

*Facultad de Ingeniería*

**Universidad Nacional de Mar del Plata**

Proyecto final

Diseño y Construcción de un  
Sistema Inyector de Cera  
para el método de colada  
“Ceras Perdidas”

**Autor: Fernando Tomac**

**Carrera: Ingeniería Electromecánica**

**Matrícula: 9001**

**Tutor: Dr. Juan M. Massone**

**Cotutor: Dr. Roberto Boeri**



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

*Facultad de Ingeniería*

**Universidad Nacional de Mar del Plata**

Proyecto final

Diseño y Construcción de un  
Sistema Inyector de Cera  
para el método de colada  
“Ceras Perdidas”

**Autor: Fernando Tomac**

**Carrera: Ingeniería Electromecánica**

**Matrícula: 9001**

**Tutor: Dr. Juan M. Massone**

**Cotutor: Dr. Roberto Boeri**

# Agradecimientos

Este proyecto ha sido llevado a cabo, no solo por el esfuerzo propio, sino también por el aporte de muchas personas, a las cuales les estoy sumamente agradecido:

- Dr. Juan Massone
- Dr. Roberto Boeri
- Especialmente al ing. Bernardo Daga; que me acompañó a lo largo de todo el proyecto y estuvo en todos los detalles.
- Al personal del área metalurgia del departamento de Ing. Mecánica
- Ing. Claudio Dimena
- Ing. Rubén Di Mauro
- A todos los profesores y el personal de la Facultad, con los que realicé esta hermosa carrera.
- A los compañeros de estudio, que con los años se han convertido en mis amigos.
- A los amigos de siempre.
- Y sobre todo, a mi familia, que siempre estuvo conmigo.

# Índice

Lista de figuras	2
Capítulo: 1 Objetivos y Alcance	3
1.1 <i>Objetivo</i>	4
1.2 <i>Alcance</i>	4
Capítulo: 2 Introducción y Justificación	5
2.1 <i>Justificación Personal</i>	6
2.2 <i>Introducción al Proyecto</i>	7
Capítulo: 3 Revisión Bibliográfica	9
3.1 <i>Fundición y Colada de metales</i>	10
3.2 <i>El Método de Ceras Perdidas</i>	14
3.3 <i>La inyección de cera</i>	21
3.4 <i>Hidráulica y Neumática</i>	27
3.5 <i>Elementos Hidráulicos</i>	30
3.6 <i>Fenómenos térmicos y transferencia de calor</i>	36
Capítulo: 4 Diseño	40
4.1 <i>Prediseño</i>	41
4.2 <i>Diseño del sistema motor</i>	45
4.3 <i>Diseño del sistema Inyector</i>	49
4.4 <i>Diseño del sistema de Alimentación</i>	57
4.5 <i>Diseño del sistema de Retención</i>	59
4.6 <i>Diseño del sistema de Calefacción</i>	63
4.7 <i>Diseño del sistema de sujeción de matriz</i>	71
4.8 <i>Diseño de la Estructura</i>	81
4.9 <i>Diseño de los sistemas auxiliares</i>	88
Capítulo 5 Construcción	89
5.1 <i>Construcción</i>	90
5.2 <i>Construcción del sistema motor</i>	91
5.3 <i>Construcción del sistema Inyector</i>	99
5.4 <i>Construcción del sistema de Alimentación</i>	106
5.5 <i>Construcción del sistema de Retención</i>	110
5.6 <i>Construcción del sistema de Calefacción</i>	116
5.7 <i>Construcción del sistema de sujeción de matriz</i>	120
5.8 <i>Construcción de la estructura</i>	122
5.9 <i>Construcción de los sistemas auxiliares</i>	125
5.10 <i>Tareas futuras</i>	129
Capítulo: 6 Conclusión	130
6.1 <i>Conclusiones</i>	131
Bibliografía	133

## Lista de figuras

Figura Nº 1: Árboles de anillos para uso en orfebrería.	15
Figura Nº 2: Geometría simplificada para en análisis inyección.	25
Figura Nº 3: Curva de presión de inyección.	26
Figura Nº 4: Vista interior de actuador de un solo sentido o de simple efecto.	30
Figura Nº 5: Vista del interior de un actuador de doble efecto	31
Figura Nº 6: Corte de bomba hidráulica de engranajes externos.	32
Figura Nº 7: Esquema básico de la válvula reguladora de presión.	34
Figura Nº 8: Esquema de conexiones de la válvula reguladora de caudal.	34
Figura Nº 9: Posiciones 1 y 2 de la corredera. Se puede apreciar como quedan vinculadas las conexiones.	35
Figura Nº 10: Diagrama básico de las distintas partes y su disposición.	45
Figura Nº 11: Esquema básico del sistema inyector.	50
Figura Nº 12: Disposición de los elementos en el cilindro.	52
Figura Nº 13: Dimensiones del pico inyector.	53
Figura Nº 14: Fuerzas sobre el cilindro y sus componentes.	54
Figura Nº 15: Sujeción del cilindro inyector.	55
Figura Nº 16: Diseño preliminar.	58
Figura Nº 17: Ubicación de los elementos de retención.	59
Figura Nº 18: Vista en corte de la válvula a claveta y su sentido de circulación.	61
Figura Nº 19: Fotografía del corte de una válvula a disco.	61
Figura Nº 20: Disposición de la matriz y su línea de partición.	72
Figura Nº 21: Vista de la estructura y base porta matriz sin la chapa.	73
Figura Nº 22: Tornillo de movimiento.	75
Figura Nº 23: Estructura que contiene a los cilindros.	83
Figura Nº 24: Carga y reacciones del elemento.	84
Figura Nº 25: Solicitaciones máximas sobre el perfil.	85
Figura Nº 26: Flecha en la viga.	86
Figura Nº 27: Cilindro hidráulico.	95
Figura Nº 28: Conjunto bomba-motor-depósito.	95
Figura Nº 29: Válvula reguladora de Presión adquirida.	96
Figura Nº 30: Válvula reguladora de Caudal adquirida.	97
Figura Nº 31: Comando Hidráulico.	97
Figura Nº 32: Diagrama hidráulico del equipo construido	98
Figura Nº 33: Cilindro aislado.	100
Figura Nº 34: Dimensiones del cilindro inyector.	101
Figura Nº 35: Cilindro hidráulico adquirido.	101
Figura Nº 36: Juego de vástago, pistón y tapón roscado.	102
Figura Nº 37: Adaptaciones del cilindro inyector.	103
Figura Nº 38: Dimensiones del pico inyector.	103
Figura Nº 39: Pico inyector fabricado.	104
Figura Nº 40: Detalles de las sujeciones del cilindro.	105
Figura Nº 41: Conjunto terminado.	105
Figura Nº 42: Longitud donde debe ser alojado el recipiente.	107
Figura Nº 43: Medidas finales.	108
Figura Nº 44: Recipiente fabricado.	108
Figura Nº 45: Esquema completo del sistema de alimentación.	109
Figura Nº 46: Prediseño de la primera válvula y sus elementos.	110
Figura Nº 47: Prediseño de la segunda válvula.	114
Figura Nº 48: Válvulas construidas y pico inyector.	115
Figura Nº 49: Ubicación de las resistencia calefactores.	117
Figura Nº 50: Sunchos calefactores adquiridos.	118
Figura Nº 51: Termostato y controlador PID.	119
Figura Nº 52: Tornillo con su rosca prolongada.	120
Figura Nº 53: Tuerca fija a la estructura.	121
Figura Nº 54: Estructura que contiene a los cilindros.	122
Figura Nº 55: Pórtico y porta matriz.	123
Figura Nº 56: Perspectiva del bastidor.	123
Figura Nº 57: Estructura y bastidor.	124
Figura Nº 58: Esquema Eléctrico.	126
Figura Nº 59: Tablero eléctrico con los controles.	127
Figura Nº 60: Banco de trabajo.	128

# Capítulo: 1

## Objetivo y alcance

## **1.1 Objetivo**

El siguiente proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema inyector de cera para ser utilizado en el método de colada de precisión denominado “moldeo por ceras perdidas”.

## **1.2 Alcance**

El presente trabajo final, alcanza la construcción del sistema de inyección que será utilizado en el marco del proyecto titulado “Obtención, microestructura y propiedades de aleaciones metálicas utilizadas en implantes intracorpóreos”. Dicho proyecto se desarrolla en el Área Metalurgia del Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería (UNMdP) y es financiado por la SECYT. En primera instancia, el alcance del proyecto está determinado por los requisitos y necesidades de un equipo de investigación, una vez determinados estos, el factor económico y la disponibilidad de materiales se tornaran decisivos.

## Capítulo: 2

# Introducción y Justificación

## **2.1 Justificación Personal**

La carrera de ingeniería posee numerosas ramas y hoy en día se tiende al desarrollo de nuevas especializaciones cada vez más específicas, acotando las áreas de estudio en cada una de estas. Dentro de las distintas ramas de esta ciencia exacta, la ingeniería Electromecánica es una de las especializaciones con un amplio campo de temas de estudio, ya que no solo se abordan temas de índole mecánico y eléctrico, sino también la interacción entre ambos para poder obtener el máximo beneficio de su complemento.

Durante el transcurso de la carrera, se han adquirido los conocimientos pertinentes mediante la participación de las clases, realización de trabajos prácticos y visitas a distintos establecimientos; y como etapa final para englobar todos estos conocimientos; se requiere llevar a cabo un proyecto final para la obtención del título de grado, por lo que la realización de este proyecto tiene por objeto proporcionar éste último elemento necesario para tal fin, con el que se le da un cierre a la etapa estudiantil y el comienzo de la vida profesional.

Este tipo de proyectos pueden ser llevados a cabo de diferentes formas, pueden ser proyectos individuales o bien en grupo; puede ser un tema propuesto por el alumno, la participación de una pasantía laboral en una empresa o un desarrollo en conjunto con la facultad. En todas estas formas diferentes de realización se opera de manera muy similar, se comienza con una búsqueda de material bibliográfico; con este se realiza un desarrollo teórico o el diseño de una instalación industrial, una máquina que desempeñe una tarea específica, la mejora en un proceso industrial, etc. Excepto en los desarrollos teóricos, muchos de estos tienen, posteriormente, un desarrollo concreto, que suele quedar indicada la forma de realizarlo, pero rara vez se lleva a cabo durante la realización del proyecto; dicho desarrollo práctico queda postergado, siendo realizado por otro grupo de trabajo y en muchas ocasiones nunca se realiza.

En lo personal, lo relacionado con la metalurgia llamó mi interés durante el transcurso de la materias obligatorias de la carrera, por lo que continué su estudio con materias optativas relacionadas, como Aceros Inoxidables y Teoría de la Fundición, y al momento de elegir el proyecto final surgió la posibilidad de realizarlo con la División Metalurgia del INTEMA que opera en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. El hecho de realizar el proyecto final en un área de mi agrado, que cuenta con reconocido prestigio y considerando el tipo de proyecto a realizar, fueron los factores determinantes para la elección del mismo.

En cuanto al tipo de proyecto, cabe destacar que durante el transcurso de la carrera se realizaron una gran cantidad de trabajos prácticos de menor escala a la que éste proyecto demanda, y se observó que siempre se realizan en un marco teórico que cuadra con las necesidades facultativas del momento, pero que distan mucho de la situación real con todo lo que ésta acarrea. En los trabajos previos realizados en la facultad, se dejan de lado una gran cantidad de variables, y existen ciertos detalles y pormenores que solo son notados al momento del desarrollo de un proyecto con una realización real en todos sus aspectos.

Bajo esta consideración, y teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, siendo este proyecto de naturaleza práctica; particularmente lo considero una experiencia ampliamente enriquecedora que me aproxima y da una visión más cercana a la vida profesional que continua luego de esta etapa.

## **2.2 Introducción al Proyecto**

Los implantes intra-corpóreos o prótesis son piezas o conjuntos de piezas utilizados para suplir o complementar las funciones de huesos o articulaciones que, por algún accidente o enfermedad, los mismos no son capaces de cumplir. Una vez que las prótesis han sido implantadas mediante una operación quirúrgica, éstas deben permanecer en el interior del cuerpo humano por períodos prolongados. Para cumplir sus funciones las prótesis deben poseer una determinada rigidez, peso, etc y además deben soportar las sollicitaciones impuestas en servicio, que involucran cargas estáticas, dinámicas y cíclicas (fatiga), el desgaste y, principalmente, resistir el ataque químico del medio intracorpóreo. Los metales son los materiales más aptos para este uso, ya que combinan muy buenas propiedades mecánicas con una aceptable compatibilidad con el medio intracorpóreo.

Actualmente las aleaciones metálicas que se usan más frecuentemente para la construcción de implantes óseos son 4:

- Aceros inoxidables austeníticos de bajo carbono
- Aleaciones de Co-Cr-Mo
- Aleaciones de Co-Cr-Mo-Ni
- Aleaciones de Titanio

Cabe destacar que aunque los aceros inoxidables son las aleaciones más económicas y de mayor disponibilidad, su uso en países desarrollados se está restringiendo por su menor resistencia a la corrosión y por su alto contenido de níquel, que ocasiona problemas a las personas alérgicas.

Se estima que en la Argentina se realizan 20.000 operaciones anuales para implantar prótesis de hombro, cadera, rodilla y columna (cifra no oficial del INDEC, este dato se obtuvo de la consulta con 4.500 médicos ortopedistas). Por razones de disponibilidad y principalmente de costo, se opta mayoritariamente por el uso de implantes de acero inoxidable. Es evidente que una falla severa en la prótesis desemboca en la remoción de la misma, interviniendo quirúrgicamente al paciente, y generando todas las complicaciones que esto implica, partiendo de los perjuicios legales y económicos, el proceso sumamente traumático con el posterior período de rehabilitación y, finalmente y más grave, la posibilidad de no poder realizar nuevamente el implante lo que lleva a invalidez permanente.

La mayor cantidad de fallas en las prótesis están relacionadas con su mala calidad. Sin embargo, existe una amplia normativa internacional (normas DIN, ASTM, ISO) y nacional (normas IRAM) en lo que respecta a los materiales a utilizar, métodos de diseño y fabricación, ensayos, terminación y esterilización; lo que lleva a la conclusión de que el grado de control ejercido por el ente regulador es insuficiente.

La mala calidad de la prótesis puede estar dada por 2 factores: un material de mala calidad que no cumple las especificaciones que se requieren, o un proceso de fabricación ineficiente. De los 2 factores, el más difícil de controlar es el proceso de fabricación, ya que partiendo de un material de buena calidad, la cantidad de procedimientos que implica la confección de la pieza da lugar a que un error en cualquiera de estos genere una prótesis de mala calidad. Además cabe destacar que uno de los procesos más utilizados para la confección de prótesis, es el de “moldeo por ceras perdidas”, un método de colada de precisión, que involucra muchos procedimientos sumamente delicados; con lo cual se concluye que para obtener resultados positivos; estos procedimientos se deben ejecutar de manera precisa, bajo una normativa exigente que los controle. En los detalle de este método se profundizará posteriormente.

La problemática de la normativa nacional en cuanto a los detalles y vacancias de la misma; y principalmente del control de su aplicación por parte del ente regulador gubernamental, la ANMAT (Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica), quedó expuesta en una reunión celebrada por miembros de la AAOT (Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología) y representantes del INTEMA, donde se acordó establecer un convenio entre la Facultad de Ingeniería de Mar del Plata y la AAOT, con la intención de desarrollar un normativa que se ajuste a las necesidades presentes y para que la ANMAT tome las medidas correspondientes para su implementación, tanto para los productores nacionales de prótesis como también sobre los productos importados; cuando la normativa mencionada sea presentada por la AAOT ante el ente regulador ANMAT. La aplicación de la misma no sólo debe garantizar la calidad en las prótesis de fabricación nacional, sino también debe estar acorde a las exigencias internacionales para que el producto nacional tenga inserción en el exterior en tiempo y forma.

La División Metalúrgica del INTEMA (DMI), que se encuentra en la Facultad de Ingeniería de Mar del Plata, es la encargada de llevar acabo este proyecto, por tener una amplia experiencia en lo que respecta al conocimiento de los metales, su composición química, micro-estructura y solidificación, tratamientos térmicos y análisis de impurezas, además de haberse realizado 2 trabajos finales en el tema de prótesis de caderas. Para realizar el estudio requerido por la AAOT, se deberá desarrollar por completo un proceso de fabricación utilizado para la confección de las prótesis, dado que de la implementación del mismo se podrán detectar las falencias en los procedimientos y sus soluciones; dando de esta forma la experiencia necesaria para desarrollar la normativa exigida. El proceso de fabricación elegido es el de “ceras perdidas” mencionado anteriormente, y del desarrollo del mismo es donde se requiere llevar a cabo este proyecto en particular, que es el Diseño y Construcción de un Sistema Inyector para el Método de Colada “Ceras Perdidas”.

## Capítulo: 3

# Revisión Bibliográfica

## **3.1 Fundición y Colada de metales**

### **3.1.1 Obtención de piezas metálicas**

La fabricación de una pieza metálica puede abordarse empleando distintas metodologías. Entre estas, pueden mencionarse el mecanizado a partir de un producto semiterminado, el ensamble por soldadura de partes primarias, la forja en caliente a partir de productos semiterminados, o el colado de la pieza en un molde a partir de metal fundido. Cada uno de estos métodos de obtención posee ventajas comparativas para ciertas aplicaciones o tipos de pieza. En particular, cuando se desean producir series medianas o pequeñas de piezas de morfología relativamente complicada, el método de fusión y colada en molde presenta ventajas sobre las demás alternativas.

### **3.1.2 Descripción general del proceso de colada de metales**

Colar un metal consiste en verter el metal en estado líquido dentro de un recipiente o molde que contiene una cavidad con la forma de la pieza deseada, esperar que este solidifique, para luego separar la pieza deseada del molde. Pero esta descripción simplificada del proceso no contempla la gran cantidad de problemas técnicos que este acarrea. Dentro de los diversos puntos críticos del proceso, pueden destacarse los siguientes:

- Obtención de metal fundido de la composición química deseada, libre de contaminaciones
- Disponer de un material refractario que contenga el metal fundido
- Confección de moldes adecuados para producir piezas con la forma final deseada, sanas interna y externamente. Esto involucra el uso de materiales de moldeo específicos, y técnicas de fabricación seriada de moldes

El molde y su metodología de obtención constituyen aspectos cruciales de la tecnología de fusión y moldeo. Se han desarrollado diversos métodos de moldeo, la mayoría enfocados en la concepción diferente del molde según el requisito de productividad, el metal a fundir, la calidad de la pieza, costos, etc.

### **3.1.3 Moldes y Modelos**

Antes de describir los métodos de moldeo, es conveniente definir los conceptos de moldes y modelos, ya que básicamente son los que definen a cada método.

El modelo, o también llamado positivo, es una reproducción total o parcial de la pieza que se desea obtener al final del proceso. Este puede ser una reproducción fiel de la pieza deseada o puede tener alguna dimensión ligeramente mayor que luego se mecaniza. Existen dos grandes tipos de modelos, los modelos permanentes, que pueden ser utilizados el número de

veces que su vida útil lo permita; y los modelos perdidos que durante el proceso son destruidos.

Los modelos son utilizados para la confección del molde, o también llamado negativo. El molde es la cavidad que durante el proceso es llenada por la aleación en estado líquido, adoptando la forma de la pieza deseada. El molde es de material refractario o bien de algún metal con punto de fusión mayor a la aleación a colar. Nuevamente existen dos grandes grupos de moldes, los caducos, que solo son utilizados una sola vez; y los permanentes. Estos últimos por lo general no requieren de modelos ya que son mecanizados sobre bloques de metal a fin.

### **3.1.4 Métodos de moldeo**

El material más utilizado para la confección de moldes es la arena. Existen varios tipos de arenas que se usan para este propósito, todas con distintas propiedades (refractoriedad, puntos de fusión, granulometría, etc.); también varias formas de ligarlas entre las cuales se pueden nombrar el uso de distintas arcillas con diferentes grados de humedad, resinas que “curan” con catalizadores o calor; y hasta cemento. El empleo de arenas tiene como ventaja que los costos de moldeo son bajos y en algunos casos hasta pueden reciclarse las arenas, pero como contraparte la precisión dimensional y la terminación superficial de las piezas producidas son bajas.

Para piezas de gran tamaño fabricadas en series pequeñas, es común emplear modelos perdidos contruidos en Poliestireno expandido (telgopor). El molde se construye recubriendo los modelos con arenas. Al momento de colar el metal fundido, los modelos se vaporizan por efecto de la alta temperatura del metal. Esta técnica permite obtener piezas de hasta 30 toneladas [1].

Cuando se requiere una alta productividad y el metal a fundir lo permite (bajo punto de fusión, como el aluminio) se realizan moldes permanentes en metal, que luego estos pueden ser asistidos por presión o no, con cámara caliente o fría. Como dato orientativo, con uno de estos moldes, asistidos por presión con cámara caliente y con un sistema automatizado, se llegan a producciones de hasta 1000 piezas por hora; obviamente esto repercute directamente sobre el costo del equipamiento. Este método permite obtener piezas de excelente precisión dimensional y terminación superficial. Sin embargo, su uso está limitado a la producción de metales de bajo punto de fusión.

Por último, cuando se busca producir piezas de alta precisión dimensional y terminación superficial, los moldes cerámicos son la mejor opción. Existen básicamente dos métodos, uno para piezas de buen tamaño (encima de 10Kg) que es el método **Shaw**, y otro para piezas más pequeñas que es el método de **ceras perdidas**. El primero emplea un modelo emplacado de la mitad de la pieza deseada, realizado en metal o polímero. Esta placa se posiciona en un marco y se cubre con barros refractarios, creándose una capa o “shell”. Se realiza la misma operación con el modelo de la mitad restante de la pieza, y se une a continuación ambas partes para obtener el molde de la pieza. Los cerámicos luego son sinterizados mediante calor quedando listo el molde para su uso, con la posibilidad de aprovechar la caída de temperatura

del sinterizado que mejoran la colabilidad y la rotura del molde por shock térmico.

El otro método de confección de moldes cerámicos es el de **ceras perdidas**: Como éste último es el que se utilizará para el desarrollo del proyecto de investigación, merece una descripción más precisa que será dada en el siguiente capítulo.

En la siguiente tabla se muestra una comparación entre los diferentes métodos de moldeo [1].

*Diseño y construcción de un sistema inyector de cera para el método de colada “Ceras Perdidas”*

	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Costos</b>	<b>Complejidad</b>	<b>Calidad</b>	<b>Rugosidad</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Toler [mm]</b>	<b>Aleaciones</b>
<b>Arenas en Verde</b>	Fund. de Fe, fund de Al	Modelo de bajo costo	Baja calidad	Bajo en cantidad y muy bajo en piezas únicas	Baja. Espesor mínimo: 3mm	Baja	Baja, pero muy dependiente de las arenas y su reciclado	Ilimitado, pero para altas producciones	0,38	Ilimitado
<b>Arenas en Seco</b>	Fundiciones de hierro partes esbeltas	Mejores prop. respecto a Arenas en verde	Moldes de mayor costo respecto al verde	Baja, pero mayor a moldes en verde	Baja. Espesor mínimo: 2,5mm	Baja, pero superior al verde	Baja, pero superior al verde	Ilimitado	0,3	Ilimitado
<b>Coquillas</b>	Competitivo con Al y Cu fundidos por precisión	Molde permanente	No apto para aleaciones de más de 1000°C	Rentable p/alta producciones	Baja. Congela en zonas esbeltas	Buena	Buena. Craking por fatiga térmica	Hasta 50 Kg, más se daña la coquilla	0,76	Base Cu y de más T de fusión
<b>Die Casting Cámara Fría</b>	Aleaciones livianas, con problemas de colabilidad	Muy alta repetitividad. Buena copiabilidad	Alto costo del herramental Severas cond. de trabajo	Muy bajo en altas cantidades	P/Piezas esbeltas y complejas	Buena	Muy buena	Pequeñas y medianas	0,25	Base Al, Base Zn y de más bajo T de fusión
<b>Die Casting Cámara Caliente</b>	Aleaciones de muy bajo punto de fusión	Muy alta Colabilidad	Muy alto costo del herramental. Condiciones de trabajo muy severas	Muy bajo en altas cantidades	P/Piezas esbeltas y complejas	Muy buena	Muy buena	Pequeñas y medianas	0,25	Base Al, Base Zn y de más bajo T de fusión
<b>Modelo Perdido PS Exp.</b>	Piezas únicas de gran tamaño y/o bajas cantidades	No se desmodela. Arenas 100% reciclables	Altas reacciones modelo/metal. Presencia de poros	Bajo, arenas sin ligante. Modelo delicado	Sin limitaciones de complejidad	Buena a excelente	Buena a muy buena	Grandes a muy grandes. Alta polución	0,25	ilimitado
<b>Moldes Cerámicos Shaw y Ceras Perdidas</b>	Colada de precisión. Muy buena calidad metalúrgica	Muy alta colabilidad. Moldes precal. 800°C	Matriz metálica para inyección de ceras	Alto, pero con muy baja presencia de defectos	Shaw: ilimitado CP: ausencia de hoyos	Muy buena. 0 Reacción molde/metal	Excelente, las mejores posibles	Shaw: medianas a grandes CP: pequeñas	0,05	Rentable p/aleaciones de muy alto valor agregado

## **3.2 El Método de Ceras Perdidas**

### **3.2.1 Reseña histórica**

El método de ceras perdidas es un sistema de colada de precisión mediante modelo perdido. Si bien en el proceso para su implementación hay un alto número de pasos complejos y delicados, es un método que ha sido usado ya desde varios años atrás, tanto que han sido encontrados trabajos en bronce de piezas de arte que datan del año 1800 AC. [PW1], tiempos en los cuales el proceso era sumamente rústico y se utilizaba cera de abejas para la confección del modelo.

Hoy en día, gracias a los avances en distintos campos de la ciencia y los requerimientos cada vez más exigentes, tantos tecnológicos como de consumo, han llevado este método a la confección de piezas de niveles de calidad anteriormente impensados, tanto por el nivel de terminaciones superficiales como las tolerancias que se alcanzan.

### **3.2.2 Descripción del método**

El método de ceras perdidas o su denominación en inglés “investment casting”, se define como un sistema de colada de precisión mediante un molde cerámico obtenido a partir de un modelo que en el proceso se destruye o “pierde”, razón por la cual se llama “modelo perdido”. El método es considerado de precisión porque el nivel de terminación superficial alcanzado mediante el mismo es excelente (el máximo posible), sumado a tolerancias dimensionales de  $\pm 0,05\text{mm}$ . Estas características son logradas gracias al empleo de un molde cerámico. El uso de este método se justifica cuando la obtención de una pieza FCF (Forma Cercana a la Final), o su denominación en inglés NNS (Near Net Shape), es crítica; como cuando el metal con el que se realiza la colada es de alto valor, y el ejemplo más común es la orfebrería, ya que si se están realizando piezas en oro u otro metal precioso, resulta inadmisibles desperdiciar metal mediante un posterior mecanizado [1].

El material de modelado tiene que reunir varias características, como posibilitar una fácil remoción del molde, la inexistencia de interacciones entre éste y el molde, y posibilitar la fabricación de modelos de la menor rugosidad posible. En general, las ceras de distinto tipo resultan materiales indicados. Los modelos se obtienen inyectando la cera fundida en el interior de una matriz, generalmente de aluminio, con la forma de la pieza deseada.

Cuando ya se obtuvieron una cierta cantidad de modelos, una práctica habitual es la de formar racimos o también llamados árboles de los modelos de cera (Figura N° 1). Esto se logra “pegando” los modelos sobre una barra cilíndrica, o de otra forma específica, que luego al verter el metal o aleación, actuará como canal de colada, por lo que se puede llenar varias cavidades de moldeo en una misma colada.



Figura N° 1: Árboles de anillos para uso en orfebrería.

Los factores a ser considerados en el diseño de un sistema de moldeo por ceras perdidas incluyen la facilidad del ensamblado del árbol, el número de piezas procesadas de una vez, la ración de metal vertido a la remesa de colada, la resistencia mecánica para su manejo, la facilidad del formado y secado del molde, y la remoción de la cera, el flujo de metal líquido dentro del molde durante el colado, el correcto llenado de las secciones más delgadas, la alimentación de la contracción por cambio de estado, el control de tamaño de grano y forma (cuando se especifica), la remoción de la coraza o molde luego de completar la solidificación, la facilidad para la remoción de los sistemas de alimentación de las piezas y el mecanizado de terminación, y finalmente los equipamientos y procesos disponibles para implementar el sistema de colado.

Tres requerimientos son esenciales:

- Proveer un ramo que es propiamente dimensionado y lo suficiente fuerte para ser manejado a lo largo del proceso.
- Satisfacer los requerimientos metalúrgicos.
- Proveer especímenes separados para testeo químico y mecánico (cuando es requerido).

En aquellos casos en que se requiere un mayor control del grano, ya sea para obtener una microestructura equiaxial, una columnar (solidificación

direccionales), o una colada monocristalina, se utilizan frecuentemente los árboles en forma circular para proveer uniformidad térmica. El proceso específico de colada usado, tal como colada contra gravedad, solidificación direccional, o colada centrífuga, puede dictar los caracteres básicos del diseño del árbol.

Ya constituido el árbol se procede a recubrirlo con un baño de material refractario. El material refractario para el moldeo es un "barro" constituido por uno o más ligantes y varios compuestos, como alúmina o sílica; aunque mayoritariamente por harina de zirconio [2]. Además de su muy baja granulometría, que permite obtener excelente terminación superficial, estas harinas están caracterizadas por poseer muy bajos coeficientes de dilatación térmica, por lo que la estabilidad dimensional queda ajustada y se pueden alcanzar los niveles de tolerancia mencionados. El barro refractario es una de las primeras capas que se aplican, posteriormente se aplican capas con mayor tamaño de partícula; y luego capas de polvo refractario para conferirle estabilidad estructural al molde. Dado que el barro aplicado en la primera capa reproducirá fielmente la superficie del modelo, éste debe tener un alto grado de calidad, tanto dimensional como superficialmente, que son los puntos fuertes de este método.

Luego de otorgarle una cierta estabilidad estructural al molde mediante un secado en salas con temperaturas y humedad controladas, el modelo debe ser retirado para constituir la cavidad de moldeo, que será ocupada por el metal, posteriormente. Para ello se lo somete a temperatura en un autoclave, mediante vapor de agua a presiones entre 6 y 10 atmósferas. En ese proceso la cera se derrite, decanta por gravedad y es recuperada para su reutilización. La diferencia de presiones, junto a la dilatación de la cera produce microgrietas que mejoran la permeabilidad del molde. En esta etapa el árbol queda listo para realizarle el sinterizado, introduciéndolo en un horno apropiado a altas temperaturas, de entre 850°C y 1100°C. El sinterizado incrementa las propiedades mecánicas del molde y elimina los restos de cera que pueden llegar a quedar en su interior. En este punto, el árbol está listo para realizar la colada. En la práctica habitual, el colado se realiza inmediatamente después de retirar el molde del horno de sinterizado. De esta forma se aprovecha la alta temperatura, aumentando significativamente la colabilidad, permitiendo que el metal realice un mejor copiado del molde y reduciendo el shock térmico. La temperatura de precalentamiento del molde depende de la aleación que se ha de colar, siendo valores típicos de entre 150°C y 540°C para aleaciones de aluminio, 425°C y 650°C para aleaciones base cobre y de 870°C y 1095°C para acero y superaleaciones base níquel y cobalto. Por último, los moldes para solidificación direccional son precalentados por encima de la temperatura de fusión de la aleación a colar [2].

En esta parte del proceso el metal ya puede ser volcado dentro del árbol. Si bien el método de colada tradicional, consistente en volcar el metal fundido dentro del molde en contacto con el aire, es simple y no requiere de equipamiento costoso; existen otros métodos de colado que presentan ventajas técnicas. Por ejemplo, la colada al vacío provee un metal más "limpio" al evitar el contacto del metal con los gases atmosféricos, y con propiedades superiores. Esta tecnología se aplica habitualmente en el colado de súper-aleaciones de base níquel, algunas aleaciones de base cobalto, metales

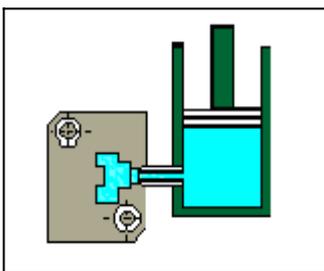
refractarios, como así también en aleaciones de base titanio, que requieren este método para evitar su oxidación por el contacto con el oxígeno del aire.

Existe otro método que utiliza vacío solamente en el molde. En este caso, el molde se posiciona con su abertura hacia abajo, poniéndolo en contacto con el metal fundido en el crisol. Como consecuencia de la diferencia de presión entre el interior y el exterior del molde, el metal asciende y se produce un llenado progresivo. Este método se llama: colado en contra de la gravedad con asistencia de vacío (CCG). En este método se toma el metal por debajo de la superficie del líquido expuesto a la atmósfera, por lo que el nivel de inclusiones se reduce significativamente. También se puede controlar la velocidad de llenado del molde variando la diferencia de presión, posibilitando la realización de un llenado menos turbulento, además de la eliminación de gases que puede provocar el ingreso del metal líquido dentro del molde. Este método es altamente eficiente para el llenado de espesores delgados, de 4mm y aún menores [3]. Por último con respecto a este tema, vale la pena mencionar que esta forma de colada será la que se implementará en el trabajo de investigación sobre las aleaciones utilizadas en implantes intra-corpóreos.

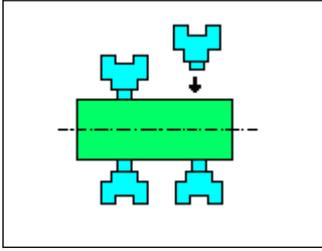
Una vez solidificado el metal, se procede a la remoción del molde cerámico; esto se realiza en primera instancia con un martillo neumático o simplemente mediante trabajo manual y luego se puede arenar, limpiar con agua a presión o también, si la aleación lo permite, se usa algún agente químico.

El paso siguiente es la separación de las piezas del árbol, cortadas con herramientas adecuadas como sierras para aleaciones de aluminio, cobre y magnesio; o discos abrasivos para aceros y súper-aleaciones. El metal sobrante, usualmente denominado retorno, puede ser limpiado y utilizado nuevamente como carga del horno, siempre que la calidad de las piezas a fundir lo permita.

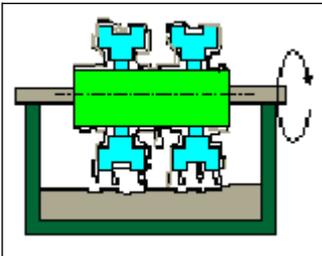
A continuación se muestran las etapas del proceso:



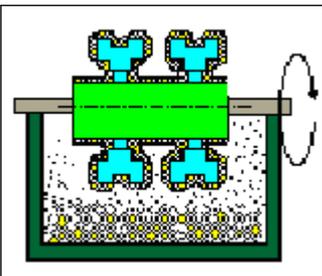
**Inyección de cera:** Primer pasó del proceso, se inyecta la cera dentro de la matriz y se obtiene el modelo de la pieza desea.



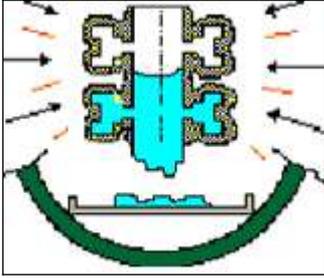
**Armado de racimos:** Una vez obtenidos varios modelos, se procede al “pegado” de los mismos a una barra de cera que luego actuará de canal de colada.



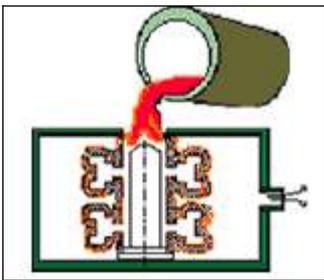
**Baño cerámico:** Constituido el racimo o árbol, se le realiza el baño con un barro de harinas refractarias. Esta primera capa le otorga gran terminación superficial al molde.



