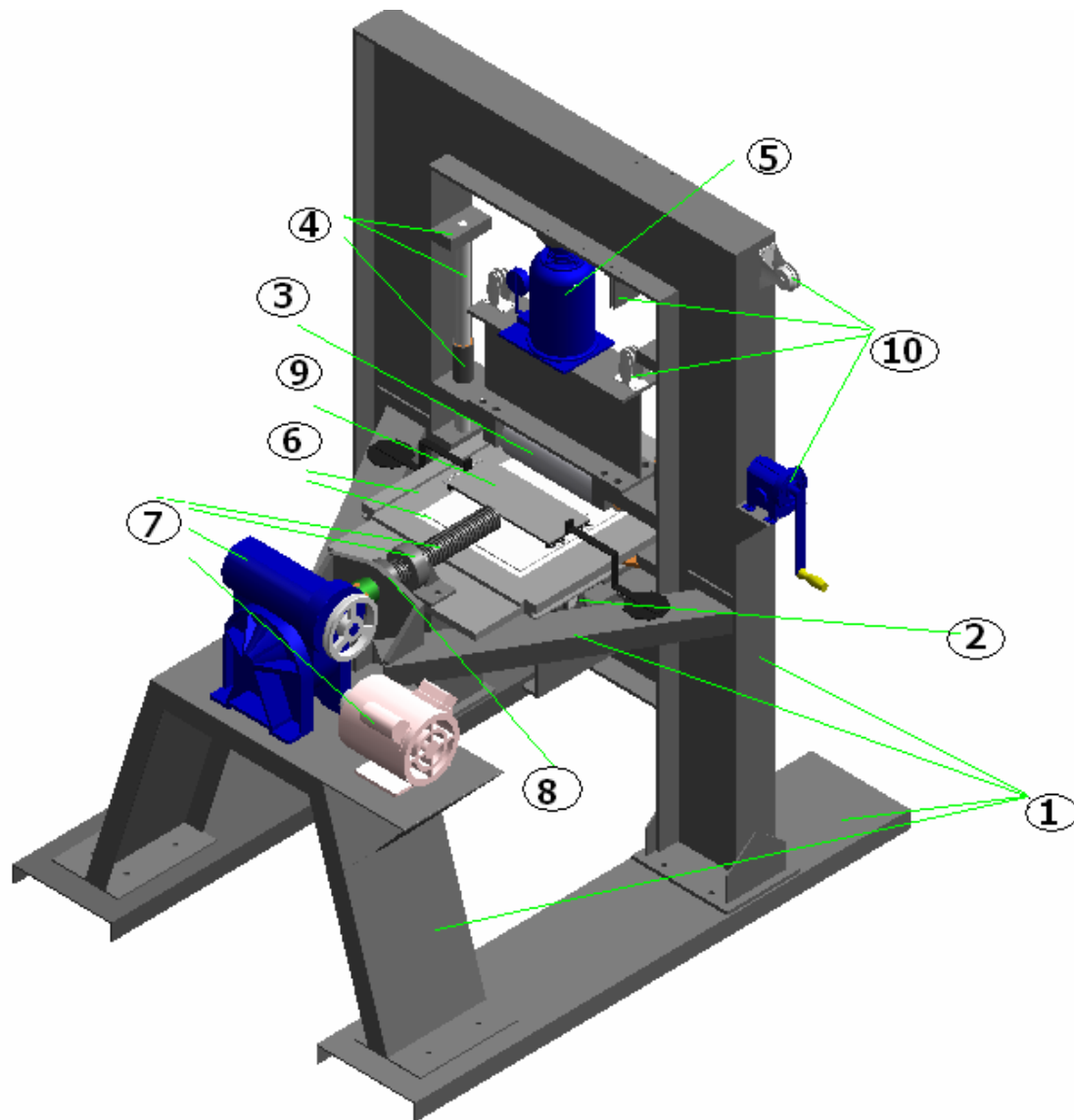
Con base en los resultados y conclusiones obtenidos durante la investigación, se hizo necesario diseñar la máquina para que cumpliera como laminadora y estampadora. Esto es debido principalmente a la infructuosa búsqueda de trenes laminadores en la ciudad, ya que en la mayoría de talleres y fábricas solo se cuenta con rodillos o cilindradoras.

Los componentes principales de la máquina son los siguientes:

1. Estructura
2. Rodillos de soporte
3. Rodillo laminador
4. Sistema de guías
5. Actuador hidráulico (Gato)
6. Sistema motriz (matriz -portamatriz)
7. Sistema de empuje (motor - reductor - tornillo de potencia)
8. Rodamiento axial
9. Sistema de calentamiento
10. Sistema de elevación

Es importante notar que cada componente puede constar de varias partes, como es el caso del sistema de elevación o el sistema de empuje. En la figura 135 se observa un esquema general de la máquina, donde se aprecia la mayoría de elementos de la máquina, sin considerar los elementos eléctricos. Aunque hay otros elementos que no se observan a simple vista y se mostrarán después, como es el caso de los rodillos de soporte.

Figura 123. Esquema general de la maquina

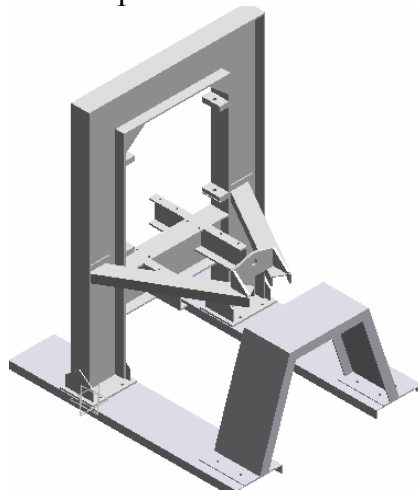


5.1 ESTRUCTURA

El diseño de la estructura debe satisfacer la necesidad de sostener una carga de estampa vertical y una de empuje horizontal. Para este fin la estructura se diseñó basada en el principio de fuerzas internas, con el fin de que no fuese obligatorio usar anclajes. La estructura cuenta con un pórtico vertical, el cual

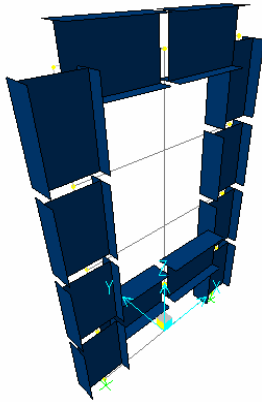
esta diseñado para soportar 25 toneladas, con lo cual se cubren las necesidades para soportar la fuerza de estampa. La estructura también cuenta con un pórtico horizontal, el cual esta diseñado para soportar 6 toneladas, debidas a la fuerza de empuje ya que sobre este pórtico se apoya el tornillo de potencia con el fin de que el reductor no reciba cargas axiales, ya que este solo cuenta con rodamientos radiales. Además de estos elementos la estructura esta compuesta de dos bases, una para el pórtico principal, y una base para el sistema motor - reductor. Estas bases solo están hechas para soportar el peso de los elementos principales y en ningún momento están soportando cargas elevadas de torque o tracción. Otros elementos de la estructura son las extensiones horizontales donde se ubican los rodillos auxiliares, y solo soportan una pequeña carga en la parte posterior. Debido al rodillo auxiliar derecho. La estructura fue construida en su totalidad en acero A36 y para el anclaje de sus diferentes partes se usaron tornillos M14 para el pórtico vertical y de ½" para el pórtico horizontal y la mesa del sistema de empuje. Para el diseño de los elementos estructurales se utilizaron herramientas informáticas en su totalidad, debido a la facilidad de las mismas y a la asertividad de los resultados obtenidos.

Figura 124. Estructura de la maquina



Para el diseño del pórtico vertical se contó con un programa especial para estructuras. Para este pórtico se seleccionó un perfil en I de 24 cm. de alto por 12 cm. de ancho, de acero A36, en la figura 125 se aprecia la disposición de este perfil y la separación entre nodos.

Figura 125. Análisis nodal del pórtico vertical



El comportamiento elástico del pórtico, se observa en la figura 126. El punto que presentó mayor deformación elástica según el software, esta localizado en la zona media de la viga superior, y el desplazamiento en este punto corresponde a 1.04 mm.

Figura 126. Comportamiento elástico del pórtico vertical

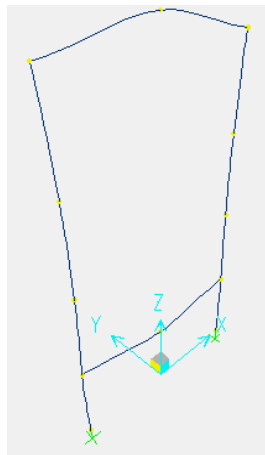
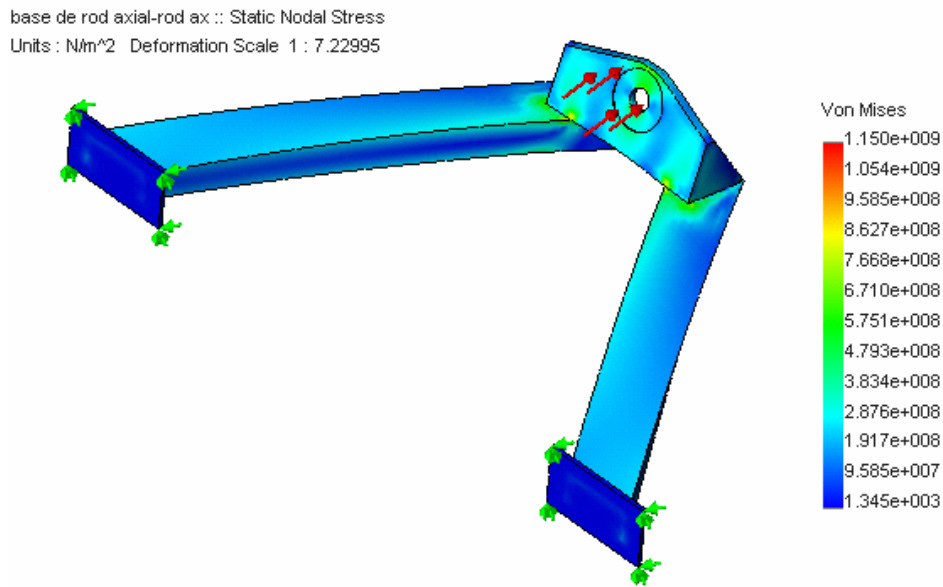


Figura 128. Análisis del pórtico horizontal por elementos finitos



5.2 RODILLO DE LAMINACIÓN

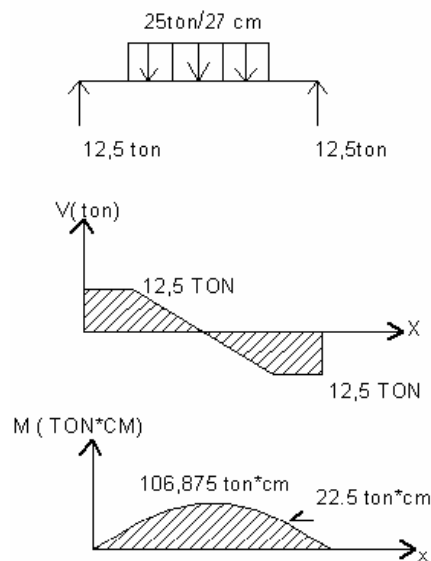
Figura 129. Rodillo de laminación



La función de este rodillo es la de ejercer la fuerza necesaria para desarrollar el laminado y el estampado del estaño, por lo cual es muy importante diseñarlo tanto a rigidez como a resistencia, ya que el éxito de las laminas obtenidas dependerá en gran manera del desempeño de este rodillo ante la acción de la fuerza. El procedimiento de diseño se hará según Mott⁹

⁹ MOTT, Robert. Diseño de elementos de maquinas. Segunda edición. México: Prentice hall, 1992. P 282-307.

Figura 130. Diagramas de cortante y momento del rodillo laminador



Este rodillo gira a una Velocidad de 0.33 revoluciones por minuto, pero es recomendable calcularlo a fatiga a causa de la importancia que representa y las altas cargas que soporta.

Se tiene que:

$$D = \left[(32 * N) / \pi * \sqrt{[Kt * M / Sn']^2 + 3/4 * [T / Sy]^2} \right]^{1/3}$$

Para el acero 1045 tenemos que $S_y = 42 \text{ Ksi}$ ó 290 MPA ; $S_u = 72 \text{ Ksi}$ ó 496 MPA , el porcentaje de elongación es de 18 %.

S_n = tensión por durabilidad. Según la grafica 5-9 es 28 ksi.

Tomando un valor de C_s de 0.9, $C_r = 0.9$.

Entonces tenemos que S_n' es 23 ksi = 1617.05 kg/cm²

Como no existe carga torsional sobre este eje el torque T es cero. Debido a esto no se hace cálculo del ζ_{adm} .

- $K_t = 1.5$ por chaflán redondeado (factor de concentración de esfuerzos)

- $N = 2$ (factor de diseño) para trabajo suave
- $C_r = 0.9$ (factor de confiabilidad)
- $C_s = 0.9$ (factor de tamaño)

Al reemplazar en la formula encontramos que el diámetro recomendado es de 7.5 cm, y se escogió 8,5 cm, ya que es necesario un hombro para colocar el cojinete de deslizamiento.

Ahora calculamos el diámetro en el centro ya que aquí se presenta el máximo momento. Como en el centro no existen puntos críticos debidos a concentradores de esfuerzos, el diámetro necesario puede ser calculado a partir del esfuerzo admisible.

$$\sigma = M \cdot C / I ; C = D / 2 ; I = \pi \cdot D^4 / 64$$

Como el $\sigma_{adm} = 38 \text{ Kg/mm}^2$, entonces al reemplazar obtenemos un diámetro $D = 66 \text{ mm}$ Pero escogemos en este punto un diámetro de 104mm mm en la parte que sostiene carga por razones de rigidez y no de resistencia, ya que después de algunas pruebas se concluyó que el rodillo laminador debía ser de un diámetro superior a los diez centímetros y con una curvatura que le permitiera contrarrestar los efectos de la flexión. Por otro lado el diámetro del cojinete sigue siendo 59 mm, como en el rodillo de soporte, con el fin de facilitar el mecanizado de los bujes.

Como ya se vio anteriormente, existe la necesidad de que este rodillo posea una curvatura, pues el más rígido de los rodillos termina por deflectarse ante la acción de una carga, pues inicialmente se hicieron pruebas de laminado y

estampado con rodillos planos, obteniéndose laminas que no poseían uniformidad de espesor.

Para el cálculo de la flecha del rodillo laminador se utiliza la ecuación de A. I. TSELIKOV¹⁰, la cual suma los efectos de la flexión y el cortante.

Por efecto de la flexión tenemos que:

$$f_1 = \frac{P \cdot (12 \cdot a \cdot b^2 - 7 \cdot b^3)}{18,8 \cdot E \cdot D^4}$$

Donde f_1 : flecha debida a la flexión.

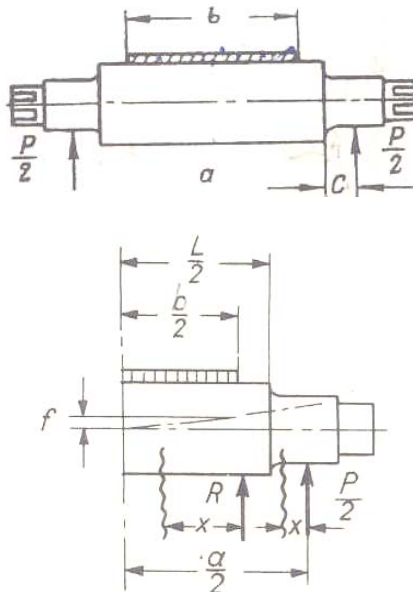
D: diámetro nominal del rodillo.

E: modulo de elasticidad.

a: distancia entre cargas

b: longitud de la tabla del rodillo que soporta la carga

Figura 131. Esquema para la determinación de la flecha de un cilindro



Fuente: TSELIKOV, A, y SMIRNOV, V. Trenes de laminación. Bilbao: Ediciones urmo, 1970. P.74.

¹⁰ TSELIKOV, A, y SMIRNOV, V. Trenes de laminación. Bilbao: Ediciones urmo, 1970. P.71-74.

$$f_1 = 25000 \text{ kg} \cdot (12 \cdot 32.8 \text{ cm} \cdot (28 \text{ cm})^2 - 7 \cdot (28)^3) / 18.8 \cdot 2109000 \text{ kg/cm}^2 \cdot (10.3 \text{ cm})^2$$

$$f_1 = 0,09 \text{ mm}$$

Por efecto del cortante tenemos que:

$$f_2 = P \cdot b / (2 \cdot \pi \cdot G \cdot D^2)$$

Donde:

P: carga soportada por el rodillo

b: longitud de la tabla del rodillo que soporta la carga

G: modulo de rigidez = 32775641.18 kg/cm²

D: diámetro nominal del eje.

$$f_2 = 3.2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$

$$f = f_1 + f_2 = 0,09 \text{ mm}$$

Por lo cual se decidió usar una flecha de 0.1 mm en el rodillo laminador lo cual genera un radio de curvatura de 102 m en el mismo.

5.3 RODILLO DE PRUEBAS

Figura 132. Rodillo de pruebas



Este rodillo es importante ya que sobre este se hicieron las pruebas de estañado en caliente, con el fin de determinar la fuerza de estampa, y además

sirve como prototipo para obtener los rodillos para estampar cera de abeja, con el estaño depositado sobre este antes del grabado.

Debido a la necesidad de calentar el estaño, con el fin de disminuir su resistencia mecánica, es necesario instalar un calentador sobre este.

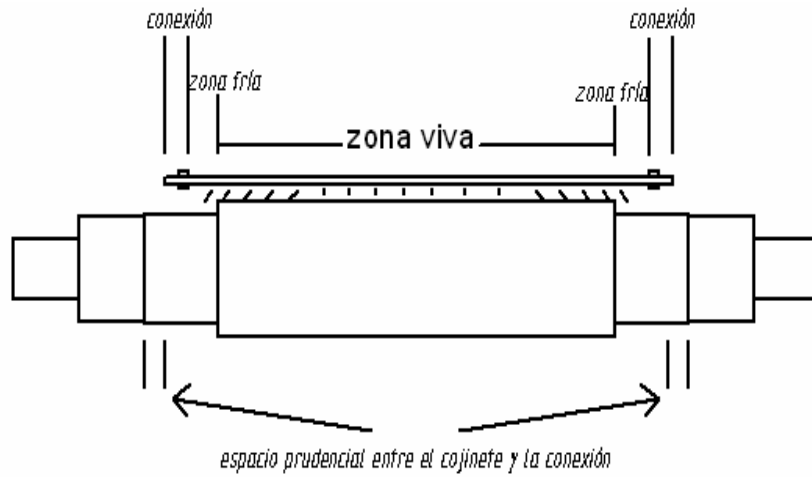
El método seleccionado para calentar el estaño, es el de un reflector, el cual esta formado por 8 resistencias colocadas en una disposición diametral sobre el rodillo, al calentarse estas resistencias, generan la radiación suficiente para calentar el rodillo a unos 120°C.

Vale la pena notar que las resistencias poseen una zona muerta necesaria para el calentamiento. Esta zona se encuentra en los extremos y mide unos dos centímetros. Debido a que la zona que se necesita calentar mide 27 cm., la resistencia mide entonces 31 cm., y además de esto se utilizan 2 cm más en cada extremo donde van colocados el tornillo y la tuerca de cada resistencia, lo que permite fijarla al alambre eléctrico.

Aunque la zona a estampar ó tabla es de tan solo 27 cm, debido a la necesidad de utilizar el calentador es necesario que el espacio entre cojinetes sea de 37cm. además de las dimensiones anteriormente expuestas, el rodillo posee unas extensiones en los extremos, por si existe la necesidad de utilizar engranes para una futura aplicación que requiera una alta sincronización entre la matriz y el rodillo que necesite ser laminado.

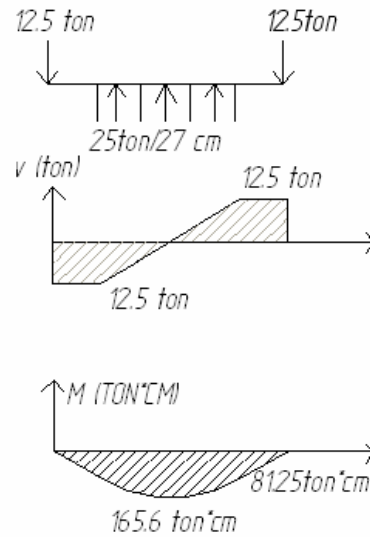
Pese a que este rodillo no hace parte del diseño principal de la máquina., es importante en la exploración de nuevas alternativas de estampado al desarrollar en un futuro las tecnologías apropiadas de adhesión.

Figura 133. Disposición del calentador sobre el rodillo de pruebas



En la figura 134 se aprecian los diagramas de cortante y momento.

Figura 134. Diagramas de cortante y momento del rodillo de pruebas



Los lugares críticos se encuentran en el hombro, y en el centro del rodillo pues es ahí donde está el máximo momento.

En el hombro tenemos que

$$\sigma = M \cdot C / I \quad \text{donde } M = 81.25 \text{ ton} \cdot \text{cm}$$

$$C = D/2 ; I = \pi * D^4 / 64$$

Como el $\sigma_{adm} = 38 \text{ Kg/mm}^2$

El diámetro mínimo es $D = 60.16 \text{ mm}$. Para este efecto dejamos el hombro de 62 mm.

En el centro tenemos que $M = 165.6 \text{ Ton*cm}$

Al reemplazar en la ecuación obtenemos un valor de $D = 76 \text{ mm}$.

Ante este valor seleccionamos un diámetro en la zona de carga de 77 mm, con el fin de que la capa de estaño quede de 4 mm de espesor y de esta forma el diámetro total del rodillo sea de 85 mm, el cual es el tamaño requerido.

5.4 RODILLOS DE SOPORTE

La parte inferior de la estructura soporta tres rodillos, dos de estos son huecos y el del centro es macizo. La función de estos rodillos es permitir el desplazamiento de la matriz con el mínimo aumento de fuerzas debidas a la fricción, el diámetro de los tres rodillos de soporte es de 85 mm. El rodillo central se encuentra soportado por bujes, pues se encuentra soportando casi toda la carga y los rodillos auxiliares se apoyan en rodamientos de bolas.

5.4.1 Rodillo de soporte principal. La función principal de este rodillo, es recibir casi toda la carga generada por la fuerza de estampa, con la mínima deflexión posible, ya que para efectos de calidad del estampado es muy importante que la matriz se encuentre sobre una superficie horizontal, ya que esto incide directamente en la flexión de la misma, en la que se necesita que todas las cavidades se encuentren a la misma altura respecto al rodillo laminador.

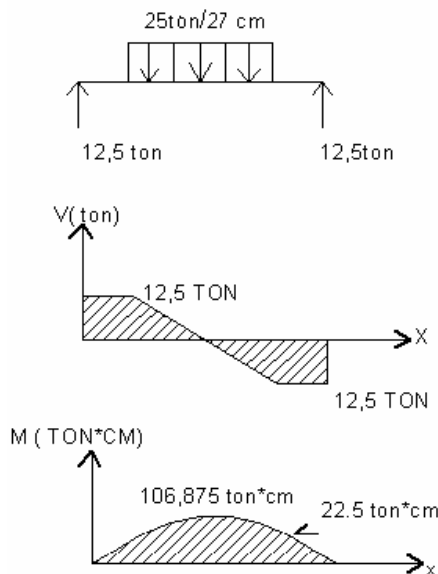
Figura 135. Rodillo de soporte principal



Este rodillo esta hecho de acero hot rolled 1045, el cual es recomendado para esta aplicación de carga. Este rodillo esta soportado por dos cojinetes de deslizamientos ó bujes de bronce, los cuales estan por ajuste unidos a una chumacera de acero A36, la cual esta firmemente unida a la estructura.

Este rodillo posee un mecanizado común pues su función no es exigente respecto a esto. La zona debida al buje ó muñón, posee un diámetro de 59mm y una longitud de 45mm. El estado de cargas de este elemento se aprecia en la siguiente figura

Figura 136. Diagrama de cortante y momento del rodillo de soporte principal



Este rodillo gira a una Velocidad de 0.33 revoluciones por minuto, pero es recomendable calcularlo a fatiga a causa de la importancia que representa y las altas cargas que soporta.

Del libro de Mott¹¹ tenemos que:

$$D = \left[(32 * N) / \pi * \sqrt{[Kt * M / Sn']^2 + 3/4 * [T / Sy]^2} \right]^{1/3}$$

Para el acero 1045 tenemos que $S_y = 42 \text{ Ksi}$ ó 290 MPA ; $S_u = 72 \text{ Ksi}$ ó 496 MPA , el porcentaje de elongación es de 18 %.

S_n = tensión por durabilidad. Según la grafica 5-9 es 28 ksi.

Tomando un valor de C_s de 0.9, $C_r = 0.9$.

Entonces tenemos que S_n^I es 23 ksi = 1617.05 kg/cm²

Como no existe carga torsional sobre este eje el torque T es cero. Debido a esto no se hace cálculo del ζ_{adm} .

- $K_t = 1.5$ por chaflán redondeado (factor de concentración de esfuerzos)
- $N = 2$ (factor de diseño) para trabajo suave
- $C_r = 0.9$ (factor de confiabilidad)
- $C_s = 0.9$ (factor de tamaño)

Al reemplazar en la formula encontramos que el diámetro recomendado es de 7.5 cm, y se escogió 7.9 cm, ya que es necesario un hombro para colocar el cojinete de deslizamiento.

Ahora calculamos el diámetro en el centro ya que aquí se presenta el máximo momento. Como en el centro no existen puntos críticos debidos a

¹¹ MOTT, Robert. Diseño de elementos de maquinas. Segunda edición. México: Prentice hall, 1992. P 282-307.

concentradores de esfuerzos, el diámetro necesario puede ser calculado a partir del esfuerzo admisible.

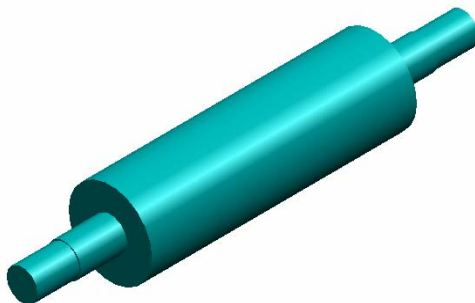
$$\sigma = M \cdot C / I$$

$$C = D/2 ; I = \pi \cdot D^4 / 64$$

Como el $\sigma_{adm} = 38 \text{ Kg/mm}^2$, entonces al reemplazar obtenemos un diámetro $D = 66 \text{ mm}$. Pero escogemos en este punto un diámetro de 85 mm en la parte que sostiene, con el fin de cumplir el principio de laminación, que exige que se usen dos rodillos de igual diámetro, para no generar curvatura en el material laminado. En nuestro caso la portamatiz. Por otro lado el diámetro del cojinete sigue siendo 59 mm , como en el rodillo laminador, con el fin de facilitar el mecanizado de los bujes.

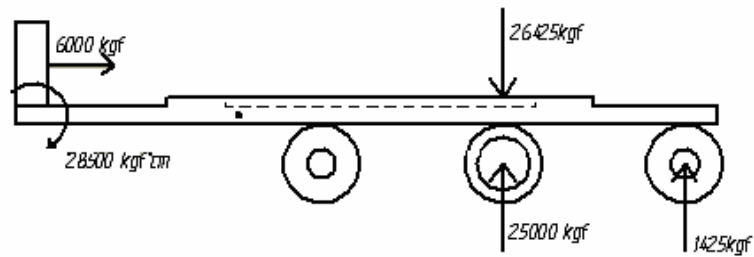
5.4.2 Rodillos auxiliares de soporte. Los rodillos auxiliares están hechos a partir de tubo de perforación, y con apoyos en acero 1045. De estos dos rodillos solo es importante diseñar el rodillo derecho, ya que es el que soportando una carga apreciable debida al momento generado por la fuerza que actúa sobre la tuerca. En la figura 137 se aprecia el rodillo.

Figura 137. Rodillo de soporte auxiliar



En el caso de los rodillos inferiores tenemos la siguiente disposición.

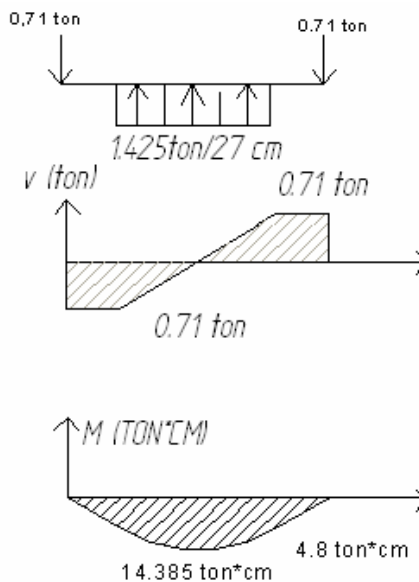
Figura 138. Disposición de carga sobre los rodillos de soporte



Como se observa en la figura 138, el rodillo inferior del centro es el que recibe casi toda la carga de estampado, y el rodillo de la derecha es el que responde al torque formado por la tuerca de empuje.

El rodillo auxiliar izquierdo se hace con las mismas dimensiones que el rodillo de la derecha, pese a que este rodillo solo funciona como descanso de la portamatriz, la razón por la que se tomaron estas medidas, es por simetría y estética. Los diagramas de carga se aprecian en la figura 139.

Figura 139. Diagramas de cortante y momento del eje de soporte auxiliar



Con los valores de fuerza y momento proseguimos a calcularlo.

El momento en hombro M es de $4.8 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{mm}$. Entonces calculamos el esfuerzo en el punto crítico

$$\sigma = M \cdot C / I$$

$$C = D/2 ; I = \pi \cdot D^4 / 64$$

Como el $\sigma_{adm} = 38 \text{ Kg/mm}^2$, entonces al reemplazar obtenemos un diámetro $D = 29.52 \text{ mm}$.

Como este eje va sobre un rodamiento seleccionamos un diámetro de eje de 34 mm en el punto crítico y 31.75 mm en la zona que descansa sobre el rodamiento, Ya que es el tamaño del rodamiento inmediatamente superior al tamaño crítico.

Ahora verificamos si el rodillo resiste en la parte central

$$\sigma = M \cdot C / I$$

$$C = D/2; I = \pi \cdot (D^4 - d^4) / 64$$

Para un valor de $D = 85 \text{ mm}$ y $d = 65 \text{ mm}$

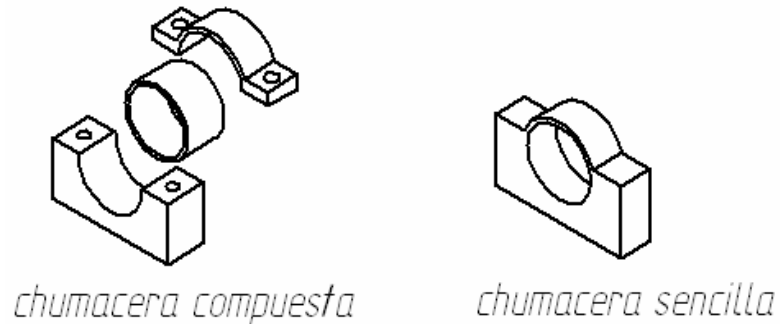
El esfuerzo obtenido es de $3.62 \text{ kgf/mm}^2 < \sigma_{adm} = 38 \text{ kg/mm}^2$

La razón de escoger el diámetro de 85 mm es por simetría y estética, pues como se aprecia en el calculo, este valor esta muy por encima del crítico.

5.5 DISEÑO DE LOS COJINETES DE DESLIZAMIENTO (BUJE)

El diámetro de los muñones de los ejes de laminación y de soporte principal es de 59 mm. Para este fin se asume una relación de $L / D = 0.5$, entonces la longitud del buje $L = 30 \text{ mm}$. El siguiente paso es calcular la presión sobre el cojinete.

Figura 140. Chumacera compuesta y chumacera sencilla



- La carga en cada cojinete es de 12500 Kg. Esto es 27557.8lbf
- El área es de 30mm * 59mm = 1.18plg * 2.32plg = 2.7432 plg²
- La presión es 27557.8lbf / 2.7432 plg² = 10045.61lbf/plg²
- La velocidad del muñón es: $V = \pi * D * n / 12$

Como es un proceso de estampado-laminado, se efectúa a muy baja velocidad y el tiempo total de estampado es de 3min; además el eje da una sola vuelta durante el recorrido lo que implica que $n = 0.33\text{rpm}$.

$$V = \pi * 2.3228\text{plg} * 0.33\text{rpm} / 12 = 0.2\text{pie}/\text{min}.$$

$$\text{El factor } P * V = 10045.61\text{lb}/\text{plg}^2 * 0.2\text{pie}/\text{min}.$$

$$\mathbf{P * V = 2015.9\text{psi-fpm}}$$

Como la recomendación es que se tome un material resistente con un $P*V$ superior al doble del calculado, serían útiles para esta aplicación una gran cantidad de materiales, ya que no es un valor muy alto. Debido a este requisito se seleccionó el bronce, además de su fácil adquisición y mecanización.

Según figura 14-3 de Mott¹², el espaciamiento diametral mínimo para esta aplicación es 50µm para un diámetro del muñón de 59mm y mínimas revoluciones.

$$Cr = \frac{Db - Di}{2}$$

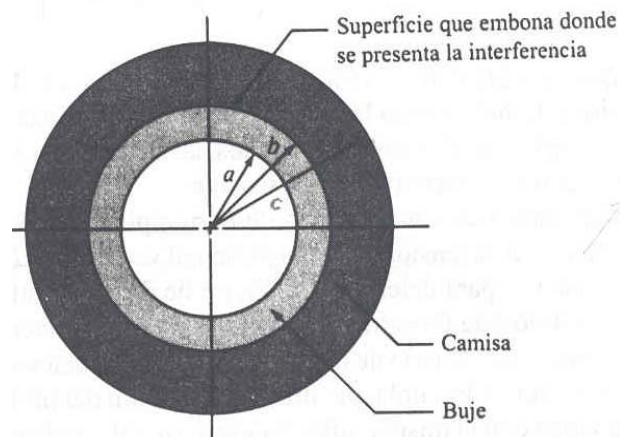
Donde, Cr es el espaciamiento diametral, Db diámetro del buje, Di diámetro del muñón. De aquí se despeja el diámetro del buje (Db).

$$5 * 10^{-5} = \frac{Db - 0.059}{2} \rightarrow Db = 59.2mm$$

5.5.1 Cálculo del ajuste entre la chumacera y el buje. Se seleccionó un ajuste FN2, que es de impulso medio, como el diámetro externo del buje es 66mm, según la tabla 8-7 de Mott los límites recomendables para este son:

1.0	+1.2	+2.9
2.9	-0	+2.2
Límite interferencia	orificio	eje

Figura 141. Ajuste entre la chumacera y el buje



Fuente : MOTT, Robert. Diseño de elementos de maquinas. Segunda edición. México: Prentice hall, 1992. P. 273

¹² MOTT, Robert. Diseño de elementos de maquinas. Segunda edición. México: Prentice hall, 1992. P 568 - 579.

$$P = \frac{\delta}{2b \left[\frac{1}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_o \right) + \frac{1}{E_i} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_i \right) \right]}$$

Donde P = Presión en la superficie que embona

δ = Interferencia diametral total

E_o = Módulo de elasticidad de la pieza exterior

E_i = Módulo de elasticidad de la pieza interior

ν_o = Razón de Poisson para la pieza exterior

ν_i = Razón de Poisson para la pieza interior

$$a = 1.16 \text{ plg}; b = 1.29 \text{ plg}; c = 1.47 \text{ plg}$$

$$\text{Para 1, } \delta = 0.001 \rightarrow P = 485.96 \text{ psi}$$

$$\text{Para 2, } \delta = 0.0029 \rightarrow P = 1409.30 \text{ psi}$$

El esfuerzo por tracción en la camisa de acero es:

$$\sigma_o = P \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} \right) = 485.96 \left(\frac{1.476^2 + 1.29^2}{1.476^2 - 1.29^2} \right) = 3629.68 \text{ psi}$$

El esfuerzo por compresión en el buje es:

$$\sigma_i = -P \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right) = -4592.1289 \text{ psi}$$

El incremento en el diámetro de la camisa es:

$$\delta_o = \frac{2bp}{E_o} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_o \right) = -3.2343 * 10^{-4} \text{ plg}$$

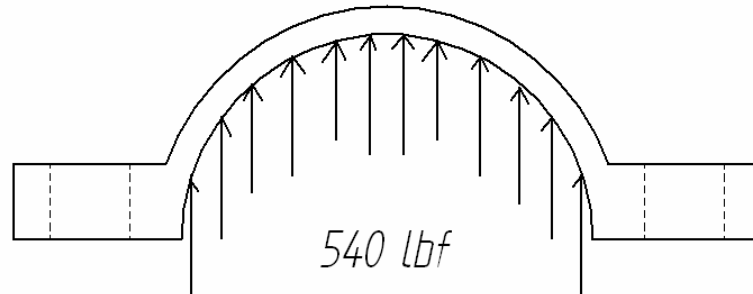
La disminución en el diámetro del buje es:

$$\delta_i = \frac{2bp}{E_i} \left[\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_i \right] = 7.1684 * 10^{-4} \text{ plg}$$

$$\text{Entonces, } \delta = 1.04 * 10^{-3} \approx 1 * 10^{-3}$$

5.5.2 Cálculo del torque de apriete de los tornillos. Para calcular el torque se necesita conocer la fuerza de tensión en los tornillos, esta se calcula a partir de la presión existente generada por el ajuste.

