

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAXIAL A BAJAS TEMPERATURAS”**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. Angolemme D., José M.  
De Stefano D., Fernando S.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2005

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAxIAL A BAJAS TEMPERATURAS”**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Eli Saúl Puchi C.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. Angolemme D., José M.  
De Stefano D., Fernando S.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2005

Caracas, 28 de junio de 2005

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres José Miguel Angolemme D y Fernando S. De Stefano D., titulado:

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN  
DISPOSITVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAXIAL  
A BAJAS TEMPERATURAS.**

Consideran que los mismos cumplen con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con lo expuesto por los autores.

Prof. Antonio Barragán  
Jurado



Prof. Francisco García  
Jurado

Prof. Eli Saul. Puchi C.  
Jurado Coordinador



Los suscritos Miembros del Jurado Examinador designados por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por los bachilleres **FERNANDO SALVATORE DE STEFANO DA ROCHA (C.I.V.-15.725.949)** y **JOSÉ MIGUEL ANGOLEMME DI MARTINO (C.I.V.-16.004.972)**, para optar al Título de Ingenieros Mecánicos.

Decidimos conferirle al Trabajo Especial de Grado, titulado:

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAXIAL A BAJAS TEMPERATURAS”**

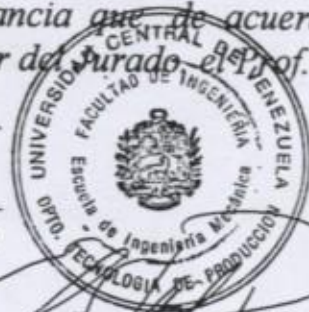
la

## **MENCIÓN HONORÍFICA**

En reconocimiento al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración del referido Trabajo, el cual constituye un aporte importante.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presenta Acta en la ciudad de Caracas, a los veintiocho días del mes de junio del año dos mil cinco, dejándose constancia que de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado el Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera.

**Prof. Francisco García**



**Prof. Antonio Barragán**

**Prof. Eli Saúl Puchi**  
Coordinador



## ***DEDICATORIA***

A *Dios*, por protegernos a mí y a todos los cercanos.

A *mis padres*, por la comprensión, paciencia y apoyo brindado durante todo este tiempo.

A *Maria Rosario* que, a pesar de la distancia, ha sabido transmitirme la energía y las ganas necesarias para hacerme llegar hasta aquí.

A *Antonio* por brindarme su colaboración y ayuda incondicional en cualquiera de las situaciones.

A *Crisanto* por los consejos y su sabia orientación.

A *mis amigos*, por haber estado siempre presentes a lo largo de este camino.

A todos aquellos que directa, o indirectamente, han servido de guía durante toda mi carrera.

***José M. Angolemme D.***

## ***DEDICATORIA***

Este trabajo esta dedicado a todas aquellas personas que de una forma u otra dieron su apoyo incondicional a lo largo de todo el proyecto.

A *Dios* por darme siempre la oportunidad de mejorar algo en mi vida.

A mis padres *Fernando* y *Rosa* por su importantísima colaboración e invaluable consejos y enseñanzas.

A mi hermana *Adriana* y mi cuñado *Erich* por estar tan cerca estando a kilómetros de distancia.

A *Naholi* por su apoyo tan especial en todo momento.

A *Crisanto* por su importante ayuda.

Y a todos los amigos y compañeros que de cierta forma ayudaron a mantenerme perseverante en este proyecto.

***De Stefano D., Fernando S.***

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios.*

*A nuestros padres, por el apoyo brindado.*

*A la UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA.*

*Al gremio de profesores de la ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.*

*A METALÚRGICA TORMASI C.A., y en especial al Sr. Fernando De Stefano por su invaluable y desinteresada ayuda en la construcción y diseño de los componentes del equipo, así como la donación de la mano de obra.*

*Al Profesor Crisanto Villalobos, por su ayuda incondicional durante todo el proceso de elaboración de este proyecto.*

*Al Profesor Eli Saúl Puchi Cabrera, por guiarnos como tutor a lo largo de este trabajo especial de grado.*