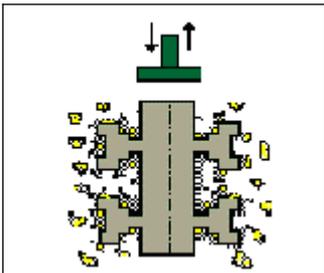
**Polvos refractarios:** Con el baño cerámico aún fresco, se le aplican polvos refractarios de mayor granulometría, otorgándole estabilidad estructural al racimo.



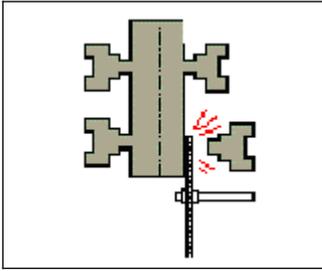
**Des-encerado:** El mismo se realiza en un autoclave. Se recupera la cera para su reutilización.



**Sinterizado y colada:** En un horno se realiza el sinterizado a la temperatura óptima para la aleación en cuestión; cuando se alcanza se realiza la colada de la misma.



**Remoción del molde:** Una vez solidificada la aleación, el molde queda adherido a las piezas, por lo que se remueve mediante diferentes métodos mecánicos, y de ser necesario mediante limpieza química.



**Corte de las piezas:** Por último se cortan del canal de colada y se obtienen las piezas. La aleación sobrante se reutiliza para cargar el horno.

Estas son las etapas fundamentales del proceso de ceras perdidas, posteriormente existen otras etapas pero no son propias del proceso en cuestión, son comunes a prácticamente todos los procesos de colada, dentro de ellas podemos encontrar:

- Un control dimensional a la pieza para asegurarse que ajusta a las especificaciones. De ser necesario y viable, se la maquina.
- Un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades mecánicas.
- Si la pieza es de compromiso, se le pueden realizar análisis mecánicos y de micro-estructura; como también ensayos no destructivos apropiados.

De ajustarse a los requerimientos y cumplir con todas las especificaciones la pieza esta lista para entrar en servicio para el cual fue concebida.

### 3.2.3 Ventajas y Desventajas del método

Como se ha mostrado anteriormente, este método de colada de precisión se torna particularmente ventajoso cuando la pieza a fabricar es de alto valor agregado, tanto por el costo de la aleación a fundir como el nivel de precisión que se alcanza.

**Entre las ventajas se pueden mencionar:**

- **Altos niveles de precisión y terminación superficial:** Las piezas obtenidas del molde se encuentran prácticamente terminadas.
- **Reducción del material desperdiciado:** Las propiedades del molde cerámico hacen que no sean necesarias mazarotas y otros artilugios para asegurar el buen llenado, por lo que la relación entre el metal en la cavidad de moldeo y en el resto del molde es menor.
- **Baja reacción molde/metal:** Al ser un molde de naturaleza cerámica, que se encuentra “curado”, tiene muy poca erosión por parte del metal y prácticamente no interactúa con el molde, generando un pieza con mucho menor contenido de inclusiones no-metálicas. Tampoco hay presencia de agua ni ligantes de origen orgánico que puedan afectar la pieza.
- **Pre calentamiento del molde:** El pre calentamiento del molde a altas temperaturas que se aprovecha del proceso de sinterizado, mejoras notablemente la colabilidad y reduce el shock térmico que tantas veces afecta al molde quebrándolo y generando una pieza defectuosa. Se pueden obtener piezas con solidificación direccional, pre calentando el molde por encima del punto de fusión de la aleación a colar [2].

**Las desventajas que posee este método son:**

- **Los costos de los materiales:** El costo de la matriz para la inyección de cera y la nulidad del reciclado del material refractario del molde cerámico, elevan los costos del proceso, por lo que no se justifica su aplicación para aleaciones de bajo valor.
- **Baja permeabilidad del molde:** Esta baja permeabilidad requiere que sea generada una red de micro-grietas que permitan la salida del aire, aunque aplicando una colada contra gravedad asistida por vacío, como la que se aplicará en el proyecto de investigación, este problema estaría solucionado.

## 3.3 La inyección de cera

### 3.3.1 Ceras

La cera es el material base preferido para la mayoría de los modelos de investment casting, pero las mezclas que contienen solo ceras son raramente usadas. Las ceras son usualmente modificadas para mejorar sus propiedades a través de la adición de materiales tales como resinas, plásticos, material de llenado ó "filler", plastificantes, antioxidantes y secadores.

### 3.3.2 Propiedades de las ceras

En la formulación de los materiales para los modelos de cera, un número de áreas y otras consideraciones deben tenerse en cuenta. Estas están listadas abajo, con las consideraciones apropiadas de cada una [2]:

- Inyección: punto de ablandamiento, rango de congelado, propiedades reológicas, habilidad para duplicar detalles, superficie, y tiempo de preparado.
- Remoción, manejo, y ensamblado: Lubricidad, resistencia, dureza, rigidez, resistencia al impacto, estabilidad, y soldabilidad.
- Control dimensional: expansión térmica/contracción, contracción de solidificación, tendencia a la cavitación, distorsión, y estabilidad.
- Armado del molde: resistencia, permeabilidad, y resistencia a solventes.
- Desencerado y cocido del molde: punto de ablandamiento, viscosidad, expansión térmica, difusividad térmica, y contenido de cenizas.
- Varios: costo, viabilidad, facilidad de reciclado, toxicidad, y factores ambientales.

### 3.3.3 Tipos de las ceras

Las ceras que más se usan para modelos son las *parafinas* y *micro-cristalinas*. Estas dos son frecuentemente usadas en combinación, porque sus propiedades tienden a complementarse. Las ceras parafinas están disponibles en grados de control ajustados con puntos de fusión que varían en incrementos de 2,8° C; en el rango de 52° C a 68° C. El bajo costo de estas ceras, combinado con su fácil disponibilidad, la conveniente elección de

grados, su alta lubricidad y baja viscosidad de fusión, hacen que tenga un amplio uso. Sin embargo, sus aplicaciones son limitadas por su fragilidad y gran contracción. Las ceras micro-cristalinas tienden a ser altamente plásticas, y a prestar tenacidad a la mezcla de ceras. Las ceras micro-cristalinas están disponibles con puntos de fusión más altos que los de las parafinas y son usualmente usadas en combinación con parafinas.

La Ozocerita es una cera mineral que puede cumplir una función similar. Las ceras Fisher-Tropsch son ceras sintéticas de hidrocarburo que se asemejan a las parafinas, pero están disponibles en grados más duros y con puntos de fusión más altos. Estas mejoran la dureza y la rigidez, y promueven un preparado más rápido en las operaciones de armado del modelo. Las ceras base polietilenos (de mucho más bajo peso molecular que los plásticos polietilenos usuales) funcionan de la misma manera que las ceras Fisher-Tropsch, pero están disponibles en grados de aún mayor punto de fusión (sobre 132° C).

La Candelilla es una cera vegetal moderadamente dura y ligeramente pegajosa. Tiene una expansión térmica relativamente baja y menor contracción de solidificación que las ceras de hidrocarburos. La cera candelilla es útil para endurecer parafinas y elevar su punto de ablande. Desafortunadamente, ésta ha sido sujeta a escasez y grandes fluctuaciones de precio.

La Carnauba es otra cera vegetal. Esta tiene un punto de fusión alto y bien definido (83°C), y un bajo coeficiente de expansión térmico. La cera carnauba es muy dura, no pegajosa y frágil. Esta es bastante costosa, lo cual tiende a limitar su uso.

La cera de abejas es una cera natural de insectos que se derrite a aproximadamente 64° C. Esta es ampliamente usada para modelar y también es útil en el fundido del modelo, contribuyendo con características comparables a las ceras micro-cristalinas. Se cree que esta fue la cera utilizada originalmente para el método de colada por ceras perdidas, pero hoy su uso es limitado por su alto costo en comparación con otras ceras.

Los ácidos palmítico y esteárico son ácidos grasos que tienen buenas propiedades de cera. Estos tienen baja viscosidad y punto de transición, una expansión térmica relativamente baja en estado sólido, una contracción de solidificación relativamente baja, y buena compatibilidad con un amplio rango de materiales. Sin embargo otras ceras que han sido usadas son ceras "montan" (tanto de ácidos y tipo éster) ácido graso amida, ceresin, stearone, y aceite de castor hidrogenado.

Las ceras mencionadas anteriormente representan las más comúnmente utilizadas para construir modelos. De estas, las parafinas y las micro-cristalinas son las más populares. Muchas otras ceras están disponibles y son al menos potencialmente útiles. En muchos casos, una cera particular no es usada simplemente porque existe otra cera de menor costo que ofrece propiedades similares.

Las ceras proporcionan un buen balance de propiedades no obtenibles fácilmente con otros materiales. Estas son fácilmente mezclables para adaptarse a diferentes requerimientos, y son compatibles con otros materiales que pueden mejorar sus propiedades aún más. Su bajo punto de fusión y baja viscosidad las hacen fáciles de combinar, inyectar, ensamblar en ramo y derretir sin romper el delgado molde cerámico. Estas propiedades permiten a

las ceras ser inyectadas a baja temperatura y presiones, y también por su carencia de abrasidad, lideran como herramientas de bajo costo [2].

### **3.3.4 Aditivos**

Las ceras simples poseen muchas propiedades útiles, pero hay 2 áreas importantes en las cuales son deficientes:

- Baja resistencia mecánica y rigidez, especialmente críticas cuando se debe construir un modelo muy esbelto.
- Difícil control de la contracción por solidificación.

Una mejora puede ser hecha en estas áreas con aditivos no cerosos.

La resistencia y la tenacidad de las ceras son mejoradas mediante la adición de de plásticos de alto peso molecular bien definido, tales como polietileno, etil celulosa, nylon, etilen-vinil acetato, y etilen-vinil acrilato. Estos materiales son altamente viscosos a temperaturas de trabajo de las ceras, los cuales tienden a limitar las cantidades que pueden ser usadas. No obstante, estas cantidades son suficientes para hacer mejoras significativas en el manejo de los modelos y entramado. El polietileno es ampliamente usado porque es económico y compatible con un amplio espectro de ceras. La Etil celulosa ha tenido algún uso, pero es mucho más limitada en términos de compatibilidad, y es también más cara. El Poliestireno es raramente usado por su incompatibilidad con las ceras de uso más común. El acetato vinil-etileno y el acrilato vinil-etileno son los materiales más nuevos que están en aplicación creciente. El nylon ha tenido poco uso.

La contracción por solidificación, que suele causar defectos superficiales, es reducida de algún modo por los plásticos mencionados arriba. El efecto, sin embargo, es limitado por la baja cantidad que puede ser adicionada a la mezcla, ya que eleva la viscosidad en forma excesiva. Se pueden lograr mejoras agregando resinas y fillers. Las resinas son usadas frecuentemente en modelos de cera. Las resinas utilizadas para la reducción de la contracción son de menor peso molecular que los plásticos usados para el incremento de la resistencia mecánica. La resina más usada se ablanda gradual y continuamente con el incremento de la temperatura, no exhibiendo gran expansión de sólido a líquido durante el calentamiento, ni contracción durante el enfriamiento, que en cambio caracterizan la transformación de sólido a líquido en las ceras. Así, las resinas reducen este efecto en proporción directa con la cantidad usada. La cantidad puede ser bastante grande porque las resinas otorgan una viscosidad, derretida, relativamente baja a las temperaturas de procesamiento.

Las resinas que se pueden utilizar incluyen los numerosos derivados (eterificado, polimerizado, hidrogenado, y dehidrogenado) así como también resinas derivadas de árboles como Burgundy Pitch, dammar, y resina terpénicas. Hay resinas adicionales que incluyen resinas cumarona indeno, varias resinas de hidrocarburos del petróleo, y un número de resinas de carbón. Las resinas enumeradas abarcan un amplio rango de puntos de ablandamiento y relaciones viscosidad-temperatura. Estas varían a temperatura ambiente de blanda y pegajosa a dura y frágil, y estas pueden tener diferentes compatibilidades con ceras y plásticos particulares. Todos estos factores deben ser considerados y propiamente balanceados al usar resinas en modelos de cera [2].

### **3.3.5 Fillers o Rellenos**

La contracción por solidificación de las ceras puede también ser reducida al mezclar materiales sólidos en forma de polvo, llamados fillers o rellenos. Estos no se disuelven en la cera, y tienen un punto de fusión más alto que la cera base. Luego de la fusión de la cera base, se mantienen en forma de suspensión al momento de inyección en el molde. Como los rellenos no se derriten, no contribuyen a la contracción de solidificación de la mezcla, la cual es reducida en proporción a la cantidad usada. Los fillers que han sido usados para construcción de modelos incluyen polietileno, varios dicarboxiamidas y compuestos relacionados, ácido isoftálico, pentaeritritol, y hexametilentetramina. El filler preferentemente debería ser en la forma de pequeñas esferas de igual tamaño. Los fillers desarrollados incluyen poliestireno esferoidal, micro-esferas de carbono hueco, y partículas esféricas de plástico termoestables. En una variación del concepto de fillers, el agua ha sido emulsionada dentro de la cera derretida para brindar la misma función de los fillers sólidos. Este tipo de cera es comercialmente disponible.

Otros diversos aditivos pueden también ser usados en modelos de cera. Colores en la forma de tinturas oleos-solubles son usados para mejorar la apariencia, para proveer identificación, y para facilitar la inspección de los modelos derretidos. También hay antioxidantes que pueden ser usados para proteger las ceras y resinas sujetas a deterioro térmico. Aceites y plastificantes han sido usados para alterar las propiedades de inyección y, en ciertos casos, para reducir la contracción.

Como resultado de los diversos factores descriptos anteriormente, la composición de las ceras típicas de hoy en día (sin fillers) caen dentro de los siguientes rangos [2]:

<b>Ingredientes</b>	<b>Composición %</b>
Ceras (usualmente más de una)	30-70
Resinas (una o dos)	20-60
Plásticos (uno)	0-20
Otros	0-5

Las ceras “rellenadas” tienen materiales base similares, con 15 a 45 % de fillers agregados.

### **3.3.6 Resumen del proceso de inyección**

Una vez construida la matriz a utilizar, la inyección de los modelos de cera es el primer paso en el proceso de fabricación de un molde para investment casting. Este paso es fundamental para el éxito del proceso, ya que todos los defectos que el modelo de cera contenga serán reproducidos en los pasos siguientes y se verán manifestados en la pieza final.

La inyección de cera puede ser llevada a cabo de distintas formas, con la cera en estado completamente líquido, pastoso y hasta en estado sólido, aunque este último caso es considerado una extrusión de cera. El rango de

temperaturas usualmente empleado es desde 43° a 77° C, y las presiones desde 275KPa a 10,3MPa.

Desde un punto de vista teórico, en una inyección de cera en estado líquido (que es la forma en que inyectará la máquina a diseñar), la cera comienza a llenar la cavidad central de la matriz a baja presión. La cera sigue ingresando y comienza a llenar las cavidades menores hasta que la matriz se encuentra completamente llena, punto en que se igualan las presiones de inyección y la del interior de la matriz. Se mantiene esta presión durante un tiempo (tiempo de mantenimiento o holding time) hasta que la cera alcanza un grado de solidificación suficiente para quedar contenida en la matriz al despresurizar. Los pasos siguientes son esperar la total solidificación de la cera y su desmoldeo de la matriz, pero estos pasos ya no pertenecen a la inyección propiamente dicha.

Los tiempos y velocidades de inyección varían de acuerdo a las condiciones de inyección de la cera (temperatura, presión, etc.), como también según la geometría de la cavidad, el punto de inyección, la temperatura de la matriz (calefaccionada o no), etc.

Dada la complejidad que tiene la inyección, tanto por las propiedades de la cera como por las distintas geometrías de las matrices, se realizan inyecciones con ciertas condiciones ajustadas, en geometrías simples para ver el comportamiento (Figura N° 2).

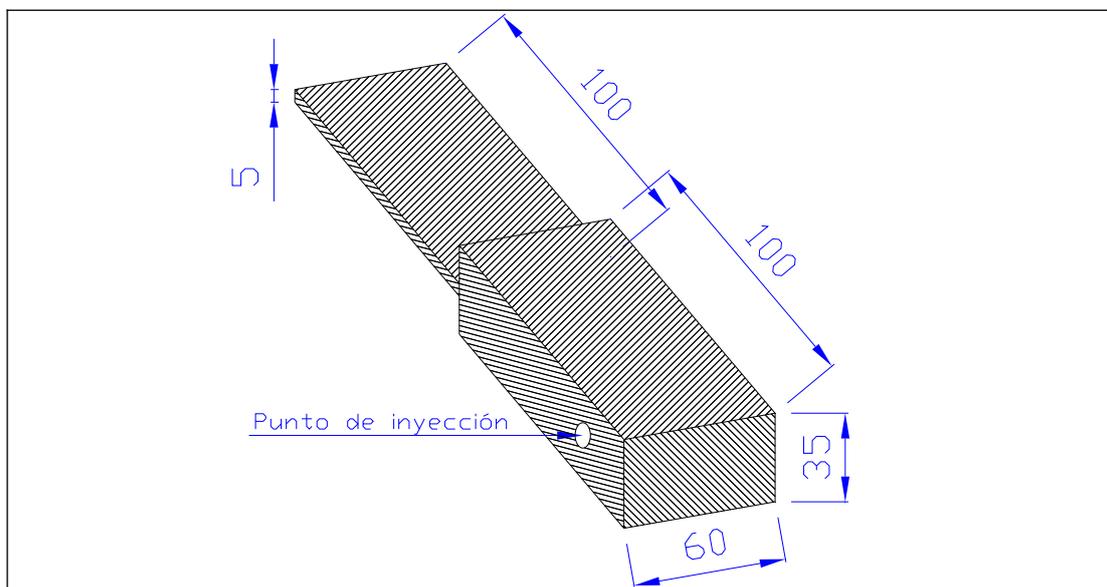


Figura N° 2: Geometría simplificada para en análisis inyección (mm) [4].

Para esta geometría, con cera en estado líquido y una presión de inyección de 25Bar (25,5Kg/cm<sup>2</sup>), la curva de presión censada en la entrada del molde se observa en la (Figura N° 3).

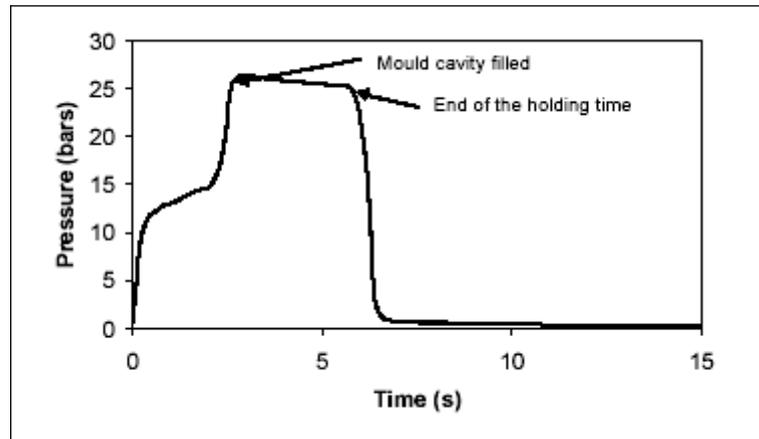


Figura N° 3: Curva de presión de inyección [4]

Otro dato importante que se deduce es que, según el tipo de cera y la geometría de la matriz, se deberá determinar la presión y la temperatura de inyección; porque se debe considerar la contracción de la cera al solidificarse y luego enfriarse.

Del análisis de todo lo expuesto, y considerando las condiciones reales en las que debe trabajar una inyectora, la misma debe ser sumamente flexible ante los cambios de las geometrías de las matrices, tanto por su forma como por su tamaño para poder realizar un buen llenado de la matriz sin defectos.

## 3.4 Hidráulica y Neumática

### 3.4.1 Principios de hidráulica y neumática

La hidráulica y la neumática son los sistemas por los cuales se transmite energía a través de un fluido. Dicha energía es utilizada para el accionamiento de diversos sistemas mecánicos; que pueden ir desde un simple mecanismo hasta sofisticados equipamientos industriales [5]. Esta transmisión de energía es función de la presión y el caudal del fluido que circula por las tuberías y conectores; y este fluido es controlado por distintos tipos de válvulas.

Aunque la diferencia sustancial entre los sistemas hidráulicos y neumáticos es el fluido de trabajo, en una primera aproximación, ambos tienen un funcionamiento similar, ambos funcionan con un fluido a presión y mediante un arreglo geométrico conveniente se utiliza el concepto de presión: la fuerza resultante sobre el área es el producto de la misma por la presión:

$$P = \frac{F}{A}$$
$$F = P.A$$

### 3.4.2 Diferencias entre los sistemas hidráulicos y neumáticos

La gran diferencia entre los sistemas es el fluido de trabajo, en los sistemas neumáticos el fluido es aire, mientras que en los sistemas hidráulicos el fluido es un aceite diseñado para este propósito. Por tener aceite como fluido de trabajo, los sistemas hidráulicos son también llamados *sistemas oleohidráulicos*; y esta diferencia repercute en todos los aspectos de los sistemas, tanto en lo constructivo, lo operativo, las prestaciones y el costo.

Desde el punto de vista técnico, esta diferencia entre fluidos se ve altamente reflejada en una propiedad: la compresibilidad. Si bien todos los fluidos sometidos a presión experimentan una compresión, el aire es altamente compresible mientras que para los fines prácticos se puede asumir que el aceite hidráulico es incompresible.

En vista de esto, una instalación neumática es completamente diferente a una hidráulica. En una instalación neumática se acumula aire mediante un compresor en un recipiente para este propósito. Mediante diversas válvulas este aire comprimido es utilizado en los distintos actuadores neumáticos de la instalación. Las válvulas controlan la presión, el caudal, seleccionan distintas partes del circuito a operar y comandan los actuadores. Excepto en aplicaciones especiales, donde se requiere una atmósfera de trabajo sumamente limpia, como aplicaciones médicas, el aire ya utilizado no retorna al circuito y es simplemente expulsado del interior del actuador.

Al trabajar con un fluido considerado incompresible, en la instalación hidráulica no se comprime el aceite y se debe elevar su presión continuamente durante el tiempo de trabajo. A través de distintas válvulas hidráulicas se cumplen las mismas funciones que en el sistema neumático y el fluido ya utilizado es recuperado para su reutilización.

Desde el punto de vista práctico, la gran diferencia entre ambos sistemas es la presión de trabajo. Mientras que en los sistemas neumáticos la máxima presión de trabajo es de  $10\text{Kg/cm}^2$ , en los sistemas hidráulicos la presión de trabajo puede ser de  $200\text{Kg/cm}^2$ . Esta diferencia de presiones se puede observar en las diferencias constructivas de los sistemas, el sistema hidráulico es mucho más robusto que el neumático, pero a la vez es más compacto. Existen aplicaciones en las que el sistema neumático no puede ser utilizado porque no puede cumplir con las sollicitaciones requeridas y debe ser utilizado el sistema hidráulico, como también en ciertas aplicaciones sólo puede utilizarse el sistema neumático por razones de higiene [5].

Todas estas ventajas y desventajas de los sistemas son enumeradas a continuación:

### **3.4.3 Sistema neumático**

#### *Ventajas:*

- El fluido de trabajo (aire) se encuentra disponible en todos los lugares y es gratis.
- El aire no posee propiedades explosivas, es más limpio que el fluido hidráulico para aplicaciones que lo requieren.
- Se consiguen altas velocidades en los actuadores.
- Los costos son menores.

#### *Desventajas*

- La presión de trabajo limita su aplicación cuando se requieren grandes fuerzas.
- En instalaciones extensas se producen pérdidas de carga considerables.
- Son sistemas ruidosos por las descargas de aire.
- Es más difícil controlar la posición del actuador.
- Ante cambios en la carga la posición del actuador cambia por ser un fluido compresible.

### **3.4.4 Sistemas hidráulicos**

#### *Ventajas*

- Permiten trabajar con elevados niveles fuerzas.
- Las instalaciones son más compactas y robustas.
- Las velocidades y posiciones del actuador son fácilmente controlables.
- Ante cambios en la carga se conserva la posición del actuador por ser un fluido incompresible.

#### *Desventajas*

- Menores velocidades de actuación que los neumáticos.
- Fluido de trabajo más caro y sensible a la contaminación.
- Instalación menos higiénica y de mayor mantenimiento.
- Equipos más costosos.

## 3.5 Elementos Hidráulicos

En un circuito hidráulico se pueden encontrar una gran variedad de elementos hidráulicos que desempeñan distintas funciones, a continuación se realiza una breve descripción de algunos de ellos.

### 3.5.1 Cilindros o actuadores

El elemento más sencillo en el que actúa el fluido a presión es un cilindro; también llamados *actuadores*. Este cilindro contiene un pistón móvil y la presión sobre la superficie de este pistón genera una fuerza axial que se transmite a través de un vástago (Figura N° 4).

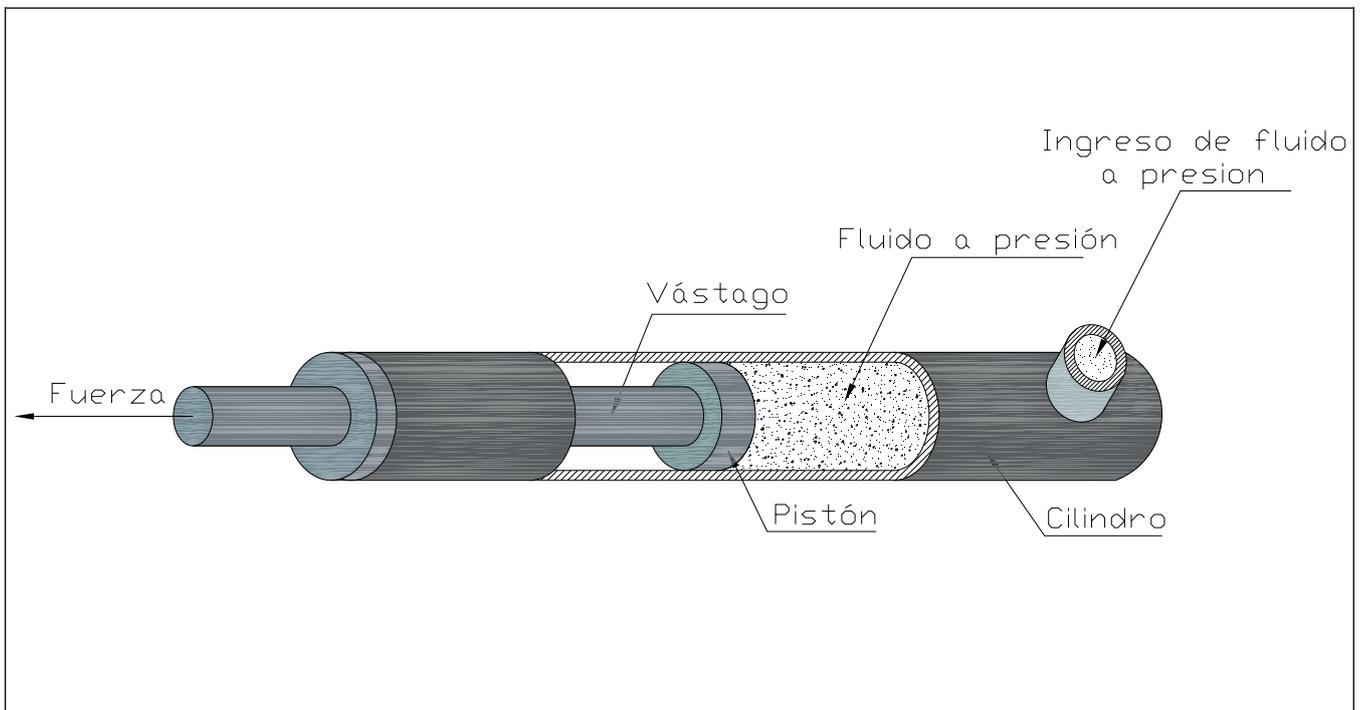


Figura N° 4: Vista interior de actuador de un solo sentido o de simple efecto.

El retroceso del pistón está dado por un resorte que se coloca en el interior del cilindro o simplemente al quitar el fluido a presión la misma carga sobre la que actuó, genera el retroceso.

También existen actuadores que poseen una entrada de fluido a presión en ambos extremos y pueden actuar en ambos sentidos independientemente de la carga aplicada, y se llaman actuadores de doble efecto. La forma de aplicar el fluido a presión está dada de manera tal que mientras se aplica presión en un extremo, el otro extremo se conecta de forma tal que el fluido retorna al tanque [7].

Cabe destacar que la fuerza realizada por el sistema en la carrera de retroceso es menor ya que el área efectiva del pistón se ve reducida por el acople de éste con el vástago (Figura N° 5). Para un sistema que opera a una

presión  $P$ , con un diámetro de pistón  $D_1$  y un diámetro de vástago  $D_2$ , la fuerza en carrera de avance está dada por la siguiente ecuación:

$$F_A = P \cdot \frac{D_1^2 \cdot \pi}{4}$$

Mientras que en la carrera de retroceso será:

$$F_A = P \cdot \frac{(D_1^2 - D_2^2) \cdot \pi}{4}$$

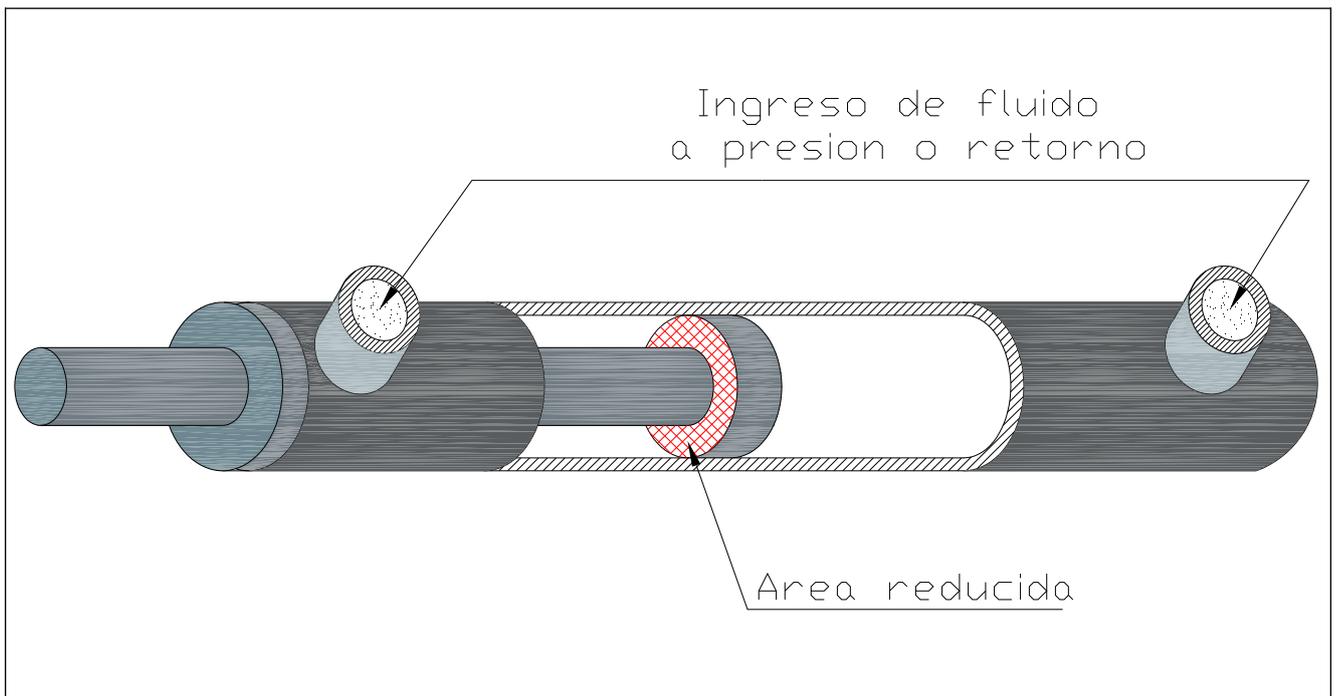


Figura N° 5: Vista del interior de un actuador de doble efecto, el área efectiva se encuentra resaltada en rojo

### 3.5.2 Bombas hidráulicas

El elemento hidráulico que se encarga de elevar la presión del fluido se denomina *bomba hidráulica*. Existen 2 formas de clasificar las bombas hidráulicas, por su caudal o por su construcción [5]:

**Caudal:**

- Constante
- Variable

**Construcción:**

- Engranajes:
  - Dientes externos

- Dientes internos
- Lóbulos
- Rotor
- Paletas:
  - Equilibradas
  - Desequilibradas
- Pistones:
  - Axiales
  - Radiales

Uno de los tipos de bomba hidráulica más utilizados es la de engranajes de dientes externos y caudal constante.

En la Figura N° 6 se puede observar la disposición de los elementos de este tipo de bomba:

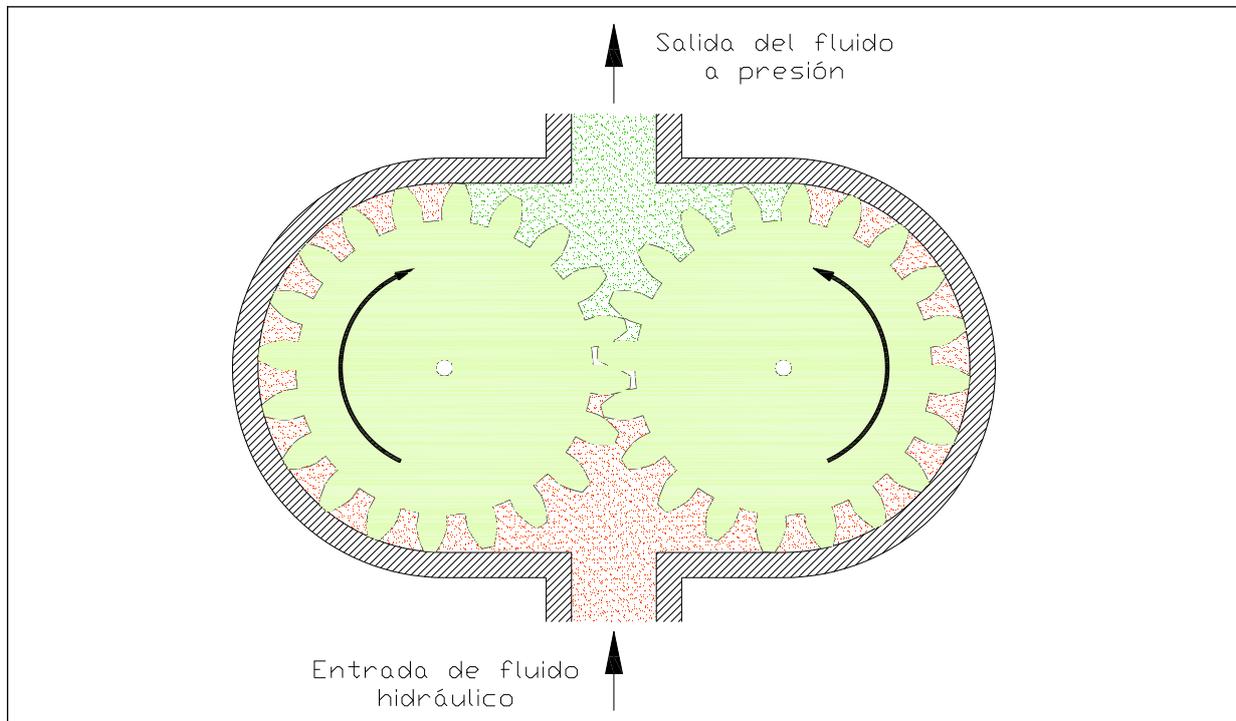


Figura N° 6: Corte de bomba hidráulica de engranajes externos.

Se ingresa potencia a través del eje de uno de los engranajes (conductor) y éste hace girar al otro engranaje en sentido opuesto (conducido). Los dos engranajes se encuentran contenidos en una carcasa muy próxima en la periferia y sus ejes engranan en el centro. Los engranajes rotan con el sentido de giro indicado en la figura, en la parte inferior el fluido hidráulico que entra queda atrapado entre dos dientes y la carcasa (zona indicada con rojo). El fluido es llevado hasta la zona superior, donde la acumulación del mismo genera el incremento de la presión (zona indicada con verde) y esto se debe a que el fluido no puede retornar a la parte inferior de la bomba porque el volumen entre dientes que ocupaba el fluido, ahora es ocupado por el diente del otro engranaje en el centro, siendo este el único paso a la parte inferior [7]. Luego la salida de fluido a presión de la bomba se conecta al resto del sistema para su uso y el retorno del sistema se conecta al depósito generando que el caudal de salida sea igual al de entrada de manera que la bomba siempre tenga fluido disponible y el nivel de aceite no varíe.