Figura 142. Fuerza de apriete entre el buje y la chumacera



$$F_t = P \cdot A / 2 = (485.9 \text{ lb/plg}^2) \cdot 2.22 \text{ plg}^2 / 2$$

$$F_t = 539.41 \text{ lbf}$$

Para un tornillo grado 3, $S_y = S_p = 85000 \text{ psi}$

La fuerza para un tornillo se calcula a partir de:

$$F_t = \frac{S_y \cdot A_s^{3/2}}{6} \text{ Para diámetros } \leq \text{ a } 3/4 \text{ plg}$$

Como $F_t = 540 \text{ lb} = 85000 \cdot A_s^{3/2} / 6$ Entonces el diámetro del tornillo es:

$$0.379 \approx 0.375 = 3/8 \text{ plg.}$$

De la tabla 7-1 del libro de Shigley en la columna UNC se obtiene que $A_s = 0.0775 \text{ plg}^2$.

El torque suministrado al tornillo se calcula a partir de:

$$T = 0.2 F_i d_n$$

$$F_i = A_s \cdot S_i \quad S_i = 0.9 \cdot S_p \quad S_i = 76500 \text{ psi}$$

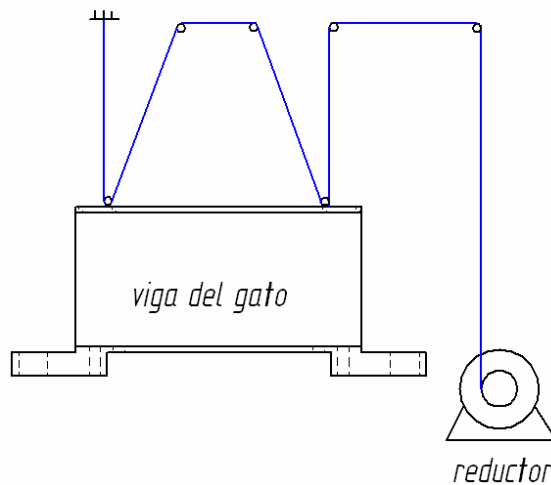
$$F_i = 5928 \text{ lb}$$

$$T = 441.69 \text{ lb/plg}$$

Para una llave de 30cm de brazo, la fuerza aplicada necesaria para lograr el apriete es de 16.96Kg, la cual es tolerable para esta aplicación.

5.6 SISTEMA DE ELEVACION

Figura 143. Sistema de elevación



El peso del sistema a elevar es de 80Kg aproximadamente, para este efecto se necesita seleccionar un cable de acero y un reductor que resistan esta carga permitiendo subirla en una forma manual.

$$\sigma_{adm.ac} = 500\text{Kg/cm}^2$$

Para un cable de 1/8 de diámetro = 0.3175cm, el área es 0.3166cm². Y como se cuenta con cuatro tensores entonces la fuerza soportada por el cable es la cuarta parte del peso. El esfuerzo soportado por el cable es:

$$\sigma = 20\text{Kg}/0.3166\text{cm}^2 = 63.1711 \text{ Kg/cm}^2 < \sigma_{adm.ac}$$

Debido a que el cable seleccionado es forrado se pueden usar poleas de aluminio, para este fin se seleccionaron 2 poleas de 2 ½plg de diámetro con soporte de acero, y dos poleas de 1 ½" de diámetro con soporte de acero. El diámetro del tambor seleccionado es de 1plg y 10cm de largo.

Para la selección del reductor se tiene que:

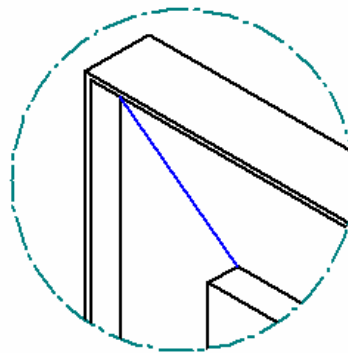
$T = 22lb \cdot plg$, entonces se selecciona un reductor con 55lb*plg de capacidad de torque, relación 40: 1 y una fuerza de 27,5g aplicada manualmente mediante una manivela de 30cm. Este sistema permite que el conjunto de laminación suba o baje aproximadamente 1mm por cada revolución del reductor

5.7 DISEÑO DE LA SOLDADURA EN EL PORTICO VERTICAL

Es muy importante el cálculo de la cantidad y espesor del cordón de soldadura depositado sobre la estructura, ya que de esta forma se garantiza la suficiente rigidez y durabilidad de la misma. Para este fin es necesario conocer la disposición de las partes a soldar, la geometría de éstas, los materiales involucrados y su respuesta ante este proceso.

5.7.1 Diseño de la parte superior de la soldadura

Figura 144. Cordón superior de soldadura en el pórtico vertical



- A_w = Longitud del cordón
- Z_w = Factor geométrico para carga flectora
- M = Momento flector
- L = Longitud del travesaño
- P = Carga aplicada sobre el travesaño
- b = Ancho del perfil
- d = Altura del perfil
- F_b = Componente de la fuerza total ejercida sobre el cordón debida a cargas flectoras
- F_t = Componente de la fuerza total ejercida sobre el cordón debida a cargas de tensión o corte
- F_R = Fuerza resultante
- W = Ancho del cordón

$$A_w = 2b + 2d$$

$$A_w = 2 * 4.72\text{plg} + 2 * 9.45\text{plg}$$

$$\mathbf{A_w = 36.16\text{plg}}$$

$$Z_w = b * d + d^2/3$$

$$\mathbf{Z_w = 122.6\text{plg}^2}$$

$$M = P * L / 8$$

$$M = 55115.56\text{lbf} * 36.22\text{plg} / 8$$

$$\mathbf{M = 249538.97\text{lbf} * \text{plg}}$$

$$F_t = (P/2) / A_w$$

$$F_t = 27557.8 \text{ lbf} / 36.16\text{plg}$$

$$\mathbf{F_t = 761.92\text{lbf/plg}}$$

$$F_b = M / Z_w$$

$$F_b = 249538.97 \text{ lbf} / 74.26\text{plg}$$

$$\mathbf{F_b = 2036 \text{ lbf/plg}}$$

Con las componentes se puede calcular la fuerza resultante que actúa sobre el cordón y que permite calcular las dimensiones del mismo.

$$F_R^2 = \sqrt{972.39^2 + 3360.37^2}$$

$$F_R = 2174.01 \text{ lb/plg}$$

De esta forma se calcula la geometría del cordón necesario.

$$W = F_R / \text{Fuerza permisible por plg de lado}$$

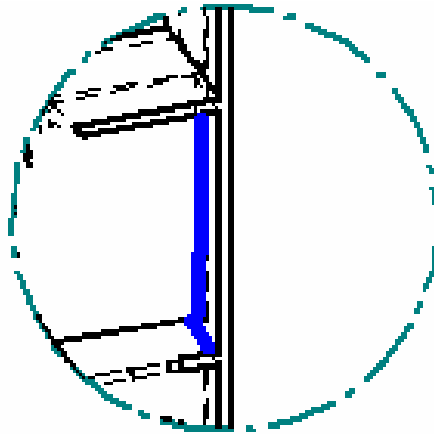
Debido a que la estructura está hecha a partir de acero A36, para un electrodo E60 la fuerza permisible por pulgada de lado es 9600 lb/plg.

$$W = (2174.014 \text{ lb/plg}) / (9600 \text{ lb/plg}) = 0.2264$$

$W \approx 0.25$. Lo que indica que se necesita un cordón de 1/4 plg de ancho W.

5.7.2 Cálculo del cordón de soldadura en la parte interior

Figura 145. Cordón inferior de soldadura en el pórtico vertical



$$M = 55115.56 \text{ lb} * 26.77 \text{ plg} / 8$$

$$M = 184441.83 \text{ lb} * \text{plg}$$

$$A_w = 2 * 4.72 + 2 * 9.45$$

$$A_w = 28.34 \text{ plg}$$

$$Z_w = 4.72 * 9.45 + 9.45^2 / 3$$

$$Z_w = 74.3715 \text{plg}^2$$

$$F_t = 27557.78 / 28.34$$

$$F_t = 972.371 \text{lb/plg}$$

$$F_b = 184441.83 / 74.3715$$

$$F_b = 2480.006 \text{lb/plg}$$

$$F_R = 2663.82 \text{lb/plg}$$

$$W = (2663.82 \text{lb/plg}) / (9600 \text{lb/plg})$$

$$W = 0.2774 \text{plg}$$

El electrodo que cumple con los mínimos requerimientos de carga y tamaño es el E60 de $\frac{1}{4}$ plg, ya que es bueno para uniones de acero A36-A36 y posee una tensión por esfuerzo de corte permisible de 13600psi, según la tabla 19-3 de Mott. Pero por disponibilidad se pudo contar con un equipo de soldadura MIG con electrodo 70-S6, la cual es similar en resistencia al electrodo E70, el cual tiene propiedades superiores al E60.

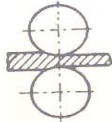
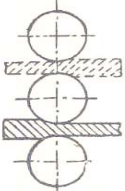
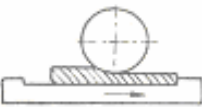
5.8 SELECCIÓN DEL ACTUADOR HIDRAULICO (GATO)

Para ejercer la fuerza de estampa se seleccionó un gato marca Mega de 30Ton de capacidad, con una carrera de 15cm y un avance de 0.5mm, el cual es adecuado para esta aplicación ya que el avance mínimo recomendado es de 0.8mm, lo cual es la mitad de la profundidad del alvéolo. La razón de no seleccionar gatos normalmente usados para prensas hidráulicas, es que éstos poseen un avance muy grande, en muchos casos, mayor a la profundidad del alvéolo, lo cual es prohibitivo, ya que la estampa debe ser gradual y sería muy difícil alcanzar la profundidad exacta requerida con dispositivos de avance largo.

5.9 DISEÑO DEL CONJUNTO MOVIL (MATRIZ Y PORTAMATRIZ)

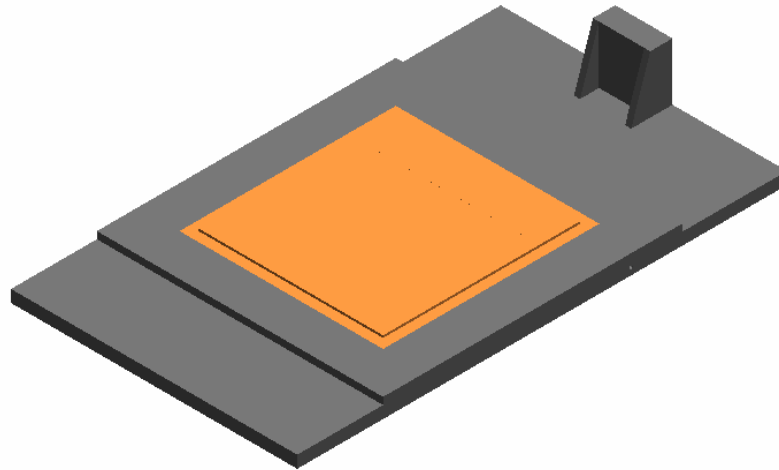
No todos los trenes de laminación están formados solo a partir de cilindros. Pues existen también las cajas para laminación sobre una placa, estas consisten en un cilindro y una placa móvil (ver tabla 3), la cual actúa como una especie de estampa, sobre la cual se coloca la pieza que va a ser laminada. El proceso de laminación difiere considerablemente del de los trenes de laminación comunes. Estos trenes se emplean en casos muy raros para laminar diversos artículos cortos de sección transversal variable.

Tabla 3. Cajas horizontales más comunes de laminación, y caja tipo slab

Disposición de los cilindros	Nombre de la caja	Empleo
<p>FIG. 1</p> 	Dúo	<p>a) Laminadores reversibles para laminar perfiles grandes (blooms), vigas y carriles y chapas gruesas.</p> <p>b) Trenes de gran producción para laminar semiproductos y secciones.</p> <p>c) Laminadores de bandas (método antiguo).</p> <p>d) Laminadores de reducción en frío para bandas estrechas y anchas.</p>
<p>FIG. 2</p> 	Trío	<p>a) Para laminar vigas, carriles, semiproductos, lingotes, y otras formas.</p> <p>b) Para laminar perfiles en pequeños tonelajes.</p>
	Caja para laminar sobre un slab	Para laminar perfiles diversos de escasa longitud.

Fuente: TSELIKOV, A. I. Trenes de laminación. Bilbao: Ediciones urmo, 1970. P.22.

Figura 146. Portamatriz y matriz tipo slab



Para lograr este tren o slab se utiliza una matriz o molde, la cual se encuentra introducida dentro de una placa conocida como portamatriz.

Para el diseño de estas piezas se tuvo en cuenta el análisis por elementos finitos pues su geometría no permite utilizar los métodos de cálculo convencionales que normalmente se utilizan en piezas regulares.

Este análisis se realizó utilizando la teoría de von misses y mostró que los esfuerzos presentes en la portamatriz y la matriz se encuentran por debajo de los admisibles.

Figura 147. Análisis de la portamatriz por elementos finitos

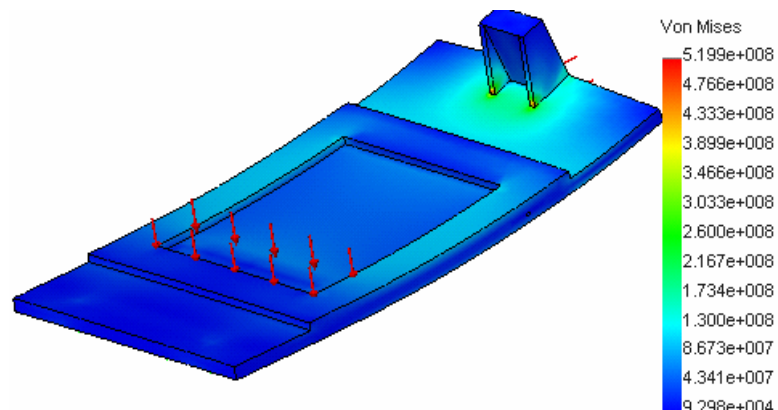
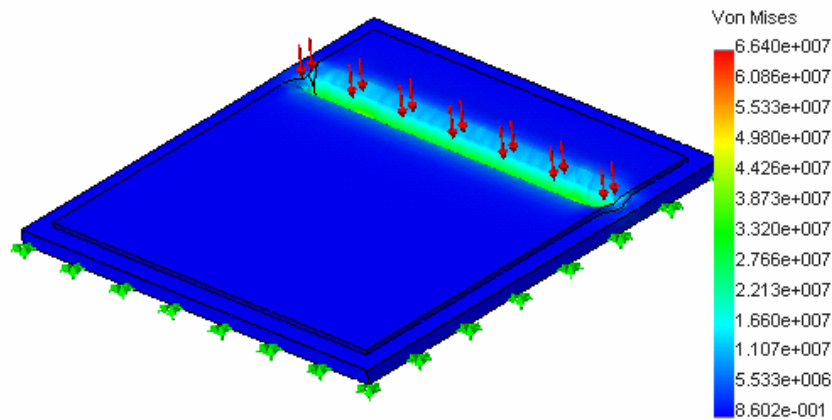


Figura 148. Análisis de la matriz por elementos finitos



El diseño de estas piezas obedece más a aspectos dimensionales que resistivos, ya que la matriz solo está trabajando a compresión, y la portamatriz a excepción de la compresión solo soporta un momento que no es muy representativo para su rigidez. Las dimensiones de la matriz son de 32 * 34cm y 29 * 31cm en su parte grabada.

La unión entre la matriz y la portamatriz se lleva a cabo por medio de tornillos, y la portamatriz posee un marco cuyas dimensiones internas corresponden a las dimensiones externas de la matriz, proveyendo de esta forma una fácil ubicación de la matriz sobre la portamatriz.

La matriz está hecha a partir de acero hot rolled 1045 de 5/8plg de espesor, y posee un recubrimiento de cromo duro (Cromo-níquel) para mejorar las propiedades de anti-abrasión y de esta forma aumentar la vida útil de la matriz. La portamatriz es elaborada a partir de una placa de 3/4 plg, de acero A36, con 45 * 77cm en sus lados. Las dimensiones del largo obedecen a la necesidad de contar con apoyo sobre los rodillos auxiliares durante la carrera de la matriz, la cual es como mínimo 27cm.

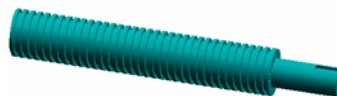
5.10 SISTEMA DE EMPUJE

El sistema de empuje se hace por medio de un tornillo de potencia, para este fin se colocó la tuerca de potencia fija a la portamatriz y el tornillo de potencia acoplado a un reductor con el fin de recibir el torque a partir de éste.

Según la prueba hecha para determinar la carga de empuje, es necesario que el tornillo haga una fuerza de al menos 3.5Ton, pero considerando que en un futuro se puede probar con otras aleaciones que ofrezcan mayor resistencia, es recomendable diseñar el tornillo para una fuerza de 6Ton.

5.10.1 Diseño del tornillo de potencia. Para el diseño del tornillo de potencia se tienen en cuenta muchos factores tales como la geometría, el material y la durabilidad.

Figura 149. Tornillo de potencia



El cálculo del tornillo de potencia se hará teniendo en cuenta la fatiga. Se determinó trabajar con un tornillo de rosca cuadrada de 9mm de paso, de 2 1/4 plg de diámetro exterior, de acero 1045 hot rolled calibrado.

Según Mott¹³ El torque de un tornillo de potencia se evalúa a partir de:

$$T_s = \frac{d_m w}{2} \left[\frac{\pi F_s d_m + nP \cos \theta}{\pi d_m \cos \theta - nPF_s} \right]$$

¹³ MOTT, Robert. Diseño de elementos de maquinas. Segunda edición. México: Prentice hall, 1992. P. 727 - 733.

Donde: T_s = Torque del tornillo de potencia

d_m = Diámetro medio del tornillo

w = Carga

F_s = Coeficiente de fricción

n = Número de hileras

P = Paso

θ = Angulo del filete

El diámetro medio es 52.65mm; el tornillo solo cuenta con una hilera, por lo tanto $n = 1$; el coeficiente de fricción recomendado es 0.17; por ser rosca cuadrada el ángulo $\theta = 90^\circ$; la carga de trabajo es de 6000Kg; el paso es de 9mm. Al reemplazar estos datos en la ecuación, se obtiene un torque de:

$$A_{\text{vance}} = 35.776 \text{Kg} \cdot \text{m}$$

El torque de regreso es de tan solo 0.0596Kg*m, ya que la carga de regreso solo corresponde al peso de la portamatriz y la matriz. A partir de estos datos se calcula el torque medio y el torque alternativo.

$$T_{\text{medio}} = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2$$

$$T_{\text{medio}} = 17.85 \text{Kg} \cdot \text{m}$$

$$T_{\text{alt}} = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / 2$$

$$T_{\text{alt}} = 17.91 \text{Kg} \cdot \text{m}$$

* **Determinación de los esfuerzos en el vástago.** Se tiene que d_{eq} = diámetro equivalente; d_{raiz} = diámetro de la raíz; A_{eq} = área equivalente.

$$d_{\text{eq}} = d_o - h = 57.15 - 4.5$$

$$d_{\text{eq}} = 52.65 \text{mm} = 2.07 \text{plg}$$

$$d_{\text{raiz}} = d_o - 2h = 57.15 - 9$$

$$d_{\text{raiz}} = 48.15 \text{mm} = 1.8956 \text{plg}$$

$$A_{eq} = (\pi/4) * d_{eq}^2$$

$$A_{eq} = 3.08 \text{plg}^2 = 1987.1 \text{mm}^2$$

$$\tau_a = (16 * T_a) / (\pi * d_{eq}^3)$$

$$\tau_a = 0.7141 \text{Kg/mm}^2$$

$$\tau_m = (16 * T_m) / (\pi * d_{eq}^3)$$

$$\tau_m = 0.7117 \text{Kg/mm}^2$$

Sin considerar pandeo se tiene que:

$$\sigma_{min} = F_{min} / A_{eq}$$

$$\sigma_{min} = -3.01 \text{Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{max} = 5.02 * 10^{-3} \text{Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{alt} = 1.5085 \text{Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{med} = -1.5034 \text{Kg/mm}^2$$

Para este material $S_{ut} = 69000 \text{psi}$; $S_{yt} = 54000 \text{psi}$

$K_s = 0.9$ maquinado común

$K_d = 0.75$ $2 \text{plg} < d_m < 12 \text{plg}$

$K_l = 0.9$ carga repetitiva

$K_c = 0.92$

$K_m = 0.9$

$K_f = 2.8$ Recocido-maquinado

$K_{fs} = 2.4$ Recocido-maquinado

$S_e = 0.5 S_{ut} = 34500 \text{psi}$

$$S_e'' = K_s * K_d * K_l * K_m * K_c * S_e$$

$$S_e'' = 17353.84 \text{psi}$$

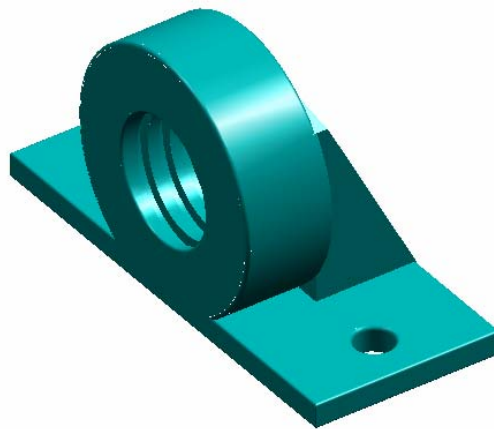
Con estos datos se puede calcular el factor de seguridad N y de esta manera verificar si el diseño fue exitoso, para este fin se utiliza la ecuación de Misses-Goodman que es la más aplicada.

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + K_f \frac{\sigma_a}{S_e''} \right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_m}{S_{ut}} + K_{fs} \frac{\tau_a}{S_e''} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Al reemplazar los valores, se tiene un $N = 2.42$. Como es mayor de 1.2, el diseño es correcto.

5.10.2 Diseño de la tuerca de potencia. Como el diseño es acertado, se puede ahora determinar la altura de la tuerca en base a los siguientes principios. El objetivo de estos cálculos es obtener la altura de la tuerca necesaria para que no exista falla en ninguno de los elementos del tornillo de potencia.

Figura 150. Tuerca de potencia



H = altura de la tuerca; P = paso; d_m = diámetro medio; S_{dc} = resistencia del material para diseño a compresión; h = altura del diente; d_o = diámetro

mayor externo del tornillo; S_{yt} = Resistencia del material para diseño a tracción; S_{ds} = Resistencia del material para diseño a corte; b = base del diente

* **Por flexión del diente.** Este principio tiene ecuaciones para el tornillo y la tuerca, así:

Tornillo

$$H = \frac{3WhP}{\pi db^2 S_{dt}}$$

Conociendo los valores:

$$H = \frac{3 * 13228 * 0.1771 * 0.3543}{\pi * 1.895 * 0.1771^2 * 21600}$$

$$\mathbf{H = 0.6130plg = 15.68mm}$$

Tuerca

$$H = \frac{3WhP}{\pi d_o b^2 S_{dt}}$$

Conociendo los valores:

$$H = \frac{3 * 13228 * 0.1771 * 0.3543}{\pi * 2.25 * 0.1771^2 * 21600}$$

$$\mathbf{H = 0.5108plg = 12.96mm}$$

Teniendo en cuenta los valores de H resultantes, se tiene que el mayor es **$H = 15.68mm$** , el cual es la cantidad mínima para que no fallen el tornillo y/o la tuerca. Para este fin se toma una distancia **$H = 35mm$** la cual es mayor por lo tanto ofrece seguridad al sistema.

5.10.3 Selección del rodamiento axial. Para soportar la fuerza axial, se selecciona del manual de FAG un rodamiento axial de bolas, de referencia 51207, el cual tiene una capacidad de 7Ton para carga estática, y debido a la baja velocidad del sistema de empuje, es posible clasificar el proceso como estático, debido a que esta es de tan solo 10rpm.

5.10.4 Selección del reductor. Después de obtenido el torque necesario para empujar la carga es necesario calcular el torque que absorbe el collarín o rodamiento axial para seleccionar de esta manera el reductor y el motor.

Torque collarín

$$T_{Coll} = \frac{d_{mc} F_c W}{2}$$

Donde:

d_{mc} = diámetro medio del collarín

F_c = Coeficiente estático de rozamiento para rodamiento axial de bolas

W = Carga axial

Reemplazando en la ecuación:

$$T_{Coll} = \frac{1.90 \text{ plg} * 0.0025 * 13228 \text{ lb}}{2}$$

$$\mathbf{T_{Coll} = 31.415 \text{ lb} * \text{plg}}$$

Entonces el torque total que necesita entregar el reductor es de:

$$T_{total} = T_{torn} + T_{coll}$$

$$T_{total} = 3105 \text{ lb} * \text{plg} + 31.415 \text{ lb} * \text{plg}$$

$$\mathbf{T_{total} = 3136.415 \text{ lb} * \text{plg}}$$

Para este fin se seleccionó un reductor sinfín-corona el cual tiene una capacidad de torque de 3645.43 lb*plg de marca Leroy-Somer, el cual tiene una relación 60:1 y eficiencia del 80%.

Con la reducción de 60:1 se tiene que:

$$T_{entrada} = \frac{T_{salida}}{i \eta_{red}}$$

$$T_{entrada} = \frac{3136.415 \text{ lb} * \text{plg}}{60 * 0.95}$$

$$\mathbf{T_{entrada} = 65.34 \text{ lb} * \text{plg}}$$

5.10.5 Selección del motor. La unión entre el reductor y el motor es por medio de una correa unida a un sistema de poleas de relación 3:1. Despreciando las pérdidas entre la correa y las poleas, se tiene que el torque de salida del motor es de:

$$T_{\text{sal-motor}} = 65.34\text{lb}\cdot\text{plg} / 3 = 21.78 \text{ lb}\cdot\text{plg}$$

Utilizando un motor que gira a 1800rpm se puede calcular la potencia necesaria que debe tener el motor:

$$\text{HP} = T * N / 63000$$

$$\text{HP} = 21.78 * 1800 / 63000$$

$$\text{HP} = 0.62$$

Para este caso se seleccionó un motor semiabierto monofásico de 1 HP, marca siemens a 1800rpm.

Es importante destacar que la selección de la correa obedeció a recomendaciones dadas por el fabricante según la potencia y la velocidad de giro, por lo cual no se realizó un cálculo exhaustivo para su selección.

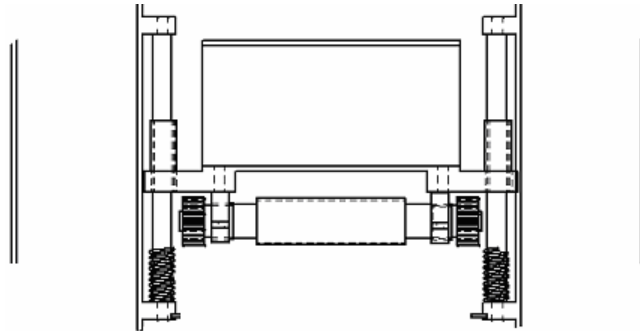
5.10.6 Selección del acople. El acople seleccionado es de estrella, de referencia L100, este tiene una capacidad de 2.7HP a 600rpm, por lo cual es más que suficiente para esta aplicación. Éste posee una estrella de bronce en vez de la estrella de caucho con que comercialmente viene pues esta es una aplicación que implica mas torque que velocidad.

5.11 GRUPO DE GUIAS

Este sistema está compuesto de dos guía paralelas con topes en sus extremos, que van atornillados al pórtico vertical de la estructura .la función de estos

topes radica en la facilidad de montaje y mantenimiento de las guías, ya que para desmontarlas solo es necesario desatornillarlas del pórtico vertical.

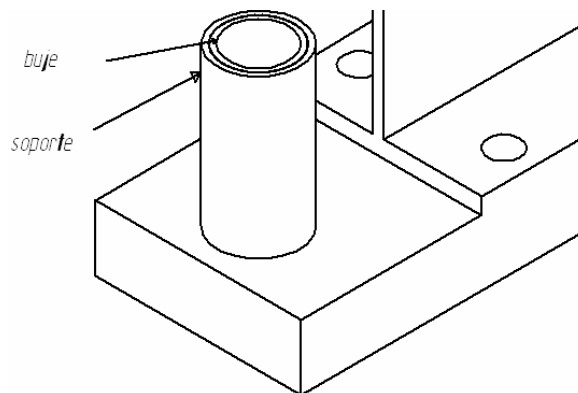
Figura 151. Guías verticales y horizontales



Estas guías permiten el desplazamiento vertical del rodillo de laminación, por lo que por ellas pasan bujes de bronce los cuales están dentro de apoyos metálicos y estos a su vez unidos por soldadura a la viga que sostiene el rodillo de laminación.

Se tomó un largo de 13cm el cual corresponde a 4 veces el diámetro de la guía, para evitar que esta se trabe. Se utilizó una tolerancia diametral de 2 décimas entre la guía y el buje para un movimiento suave y además con la suficiente lubricación para disminuir el desgaste.

Figura 152. Detalle del buje de la guía vertical y su apoyo



en el caso de las guías horizontales tenemos que estas poseen 2 décimas de juego en dirección lateral y 5 décimas en la cara superior, esto debido principalmente a que su aplicación no es tan exigente como en el caso de las guías verticales.

5.12 SELECCIÓN DE LAS POLEAS

Para el cálculo de las poleas del motor y el reductor se utilizó el procedimiento expresado en el libro de mott.+

- calculo de la potencia de diseño. $P_d = P_n * N_{sf}$ de la tabla 13-1 de mott

$N_{sf} = 1.2$ $P_n = 1\text{Hp}$, reemplazando:

$P_d = 1.2 \text{ Hp}$. La polea pequeña gira a 1800 RPM

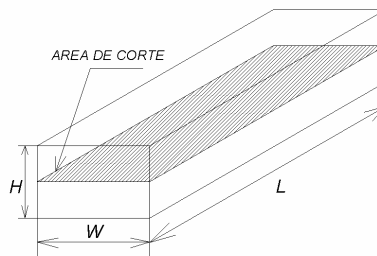
- A partir de la figura 13-9 de mott se selecciona la sección de la banda 3VX.
- Como la velocidad de entrada del reductor debe ser de 600 RPM, la relación de velocidades es de 3:1
- Se selecciono $D_1 = 2''$
- $W_1/W_2 = D_2/D_1$, entonces $D_2 = 6''$
- Se determina la potencia especificada utilizando la figura 13-10 de Mott, la potencia básica que se especifica es: 1.2 Hp
- Para determinar el centro: $D_2 < C < 3*(D_2 + D_1)$
 $6 < C < 3*(6 + 2)$, $6 < C < 24$. Con la intención de mantener el espacio entre Ejes, se escoge $C = 7.5''$
- A partir de la ecuación $L = 2*C + 1.57*(D_2 + D_1) + (D_2 - D_1)^2/4C = 28''$
- De la tabla 13 -2 de Mott se seleccionó una longitud de banda estándar de 28 "por lo tanto no es necesario corregir este valor.
- Los factores de corrección $C_1 = 1.16$ y $C_0 = 0.92$ se obtienen de las tablas 13-14 y 13-15 de Mott.
- La potencia corregida es : $P_c = C_1 * C_0 * P = 1.28 \text{ Hp}$,

- el numero de bandas se obtiene a partir de $N = Pd/Pc = 1.2/1.28 = 0.93$ por lo tanto $N = 1$

5.13 DISEÑO DE LAS CUÑAS

Se necesitan cuñas entre el reductor y el acople, entre el acople y el tornillo de potencia. Y entre el motor y reductor con sus respectivas poleas.

Figura 153. Geometría de la cuña



Como el diámetro del reductor es de $1 \frac{3}{8}$ plg según la tabla 10-1 de Mott, para una cuña cuadrada se recomienda una de $\frac{3}{8}$ plg de lado, de acero 1020 de $S_y = 51000$. Para el cálculo de la longitud se tiene que $N=2$

$$L = 4 * T * N / D * W * S_y$$

$$L = (4 * 3105 * 2) / (1.375 * 0.375 * 51000)$$

$$L = 0.94 \text{plg} \approx 1 \text{plg}$$

Se utiliza esta formula pues la cuña es de menor resistencia que los ejes y el acople. Para el tornillo de potencia seleccionamos una cuña cuadrada de $\frac{5}{16}$ " de lado y aplicando la formula anterior se obtiene que la longitud recomendada es de $L = 1.13 \text{ Plg}$ pero se decidió tomarla de una plg de largo.