*Al LABORATORIO NACIONAL DE REFERENCIA PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS, DESGASTE Y CORROSIÓN DE MATERIALES. Ing. Engels Ochoa por su colaboración en el proceso de diseño y construcción del proyecto.*

*A GASES UNIDOS DE VENEZUELA, especialmente al Ing. Alejandro Piñeiro y a Carlos Álvarez, por toda la ayuda brindada en cuanto a asesoría, por el suministro de nitrógeno líquido y por facilitarnos sus instalaciones para realizar las pruebas.*

*Y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma colaboraron con nuestra formación y desarrollo de este trabajo.*

**J. M. Angolette Di Martino, F. S. De Stefano Da Rocha.**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN  
DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAXIAL A  
BAJAS TEMPERATURAS**

**Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera.**

**Tesis. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.  
Año 2005, 148 p.**

**Palabras clave:** Diseño, cámaras ambientales, bajas temperaturas, tracción uniaxial.

**Resumen.** Atendiendo una inquietud del Laboratorio Nacional de Referencia para la Evaluación de Propiedades Mecánicas, Desgaste y Corrosión de Materiales, en vista del crecimiento acelerado que ha venido experimentando la industria de gas natural y la licuefacción de gases, se planteó la necesidad de producir un dispositivo para realizar ensayos mecánicos a bajas temperaturas. El dispositivo desarrollado en el presente trabajo, se adapta en la máquina universal de ensayos mecánicos existente en el laboratorio, a saber, un equipo marca Instron modelo 8502, y basa su funcionamiento en la inyección de nitrógeno líquido en el interior de una cámara ambiental, donde éste pasa a fase gaseosa convirtiéndose en el fluido encargado de la transferencia de calor con la probeta. Este nitrógeno gas es recirculado empleando un ventilador para asegurar la homogeneidad de la temperatura dentro de la cámara y facilitar la transferencia de calor por convección. La cámara está provista de un agujero que permite la salida del nitrógeno gas, para evitar la presurización de la misma. El equipo posee también dos extensores para mantener la probeta en contacto con las bajas temperaturas, evitando así, que estas condiciones de operación, afecten a la máquina universal de ensayos. Así mismo se desarrolló, todo el sistema de sujeción e integración al equipo existente. Es conveniente destacar que el dispositivo, es capaz de realizar ensayos tanto a temperaturas por debajo de la temperatura ambiente como por encima de la misma, alcanzándose un intervalo de operación que varía desde  $-100^{\circ}\text{C}$  hasta  $100^{\circ}\text{C}$ , medidos en la superficie del espécimen. Adicionalmente, se tiene la capacidad de monitoreo permanente de la temperatura durante los ensayos, manteniendo el valor de la misma en un intervalo aceptable, su control a través de la válvula solenoide y del encendido y apagado de la resistencia interna garantizan la minimización de dicho intervalo de temperaturas durante la realización de cada ensayo. Finalmente es pertinente mencionar que la elaboración de este prototipo demuestra que, en el país existe tanto la capacidad de diseño y construcción, como también los materiales y equipos necesarios para el desarrollo de estos sistemas, y su comercialización es factible ya que el costo de fabricación es bastante competitivo.

## *Índice de contenido*



	Pág.
Índice de Figuras.	vi
Índice de Tablas.	xi
Abreviaturas y Símbolos.	xii
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO I: Marco Teórico.	4
1.1.- Ensayos de tracción a altas y a bajas temperaturas.	5
1.1.1.- Características generales.	6
1.1.2.- Métodos experimentales.	9
1.1.3.- Probeta para ensayos de tracción uniaxial.	11
1.2.- Comportamiento de los aceros a bajas temperaturas.	12
1.2.1.- Aceros inoxidables austeníticos.	14
1.2.2.- Otros aceros para usos a bajas temperaturas.	20
CAPÍTULO II: Metodología del Diseño.	24
2.1.- Metodología del diseño.	25
2.2.- Establecimiento de una necesidad.	25
2.3.- Concepción del sistema.	27
2.3.1.- Tormenta de Ideas.	27
2.3.1.1.- Propuesta N°1.	28
2.3.1.2.- Propuesta N°2.	30
2.3.1.3.- Propuesta N°3.	31
2.3.1.4.- Propuesta N°4.	33
2.3.1.5.- Propuesta N°5.	35
2.4.- Análisis de las propuestas.	36
2.4.1.- Parámetros a evaluar.	36
2.4.2.- Matriz Morfológica.	38
2.4.3.- Toma de decisiones.	40
2.5.- Ingeniería de detalles.	40
2.6.- Fabricación del prototipo.	41
2.7.- Puesta en funcionamiento y evaluación final.	41
CAPÍTULO III: Desarrollo del dispositivo.	42
3.1.- Desarrollo del equipo.	43
3.2.- Descripción general del equipo.	43
3.3.- Cálculo y selección de los elementos que conforman el equipo.	46
3.3.1.- Cámara de ensayos.	48
3.3.1.1.- Estructura.	48
3.3.1.2.- Inyector.	55
3.3.1.3.- Ventilador.	55
3.3.1.4.- Válvula solenoide.	55
3.3.1.5.- Resistencia.	56