El nivel de aceite es elegido de manera tal que la bomba se encuentre sumergida en el interior del depósito, y esto se debe a varias razones:

- Al encontrarse en el interior del depósito la bomba está más resguardada de posibles impactos y corrosión.
- En caso de rotura y derrame el aceite queda contenido en el depósito.
- La compresión del aceite hidráulico eleva la temperatura del mismo, por lo que al estar sumergida se refrigera con el resto del aceite
- El aceite provee lubricación a las partes móviles de la misma.

### **3.5.3 Válvulas reguladoras**

La *válvula reguladora de presión* es una válvula externa que se ubica en el circuito hidráulico. Esta válvula posee una perilla que regula la compresión del resorte y dos conexiones, una que se conecta a la línea de presión que sale de la bomba hidráulica mediante una conexión T (en paralelo), y otra que es la descarga a tanque (Figura N° 7). Cuando la presión de la línea excede el valor regulado, la fuerza ejercida sobre el obturador por la misma es mayor a la del resorte con el que se regula la válvula y deriva fluido al tanque [6]. Esto ocurre cuando la fuerza del sistema conducido sobre el vástago del actuador hidráulico genera la presión a la que se reguló la válvula, por lo que el pistón se detendrá a esta presión, derivando el caudal al tanque.

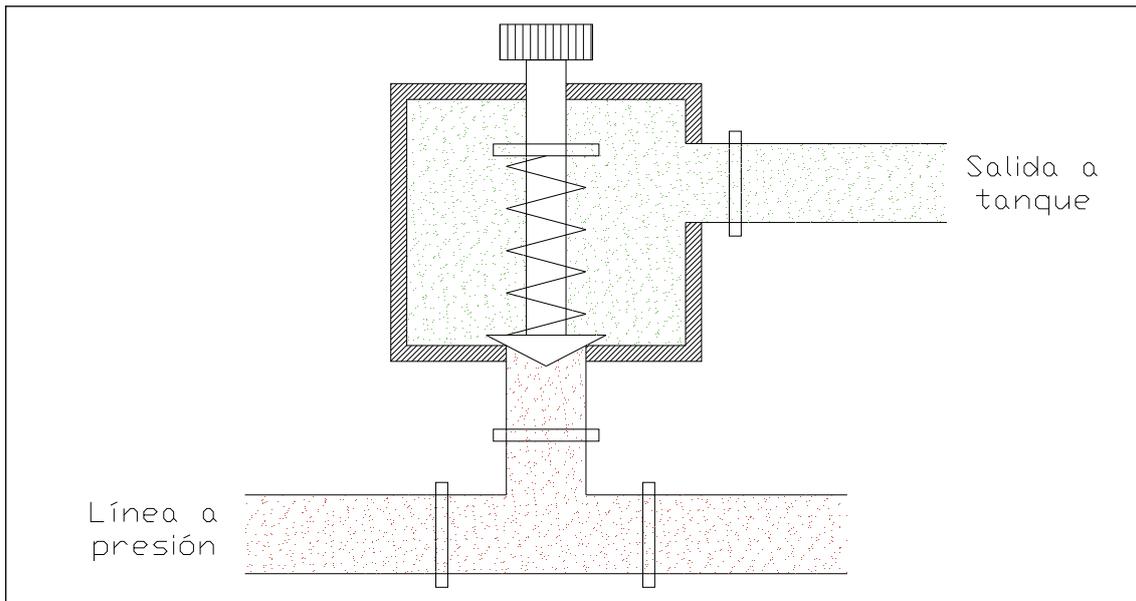


Figura N° 7: Esquema básico de la válvula reguladora de presión.

La válvula reguladora de caudal también es una válvula externa que se ubica en el circuito hidráulico, pero lo hace con una conexión en serie con el sistema. Hay dos tipos de estas válvulas: compensación por estrangulamiento en serie o por derivación de caudal. La válvula de tipo derivación de caudal, aventaja a la de estrangulamiento en serie, por mantener una caída de presión mucho menor y constante [6]. En ella se encuentra una perilla para su regulación y tres conexiones, una es la entrada de la línea de presión (caudal a controlar), una salida de caudal controlado y un retorno a tanque (Figura N° 8).

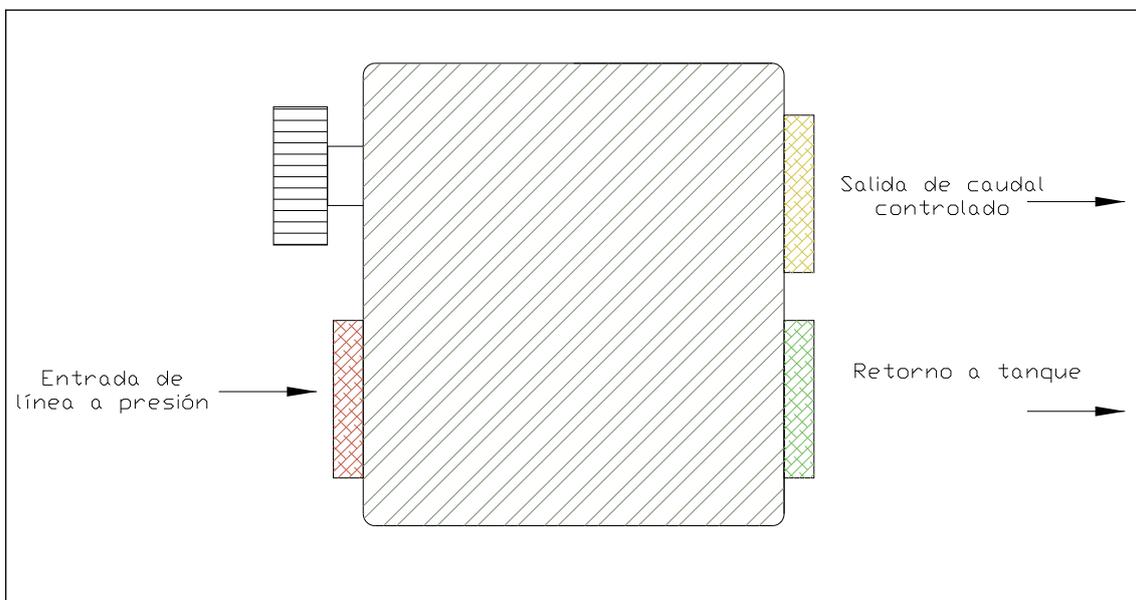


Figura N° 8: Esquema de conexiones de la válvula reguladora de caudal.

### 3.5.4 Comando hidráulico

Otro elemento hidráulico básico es el comando, que permite controlar el cilindro hidráulico. Existen varios tipos, pudiendo ser manuales o estar automatizados. En la Figura 9 se muestra un comando manual de 3 posiciones y 4 vías, que consta de cuatro conexiones: la entrada de la línea de presión (P), el retorno a tanque (T) y dos conexiones para el actuador (A y B). Posee una corredera en el interior del cuerpo (1) vinculada a una palanca para su accionamiento. La corredera tiene sección variable de forma tal que el cambio de posición vincula diferentes conexiones (Figura N° 9). En la posición central la entrada de presión queda conectada a tanque (centro abierto) y las dos conexiones del cilindro (A y B) cerradas, en la posición uno (Figura 9 izquierda), se conecta la entrada de presión P a la conexión B y la conexión A se deriva a tanque T; y en la posición dos se invierten (Figura 9 derecha) [6].

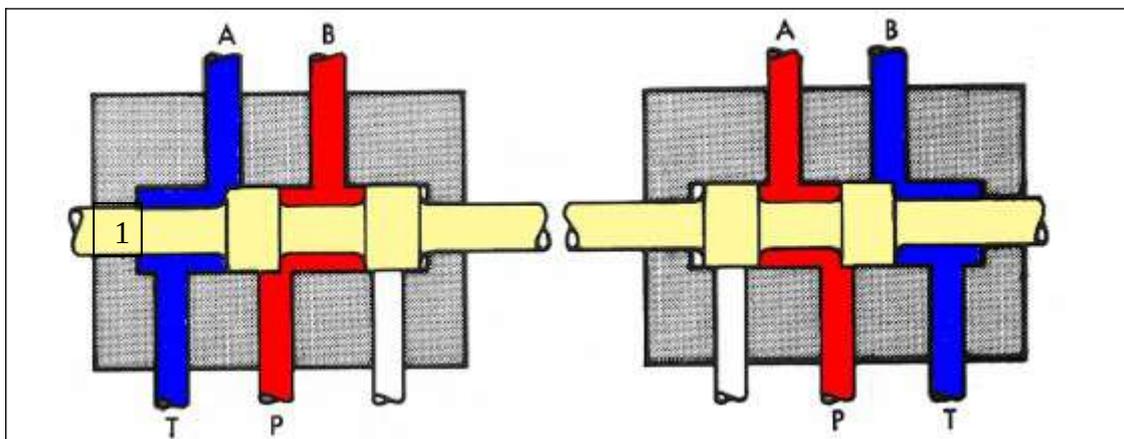


Figura N° 9: Posiciones 1 y 2 de la corredera. Se puede apreciar como quedan vinculadas las conexiones.

## 3.6 Fenómenos térmicos y transferencia de calor

### 3.6.1 Introducción

Dentro de las ramas de la ciencia que estudia los fenómenos térmicos, la termodinámica estudia la relación entre el calor y las otras formas de energía; y la transferencia de calor es la ciencia que se encarga del análisis de la tasa de transferencia de calor, en un sistema dado. Si bien el flujo de calor no puede medirse directamente, existe una variable que sí permite medirse y que se encuentra relacionada, *la temperatura*. Desde hace mucho tiempo se ha establecido que cuando en un sistema existe una diferencia de temperatura, el calor fluye de la región de mayor a la de menor temperatura [13].

En el estudio de los fenómenos de transferencia de calor existen 3 formas básicas para realizar el mismo: la conducción, la convección y la radiación. De estos se puede abordar el estudio en forma independiente o combinando los mismos.

La *conducción* es la forma de transferencia de calor en la que el intercambio de energía se realiza por el movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones, como es el caso de los metales.

La *convección* es el caso en que un fluido pasa sobre un sólido y existe una diferencia de temperaturas entre ellos, esto provoca una transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la superficie. Existen dos tipos, la natural y la forzada; siendo la natural cuando este movimiento relativo está dado por la diferencia de densidades en el fluido por la diferencia de temperaturas; mientras que la forzada es el movimiento inducido por una bomba o ventilador en forma mecánica.

La *radiación* es la emisión de energía radiante, debida a temperatura, a través de ondas electromagnéticas o en forma de fotones discretos. La misma depende de la superficie del cuerpo y de la cuarta potencia de la *temperatura absoluta* del cuerpo.

### 3.6.2 Ecuaciones de transferencia de calor

Para los diferentes problemas térmicos existen distintas ecuaciones según su naturaleza, teniendo en cuenta que en todas se desea determinar las temperaturas y el flujo de calor.

En lo que respecta a la conducción, la ecuación que determina estos parámetros es la *ecuación diferencial de conducción del calor*, que se presenta a continuación en coordenadas rectangulares:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g = \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde:

$$\begin{aligned} C_p &= \text{Calor específico a presión constante} \quad [\text{J/Kg } ^\circ\text{C}] \\ \rho &= \text{Densidad} \quad [\text{Kg/m}^3] \\ k &= \text{Conductividad térmica} \quad [\text{W/m } ^\circ\text{C}] \\ g &= \text{Tasa de generación de calor} \quad [\text{W/m}^3] \end{aligned}$$

Esta compleja expresión también puede ser expresada en coordenadas cilíndricas, mucho más conveniente para nuestro caso [13]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \Phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde:

$$\alpha = \text{Difusividad térmica} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

Aquí las variables son el radio ( $r$ ), el ángulo barrido ( $\Phi$ ) y la altura ( $z$ ).

Esta ecuación puede simplificarse significativamente dependiendo del caso y las condiciones de frontera. Por ejemplo, si se considera un cilindro macizo en que la temperatura solo varía en dirección del radio; y de radio  $b$ , la expresión queda reducida a:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{g}{k} = 0$$

Integrando la expresión y usando las condiciones de frontera adecuadas se llega a la siguiente expresión [14]:

$$T(r) - T_0 = \frac{g \cdot b^2}{4k} \left[ 1 - \left( \frac{r}{b} \right)^2 \right]$$

Donde  $T_0$  representa la temperatura en el exterior ( $r=b$ ) y  $g$  es la generación interna de calor. La siguiente expresión considera la generación de calor externa:

$$T(r) - T_0 = \frac{g \cdot b^2}{4k} \left[ \left( \frac{r}{b} \right)^2 - 1 \right]$$

Mediante un análisis similar se puede encontrar la expresión que determina las temperaturas y flujo de calor para un cilindro hueco  $a \leq r \leq b$ .

$$\frac{T(r) - T_a}{T_b - T_a} = \frac{\ln(r/a)}{\ln(b/a)} + \frac{g(b^2 - a^2)}{4k(T_b - T_a)} \left[ \frac{\ln(r/a)}{\ln(b/a)} - \frac{(r/a)^2 - 1}{(r/b)^2 - 1} \right]$$

En esta expresión se pueden calcular las temperaturas en el espesor del cilindro conociendo las temperaturas en el interior ( $T_a$ ) y en el exterior ( $T_b$ ) y también determinar el flujo de calor necesario [13].

Estas expresiones son válidas para fenómenos estacionarios, pero cuando se debe analizar los tiempos de calentamiento, estas expresiones dejan de ser válidas, por lo que tomamos nuevamente la *ecuación diferencial de conducción del calor*.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \Phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Considerando las variaciones en el tiempo y en sentido del radio, la misma queda reducida a:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

La solución de esta expresión depende del valor de un parámetro adimensional llamado Número de Biot, el mismo establece una relación entre el coeficiente de transferencia de calor por superficie; y la conductancia interna del sólido por unidad de longitud [13]. Para valores elevados de  $N^o$  Biot resistencia interna alta, para valores bajos resistencia interna baja.

El valor de número de Biot de 0,1 marca la diferencia entre los métodos. Para valores mayores a 0,1 se utilizan tablas para el cálculo de distintas geometrías; y para valores menores a 0,1 se utiliza el método de análisis de sistema en bloques, en el cual se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{\theta(t)}{\theta_0} = \frac{T(t) - T_e}{T_i - T_e} = e^{-Bi.Fo}$$

Donde:

$$\begin{aligned} T_e &= \text{Temperatura de medio} && [^{\circ}\text{C}] \\ T_i &= \text{Temperatura de inicial de sólido} && [^{\circ}\text{C}] \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ll} Bi = \text{Número de Biot} & [h \cdot L_s / k] \\ Fo = \text{Número de fourier} & [\alpha \cdot t / L_s^2] \end{array}$$

Esto se debe a que con ese valor de número de Biot se puede desprestigiar la resistencia interna del cuerpo y se supone que toda la temperatura es uniforme, por lo que la expresión se independiza de la posición en el mismo.

# Capítulo: 4

## Diseño

## **4.1 Prediseño**

### **4.1.1 Consideraciones generales**

El diseño de la máquina inyectora debe contemplar que la misma se utilizará para realizar trabajos de investigación, por lo que no se requiere un gran nivel de automatización para alta producción, que encarece al sistema considerando que el factor económico es de gran importancia.

La adquisición de materiales para la posterior construcción se realizará con proveedores locales. Se utilizarán medidas, materiales y componentes standard para facilitar el abastecimiento e intercambiabilidad en caso de desperfecto o rotura de los mismos; condiciones que afectan al diseño y en mayor medida a la posterior construcción.

La inyectora de cera debe ser versátil y su diseño debe ser independiente del tipo de cera a inyectar.

Teniendo en cuenta la naturaleza de la máquina y la tarea que desempeña, se deben analizar las distintas variables y condiciones de trabajo; para determinar un “punto de partida” del cual se puede comenzar el diseño y dimensionado de los sistemas.

### **4.1.2 Variables críticas**

Anteriormente se han tratado los distintos aspectos teóricos de la inyección de cera, y en base a estos se han detectado una serie de variables que son consideradas *críticas* para obtener una adecuada inyección. Estas variables son:

- *La presión de inyección*
- *La temperatura de inyección*
- *La velocidad de inyección*

La presión y temperatura están directamente relacionadas y dependen de la geometría y tamaño de la matriz a inyectar.

Para una matriz de dimensiones pequeñas, las contracciones en las zonas esbeltas no son importantes, mientras que el llenado de las mismas resulta difícil. Para evitar este problema se inyecta la cera a mayor temperatura debido a que la viscosidad de la cera disminuye con la temperatura, otorgándole mayor fluidez y adecuada capacidad para copiar y llenar en su totalidad las cavidades. En estas condiciones la presión de inyección requerida es menor.

En cambio, cuando se realiza la inyección en una matriz de grandes dimensiones, las secciones de las zonas esbeltas son mayores y el volumen de la cavidad mayor sufrirá contracciones, tanto en la solidificación como en el enfriamiento posterior; por lo que se recurre a una inyección a menor

temperatura para disminuir las contracciones. Pero esto crea un problema en el llenado, ya que la cera a menor temperatura pierde fluidez (aumento de la viscosidad), por lo que para garantizar un buen llenado se debe elevar la presión de inyección.

Como se puede observar, las dos variables están relacionadas, siendo una inversa a la otra. La forma exacta en que varían ambas estará dada según la forma y tamaño de la matriz, y la manera más sencilla de determinarlo es realizando inyecciones de prueba.

La última variable crítica que queda por analizar es la *velocidad de inyección*, que queda determinada según el volumen inyectado por unidad de tiempo, considerándose un caudal de inyección. Este caudal de inyección no puede ser muy lento, porque esto provocaría la solidificación anticipada, creando frentes fríos que al proseguir la inyección generan dos defectos; uno es la obstrucción de la zonas de menor sección obteniéndose un llenado incompleto; el segundo es una marca superficial en el modelo de cera, donde se generó el frente frío. En cambio, si el caudal de inyección es muy elevado, el brusco ingreso de cera en la cavidad no permite la salida completa del aire, quedando atrapado y generando un modelo defectuoso.

Como se puede apreciar, para realizar un diseño satisfactorio hay que tener presente estas tres variables y su forma de controlarlas.

Desde ya estas no son las únicas variables. También existen otras de menor importancia que quedan acotadas una vez determinados ciertos requerimientos de la máquina, y que sirven para determinar otros aspectos de diseño que no están directamente relacionados con la inyección.

En este sentido la variable que más se destaca es *volumen máximo de inyección*, que determina el tamaño máximo de pieza a inyectar. Este dato se puede considerar como el punto de partida para el diseño ya que sobre este se comienzan a dimensionar los sistemas. El mismo se fijó en **500CC**, ya que las piezas a inyectar son de menor volumen que éste.

### **4.1.3 Sistemas a diseñar**

La máquina inyectora estará compuesta por distintos “sub-sistemas” que cumplirán una función específica. El diseño de los mismos debe contemplar como se afectan mutuamente y tener la flexibilidad suficiente para permitir la interacción entre ellos. Dado que no se requiere un alto grado de productividad, se implementará la menor automatización posible para el funcionamiento; considerando que en un futuro la máquina puede requerirlo si las condiciones de trabajo, y más significativamente las exigencias de producción, se acrecientan.

De los distintos sistemas a diseñar, existen algunos sistemas que se pueden diseñar en forma independiente mientras que otros se deben diseñar considerando todos los demás.

Los sistemas a diseñar son:

- ***Sistema Motor:***

Es el encargado de impulsar al sistema inyector. Es el sistema más importante.
- ***Sistema Inyector:***

Es el que contiene la cera ya lista para su uso y realiza la inyección asistido por el sistema motor.
- ***Sistema de Alimentación:***

Es el que provee de cera al sistema inyector para su posterior inyección y actúa como reservorio.
- ***Sistema de Retención:***

Es el que realiza el bloqueo de un sistema que no debe actuar en una etapa determinada del proceso.
- ***Sistema Calefactor:***

Es el que eleva la temperatura en el sistema de alimentación derritiendo la cera y mantiene la temperatura adecuada en el sistema inyector.
- ***Sistema de sujeción de matriz:***

Es el que impide la apertura de la matriz cuando ésta se encuentra bajo presión en la etapa de inyección.
- ***Estructura:***

Es el soporte donde se encuentran montados los distintos sistemas y el que debe soportar las solicitaciones mecánicas y térmicas de los demás sistemas.
- ***Sistemas auxiliares:***

Son los sistemas que no afectan directamente al proceso de inyección, pero son necesarios para el funcionamiento y utilización de la máquina inyectora; y para asegurar la seguridad de las personas que operen la máquina, como los dispositivos de protección eléctrica, banco de trabajo, etc.

Los distintos sistemas de la máquina inyectora actúan según la siguiente secuencia:

Al encender la máquina inyectora comienza a actuar el sistema calefactor derritiendo la cera del sistema de alimentación y el remanente del sistema inyector. Durante el tiempo que demanda el calentamiento del sistema se ajusta la matriz al sistema inyector mediante el sistema de sujeción.

Una vez que la cera alcanza la temperatura deseada, la máquina se encuentra en régimen y mediante el sistema motor se alimenta la cera al sistema inyector. El sistema de retención impide el ingreso de aire al sistema inyector.

Alimentado con la cera necesaria, actúa nuevamente el sistema motor pero en sentido opuesto, el sistema de retención impide que la cera retorne al sistema de alimentación y a través del pico inyector ingresa a la cavidad de la matriz.

Una vez llena la matriz, el sistema motor sigue actuando durante un tiempo de mantenimiento o “holding time”, concluido este tiempo la cera se solidifica y adquiere una cierta resistencia mecánica por, la cual no requiere de presión para permanecer en la cavidad de la matriz. Se aguarda a conseguir una solidificación general en la matriz y se retira de la máquina para retirarla, posteriormente, de la matriz.

#### **4.1.4 Comienzo del Diseño**

Estos son los primeros aspectos a considerar para comenzar el diseño; también se debe tener en cuenta que a medida que se avance, surgirán nuevos puntos a considerar. Como paso inicial se comienza con el diseño del sistema motor.

## 4.2 Diseño del sistema motor

### 4.2.1 Generalidades

El sistema motor es el primer sistema a diseñar y el más importante, desde el punto de vista técnico como económico. Controla dos de las variables críticas: la presión de inyección y la velocidad de inyección. También en el diseño del mismo hay que considerar que siempre que en una máquina se encuentran un sistema motor, hay un sistema conducido o impulsado (en este caso el sistema inyector), los cuales deben trabajar en conjunto y ser completamente compatibles, por lo que en este diseño se debe considerar permanentemente al sistema inyector.

Existen dos disposiciones básicas entre ambos sistemas para este tipo de máquina:

- **Máquinas inyectoras a pistón**
- **Maquinas inyectoras a tornillo.**

Las máquinas inyectoras a tornillo son utilizadas para realizar la extrusión de cera en estado sólido. Esta extrusión se realiza a presiones muy elevadas por lo que es un sistema complejo y sumamente caro. La máquina inyectora a diseñar no requiere realizar esta acción, por lo que esta disposición se descarta inmediatamente.

Las máquinas inyectoras a pistón reciben este nombre por la disposición de su sistema inyector, el cual es un arreglo entre un cilindro y un pistón móvil. El cilindro contiene la cera entre el pistón y el pico, que permite que la cera sea inyectada dentro de la matriz. En el extremo opuesto, ingresa el vástago que acciona al pistón (Figura N° 10).

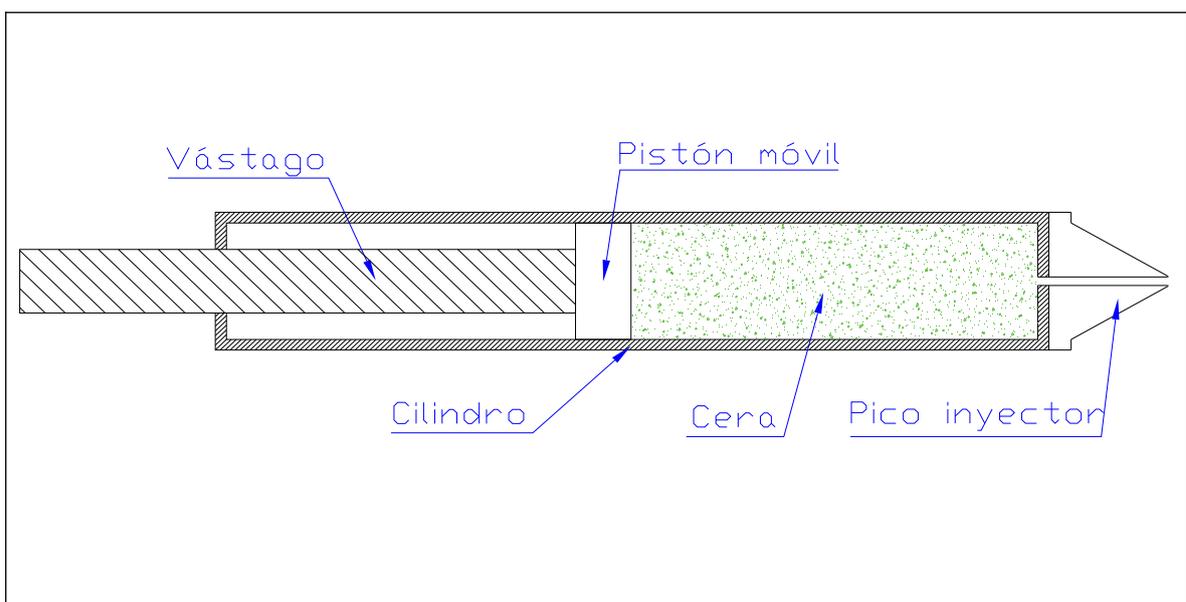


Figura N° 10: Diagrama básico de las distintas partes y su disposición.

El sistema motor que acciona este tipo de sistemas de inyección debe realizar una fuerza axial en ambos sentidos sobre el vástago. En un primer momento se analizaron todas las posibilidades para realizar esta acción, tanto de sistemas de fluidos como mecánicos.

#### **4.2.2 Sistemas mecánicos y de fluidos**

Entre los sistemas mecánicos que pueden ser utilizados para desempeñar esta tarea se consideraron un motor eléctrico paso a paso y un motor eléctrico trifásico con una caja reductora, ambos sistemas acoplan sus ejes a una cremallera vinculada al vástago, y dada la naturaleza de la inyección de cera que requiere un tiempo de mantenimiento (holding time), ambas opciones necesitan un freno mecánico para realizar esta acción. Durante el tiempo de mantenimiento la cera experimenta una contracción y la presión disminuye, por lo que el sistema debe responder compensando esta caída de presión mediante pequeñas acciones de los motores, que deben ser controlados de forma muy precisa, siendo esta tarea dificultosa por la naturaleza del sistema motor antes mencionada.

Estas complicaciones técnicas, sumado al alto costo de la caja reductora, y del motor eléctrico paso a paso de la potencia requerida, fueron los motivos para que estas propuestas sean desechadas.

El diseño del sistema motor de la máquina inyectora de cera quedó acotado a un sistema que trabaje con fluidos. Una búsqueda en Internet de las máquinas inyectoras disponibles en el mercado, develó que todas ellas son accionadas por un sistema de fluidos; hidráulico o neumático. Estos sistemas aventajan significativamente a los sistemas mecánicos en lo que respecta a la parte técnica, ya que no requieren frenos de ningún tipo y ante las variaciones de presión del sistema inyector, poseen una respuesta inmediata por la naturaleza de los mismos.

#### **4.2.3 Dimensionado y valores adoptados**

Teniendo en cuenta las características de los equipos, se debe fijar una presión de trabajo con la que operará la máquina inyectora, para poder dimensionar el sistema motor. Mediante la bibliografía consultada, sumado a los datos aportados por la búsqueda en Internet y la visita a la Fábrica CAFAVI S.A., se fijó **una presión de inyección de  $20\text{Kg/cm}^2 = 1,960\text{MPa}$** ; el equipo debe tener la capacidad de permitir variaciones controladas por encima y por debajo de este valor para poder tener una inyección adecuada según los requerimientos de la matriz.

Siendo esta la presión de inyección, no a la que debe operar el sistema motor, es necesario encontrar un arreglo para que mediante uno de los dos sistemas, se proporcione esta presión de inyección, para lo cual hay que tener definidas las generalidades del sistema inyector.

El sistema inyector estará compuesto por un arreglo entre un cilindro y un pistón. La relación entre ambos debe ser tal que el área del pistón por la carrera del mismo sea igual o mayor al volumen máximo de inyección, fijado en **500CC**; considerando una mayor distancia en el cilindro inyector para alojar en

su interior los sensores para controlar las variables necesarias. Además debe tener la longitud extra necesaria para que los fines de carrera del pistón inyector no hagan tope sobre el cilindro inyector, sino que el pistón del sistema motor lo haga y que éste soporte la carga, lo cual independiza los sistemas en caso de mala operación o falla.

Dentro de las medidas comerciales standard existen una gran cantidad de arreglos entre el área y la longitud que cumplen con este volumen (500CC), pero cuanto mayor es el diámetro, mayor es el precio, por lo que se decidió por un arreglo entre un cilindro de 2" (5,08cm) de diámetro interno ( $\emptyset$ ) x 25cm de carrera.

$$A = \frac{(5,08cm)^2 \cdot \pi}{4} = 20,26cm^2$$

$$Vol = A \cdot L = 20,26cm^2 \cdot 25cm = 506,7cm^3$$

Mediante este arreglo se alcanza el volumen máximo de inyección utilizando medidas standard.

La fuerza que debe ejercer el sistema motor sobre el vástago del sistema inyector de 405Kg=3970N.

$$F = P \cdot A$$

$$F = 20,26cm^2 \cdot 20 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F = 405Kg = 3970N$$

Esta fuerza la ejercerá el vástago del sistema motor sobre el vástago del sistema inyector. También existe una relación entre las áreas de los cilindros de ambos sistemas, en una relación de uno entre estas (áreas iguales), por lo tanto para obtener 1,96MPa (20Kg/cm<sup>2</sup>) en el cilindro inyector, se deberá generar la misma presión en el cilindro motor. Es evidente que esto nunca podrá ser alcanzado por un sistema neumático, ya que su presión máxima de trabajo es de 0,98MPa (10kg/cm<sup>2</sup>). Además, esta presión es la máxima que puede alcanzar, como el sistema neumático acumula aire en un recipiente, a medida que éste se utiliza, la presión en el recipiente cae hasta cierto valor, dando lugar al encendido del compresor, por lo que la presión real de trabajo se encuentra entre 0,59 y 0,78 MPa (6 y 8 Kg/cm<sup>2</sup>). Esto genera un sistema más voluminoso, sumado a que el control de la posición es más difícil y las variaciones de carga varían la posición del pistón; esto hace considerar al sistema neumático poco viable.

El sistema hidráulico opera a presiones para las que puede utilizarse una relación de uno e incluso menores, obteniendo un equipo más compacto, los desplazamientos del pistón son más controlados y al utilizar un fluido incompresible las variaciones de carga no producen desplazamientos en el pistón.

Con todas estas consideraciones es evidente que un *equipo hidráulico* *aventa* *significativamente* *al neumático* para su utilización en la máquina inyectora.

El último punto a tener en cuenta es el aspecto económico, por lo que antes de comenzar con la adquisición y construcción de este sistema, se deben consultar presupuestos, tanto de sistemas hidráulicos como de sistema neumáticos con proveedores locales. Con el análisis de estos, se definirá el equipo a adquirir, con una clara tendencia hacia el equipo hidráulico por las ventajas técnicas que este presenta.

Las únicas consideraciones técnicas del sistema motor son las dimensiones del actuador, que debe ser de 50,8mm (2”) de diámetro y 250mm de carrera; y la presión de inyección de 1,96MPa (20Kg/cm<sup>2</sup>); con estos datos se puede continuar con el diseño del siguiente sistema, el sistema inyector.

## **4.3 Diseño del sistema Inyector**

### **4.3.1 Consideraciones previas**

En el capítulo anterior se mencionó cómo se diseñó el sistema motor, que se encuentra fuertemente vinculado a este sistema; por lo que muchas consideraciones sobre el diseño del mismo ya fueron hechas, y deben ser tenidas en cuenta para que exista total compatibilidad entre ambos.

Durante el diseño del sistema motor se definió:

- El sistema inyector será del tipo cilindro-pistón.
- Las dimensiones serán de 50,8mm (2") de diámetro interno y debe permitir una carrera de pistón de 250mm, generando un volumen de 500cc.
- La presión de inyección media se fijó en 1,96MPa (20Kg/cm<sup>2</sup>), permitiendo regulaciones por encima y debajo de ese valor, según los requisitos de la matriz.

Estas consideraciones son el punto de partida para el diseño del sistema inyector, pero no son las únicas a tener en cuenta; hay otros factores y problemas potenciales que deben detectarse a partir de las condiciones de servicio a cumplir, para realizar un buen diseño.

### **4.3.2 Condiciones de servicio**

Como se mencionó, el sistema inyector es un arreglo de cilindro-pistón con las medidas dadas y sometido a 1,96MPa (20Kg/cm<sup>2</sup>) de presión interna. Por eso con estos datos se puede dimensionar el cilindro para que verifique las solicitaciones mecánicas generadas por la presión; existen también solicitaciones térmicas, posible corrosión y también debe considerarse la disposición de los distintos elementos y su sujeción.

El esquema básico del sistema inyector se ve alterado del mostrado en el diseño del sistema motor por esta serie de modificaciones para adaptarlo a los requerimientos (Figura N° 11).

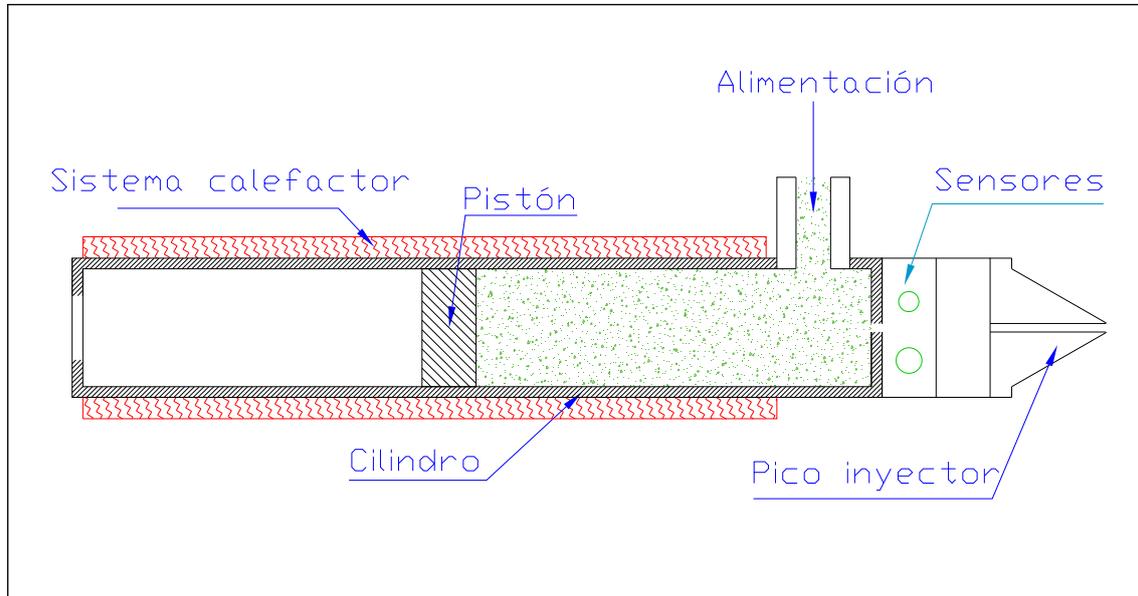


Figura N° 11: Esquema básico del sistema inyector.

Dado que al sistema de inyección se le acoplan la mayoría de los otros sistemas, éste se ve afectado por los mismos con solicitudes de todo tipo.