Para el calculo de las cuñas de las poleas del reductor y el motor usamos la formula en que la cuña es mas dura que el material de la polea o masa

$$L = 4 * T / \sigma_d * D * H \text{ donde } \sigma_d = S_y / N$$

Para el aluminio $S_y = 18000$ psi según el apéndice 10 de Mott. Para una valor de $N = 3$

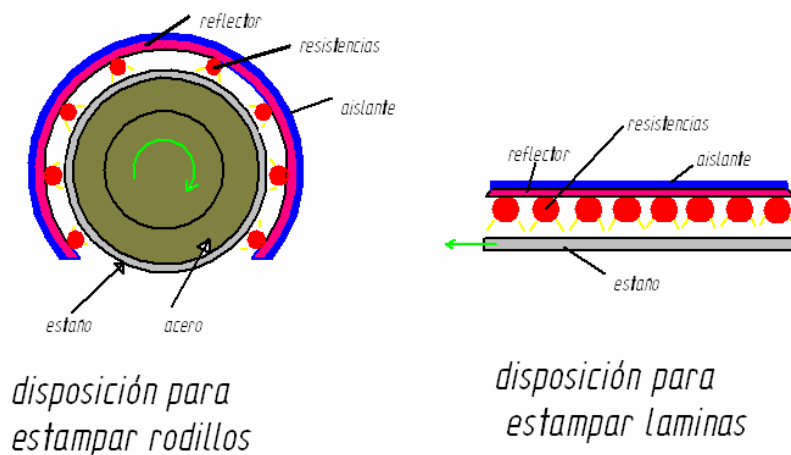
Para la polea del reductor con $D = 1''$ y un H recomendado de $\frac{1}{4}''$ obtenemos un valor de $L = 0,13''$, pero como este no es un valor practico, seleccionamos una longitud $L = 1''$.

Para la polea del motor trabajamos con la cuña que posee el motor de fábrica la cual es de 30mm de largo y $\frac{3}{16}''$ de sección cuadrada.

5.14 DISEÑO DEL CALENTADOR

Para el diseño del calentador se tuvieron en cuenta dos geometrías. La primera consiste en un cascaron cilíndrico la cual se utilizo para realizar las pruebas sobre los rodillos, y la segunda disposición es plana, la cual se utilizó en el diseño definitivo de la maquina, por lo cual solo se mostrará el procedimiento de diseño de la ultima.

Figura 154. Disposición del calentador



Se establecen las siguientes suposiciones:

- El aire ambiente esta en reposo a una temperatura de 298K

- Los efectos de la irradiación en la lámina de estaño son insignificantes.
- Para una temperatura promedio de la lamina de 338K se tiene $T_f = 318\text{K}$
- Las propiedades a T_f son: $\nu = 17.7 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$, $\alpha = 25.164 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$,
- $k = 27.63 \cdot 10^{-3} \text{ (W/mK)}$, $\beta = 0.003144 \text{ K}^{-1}$, $\text{Pr} = 0.7044$. $L = A_s / P = 0.06061$

Según ecuación $R_{al} = Gr_1 \cdot \text{Pr} = (g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\alpha) \cdot L^3) / (\nu \cdot \alpha)$ de incropera¹⁴

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación tenemos que:

$$R_{al} = 616292.8$$

Según ecuación $Nu_l = 0.54 R_{al}^{1/4}$ y $h = (k \cdot Nu_l) / L$ para este caso de la lamina.

Reemplazando los valores en las ecuaciones anteriores,

$$h = 6.9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

De la tabla A1 de incropera, para el estaño $k = 65 \text{ W/mk}$,

Según la ecuación $Bi = h \cdot L_c / k$ y reemplazando valores, $Bi = 2.12 \cdot 10^{-4}$

Como $Bi < 0.1$ este caso se puede considerar como de resistencia interna despreciable. Por lo tanto es posible calcular el tiempo de calentamiento a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = (m_{est} \cdot C_p \cdot \Delta T / t) + Q_{cond}$$

El calor generado por las resistencias es de 2000 W se asume que el reflector se comporta como una superficie negra debido a la cercanía entre las dos superficies.

$$Q_{cond} = k \cdot A \cdot \Delta T / L$$

Para un espesor del acero de 50mm y un valor de $k = 82 \text{ W/m}^2\text{K}$, y Con un cambio de temperatura en la placa de acero de $20,72^\circ\text{C}$

Se obtiene un calor de conducción de 1970W.

Al reemplazar estos valores en la ecuación tenemos que se obtiene un tiempo de **$t = 9 \text{ min}$** para que la lamina de estaño alcance los 100°C .

¹⁴ INCROPERA Frank. y DeWITT David. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta edición. México: Pearson, 1996. P 482 - 506.

6. CONCLUSIONES

- Se diseñó un procedimiento de fabricación de los rodillos estampadores de cera de abeja, que permite a los apicultores colombianos contar con la alternativa de adquirir sus maquinas estampadoras de cera en el país, sin la necesidad de recurrir a la importación.
- Se diseñó y construyó un prototipo para la laminación y el estampado del estaño como paso fundamental para la fabricación de los rodillos estampadores de cera de abeja.
- Se diseñó y construyó un prototipo versátil para la laminación y el estampado del estaño que al cambiar el molde - matriz permite la fabricación de rodillos estampadores de cera de abeja de diferentes diámetros y profundidades alveolares según la raza ó tamaño de las abejas
- Se diseñó y construyó un molde - matriz con la disposición alveolar de acuerdo a los requerimientos iniciales.
- Se logró disminuir en un 75% el peso de los rodillos estampadores de cera de abeja en comparación al peso de los rodillos metálicos comerciales.
- Se logró reducir el costo de fabricación de los rodillos estampadores de cera de abeja hasta en un 80% en comparación al valor de venta de los rodillos comerciales.

- Por medio del desarrollo de un proceso de fabricación eficiente de los rodillos estampadores de cera de abeja, es posible restaurar los rodillos desgastados con el simple cambio de la vamis grabadora de estaño, sin necesidad de desechar los ejes de acero que estos rodillos traen como soporte del estaño.
- Se contribuyó en investigaciones que relacionan la ingeniería mecánica con áreas primarias de la economía como es el caso de la agricultura, ofreciendo soluciones prácticas y económicas a algunas necesidades de los apicultores.
- Fue posible montar los rodillos obtenidos durante el proceso de fabricación en un maquina estampadora existente y estampar cera de abeja obteniéndose buenos resultados.
- Fue de suma importancia la experiencia practica y teórica adquirida durante el diseño y construcción de una maquina como esta, ya que permitió utilizar muchos de los conceptos aprendidos durante la carrera, permitiéndose así un buen desarrollo ingenieril para los ejecutores de este proyecto.

7. RECOMENDACIONES

- Para obtener resultados óptimos en el estampado de la cera, se recomienda elaborar un troquel en zigzag con las dimensiones requeridas por las láminas de estaño para reemplazar el corte manual y de esta manera obtener un empalme perfecto entre los extremos de las mismas.
- Es importante instalar un variador de velocidad al motor, con el fin de permitir que el regreso de la portamatriz sea mucho más rápido que el avance de la misma.
- Es conveniente adaptar un motor al reductor de elevación, que permita una ganancia de tiempo durante el descenso ó elevación del conjunto laminador, ya que esta tarea se viene realizando de forma manual.
- Se recomienda utilizar esta maquina para estampar ó laminar estaño puro, aleaciones de estaño o cualquier aleación blanda que no exija mas de 30 Toneladas de fuerza.
- Para el procedimiento de estampado del estaño, se recomienda un calentamiento previo de la lámina entre 90-120°C.
- En vista de que en un futuro se cuente con procesos de estañado en caliente o similares en nuestro país, se recomienda que los rodillos se fabriquen a partir de estos medios, ya que de esta manera se evitaría la necesidad de recurrir al empalme en zigzag de las láminas.

BIBLIOGRAFÍA

BEGEMAN, Myron. Manufacturing processes. 6 ed. Texas : Jhon wiley and sons, 1969. p. 633-661.

CARDENAS, Humberto. Procesos de manufactura. Bucaramanga : Publicaciones universidad industrial de Santander, 1990. p 216-236.

HEDGES, Ernest. Tin and its alloys. London : Edward arnold, 1960. p. 155-191.

KRASZYUK, B. Electrospark machining of metals. New york : Consultants bureau. 1964. v. 3, p. 66-74.

LASHERAS ESTEBAN, José maría y ARIAS SANVICENTE, Héctor. Procedimientos de fabricación y control. Tercera edición. Barcelona : Ediciones cedel. 1970. v. 1, p. 119-130.

METALS HANDBOOK CONMITTEE. Metals handbook : Properties and selection of metals. 8 ed. New York : AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1961. v. 1, p. 1131 - 1146.

MOTT, Robert. Diseño de elementos de maquinas. 2 ed. México : Prentice hall, 1992. 787 p.

SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 3 ed.
Madrid : Mc graw hill, 1998. p. 150-151, 122-127.

TSELIKOV, A y SMIRNOV, V. Trenes de laminación. Bilbao : Ediciones
urmo, 1970. 464 p.

ZEERLEDER, Alfred. Aleaciones ligeras. Madrid : Aguilar, 1955. p. 124-187

ANEXO A. CERA DE ABEJA Y EQUIPOS DE ESTAMPADO

HISTORIA DE LA CERA DE ABEJA

Si la lámpara de aceite, mas tarde la de petróleo y finalmente la electricidad, destronaron poco a poco las velas de cera de abejas, su uso persistió en forma obligada en la Iglesia Católica hasta estos últimos años.

La apicultura fijista fue la única, hasta el siglo XIX, que producía una gran cantidad de cera, ya que solo la destrucción de los panales permitía la cosecha de miel. Fuera cual fuera el tipo de hábitat de las abejas, estas debían construir sus panales a partir de la parte mas alta del habitáculo, sin guía alguna. Tan solo eran colocados algunos travesaños de madera para reforzar el conjunto de la construcción en aquellas colmenas de gran capacidad.

Las abejas venían trabajando de esta manera después de miles de milenios de años y por otra parte, continúan haciéndolo así aun hoy, cuando, por ejemplo, un apicultor coloca un enjambre en una colmena Standard o cuando su humor vagabundo guía al propio enjambre hacia una cavidad natural o hacia algún hueco en un muro, en una estructura de madera o en un doble piso. De esta forma, las abejas se apresuran igualmente a llenar cualquier vacío importante dejado en una colmena moderna por un apicultor negligente.

Durante mucho tiempo, el hombre creyó que la cera de abejas era de origen puramente vegetal. Ya en la Edad Media, se conocía la existencia de algunas

ceras de este origen y se pensaba que las abejas las recogían para construir sus panales. La historia no nos dice con precisión quien fue el primero que descubrió las escamas de cera segregadas por las obreras, pero François Huber demostró en 1814, después de una serie de experiencias, la inexactitud de la tesis sobre el origen vegetal de la cera.

Aunque en el transcurso de los siglos, se realizaron numerosas tentativas para ayudar a las abejas en sus trabajos de construcción, fue en 1844 que Deauvoys invento el cuadro móvil rodeando por completo a cada uno de los panales de la colmena. En 1852, Langstroth patentó en Estados Unidos la colmena de la cual derivarían los otros modelos de colmenas de cuadros modernas. Por otra parte, se observó que las abejas consumían mucha miel para segregar la cera; algunos autores estiman, por ejemplo, que son necesarios entre 6 y 7 kilos de miel para producir la secreción de un solo kilo de cera; otros autores indican hasta 12 kilos.

ORIGEN DE LA CERA

Las glándulas cereras. En la *Apis Melífera* solo las obreras pueden segregar cera. Para ello poseen ocho glándulas cereras situadas en la parte interna de las eternitas o placas ventrales del abdomen. La importancia de las glándulas cereras varía según la edad de la obrera y alcanzan su máximo desarrollo hacia el duodécimo día después del nacimiento y empiezan a decrecer después de 18 o 19^o días, hasta la muerte de la abeja. Es entonces, durante este

periodo que la abeja esta en sus mejores condiciones para realizar los trabajos de construcción.

Durante las tareas de construcción, las abejas cereras, una vez saciadas de miel, permanecen suspendidas las unas de las otras por las patas, formando largas cadenas, denominadas *cadena de cera*. La secreción se produce cuando la temperatura alcanza entre los 35° C y 36° C. La cera, fluida durante su secreción, se moldea sobre los espejos de cera. Con la ayuda de una de sus patas posteriores, la obrera arranca una a una las placas y las acerca a sus mandíbulas. Cada escama pesa aproximadamente 0,0008 grs. La abeja incorpora a la cera un disolvente de origen salival que facilita su amasado. La escama, triturada de esta manera, interviene en la construcción del panal o bien sirve para opercular celdillas repletas de miel.

COMPOSICION QUIMICA Y FISICA

La cera es un cuerpo químicamente muy estable y sus propiedades no se alteran apenas con el tiempo. Resiste perfectamente a la hidrólisis o la oxidación natural y es totalmente insoluble en agua. Los ácidos o los jugos digestivos de los animales no pueden destruirla, con excepción de los de las larvas de algunas polillas parásitas de las colmenas o de algunos pájaros como el *Indicador Major* (pájaro africano que “indica” a los nativos la situación de los enjambres silvestres de abejas)

La cera de abeja es de naturaleza lipóide y contiene

- Hidrocarburos saturados, siendo el más frecuente el heptacosano. Son hidrocarburos que contienen un número impar de átomos de carbono.
- Ácidos o hidroxiacidos igualmente saturados, en la mayoría de los casos, pero cuyo número de átomos de carbono es par, como el ácido palmítico o el ácido tetracosanoico.
- Alcoholes, monoles y dioles

A estos constituyentes de la cera pura se añaden en la cera extraída por los procedimientos corrientes, pigmentos diversos procedentes sobre todo del polen, de los propóleos.

En el plano físico, la cera se presenta como un cuerpo sólido a temperatura normal, frágil cuando la temperatura es baja, pero cuando esta es de unos 35 a 40° C se vuelve rápidamente plástica. Su punto de fusión se sitúa alrededor de los 64° C (+-1). Su densidad es de 0.95 (+-2) para una cera amarilla del comercio a 15° C.

ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS PARA ESTAMPAR CERA

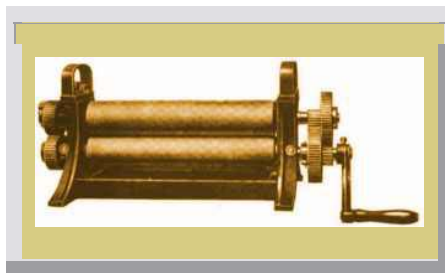
Rodillo para estampar / rodillo liso. Este económico equipo permite procesar la propia cera para transformarla en hojas nuevas de cera estampada. La planta se compone de un rodillo liso y uno para estampar.

Fabricación de cera estampada

1. Con la cera en estado líquido se hacen primero panes de un espesor aproximado de 20mm.
Cuando se hayan enfriado un poco se sumergen en agua a una temperatura de 40-50 °C
2. Estos panes se pasan por el rodillo liso, obteniéndose una cinta de 5 mm de espesor.
3. A continuación esta cinta lisa se pasa por el rodillo estampador para obtener la cinta final con el diseño.
4. Con un molde y cuchillo afilado se da a la cinta estampada las medidas necesarias

ESTAMPADORA MANUAL

Figura 155. Estampadora manual



Fuente: <http://www.padiway.com>

El núcleo de los rodillos y las ruedas dentadas son de acero forjado. Sus anchos descansos están en cajas de bronce. Las ruedas gemelas tienen dientes extra anchos para impedir fracturas. La lubricación de los descansos funciona

mediante engrasadores. Las camisas con el cino grabador son de una aleación de estaño. En estas camisas están grabados los alvéolos.

Medidas de los alvéolos: Ancho estándar 5,4 mm o sea aproximadamente 780-800 alvéolos por decímetro cuadrado, en ambos lados la vamis grabadora, gastada después de prolongado uso, puede ser sustituida fácilmente por una nueva.

Tabla 4. Dimensiones de los rodillos de la estampadora manual.

N°	Largo de los rodillos	Diámetro de los Rodillos	Peso neto Kg.	Aprox. Bruto Kg.	Medidas aprox. del Cajón en cm. Largo x ancho x alto		
I	270mm	85mm	55	70	65	38	39
II	320mm	85mm	60	75	70	38	39
III	360mm	85mm	67	80	75	38	39
IV	450mm	85mm	80	100	85	38	39
IVa	480mm	85mm	84	105	90	38	39
V	550mm	85mm	98	118	95	38	39

Fuente: <http://www.padiway.com>

ESTAMPADORA AUTOMÁTICA

Figura 156. Estampadora automática



Con esta máquina es posible producir los panales de cera en un solo proceso de trabajo, mediante el procedimiento de colado. La cera líquida es conducida a la máquina desde una caldera con un contenido de unos 130 Kg. (En caso necesario pueden encontrarse calderas con un contenido hasta 250 Kg.) a través de una caldera de entrada. Entre los rodillos, la cera se solidifica, resultando una tira ancha de panal de cera la cual es cortada por lo ancho y lo largo, mediante la guillotina instalada detrás. El ancho se ajusta desplazando las cuchillas circulares, el largo puede regularse mediante un contador de ajuste previo, correspondiendo el número ajustado al largo en milímetros. Las diferencias de ancho y largo son inferiores a 1 mm.

Tabla 5. Dimensiones de la estampadora automática

Tipo	VA I	VA II
Tamaño de los rodillos	610 x 170 mm Ø	750 x 170 mm Ø
Rendimiento por hora en Kg.	20 - 30	25 - 40
Medidas de la máquina	300 x 135 x 240 cm.	300 x 150 x 240 cm.
Peso neto en Kg.	530	570

Fuente: <http://www.padiway.com>

Los panales de cera son apilados sobre una mesa elevadora de la cual pueden ser retirados para su embalaje.

A temperaturas bajas, sin embargo, los panales de cera colados no son tan elásticos como los panales laminados. El grabado normal es de unos 800 alvéolos por dm² en ambos lados.

ANEXO B. CARACTERISTICAS DIMENSIONALES DE LOS ALVEOLOS

Los esposos Lusby encontraron que el diámetro de los alvéolos difiere mucho según los fabricantes de máquinas estampadoras en los Estados Unidos y en el mundo. Y posteriormente publicaron su descubrimiento en 1990. Ellos hicieron un esfuerzo por resolver la cuestión pertinente al tamaño óptimo del alveolo, y su impacto en las colonias. Habiendo identificado para su propia satisfacción el diámetro óptimo para su área geográfica, la cual es el sur de Arizona. Ellos han trabajado mucho en la implementación del concepto de celdas pequeñas, y lo han proclamado durante bastante tiempo en las asociaciones de apicultores gracias a los buenos resultados que han obtenido en la reducción de fugas de colonias y de infestación en estas, en simultáneo con un incremento en la productividad de la colonia, Y así mismo muchos apicultores han seguido sus estrategias.

Así mismo también han desarrollado un mapa que identificaría el tamaño óptimo del alvéolo para uso del apicultor, el cual se basa en los tamaños naturales según la latitud. Las colonias de abejas domésticas que los apicultores crían y los científicos estudian, difieren muchísimo de las colonias silvestres. Esto se debe a que las abejas domésticas viven en colmenas artificiales, mientras que las abejas silvestres viven en poblaciones seleccionadas naturalmente, las cuales son autosuficientes y se han adaptado suficientemente a vivir en cavidades naturales. Es importante saber que los resultados de estudios hechos al usar abejas domésticas en cuadros Langstroth no son necesariamente aplicables a las abejas silvestres y viceversa. En la literatura se encuentra que la controversia por el tamaño óptimo del alvéolo lleva más de 100 años. Esto comienza cuando en 1857 Mehring inventó el concepto de la lámina de fundación, y los apicultores europeos

usaban alvéolos relativamente pequeños. Poco después el profesor Baudox, a través de su investigación en Bruselas, concluyó que el pequeño tamaño que se venía usando (920 alvéolos por decímetro cuadrado y 5 mm de diámetro) era deprimente para el desarrollo de las colonias y su productividad. Por lo que el experimentó con laminas de fundación de tamaño mayor de la celda y demostró que las abejas melíferas adultas eran de mayor tamaño cuando se criaban en celdas de tamaño mayor

Desafortunadamente el profesor baudox era un proponente de la teoría lamarkiana de la evolución, la cual hoy esta desaprobada, y que habla acerca de los cambios estructurales en plantas y animales al inducir sus órganos ó cuerpos en el uso de dispositivos externos que con el tiempo llevaran a adaptaciones progresivas a dichos dispositivos. Y es por esto que el profesor baudox propuso un alvéolo de 6 mm de diámetro.

Hay que decir que no existen reportes acerca de estudios que comparen la rata de crecimiento ó picos de población entre abejas grandes ó pequeñas. Aun así los investigadores han mostrado que las colonias de pequeñas abejas africanizadas tienen la capacidad de construir más rápidamente que las europeas. Sin embargo se necesita investigar mucho más acerca del impacto que tiene el tamaño del alveolo.

Sin embargo, aún más importante que eso, es la investigación del tamaño del alvéolo en el desarrollo individual de la abeja, su susceptibilidad a enfermarse, y otros factores bióticos y abióticos.

El tamaño natural de la colmena de obreras se encuentra en un rango de 700-950 alvéolos por decímetro cuadrados. Sin embargo parece ser que para la

mayoría de las razas de obreras el tamaño de la colmena se basa en un alveolo de 5.1 mm y Así mismo rangos de 5.1-5.3 mm. En los estados unidos a finales del siglo 19 el tamaño estándar del alveolo fue de 5.1mm, pero a principios del siglo 20 se realizó una transición hacia alvéolos de mayor diámetro por algunos fabricantes. En 1913, al menos 2500 estampadoras de plancha fueron vendidas en Europa por la rietsche con un tamaño de alveolo de 5.6 mm, y de esta manera el estándar mundial se localizó entre 5.6-5.4mm de diámetro, mientras en los estados unidos la mayoría de laminas de fundación e encuentran en el rango de 5.2-5.7mm de diámetro del alvéolo

Tabla 6 valores relativos para tamaños de alvéolos

# alveolos/dm ² (2 lados)	# alveolos/ plg	# alveolos/plg ² (2 lados)	cell width in mm ²
650	4.3	41.9	6.0
700	4.4	45.2	5.7
725	4.5	46.8	5.6
750	4.6	48.4	5.5
800	4.7	51.6	5.4
830	4.8	53.5	5.3
850	4.9	54.8	5.2
920	5.1	59.4	5.0
950	5.2	61.3	4.9
1050	5.4	67.7	4.7

Fuente: <http://www.beesource.com>

El número de alvéolos por decímetro cuadrado es una unidad de medida muy útil para manejar conceptos referentes a dinámicas poblacionales en las colonias y para el desarrollo de estrategias de manejo. Pero para efectos prácticos se maneja la distancia medida en una hilera de 10 alvéolos.

Para convertir alvéolos por decímetro cuadrado a alvéolos por decímetro lineal y después a mm, se usa la siguiente ecuación.

Ecuación 1:

$\text{alvéolos}/\text{dm}^2 = 2.31 \times N^2$ (donde N es el numero de alvéolos por dm lineal)

Ejemplo: $850 = 2.31 \times (19.18)^2$

al dividir 100 by el # de alvéolos por dm lineal se obtiene la longitud del alveolo.

Ejemplo: $100 / 19.2 = 5.2$

para convertir alvéolos por plg² a plg por alvéolo se tiene:

Ecuación 2:

$\text{alvéolos}/\text{plg}^2 = 2.31 \times N^2$ (donde N = numero de alvéolos por plg)

Ejemplo: $54.8 = 2.31 \times (4.87)^2$

Ecuación 3:

$\text{alvéolos}/\text{dm}^2 = 15.5 \times \text{alvéolos}/\text{plg}^2$

ejemplo: $850 = 15.5 \times 54.8$

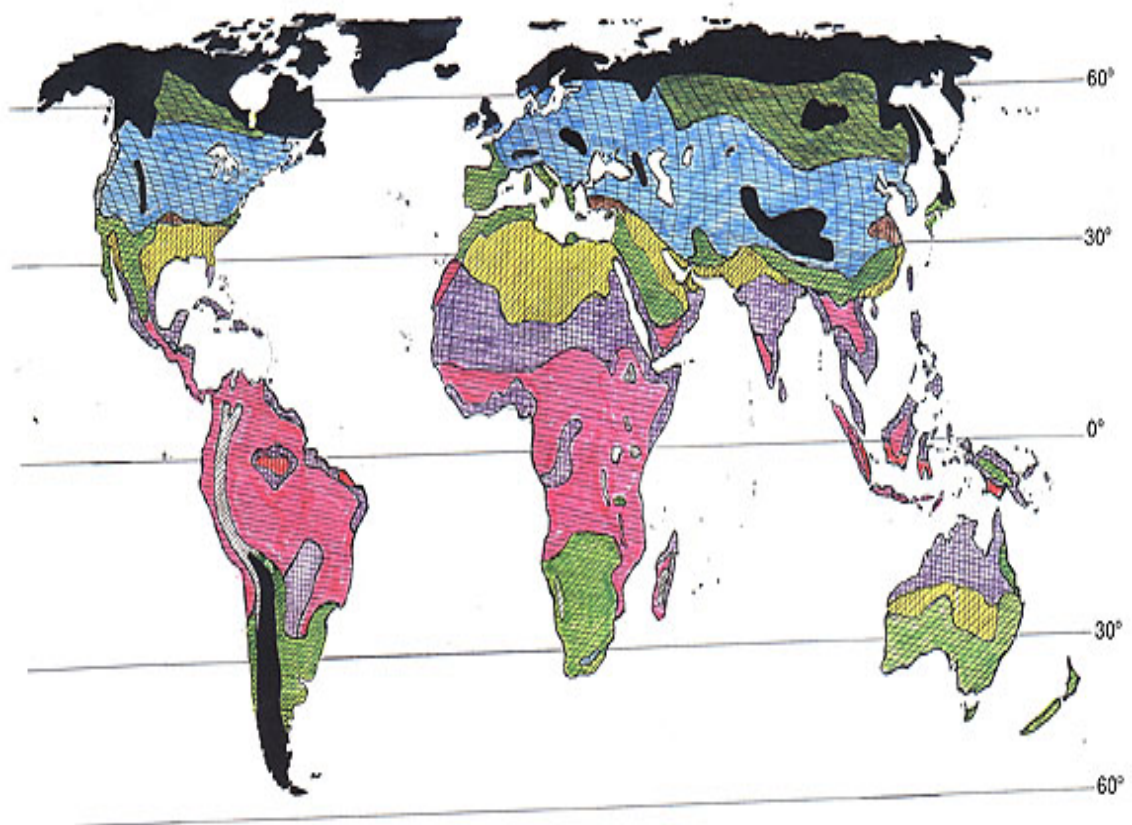
En la tabla siguiente se muestran medidas de los alvéolos y materiales usados en la fabricación de láminas de fundación producidas por varias casas industriales desde finales del siglo 19 hasta 1989. Y esta información también muestra datos de varios lugares del mundo. Lo que hace que esta información sea interesante y de alto valor comparativo.

Tabla 7 Documentación acerca de tamaños de alvéolos en estado silvestre

tipo	fuelle	Tamaño promedio del alveolo en mm
cera	África	4.76
cera	África	4.89
cera	A.I. Root (circa 1929)	5.05
aluminio	desconocido	5.10
molino	A.I. Root (circa 1929)	5.12
cera	L.A. Honey (1989)	5.15
cera	Miller (circa 1888)	5.18
cera	México	5.18
cera 5-3/8"	A.I. Root (1989)	5.18
cera	Glorybee, OR	5.19
cera	Tom Industries, CA	5.19
cera	Honey Acres, WI	5.19
molino	A.I. Root (1989)	5.20
cera 8-3/8"	A.I. Root (1989)	5.20
plástico	Arnaba, HI	5.21
plástico	unknown	5.23
plástico	unknown	5.28
cera	W.T. Kelly, KY	5.28
molino	A.I. Root (circa 1910)	5.29
cera	Brushy Mountain	5.30
plástico	unknown	5.35
cera 8-5/16"	Dadant (med. brood)	5.36
cera	Honey Acres, WI	5.39
cera 5-1/2"	Dadant (med. brood)	5.39
Duraguilt	Dadant	5.40
cera	Bolivia	5.44
7-11	W.T. Kelly, KY	5.53
Perma-dent	Draper's, NE	5.56
Perma Comb	Perma Comb	5.64

Fuente: <http://www.beesource.com>

Figura 157. Mapa termológico del tamaño del alvéolo en el mundo según Lusby



Dee Lusby · Feb. 1998

**HONEYBEE
THERMOLOGY/CELL SIZE
ZONES**

MONTHLY TEMPERATURE MEANS	GENERAL CELL SIZES	COLOR ZONE
-0F - 60F / 80F	5.0 mm - 5.2 mm	
0 / 40F - 60F / 80F	4.9 mm - 5.1 mm	
0 / 40F - above 80F	4.8 mm - 4.9 mm	
40F / 60F - 40F / 60F	4.9 mm	
40F / 60F - 60F / 80F	4.8 mm - 5.0 mm	
40F / 60F - above 80F	4.7 mm - 4.9 mm	
60F / 80F - 60F / 80F	4.6 mm - 4.8 mm	
60F / 80F - above 80F	4.7 mm - 4.9 mm	
above 80F - above 80F	4.5 mm - 4.7 mm	

Fuente: <http://www.beesource.com>

ANEXO C. PROPIEDADES DEL ESTAÑO

No hay duda de que el estaño fue uno de los primeros metales conocidos por la humanidad. Aún así la historia no expone un punto de referencia que nos permita saber el lugar, la fecha y el propósito en que se comenzó a usar el estaño. El hallazgo de objetos antiguos a los que se puede otorgar una fecha junto con un análisis químico, han sido los únicos puntos de referencia hasta el momento, lo que nos ha permitido saber que su uso se extiende muchísimo tiempo atrás.

PROPIEDADES DEL ESTAÑO PURO

Gracias a que el estaño es un metal fácil de manipular y de obtener en un estado de alta pureza, monocristalino y policristalino, sus propiedades físicas han sido objeto de considerables investigaciones, para obtener información del estaño y para el estudio de los estados líquido y sólido del mismo.

Algunas de sus propiedades son:

- Modulo de elasticidad: 4240 kg/mm^2 (fundición) a temperatura ambiente
- Modulo de rigidez: 1640 Kg./mm^2
- Razón de poisson : 0.33
- Resistencia a la fatiga: 10^7 ciclos- $\pm 0.3 \text{ kg/mm}^2$ y para 10^8 ciclos $\pm 0.27 \text{ kg/mm}^2$
- Dureza: la dureza del estaño puede variar de 4.2 HBN a 0°C hasta 0.7 HBN a 220°C

Es curioso encontrar que aunque el estaño tiene un punto de fusión bajo, su punto de ebullición es bastante alto y la diferencia en grados entre estos dos puntos superan a la de muchos metales, siendo comparable este rango solo con el rango del galio. La densidad del estaño blanco (7.29 g/cc) esta por el

orden de otros metales familiares. Aunque hay que tener en cuenta que cuando el estaño se encuentra como gris (el cual posee una estructura diferente al blanco) su densidad es de tan solo 5.77 g/cc. Y así se observa que un incremento del 25% en volumen es acompañado por una transformación de estaño blanco a estaño gris. Tal cambio de volumen es único en los metales alotrópicos y es indeseable ya que viene acompañado de corrupción en el metal.

ANEXO D. PRINCIPIO DE LAMINACIÓN

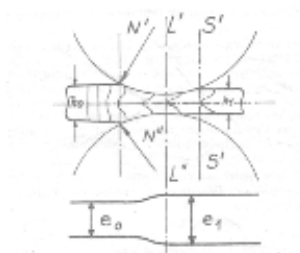
Laminar es deformar una masa metálica haciéndola pasar entre dos cilindros superpuestos, que giran en sentido inverso. Esta operación puede hacerse en caliente ó en frío. La laminación en frío se realiza a temperatura ambiente y por lo tanto los materiales adquieren acritud al deformarse, por lo que deben recocerse al terminar la operación. Los materiales aptos para laminación son los mismos materiales que son aptos para ser trabajados por forja. De ellos los que en mayor volumen son trabajados son los aceros.

Las deformaciones producidas en la laminación por medio de cilindros son:

- Recalcado a la entrada: las fuerzas normales y de reacción de los cilindros producen en este una especie de recalcado, que se traduce en un aumento de la sección de la pieza inmediatamente detrás de la sección de contacto con los cilindros.
- Deformación máxima: la deformación máxima tiene lugar en el plano que pasa por los ejes de los dos cilindros.

Dilatación a la salida: al salir el material de los cilindros y cesar sobre la presión que estos ejercían, aumenta su espesor debido a la elasticidad del material. Ver figura 10.

Figura 158. Principio de laminación

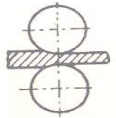
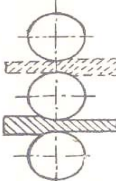


Fuente: ZEEDERLER, Alfred. Aleaciones ligeras. Madrid: Aguilar, 1955. P.185.

La disposición de los cilindros en las cajas depende de la función del tren de laminación y de la producción necesaria. Para esto existen cajas con cilindros horizontales y cajas con cilindros verticales. Las cajas con cilindros horizontales son las más comunes. Existen 8 clases diferentes de cajas horizontales. Entre estas se encuentran las cajas dúos que se componen de dos cilindros horizontales, dispuestos el uno sobre el otro (Ver tabla 5).

Otros tipos de cajas horizontales bastante comunes son las cajas tríos (ver tabla 5), la cuales se componen de tres cilindros horizontales dispuestos uno encima de otro. En estas cajas la pieza es laminada en ambas direcciones sin necesidad de invertir la marcha. Los trenes con cajas de este tipo han comenzado a ser desplazados por trenes dúos más productivos, en los que la pieza hace solamente una pasada entre los cilindros en cada caja y en este caso no se necesita cambiar de dirección.

Tabla 5. Cajas horizontales más comunes de laminación

Disposición de los cilindros	Nombre de la caja	Empleo
<p>FIG. 1</p> 	Dúo	<p>a) Laminadores reversibles para laminar perfiles grandes (blooms), vigas y carriles y chapas gruesas.</p> <p>b) Trenes de gran producción para laminar semiproductos y secciones.</p> <p>c) Laminadores de bandas (método antiguo).</p> <p>d) Laminadores de reducción en frío para bandas estrechas y anchas.</p>
<p>FIG. 2</p> 	Trío	<p>a) Para laminar vigas, carriles, semiproductos, lingotes, y otras formas.</p> <p>b) Para laminar perfiles en pequeños tonelajes.</p>

Fuente: TSELIKOV, A, y SMIRNOV, V. Trenes de laminación. Bilbao: Ediciones urmo, 1970. P.74.

ANEXO E. LISTADO DE PLANOS

Los planos se codificaron según subconjuntos de la siguiente forma:

01.00.00: LAMINADORA Y ESTAMPADORA DE ESTAÑO

01.01.00: ESTRUCTURA

01.01.01: marco vertical

01.01.02: marco horizontal

01.01.03: base del reductor

01.01.04: base de la estructura

01.02.00: SOPORTE VERTICAL

01.02.01: rodillo de soporte principal

01.02.02: rodillo de soporte auxiliar

01.02.03 chumacera del rodillo principal

01.02.04: buje del rodillo de soporte principal

01.03.00: CONJUNTO LAMINADOR

01.03.01: rodillo laminador

01.03.02: viga de soporte del rodillo laminador

01.03.03: parte inferior de la chumacera del rodillo laminador

01.03.04: parte superior de la chumacera del rodillo laminador

01.03.05: buje del rodillo laminador

01.03.06: buje de la guía vertical

01.03.07; soporte del buje de la guía vertical.

01.04.00: GRUPO DE GUÍAS.