3.3.1.6.- Sensor de temperatura.	56
3.3.1.7.- Secciones removibles	56
3.3.1.8.- Goma.	57
3.3.1.9.- Controlador.	57
3.3.2.- Sistema de sujeción.	58
3.3.2.1.- Bandeja.	58
3.3.2.2.- Brazo 1	58
3.3.2.3.- Brazo 2.	64
3.3.2.4.- Pasador brazos.	70
3.3.2.5.- Eje vertical Instron.	71
3.3.2.6.- Pieza de soporte.	74
3.3.2.7.- Brazo 3.	75
3.3.2.8.- Brazo 4.	80
3.3.2.9.- Arandelas.	80
3.3.3.- Extensores.	81
3.3.3.1.- Base.	81
3.3.3.2.- Pasador.	83
3.3.3.3.- Eje.	85
3.3.3.4.- Portaprobeta.	87
3.3.4.- Otros cálculos.	88
3.3.4.1.- Cálculo del flujo másico de nitrógeno requerido para mantener una temperatura de $-150^{\circ}\text{C}$ en el interior de la cámara.	88
3.3.4.2.- Cálculo del tiempo necesario para obtener una temperatura de $-125^{\circ}\text{C}$ en la superficie de la probeta partir de la temperatura ambiente.	90
3.3.4.3.- Cálculo del flujo másico de nitrógeno requerido para disminuir la temperatura en el interior de la cámara de $25^{\circ}\text{C}$ a $-150^{\circ}\text{C}$ .	93
CAPÍTULO IV: Construcción del dispositivo.	94
4.1.- Selección de Materiales.	95
4.1.1.- Acero Inoxidable AISI 304.	95
4.1.2.- Acero AISI 4140.	97
4.1.3.- UHMW – PE ( Cestilene HD 1000 ).	98
4.1.4.- PTFE (Teflón®).	100
4.1.5.- Poliuretano expandido.	101
4.1.6.- Aluminio.	102
4.2.- Construcción.	104
4.2.1.- Estructura.	104
4.2.1.1.- Corte y doblado.	104
4.2.1.2.- Soldadura de las piezas.	108
4.2.2.- Sistema de sujeción.	109
4.2.2.1.- Bandeja.	109

4.2.2.2.- Brazo 1.	110
4.2.2.3.- Brazo 2.	112
4.2.2.4.- Pasador brazos.	112
4.2.2.5.- Eje vertical Instron.	113
4.2.2.6.- Pieza de soporte.	114
4.2.2.7.- Brazo 3.	115
4.2.2.8.- Brazo 4.	116
4.2.2.9.- Arandelas.	117
4.2.3.- Extensores.	117
4.2.3.1.- Base.	117
4.2.3.2.- Pasador.	118
4.2.3.3.- Eje.	119
4.2.4.- Secciones removibles.	120
4.2.5.- Inyector.	121
4.3.- Ensamble.	121
CAPÍTULO V: Manual de Operaciones.	125
5.1.- Descripción del equipo.	126
5.2.- Especificaciones del equipo.	126
5.3.- Operación.	127
5.3.1.- Procedimiento para el montaje de la probeta.	128
5.3.2.- Ensayos a bajas temperaturas.	128
5.3.3.- Ensayos a altas temperaturas.	131
5.3.4.- Maquina inactiva.	133
5.3.5.- Instalación del programa de recopilación de datos.	134
5.3.5.- Plano eléctrico.	135
5.3.6.- Hoja de seguridad.	136
CAPÍTULO VI: Conclusiones y Recomendaciones.	140
6.1.- Conclusiones.	141
6.2.- Recomendaciones.	142
Referencias bibliográficas.	144
ANEXOS.	147
A.1.-Planos del dispositivo para realizar ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas.	148