Dentro de las condiciones de servicio y las distintas disposiciones entre los demás sistemas y éste, hay que considerar:

- El cilindro debe poseer una longitud mayor que la carrera de 250mm para poder alojar los sensores de presión y temperatura, y además para que el pistón no realice contacto con los extremos del cilindro inyector en los fines de carrera del cilindro hidráulico.
- El diseño del pico inyector y su posterior sujeción al cilindro para su fácil acople y desacople.
- El alojamiento de los componentes del sistema de retención. Armado y desarmado para el mantenimiento
- El lugar por donde se realizará el ingreso de cera proveniente del sistema de alimentación.
- El sistema de sellado del pistón con el cilindro para la presión de trabajo.
- Los puntos donde el cilindro pueda ser atacado por corrosión.

- La forma de alinearlos y acoplarlos con el cilindro hidráulico y la sujeción a una futura estructura.
- Las solicitaciones mecánicas debidas a la presión interior y las fuerzas de las sujeciones.
- La calefacción del cilindro, las solicitaciones térmicas y las solicitaciones mecánicas debidas a las dilataciones.

### **4.3.3 Selección de materiales**

Lo primero a definir en el diseño del sistema inyector es el cilindro, y se debe seleccionar un material que luego en la etapa de construcción permita realizar las modificaciones necesarias para las adaptaciones de los demás sistemas. Estas modificaciones constan de soldaduras, confección de roscas y otros procesos como rectificado y bruñido del interior. Excepto por los trabajos de rectificado y bruñido, para los que se requiere maquinaria y herramienta especial, los trabajos de soldadura y tornería se realizarán en los talleres de la Facultad de Ingeniería. Hay que considerar el posible problema de corrosión en el interior del mismo que puede contaminar la cera. También hay que mencionar que el cilindro debe tener una terminación superficial excelente para el deslizamiento y estanqueidad del pistón.

Los cilindros que son utilizados bajo presión, como los cilindros hidráulicos, se fabrican a partir de tubos sin costura, los cuales poseen propiedades mecánicas superiores a los fabricados a partir de tubos con costura.

Bajo estas consideraciones, hay tres formas de confeccionar el cilindro:

- Con un tubo sin costura de un material resistente a la corrosión.
- Con un tubo sin costura de acero al carbono aplicándole un tratamiento anti-corrosión.
- Con un tubo sin costura de acero al carbono que no tomen contacto con el aire en las zonas comprometidas.

Si bien cualquiera de estas opciones para la fabricación del cilindro inyector es técnicamente viable, la elección de un material resistente a la corrosión, como puede ser un acero inoxidable, es *la optima*.

El cromo duro es un tratamiento anti-corrosión que se aplica a distintos tipos de aceros. Consta de la deposición electroquímica de una delgada capa de cromo metálico, que según los requisitos, puede alcanzar un espesor de 0,1mm [PW2] y se debe aplicar cuando el cilindro esta terminado. Cualquier trabajo posterior sobre la capa de cromo duro debe evitarse para que no se pierda su efectividad, por lo que si se deben realizar modificaciones o reparaciones posteriores, hay que aplicar el tratamiento nuevamente.

La opción de realizar un sellado de las posibles zonas afectadas por corrosión permite realizar cualquier trabajo posterior, pero se deben implementar un sistema que asegure la estanqueidad.

Por estas razones, la elección de un material resistente a la corrosión y que permita trabajos de tornería y soldaduras, como puede ser un acero AISI 316L, es la elección técnicamente superior y luego de un análisis económico a través de presupuestos se decidirá cual implementar teniendo en cuenta las consideraciones anteriores.

#### 4.3.4 Dimensionado del cilindro, vástago y pistón

Se asume una longitud mínima de 30cm para el cilindro, dado que de esta forma contiene la longitud de carrera y el espacio suficiente para contener los sensores. En cuanto a la presión que debe soportar, todas las opciones comercialmente disponibles en 50,8mm (2") de diámetro y con un espesor mayor a 3 mm satisfacen ampliamente la presión de trabajo.

Para el diseño del vástago, debe considerarse la carga de compresión y el posible pandeo; y su dimensionado queda acotado al diseño del cilindro.

En cuanto al diseño del pistón, este debe asegurar la estanqueidad y también estar protegido de los posible problemas de corrosión. Para el mismo puede utilizarse acero inoxidable o bien aluminio, asegurando las dimensiones correctas con el nivel de tolerancias y huelgos para las dilataciones térmicas, y se le confeccionará una ranura para alojar un sello tipo o-ring para asegurar la estanqueidad a la presión de trabajo.

Las verificaciones de estos tres elementos se realizarán en el capítulo de construcción, una vez definidos los materiales.

Al cilindro se le realizará una perforación y el soldado de un suplemento en la parte superior (Figura N° 12), para darle acceso al sistema de alimentación, y luego posteriormente se encuentran el elemento de retención y el pico inyector.

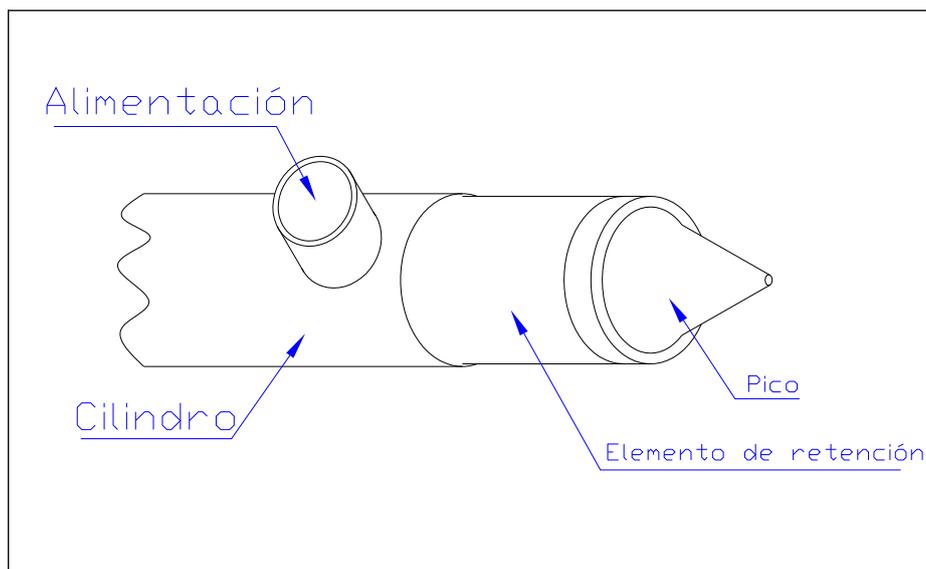


Figura N° 12: Disposición de los elementos en el cilindro.

Definido los aspectos básicos del cilindro inyector, se debe diseñar el pico inyector; y los acoples del mismo con el elemento de retención y con el cilindro. Los acoples se realizarán mediante uniones roscadas, permitiendo su fácil armado y desarmado para su limpieza y mantenimiento.

#### 4.3.5 Pico inyector

Dado que el pico se encontrará en contacto con aire y cera en estado líquido, el mismo se fabricará en un material resistente a la corrosión y su forma será cónica. Para el dimensionado del mismo la medida más significativa es el diámetro del orificio de inyección. Este diámetro es función de la capacidad de la inyectora y además debe ser "el cuello de botella" del paso de cera en la inyectora. El mismo se dimensionó con un *diámetro de orificio de 4mm*, con una inclinación de 45° en el interior para facilitar el ingreso de la cera al orificio (Figura N° 13).

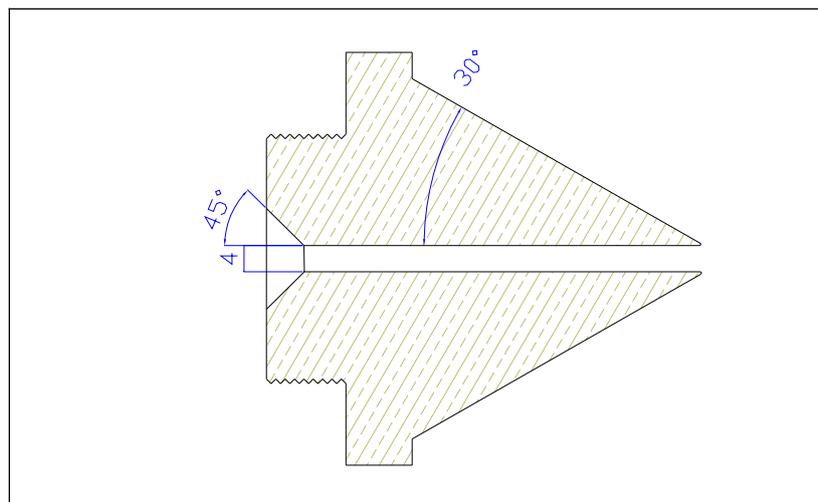


Figura N° 13: Dimensiones del pico inyector (mm).

El ángulo de inclinación del pico determinará el asiento en la matriz y se fijó en 30°, ya que es un ángulo standard que facilitará el maquinado de la matriz. El resto de las dimensiones no son significativas y son fijadas posteriormente, de forma tal que faciliten su fabricación.

#### 4.3.6 Sujeción del cilindro

Ahora se tratará el diseño del sistema de sujeción del cilindro inyector y su forma de alinearlos con el cilindro hidráulico que le transmitirá la fuerza para la inyección. Ambos cilindros operarán en forma vertical y sus vástagos no realizan ninguna rotación, sólo realizarán desplazamientos axiales, por lo que el acople no requiere una gran alineación y se define en el capítulo de

construcción, con las medidas más acotadas. Los dos cilindros se encuentran fijos a una estructura que se define posteriormente, siendo la sujeción del cilindro hidráulico de forma tal que no se le tengan que realizar ningún tipo de soldadura, mientras que el cilindro inyector no sólo está solicitado por las fuerzas producidas por la presión de inyección, sino que también está solicitado por las fuerzas debidas a las dilataciones térmicas.

Como primer paso se calculan las fuerzas debidas a la presión de inyección. Cuando al cilindro se le aplican los 1,96MPa (20Kg/cm<sup>2</sup>) de presión de inyección, éste encuentra la mayor sollicitación, como resultado de esta presión se producen fuerzas longitudinales en sentido del vástago.

Estas fuerzas debidas a la presión se hacen críticas en dos lugares, en la superficie del pistón y en la parte superior del cilindro. Ambas fuerzas tienen el mismo valor y es el producto de la sección transversal (área del pistón) por la presión interna. La fuerza sobre el pistón es equilibrada por la fuerza producida por el sistema hidráulico, mientras que la fuerza en la parte superior del cilindro inyector es la que debe equilibrarse mediante la sujeción del mismo (Figura N° 14).

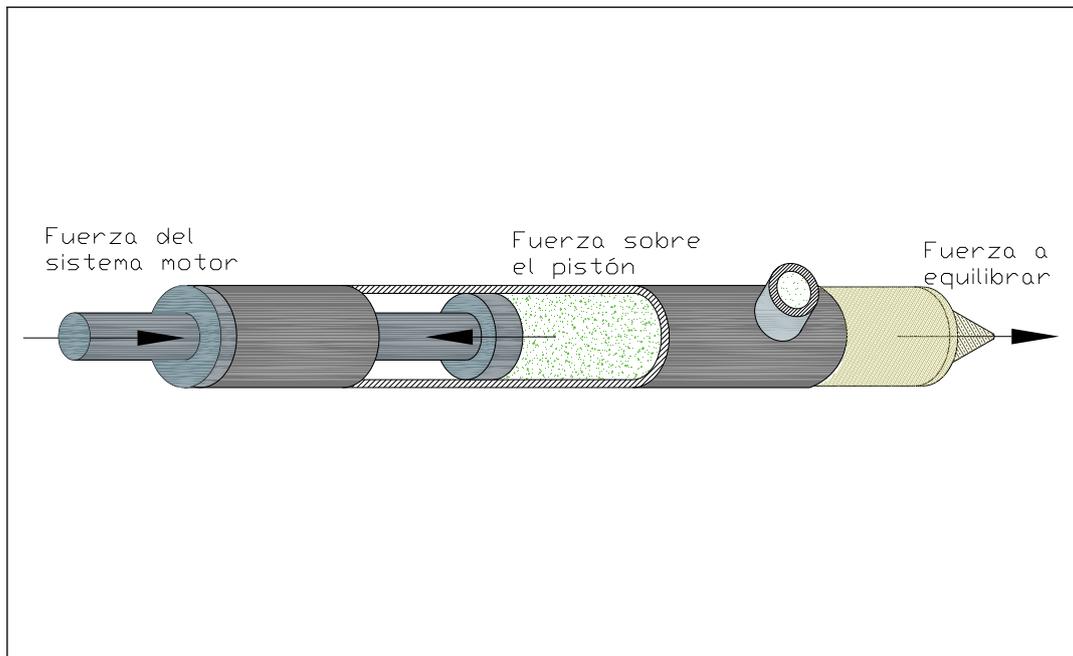


Figura N° 14: Fuerzas sobre el cilindro y sus componentes.

La fuerza en la parte superior del cilindro actúa sobre la reducción del cilindro, el elemento de retención y el pico. Todos estos elementos se encuentran fijos al cilindro, por lo que sujetando el cilindro se compensa esa fuerza. La sección transversal es de 20,25cm<sup>2</sup>, y su producto por la presión de inyección de 1,960Ma (20Kg/cm<sup>2</sup>) resulta un valor de **fuerza de 3970N (405Kg)**.

La sujeción del cilindro también debe considerar las fuerzas debidas a las dilataciones térmicas, ya que si este se sujeta de la parte inferior y superior la dilatación del cilindro, por el aumento de la temperatura, genera una fuerza entre las sujeciones, que de ser consideradas ambas sujeciones rígidas,

produce que el cilindro se cargue a la compresión debido a la deformación producida por la dilatación

El coeficiente de dilatación lineal del acero al carbono es de  $\alpha=10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , y el módulo de elasticidad es de  $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ . Si se considera que la temperatura ambiente es de  $20^\circ\text{C}$  y la máquina operará a  $70^\circ\text{C}$ , la diferencia de temperatura es de  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ .

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T = 50^\circ\text{C} \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{^\circ\text{C}} = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1 \cdot 10^6 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 1050 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 102 \text{MPa}$$

Como se ve, el valor de esta tensión no puede ser ignorada. Si una de las sujeciones no es rígida y cumple la función de guía, el cilindro puede deslizarse sobre ella, sólo se produce un alargamiento y se evita la tensión. Otro punto a tener en cuenta es que el cilindro tiene que alojar los elementos calefactores, por lo que las sujeciones no deben demandar mucho espacio y deben estar estratégicamente ubicadas.

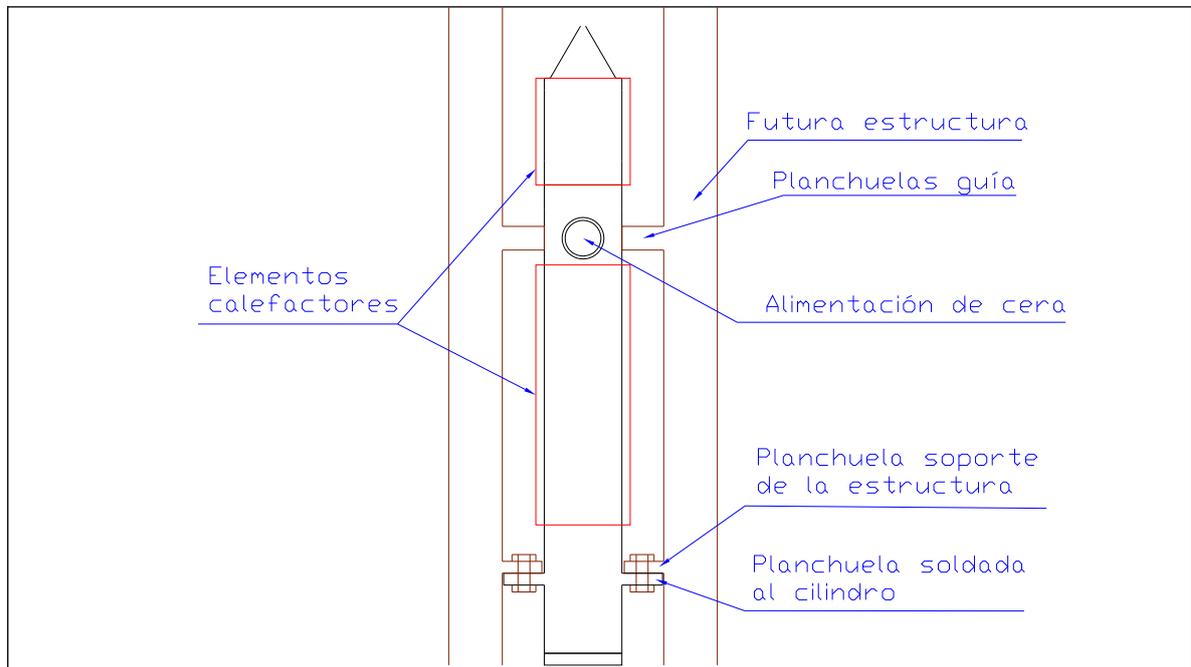


Figura N° 15: Sujeción del cilindro inyector.

Con esta disposición de sujeción del cilindro inyector se evitan las tensiones de origen térmico sobre las sujeciones (Figura N° 15).

El alargamiento producido en 30cm de cilindro (distancia estimada que habrá entre sujeciones) es de:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \Rightarrow \quad \Delta L = L \cdot \varepsilon = 30\text{cm} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0,015\text{cm}$$

Este desplazamiento es muy pequeño en relación con las demás dimensiones y puede ser ignorado.

Estos son los aspectos generales del diseño de este sistema. Cabe mencionar que muchas de las medidas y dimensiones de los distintos elementos no están definidas y serán especificadas en el capítulo de construcción.

## **4.4 Diseño del sistema de Alimentación**

### **4.4.1 Introducción**

El sistema de alimentación es un sistema sencillo que cumple la función de almacenar la cera, acondicionarla y mantenerla en ese estado, para su posterior uso en el sistema inyector. El mismo consta de un recipiente donde se introducen manualmente trozos de cera en estado sólido, mediante un sistema calefactor se le entrega calor para producir el cambio de la misma al estado líquido; alcanzada la temperatura deseada se transporta a través de un conducto al sistema inyector según éste lo requiera.

### **4.4.2 Consideraciones**

Lo primero a definir para comenzar el diseño es el volumen de cera que el recipiente contendrá. El mismo se fijó como mínimo en 2000cc, de esta manera se pueden realizar hasta cuatro inyecciones de cilindro completo. Para realizar la conexión entre este sistema y el inyector se utilizarán elementos de plomería standard, dada la alta disponibilidad y bajo costo de los mismos.

Este recipiente no se encontrará sometido a presión, por lo que su forma no requiere de una geometría específica.

Es necesario tener en cuenta tres factores:

- El recipiente debe poder ser calefaccionado fácilmente.
- Debe permitir que el flujo de calor se encuentre distribuido de la forma más uniforme.
- Debe ser tal que no insuma demasiado espacio.

Considerando estos factores, se decidió fabricar el recipiente de forma cilíndrica con la parte inferior cónica para facilitar el flujo de cera hacia la conexión (Figura N° 16). El modo de calefaccionar el recipiente será similar a la forma del cilindro inyector, generando un flujo de calor radial hacia el centro, siendo éste el punto crítico (el más frío) donde se alojará el sensor de temperatura. De esta manera se asegura que toda la cera en su interior se encuentre en estado líquido cuando el sensor lo indique.

### 4.4.3 Diseño

Dado que se desea un diseño sencillo y económico, se requiere que la cera fluya por acción de la gravedad sin necesidad de ningún tipo de bomba, por lo que la parte inferior del recipiente se debe encontrar por encima del acceso al cilindro inyector. También se desea reducir al máximo posible la distancia entre la conexión del recipiente y el cilindro inyector, para minimizar la pérdida de calor de este conducto, evitando tener que calefaccionar el mismo. Por lo mencionado anteriormente se llega a la conclusión que el recipiente se debe encontrar lo más próximo al cilindro inyector.

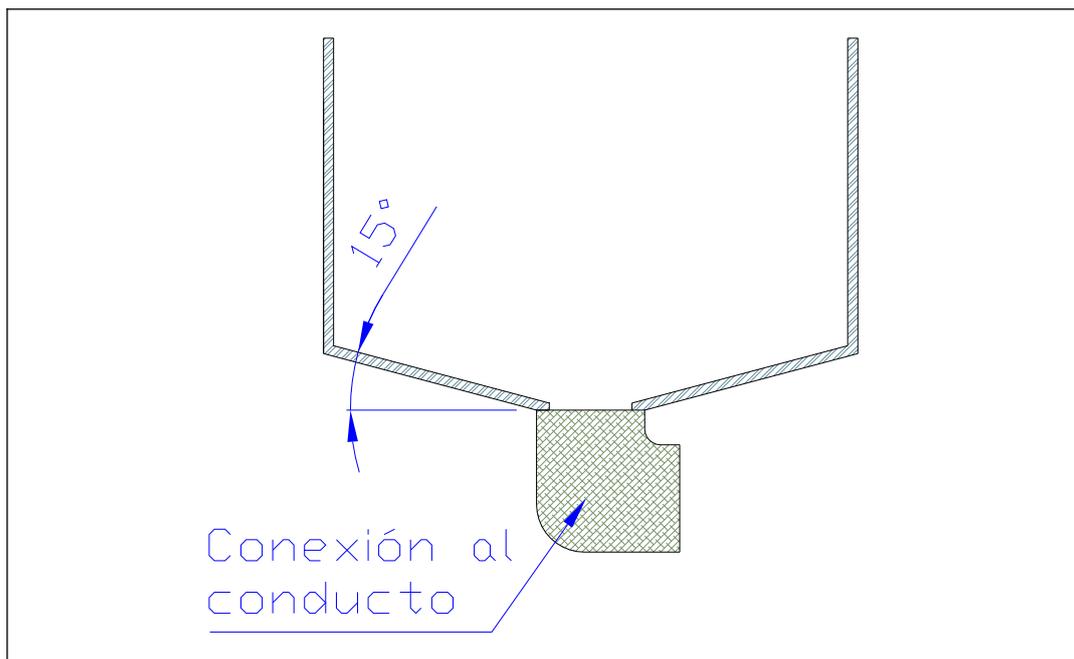


Figura N° 16: Diseño preliminar.

Las dimensiones del recipiente y su ubicación quedan acotadas tanto a la disponibilidad de materiales, como al diseño de otros sistemas; por ser este un sistema que no presenta gran complejidad, su diseño presenta gran flexibilidad.

## 4.5 Diseño del sistema de Retención

### 4.5.1 Descripción

El sistema de retención es un sistema simple que se encarga del bloqueo de uno de los sistemas que no debe actuar en una etapa determinada del proceso de inyección.

En el momento de la inyección (carrera ascendente del pistón), se debe bloquear el conducto de alimentación para que la cera ingrese a la matriz y no retorne al recipiente de alimentación. De igual manera, cuando se realiza la alimentación del cilindro inyector (carrera descendente del pistón), se debe bloquear el pico inyector para que la depresión originada por la carrera descendente del pistón produzca el ingreso de cera del sistema de alimentación y no el ingreso de aire por el pico inyector.

Este sistema está compuesto por dos elementos (Figura N° 17), uno ubicado en el conducto de alimentación que produce el bloqueo en la carrera ascendente y el otro ubicado en el cilindro inyector, precisamente entre el pico inyector y el acceso del sistema de alimentación al cilindro inyector.

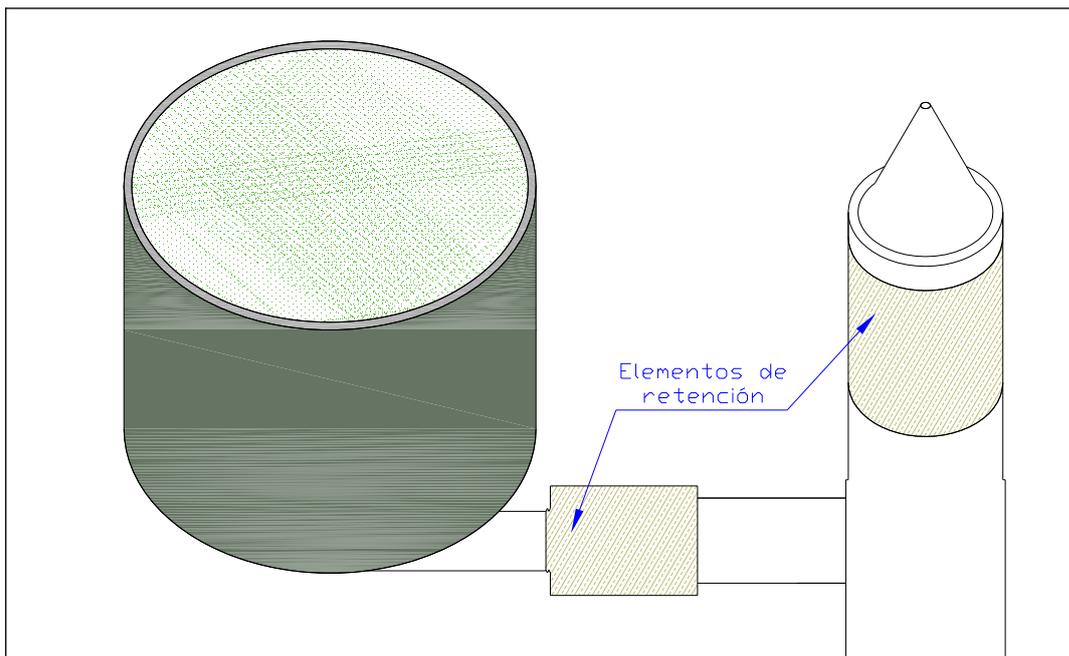


Figura N° 17: Ubicación de los elementos de retención.

### 4.5.2 Elección de los elementos

Los elementos de retención deben permitir el paso de la cera en un momento de la inyección e impedirlo en otro, esto se logra a través del uso de válvulas. Dentro de las válvulas para el control de fluidos se diferencian dos grandes grupos, las válvulas manuales y las válvulas de retención.

Las válvulas manuales permiten el paso del fluido en ambos sentidos y son operadas externamente. Esta operación es realizada por una persona o puede automatizarse para controlarse remotamente. Existen numerosos diseños de este tipo de válvula que pueden ser utilizadas para realizar el bloque en la máquina inyectora, pero la más indicada es la válvula esférica, por ser compacta y de rápida operación.

Las válvulas de retención permiten el paso del fluido en un solo sentido y lo impiden en otro. Este tipo de válvulas se instalan en la línea a controlar y no pueden ser operadas externamente, simplemente actúan cuando el sentido de circulación del fluido se invierte, evitando que el fluido retorne.

Las zonas donde operarán las válvulas a designar son de difícil acceso y se encontrarán a temperatura la de trabajo de la cera fundida, dificultando su operación. Además no se requiere un uso distinto de las válvulas durante la operación de inyección de la cera, siempre operarán de la misma forma permitiendo el paso en un sentido e impidiéndolo en el otro; por lo que utilizando válvulas manuales se tendrían que operar ambas en cada cambio de carrera del pistón, mientras que con el uso de válvulas de retención la persona que está operando la máquina se independiza de estas operaciones.

Bajo estas consideraciones se decidió, para este sistema, el uso de dos válvulas de retención.

### **4.5.3 Válvulas de retención**

Las válvulas de retención se dividen en dos grandes grupos:

- *Válvulas de retención a placa o clapeta*
- *Válvulas de retención a bola*

#### *Válvulas de retención a placa o clapeta*

Las válvulas de retención a clapeta son utilizadas cuando las presiones de operación son relativamente bajas. Éstas están diseñadas para operar normalmente en posición horizontal. Están compuestas por un cuerpo donde se fijan los conductos, en el interior de estos se encuentra una placa o clapeta que permite o restringe el paso del fluido según el sentido de circulación (Figura N° 18).

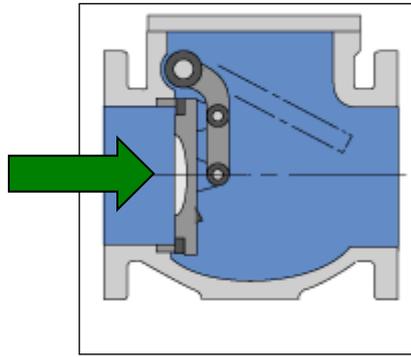


Figura N° 18: Vista en corte de la válvula a claveta y su sentido de circulación.

La otra disposición (también llamada válvula de retención a disco) es la placa montada sobre una guía central con un resorte (Figura N° 19), la presión ejercida produce un desplazamiento axial sobre la guía permitiendo el paso del fluido. Cuando se invierte el flujo, se cierra por efecto de la presión y la acción del resorte.



Figura N° 19: Fotografía del corte de una válvula a disco.

#### *Válvulas de retención a bola*

Las válvulas de retención a bola son utilizadas cuando las presiones de trabajo son altas, como en las líneas hidráulicas ( $19\text{MPa}=200\text{Kg/cm}^2$ ) e incluso superiores. Según su diseño pueden operar tanto vertical como horizontalmente. El funcionamiento es similar a la válvula de retención a disco, pero con la diferencia que la retención la realiza una esfera sobre un asiento que puede ser plano o cónico. Por lo general este tipo de válvulas no requiere de sellos u O-Rings, otorgándole robustez para soportar elevadas presiones. Son más compactas y poseen menos elementos en su interior que las válvulas a clapeta.

#### **4.5.4 Elección**

De las diferentes opciones mostradas previamente, se decide la implementación de **válvulas de retención a bola** por ser más robustas, más sencillas, y requerir menos mantenimiento. Sin embargo esto quedará definido luego de realizar una búsqueda de los modelos comercialmente disponibles y sus presupuestos.

## **4.6 Diseño del sistema de Calefacción**

### **4.6.1 Descripción**

El sistema calefactor tiene la función de entregar el calor para derretir y mantener la cera a la temperatura óptima para su inyección, tanto en la tolva como la acumulada en el cilindro inyector.

Las temperaturas de trabajo de las ceras utilizadas en las inyectoras tienen un rango aproximado de 45° a 80°C; por lo que para realizar la calefacción de las distintas partes de la máquina pueden considerarse la utilización directa de resistencias eléctricas; como también sistemas de circulación de fluidos, entregándoles calor a través de resistencias eléctricas o con la quema de combustibles como gas natural.

Los sistemas de circulación de fluidos están compuestos por un líquido como agua o aceite, al cual se le entrega calor y luego se los hace circular por la zona a calefaccionar, muchas veces asistidos por una bomba. La gran ventaja de estos sistemas es que una vez alcanzada la temperatura de régimen poseen una gran inercia térmica, por lo que se los considera muy estables y con una entrega de calor muy homogénea. Como contrapartida son sistemas lentos y difíciles de implementar.

Las resistencias eléctricas en contacto directo, son sistemas sencillos y actúan más rápido sin embargo presentan una mayor dificultad a la hora de lograr una adecuada homogenización de la temperatura.

### **4.6.2 Cálculo térmico**

Los volúmenes de cera a calefaccionar son de 500cc para el cilindro y 2000cc para la tolva.

Las dimensiones del cilindro ya están fijadas en 50,8mm de diámetro por 250mm carrera; mientras que las de la tolva dependen del diseño de de otros sistemas, procurando minimizar la relación superficie-volumen, de forma tal que la temperatura de régimen se alcanza en mayor tiempo, pero la pérdida de calor es menor y es más estable térmicamente.

Para una geometría cilíndrica esta relación depende de la relación entre el radio y la altura. En la siguiente tabla se muestran pares de valores de radios y alturas donde se puede apreciar que existe un rango de valores para los cuales no existe gran diferencia (radios de entre 5 y 9cm), alcanzando el valor óptimo en 7cm; por lo que cualquier cálculo realizado en este rango no genera una gran diferencia.



Estos datos son insuficientes para realizar el cálculo térmico, por lo que se recopilaron datos genéricos de ceras y se realizó un promedio para darle mayor flexibilidad a la inyectora a la hora de elegir la cera:

$\rho$	<b>Densidad</b>	960,00	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	<b>Calor específico</b>	2,8	[KJ/Kg °C]
$L_f$	<b>Calor latente de fusión</b>	142,35	[KJ/Kg]
$k$	<b>Conductividad térmica</b>	0,08352	[W/m°C]

Cabe destacar que los datos de calor específico y conductividad térmica se consideran iguales tanto para estado sólido como para estado líquido. Se adopta una temperatura de **solidificación/fusión de 64°C**.

Con estos datos, se calculan las masas a calentar y derretir, en el cilindro inyector y en la tolva:

- Cilindro inyector 500cc → 0,48Kg
- Tolva 2000cc → 1,92Kg

Considerando una temperatura ambiente de 20°C y una temperatura final de 70°C, se calcula la cantidad de calor necesaria para producir el  $\Delta T$  y el cambio de estado.

$$Q_{total} = Q_{Sensible} + Q_{latente} = m.C_p.\Delta T + m.L_f$$

- Para el cilindro inyector:

$$0,48Kg \cdot 2,8 \frac{KJ}{Kg^\circ C} \cdot 50^\circ C + 0,48Kg \cdot 142,35 \frac{KJ}{Kg} = 135,52KJ$$

- Para la tolva:

$$1,92Kg \cdot 2,8 \frac{KJ}{Kg^\circ C} \cdot 50^\circ C + 1,92Kg \cdot 142,35 \frac{KJ}{Kg} = 542,11KJ$$

Estas son las cantidades de calor que se le deben entregar a cada uno de los elementos para acondicionar la cera.

Si se considera un tiempo de 30 minutos para poner en régimen la inyectora, se calcula el flujo de calor mínimo:

$$30 \text{ min} = 1800 \text{ seg}$$

- Para el cilindro inyector:

$$\frac{135,52KJ}{1800seg} = 75W$$

- Para la tolva:

$$\frac{542,11KJ}{1800seg} = 300W$$

Estos son los flujos de calor mínimos que se deben entregar; sin considerar las pérdidas, por lo que se realiza su cálculo para la temperatura de las resistencias eléctricas a 300°C (caso con mayores pérdidas). El cálculo de las pérdidas se realiza considerando la convección natural de un cilindro vertical mediante la siguiente fórmula [13].

$$N_{um} = c.(G_{rl} . P_r)^n \text{ siendo } N_{um} = \frac{h.L}{k}$$

Donde:  $N_{um}$  = Número de Nusselt  
 $G_{rl}$  = Número de Grashof  
 $P_r$  = Número de Prandtl  
 $L$  = Longitud del cilindro  
 $h$  = Coeficiente de transferencia de calor  
 $k$  = conductividad térmica

c y n son constantes que se obtienen de la siguiente tabla [13]:

Tipo de flujo	Rango de Grl.Pr	c	n
Laminar	10 <sup>4</sup> a 10 <sup>9</sup>	0,59	1/4
turbulento	10 <sup>9</sup> a 10 <sup>13</sup>	0,10	1/3

El valor de  $P_r$  se obtiene de tabla y para aire a 20 °C es de  $P_r = 0,7$ ; y el valor de  $G_{rl}$  se obtiene de:

$$G_{rl} = \frac{g \cdot \beta (T_w - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2}$$

$g$  = Aceleración de la gravedad = 9,8 m/s<sup>2</sup>  
 $\beta$  = Coeficiente de expansión volumétrico = 6,67.10<sup>-3</sup> 1/°C  
 $T_w$  = Temperatura de la pared (300 °C)  
 $T_\infty$  = Temperatura de medio (20 °C)  
 $L$  = Longitud del cilindro  
 $\nu$  = viscosidad cinemática = 0,14.10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s

Estos datos son para aire a 20 °C [13]. Se considera una longitud de 250mm para el cilindro inyector y de 100mm para la tolva.

Cilindro inyector	$G_{rl} = 1,45 \cdot 10^9$	$\Rightarrow$	$G_{rl} \cdot P_r = 1,015 \cdot 10^9$
Tolva	$G_{rl} = 9,33 \cdot 10^5$	$\Rightarrow$	$G_{rl} \cdot P_r = 6,53 \cdot 10^5$

Aplicando las constantes de la tabla y  $k = 0,026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  (aire a 20°C) se obtiene:

Cilindro inyector  $N_{um} = 100,5$

$$\boxed{N_{um} \cdot k / L = h = 10,45 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Tolva  $N_{um} = 16,77$

$$\boxed{N_{um} \cdot k / L = h = 4,36 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Estos son los valores de h para ambos cilindro, utilizando la siguiente fórmula podemos obtener las pérdidas, donde A es el área de cada uno de los cilindros:

$$\boxed{Q_p = A \cdot h \cdot \Delta T}$$

<b>Cilindro inyector</b> $Q_p = 116,74 \text{ W}$
---

<b>Tolva</b> $Q_p = 64,4 \text{ W}$
-------------------------------------

Estas son las pérdidas del cilindro y la tolva para el caso con mayores pérdidas (resistencias eléctricas) y sin aislación térmica. Estas pérdidas sumadas a los calores necesarios para acondicionar la cera nos determina la potencia total que debe entregar el sistema calefactor.