01.04.01: guía vertical

01.04.02: tope inferior de la guía vertical

01.04.03: tope superior de la guía vertical

01.04.04: guía horizontal

01.05.00: SISTEMA DE EMPUJE

01.05.01: tornillo de potencia

01.05.02: tuerca de potencia

01.05.03: polea del reductor

01.05.04: polea del motor

01.05.05: cuña del reductor

01.05.06: cuña del tornillo de potencia

01.05.07: cuña del motor

01.05.08: cuña de la polea del reductor

01.05.09: buje axial

01.05.10: estrella metálica del acople tipo araña

01.05.11: chumacera del rodamiento axial

01.06.00: CONJUNTO MOVIL

01.06.01: portamatriz

01.06.02: matriz

01.07.00: SISTEMA DE ELEVACIÓN

01.07.01: base de la polea grande de elevación

01.07.02: polea grande de elevación

01.07.03: base de la polea mediana de elevación

01.07.04: polea mediana de elevación

01.07.05: cubreguaya

01.07.06: centraguaya

01.7.07 polea pequeña de elevación y soporte

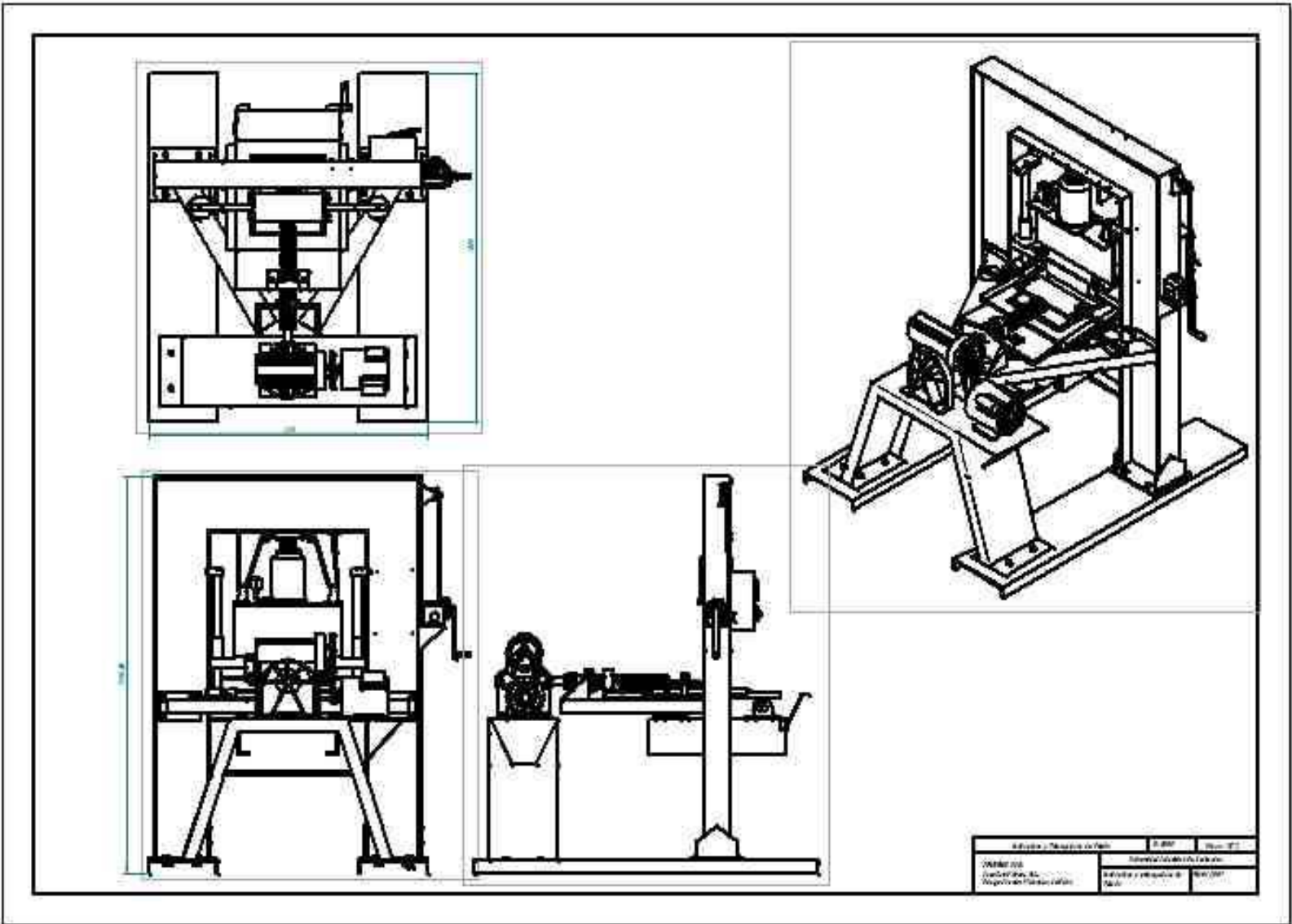
01.08.00 CALENTADOR

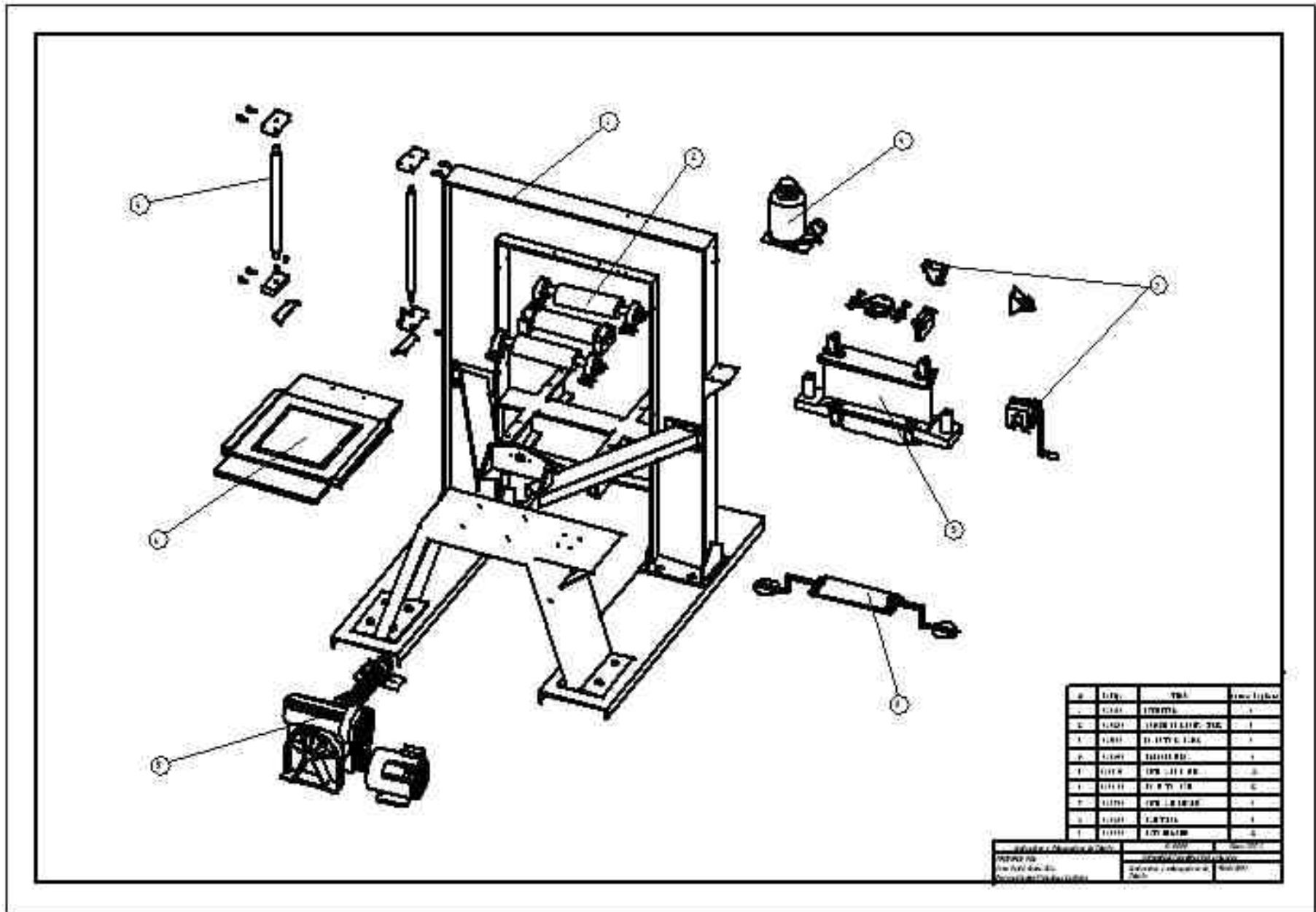
01.08.01: estructura del calentador.

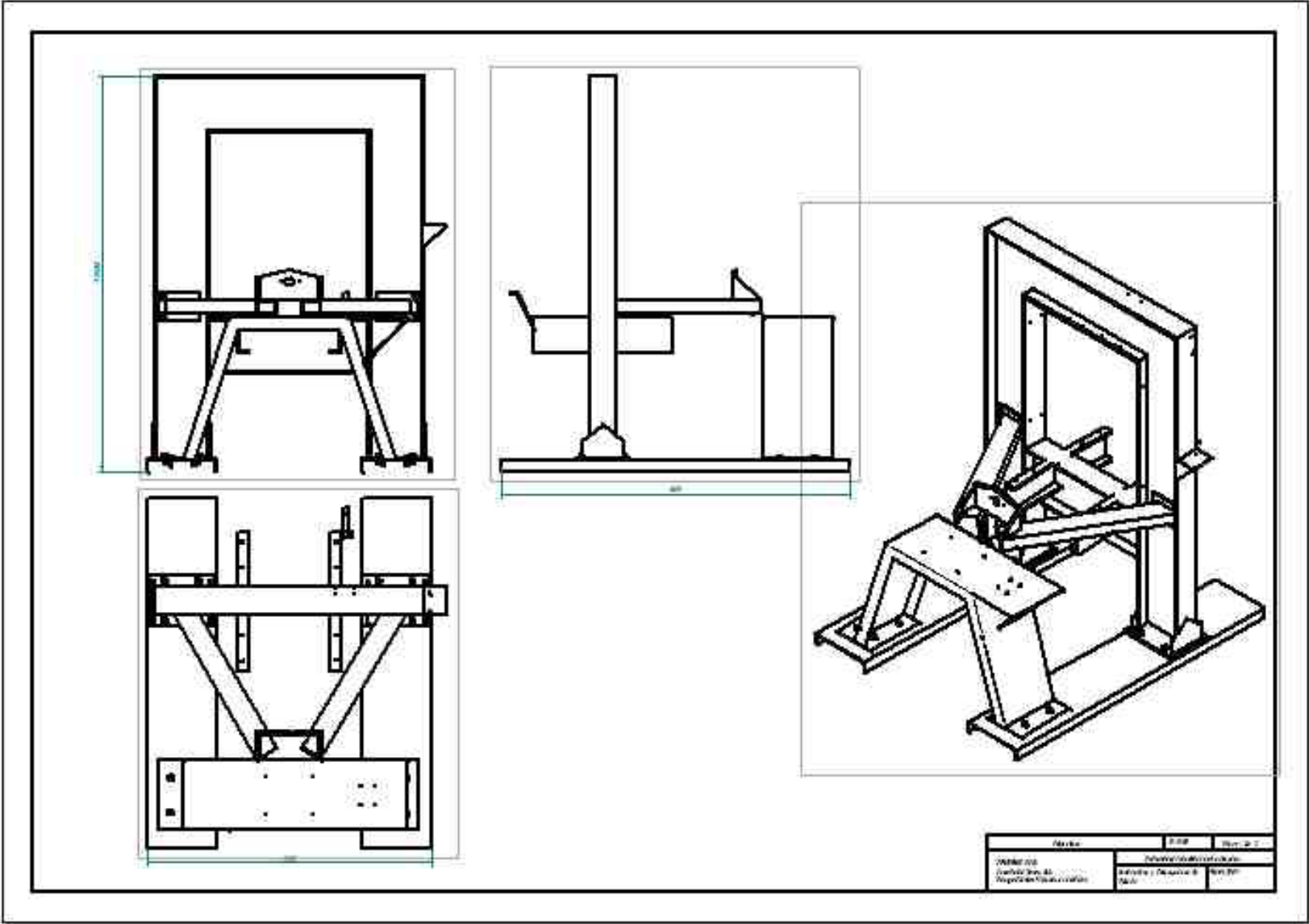
01.08.02: resistencia eléctrica

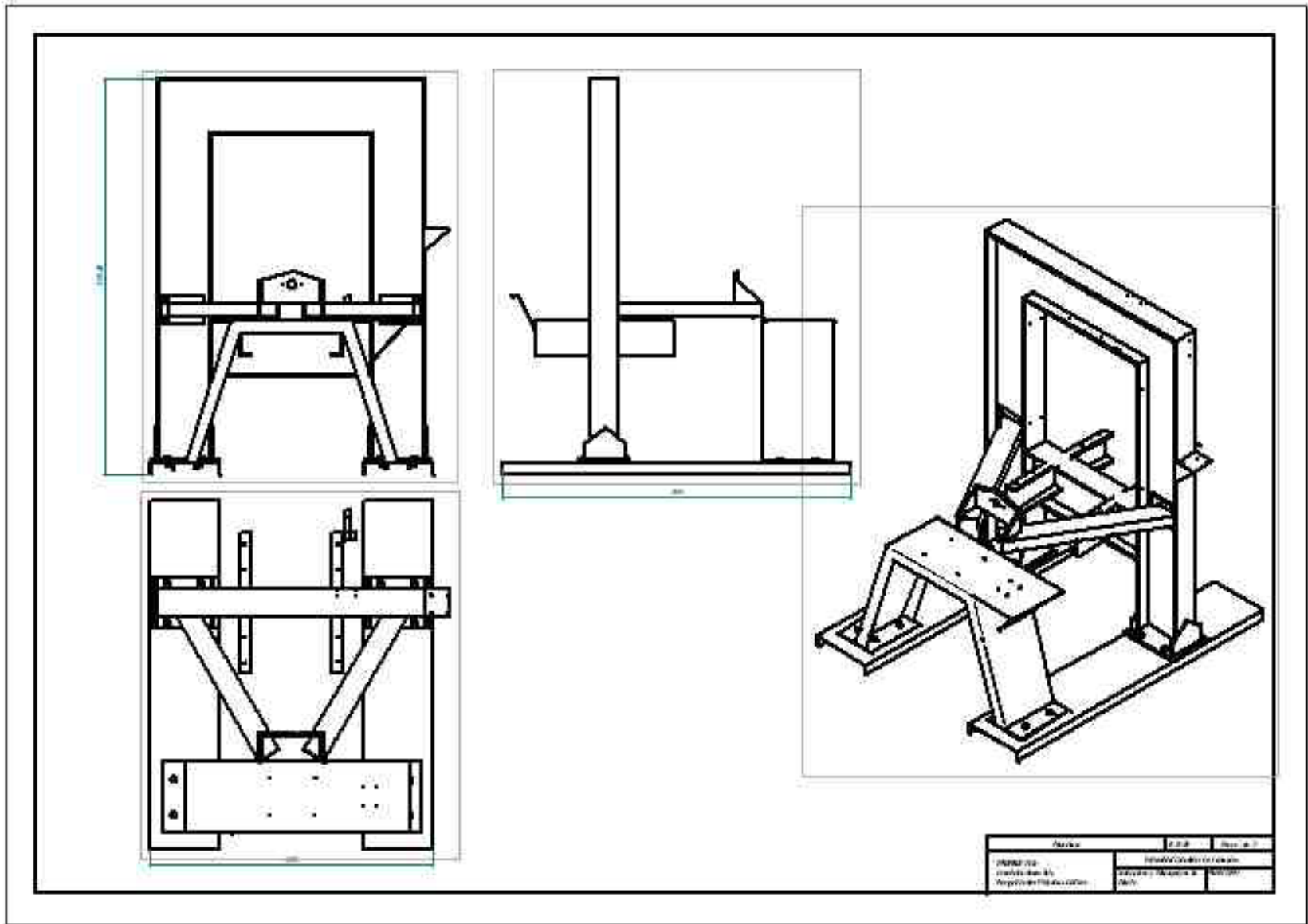
01.08.03: imán

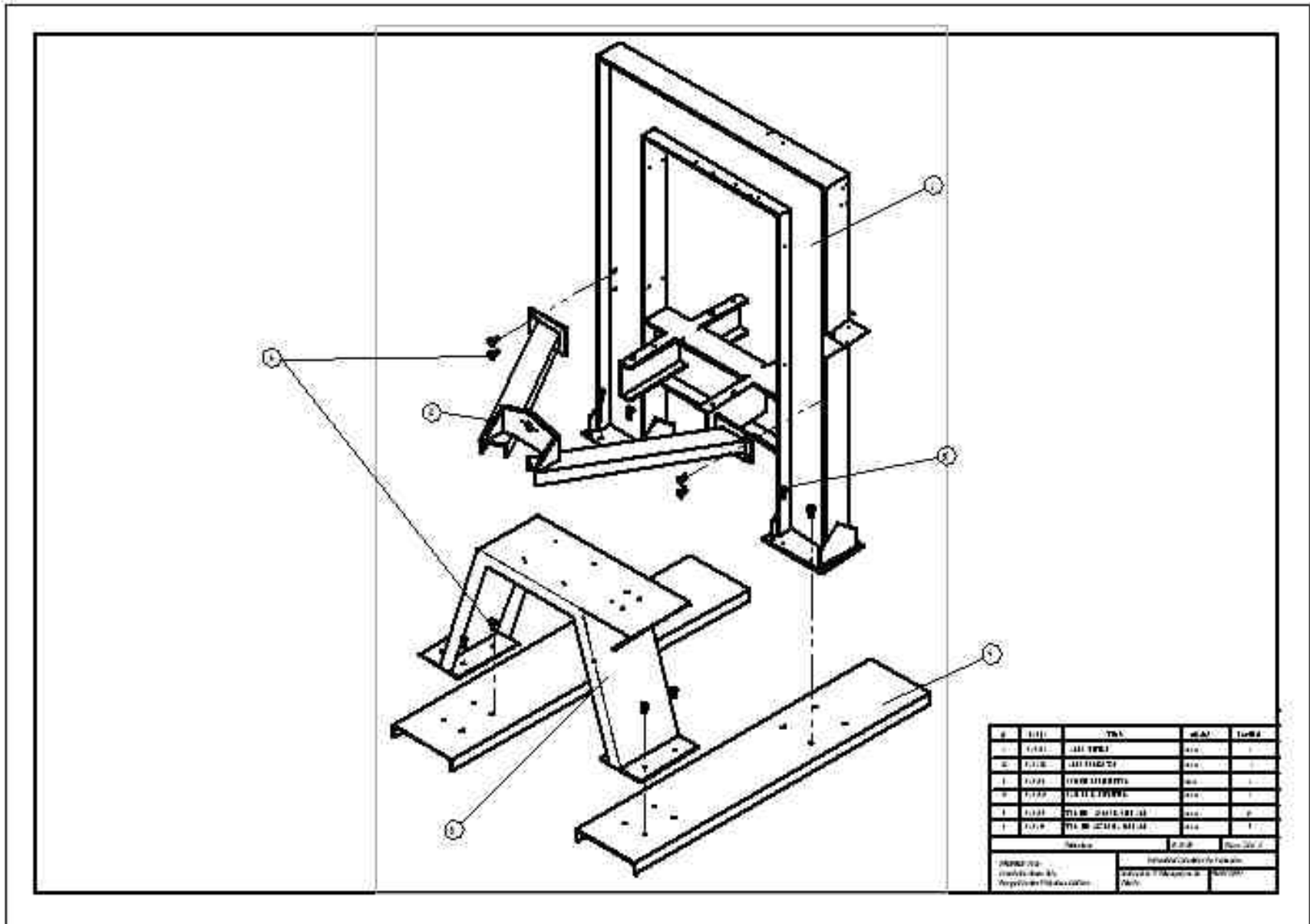
01.08.04: aislante

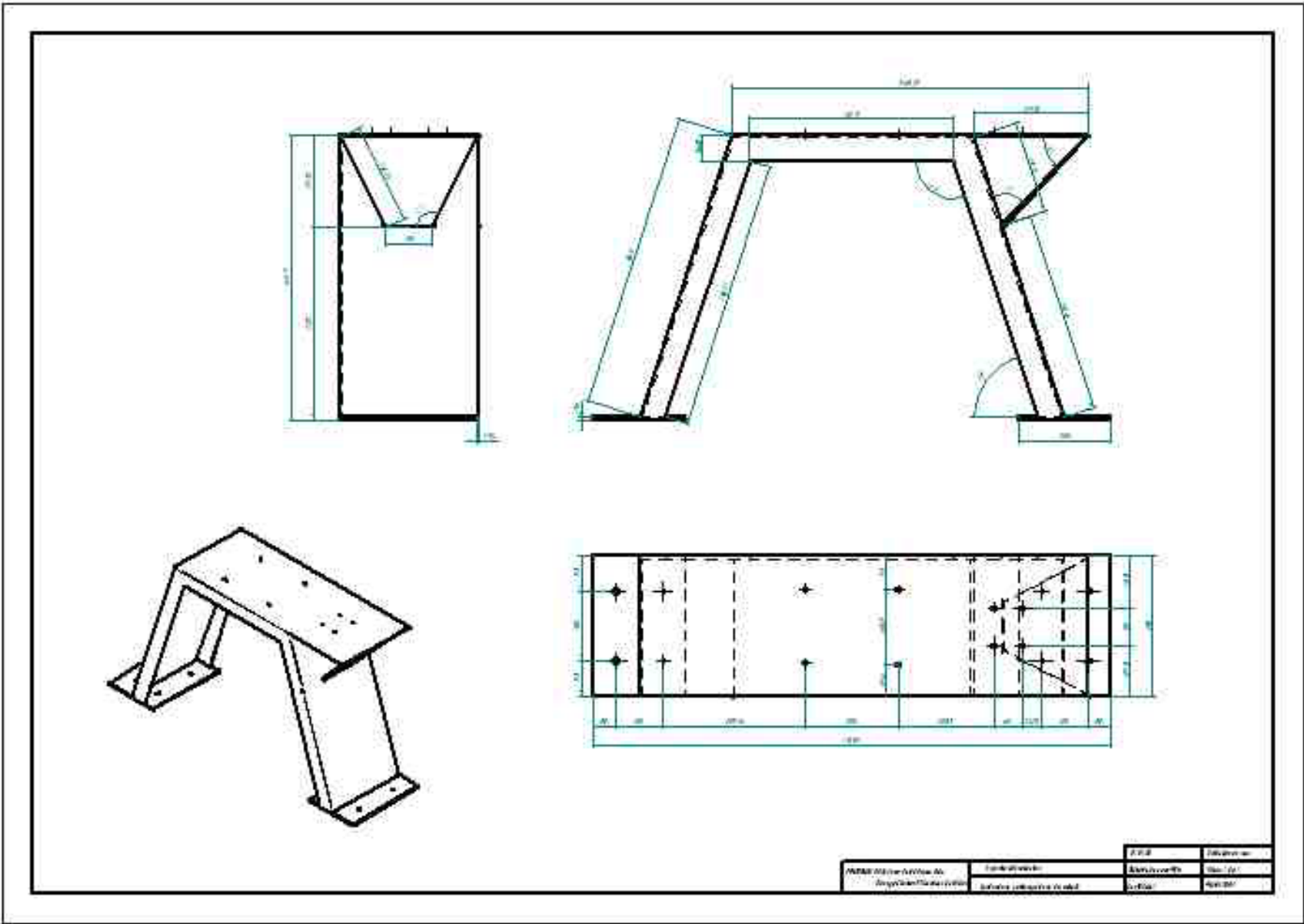


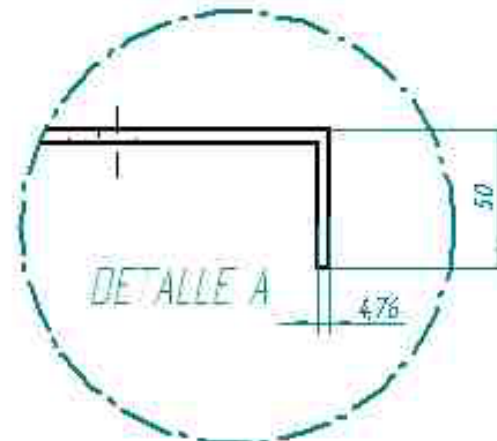
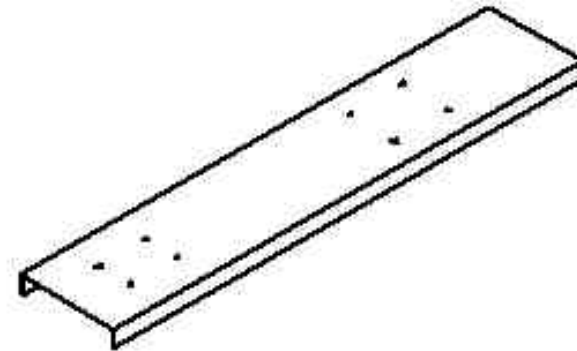
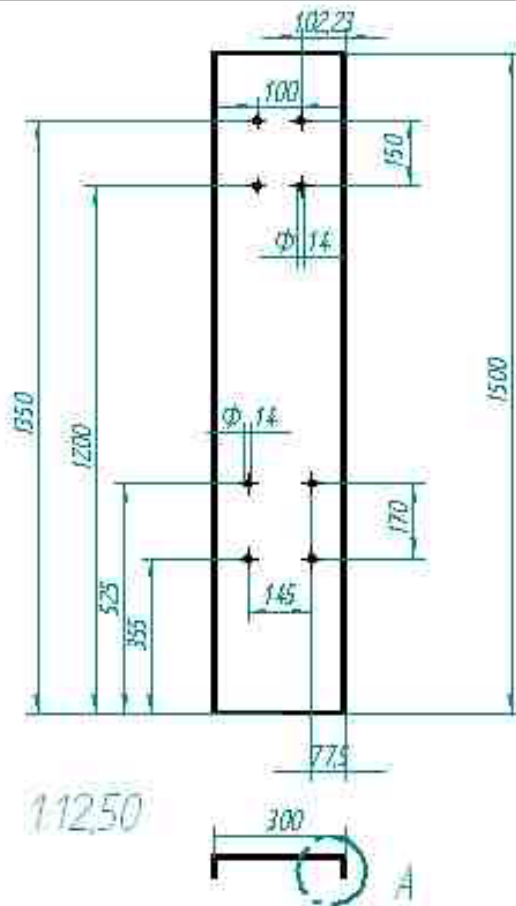








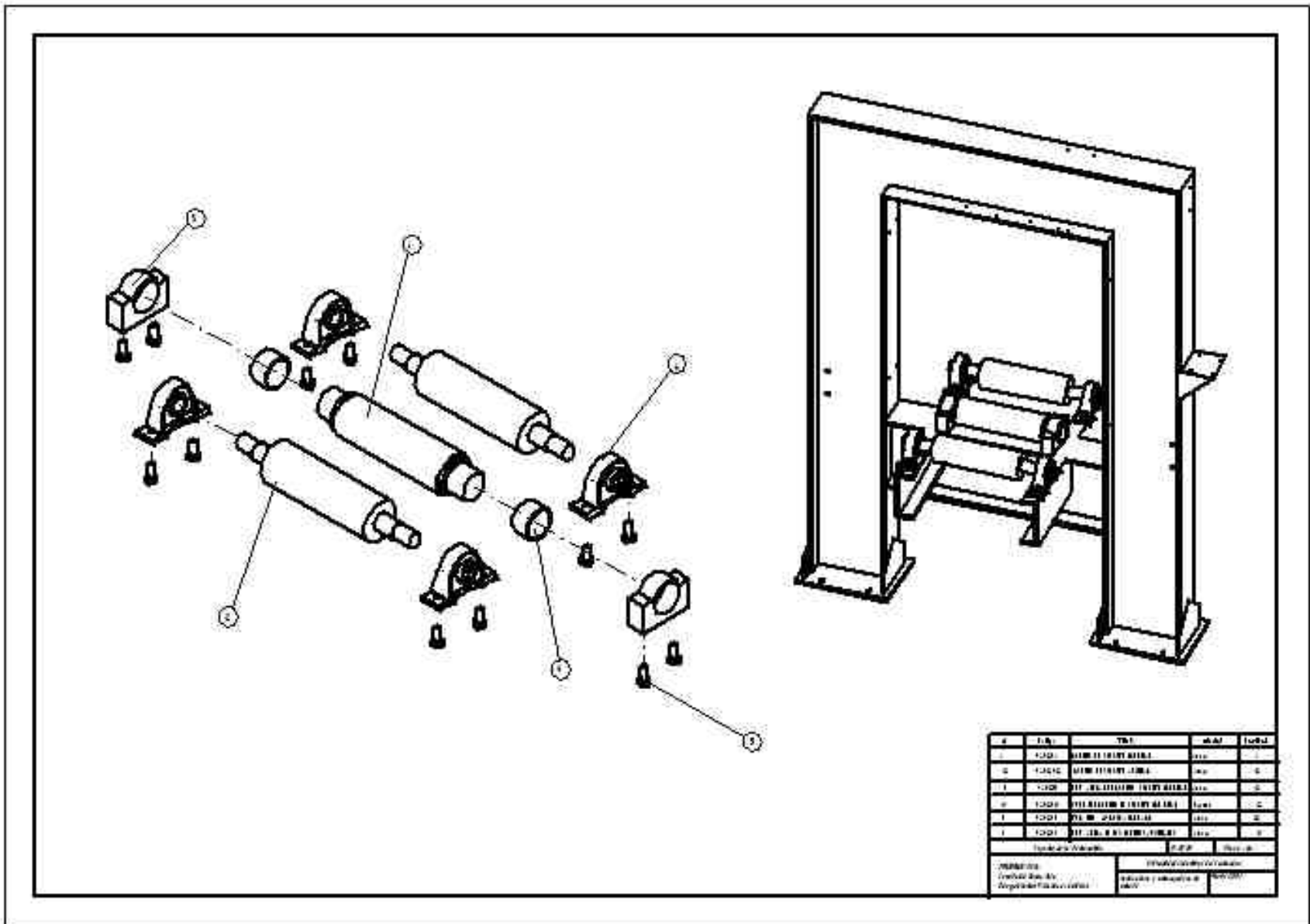


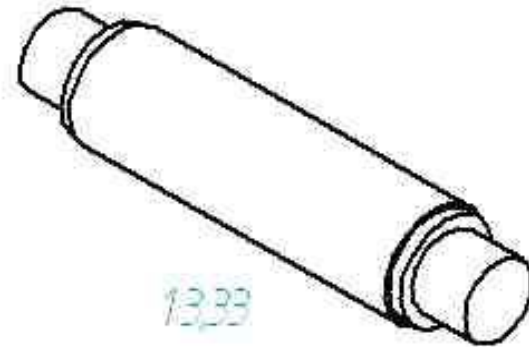


11250

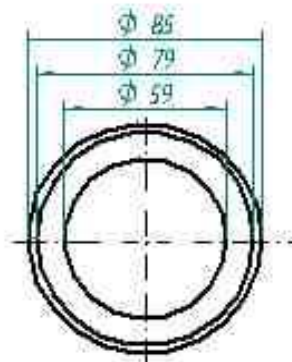
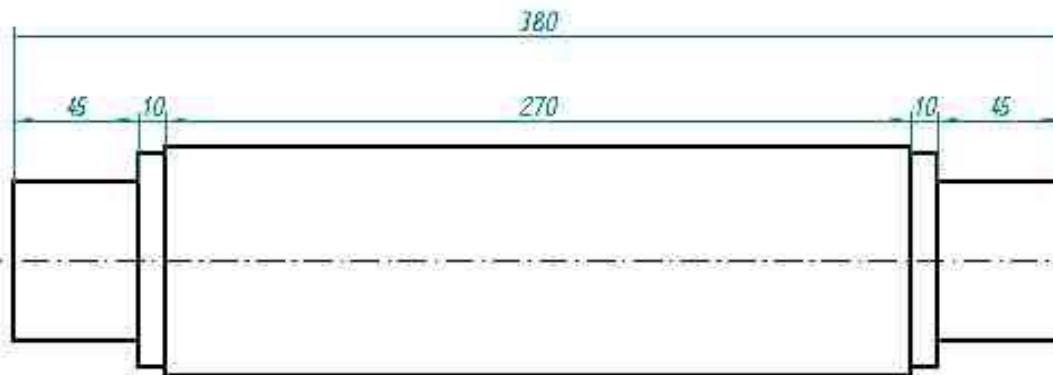
11250

		01.01.04	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cabillas	Base de la estructura	Material: acero A36	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 1	Abril 2004



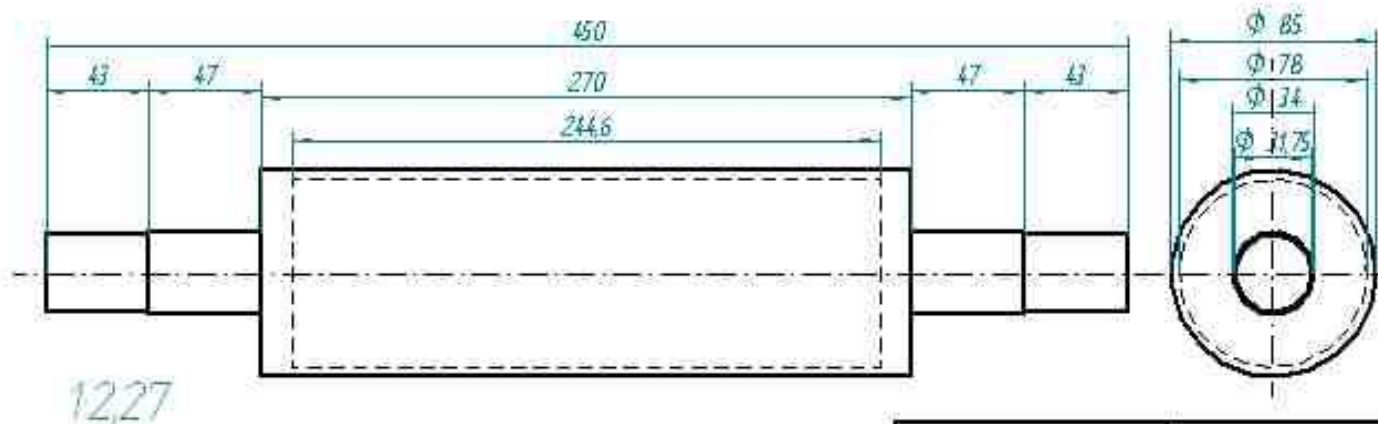
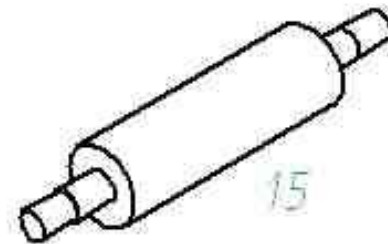


13.33



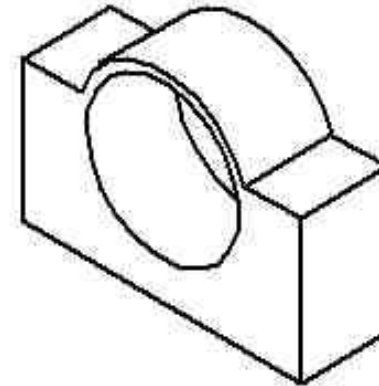
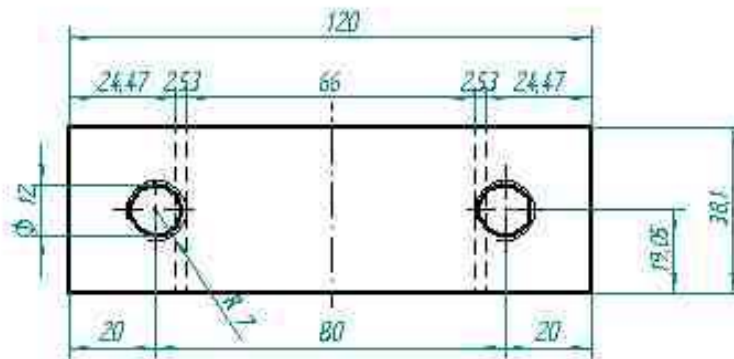
12