## *Índice de figuras*

	Pág.
Figura 1.1 Máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8502, ubicada en el Laboratorio Nacional de Caracterización de Propiedades Mecánicas, Desgaste y Corrosión de Materiales.	6
Figura 1.2.a. Diagrama esfuerzo-deformación para un acero inoxidable 304 a bajas temperaturas.	7
Figura 1.2.b. Diagrama esfuerzo-deformación para un acero inoxidable 304 a altas temperaturas.	7
Figura 1.3.a. Efectos de la temperatura en la resistencia y la ductilidad de varios materiales: Resistencia vs. Temperatura.	7
Figura 1.3.b Efectos de la temperatura en la resistencia y la ductilidad de varios materiales: elongación a la tracción.	7
Figura 1.4 Probeta para ensayos de Tracción Uniaxial según la norma ASTM A370.	12
Figura 1.5. Resultados de ensayos de impacto Charpy para aceros de templados o templados y sensitizados.	16
Figura 1.6. Resultados de ensayos de flexión rotativa de un acero 304 trabajado en frío.	17
Figura 1.7. Efecto del trabajo en frío en los aceros inoxidables 304 y 304L.	18
Figura 1.8. Efecto de la temperatura en el calor específico de los aceros inoxidables 304 y 304L.	19
Figura 1.9. Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de los aceros inoxidables 304 y 304L.	19
Figura 2.1.a. Propuesta N°1: Cámara.	29
Figura 2.1.b. Propuesta N°1: Sistema de sujeción.	29
Figura 2.1.c. Propuesta N°1: Extensores.	29
Figura 2.2.a. Propuesta N°1: Detalle del extensor con el sistema de enfriamiento.	29
Figura 2.2.b. Ensamble de la propuesta N°1.	29
Figura 2.3.a. Propuesta N°2: Cámara.	30
Figura 2.3.b. Propuesta N°2: Sistema de sujeción.	30
Figura 2.3.c. Propuesta N°2: Extensores.	30
Figura 2.4. Ensamble de la propuesta N°2.	31
Figura 2.5.a. Propuesta N°3: Cámara.	32
Figura 2.5.b. Propuesta N°3: Sistema de sujeción.	32
Figura 2.5.c. Propuesta N°3: Extensores	32
Figura 2.6. Ensamble de la propuesta N°3.	33
Figura 2.7.a. Propuesta N°4: Cámara.	34
Figura 2.7.b. Propuesta N°4: Sistema de sujeción.	34
Figura 2.7.c. Propuesta N°4: Extensores.	34
Figura 2.8. Ensamble de la propuesta N°4.	34
Figura 2.9.a. Propuesta N°5: Cámara.	35