Ahora se realiza el cálculo del tiempo aproximado en que se llevará a cabo esta entrega de calor considerando los fenómenos transitorios, considerando en ambos casos como cilindro sólidos de cera, de forma tal que la temperatura en el centro sea de 70°C. Como se trata de un cálculo aproximado, se consideran los cilindros de gran longitud para despreciar las condiciones de borde.

El primer paso es el cálculo del Número de Biot, que se define de la siguiente forma:

$$Bi = \frac{h.L_s}{k}$$

Como estos cilindros macizos se encuentran contenidos dentro de un tubo de acero, y no hay fenómeno de convección. Se considera al tubo de acero a la temperatura de régimen y que tiene una resistencia a la transferencia de calor despreciable frente a la de la cera, por lo que se asume que el coeficiente  $h \rightarrow \infty$ .

Con este valor, el número de Biot también tiende a infinito, por lo que es válido el uso de tablas; estando las mismas formuladas para el cálculo en el centro del cilindro, por lo que no es necesario aplicar un factor de corrección [13].

Ahora se realiza el cálculo para los dos cilindros, uno para el sistema de circulación de agua a 95°C; y otro para resistencias en contacto directo a una temperatura de 300°C.

$$\frac{T_0 - T_e}{T_i - T_e} = \theta$$

Donde:

- $T_e$  = Temperatura del medio (95 °C y 300 °C)
- $T_i$  = Temperatura inicial de sólido (20 °C)
- $T_0$  = Temperatura en el centro del sólido (70 °C)
- $\theta$  = Temperatura adimensional

Los valores de temperatura adimensional para el sistema de circulación de agua es de  $\theta = 1/3$  y para las resistencias eléctricas es de  $\theta = 0,821$ .

Con estos valores se ingresa a la tabla junto con el número  $1/Biot = 0$  y se obtienen los valores:

$$\theta = 1/3 \quad \Rightarrow \quad 0,24$$

$$\theta = 0,821 \quad \Rightarrow \quad 0,04$$

*Estos son los valores del parámetro  $\alpha.t/b^2$*

Donde:

- $\alpha$  = Difusividad térmica =  $k/\rho.C_p$
- $b$  = Radio del cilindro
- $t$  = Tiempo

La difusividad térmica es un parámetro de la cera, y su valor es:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \frac{0,08352 \frac{W}{m^{\circ}C}}{960 \frac{Kg}{m^3} \cdot 2800 \frac{J}{Kg^{\circ}C}} = 3,1 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{seg} = 3,1 \cdot 10^{-4} \frac{cm^2}{seg}$$

**Para el sistema de circulación de agua (95°C)**

- Cilindro inyector: 
$$\frac{0,24 \cdot (2,54cm)^2}{3,1 \cdot 10^{-4} \frac{cm^2}{seg}} = 4995seg = 83 \text{ min} = t$$

- Tolva: 
$$\frac{0,24 \cdot (8cm)^2}{3,1 \cdot 10^{-4} \frac{cm^2}{seg}} = 49548seg = 13h45 \text{ min} = t$$

**Para el sistema de resistencias eléctricas (300°C)**

- Cilindro inyector: 
$$\frac{0,04 \cdot (2,54cm)^2}{3,1 \cdot 10^{-4} \frac{cm^2}{seg}} = 832seg = 14 \text{ min} = t$$

- Tolva: 
$$\frac{0,24 \cdot (8cm)^2}{3,1 \cdot 10^{-4} \frac{cm^2}{seg}} = 8258seg = 137 \text{ min} = t$$

Se puede ver que el sistema de resistencias eléctricas aventaja al otro en cuanto al tiempo necesario para alcanzar la temperatura de trabajo.

Una cuestión a tener en cuenta, es que estos cálculos son para las temperaturas en los centros de los cilindro, mientras que en los bordes las temperaturas son levemente menores a las de los sistemas calefactores (95 y 300°C). Para el sistema de circulación de fluidos este no presenta un problema, pero para las resistencias en contacto directo, la temperatura en los borde puede superar la de ebullición de la cera, degradándola. Según el fabricante, la temperatura a la cual comienza la degradación es de aproximadamente 120° C; por lo que de optar por un sistema de resistencias en contacto directo, se debe utilizar un sistema de control preciso para evitar este problema.

## **4.7 Diseño del sistema de sujeción de matriz**

### **4.7.1 Generalidades**

La matriz en donde se inyecta la cera está compuesta por dos mitades, generalmente simétricas, por lo que se genera una línea de partición central que es necesaria para desmoldar y obtener el modelo deseado una vez que la cera se encuentra en estado sólido.

Durante el proceso de inyección, la cavidad de la matriz se encuentra bajo presión, generándose fuerzas, sobre las superficies internas, que tienden a separar sus dos mitades. Este sistema se debe encargar de evitar la apertura de la misma durante la inyección.

### **4.7.2 Consideraciones previas**

Este sistema debe poseer la flexibilidad para proporcionar el cierre de matrices de diferentes dimensiones, ser simple para permitir una operación sencilla y no encarecer al equipo

Para su diseño se deben definir las dimensiones de la matriz de mayor tamaño a utilizar para poder dimensionar la base porta matriz, la altura máxima y la estructura donde se montará; y también calcular las solicitaciones que éste sistema deberá soportar.

Si bien el uso principal de esta inyectora será la confección de modelos de prótesis, y los mismos son de pequeños volúmenes y áreas reducidas; se considera un tamaño de matriz mayor al requerido, para asegurar su buen funcionamiento y poder darle uso a la inyectora en otras aplicaciones.

La presión en la matriz actúa sobre toda su superficie interna, generando fuerzas normales en cada punto, pero como se trata de un volumen cerrado las mismas se anulan al encontrar su opuesta (caso análogo a las fuerzas radiales en un cilindro sometido a presión). Las fuerzas que no poseen opuestas dentro de la misma pieza de la matriz, son las que se encuentran sobre la sección transversal de la línea de partición, y actúan en forma normal. El valor de la sección transversal a adoptar para el diseño es de suma importancia ya que su producto por la presión de inyección nos brinda el valor de las fuerzas a equilibrar.

Se considera un **área máxima de sección transversal de 50cm<sup>2</sup>**, teniendo en cuenta el volumen máximo de inyección de 500cc y la presión de inyección de 1,96MPa (20Kg/cm<sup>2</sup>) por lo que la máxima fuerza que actúa sobre cada mitad de la matriz es de 9800N (1000Kg).

$$P = 50\text{cm}^2 \cdot 20\text{Kg} / \text{cm}^2 = 1000\text{Kg} = 9800\text{N}$$

Como se mencionó anteriormente, el cilindro inyector tiene una disposición vertical, por lo que la inyección también es en forma vertical. En consecuencia la línea de partición de la matriz se debe encontrar en forma

vertical también, para facilitar el desmolde de la pieza, ya que de otra forma el canal de alimentación quedaría contenido dentro de una de las mitades de la matriz dificultando su extracción.

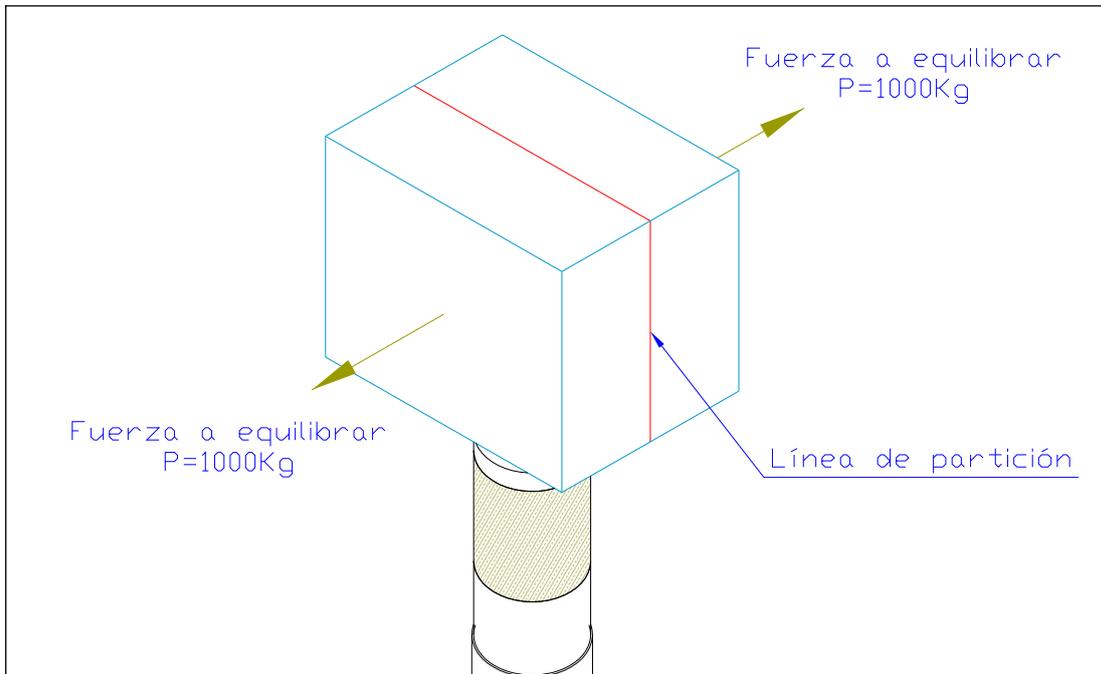


Figura N° 20: Disposición de la matriz y su línea de partición.

Dado que el plano que contiene a la sección transversal y a la línea de partición es vertical, las fuerzas de separación de la matriz están orientadas horizontalmente como se muestran en la Figura N° 20.

El siguiente paso es definir las dimensiones de la base porta matriz, la altura máxima y la estructura en donde se montará este sistema, con lo cual se pueden calcular las solicitaciones a la que estarán sometidos tanto el sistema de sujeción como la estructura donde esté montado.

Como se ha mencionado, se requiere equilibrar las dos fuerzas en dirección horizontal que tienden a separar la matriz, por lo que el sistema de sujeción estará montado a los laterales de la estructura, que tendrá forma de pórtico montado sobre la base porta matriz. De esta forma quedan dos dimensiones acotadas, que son la altura y el ancho del pórtico, la profundidad del pórtico no queda acotada por la estructura.

En base a la máxima área de sección transversal y al volumen máximo de inyección se determinan inicialmente un ancho y una altura de 300mm, y una profundidad de alrededor de 250mm; y los actuadores del sistema de sujeción estarán montados a 100mm sobre la base porta matriz (Figura N° 21).

Dado que los actuadores estarán montados en dirección del ancho de la estructura y demandarán un cierto espacio, se decidió extender esta dimensión a 335mm, como también se ajusta la profundidad a 245mm para facilitar su construcción.

Sobre la base porta matriz se montará una chapa de 5mm de espesor con un orificio central por donde se extienden 15mm del pico inyector. La

misma no se fija a la estructura, simplemente estará guiada para facilitar su remoción y de esta forma el montaje del cilindro inyector.

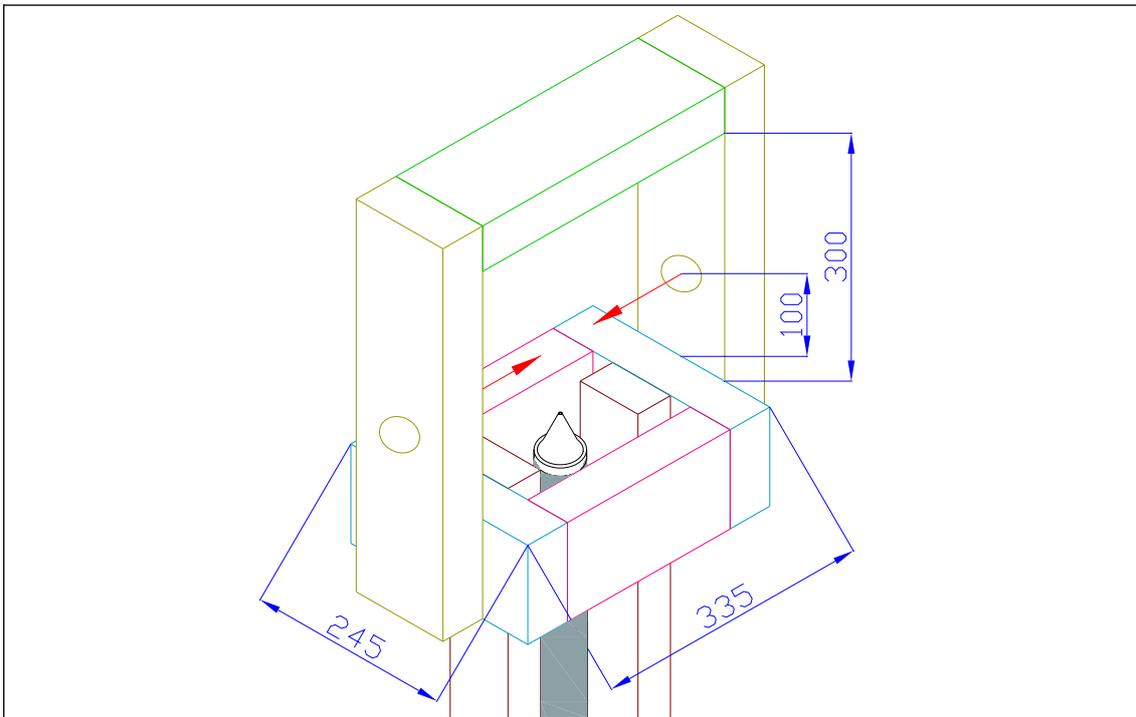


Figura N° 21: Vista de la estructura y base porta matriz sin la chapa. Las fuerzas del sistema de sujeción están indicadas en rojo.

#### 4.7.3 Elección del sistema

El sistema de sujeción debe proveer el cierre de la matriz mediante dos fuerzas laterales que actúan en forma opuesta, estas fuerzas se indican con color en la Figura N° 21. La matriz debe ubicarse en el medio de la base, por lo que el sistema debe disponer de dos actuadores que permitan variar las distancias de ambos, para poder ajustarse a matrices de diferentes tamaños. Estos actuadores deben proveer una fuerza en una única dirección, caso similar al del sistema inyector, sin el grado de precisión y control que éste requiere.

Dado que la sujeción es muy similar al sistema motor se consideran los mismos tipos de sistemas para realizar esta tarea:

- Sistema Mecánico
- Sistema Neumático
- Sistema Hidráulico

Los sistemas hidráulico y neumático ya fueron descritos en profundidad, el que varía del considerado anteriormente es el mecánico. Al no demandar los mismos requisitos anteriormente descritos, el sistema mecánico puede reconsiderarse como un arreglo de tuerca y tornillo de movimiento. Los sistemas de fluidos aventajan al tornillo de movimiento por ser más rápidos, más fáciles de operar y no requieren de la fuerza de la persona que esté operando la máquina, pero en contrapartida son más costosos, por lo que estos son utilizados cuando hay una demanda de alta productividad.

Los costos de los sistemas de fluidos ya fueron analizados y se cuentan con presupuestos de los proveedores locales de ambos. El sistema neumático es descartado ya que para producir los 9800N (1000Kg) de fuerza requeridos trabajando con los 0,98MPa (10Kg/cm<sup>2</sup>) de presión máxima se requieren dos cilindros de 12cm de diámetro, sin contar con las válvulas que los controlen, por lo que es un sistema sumamente costoso.

El sistema hidráulico se puede considerar debido a que ya se cuenta con la bomba y las válvulas del sistema motor, adquiriendo una válvula derivadora se pueden utilizar estos componentes en un nuevo circuito al que se le sumarían dos actuadores hidráulicos para realizar la tarea de cierre de matriz; pero estos componentes elevarían el costo considerablemente. De optar por el sistema mecánico, los tornillo de movimiento como las tuerca pueden ser fabricadas en los talleres de la facultad, por lo que los costos se limitarían solamente a los materiales para su confección.

Debido a que no se requiere una alta productividad y el factor económico es considerado de gran importancia, se opta por realizar el sistema de sujeción de matriz con dos tornillos de movimiento con sus respectivas tuercas.

#### **4.7.4 Tornillo de movimiento**

Los tornillos de movimiento son utilizados de dos maneras, cuando se quiere ejercer una gran presión sobre un objeto (prensas); o cuando se requiere elevar cargas (gatos). Estos se diferencian de los tornillos de fijación en el perfil de su rosca, los tornillos de fijación tienden a una rosca triangular para producir mayores fuerzas de roce y así garantizar su fijación; mientras que los tornillos de movimiento poseen perfiles trapezoidales o cuadrados. La manera en que transmiten el movimiento o ejercen presión es impidiendo el movimiento axial y de rotación de la tuerca o el tornillo y según el caso, se encuentran distintas combinaciones (Figura N° 22).

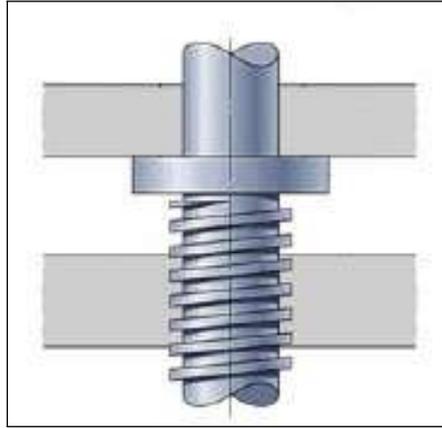


Figura N° 22: Tornillo de movimiento.

En nuestro caso y dado que el tornillo se utilizará como prensa, se restringe ambos movimientos a la tuerca. La torsión se administra al tornillo mediante un brazo de palanca en su extremo libre, produciendo el movimiento axial y comprimiendo a la matriz.

Este sistema es el que debe soportar las mayores fuerzas generadas por la maquina inyectora, por lo que se deben realizar los cálculos de las solicitaciones sobre la rosca y el núcleo del tornillo.

#### 4.7.5 Cálculo del tornillo

Los tornillos se diseñan asumiendo una carga ejercida por las placas sobre cada uno de ellos de 9800N (1000Kg).

Se escoge como material de construcción un acero al carbono comercialmente disponible, SAE 1045, y sus propiedades se muestran a continuación [11]:

**SAE 1045** (Sin tratamiento térmico)

Tensión de rotura:  $\sigma_{Rot} = 560\text{MPa}$  (5750Kg/cm<sup>2</sup>)

Tensión de fluencia:  $\sigma_{flu} = 310\text{MPa}$  (3200Kg/cm<sup>2</sup>)

Como criterio de diseño se adopta que las tensiones debidas a las solicitaciones no deben superar a la tensión de fluencia, afectada por un factor de seguridad de 2, siendo los valores típicos para maquinaria entre 1,5 y 2 [15]; por lo que la tensión admisible es de:  $\sigma_{flu}/2 = \sigma_{adm} = 155\text{MPa}$  (1600Kg/cm<sup>2</sup>). Para el cálculo de los esfuerzos de corte se utiliza el criterio de Tresca, que indica que la plasticidad se produce cuando el esfuerzo de corte alcanza la mitad de la tensión de fluencia a la tracción, por lo que, el esfuerzo de corte admitido será de  $\tau_{adm} = 78\text{MPa}$  (800Kg/cm<sup>2</sup>) =  $\sigma_{adm}/2$ .

Como primer paso, se realizan el dimensionado del núcleo del tornillo, al cual se le asigna un valor de **2cm**, partiendo de dicho valor se pueden realizar la verificación de los esfuerzos a la compresión, torsión, esfuerzos combinados y pandeo.

En el **esfuerzo de compresión**, para un diámetro interno de 2cm, la sección es de:

$$A = \frac{D_i^2 \cdot \pi}{4} = 3,14 \text{ cm}^2$$

para la carga de 9800N (1000kg):

$$\sigma_{comp} = \frac{1000 \text{ Kg}}{3,14 \text{ cm}^2} = 318,3 \text{ Kg/cm}^2 < \sigma_{adm} = 1600 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{comp} = 31 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 155 \text{ MPa}$$

Verifica ampliamente.

Para el cálculo de los **esfuerzos de torsión** se asume un brazo de placa de 20cm y una fuerza de apriete de 196N (20Kg), que es el apriete típico para tornillo grandes [12]. El momento torsor resultante es de 39Nm (4Kg.m). El esfuerzo de corte producido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{M_t \cdot Y}{J} < \tau_{adm}$$

Donde:  $M_t$  = momento torsor

$Y$  = Máxima distancia del eje (en este caso el diámetro de raíz del tornillo)

$J$  = Momento de inercia polar ( $\pi \cdot r^4 / 2$  para secciones circulares).

$$4 \text{ Kg.m} \cdot r / (\pi \cdot r^4 / 2) = 800 \text{ Kg.cm} / \pi \cdot r^3 = 254,6 \text{ Kg/cm}^2 = 24 \text{ MPa}$$

Comparado con el valor de  $\tau_{adm} = 78 \text{ MPa}$  ( $800 \text{ Kg/cm}^2$ ), verifica.

Ahora se realiza la verificación de los **esfuerzos combinados**. En el momento del ajuste, el tornillo está sometido tanto a compresión como a torsión, si bien estos dos esfuerzos no se encontrarán en sus máximas magnitudes simultáneamente (en el momento del ajuste no se encontrará la máxima compresión, y en la máxima compresión no se estará ajustando), se calculará las solicitaciones por esfuerzos combinados utilizando el criterio de Tresca como si estos fueran máximos simultáneos.

$$\sigma_{adm} > (\sigma_{comp}^2 + 4\tau^2)^{1/2}$$

$$\sigma_{adm} > [(318,3)^2 + 4(254,6)^2]^{1/2} \text{ Kg/cm}^2 = 600,5 \text{ Kg/cm}^2 = 58 \text{ MPa}$$

Comparado con el valor de  $\sigma_{adm} = 155\text{MPa}$  ( $1600\text{Kg/cm}^2$ ), verifica ampliamente.

Para el cálculo del **pandeo** se debe adoptar un criterio, como puede ser el de Euler, pero como no siempre es necesario ésta verificación por las dimensiones del elemento, se adopta el siguiente criterio:

Si la longitud del tornillo no soportado es mayor o igual a ocho veces el diámetro de raíz, se debe tratar el mismo como una columna y calcular la verificación del esfuerzo al pandeo [10]. En este caso la distancia crítica es de 16cm, y la distancia al centro es de 16,75cm, pero considerando el ancho de la matriz, la distancia del tornillo en voladizo nunca será mayor a 16cm.

Ya se han realizado todas las verificaciones para el tornillo, ahora se debe comenzar con el dimensionado de la rosca. Se adopta un perfil de filete cuadrado, debido a su menor roce se elije del ángulo de la hélice y paso.

Dado que los tornillos deben mantener cerradas las placas de la matriz, estos deben verificar la condición de irreversibilidad, por lo que el ángulo de hélice no puede elegirse al azar.

De la ecuación de condición de irreversibilidad para tornillos de movimiento [9], se despreció el término que considera al collar de empuje, ya que la disposición planteada no lo requiere, reduciéndose esta ecuación a:

$$\text{Tg } \alpha < \mu$$

Donde  $\alpha$  = ángulo de hélice

$\mu$  = Coeficiente de roce entre el tornillo y la tuerca

Tanto el tornillo como la tuerca se confeccionarán en Acero SAE 1045 y valores promedios de coeficiente de rozamiento entre estos es de  $\mu = 0,17$  por lo que  $\alpha < 10^\circ$ .

Se adopta un valor de  $\alpha$  de  $5^\circ 30'$ , con lo que se obtiene un **paso de 6mm**, ya que:

$$p = \pi \cdot D_i \cdot \text{sen } \alpha$$

Donde  $D_i$  es diámetro de raíz (20mm) y  $p$  el paso.

Con estos valores se puede calcular el rendimiento del los tornillos, aunque para la aplicación no es un dato relevante:

$$\eta = \frac{\text{Tg } (\alpha)}{\text{Tg } (\alpha + \varphi)}$$

Donde el ángulo  $\varphi$  se obtiene de la ecuación  $\text{Tg } \varphi = \mu$ , simplificación para el tornillo de filete cuadrado [9].

De la ecuación recién dada se obtiene un rendimiento del **35,5%**

El siguiente paso es la comprobación de los esfuerzos que se producen en los filetes. Para el cálculo de estos esfuerzos primero hay que definir ciertos parámetros de la rosca, estos son:

### **Tornillo (SAE 1045)**

Perfil del filete: cuadrado  
Diámetro interno o de raíz: 20mm  
Diámetro medio: 23mm  
Diámetro Externo: 26mm  
Altura del filete = 3mm  
Ancho del filete 3mm  
Paso: 6mm  
ángulo de hélice: 5° 30´

### **Tuerca (SAE 1045)**

Diámetro de agujero: 20,5mm  
Diámetro de rosca: 26,5mm  
Profundidad de la rosca: 3mm

Dado que la distribución de la carga en los filetes no se produce en forma pareja, de hecho alrededor del 65% de la misma se reparte en los primero dos filetes [10], en lugar de calcular la tensión producida en n filetes; el criterio es calcular el número de filetes en los que se produciría la máxima sollicitación admisible; **y este valor deben ser menor o igual a 2 filetes.**

Con estos datos y consideraciones, se pueden realizar las verificaciones de la rosca a los distintos esfuerzos.

La primera es la **presión por aplastamiento**, que es el esfuerzo que se genera entre la superficie de la rosca del tornillo y la superficie de contacto con la tuerca, la misma se puede describir con la siguiente ecuación [10]:

$$\sigma_b = \frac{W}{\pi \cdot d_m \cdot h \cdot n}$$

Donde:  $\sigma_b$  = Presión por aplastamiento (dato de tabla)

W = Carga

$d_m$  = diámetro medio de la rosca del tornillo

h = altura de la rosca

n = número de filetes en contacto.

La tensión máxima admisible por aplastamiento, para el caso de una prensa manual con tornillo de acero y tuerca de bronce es entre 16 y 23 MPa (170 y 240 Kg/cm<sup>2</sup>), como no se pudo encontrar un valor representativo de una tuerca de acero SAE 1045, y dado que el valor de tensión de fluencia del bronce es 2,5 veces menor que el de este acero, se adopta un valor 1,5 veces superior al de la tabla para continuar con una postura conservadora.  **$\sigma_b = 29\text{Mpa (300 Kg/cm}^2\text{)}$**

$$n = \frac{W}{\pi \cdot d_m \cdot h \cdot \sigma_b}$$

Esto nos da un valor n de 1,53; por lo que verifica según el criterio adoptado.

El esfuerzo de **flexión** surge de considerar el filete como una viga con una carga distribuida, nuevamente la ecuación es:

$$\sigma_b = \frac{3.W.h}{\pi.d_m.b^2.n}$$

Donde: b = ancho del filete

El resto de los parámetros ya fueron definidos con la excepción de  $\sigma_b$  que su valor para el cálculo de flexión al de diseño del material y nuevamente se puede calcular el número mínimo de filetes:

$$n = \frac{3.W.h}{\pi.d_m.b^2.\sigma_b}$$

Como resultado  $n = 0,86$  filetes, verifica ampliamente comparando con el valor de 2.

Las roscas del tornillo y de la tuerca se encuentran ambas sometidas al corte transversal debido a la flexión. La ecuación que representa esta sollicitación es la siguiente:

$$\tau = \frac{3.W}{2.A}$$

donde A es la sección transversal.

Realizando las simplificaciones para el caso tanto de la tuerca como del tornillo se obtiene:

$$\tau = \frac{3.W}{2.\pi.d_0.b.n}$$

Donde todos los parámetros fueron ya definidos; el único que merece una aclaración es  $d_0$ , que es el diámetro de raíz del tornillo para el cálculo en el mismo y es el diámetro mayor del tornillo para el cálculo en la tuerca. De los 2 componentes el que más va a estar sollicitado es el tornillo, por lo que se hará el cálculo en este:

$$n = \frac{3.W}{2.\pi.d_0.b.\tau}$$

El resultado es de  $n = 1$  por lo que se requieren por lo menos 2 filetes para soportar esta sollicitación.

Mediante esta serie de verificación se puede asegurar la sujeción de la matriz; que posteriormente se tratará la construcción de la misma

## **4.8 Diseño de la Estructura**

### **4.8.1 Generalidades**

La estructura es el componente en donde se montan todos los sistemas anteriormente descritos, debiendo soportar el peso de algunos y las cargas producidas por otros. Los controles, comandos, instrumentos, sistemas auxiliares, un área de trabajo para la matriz y la misma estructura son montados sobre un bastidor que soporta el peso de estos elementos y le provee estabilidad a la estructura.

### **4.8.2 Solicitaciones sobre la estructura**

Sobre la estructura están montados prácticamente todos los sistemas, dentro de los cuales encontramos al sistema motor, inyector, de retención, de alimentación, calefactor y de sujeción de matriz. Solo tres de ellos cargan a la estructura con fuerzas que no provienen del peso propio, estos sistemas son el motor, inyector y el de sujeción de matriz; y las fuerzas que cargan a la estructura son todas de origen mecánico, porque como se describió en el diseño del sistema inyector, se encontró un arreglo para que las fuerzas de origen térmico no actúen sobre la misma. Así mismo, la temperatura a la que opera la máquina inyectora es baja (alrededor de 70°C) que para un material como el acero no afectará sus propiedades mecánicas.

Para el diseño de la estructura se debe contemplar las medidas de las sujeciones de los sistemas a la misma; de esta manera muchas de las dimensiones de la estructura se encuentran acotadas.

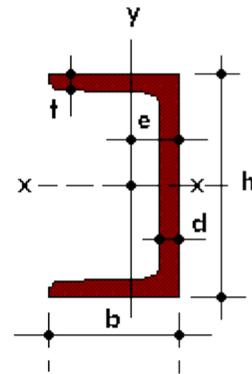
Debido a esto, la estructura está compuesta por dos partes, una que se encarga de resistir las solicitaciones del cilindro hidráulico e inyector; y la otra que resiste las solicitaciones de los tornillos de movimiento del sistema de sujeción de matriz, que es el pórtico descrito anteriormente.

Ambas partes de la estructura deben permitir la inserción de los elementos para vincular los sistemas. En el caso de los cilindros la sujeción se realizará con planchuelas de acero vinculadas con tornillos. Para el sistema de sujeción de matriz se debe permitir perforar y soldar la tuerca que guía y soporta al tornillo de movimiento. Estas consideraciones repercuten en la elección del tipo de perfil de acero para la construcción de ambas partes, y si bien existen varios tipos de perfiles, se decidió el uso de perfil normalizado tipo U (o también llamado C) sobre el perfil doble T. Esto se debe a que este perfil tiene una mayor sección en su parte cóncava para soldar las planchuelas, otorgando una mejor distribución de las tensiones y esfuerzos; como también provee el espacio suficiente para alojar la tuerca.

Las características de estos perfiles son mostradas a continuación:

## CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES U NORMALES

J = Momento de inercia  
 W = Módulo resistente  
 F = Sección  
 i = Radio de giro



PN	b mm	d mm	t mm	F cm <sup>2</sup>	Peso kg/m	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	J <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	i <sub>x</sub> cm	J <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	i <sub>y</sub> cm	e cm
5	38	5	7	7.12	5.6	10.6	26.4	1.92	9.12	1.13	1.37
6½	42	5.5	7.5	9.03	7.10	1.77	57.5	2.52	14.1	1.25	1.42
8	45	6	8	11.0	8.64	2.65	106	3.10	19.4	1.33	1.45
10	50	6	8.5	13.5	10.6	41.2	206	3.91	29.3	1.47	1.55
12	55	7	9	17.0	13.40	60.7	364	4.62	43.2	1.59	1.60
14	60	7	10	20.4	16.0	86.4	605	5.45	62.7	1.75	1.75
16	65	7.5	10.5	24.0	18.8	116	925	6.21	85.3	1.89	1.84
18	70	8	11	28.0	22.0	150	1350	6.95	114	2.02	1.92
20	75	8.5	11.5	32.2	25.3	191	1910	7.7	148	2.14	2.01
22	80	9	12.5	37.4	29.4	245	2690	8.48	197	2.3	2.14
24	85	9.5	13	42.3	33.2	300	3600	9.22	248	2.42	2.23
26	90	10	14	48.3	37.9	371	4820	9.99	317	2.56	2.36
28	95	10	15	53.3	41.8	448	6280	10.9	399	2.74	2.53
30	100	10	16	58.8	46.2	535	8030	11.7	495	2.9	2.7

Las solicitaciones en ambas partes de la estructura son distintas. En la parte esbelta de los cilindros la carga de 3970N (405Kg) actúa sobre las planchuelas y cargan al perfil a la tracción en la carrera ascendente. En el pórtico, el sistema de sujeción de matriz produce una carga de 9800N (1000Kg) solicitando al primer perfil a la flexión y a los otros a la tracción. Como estas cargas son diferentes y evidentemente el pórtico se encuentra más solicitado, se decidió fabricarlo con un perfil del 12 y a la parte esbelta de los cilindros con un perfil del 8.

El diseño de la parte esbelta de los cilindros se muestra a continuación en la Figura N° 23, los perfiles están orientados con sus partes cóncava hacia adentro, donde se sueldan las planchuelas. El cilindro hidráulico apoya en la parte inferior de esta estructura, donde se realiza un corte en el perfil para poder tener acceso a las conexiones hidráulicas. Queda una distancia a definir según las dimensiones de los cilindros y sus vástagos.

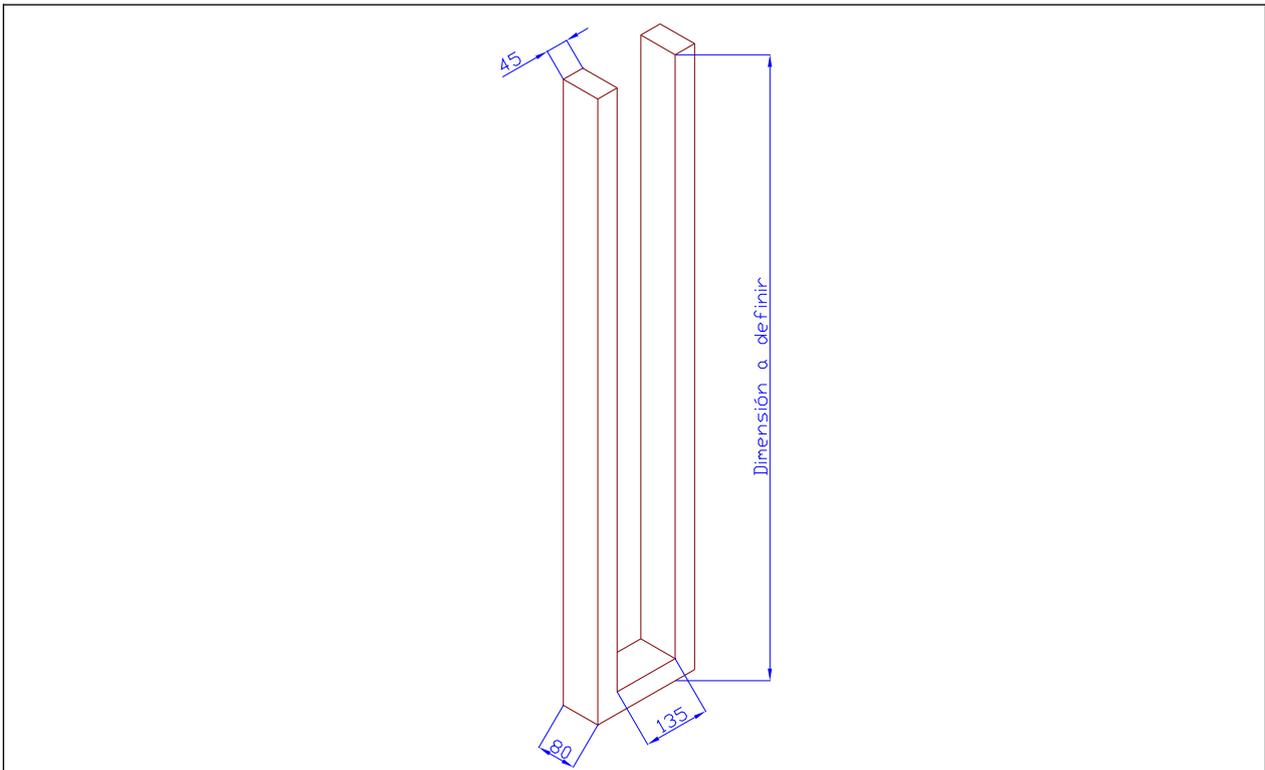


Figura N° 23: Estructura que contiene a los cilindros (mm).