		01.02.01	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	Rodillo de soporte principal	Material: acero 1045	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 1	Abril 2004

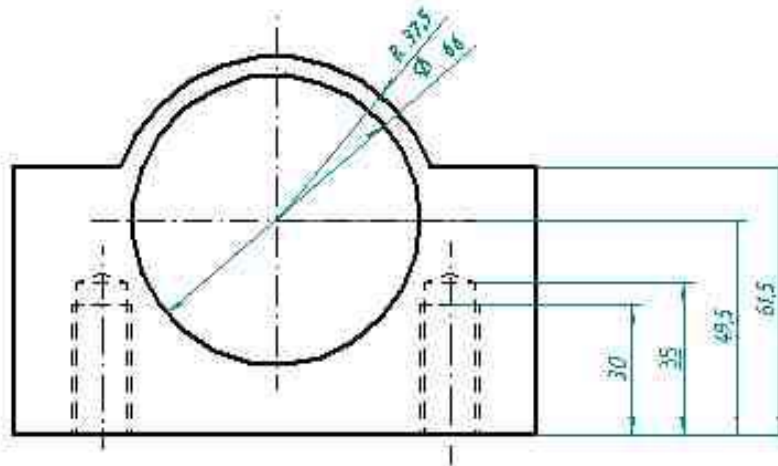


12,27

		01.02.02	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz	Rodillo de soporte auxiliar	Material: acero 1020	Plano 1 de 1
George Charles Villamizar Lubillos	Laminadora y estampadora de estopa	Cantidad: 2	Abril 2004



11,67

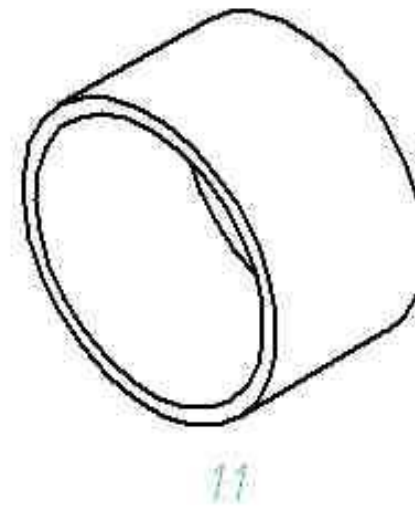
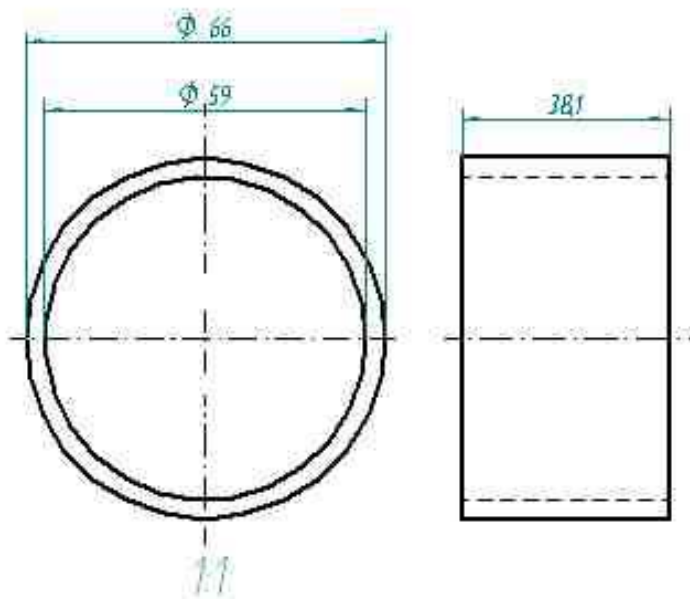


11,25

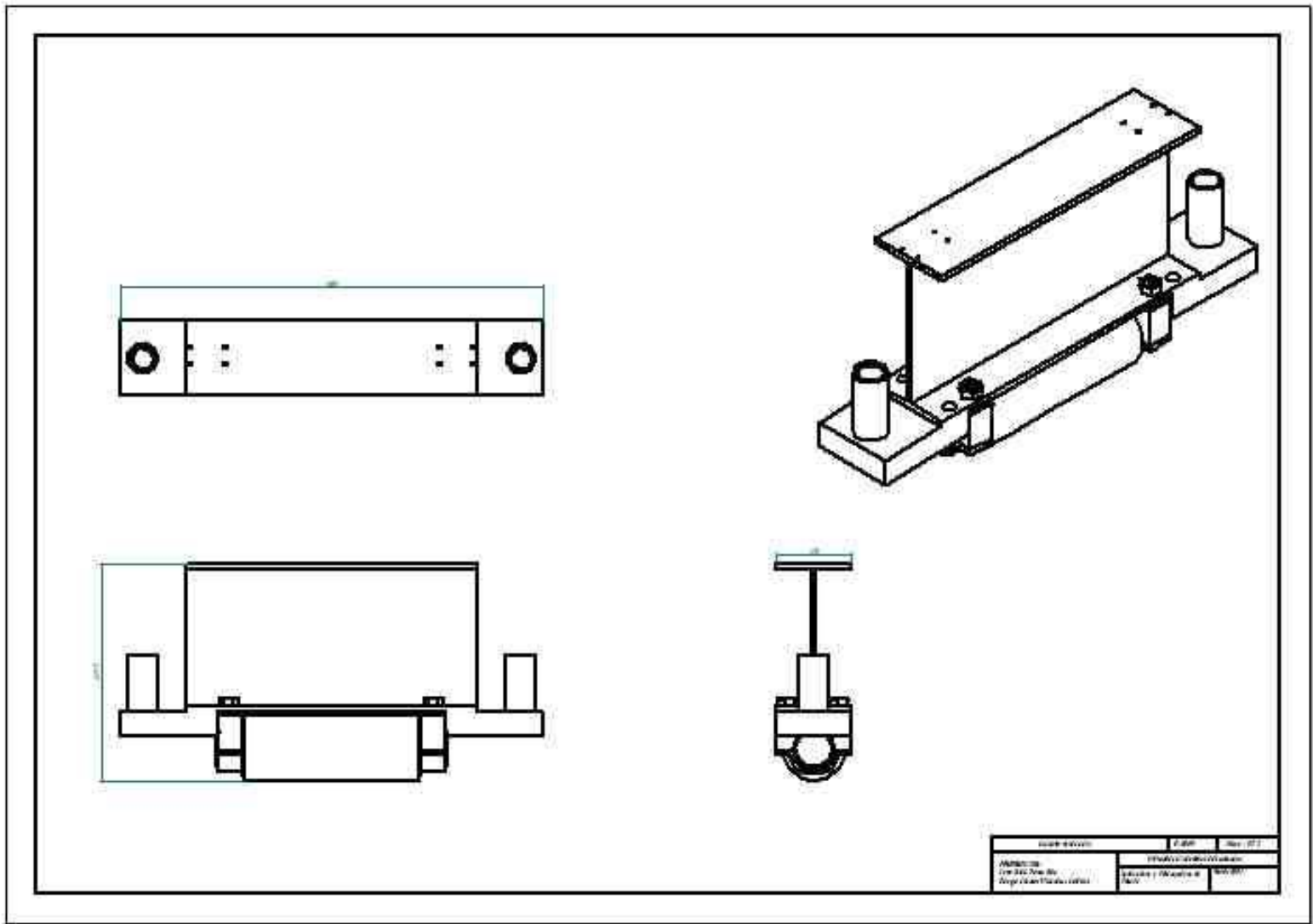
Elaborado por: José David Pérez Ruiz
George Charles Villamizar Cubillos

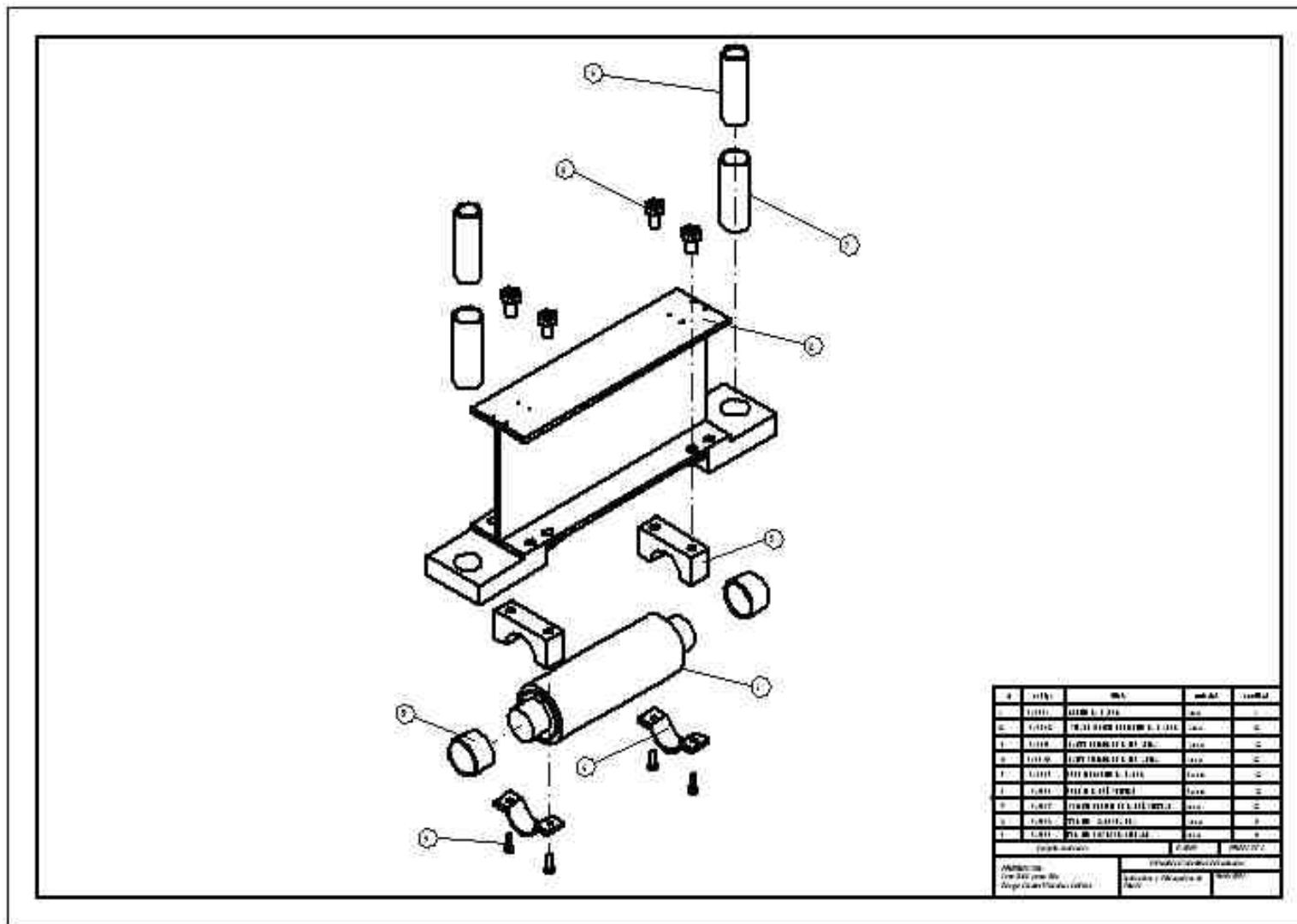
Chumacera del rodillo de soporte principal
laminadora y estampadora de estano

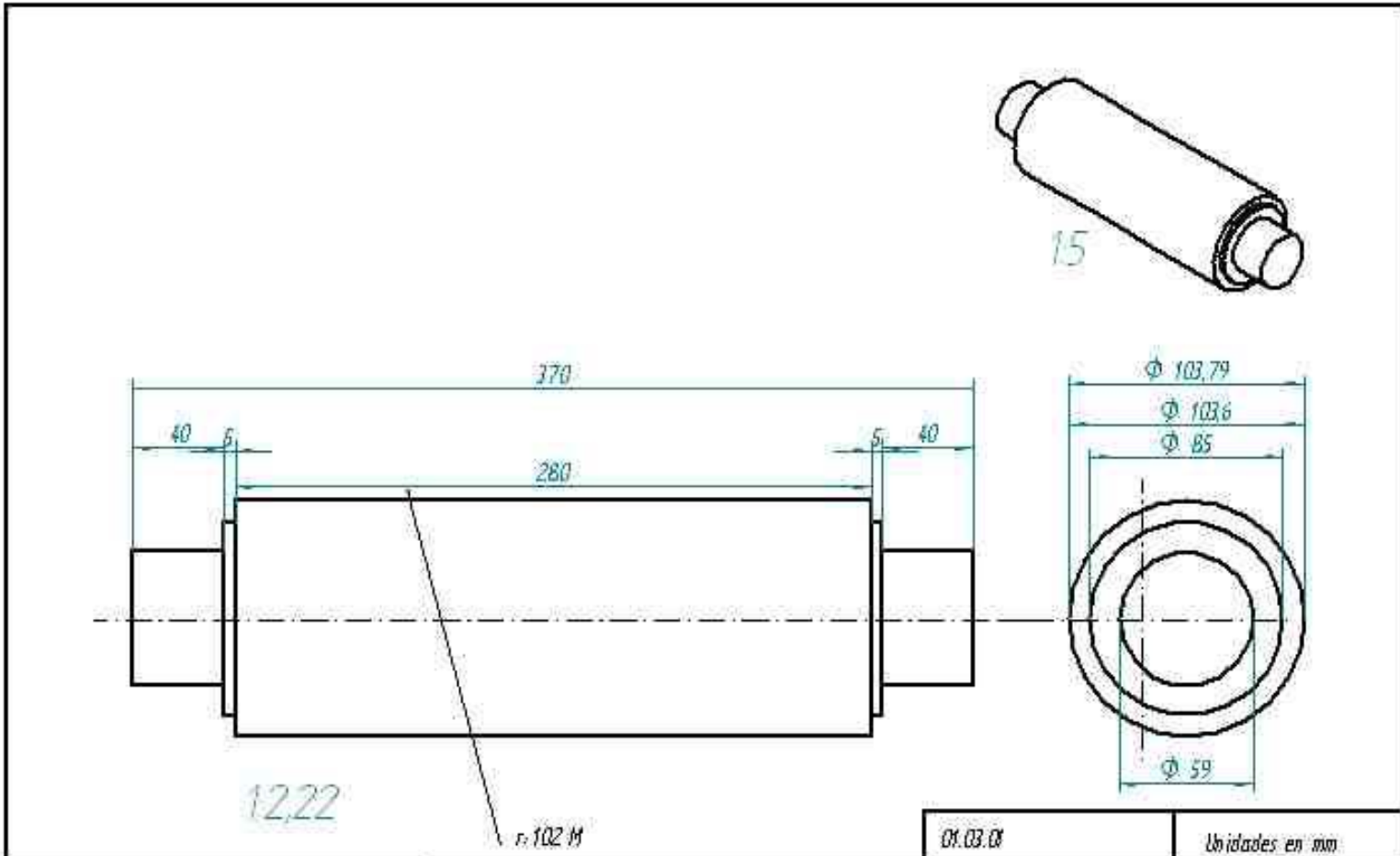
01.02.08	Unidades en mm
material: Acero A36	Plano 1 de 1
cantidad: 2	Abril 2004



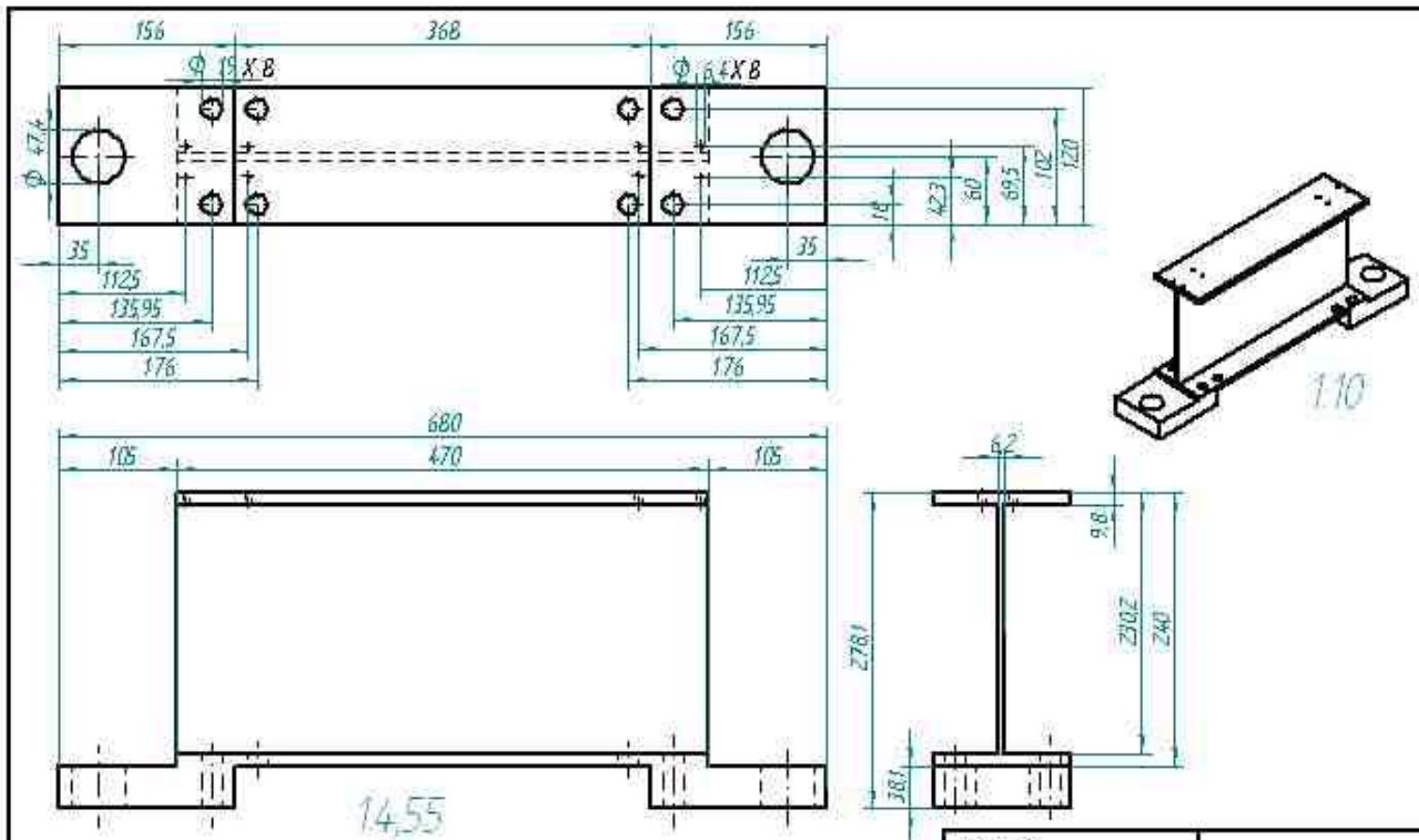
		01.02.04	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Lubillos	Boje del rodillo de soporte principal	Material: bronce	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 2	Abril 2004







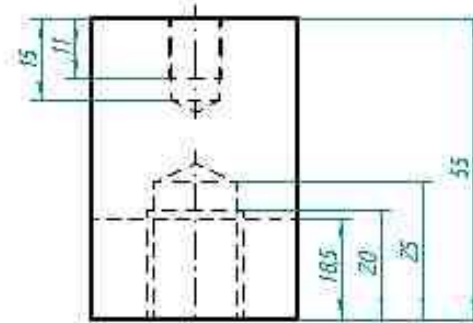
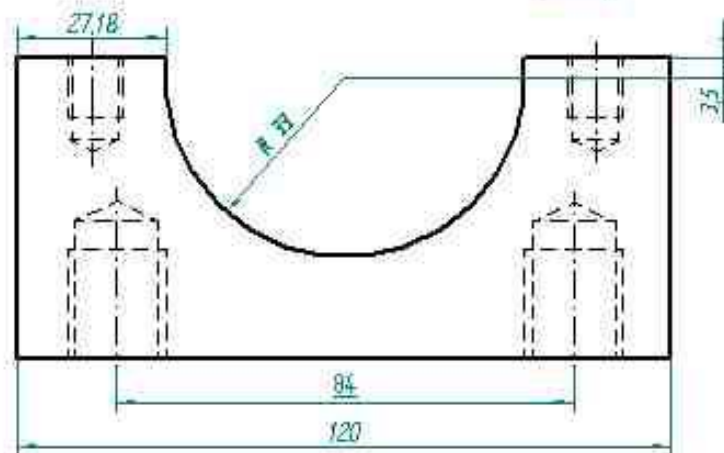
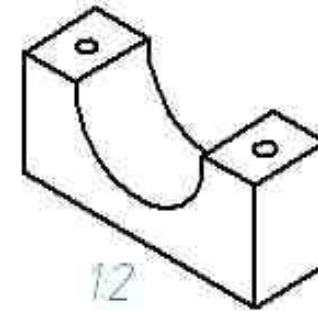
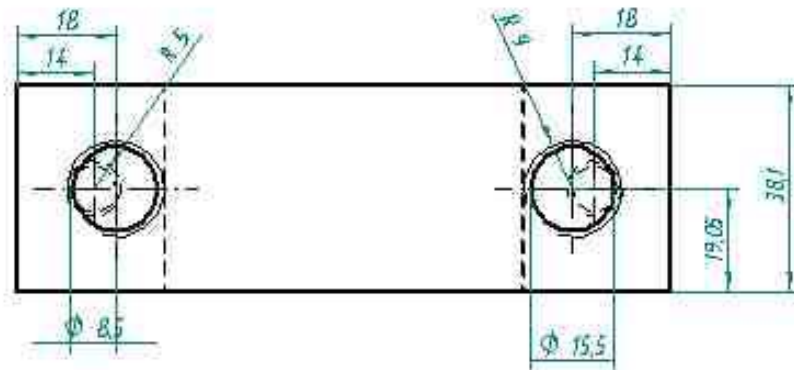
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cobillos		Rodillo laminador	01.03.08	Unidades en mm
		laminadora y estampadora de estado	Material: Acero 1045	Plano 1 de 1
			Cantidad: 1	Abril 2004



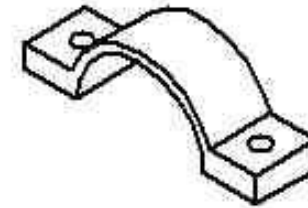
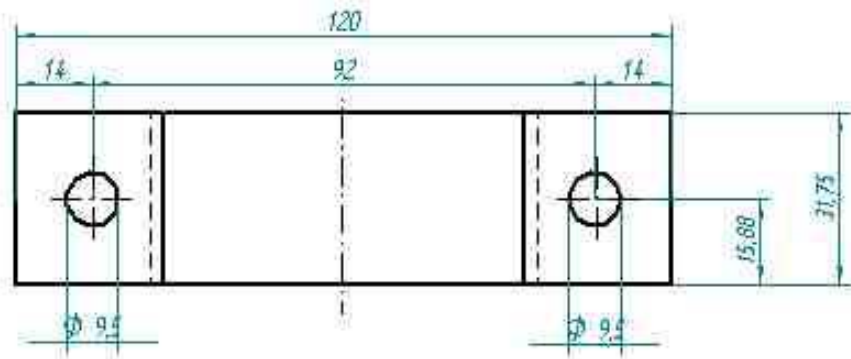
Elaborado por: José David Pérez Ruiz
George Charles Villamizar Cubillas

Viga de soporte del rodillo laminador
laminadora y estampadora de estado

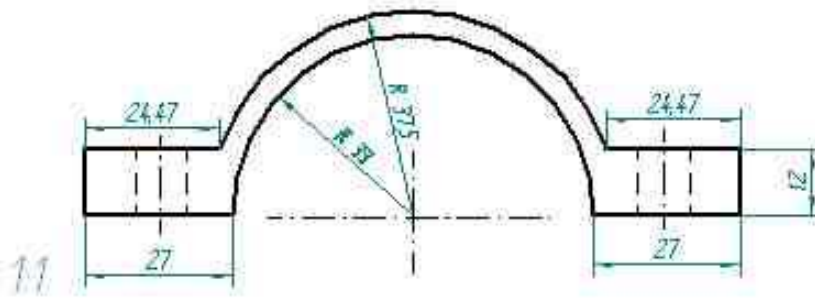
01.03.02	Unidades en mm
Materia: acero A-36	Plano 1 de 1
Cantidad: 1	Abril 2004



Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	Parte inferior de la chumacera del rodillo laminador	01.03.08	Unidades en mm
	laminadora y estampadora de acero	materia: acero A36	Plano 1 de 1
		cantidad: 2	Abril 2004

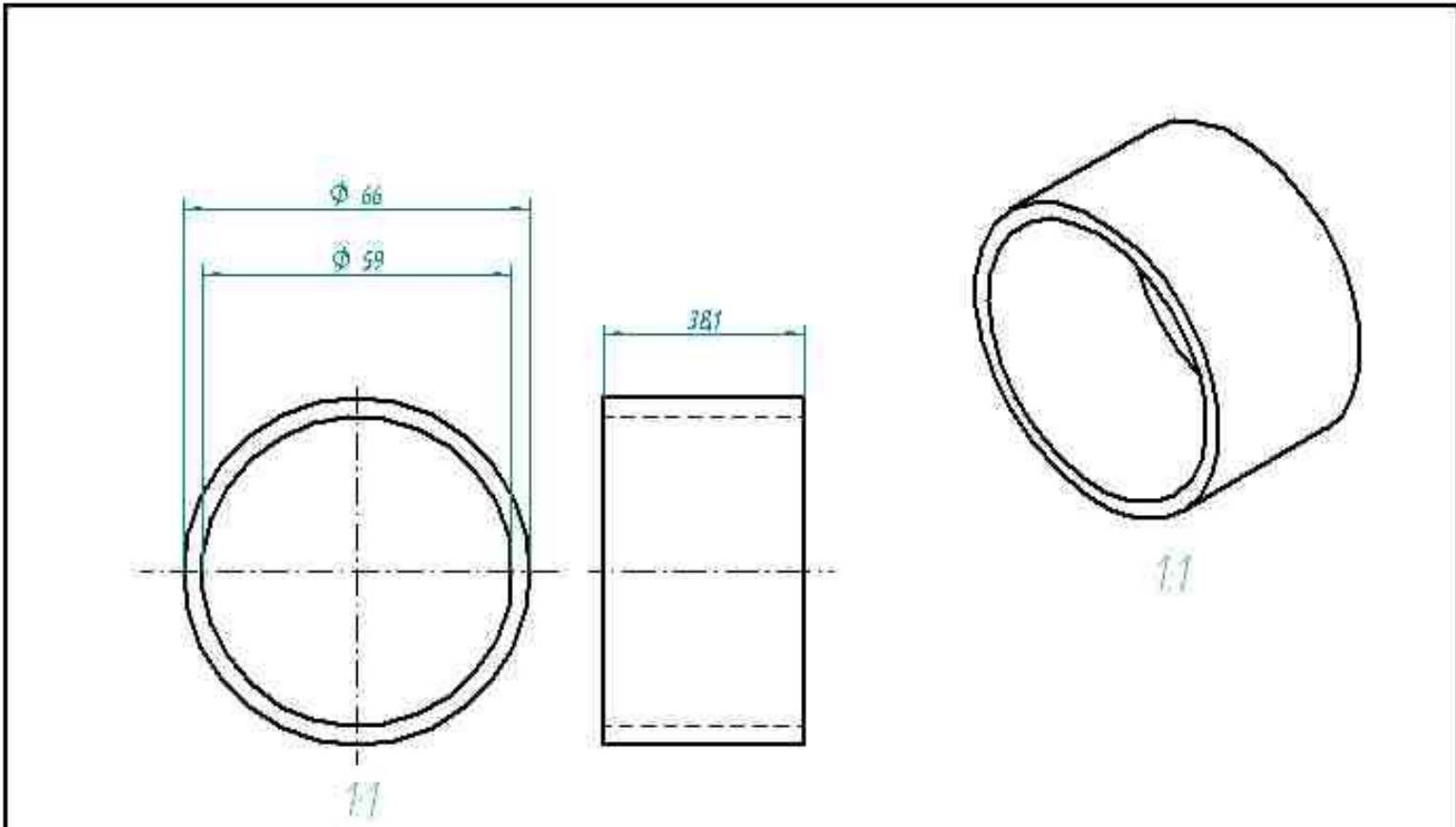


12

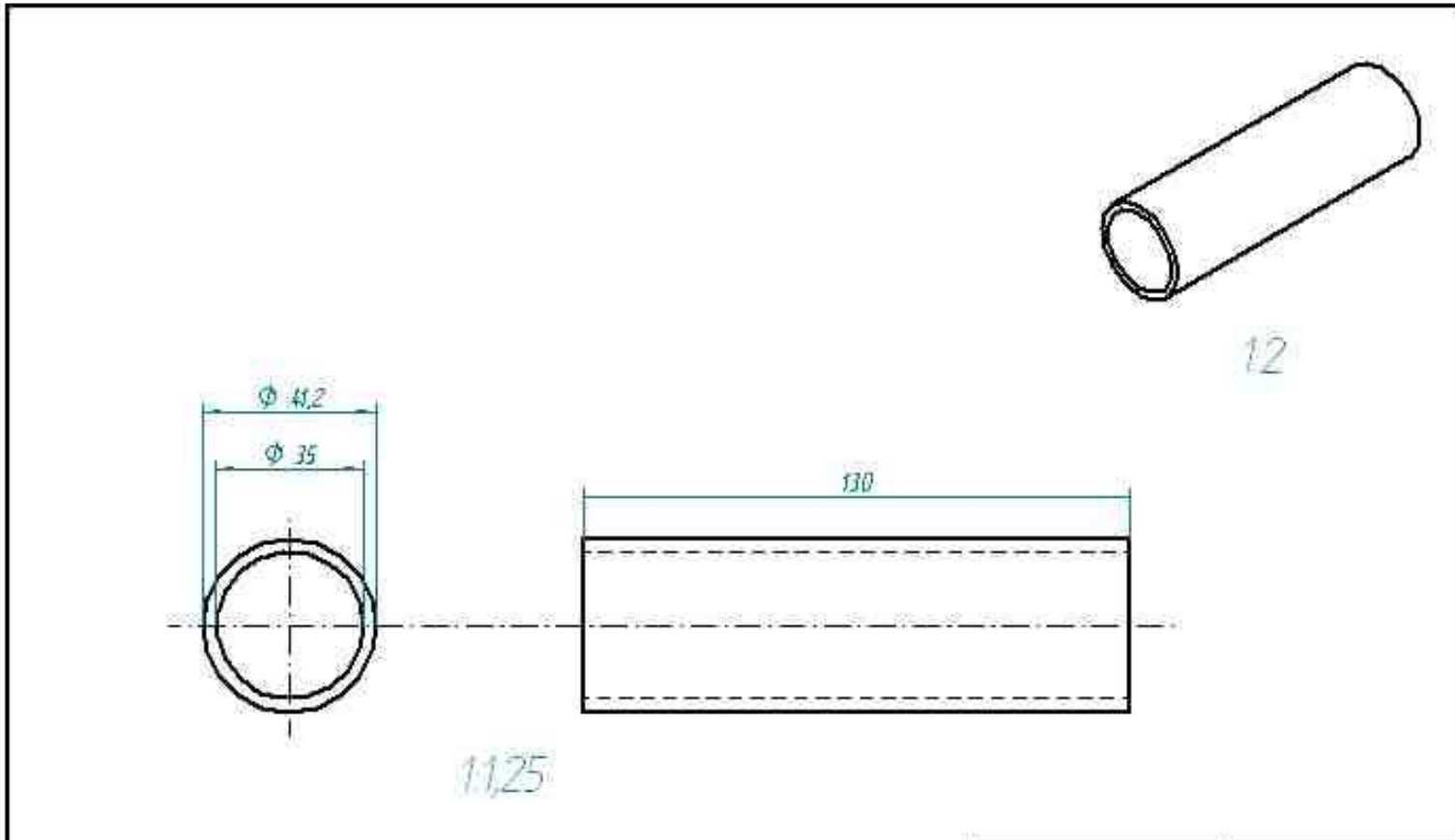


11

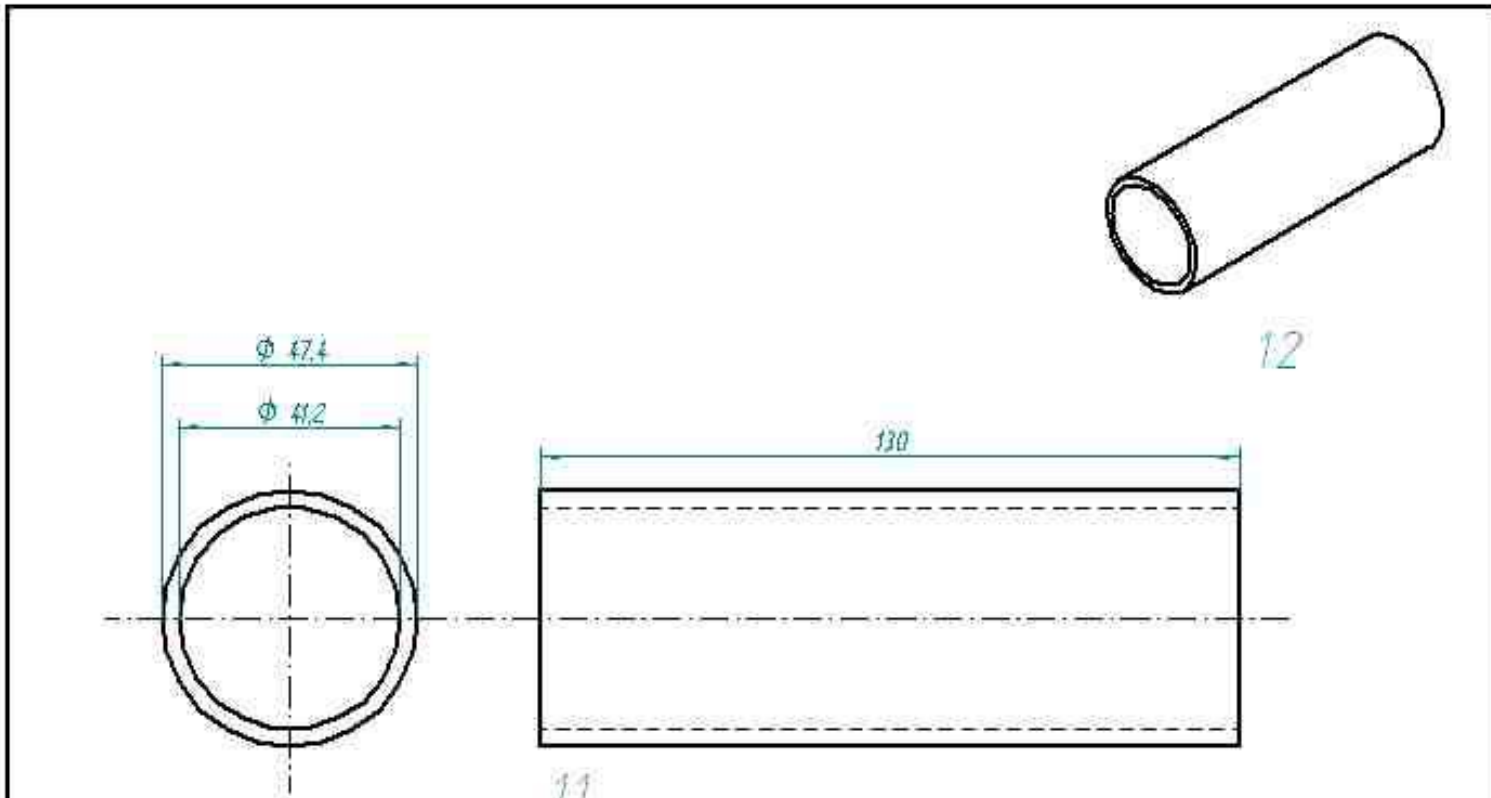
		01.03.04	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	Parte superior de la chumacera del rodillo laminador	Material: Acero A36	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 2	Abril 2004