Figura 2.9.b. Propuesta N°5: Sistema de sujeción.	35
Figura 2.9.c. Propuesta N°5: Extensores.	35
Figura 2.10. Ensamble de la propuesta N°5.	36
Figura 2.11. Propuesta seleccionada.	40
Figura 3.1. Esquema de la cámara de ensayos.	44
Figura 3.2. Esquema del sistema de sujeción.	45
Figura 3.3. Esquema de los extensores.	46
Figura 3.4.a. Estados de esfuerzo general.	47
Figura 3.4.b. Estados de esfuerzo plano.	47
Figura 3.4.c. Estados de esfuerzo plano (vista bidimensional).	47
Figura 3.5. Esquema de una de las paredes de la cámara con su respectivo circuito térmico equivalente.	49
Figura 3.6. Representación en viga del Brazo 1.	59
Figura 3.7. Esquema, dimensiones y sección transversal del Brazo 1.	59
Figura 3.8. Diagrama de Fuerza cortante V y momento flector M	60
Figura 3.9. Distribución de los esfuerzos normales y cortantes en una viga de sección transversal rectangular.	61
Figura 3.10. Esquema, dimensiones y sección transversal del Brazo 2	64
Figura 3.11. Vista superior de la posición del Brazo 1 respecto al Brazo 2 para generar flexión pura	65
Figura 3.12. Representación en viga del Brazo 2 sometido a flexión pura.	65
Figura 3.13. Diagrama de Fuerza cortante V y momento flector M.	66
Figura 3.14. Sección transversal del Brazo 2 en el extremo A.	66
Figura 3.15. Sección transversal del Brazo 2 en el extremo B.	67
Figura 3.16. Vista superior de la posición del Brazo 1 respecto al Brazo 2 para generar flexión y torsión.	67
Figura 3.17. Representación en viga del Brazo 2 sometido a flexión y torsión.	68
Figura 3.18. Diagrama de Fuerza cortante V y momento flector M.	68
Figura 3.19. Esquema del pasador entre los brazos 1 y 2, con el momento al que está sometido.	70
Figura 3.20. Diagrama de Fuerza cortante V y momento flector M.	70
Figura 3.21. Representación en viga del Eje vertical sometido a un momento flector y a una carga axial.	72
Figura 3.22. Esquema de los esfuerzos que intervienen en el extremo empotrado, a raíz de la carga axial y de la flexión.	72
Figura 3.23. Sección transversal del Eje vertical en el extremo empotrado.	73
Figura 3.24. Sección transversal del Eje vertical en punto de momento flector máximo.	74
Figura 3.25. Esquema del Brazo 3.	75
Figura 3.26. Vista superior de la posición del Brazo 2 respecto al Brazo 3 para generar flexión pura.	76
Figura 3.27. Representación en viga del Brazo 3 sometido a flexión.	76

Figura 3.28. Diagrama de Fuerza cortante V y momento flector M.	77
Figura 3.29. Sección transversal del Brazo 3 en el extremo A.	77
Figura 3.30. Vista superior de la posición del Brazo 2 respecto al Brazo 3 para generar flexión y torsión.	78
Figura 3.31. Representación en viga del Brazo 3 sometido a flexión y torsión.	78
Figura 3.32. Diagrama de Fuerza cortante V y momento flector M.	78
Figura 3.33. Sección transversal del Brazo 3 en el extremo B.	79
Figura 3.34. Distribución de los esfuerzos en una viga sometida a tracción.	81
Figura 3.35. Esquema de la base de los extensores.	82
Figura 3.36. Sección transversal A.	82
Figura 3.37. Sección transversal B.	83
Figura 3.38. Esquema del pasador con las fuerzas de tracción.	84
Figura 3.39. Esquema del eje del extensor	85
Figura 3.40. Sección transversal A del eje del extensor.	85
Figura 3.41. Esquema del volumen de control seleccionado.	89
Figura 3.42. Esquema la probeta y los extensores con su cambio a diámetro equivalente	91
Figura 4.1. Pieza 1.	104
Figura 4.2. Pieza 2.	105
Figura 4.3. Pieza 3.	105
Figura 4.4. Pieza 4.	106
Figura 4.5. Pieza 5.	106
Figura 4.6. Pieza 6.	106
Figura 4.7. Pieza 7.	107
Figura 4.8. Piezas 8 y 9.	107
Figura 4.9. Pieza 9.	108
Figura 4.10. Piezas 11 y 12.	108
Figura 4.11. a) y b): Bandeja, c) eje de la bandeja.	110
Figura 4.12. Brazo 1.	111
Figura 4.13. Brazo 2.	112
Figura 4.14. Pasador brazos.	113
Figura 4.15. Eje vertical con detalle.	114
Figura 4.16. Pieza de soporte.	115
Figura 4.17. Brazo 3	116
Figura 4.18. Brazo 4.	116
Figura 4.19. Arandela.	117
Figura 4.20 Base de los extensores.	118
Figura 4.21. Pasador de los extensores.	119
Figura 4.22. Eje de los extensores.	119
Figura 4.23. Secciones removibles.	120
Figura 4.24. Inyector.	121
Figura 4.25. Cortes realizados a la cámara, para albergar las secciones removibles.	122