La carga generada en el momento de la inyección es de 3970N (405Kg), y se distribuye en partes iguales sobre cada perfil, es decir que cada uno soporta 1985N (202,5Kg), y la sección del perfil según la tabla es de 11cm<sup>2</sup>, por lo que **la sollicitación es de 1,8MPa (18,5Kg/cm<sup>2</sup>)**, lo cual verifica ampliamente la tensión de fluencia del acero **SAE 1010 de 180MPa (1850 Kg/cm<sup>2</sup>)** [11].

El diseño del pórtico y el porta matriz se realizan con un perfil U normalizado del 12, y sus dimensiones ya fueron definidas anteriormente, por lo que solo queda pendiente la verificación de las sollicitaciones. Para realizar la verificación se descompuso a la pieza en prismas para facilitar su cálculo.

De todos estos elementos, el más sollicitado es el que tiene una longitud de 475mm donde se encuentran ancladas las tuercas. Este elemento esta sometido a la flexión por la fuerza de 9800N (1000Kg) que ejercen los mismos,

Para el cálculo de la sollicitación debida a la flexión en el elemento de 475mm, se lo considera empotrado en sus dos extremos y las reacciones en los mismos se asumen puntuales en el medio de la longitud de contacto entre este elemento y el siguiente, la carga  $P = 9800\text{N}$  (1000Kg) actúa a 100mm sobre la base porta matriz, como se muestra en Figura N° 24.

Bajo estas consideraciones se pueden determinar las distancias necesarias para el cálculo de las solicitaciones. Asumiendo a este elemento como una viga empotrada, solicitada a la flexión, con una distancia efectiva de 387,5mm y la carga aplicada a 160mm de un extremo. De esta forma, la sumatoria de fuerzas y momentos sobre este elemento deben ser nulas.

$$\Sigma_{Fuerzas} = 0 \quad \text{y} \quad \Sigma_{momentos} = 0$$

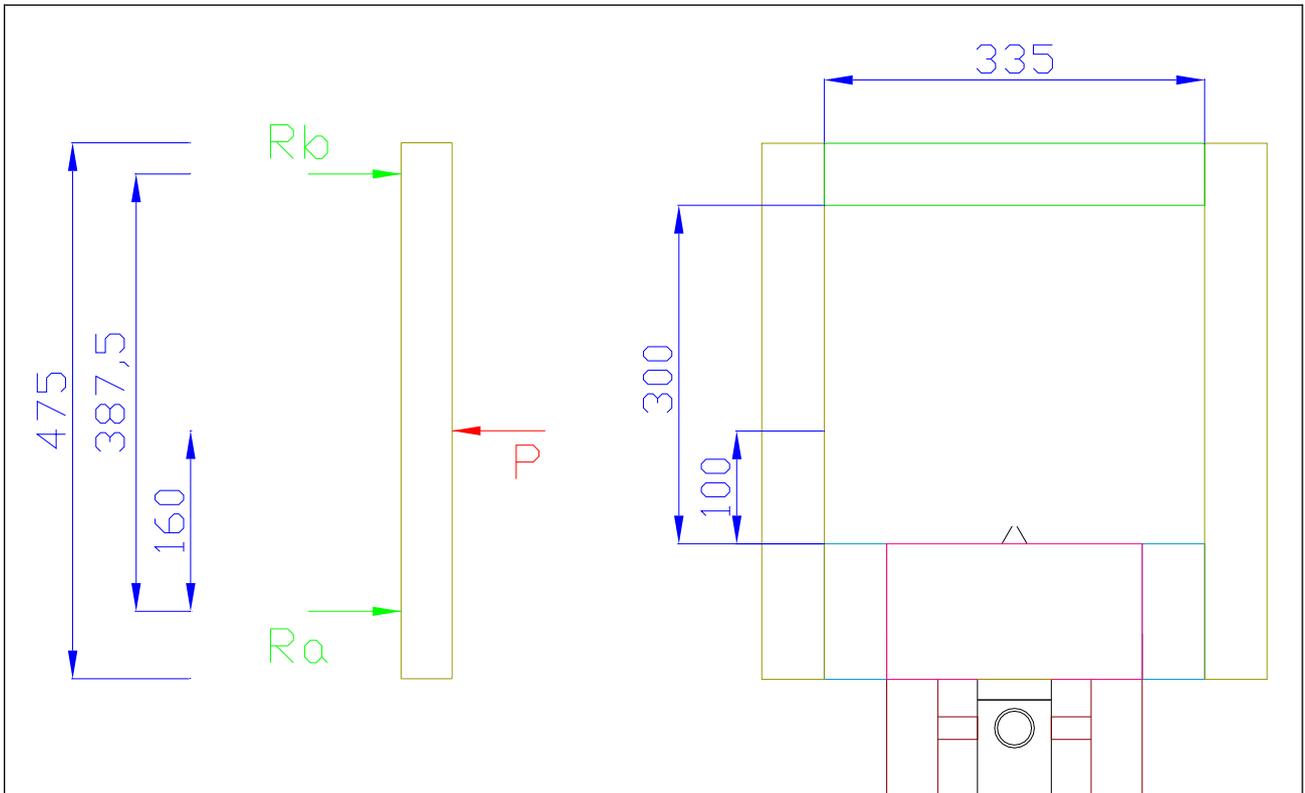


Figura N° 24: Carga y reacciones del elemento mm.

La sumatoria de fuerzas es:

$$R_a + R_b = P$$

Y la sumatoria de momentos respecto al punto de Ra:

$$P \cdot 160\text{mm} - R_b \cdot 387,5\text{mm} = 0$$

$$R_b = \frac{160}{387,5} \cdot P = 413\text{Kg} = 14570\text{N}$$

$$R_a = P - R_b = 1000\text{Kg} - 413\text{Kg} = 587\text{Kg} = 20700\text{N}$$

Estas son las reacciones en los vínculos de la viga. El máximo momento flector se encuentra en donde se aplica la carga de 9800N (1000Kg), y su valor es de:

$$M_{\max} = R_a \cdot 16\text{cm} = R_b \cdot 22,75\text{cm} = 9392\text{Kg.cm} = 3310\text{N.m}$$

Con este valor de máximo momento flector y los parámetros del perfil normalizado del 12 obtenidos de la tabla, se puede calcular la máxima tensión que solicita al perfil:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot Y_{\max}}{I_{yy}} = 847.9\text{Kg/cm}^2 = 83\text{MPa}$$

Donde:

- $Y_{\max}$  es la máxima distancia de la sección del perfil a la línea neutra;  $5,5\text{cm} - 1,6\text{cm} = \mathbf{3,9\text{cm}}$  (según tabla).
- $I_{yy}$  es el momento de inercia respecto al eje y, en este caso =  $\mathbf{43,2\text{cm}^4}$  (según tabla).
- $M_{\max}$  es el momento flector máximo al que se encuentra sometida la viga, cuyo valor es  $\mathbf{3310\text{N.m}}$  ( $\mathbf{9392\text{Kg.cm}}$ ).

Este valor de tensión máxima se encuentra en los puntos de los extremos del perfil y a la tracción (Figura N° 25).

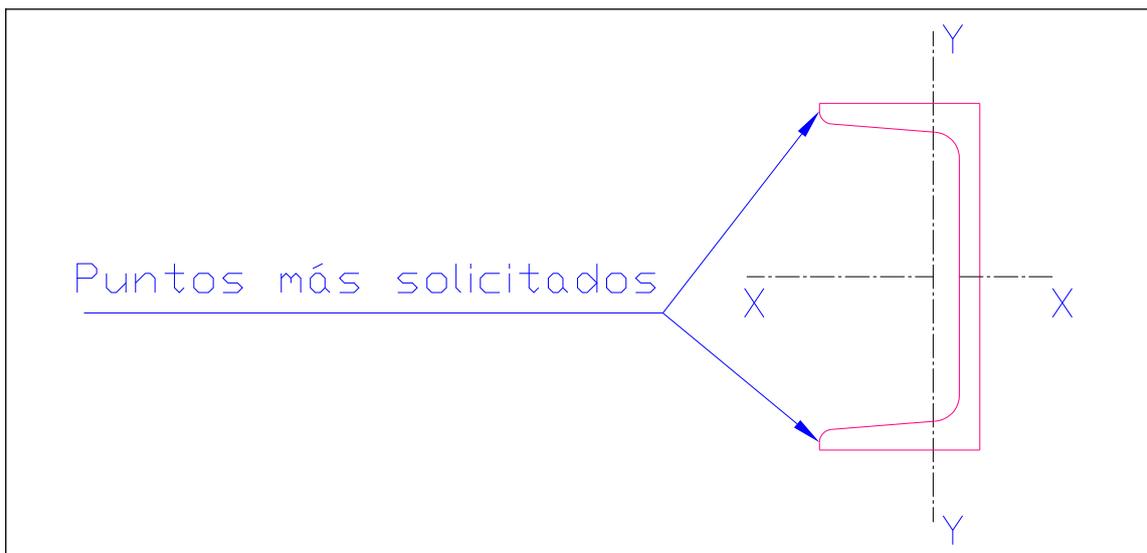


Figura N° 25: Solicitaciones máximas sobre el perfil.

El material del perfil es un acero SAE 1010 con una tensión de fluencia de 180MPa ( $1850\text{Kg/cm}^2$ ) [11], por lo que aplicando un factor de seguridad de 1,5 [15] la estructura verifica.

Paso siguiente es el cálculo de la flecha que la carga produce sobre este elemento, ya que de ser un desplazamiento importante, no se mantendrá el cierre de la matriz.

Si se considera al elemento como una viga como se muestra en la Figura N° 26, la ecuación que representa el desplazamiento en el eje y [10], considerando  $x = 0$  en el punto de reacción de  $R_a$ , está dada por:

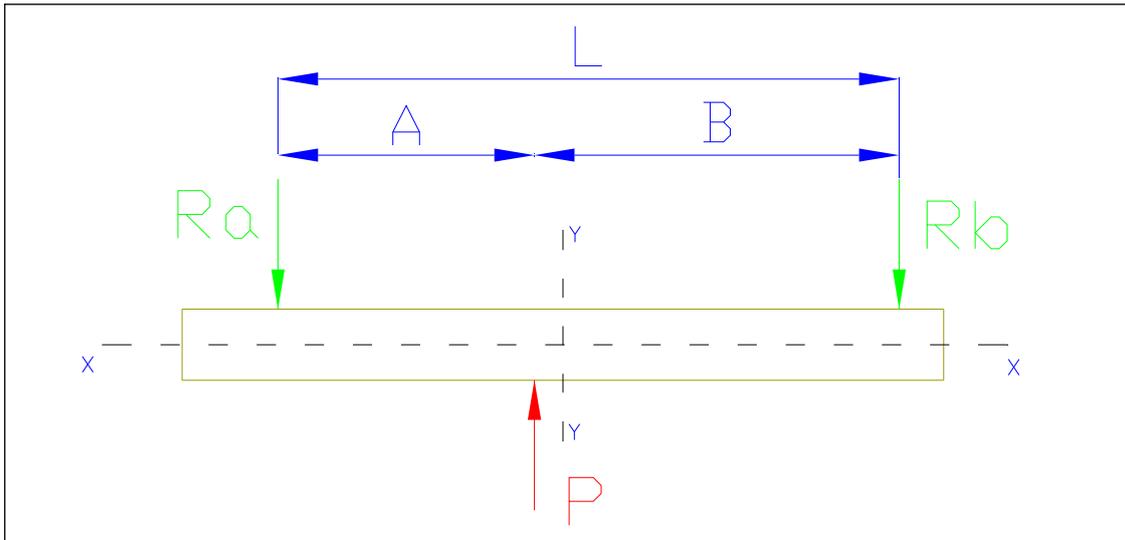


Figura N° 26: Flecha en la viga.

$$E.I.y = -\frac{P.B.x^3}{6.L} + \frac{P.B}{6.L} \cdot (L^2 - B^2) \cdot x \quad \text{Para } x \leq A$$

$$E.I.y = -\frac{P.B}{6.L} \cdot x^3 + \frac{P \cdot (x - A)^3}{6.L} - \frac{P.B}{6.L} \cdot (B^2 - L^2) \cdot x \quad \text{Para } A < x < A + B$$

Donde:

- A = 16cm
- B = 22,75cm
- L = A + B = 38,75cm
- I = Momento de inercia = 43,2cm<sup>4</sup>
- E = Módulo de elasticidad = 2,1.10<sup>6</sup>Kg/cm<sup>2</sup>

Si bien el desplazamiento máximo en el eje  $y$  no se encuentra en el lugar donde se aplica la carga, se desea calcular la deformación en ese lugar, ya que es donde se producirá el desplazamiento de los tornillos y por ende podría producirse la posible apertura de la matriz.

Utilizando la primera ecuación para  $x = A$ , que es el punto donde trabajan los tornillos:

$$y(A) = 0,0125cm = 0,125mm$$

Esto significa que en donde actúan cada uno de los tornillos, el perfil experimenta un desplazamiento de 0,125mm, esto es a cada lado de la matriz, por lo que el desplazamiento total es de 0,25mm para el tamaño máximo de matriz; por lo que con un arreglo geométrico conveniente se puede asegurar la estanqueidad.

## **4.9 Diseño de los sistemas auxiliares**

### **4.9.1 Descripción**

Los sistemas auxiliares son los que realizan una tarea que no influyen directamente sobre la inyección de cera, pero son necesarios para el funcionamiento del sistema inyector. Estos quedan acotados a los sistemas anteriormente descritos y son básicamente dos:

- La instalación que distribuye la energía eléctrica a los distintos componentes que lo requieran y las protecciones (tanto a componentes como a personas).
- El banco de trabajo donde se prepara la matriz a inyectar y posteriormente se realiza el desmolde, para la obtención de la pieza en cera.

Para el diseño de la instalación eléctrica se debe considerar el consumo del motor de la bomba hidráulica y las posibles resistencias del sistema calefactor que quedan a definir en la etapa de construcción. El banco de trabajo también queda acotado a las dimensiones finales de la estructura donde se montan los sistemas principales, como el bastidor que complementa el montaje.

Dada la dependencia de estos sistemas a los anteriores, su definición se realizará en la etapa de construcción.

## Capítulo 5

# Construcción

## **5.1 Construcción**

### **5.1.1 Consideraciones generales**

En este capítulo se trata la construcción de los distintos sistemas de la máquina inyectora anteriormente mencionados en la etapa de diseño.

Basándose en el diseño, la construcción se realizará con la posibilidad de realizar modificaciones en el mismo, considerando el factor económico, la disponibilidad; y el factor técnico debido a las modificaciones de un sistema que afecten al otro.

## **5.2 Construcción del sistema motor**

### **5.2.1 Hidráulica y Neumática**

En la etapa de diseño se indicó que esta parte de la inyectora será construida utilizando un sistema de transmisión de potencia mediante fluidos, ya que dada la naturaleza de los mismos, es la opción que mejor se ajusta a los requerimientos.

Existen dos opciones, la hidráulica y la neumática. Más allá de la diferencia técnica entre ambas, *dentro de la cual el sistema hidráulico aventaja significativamente al neumático*, el factor económico es preponderante, por lo que se realizaron consultas de presupuestos de ambos sistemas, teniendo en cuenta que:

- Si se adquiere un sistema neumático, la Facultad cuenta con un compresor de gran capacidad, por lo que la parte más costosa del equipo neumático ya estaría cubierta, pero el equipo sólo podría operar en lugares donde haya una línea de aire a presión.
- Si se adquiere un equipo hidráulico, habría que comprar la totalidad de los componentes, aunque la operación del sistema sólo se requiere alimentación eléctrica para el motor.
- Los actuadores de ambos equipos deberán tener la misma carrera, de 250mm, siendo el actuador neumático de mayor diámetro (10cm) y el hidráulico de 50,8mm (2”).
- Los presupuestos de ambos sistemas deben incluir los componentes para el control del caudal y de la presión.

Bajo estas consideraciones se solicitaron los presupuestos a proveedores locales de equipos neumáticos e hidráulicos, que se muestran a continuación:

Presupuestos para sistemas neumáticos:

<b>Empresa</b>	<b>Precios unit. s/iva</b>	<b>Precio Final</b>
----------------	----------------------------	---------------------

<b>Camozzi</b>		
Pistón 100x250 mm 10Bar	528,03	638,92
2 Reguladores de Caudal 3/8 a 10mm	49,38	119,50
Electroválvula centro cerrado	394,85	477,77
2 Solenoides	63,12	152,75
Ficha elec.	11,60	14,04
Regulador de Presión + Filtro	118,00	142,78
<b>Equipo completo (nuevo)</b>		<b>1545,75</b>

<b>Festo</b>		
Pistón 100x250 mm 10Bar	775,66	938,55
Electro-válvula centro cerrado	466,90	564,95
Placa base Normalizada	57,24	69,26
2 Bobinas CC	41,50	100,43
Filtro y regulador de presión	109,86	132,93
Escuadra de fijación	8,40	10,16
2 Reducciones	14,54	35,19
2 Reguladores de caudal	44,48	107,64
7 Racor Rápido	7,60	64,37
2 Silenciadores	10,61	25,68
5 Tubo plástico \$/m	4,56	27,59
<b>Equipo completo (nuevo)</b>		<b>2076,75</b>

<b>Hidráulica y Neumática S.R.L.</b>		
<i>Equipo neumático</i>		
Electro-válvula 3pos. Centro cerrad. 1/4" BSP	275,20	332,99
Reguladora de caudal 1/4" BSP	42,92	51,93
Conjunto FRL (filtro-Regulador-lubricador)	226,56	274,14
Cilindro 100mm x 250 mm vástago 1"	780,00	943,80
vástago 1" x 600 mm cromado - extremos roscados 3/4"	430,00	520,30
<b>Equipo completo (nuevo)</b>		<b>2123,16</b>

Presupuestos para sistemas hidráulicos:

Empresa	Precios unit. s/iva	Precio Final
---------	---------------------	--------------

<b>Hidráulica MDP El Gaucho</b>		
Central hidráulica 20 ltrs/min + reg. De presión + cilindro 2" x 25cm carrera	4300,00	5203,00
Válvula reg. De caudal	430,00	520,30
<b>Equipo completo (nuevo)</b>		<b>5723,30</b>
Central semi-nueva (electro-válvula y pistón nuevos)	3500,00	4235,00
<b>Equipo completo (usado)</b>		<b>4235,00</b>

<b>Andere Equipos Hidráulicos</b>		
Central con: motor 1/2 HP, 7,5 ltrs/min, tanque 2 ltrs, reg de presión y electro-válvula de 3 pos.		2600,00
Pistón 2" x 250 mm vástago 1"	225,00	272,25
Reguladora de caudal c/retorno		135,00
<b>Equipo completo (nuevo)</b>		<b>3007,25</b>

<b>Servicios Integrales Hidráulicos</b>		
Central: Depos. 20ltrs, bomba 8 ltrs/min, rotor a paletas, válv reg caudal c/retorno, comando manual c/reg presión, motor, manómetro, filtro y aceite	2780,75	3364,71
Pistón 2" x 250mm vástago 1"	369,80	447,46
2 Mangueras 3/8"x 1 mt c/terminales alta pres.	64,13	155,19
Mano de obra	600,00	726,00
<b>Equipo completo (nuevo)</b>		<b>4693,36</b>
Central: Depos. 30ltrs, bomba 24 ltrs/min, rotor a paletas, válvula reg caudal c/retorno y reg. presión, motor, manómetro, filtro y aceite	800,00	968,00
Comando manual c/valv reg presión	389,00	470,69
Pistón 2" x 2500mm vástago 1"	369,80	447,46
2 Mangueras 3/8"x 1 mt c/terminales alta pres.	64,13	155,19
Mano de obra	240,00	290,40
<b>Equipo completo (usado)</b>		<b>2331,74</b>

<b>Hidráulica y Neumática S.R.L.</b>		
<b>Equipo hidráulico</b>		
Electro-válvula 3pos. Centro cerrad. -cetop 3 - 24V	345,70	418,30
Reguladora de caudal en placa	412,56	499,20
Placa de montaje cetop 3	99,58	120,49
Reguladora de presión en placa	349,31	422,67
Central hidráulica mini 220 V (dólares a \$ 3,10)	975,00	3657,23
Cilindro 250 mm vástago 20 mm - ext. Roscados	675,00	816,75
<b>Equipo completo (nuevo)</b>		<b>5934,63</b>

<b>Hidráulica Lago</b>	
Bomba 8 litros/min	512,00
Motor eléctrico	200,00
Válvula reguladora de caudal	357,00
Adaptar bomba a depósito	300,00
Cilindro 2" x 250mm doble efecto	195,00
Depósito 10 litros	150,00
Válvula Reguladora de presión + Manómetro	458,00
Comando nuevo Manual	458,00
<b>Equipo completo</b>	<b>2630,00</b>

Como se muestra, la diferencia de precios entre los equipos neumáticos y alguno de los equipos hidráulicos no era significativa teniendo en cuenta la diferencia de prestaciones entre ambos sistemas.

Dado el valor del presupuesto, los componentes incluidos en éste y los antecedentes de la realización satisfactoria de un trabajo reciente, se decidió adjudicar el sistema presupuestado por **Hidráulica Lago**.

### 5.2.2 Equipo hidráulico adquirido

El equipo hidráulico consta de 5 componentes fundamentales:

- Actuador de doble efecto
- Conjunto Bomba-motor-depósito
- Válvula reguladora de presión
- Válvula reguladora de caudal con retorno a tanque
- Comando de manual de 3 posiciones y 4 vías

El actuador de doble efecto tiene 50,8mm (2") de diámetro interior por 250 mm de carrera, de la firma Alberto G. Moro S.R.L (Figura N° 27).



Figura N° 27: Cilindro hidráulico.

*El conjunto bomba-motor-depósito* es el que provee de presión hidráulica al sistema. El mismo consta de un motor eléctrico monofásico de  $\frac{3}{4}$  HP, 1400 RPM, 6 Amp, 220 VAC. El motor eléctrico se encuentra sujeto al exterior de depósito y su eje ingresa al interior del mismo, vinculándose al eje de la bomba hidráulica. La bomba hidráulica es a engranajes, marca Ventura, con un caudal máximo de 8 litros por minuto. Esta se encuentra en el interior del depósito sumergida en aceite hidráulico. El depósito tiene dos conexiones, una es para la línea de presión, y la otra es la de retorno al tanque (Figura N° 28).



Figura N° 28: Conjunto bomba-motor-depósito.

La potencia suministrada a la bomba está dada por un motor eléctrico monofásico sin control de velocidad de giro, por lo que el caudal proporcionado por la bomba se considera constante y el mismo es regulado por otro componente. El caudal máximo de la bomba es de 8 litros por minuto ( $133,3 \text{ cm}^3/\text{seg}$ ), y permite realizar la carrera del pistón completa en 3,75 seg.

Para las regulaciones de la presión y en caudal se adquirieron dos válvulas, ambas de la firma nacional Venturi (Figuras N° 29 y 30).

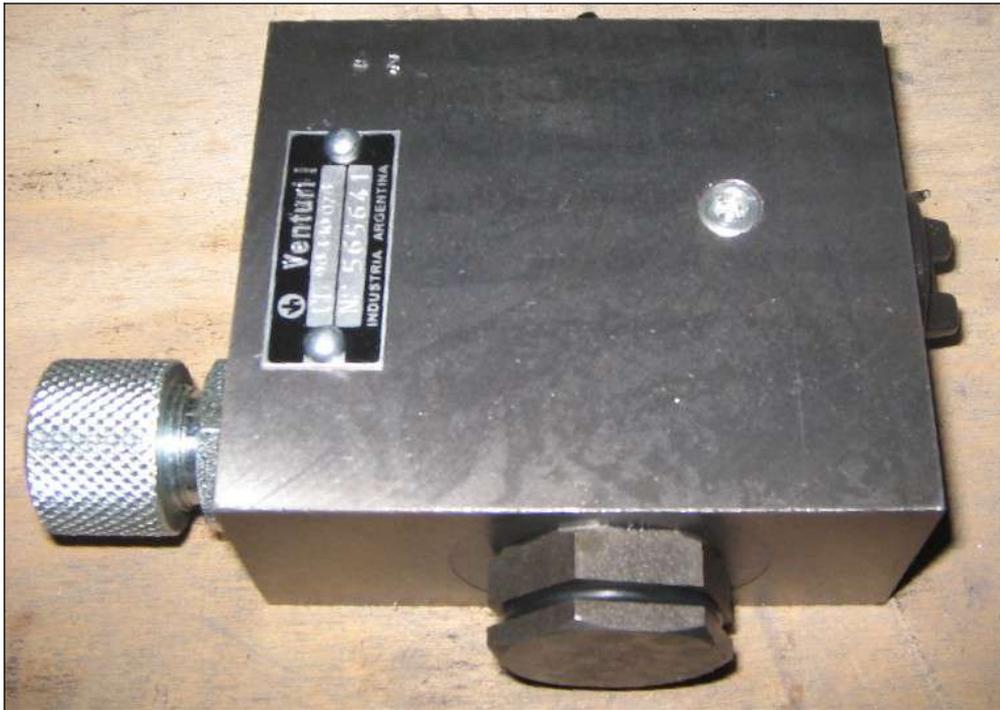


Figura N° 29: Válvula reguladora de Presión adquirida.

Cabe destacar que la válvula reguladora de caudal es con retorno a tanque, que aventaja significativamente a las que funcionan por restricción de paso, ya que estas producen una caída de presión.



Figura N° 30: Válvula reguladora de Caudal adquirida.

Por último encontramos el comando de 3 posiciones y 4 vías, también de la firma Venturi (Figura N° 31).



Figura N° 31: Comando Hidráulico.

Luego se adquirieron las conexiones y acoples hidráulicos para vincular los distintos componentes, quedando compuesto el circuito hidráulico en su totalidad, como se muestra en Figura N° 32:

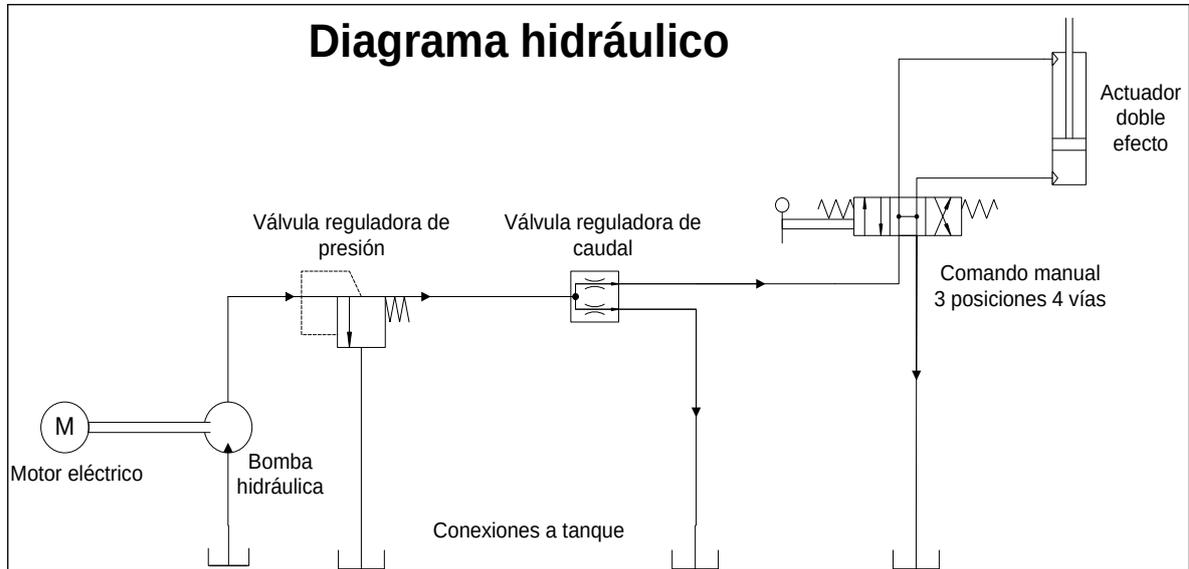


Figura N° 32: Diagrama hidráulico del equipo construido

## 5.3 Construcción del sistema Inyector

### 5.3.1 Cilindro inyector. Materiales

Las opciones para la construcción del cilindro inyector fueron tratadas en la etapa de diseño. La decisión final se tomara luego de un análisis económico y de disponibilidad de materiales.

Las opciones constructivas son:

- Un tubo sin costura de un material resistente a la corrosión.
- Un tratamiento anti-corrosión a un tubo sin costura de acero al carbono
- Sellar las zonas comprometidas de un tubo sin costura de acero al carbono.

El tubo sin costura de *material resistente a la corrosión* es la opción técnicamente superior. El material de construcción debe permitir su unión por soldadura. El acero inoxidable AISI 316 L presenta las características deseadas, ya que no pierde sus propiedades anti-corrosivas luego de la soldadura por su bajo contenido de carbono (menos del 0,03 %), evitando la formación de carburos de cromo. Dicha formación de carburos reduciría la concentración de cromo en el cordón de soldadura, disminuyendo la resistencia a la corrosión en esa zona [11 y 16]. El precio del tubo de este material fue consultado a la firma FESCAP S.A. Un tubo sin costura de 50,8mm (2") de diámetro y espesor 5,5mm fue cotizado a razón de \$ 650/metro. Para el cilindro inyector son necesarios 30cm, por lo que el costo es de \$195, sin contar con los procesos su terminación (rectificado y bruñido).

Otra opción para la fabricación del cilindro inyector es aplicarle un *tratamiento anti-corrosión* a un tubo de acero al carbono. Este tratamiento debería aplicarse en el interior del mismo ya que es la zona a proteger, previa realización del rectificado y bruñido, ya que si se realizan posteriormente el tratamiento deja de ser efectivo. Se consultaron dos presupuestos, uno a la firma Espinoza Cigüeñas, cuyo precio fue de \$600 + IVA, y el otro a Tecno-Pesca con un precio de \$ 500. Ambos precios no contemplan el costo del tubo sin costura de acero al carbono ni los procesos previos de rectificado y bruñido. Dado el costo del tratamiento como su falta de resistencia frente a procesos posteriores, esta opción fue descartada.

La última opción es evitar el contacto del aire con el interior del cilindro. De esta forma se evita el recambio de aire que aporta humedad ambiente que favorece la oxidación del acero. El cilindro tiene dos zonas, una que estará en contacto con la cera, comprendida entre el pico y el pistón, y otra entre el pistón y la parte posterior, por donde ingresa el vástago, que sería la zona a aislar (Figura N° 33).

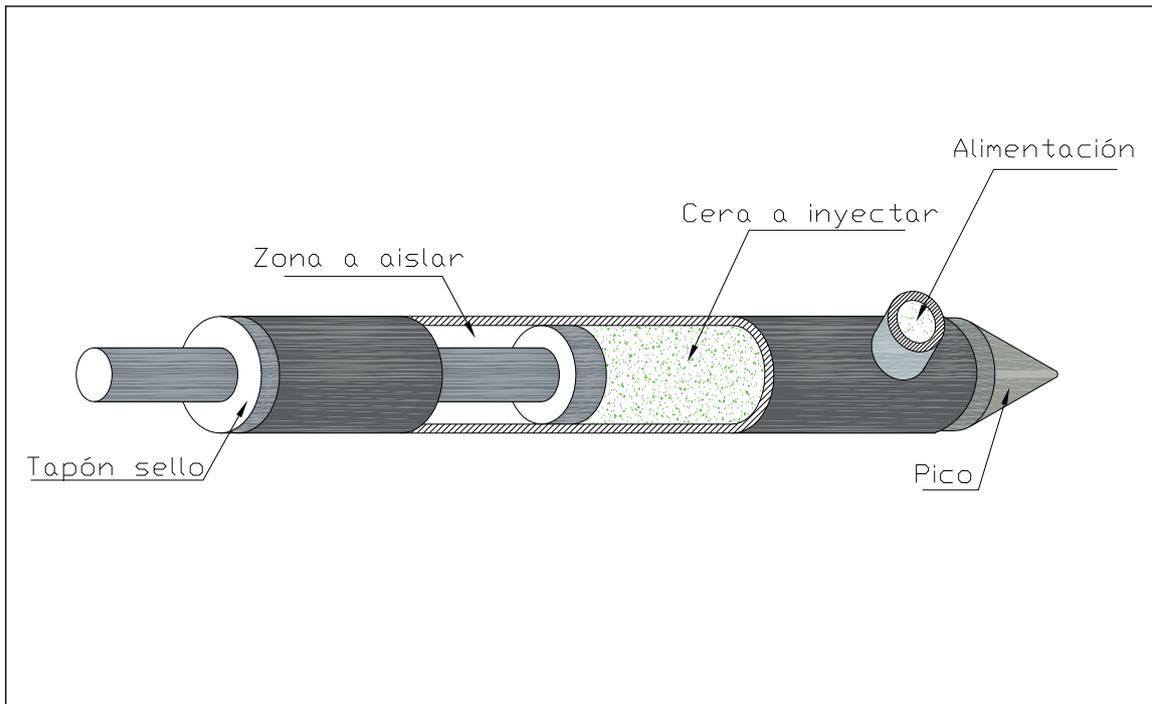


Figura N° 33: Cilindro aislado.

Para esta última opción pueden utilizarse dos tipos de tubos: el tubo sin costura común o el tubo sin costura rectificad y bruñido para cilindros hidráulicos. Los Precios consultados fueron, para el tubo sin costura sin procesos previos de 50,8mm (2") espesor de 5,5mm, \$100/metro en Wolodarsky S.A. Para los tubos sin costura rectificad y bruñidos de 2", espesor de 5,5mm \$ 230 + IVA/metro en Hidráulica Lago y \$ 305/metro en Hidráulica Andere. Para 30cm de longitud necesarios, los precios serían de \$ 30 sin rectificar y bruñir; \$ 83,5 en Hidráulica Lago y \$ 91,5 en hidráulica Andere con los procesos realizados.

Sin embargo, a esta altura del análisis se decidió evaluar la posibilidad de adaptar un cilindro hidráulico para ser utilizado como cilindro inyector. El cilindro hidráulico está diseñado para presiones de 19,6MPa (200 Kg/cm<sup>2</sup>), por lo que la presión de inyección es soportada por amplio margen. También admite soldaduras, ya que en su fabricación la tapa del extremo fijo es soldada. Los cilindros hidráulicos de simple efecto tienen un extremo sin sellar, pero los de doble efecto tienen ambos extremos sellados por estar sometidos a presión de ambos lados. En consecuencia, la utilización de un cilindro de doble efecto resolvería el problema de la corrosión. Adicionalmente, el cilindro hidráulico está preparado para operar a 50°C, temperatura cercana a la que operará la cera. De adquirir un juego completo también se obtendrían el vástago y el pistón, por lo que se resolvería gran parte de la construcción. Sólo queda el factor económico, por lo que se consultó en hidráulica Lago por un cilindro hidráulico nuevo de doble efecto 50,8mm (2") Ø x 300 mm de carrera, cuyo precio es de \$ 257. Este costo es muy alto, sin contar que sólo se lo utilizaría al 10% de su capacidad y se le harían numerosas modificaciones, por lo que se consultó por un cilindro hidráulico usado de iguales características. Se presupuestó uno en \$ 120.

Teniendo en cuenta los costos, como las simplificaciones que resultan de su implementación, se adquirió el cilindro hidráulico de doble efecto de 50,8mm (2") x 300 mm de carrera en Hidráulica Lago con un costo de \$ 120 (Figura N° 34).