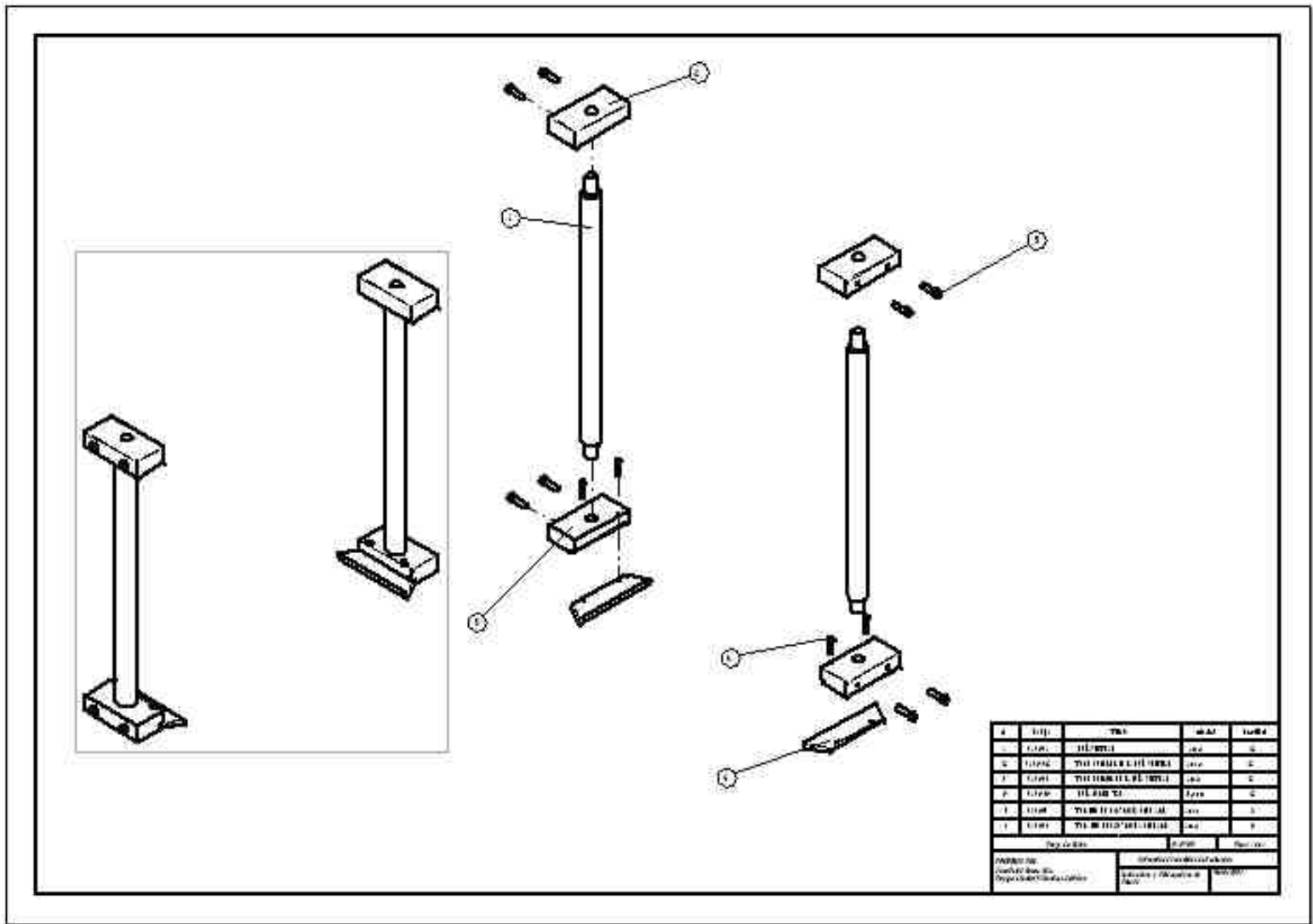
		01.03.05	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Buje del rodillo laminador	Material: Bronce	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 2	Abril 2004

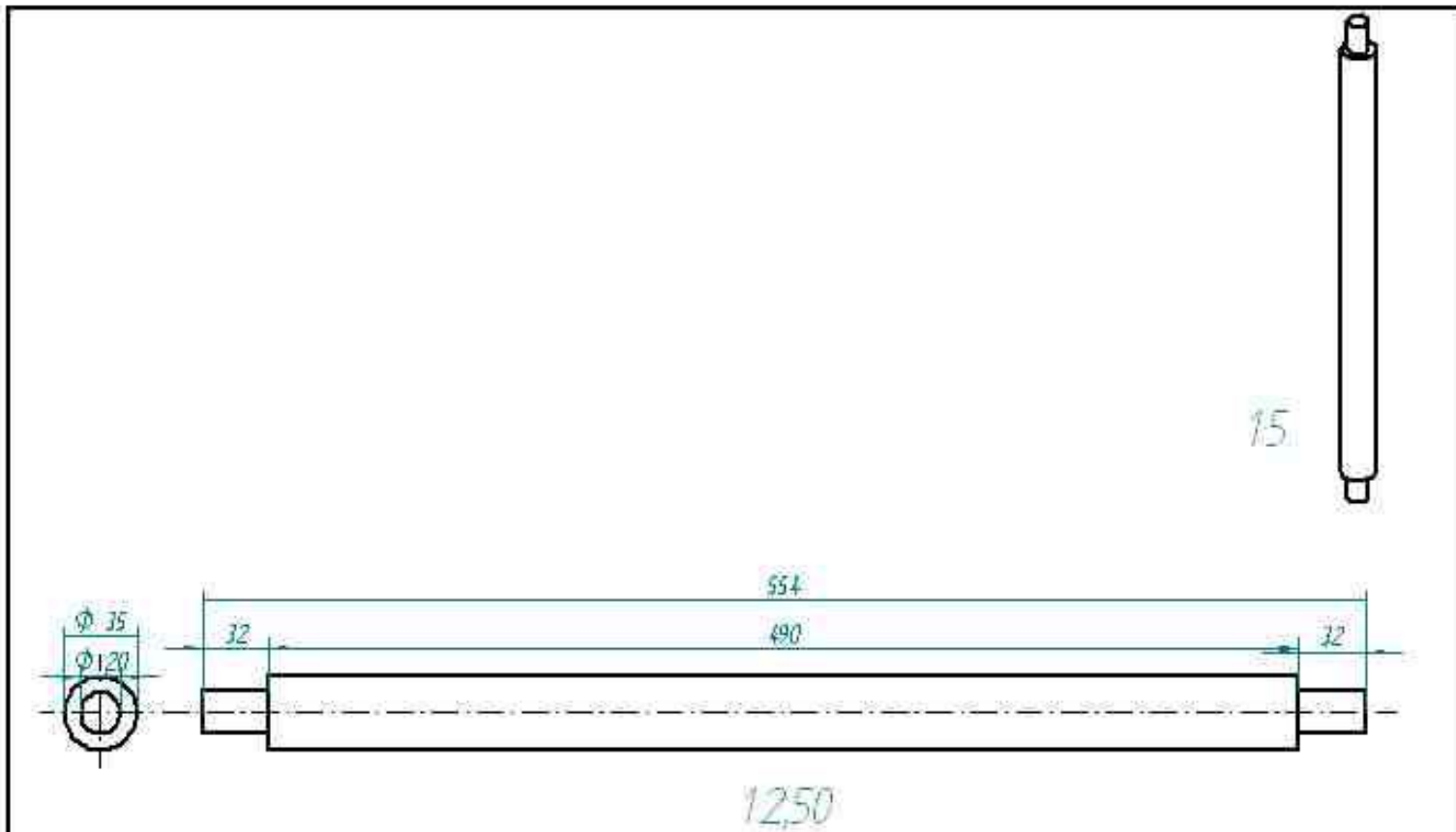


		01.03.06	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	Buje de la guía vertical	Material: Bronce	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 2	Abril 2004

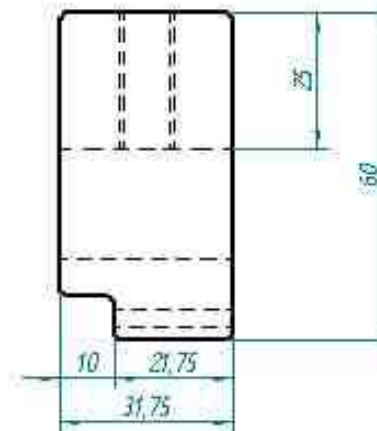
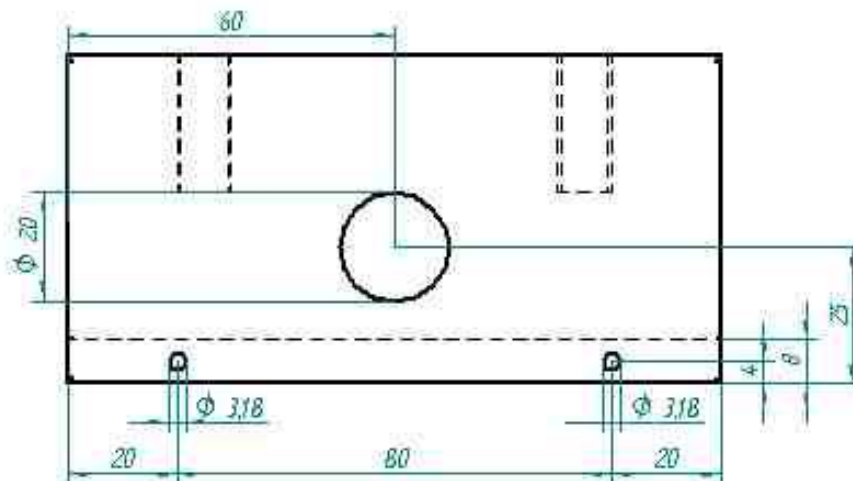
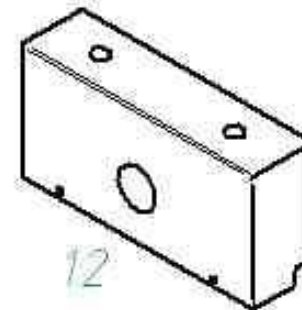
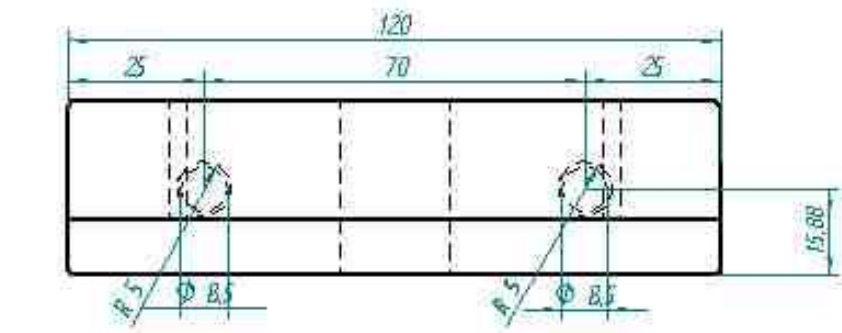


		01.03.07	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	soporte del buje de la guía vertical	material: acero 1020	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	cantidad: 2	Abril 2004





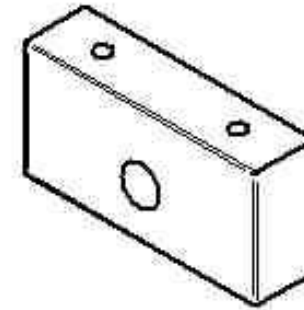
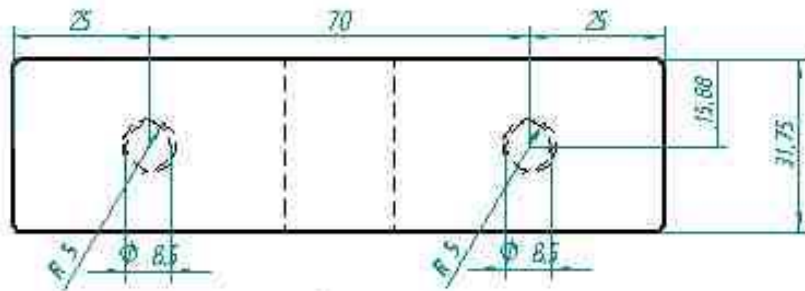
		01.04.01	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	Guía vertical	Material: acero 1020	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 2	Abril 2004



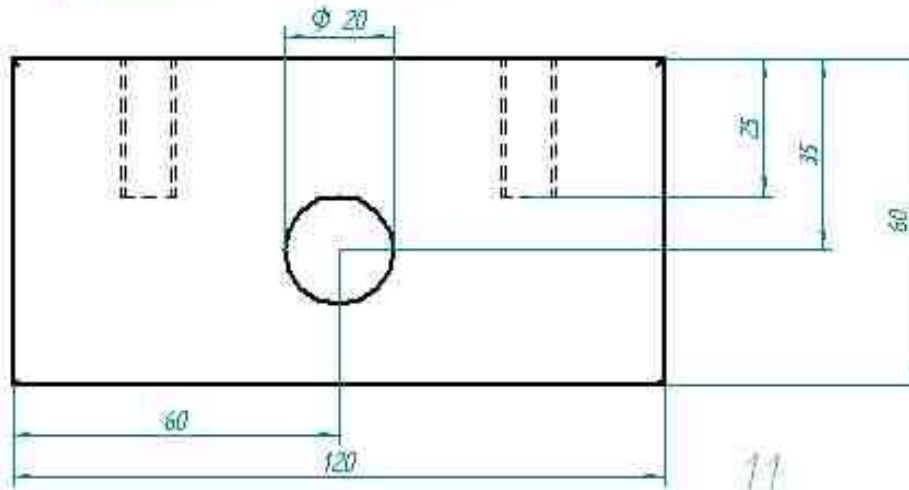
Elaborado por: José David Pérez Ruiz
George Charles Villamizar Cubillos

fope inferior de la guía vertical
laminadora y estampadora de estado

01.04.02	Unidades en mm
material: acero A36	Plano 1 de 1
cantidad: 2	Abril 2004

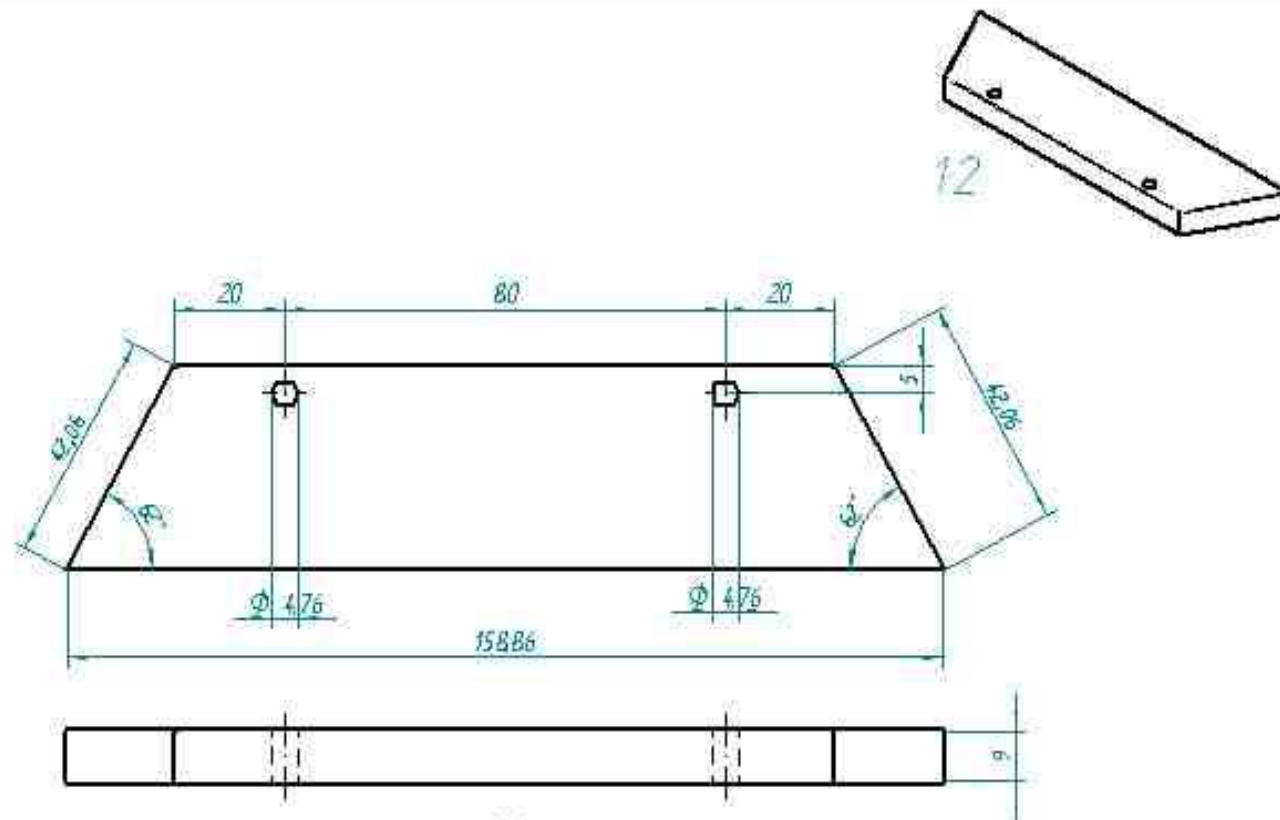


12



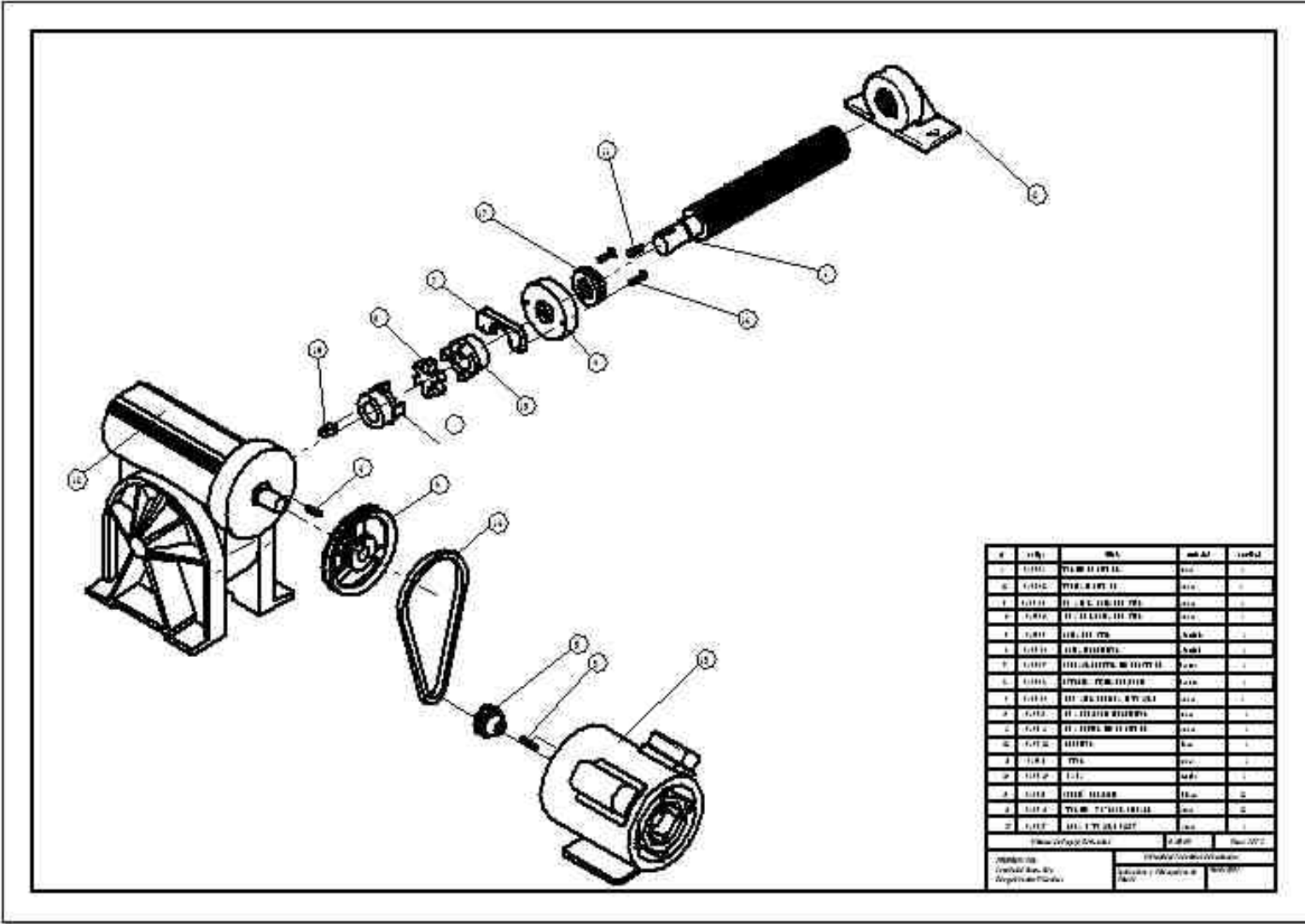
11

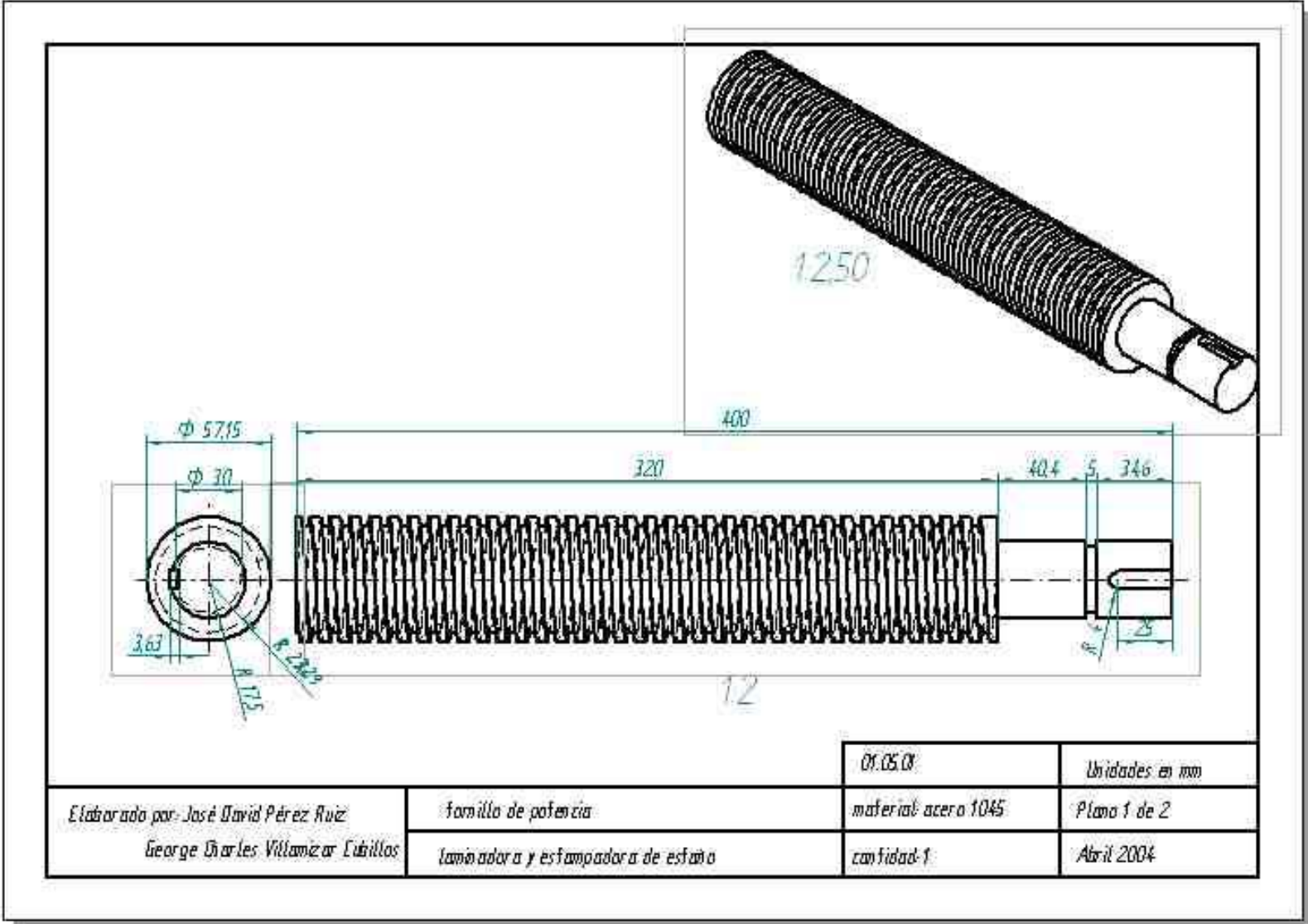
		01.04.08	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	fape superior de la guía vertical	material: acero A36	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	cantidad: 2	Abril 2004



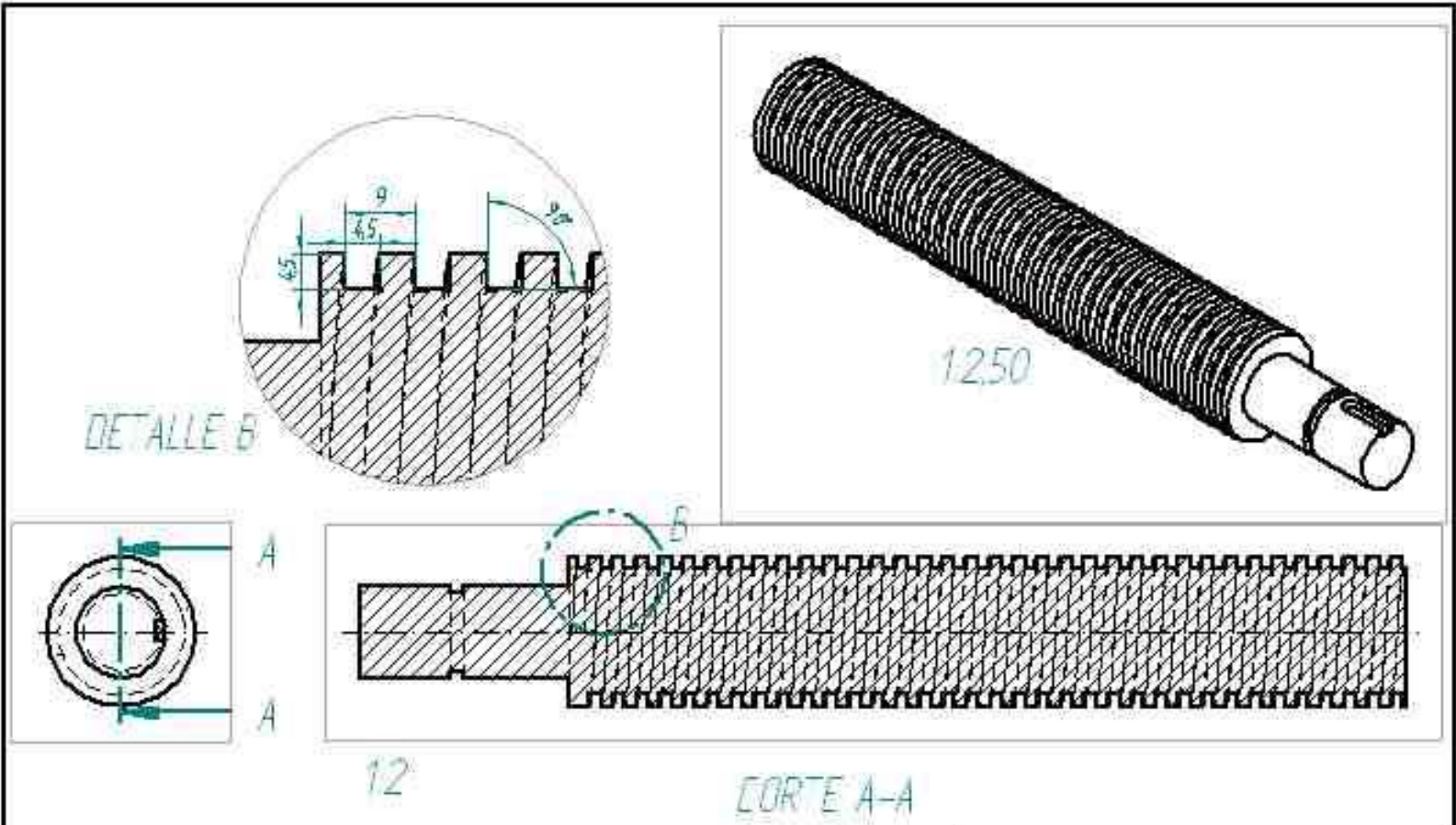
11

		01.04.04	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Guía horizontal	Material: bronce	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 2	Abril 2004

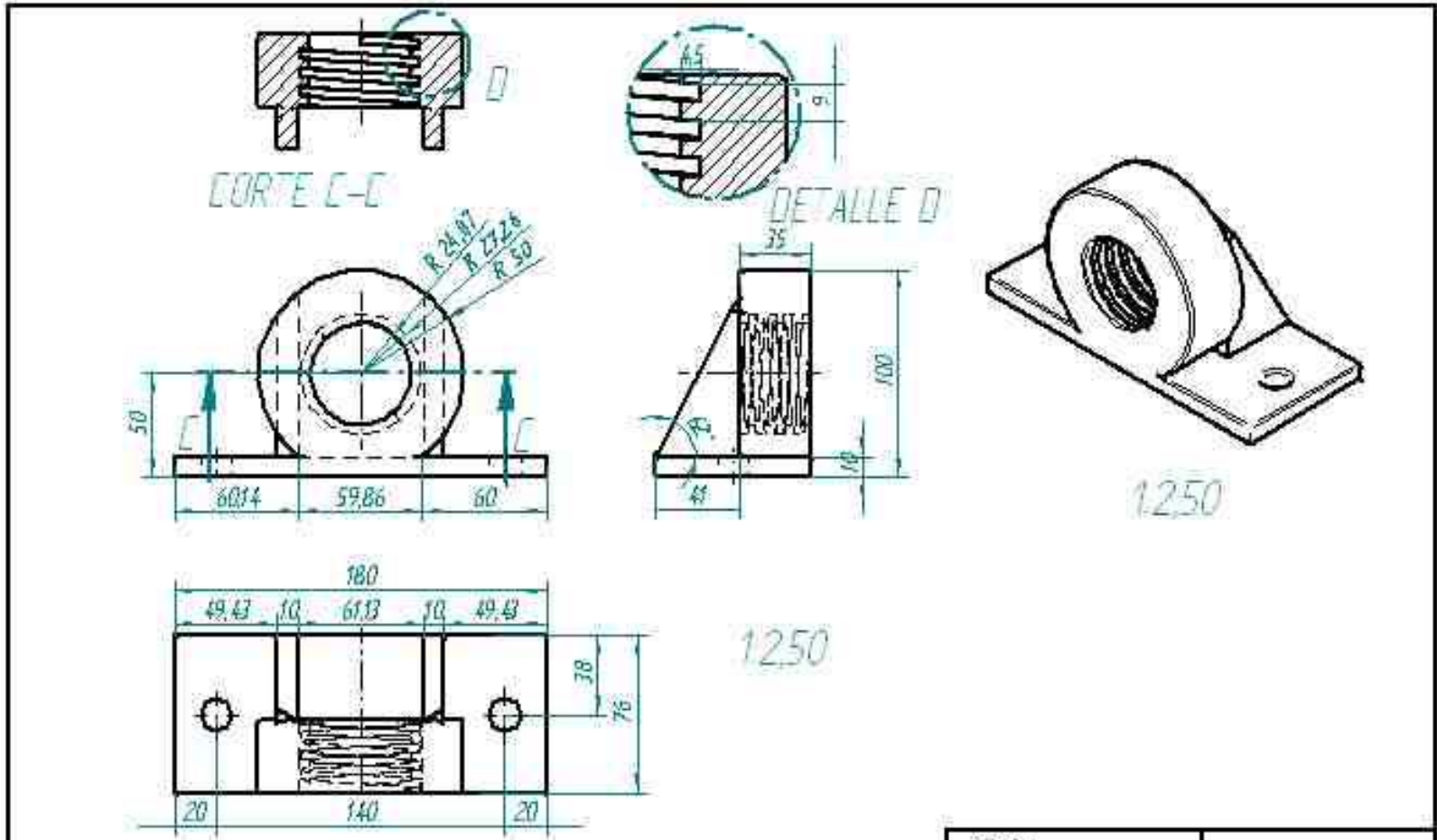




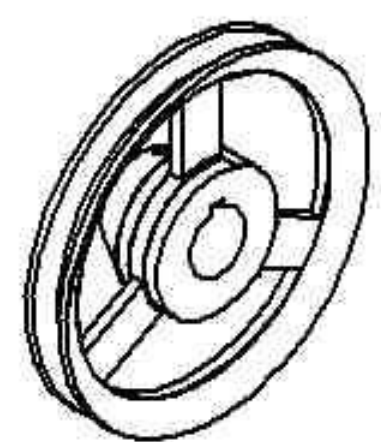
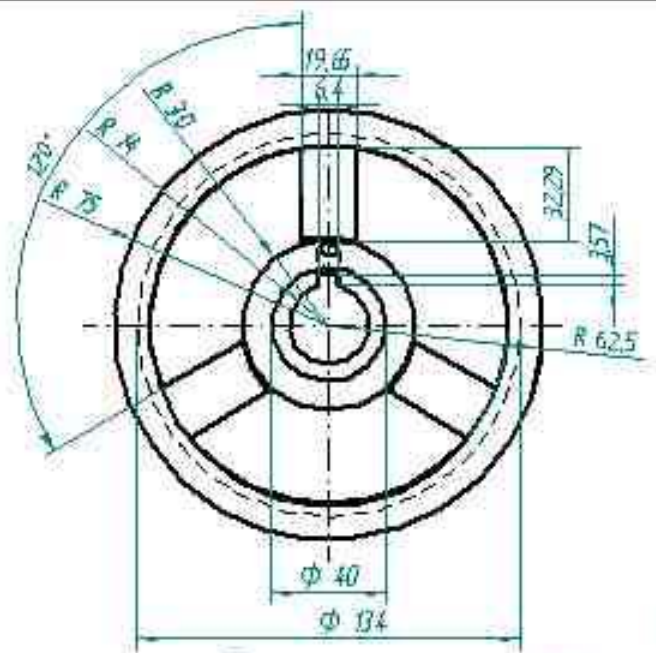
		01.05.01	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	fornillo de potencia	material: acero 1045	Plano 1 de 2
	laminadora y estampadora de estano	cantidad: 1	Abril 2004



		01.05.01	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	familia de potencia	materia: acero 1045	Plano 2 de 2
	laminadora y estampadora de estano	cantidad: 1	Abril 2004