---

Figura 4.26. Cámara terminada.	122
Figura 4.27. Extensores terminados.	123
Figura 4.28. Sistema de sujeción terminado.	123
Figura 4.29. Cámara para ensayos a bajas temperaturas con todos sus elementos.	124
Figura 5.1 Esquema del controlador PLC.	127
Figura 5.2 Pantalla de bienvenida.	129
Figura 5.3 Menú de selección del tipo de ensayo.	129
Figura 5.4 Pantalla para la introducción de la temperatura.	130
Figura 5.5 Pantalla de espera durante el enfriamiento.	130
Figura 5.6 Pantalla de confirmación de temperatura alcanzada.	130
Figura 5.7 Pantalla para el inicio de la recopilación de datos.	130
Figura 5.8 Pantalla para terminar el ensayo.	130
Figura 5.9 Pantalla de espera.	131
Figura 5.10 Pantalla que indica el retiro de la probeta.	131
Figura 5.11 Pantalla para la introducción de la temperatura.	132
Figura 5.12 Pantalla de espera durante el calentamiento.	132
Figura 5.13 Pantalla de confirmación de temperatura alcanzada.	132
Figura 5.14 Pantalla de espera.	133
Figura 5.15 Plano eléctrico.	135
Figura 6.1. Montaje del sistema de medición.	142

## *Índice de tablas*

	Pág.
Tabla 1.1. Propiedades a tracción de algunos aceros inoxidable austeníticos	14
Tabla 1.2. Resistencia al impacto de algunos aceros inoxidable austeníticos	15
Tabla 1.3. Resultados de ensayos de impacto a temperaturas criogénicas a probetas tomadas de la zona afectada por el calor de láminas de aceros inoxidable austeníticos soldadas.	16
Tabla 1.4. Coeficiente de expansión térmica de distintos aceros inoxidable a varias temperaturas	19
Tabla 2.1. Porcentajes asignados a cada parámetro de evaluación	39
Tabla 2.2. Matriz morfológica	39
Tabla 4.1. Análisis químico del acero inoxidable austenítico AISI 304, expresado en % de los elementos.	96
Tabla 4.2. Principales propiedades físicas mecánicas y térmicas del acero inoxidable austenítico 304	96
Tabla 4.3. Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero AISI 4140 templado a 425°C en aceite.	98
Tabla 4.4. Principales propiedades del UHMW (Cestilene HD 100).	99
Tabla 4.5. Principales propiedades del PTFE Teflón®.	100
Tabla 4.6. Propiedades del poliuretano expandido.	102
Tabla 4.7. Cuadro comparativo de las conductividades térmicas de varios aislantes.	102
Tabla 4.8. Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio AA-6063-T6	103
Tabla 4.9. Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la fundición de aluminio A-356 (vacuada en molde de arena).	103
Tabla 5.1 Tabla de especificaciones de la cámara para ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas.	127



## *Abreviaturas y símbolos*

$\rho_{\text{acero}}$	Densidad del acero ( $7850\text{Kg}/\text{m}^3$ ).
$\rho_{\text{aluminio}}$	Densidad del aluminio ( $2700\text{Kg}/\text{m}^3$ ).
$\rho_{\text{poliuretano}}$	Densidad del poliuretano expandido ( $30\text{Kg}/\text{m}^3$ ).
$\rho_{\text{UHMW-PE}}$	Densidad del UHMW - PE ( $930\text{Kg}/\text{m}^3$ ).
$\rho_{\text{PTFE}}$	Densidad del PTFE ( $2130\text{Kg}/\text{m}^3$ ).
$\sigma'$	Esfuerzo de von Mises.
$\sigma$	Esfuerzo normal.
$\sigma_x$	Esfuerzo normal en dirección X.
$\sigma_y$	Esfuerzo normal en dirección Y.
$\tau_{\text{max}}$	Esfuerzo cortante máximo.
$\tau_{xy}$	Esfuerzo cortante.
$\nu_N$	Viscosidad Cinemática del Nitrógeno gas.
A	Área de la sección transversal.
$A_d$	Área del diámetro mayor del sujetador.
$A_t$	Área de esfuerzo de tensión.
$A_T$	Área total de transferencia de calor
C	Fracción de la carga externa.
c	Distancia del eje neutro al punto en estudio.
$D_{\text{eq}}$	Diámetro equivalente.
$D_{\text{vent}}$	Diámetro del aspa del ventilador.
E	Módulo de elasticidad del material.
F	Fuerza axial.