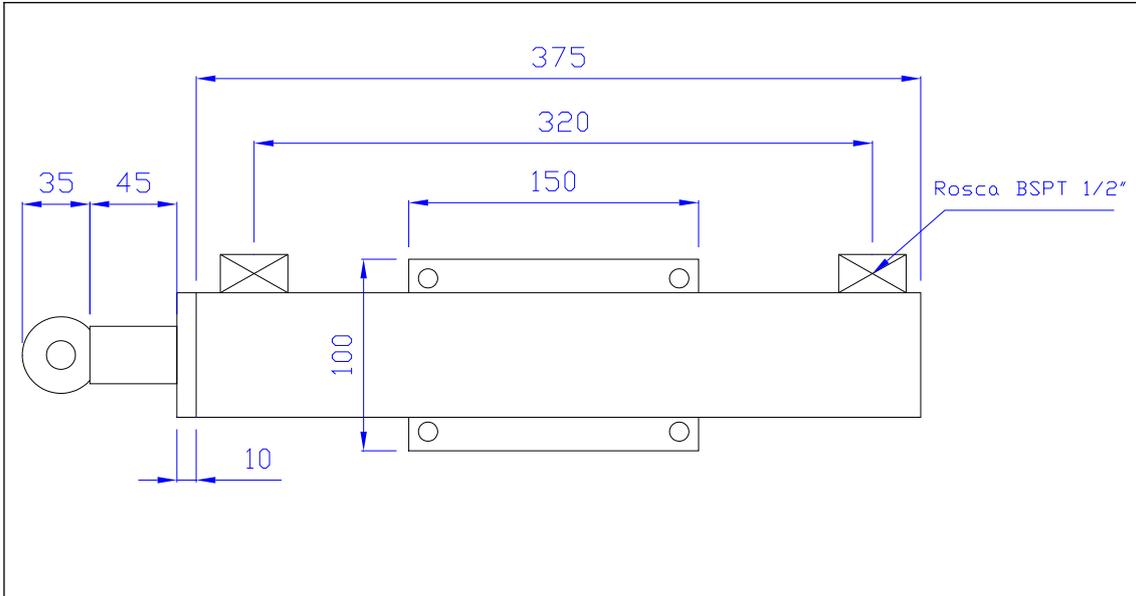


Figura N° 34: Dimensiones del cilindro inyector (mm).

Si bien en el exterior del cilindro se encuentra corrosión (Figura N° 35), el interior del mismo se encontraba en condiciones de uso, al igual que su vástago y pistón. Al exterior del cilindro se le realizó un arenado para efectuar los trabajos posteriores.



Figura N° 35: Cilindro hidráulico adquirido.

El cilindro adquirido también cuenta con el vástago, el pistón y el tapón roscado que se muestran en la Figura N° 36.



Figura N° 36: Juego de vástago, pistón y tapón roscado.

### 5.3.2 Adaptaciones

El cilindro adquirido tenía una planchuela de 150mm x 100mm que fue retirada ya que impedía el acople del sistema calefactor. También se retiró la sección anular del extremo del vástago y los niples de las conexiones hidráulicas, quedando descubiertas las roscas hembras tipo BSPT de  $\frac{1}{2}$ ". Dichas conexiones se utilizarán de la siguiente manera: la conexión del extremo sellado será el acceso para el sistema de alimentación, mientras que la conexión del extremo por donde ingresa el tapón roscado se bloqueará con un tapón ciego. La cavidad formada en el interior del cilindro entre este tapón ciego, el pistón y el tapón roscado del vástago, cumplirá la función de cámara de expansión y quedará sellada, evitando el problema de corrosión.

En el extremo que se encuentra sellado se deben alojar los sensores, sujetar el elemento de retención y posteriormente el pico inyector; por lo que se le realizó una adaptación de un suplemento, que consta de un perfil circular de acero SAE 1010 con un diámetro de 63,5mm ( $2\frac{1}{2}$ " ), el cual se perforó, se le realizó la rosca necesaria y luego se soldó al extremo sellado del cilindro, previamente perforado. El suplemento es de 40mm de longitud y se le realizó una rosca tipo BSPT de  $1\frac{1}{4}$ " , de la cual sólo se utilizarán 15mm para roscar el elemento del sistema de retención (Figura N° 37). El resto de la longitud será utilizada para alojar los sensores de presión y temperatura.

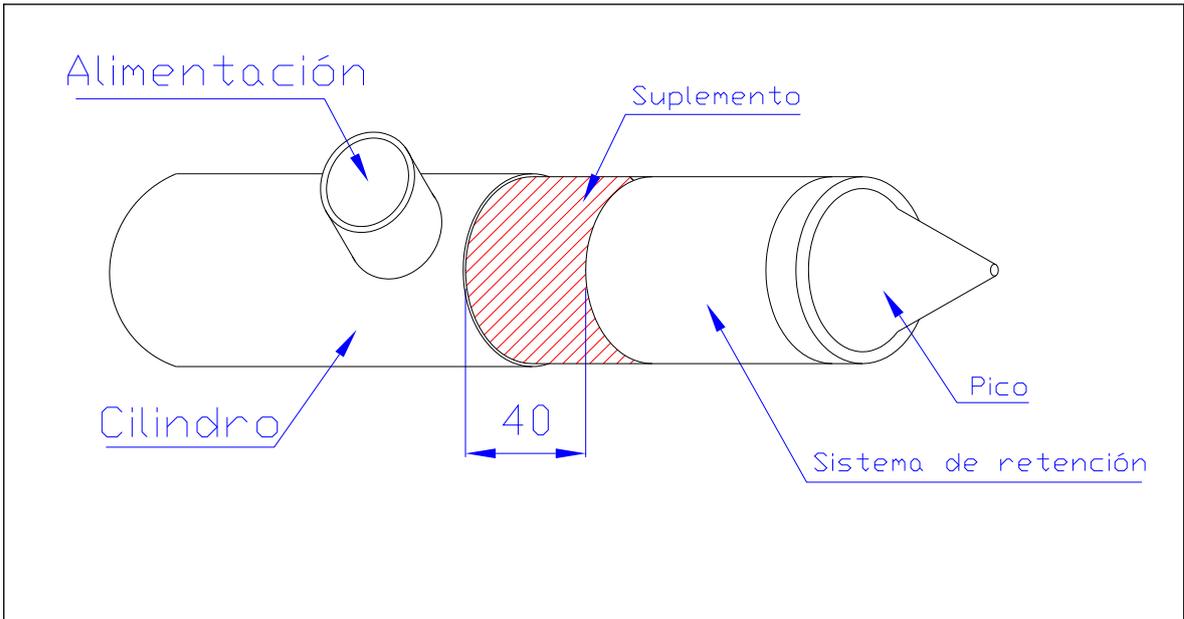


Figura N° 37: Adaptaciones del cilindro inyector. El suplemento soldado se encuentra resaltado en rojo (mm).

### 5.3.3 Pico Inyector

Ciertas dimensiones de pico inyector habían sido fijadas, por lo que se completan las restantes para que se ajusten a las dimensiones del cilindro y faciliten su fabricación (Figura N° 38).

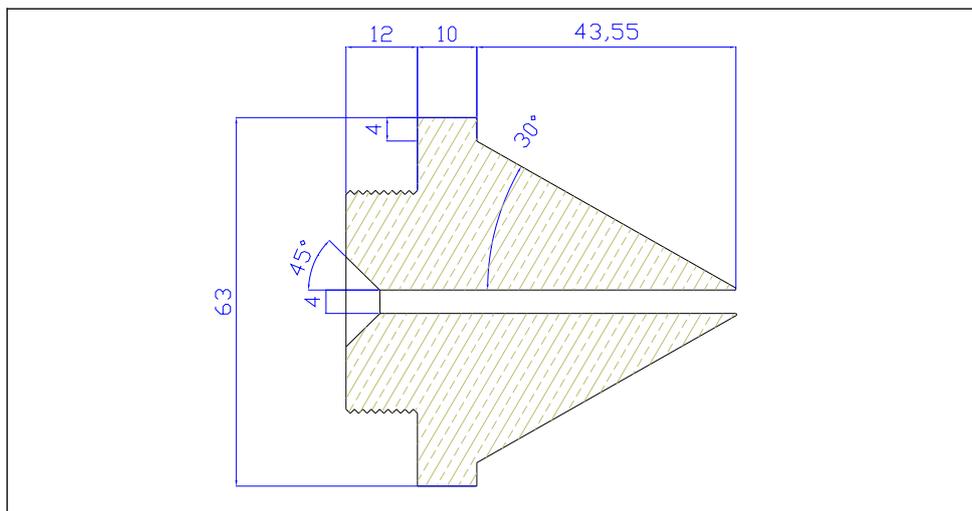


Figura N° 38: Dimensiones del pico inyector (mm).

El pico inyector se construyó el bronce SAE 40 a partir de un perfil circular de 63,5mm (2 ½”).

Se le realizó una rosca BSPT 1 ¼” para fijarla al elemento del sistema de retención (Figura N° 39).



Figura N° 39: Pico inyector fabricado.

#### 5.3.4 Sujeción del cilindro

La sujeción de cilindro se realizará en la parte inferior del mismo, soldándole dos planchuelas de acero SAE 1010, de 1cm de espesor. En la parte superior solamente se guiará con planchuelas soldadas a la estructura. Las planchuelas de la parte inferior se soldaron 1cm por encima de la conexión hidráulica para evitar que el calor afecte a la rosca donde ajusta el tapón roscado del vástago (Figura N° 39). Las planchuelas guía se soldarán a la estructura exactamente a los costados de la conexión hidráulica que funciona como acceso de la alimentación.

Dado que la fuerza ejercida por la presión del interior del cilindro actúa sobre éste en dirección ascendente, la planchuela del cilindro se posicionará por debajo de la soldada a la estructura, de manera que la mayor carga sea soportada por ambas planchuelas en contacto, a través de un esfuerzo de corte. Los tornillos que las vinculan sólo estarán sometidos a la tracción en la carrera descendente del pistón. Los tornillos deben ser de diámetro ligeramente menor al del hueco de las planchuelas debido a la dilatación térmica que afectará al cilindro. El esfuerzo sobre el tornillo es mínimo, debido a que las depresiones que se generan en la alimentación del cilindro inyector son menores a la atmosférica.

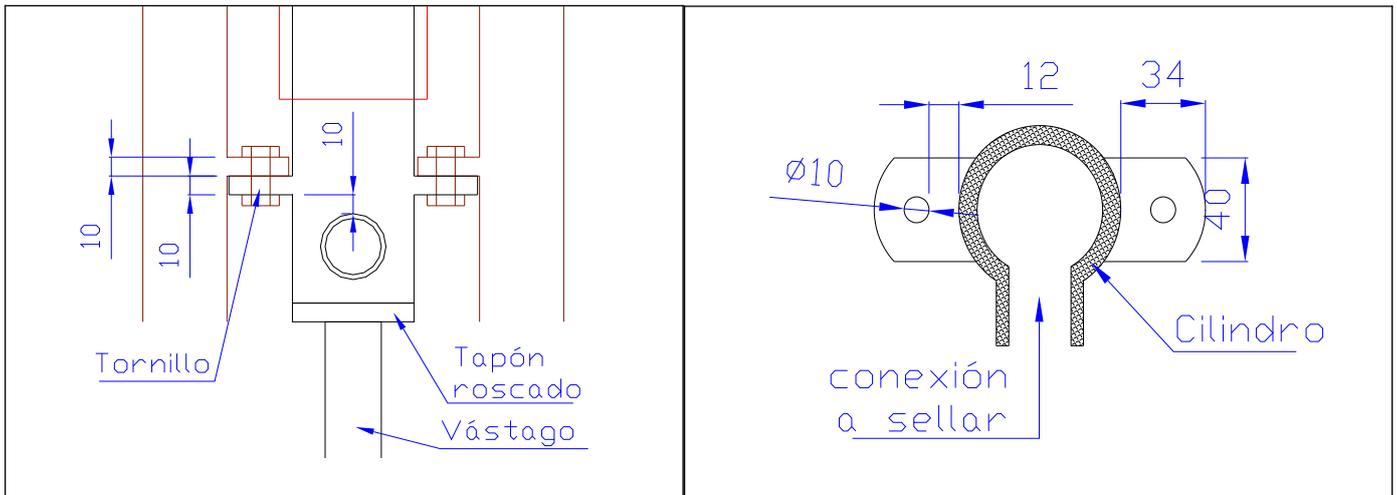


Figura N° 40: Detalles de las sujeciones del cilindro (mm).

El área soldada de cada planchuela es de  $4,25\text{cm}^2$ , y la carga de  $3970\text{N}$  ( $405\text{Kg}$ ), que se reparte en las dos planchuelas por igual (Figura N° 40), por lo que el esfuerzo al corte es de:

$$\tau = \frac{202,5\text{Kg}}{4,25\text{cm}^2} = 47,65 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 4,6\text{MPa}$$

Este valor es pequeño en relación al admisible del material (SAE 1010) de alrededor de  $88\text{MPa}$  ( $900\text{Kg/cm}^2$ ) para los esfuerzos de corte, aún considerando que este esfuerzo se realiza en una zona de soldadura.

Finalmente se muestra el conjunto cilindro-válvula-pico terminado (Figura N° 41).



Figura N° 41: Conjunto terminado.

## **5.4 Construcción del sistema de Alimentación**

### **5.4.1 Diseño Previo**

En la etapa de diseño se definieron una serie de características de este sistema entre las cuales podemos mencionar:

- El volumen es de 2000cc.
- Forma cilíndrica para facilitar la entrega de calor en forma uniforme.
- La parte inferior cónica para facilitar el flujo por el conducto.
- El flujo de cera es por medio de gravedad.

Bajo estas consideraciones, se decide reducir las pérdidas de calor al mínimo, reduciendo la longitud del conducto que une el recipiente con el cilindro, y evitando la necesidad de calefaccionar el mismo. Para cumplir con esta condición, el recipiente debe encontrarse lo más próximo al cilindro inyector. Sin embargo, las posiciones del recipiente y el conducto están acotadas entre el acceso de alimentación del cilindro inyector y la base porta matriz. Esto se debe a que se desea que la parte superior del recipiente quede por debajo de la línea donde se dispondrá la matriz, para no entorpecer la operación con la misma. La separación horizontal del recipiente se puede regular posteriormente, con la elección de diferentes piezas de tubería, considerando que se desea acortar la longitud del conducto. Como para el dimensionado del recipiente se debe conocer esta longitud, se define que el *elemento de retención* deberá tener una longitud de **60mm** y la altura de pico libre de **15mm** (Figura N° 42).

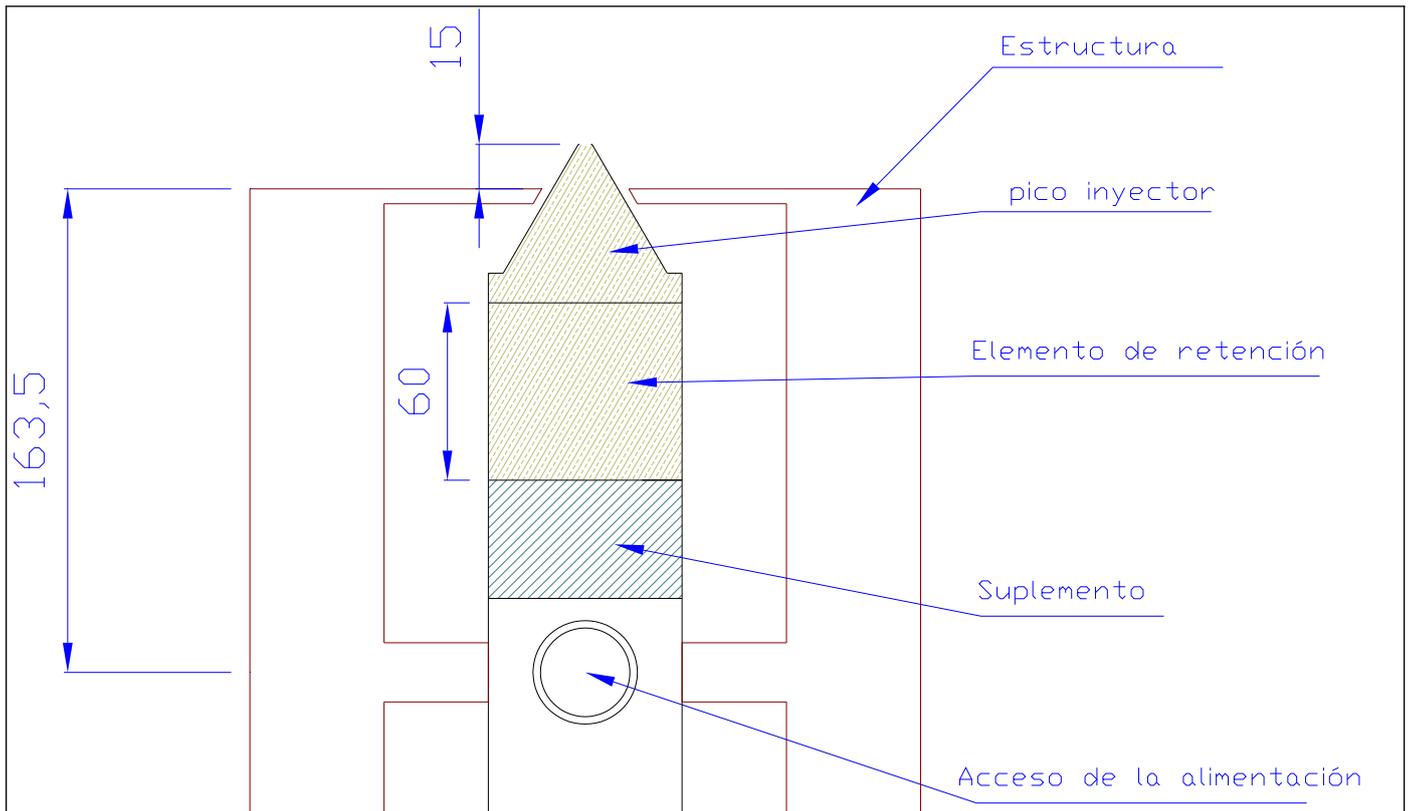


Figura N° 42: Longitud donde debe ser alojado el recipiente (mm).

Con esta longitud definida, queda acotada la altura del recipiente, por lo que éste deberá tener un diámetro mínimo de 150mm para poder generar el volumen mínimo de 2000cc. Las medidas comercialmente disponibles de tubo con costura de acero SAE 1010 superiores a 150mm sin generar un recipiente excesivamente ancho son 168mm, 194mm de diámetro exterior, con un espesor de 3,2mm (1/8"). Los presupuestos provistos por Wolodarsky S.A. fueron de \$ 173/metro para el de 194mm y \$ 157/metro para el de 168mm de diámetro.

Se decidió fabricar el recipiente con el tubo de 168mm de diámetro externo, de una altura de 100mm para la parte cilíndrica y 18mm para la parte cónica. La parte cónica se fabricó a partir de una chapa de acero SAE 1010 de forma circular de 174mm de diámetro y 3,2mm de espesor, a la que se le seccionó un ángulo de 15°, se la plegó y soldó, generando un cono de 22,5mm de altura y 168mm de base para poder soldarlo al tubo de mismo diámetro. En el centro del cono se realizó una perforación de 25mm de diámetro y se le soldó un codo de rosca 1/2" BSPT (Figura N° 43 y 44), donde se acoplarán el conducto y el elemento de retención que posteriormente se conectan al acceso de alimentación del cilindro inyector.

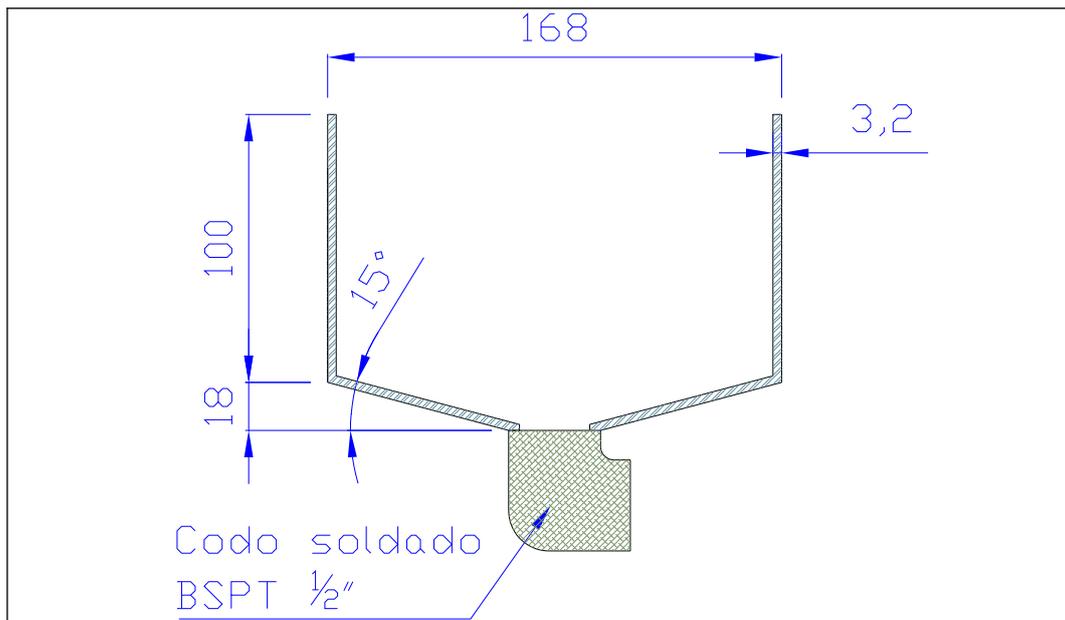


Figura N° 43: Medidas finales (mm).



Figura N° 44: Recipiente fabricado.

Por último, para el conducto que comunica el recipiente y el cilindro inyector se utilizaron piezas de plomería standard, considerando que en dicho conducto se aloja el elemento de retención correspondiente y debe poseer un fácil armado y desarmado. Para esto se utilizó una unión doble de  $\frac{1}{2}$ " BSPT, elemento que se utiliza cuando se tienen que vincular dos elementos roscados que no pueden girar. Esta unión doble se utiliza junto al elemento de retención y facilita el armado y desarmado de todo el conjunto (Figura N° 45).

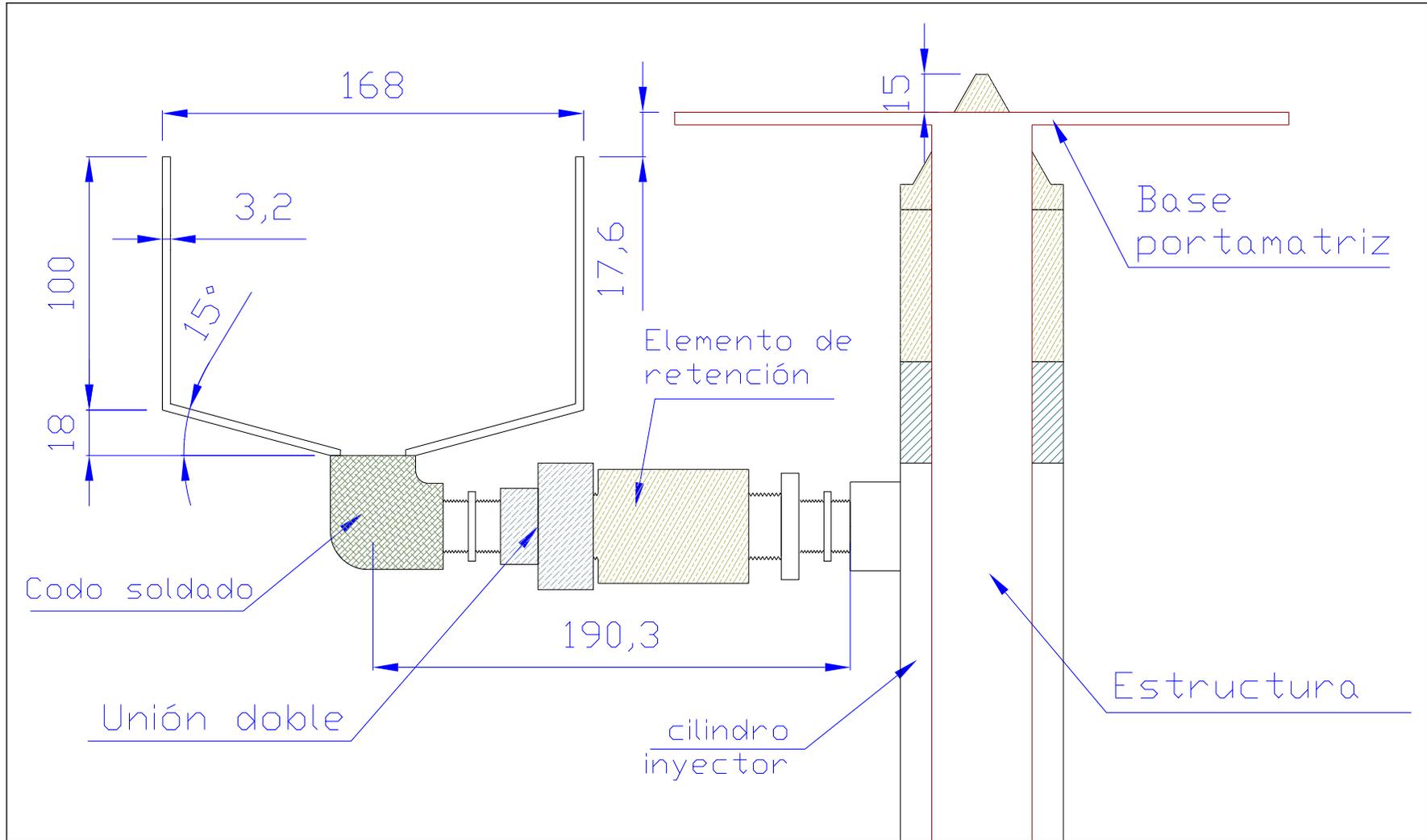


Figura N° 45: Esquema completo del sistema de alimentación y sus dimensiones en mm

## 5.5 Construcción del sistema de Retención

### 5.5.1 Búsqueda y Elección

Anteriormente se determinó que las válvulas para realizar las retenciones serán las denominadas a bola; y su adquisición se realizará en base a la disponibilidad y precios. Los presupuestos consultados mostraron que no hay gran disponibilidad, los precios son elevados y para conseguir las válvulas con las dimensiones adecuadas, deberían ser encargadas a proveedores no locales. El representante local de la firma Verion S.A., presupuestó una válvula de retención a bola para uso oleohidráulico en \$ 54 dólares estadounidenses.

Por este motivo, se consultó la viabilidad de la construcción de un prediseño al personal de los talleres de la Facultad de Ingeniería y posteriormente se decidió realizar la fabricación de las válvulas en el mismo. De esta manera las válvulas se podrán adaptar fácilmente al resto de los sistemas con las características deseadas.

Para evitar futuros problemas de corrosión se decidió la construcción de ambas válvulas en bronce SAE 40. De los diseños de sistemas anteriores hay algunos parámetros de las válvulas que ya están fijados. La válvula que se encuentra entre el cilindro inyector y el pico se fija con roscas BSPT 1 1/4" y el cuerpo tiene una longitud de 60mm. La válvula que se encuentra entre el recipiente de alimentación y el acceso al cilindro inyector se fijará directamente a la unión doble para acortar la distancia del conducto, por lo que se le debe realizar el asiento y la rosca de la misma.

El prediseño de la válvula que se encuentra junto al pico se muestra en la figura Figura N° 46.

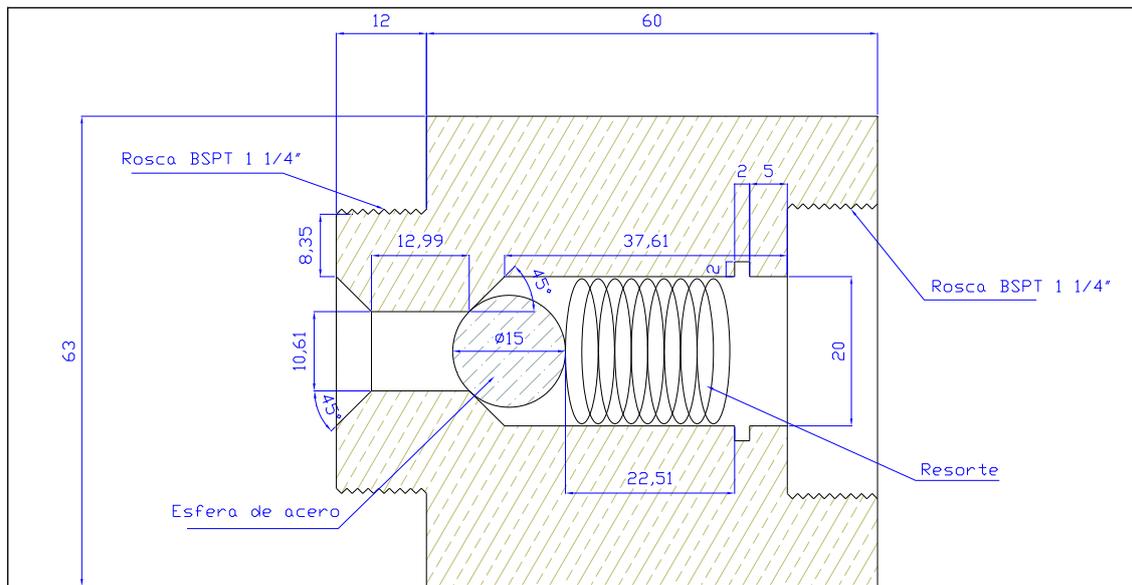


Figura N° 46: Prediseño de la primera válvula y sus elementos (mm).

Para el dimensionado de la válvula se tomaron en cuenta las medidas comerciales, por lo que para la fabricación se partió de un perfil circular macizo de 2 ½" (63,5mm) diámetro, y una esfera de acero para rodamientos de 15mm de diámetro. Se decidió el diseño del asiento cónico en lugar de asiento plano, ya que el mismo guía a la esfera y provee mejor cierre. Se eligió que la esfera asiente sobre el punto de intersección entre el hueco y el cono, de esta forma se provee un mejor cierre [PW3]. El resorte será comprimido y retenido por un seguro Seguer que se aloja en la ranura posterior. El diámetro del conducto donde se aloja la esfera es de 20mm para que cuando la válvula se encuentre abierta la sección transversal sea mayor a la del pico, ya que se desea que el área del pico sea la menor (cuello de botella) en la inyección, el pico tiene un diámetro de 4mm.

$$\frac{[(20mm)^2 - (15mm)^2] \cdot \pi}{4} = 137,45mm^2 > \frac{(4mm)^2 \cdot \pi}{4} = 12,56mm^2$$

Ahora se tienen que verificar las solicitaciones donde se producen los puntos de sujeción de la válvula y en la ranura donde se ajusta el seguro Seguer.

El bronce SAE 40 (C83600) para la construcción de ambas válvulas tiene una tensión de rotura  $\sigma_{rot} = 255MPa$  (2600Kg/cm<sup>2</sup>) y una tensión de fluencia  $\sigma_{flue} = 117MPa$  (1200 Kg/cm<sup>2</sup>) [16].

Como criterio de diseño se adopta que las tensiones debidas a las solicitaciones deben ser menores a la tensión de fluencia del material, afectado por un factor de seguridad de 2 [15], por lo que la tensión admisible es de  $\sigma_{adm} = 59MPa$  (600Kg/cm<sup>2</sup>), y para los esfuerzos de corte se adopta el criterio de Tresca, por lo que se considera máximo esfuerzo de corte la mitad de la tensión admisible  $\tau_{adm} = \sigma_{adm} / 2 = 29,5MPa$  (300Kg/cm<sup>2</sup>) [9].

Para los cálculos se considerará el peor de los casos posibles que es si la válvula por algún motivo no abre (solicitaciones sobre las roscas) o si el resorte es muy rígido y no cede ante la presión máxima de inyección (solicitud sobre la ranura).

Dado que la distribución de la carga en los filetes no se produce en forma pareja, de hecho los primeros dos filetes soportan la mayor parte de la carga, la cantidad de filetes que deben soportar estos esfuerzos deben ser menores o iguales a dos filetes para que no se produzca la fluencia de los mismos [10].

El diámetro del núcleo de esta rosca es de 3,9cm, que es donde actúa la presión de 1,96MPa (20Kg/cm<sup>2</sup>), por la que la fuerza es de 2340N (238,9Kg). Se considera que los filetes se cargan al corte en la raíz, por lo que la condición para que verifiquen es:

$$\tau_{adm} > \frac{W}{\pi \cdot D_{raíz} \cdot p \cdot n}$$

Donde:

W = Carga.

$D_{raiz}$  = Diámetro de raíz

p = Paso de la rosca

n = Numero de filetes en contacto.

La rosca BSPT 1 ¼" tiene 11 filetes por pulgada, por lo que el paso es de  $p = 0,23\text{cm}$ .

Igualando la inecuación y operando con la misma, se despeja el número de filetes en contacto para producir el esfuerzo de corte admisible.

$$n = \frac{W}{\pi \cdot D_{raiz} \cdot p \cdot \tau_{adm}} = 0,25$$

Como se ve, la rosca precisa menos de dos filetes en contacto para producir el esfuerzo máximo, por lo que la rosca verifica ampliamente. Esta misma rosca es la que se encuentra en el extremo opuesto de la válvula donde se vincula el pico inyector, lugar donde el diámetro se reduce a 20mm, por lo que si por alguna circunstancia el pico inyector se bloquea, tanto la rosca del pico como la rosca de la válvula soportarán las solicitaciones.

El siguiente paso es la verificación de la ranura donde se aloja el seguro Seguer. Para esto se adoptan las consideraciones de cálculo de los filetes de tornillo de movimiento, pero para este caso se considera sólo un filete y de una prensa manual, o sea cuasi-estático [10]. Bajo estas consideraciones la ranura se verificará a la flexión, al aplastamiento y al corte. La carga que debe soportarse es de la presión de inyección por el área de conducto de 1,06cm de diámetro, que es de  $0,88\text{cm}^2$ , como resultado la carga es de  $W = 173\text{N}$  (17,65Kg).

### Flexión

Para este caso la ranura se supone como una viga solicitada por una carga repartida uniformemente. Muchos de los parámetros que definen a la ranura pueden utilizarse directamente para la suposición, pero para que ésta sea válida, se debe definir un ancho de la supuesta viga, que como muestra la figura del prediseño tiene 0,5cm y luego la continúa el espacio sin material para la rosca del pico, por lo que a modo conservador se toma un ancho de 0,2cm:

$$\sigma_{adm} > \sigma_b = \frac{3 \cdot W \cdot h}{\pi \cdot D_m \cdot b^2 \cdot n} = 38,3 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 3,75\text{MPa}$$

Donde:

$\sigma_b$  = Tensión por flexión

W = Carga = 173N (17,65Kg)

$D_m$  = Diámetro medio de la ranura = 2,2cm

b = Ancho de la ranura = 0,2cm

h = Altura de la ranura = 0,2cm

$n = \text{Número de filetes en contacto} = 1$

### *Aplastamiento*

Este es el esfuerzo generado por el aplastamiento entre la superficie del seguro Seguer y la ranura. La ecuación para el cálculo de la tensión es la siguiente:

$$\sigma_t > \sigma_b = \frac{W}{\pi \cdot D_m \cdot h \cdot n} = 12,77 \frac{Kg}{cm^2} = 1,25 MPa$$

Todos los parámetros ya fueron definidos, excepto la tensión  $\sigma_t$ , que es una tensión que se obtiene de una tabla de presiones de diseño por aplastamiento para tornillo de movimiento, para este caso tiene un rango de entre 16 y 23 MPa (170 y 240 Kg/cm<sup>2</sup>) [10].

### *Corte*

La ranura se encuentra sometida al corte transversal debido a la flexión. La ecuación que representa esta sollicitación es la siguiente:

$$\tau = \frac{3 \cdot W}{2 \cdot A}$$

donde A es la sección transversal.

Realizando las simplificaciones para este caso se obtiene:

$$\tau_{adm} > \tau_b = \frac{3 \cdot W}{2 \pi \cdot D_0 \cdot b \cdot n} = 17,55 \frac{Kg}{cm^2} = 1,72 MPa$$

Todos los parámetros ya fueron definidos, excepto  $D_0$  el diámetro de raíz de la ranura = 2,4cm.