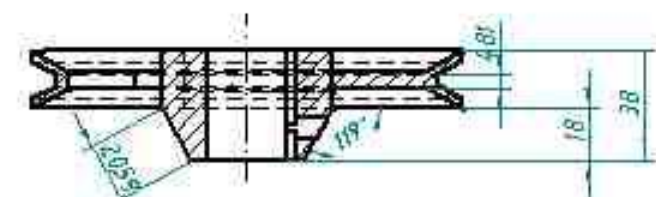
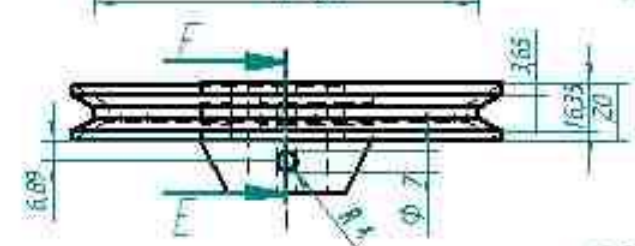


Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillas		fuerza de potencia	01.05.02	Unidades en mm
		cantidad: 1	material: acero A36	Plano 1 de 1
		laminadora y estampadora de estado		Abril 2004



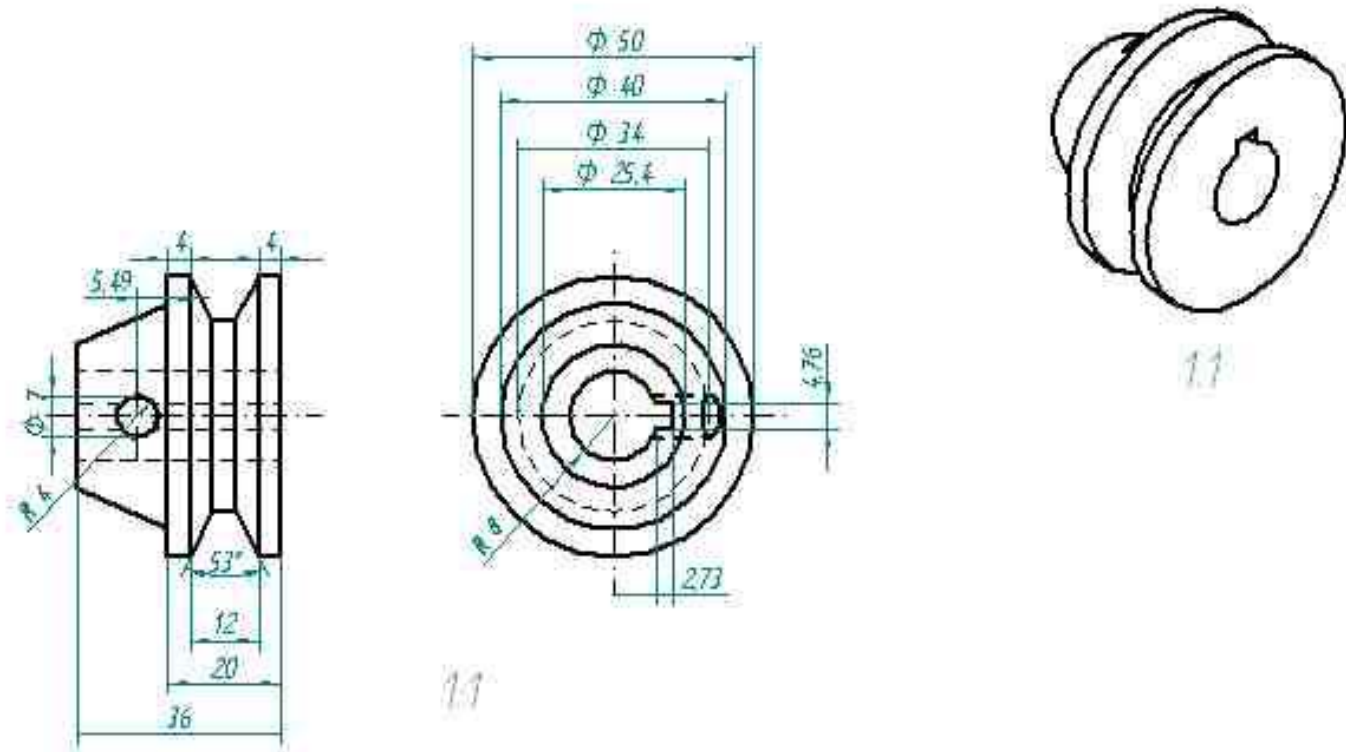
12

12

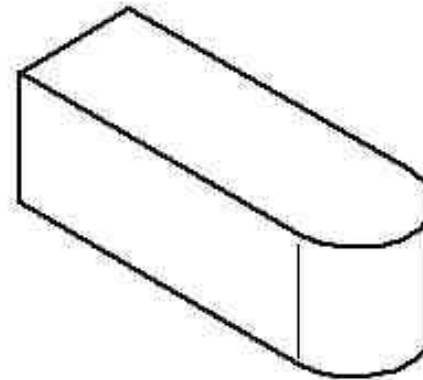
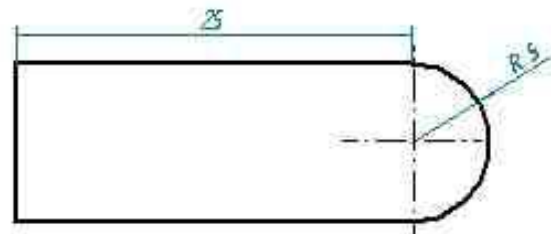


CORTE E-E

Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos		Polea del reductor	01.05.08	Unidades en mm
		Laminadora y estampadora de estado	Material: aluminio	Plano 1 de 1.
		Cantidad: 1		Abril 2004



Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos		01.05.04		Unidades en mm
		Polea del motor		Plano 1 de 1
laminadora y estampadora de acero		Materia: aluminio		Cantidad: 1
				Abril 2004

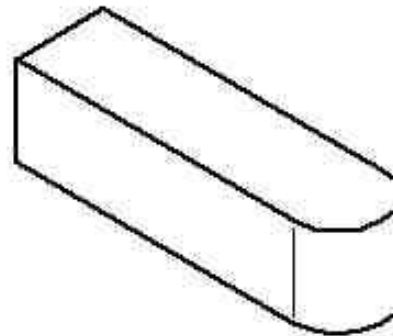
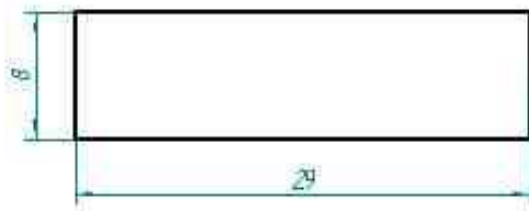
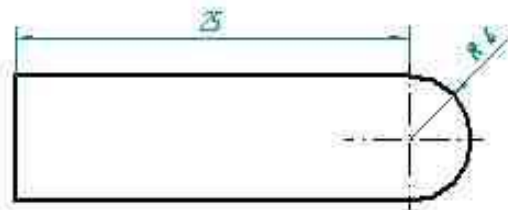


3,00:1



3,00:1

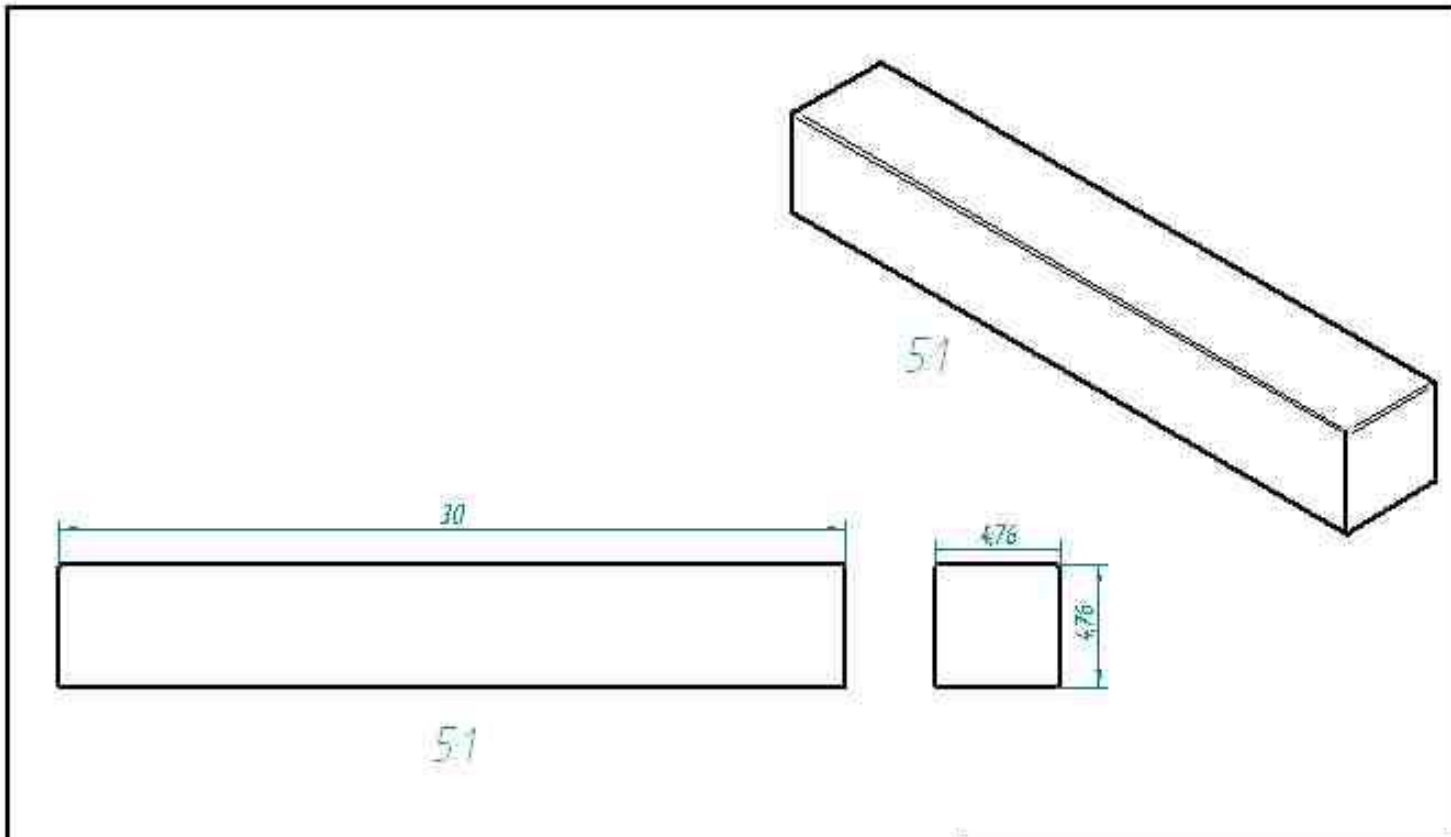
		01.05.05	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanar Cubillos	Caja del reductor	material: acero 1020	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de acero	cantidad: 1	Abril 2004



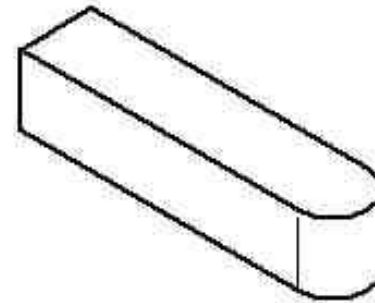
3,001

3,001

		01.05.06	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Cuña del tornillo de potencia	Material: acero 1020	Plano 1 de 1
	Laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 1	Abril 2004



		01.05.07	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Cuña del motor	Materia: acero 1020	Plano 1 de 1
	Laminadora y estampadora de estano	Cantidad: 1	Abril 2004

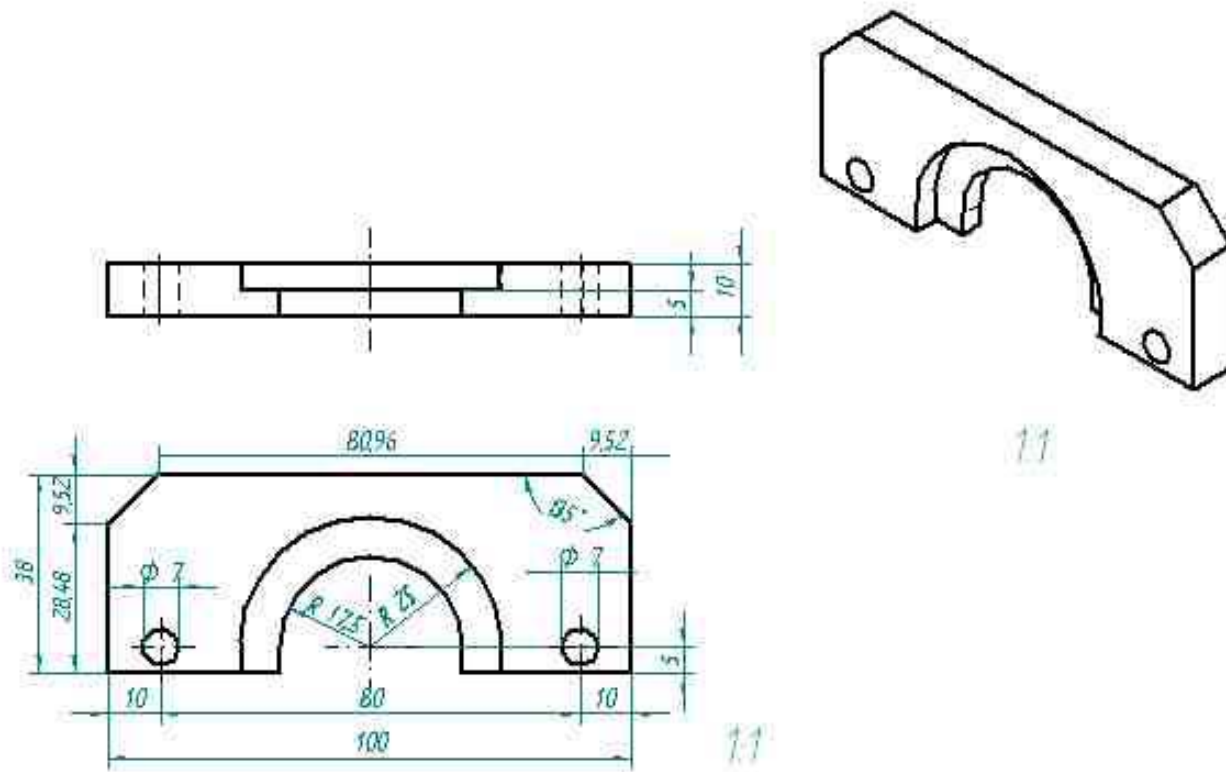


3,001

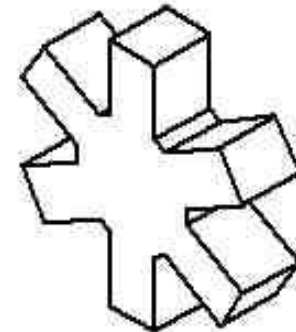
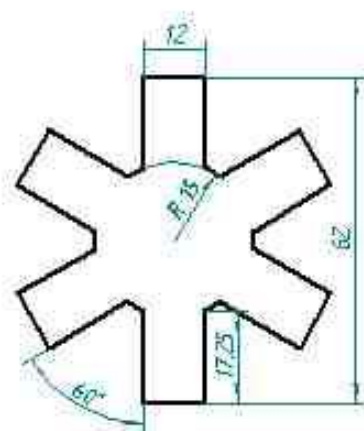


3,001

		01.05.08	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Caja de la polea del reductor:	Materia: acero 1020	Plano 1 de 1
	Laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 1	Abril 2004



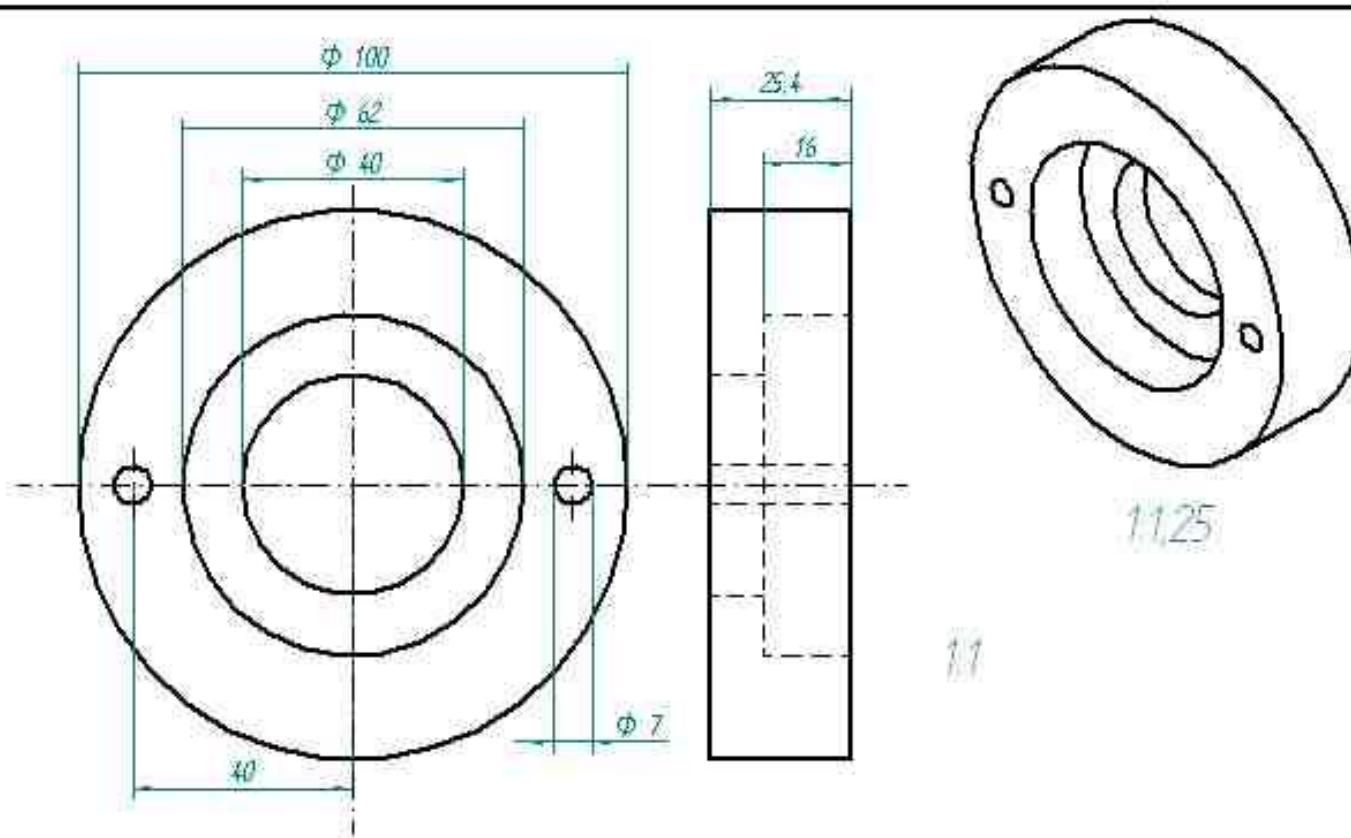
		01.05.09	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Buje axial	Materia: bronce.	Plano 1 de 1
	Laminadora y estampadora de estaño	Cantidad: 1	Abril 2004



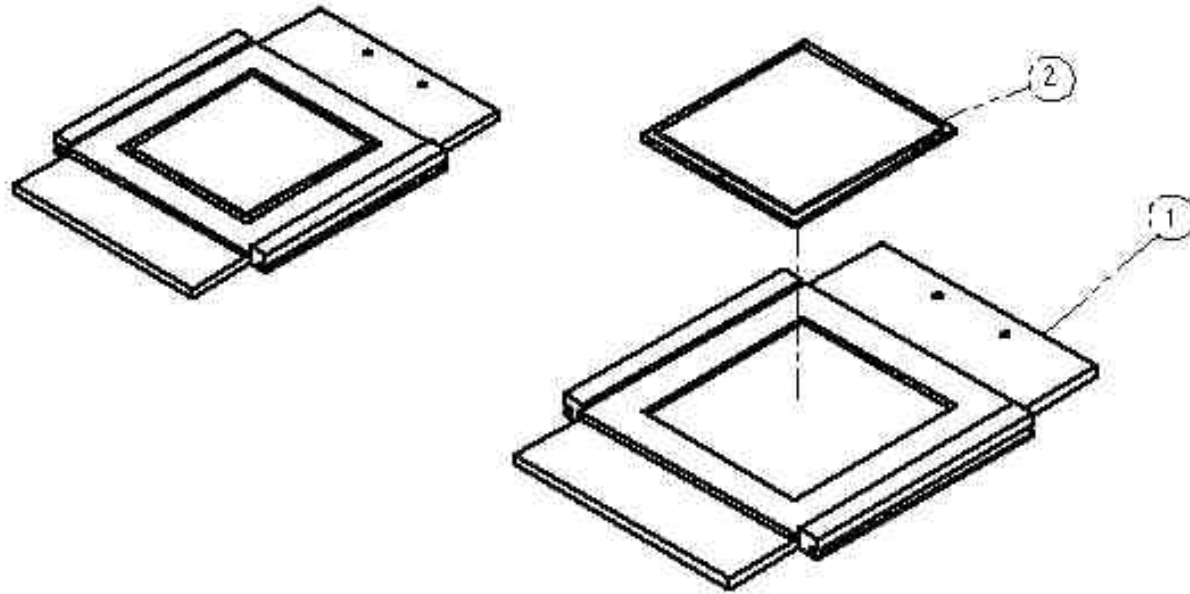
11

11

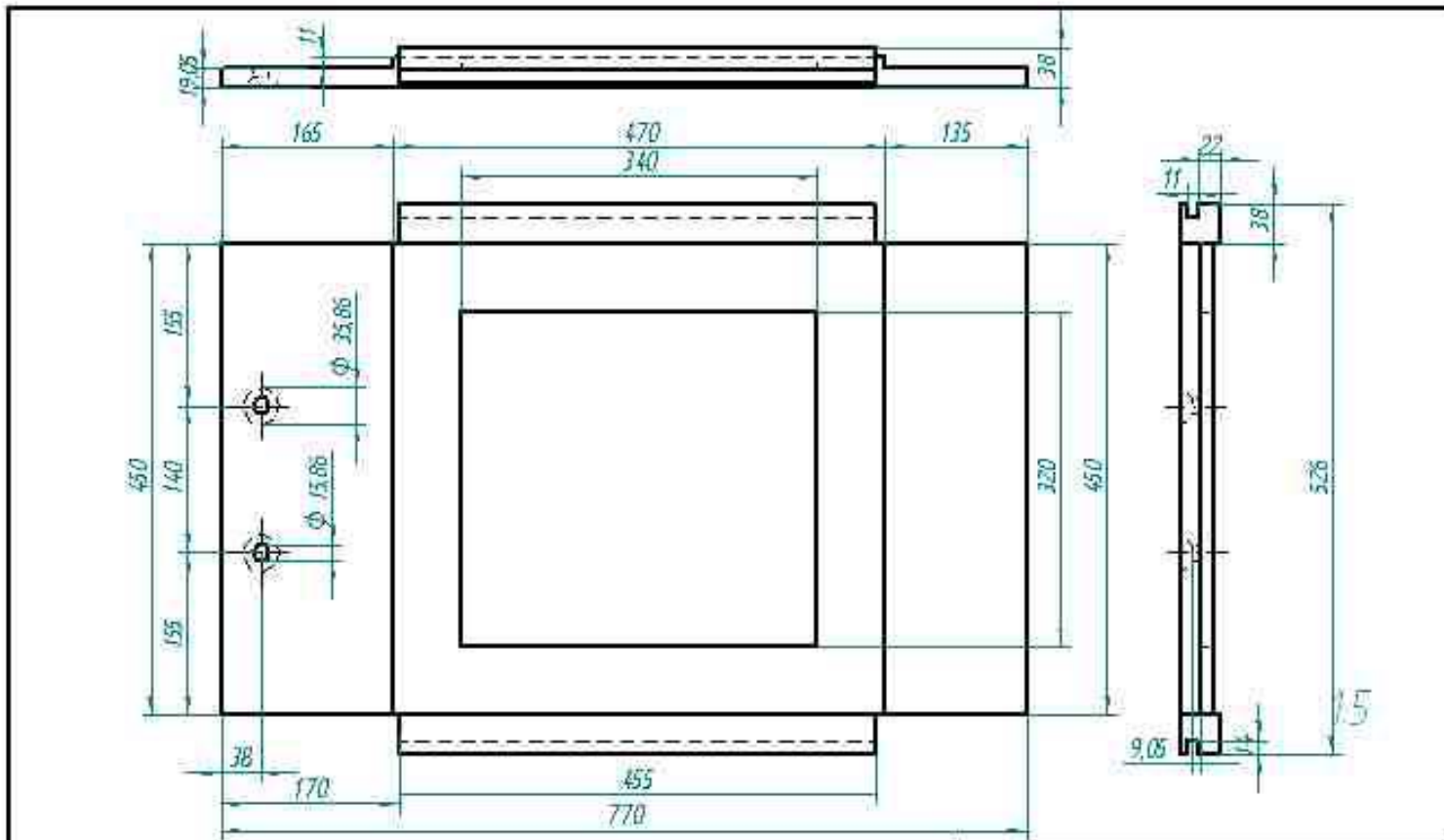
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos		Øf. 05.10	Unidades en mm
		Material: bronce.	Plano 1 de 1.
		Cantidad: 1	Abril 2004



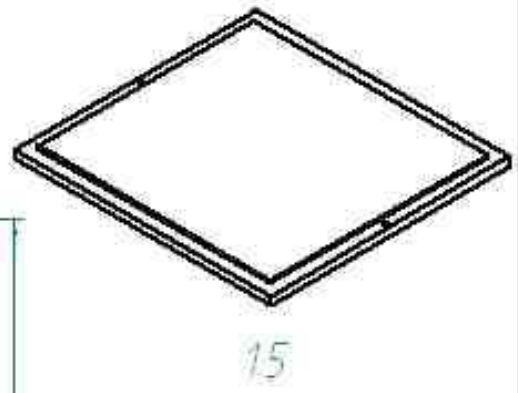
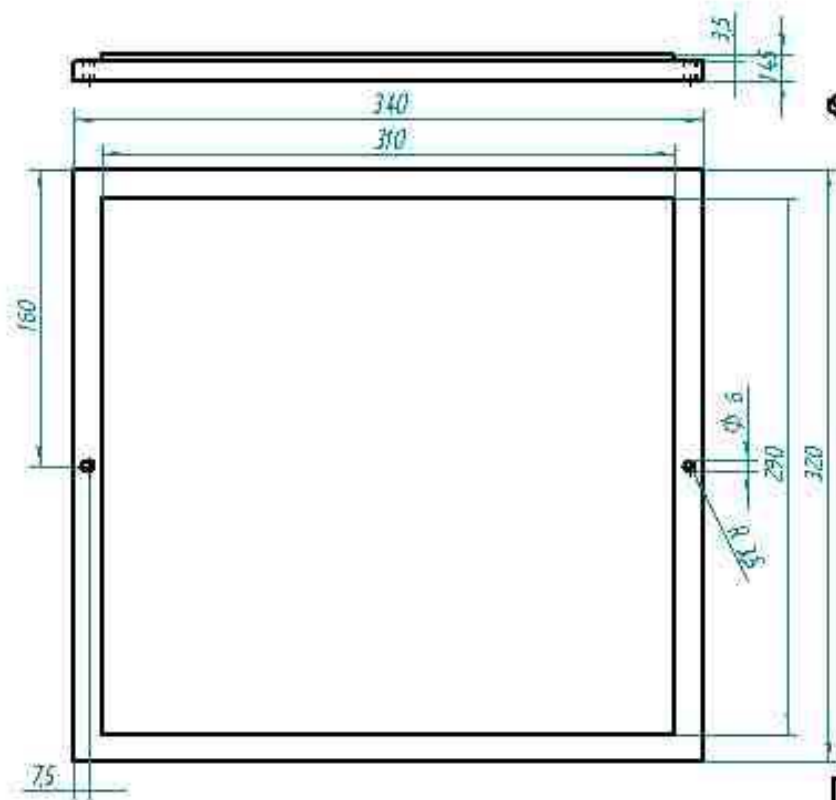
		01.05.11	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillas	Elaboradora del rodamiento axial	Materia: acero A36	Plano 1 de 1
	Laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 1	Abril 2004



#	Codigo	Titulo	Material	Cantidad
1	01.06.01	PORTAMATRIZ	acero	1
2	01.06.02	MATRIZ	acero	1
<i>Conjunto móvil</i>			<i>01.06.00</i>	<i>PLANO 1 DE 1</i>
<i>ELABORADO POR:</i> <i>Jose David Perez Ruiz</i> <i>George Charles Villamizar Cubillas</i>		<i>Universidad Industrial de Santander</i>		
		<i>Laminadora y estampadora de</i> <i>estado</i>	<i>ABRIL 2004</i>	

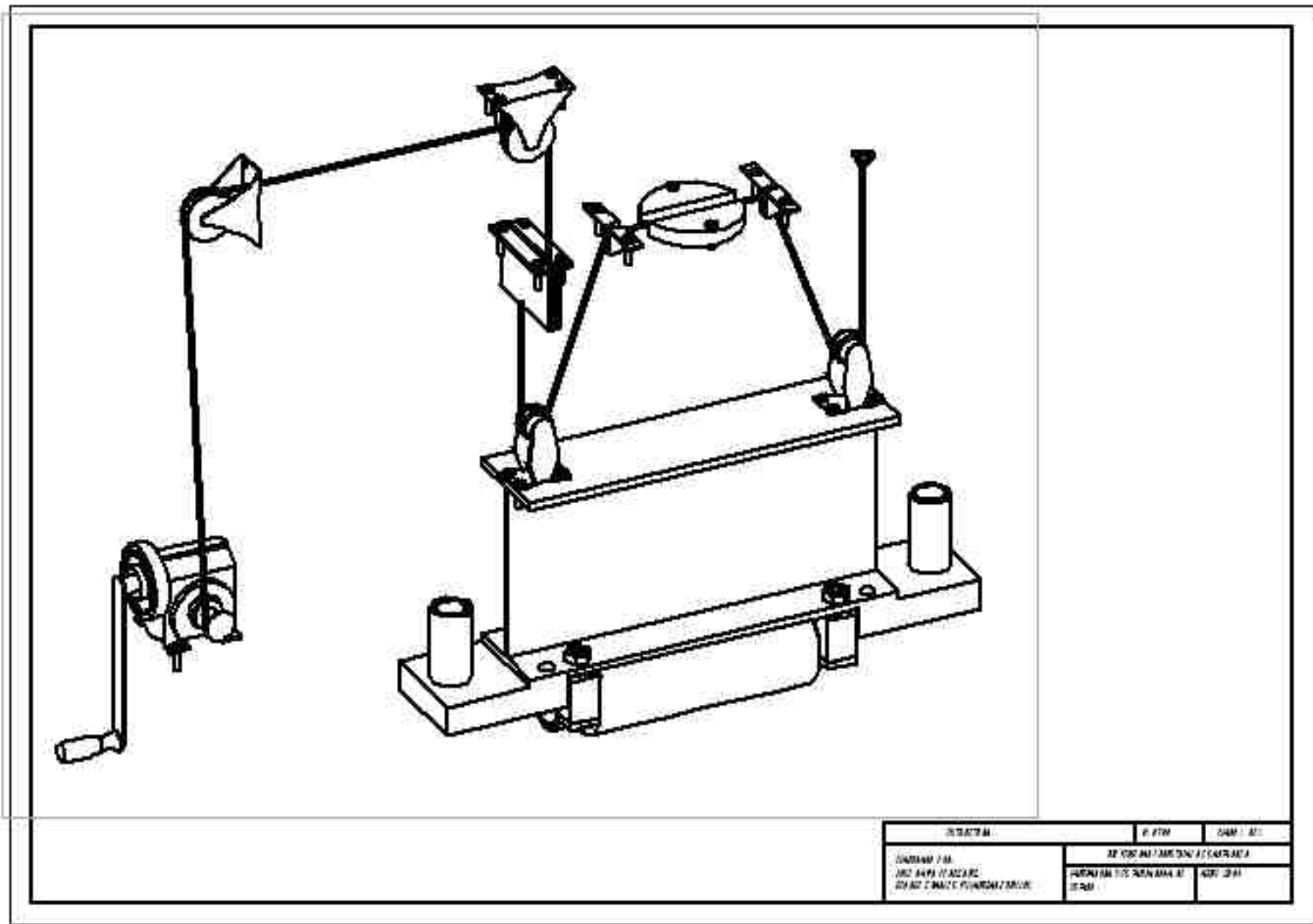


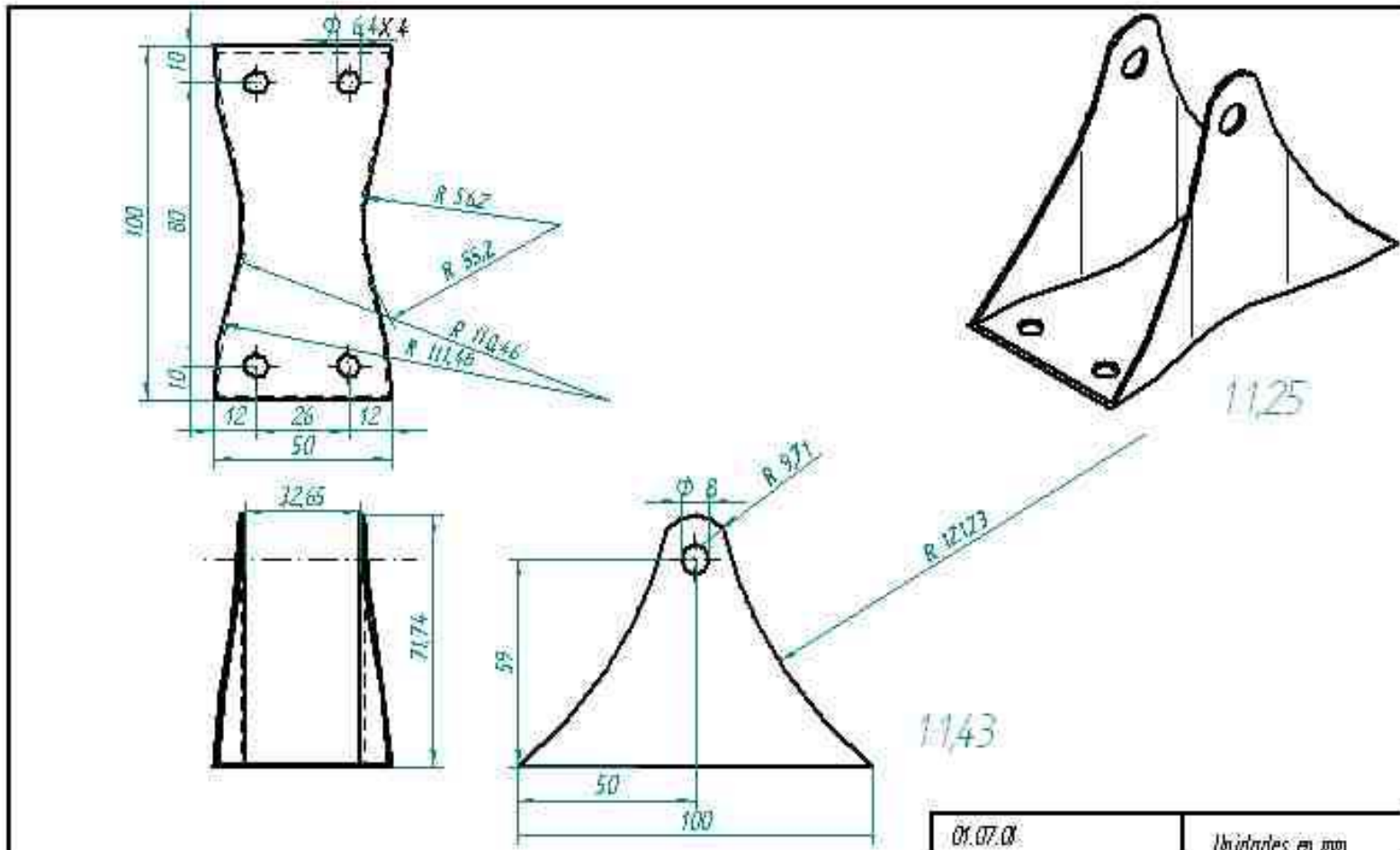
		Of. 06.01.	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Partamatrix	Materia: acero A36	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 1	Abril 2004