Fb	Fuerza a la que está sometido el perno.
g	Aceleración de la gravedad ( $9,81m/s^2$ )
$h_{ce}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección en el exterior de la cámara para aire quieto.
$h_{ci}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la cámara.
$h_e$	Entalpía a la entrada del volumen de control.
$h_s$	Entalpía a la salida del volumen de control.
I	Momento de inercia de la sección transversal.
K	Conductividad térmica.
Kb	Rigidez del sujetador.
Km	Rigidez del elemento.
$l_{brazo1}$	Longitud del Brazo 1.
$l_{brazo2}$	Longitud del Brazo 2.
$l_{binstron}$	Longitud del Brazo 3.
ld	Longitud de la parte sin rosca en agarre.
lt	Longitud de la parte roscada de agarre.
M	Peso molecular.
$M_A$	Momento flector en el punto A.
m	Flujo másico.
$m_a$	Masa de los accesorios.
$M_B$	Momento flector en el punto B.
$m_{bandeja}$	Masa de la bandeja.

$m_{\text{brazo1}}$	Masa del Brazo 1.
$m_{\text{brazo2}}$	Masa del Brazo 2.
$m_{\text{binstron}}$	Masa del Brazo 3.
$m_{\text{estructura}}$	Masa de la estructura.
$n$	Factor de seguridad.
$Nu$	Número de Nusselt.
$P$	Carga puntual.
$P_1$	Carga puntual aplicada en el Brazo 1.
$P_2$	Carga puntual aplicada en el Brazo 2.
$Pr$	Número de Prandlt.
$q_e$	Calor transferido a través de la pared.
$q_T$	Calor total transferido.
$R$	Resistencia térmica.
$S_{\text{uts}}$	Resistencia última de la tensión del material.
$S_y$	Resistencia a la fluencia.
$t$	Tiempo.
$T$	Momento torsor.
$T_{\infty e}$	Temperatura del aire en el exterior de la cámara.
$T_{\infty i}$	Temperatura del Nitrógeno en el interior de la cámara.
$T_{\text{se}}$	Temperatura superficial en la lámina exterior de la cámara.
$u$	Velocidad del aire.

$V$	Fuerza cortante.
$V_A$	Fuerza cortante en el punto A.
$V_{\text{brazo1}}$	Volumen del Brazo 1.
$V_{\text{brazo2}}$	Volumen del Brazo 2.
$V_{\text{láminas}}$	Volumen de las láminas.
$W_{\text{brazo1}}$	Carga uniformemente distribuida en el Brazo 1.
$W_{\text{brazo2}}$	Carga uniformemente distribuida en el Brazo 2.
$W$	Trabajo del ventilador.

# *INTRODUCCIÓN*

Es bien conocido que el comportamiento de los elementos estructurales empleados en la industria se puede ver seriamente afectado cuando las condiciones de operación son modificadas. Tal es el caso de los componentes sometidos a bajas temperaturas.

Las experiencias obtenidas de la Segunda Guerra Mundial en cuanto a fallas de cascos metálicos de barcos por fractura frágil, le ha demostrado a los diseñadores que un material que ha pasado exitosamente un control de calidad a temperatura ambiente establecido según norma, puede llegar a ser inaceptable cuando su servicio es requerido en ambientes donde la temperatura desciende drásticamente.

El peligro a bajas temperaturas es la fractura frágil, que puede traducirse en una destrucción catastrófica de estructuras y equipos complejos. Usualmente, los metales estructurales no fallarán sin dar señales de alargamiento, flexión, pandeo o cualquier deformación plástica. Bajo ciertas condiciones, los metales que normalmente son dúctiles pueden fallar repentinamente sin ninguna evidencia de deformación plástica y a niveles de esfuerzos muy bajos. Fallas de este tipo, conocidas como fracturas frágiles se manifiestan generalmente a bajas temperaturas.