Como se puede apreciar, el diseño de esta válvula verifica ampliamente todos los tipos de sollicitaciones mecánicas que se le presentan, por lo que se adquirió a Wolodarsky S.A. un perfil de bronce SAE 40 de 63,5mm (2 ½") Ø por 150mm de longitud por \$140 y con él se fabricaron el pico inyector y la válvula.

Para el diseño de la otra válvula se contaba en la Facultad con un perfil de bronce de 40mm de diámetro, por lo que el diseño se acotó a esta medida. El diseño se basa en la primera válvula, con la diferencia que esta segunda válvula opera con la presión en sentido contrario (Figura N° 47).

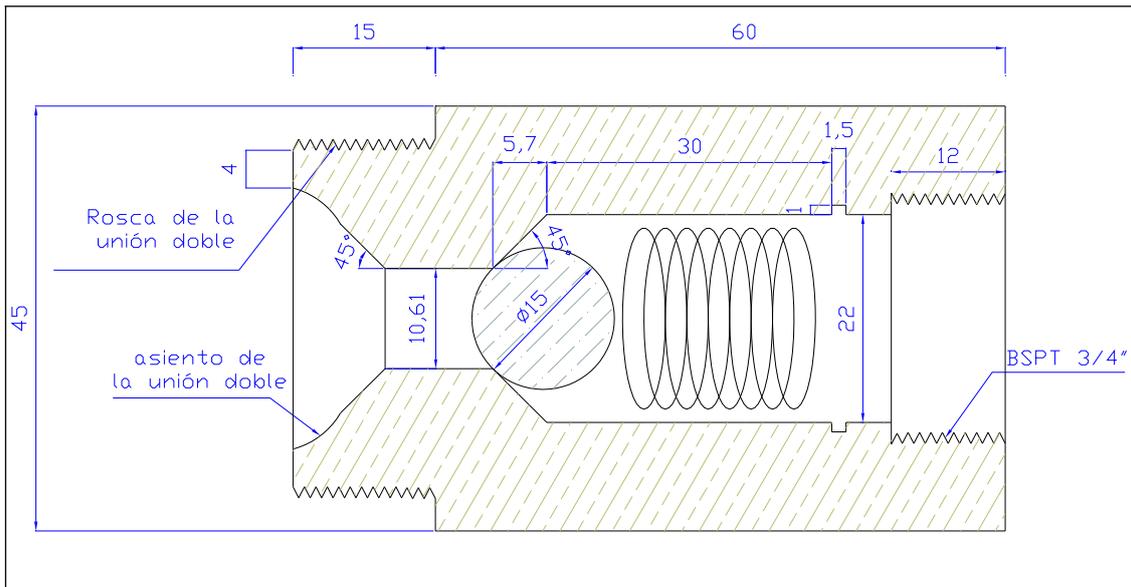


Figura N° 47: Prediseño de la segunda válvula. Dimensiones en mm.

Se le dio un diámetro ligeramente mayor (22mm) para facilitar el paso de cera ya que este paso se realiza con menor presión, razón por la cual también el resorte de retorno es poco rígido. Bajo esta consideración, no se realiza el cálculo tensional de la ranura ya que las presiones en las que trabaja la ranura son pequeñas, siendo la máxima de 1 atmósfera (1,033Kg/cm<sup>2</sup>). En cambio, se realiza la verificación de la rosca del lado derecho de la figura, que es la que se somete a la carga producida por la presión de inyección, sobre el área del conducto de 2,2cm de diámetro. Esta carga es de 745N (76Kg).

Se utiliza la ecuación para el cálculo en la primera válvula, con los cambios de los parámetros producidos por el cambio de rosca. La rosca BSPT 3/4" tiene 14 filetes por pulgada y un diámetro exterior de 26,44mm, que es el que debe utilizarse en esta rosca hembra.

$$n = \frac{W}{\pi \cdot D_{ext} \cdot p \cdot \tau_{adm}} = 0,03$$

Donde:

$W$  = Carga = 745N (76Kg)  
 $D_{ext}$  = Diámetro exterior = 2,65cm  
 $p$  = Paso de la rosca = 0,81cm  
 $n$  = Numero de filetes en contacto.

Como se puede apreciar, nuevamente la rosca verifica ampliamente la sollicitación. La rosca del otro extremo no se encuentra sollicitada, simplemente fija la válvula a la unión doble por lo que no requiere verificación.

A continuación se muestran las válvulas construidas junto con el pico inyector (Figura N° 48).



Figura N° 48: Válvulas construidas y pico inyector.

## **5.6 Construcción del sistema de Calefacción**

### **5.6.1 Elección**

En la etapa de diseño se mencionaron dos formas distintas de llevar a cabo la calefacción de la cera, mediante un sistema de intercambio de calor con fluidos; y con resistencias eléctricas en contacto directo con los recipientes, ambas formas tienen sus ventajas y desventajas que se consideran a la hora de realizar la elección a implementar.

El circuito de circulación de fluido puede implementarse utilizando un circuito cerrado de agua, mediante un termotanque y una serie con conexiones que lleven el agua caliente a un recipiente que contenga al elemento y que el agua tome contacto directo; o una serpentina que se encuentre alrededor del mismo. La serpentina provee un intercambio de calor ineficiente comparado con el recipiente; por lo que se analiza la implementación del mismo.

Los recipientes a implementar deben contener al cilindro inyector y a la tolva en la mayor superficie posible para facilitar el intercambio de calor; y a la vez deben otorgar estanqueidad y prevenir las posibles pérdidas. A la vez se deben considerar los posibles problemas de corrosión que genere al agua en contacto con el cilindro y la tolva.

Además, este sistema es mucho más voluminoso que el de resistencias y depende de la disponibilidad de gas (natural o envasado) para su funcionamiento, acotando el lugar de trabajo y complicando su posible traslado.

Por estos inconvenientes para llevar a cabo la implementación, se decide el uso de resistencias eléctricas en contacto directo, por ser un sistema más sencillo y compacto. La gran desventaja de este sistema es la inercia térmica, que lo hace más rápido en alcanzar el régimen, pero menos estable; por lo que buscan opciones para resolver este problema.

Existen dos opciones, que pueden ser utilizadas en conjunto, para una mejor performance:

- *Colocar un material que actúe de inercia térmica entre la resistencia eléctrica y la zona a calefaccionar*
- *El uso de un controlador PID*

El uso de un material intermedio provee un mayor tiempo de calentamiento, pero una variación de temperatura no tan abrupta, además de una distribución más pareja de calor.

El controlador PID es un sistema de control automático que se utiliza en un gran número de procesos de distinto tipo. El mismo se basa en la comparación del valor seteado y la magnitud censada a controlar. Esta diferencia se llama error, y luego el controlador realiza tres tipos de ajustes:

- Un ajuste proporcional al error (P)

- Un ajuste que considera los errores anteriores mediante una suma o promedio de los mismo, que es la constante integral del controlador (I)
- Un ajuste con considera la velocidad de cambio del error, que es la constante derivadora (D)

En los procesos térmicos, se censa la temperatura a controlar mediante el uso de termocuplas y realiza el control según los parámetros elegidos.

Dadas las dimensiones del cilindro inyector, se definen las zonas a calefaccionar en el mismo y el lugar a censar la temperatura. En total se calefaccionará 310mm del cilindro, dividido en dos partes, dejando lugar para la alimentación a 22mm por encima de la resistencia inferior; y la termocupla ubicada a 10mm por debajo de la resistencia superior, y se extiende hasta el centro del cilindro (Figura N° 49).

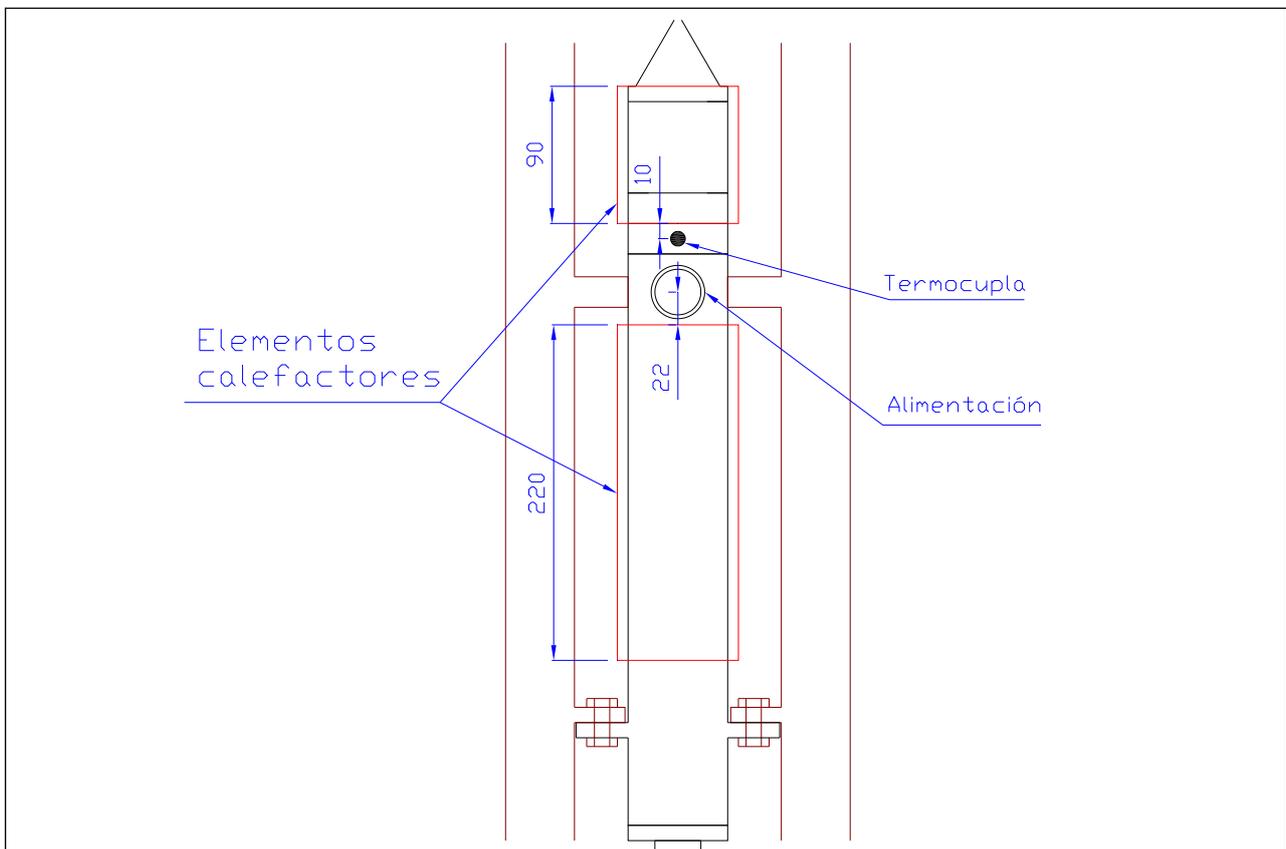


Figura N° 49: Ubicación de las resistencia calefactores (mm).

Estas dos resistencias tienen forma cilíndrica y se denominan sunchos calefactores, siendo las dimensiones de 63mm de  $\varnothing$  x 90mm y 65mm de  $\varnothing$  x 220mm.

La tolva también utiliza uno de estos sunchos con las dimensiones de la misma 168mm de  $\varnothing$  x 100mm.

## 5.6.2 Adquisición

Decidido el uso de resistencias eléctricas, se buscan proveedores de las mismas en la ciudad, encontrando la firma Resistencias Mar del Plata S.R.L; y representada por Casa Blanco S.A., la firma Scram S.R.L. de la ciudad de Rosario.

Por razones de disponibilidad, se adquirieron los sunchos calefactores a Resistencias Mar del Plata en \$ 653,40 (Figura N° 50).

- 63mm de Ø x 90mm
- 65mm de Ø x 220mm
- 168mm de Ø x 100mm



Figura N° 50: Sunchos calefactores adquiridos.

En cuanto al control, se adquirieron a la firma Casa Blanco S.A., un termostato para el control del suncho de la tolva, ya que no se requiere un control muy preciso en la misma. El control fino se realiza en el cilindro inyector; empleando un controlador PID marca Autonics, modelo TZN4S (Figura N° 51):

- Controlador PID Autonics, modelo TZN4S +/- 1°C      \$ 358
- Termostato mecánico +/- 4°C      \$ 45
- Termoresistencia PT100 vaina roscada      \$ 125



Figura N° 51: Termostato y controlador PID.

Las potencias que deben controlar ambos elementos, están dadas por los sunchos, los cuales entregan  $3W/cm^2$ , por los que:

*Controlador:*

$$(6,5cm \cdot 22cm + 6,3cm \cdot 9cm) \cdot 3W / cm^2 = 627cm^2 \cdot 3W / cm^2 = 1880W$$

*Termostato:*

$$(16,8cm \cdot 10cm) \cdot 3W / cm^2 = 527cm^2 \cdot 3W / cm^2 = 1580W$$

Como se puede apreciar, las potencias son mucho mayores a las requeridas de las calculadas en el capítulo de diseño, ya que para el cilindro inyector son necesarios 191,74W; y 364,4W para la tolva; que en ambos casos están contempladas las pérdidas, sin ningún tipo de aislación.

Ya que las resistencias trabajan a  $300^\circ C$  y es posible sobrepasar la temperatura de trabajo de la cera ( $120^\circ C$ ), mediante el seteo correcto del controlador PID se evita este inconveniente; y para la tolva, se censará la temperatura en los bordes de la misma (punto caliente).

Dadas las potencias que deben controlar, las salidas del controlador y del termostato se utilizarán en los contactos auxiliares de dos contactores que son los que suministrarán la potencia a cada juego de sunchos.

En cuanto al conducto entre la tolva y el cilindro inyector, la calefacción se realizará mediante conducción térmica de los distintos elementos hacia este conducto cuando se alcanza la temperatura de régimen, y de requerirlo se aislará para reducir la pérdida de calor.

Una vez realizadas las conexiones eléctricas, se realizarán pruebas para ajustar el sistema, y determinar si es necesario el uso un material intermedio que actúe como inercia térmica, como también si es necesario el uso de aislante térmico y en que zonas.

## **5.7 Construcción del sistema de sujeción de matriz**

### **5.7.1 Tornillo calculado**

En el capítulo de diseño se evaluaron las distintas opciones y se decidió que la sujeción de la matriz se realizará mediante el uso de tornillos de movimiento. Posteriormente se dimensionó; y se realizaron los cálculos para verificar la resistencia las solicitaciones, tanto para su núcleo como para la rosca.

Llegado el momento de su construcción, se consideraron otras opciones para la implementación de este sistema, por razones económicas debido al precio de los materiales, como por razones técnicas ya que su construcción se dificultaba.

### **5.7.2 Tornillo adquirido**

En base a este último análisis se consultaron precios de tornillo similares para ser utilizado en la sujeción de la matriz; y se decidió la compra de dos tornillos 25,4mm (1") alta resistencia Grado SAE 5 con una tensión de prueba de 585MPa [17]; junto con sus respectivas tuercas y una llave para realizar su ajuste.

Los precios de cada uno de los materiales se muestran a continuación:

- Tornillos 25,4mm (1") y tuercas \$ 61,25
- Llave tubo \$ 52,00

Los tornillos tienen una rosca en el extremo de 6cm, por lo que se prolongó la misma la longitud necesaria para poder ser roscados la longitud necesaria (Figura N° 52). En el extremo se le realizó una perforación para poder vincular la placa que ajusta la matriz.



Figura N° 52: Tornillo con su rosca prolongada.

Las tuercas se soldaron cada una a una chapa circular para se fijada al pórtico porta matriz (Figura N° 53). El ajuste de los tornillos se realizara con una llave tubo afín.



Figura N° 53: Tuerca fija a la estructura.

## 5.8 Construcción de la estructura

### 5.8.1 Estructura y montaje

La estructura es uno de los últimos elementos a construir, donde se montarán los sistemas principales. Pero esta estructura no alcanza para albergar todos los componentes, por lo que debe complementarse con otra estructura o bastidor, la cual no debe soportar grandes cargas, sino que solamente debe soportar el peso de los sistemas auxiliares (instalación eléctrica, banco de trabajo) y otorgarle estabilidad a la estructura principal. Esta estructura complementaria se define una vez terminada la estructura principal.

### 5.8.2 Dimensiones a definir

En la etapa de diseño, se definieron los materiales, perfiles y casi todas las dimensiones para la construcción de esta estructura principal, quedando pendiente la longitud de la zona esbelta, que dependen de las longitudes de los cilindros. Se define esta distancia en 1270mm, considerando la longitud de los cilindros, los vástagos y 35mm para el acople entre los mismos (Figura N° 54).

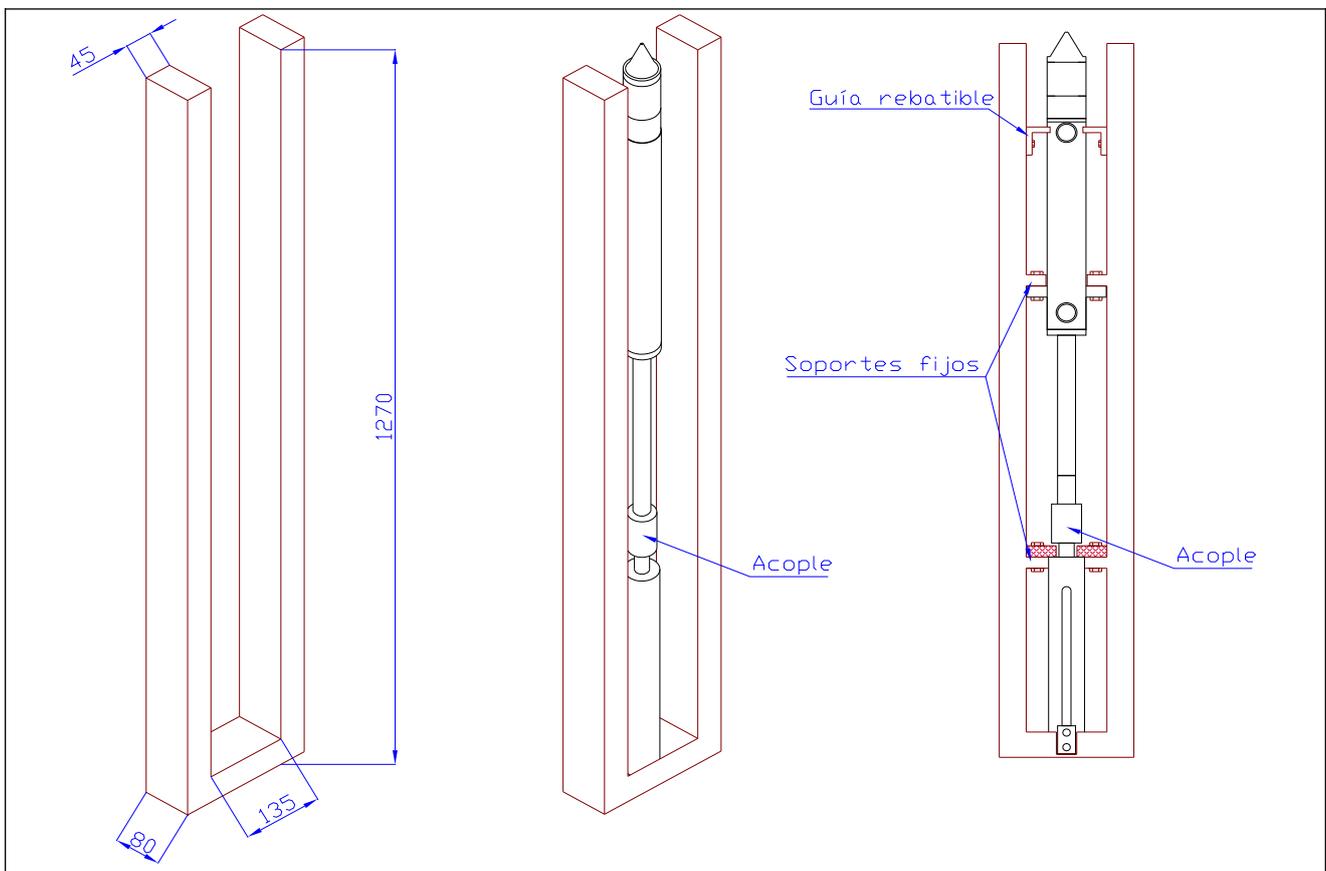


Figura N° 54: Estructura que contiene a los cilindros. Sus dimensiones en mm, vista en perspectiva y vista trasera con los cilindros y sus sujeciones.

La parte superior de la estructura (pórtico y porta matriz), ya tiene todas sus dimensiones definidas (Figura N° 55).

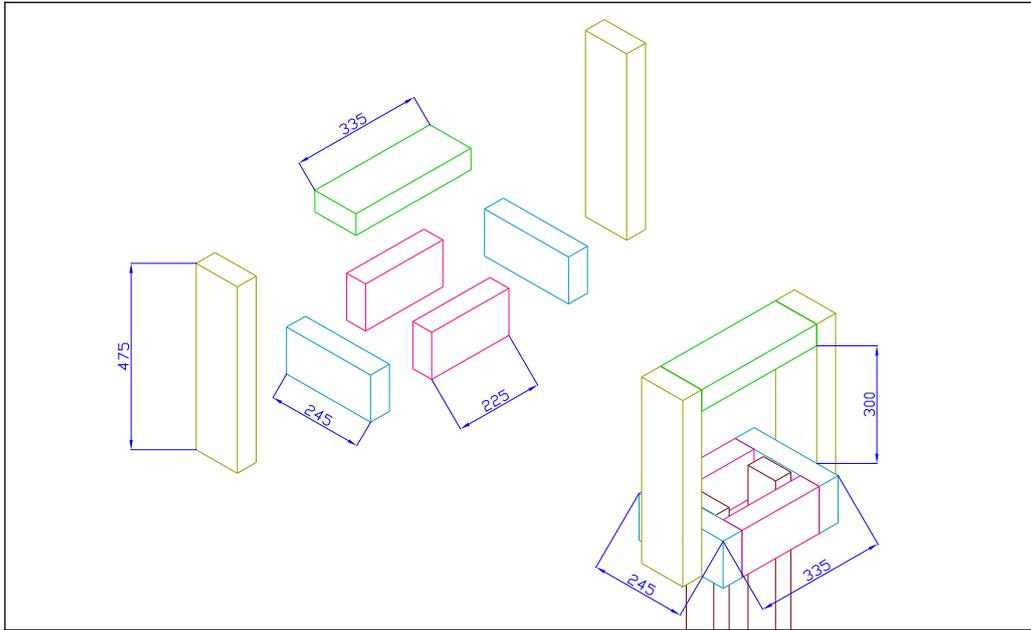


Figura N° 55: Pórtico y porta matriz en mm.

Con estas medidas y los perfiles seleccionados, se presupuestó la construcción de la estructura principal con los materiales en un monto de \$ 600. Posterior a su construcción, la estructura principal se instaló a un bastidor para poder montar los sistemas auxiliares (Figura N° 56).

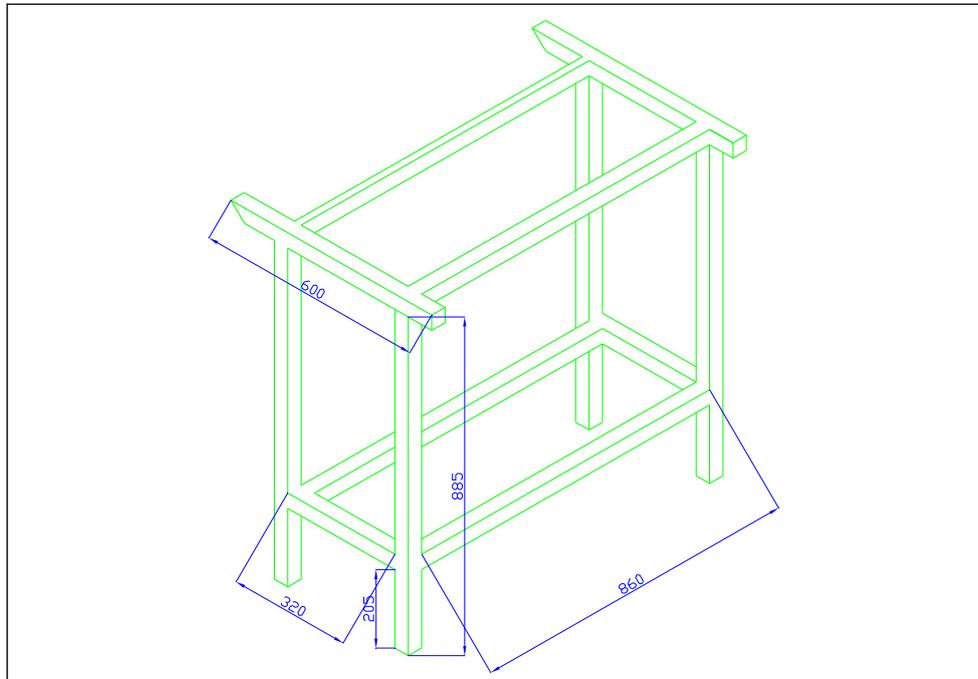


Figura N° 56: Perspectiva del bastidor, dimensiones en mm.



Figura N° 57: Estructura y bastidor.

## **5.9 Construcción de los sistemas auxiliares**

### **5.9.1 Realización**

Durante la etapa de diseño se mencionó los aspectos básicos de estos sistemas que asisten a los sistemas principales de inyección; donde encontramos dos:

- La instalación eléctrica
- El banco de trabajo

### **5.9.2 Instalación eléctrica**

Se inicia con la construcción de la instalación eléctrica, para lo cual se consideran los distintos elementos eléctricos que son alimentados. Los elementos significantes son las resistencias calefactoras y el motor eléctrico de la bomba hidráulica. El motor eléctrico posee una **corriente nominal de 6 A**; y las corrientes de las resistencias calefactores se pueden calcular por sus potencias:

*Controlador:*

$$I = P / V = 1880W / 220V = 8,54A$$

*Termostato:*

$$I = P / V = 1580W / 220V = 7,18A$$

La instalación de donde se toma tensión es trifásica; y posee un interruptor automático diferencial (disyuntor); por lo que no es necesario que se instale otro en la inyectora.

La suma de las corrientes es de 21,72A; por lo que para no desbalancear la red trifásica, la carga se reparte entre las tres fases; el motor en una (fase T), las resistencias del controlador en otra (fase R) y por último las resistencias del termostato en otra (fase S).

Para la protección por sobrecorrientes se utilizan un interruptor automático termomagnético unipolar de 10A marca SICA, por cada fase.

El manejo de la potencia se realiza a través de contactores, por lo que el controlador PID y el termostato se conectan a los contactos de las bobinas de los mismos; y para el encendido y apagado de cada uno de los elementos se utiliza una llave con una luz testigo, para no utilizar los interruptores automáticos en forma reiterada (Figura N° 58).

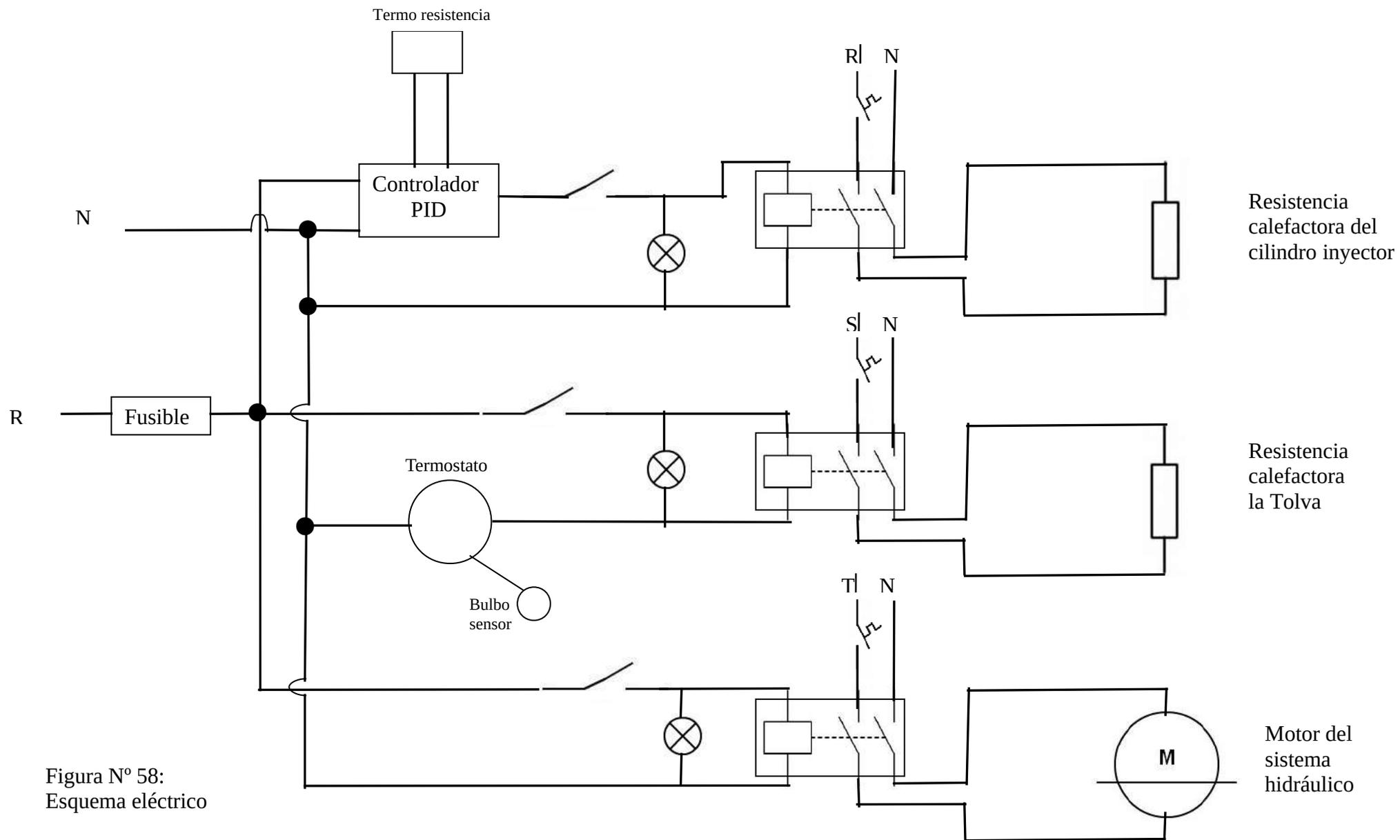


Figura N° 58:  
Esquema eléctrico

La alimentación general y control se instala en un tablero en la parte superior del bastidor (Figura N° 59); mientras que los contactores son instalados en un tablero que se encuentra sobre uno de los lados.



Figura N° 59: Tablero eléctrico con los controles.

### 5.9.3 Banco de trabajo

El banco de trabajo queda constituido por tres placas rebatibles de distintas formas para poder retirarlas fácilmente cuando se lo requiera. Las mismas se fabricaron en un material llamado Fibrofacil y fueron recubiertas con chapa galvanizada (Figura N° 60).



Figura N° 60: Banco de trabajo.

## **5.10 Tareas futuras**

Concluida la construcción de cada uno de los sistemas y sus respectivos montajes, la máquina inyectora de cera queda terminada, quedando pendientes detalles de pintura y conexión de sensores. Una vez concluidas estas tareas se realizará la puesta en marcha de la máquina inyectora y los ajustes finales (regulación del sistema calefactor y del sistema hidráulico). Estos ajustes servirán para alcanzar el mejor rendimiento de la máquina y finalmente generar el manual de operaciones de la misma.

## Capítulo: 6

# Conclusión

## 6.1 Conclusiones

### 6.1.1 Análisis económico

Durante el desarrollo de este proyecto, el aspecto económico tuvo gran importancia en la toma de decisiones; tanto para el diseño como para su construcción.

El enfoque que se le dio al desarrollo del sistema inyector, como a su posterior uso, es para investigación; por lo que se evitó incorporar excesiva automatización; que le brinda mayor productividad al sistema, pero lo encarece. Por esta razón, un análisis económico en el que se supone una cierta productividad y un valor de venta de producto, considerando posteriormente una tasa de retorno interna y tiempos de repago; no es representativo. El análisis queda acotado a comparar el costo de este sistema inyector con uno comercial, de características similares.

### 6.1.2 Costos

A continuación se muestran los costos totales de la construcción de los distintos sistemas que componen la inyectora de cera, en pesos argentinos, incluido el IVA:

Sistema	Costo Total
Motor	\$ 3.680,00
Inyector	\$ 160,00
Alimentación	\$ 50,00
Retención	\$ 116,00
Calefacción	\$ 1.180,00
Sujeción de matriz	\$ 113,00
Estructura	\$ 600,00
Auxiliares	\$ 550,00
<b>Total</b>	<b>\$ 6.449,00</b>

Este valor llevado a Dólares estadounidenses a la cotización actual (U\$S 1 = \$ 3,15), nos da un valor de **2047,3 U\$S**.

Según un información obtenida en internet, los costos de las inyectoras comercialmente disponibles varían entre 12.000 y 16.000 U\$S, sin contar los gastos de envío e impuestos por la importación [PW4].

### **6.1.3 Comentarios finales**

Durante el transcurso de este proyecto, se aplicaron los conceptos adquiridos durante la carrera; pero con otro enfoque, mucho más práctico y cercano a la realidad, que muchas veces el marco académico regular no puede brindar.

El hecho de haber abordado una gran cantidad de áreas diferentes, ha sido un desafío tanto a la hora de poder otorgar la suficiente profundidad y análisis a cada una; como también hallar la correcta manera de complementarlas; por lo que en lo personal, ha sido una experiencia altamente enriquecedora y me ha dado una visión mucho más cercana al desarrollo de la vida profesional.

Tanto el diseño como la construcción del sistema inyector se concretaron con éxito, satisfaciendo los objetivos planteados. Una vez evaluada la performance del equipo se encontrará listo para ser utilizado, siendo una herramienta fundamental que contribuirá con el éxito del proyecto de investigación actualmente vigente.

# Bibliografía

- 1) Apuntes de cátedra: Técnica fundición y pulvimetalurgia, cursada 2005.
- 2) Metal Handbook, Ninth Edition Volumen 15 Casting. Editorial ASM internacional.
- 3) Fundiciones esferoidales de espesores delgados obtenidas por colada en contra de la gravedad asistida por vacío - optimización del proceso. Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000.
- 4) Modeling of the wax injection process for the investment casting process: prediction of defects. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia. December 2003.
- 5) Manual de Hidráulica y Neumática – Inacap. Versión Electrónica.
- 6) Manual de Hidráulica Industrial. Vickers. Versión Electrónica.
- 7) Neumática, Hidráulica y Electricidad Aplicada. José Roldán Vilorio. Versión Electrónica.
- 8) Hand Book of Lost Wax or Investment Casting. James E. Sopcak. Gem Guides Book Company. Versión Electrónica.
- 9) Apuntes de Mecanismos. Lauría-Falco. La Línea Recta.
- 10) Diseño en ingeniería mecánica - 6º edición. Shigley, Joseph Edward y Mischke, Charles.
- 11) Metal Handbook, tenth Edition Volumen 1 Irons, Steels, And High Performance Alloys. Editorial ASM internacional.
- 12) Apuntes cátedra Cálculo de elementos de máquina. Cursada año 2004.
- 13) Transferencia de calor. M. Necati Ozisik. Editorial McGraw-Hill.
- 14) Transport Phenomena Part II: Energy Transport, Second edition. R. Byron Bird. Editorial John Wiley & Sons.
- 15) Formulas for Stress and Strain, Raymond J. Roark. Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company.
- 16) Metal Handbook, tenth Edition. Volumen 2 Nonferrous Alloys And Special-Purpose Materials. Editorial ASM internacional.

17) Diseño de Maquinas, Robert L. Norton. Primera Edición, Editorial Prentice-Hall

Paginas web

- 1) [www.investmentcastingmfg.com](http://www.investmentcastingmfg.com)
- 2) <http://www.tecnocrom.es/>
- 3) [http://www.precisionballs.com/ball\\_valve.htm](http://www.precisionballs.com/ball_valve.htm)
- 4) [http://dime.cucei.udg.mx/EXPODIME/expodime9/expo-sep2004/memorias/Folio\\_06.pdf](http://dime.cucei.udg.mx/EXPODIME/expodime9/expo-sep2004/memorias/Folio_06.pdf)