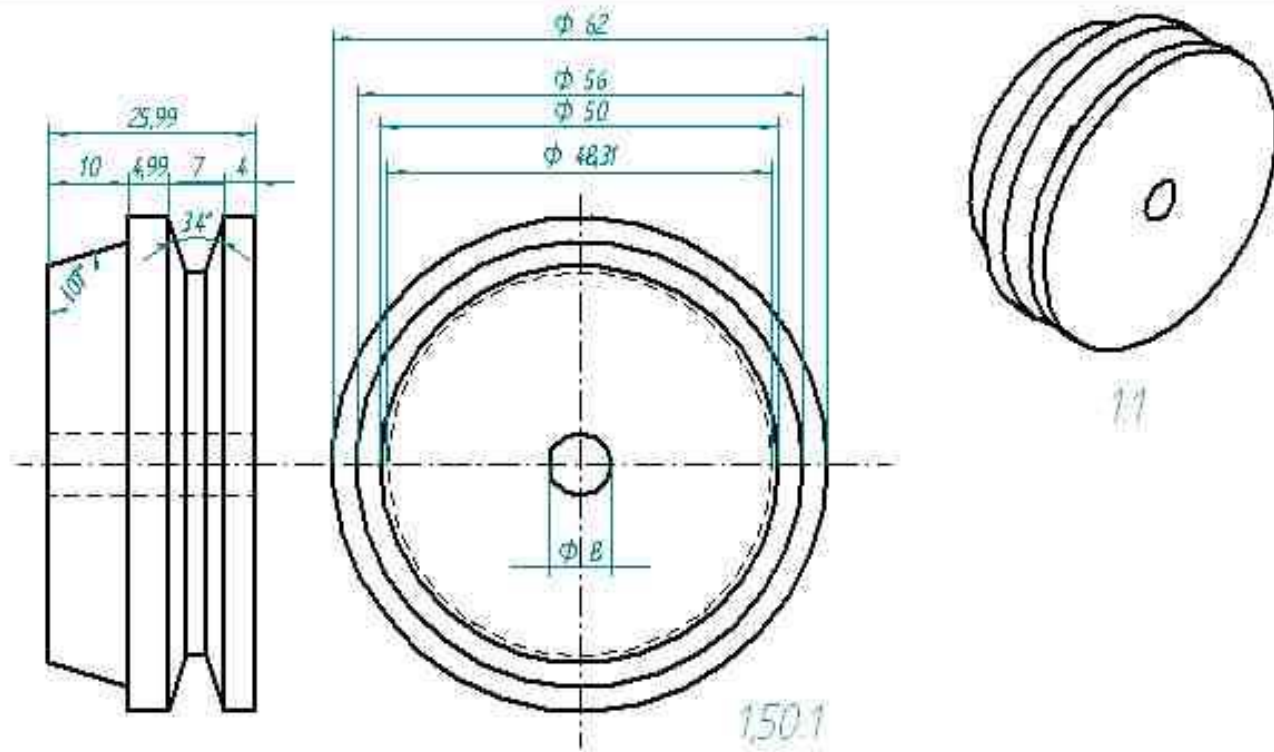
1286

		Of. 06.02	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanar Cubillos	Matriz	Material: acero 1045	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 1	Abril 2004

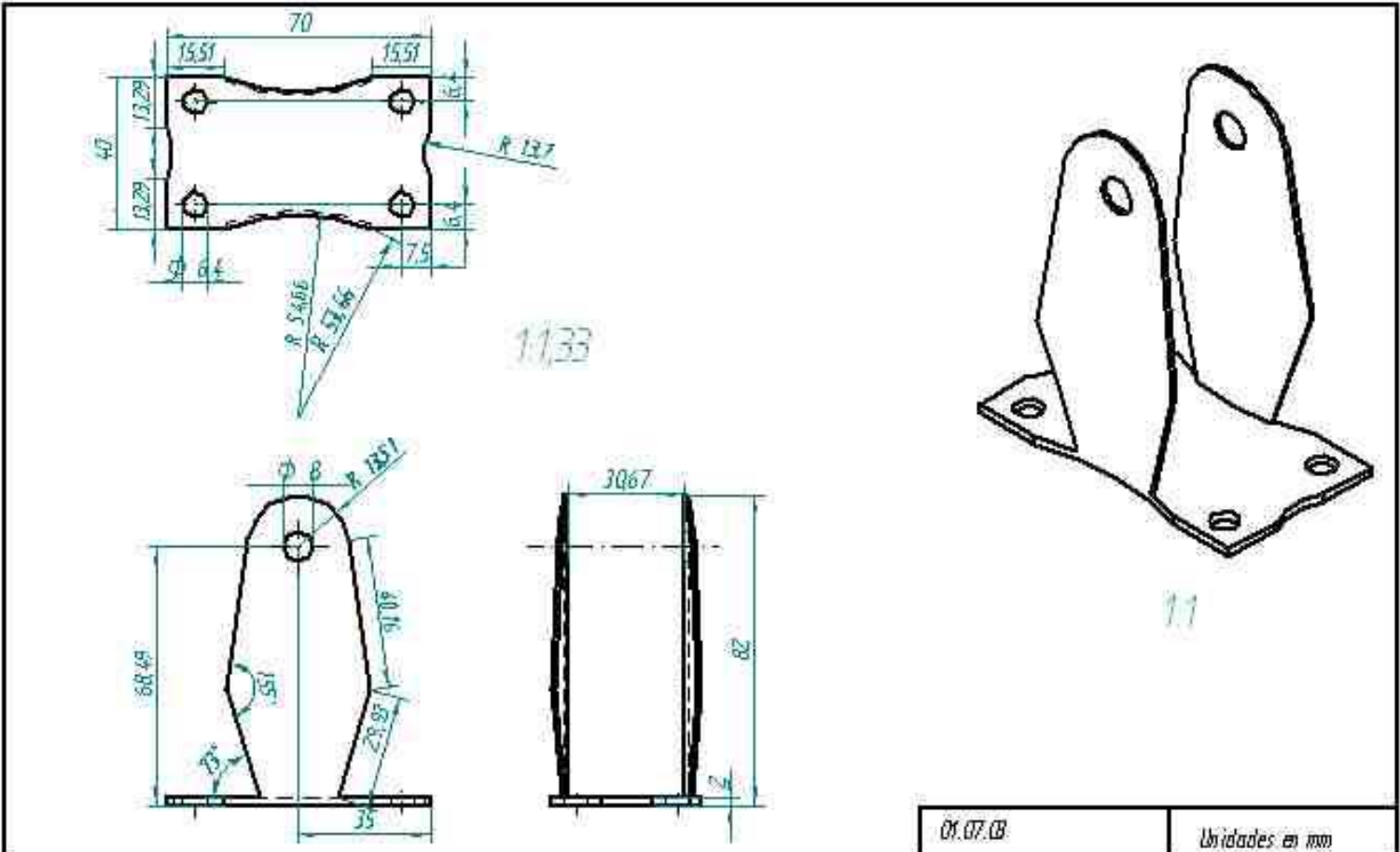




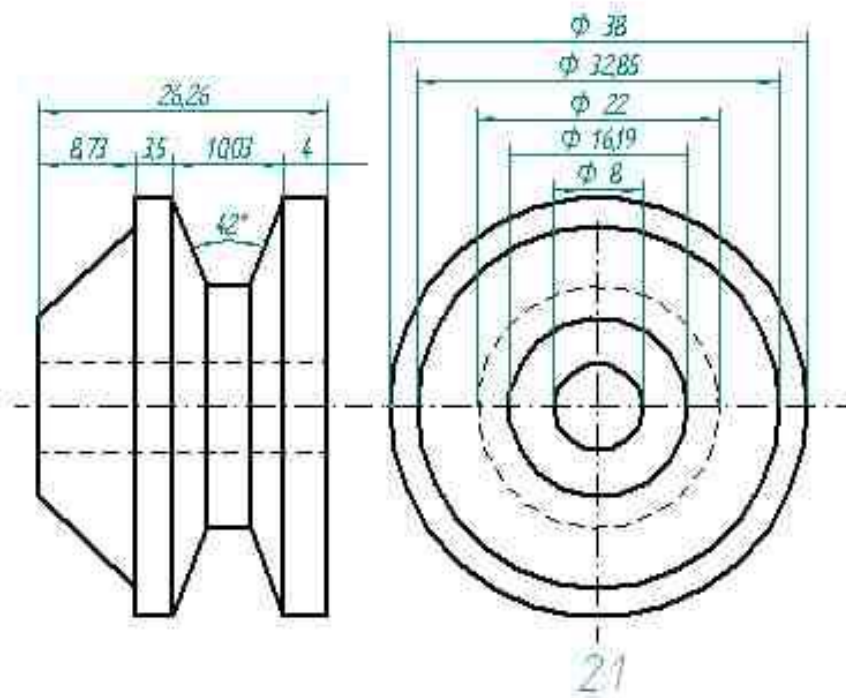
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Base de la polea grande de elevación	01.07.01	Unidades en mm
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 2	Plano 1 de 1 Abril 2004



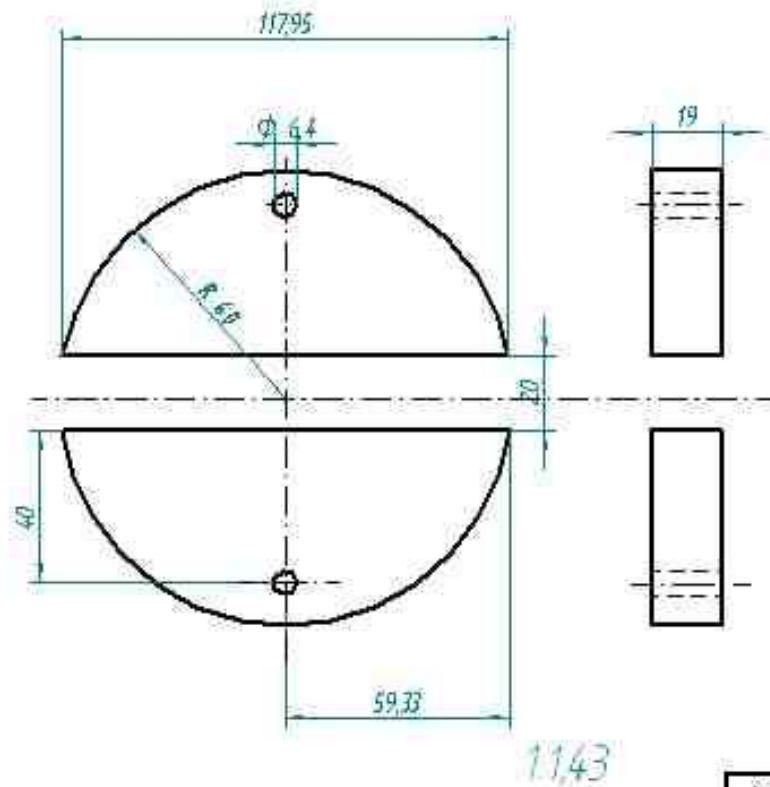
		01.07.02	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Estibillos	Polea grande de elevación	Materia: aluminio	Plano 1 de 1
	Laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 2	Abril 2004



Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Base de la polea de elevación mediana	01.07.08	Unidades en mm
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 2	Plano 1 de 1 Abril 2004

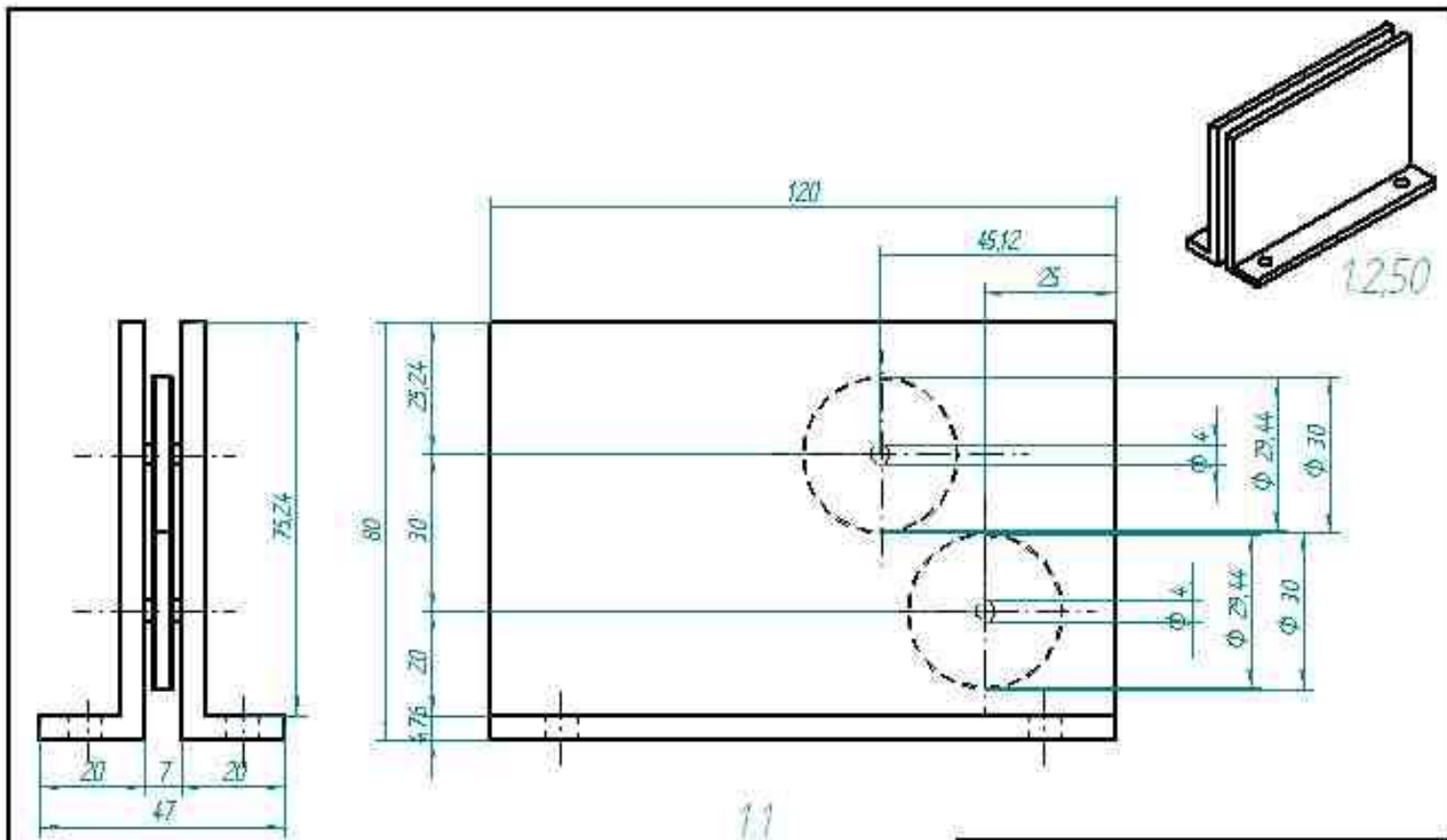


		01.07.04	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillas	Polea mediana de elevación	Materia: aluminio	Plano 1 de 1.
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 2	Abril 2004



01.07.05	Unidades en mm
Material: acero A36	Plano 1 de 1
Cantidad: 1	Abril 2004

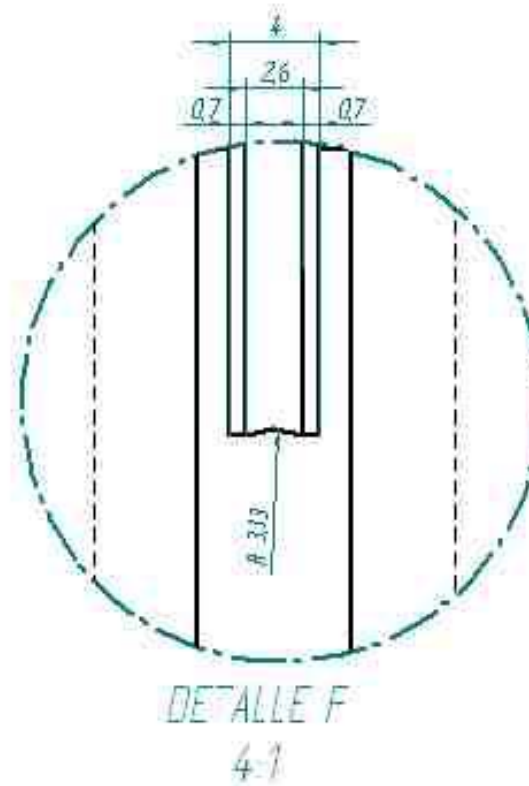
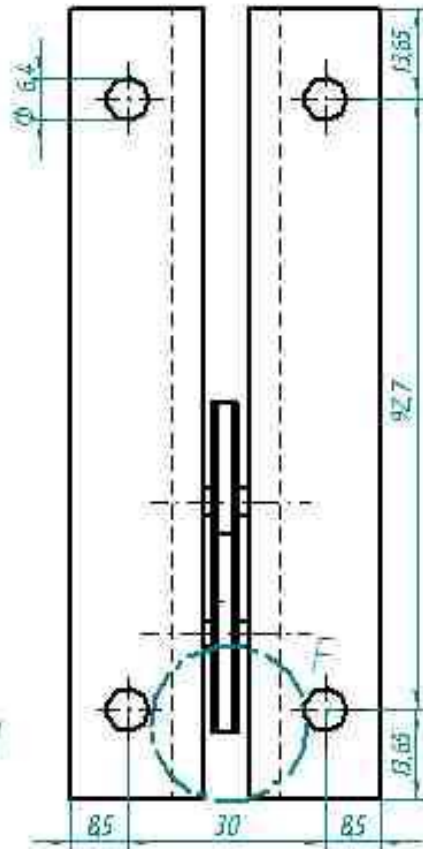
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Cubreguaya		
	laminadora y estampadora de estano		



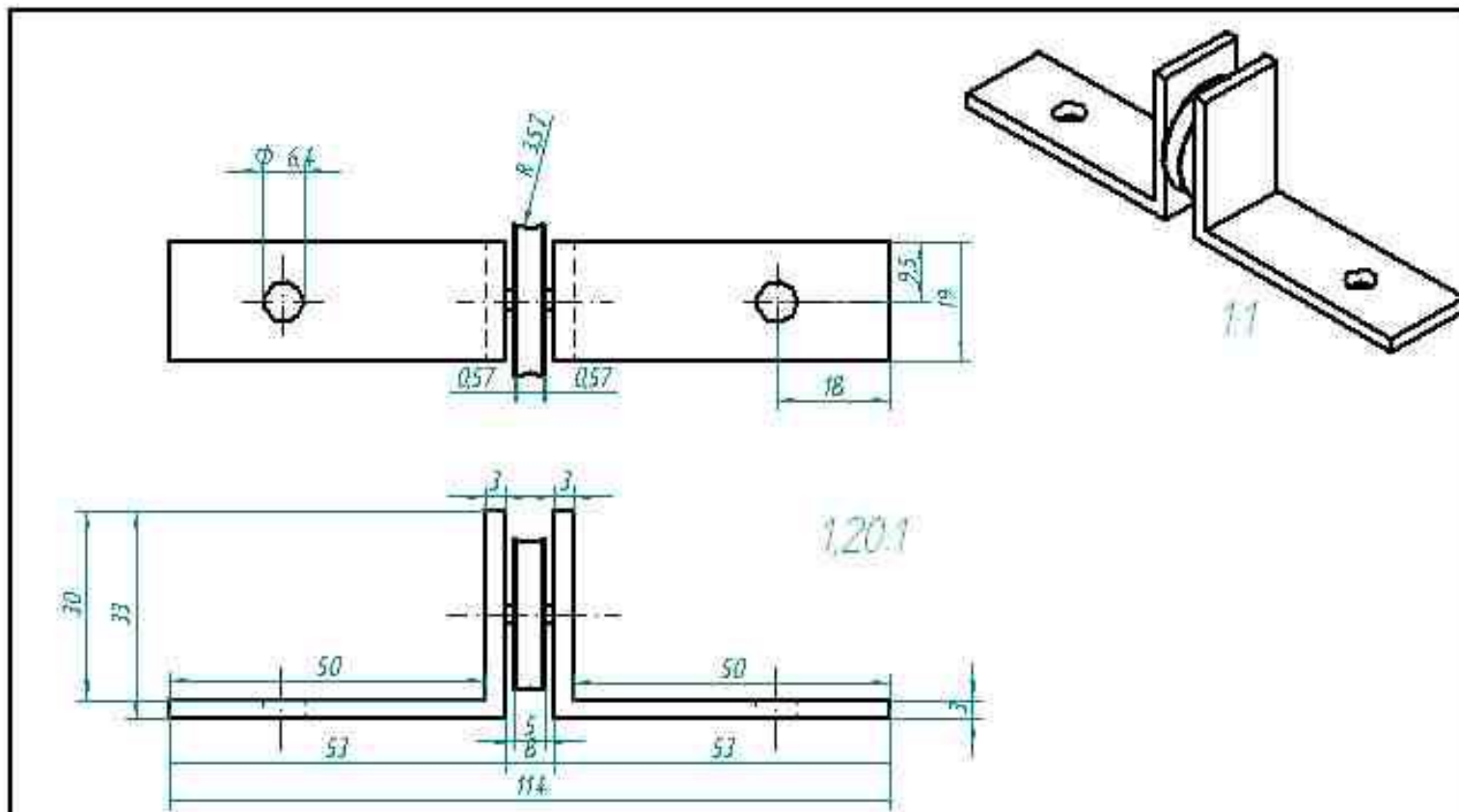
11

Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos		Centraguaya	01.07.06	Unidades en mm
		Laminadora y estampadora de estano	Cantidad: 1	Plano 1 de 2 Abril 2004

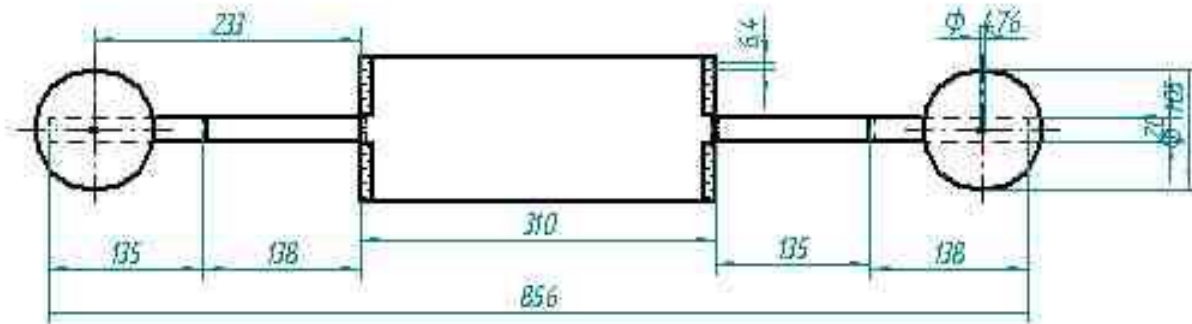
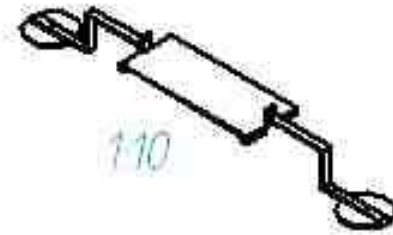
1:20:1



		01.07.06	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	centraguaya	Materia: acero y teflon	Plano 2 de 2
	laminadora y estampadora de estano	Cantidad: 1	Abril 2004

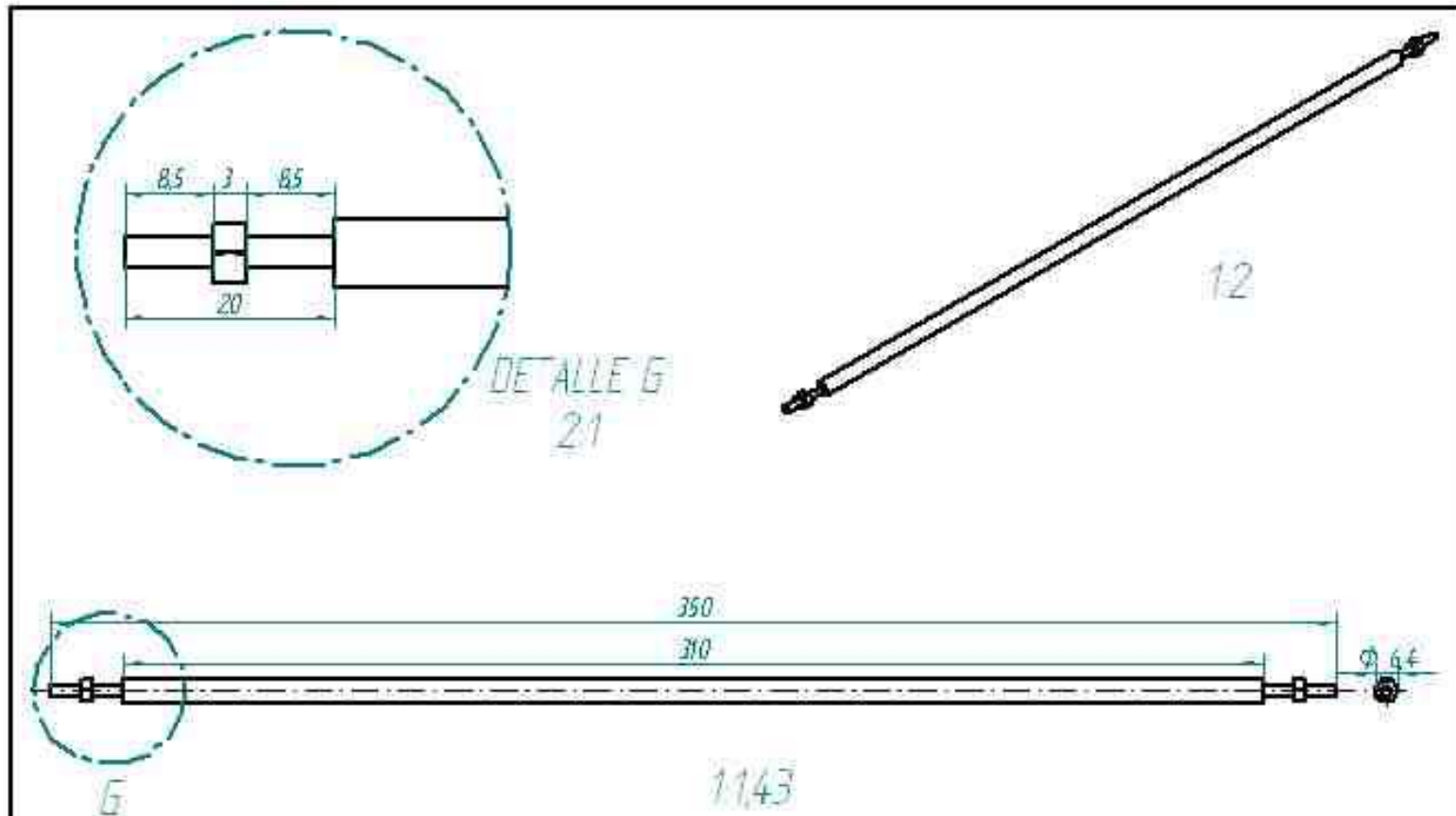


		01.07.07	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villanizar Cubillos	Polea pequeña de elevación y soporte	Material: acero y teflon	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 2	Abril 2004

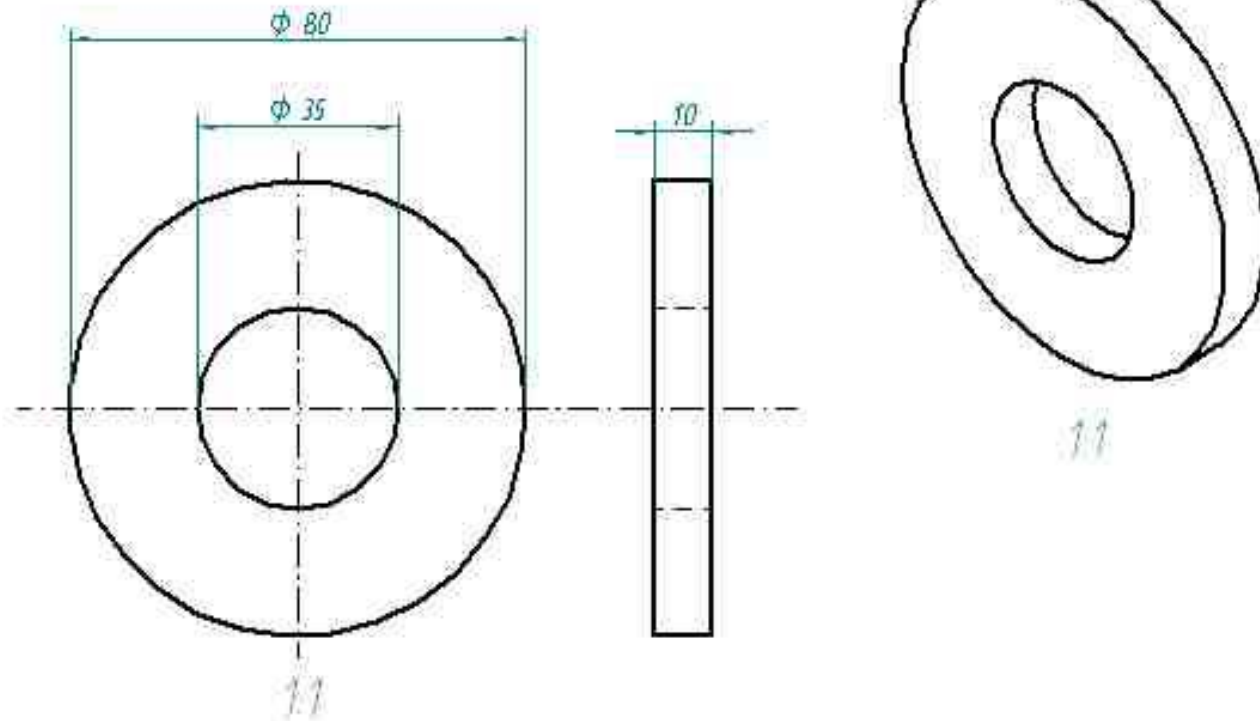


15

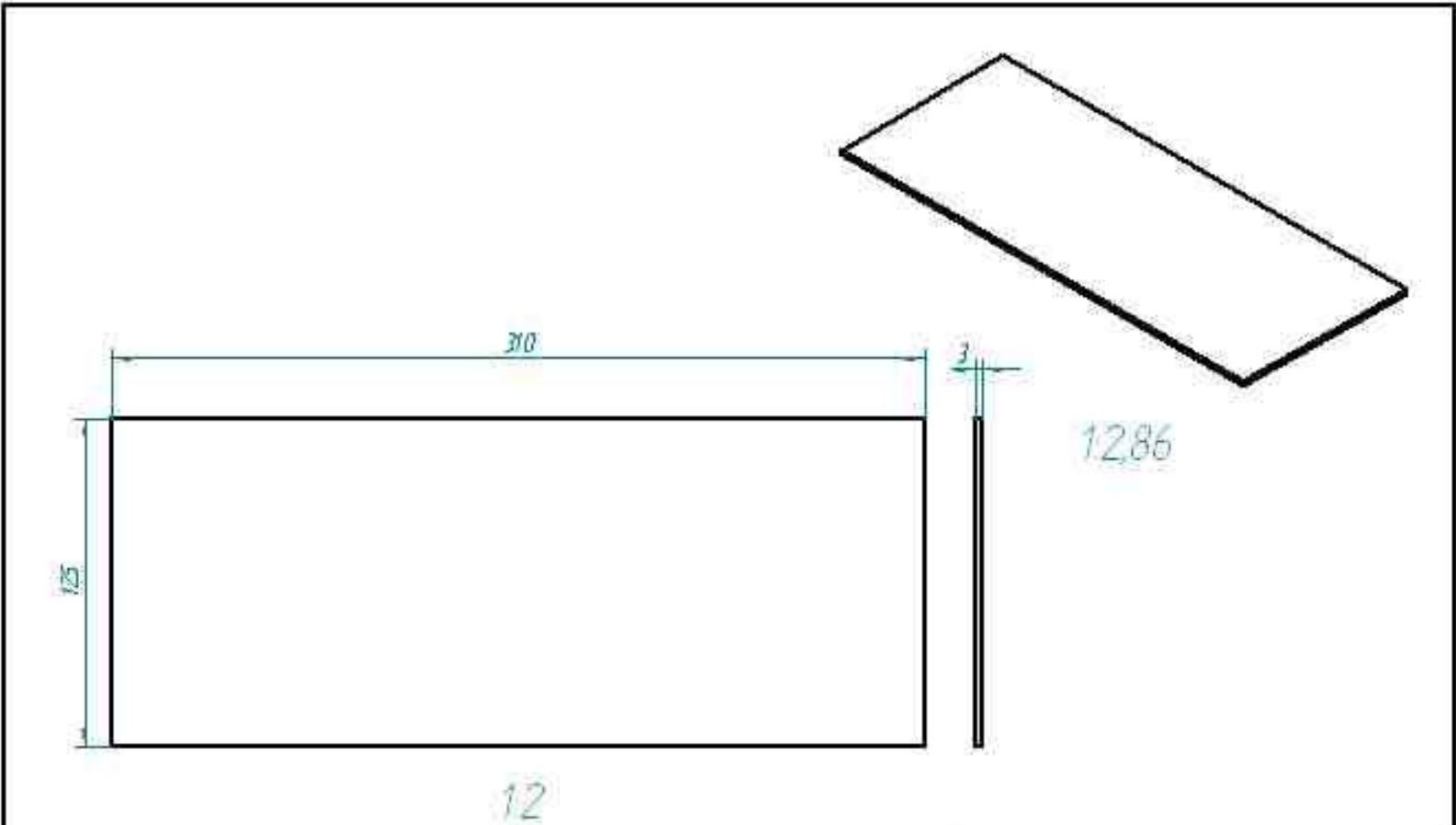
		01.08.01	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Estructura del calentador	Material: acero A36	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 1	Abril 2004



		01.08.02	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillas	resistencia eléctrica	Material: acero	Plano 1 de 1.
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 8	Abril 2004



		01.08.08	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Iman	Materia: magnética	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de acero	Cantidad: 2	Abril 2004



		01.08.04	Unidades en mm
Elaborado por: José David Pérez Ruiz George Charles Villamizar Cubillos	Asfalto	Materia: asbesto	Plano 1 de 1
	laminadora y estampadora de estado	Cantidad: 1	Abril 2004