Por esto, surge la necesidad de abordar el tema realizando estudios que permitan analizar el comportamiento de los materiales bajo estas condiciones. Esto es posible lograrlo incorporando cámaras ambientales con atmósferas y temperatura controladas en los equipos por medio de los cuales se realizan los ensayos mecánicos tradicionales, con el fin de simular las condiciones de operación del elemento en estudio, y así obtener información acerca de su desempeño.

Entre los ensayos mecánicos destructivos más comunes a los que son sometidos los materiales se encuentra el de *tracción uniaxial*, y consiste en someter una probeta normalizada a esfuerzos progresivos y crecientes de

tracción en la dirección de su eje hasta que llegue a la deformación y a la rotura correspondiente. Este tipo de ensayo se puede realizar en una máquina universal de ensayos mecánicos, que se encargará de ir aplicando las cargas deseadas a la probeta colocada y sujeta a ésta por medio de mordazas adecuadas. Adicionalmente a la máquina de ensayos, se puede disponer de dispositivos especialmente diseñados para modificar las condiciones ambientales a las que pudiera estar sometida la probeta, como por ejemplo la temperatura.

La intención de este trabajo especial de grado es crear un dispositivo que, al acoplarse a la máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8502, pueda permitir la realización de ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas. Este dispositivo deberá estar acorde con la tecnología disponible en la actualidad en cuanto al monitoreo y control de los procesos, deberá brindar seguridad y funcionalidad a los operadores adaptándose a las necesidades específicas del Laboratorio Nacional de Caracterización de Propiedades Mecánicas, Desgaste y Corrosión de Materiales, y además deberá ser construida con la finalidad de ser competitivo tanto económica como tecnológicamente en el mercado nacional e internacional.



***CAPÍTULO I***  
***Marco teórico***

### ***1.1.- Ensayos de tracción a altas y a bajas temperaturas***

Los ensayos de tracción a temperaturas altas o bajas son realizados como parte de las medidas de control de calidad o estudios de caracterización general para materiales de ingeniería que son utilizados a temperaturas, que van desde temperaturas relacionadas con aplicaciones criogénicas, como los sistemas de refrigeración líquido-gas, a extremadamente altas, como en las turbinas de gas o en los propulsores de los cohetes.

Un ensayo de tracción tiene muchas ventajas. Se usa una probeta de diseño simple que puede ser fundida directamente o maquinada. Las mediciones pueden ser realizadas con equipos que están disponibles en la mayoría de los laboratorios metalúrgicos, y el ensayo puede durar pocos minutos, sin tomar en cuenta el período de calentamiento o enfriamiento. A pesar de que estas ventajas simplifican las pruebas de control de calidad, un ensayo de tracción debe ser usado con precaución como un indicador del nivel de calidad, debido a que la relevancia del ensayo está limitada por su correlación con el desempeño. En otras palabras, un material puede pasar previamente un control de calidad establecido según norma para resistencia a la tracción y ductilidad, y a la vez puede ser inaceptable para las condiciones de operación deseadas. Por ejemplo, diferentes programas de procesamiento termomecánico pueden ser aplicados a un acero tratable térmicamente para producir una combinación de propiedades de tensión, pero sólo uno de estos tratamientos térmicos puede ser capaz de brindarle las otras propiedades mecánicas críticas para su uso. De esta manera, deben ser realizados ensayos adicionales como fatiga, dureza, resistencia a la corrosión y fluencia lenta “creep”, así como estudios microestructurales, para una evaluación adecuada de un material.

Los ensayos de tracción a bajas/elevadas temperaturas se realizan básicamente con las mismas probetas y procedimientos que los realizados a temperatura ambiente <sup>(1)</sup>. En este caso las probetas deben ser calentadas o enfriadas en una cámara ambiental, y los dispositivos de ensayo deben ser suficientemente fuertes y resistentes a la corrosión, además de que los equipos de medición deben poder soportar las temperaturas de los ensayos.



Figura 1.1 Máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8502, ubicada en el Laboratorio Nacional de Caracterización de Propiedades Mecánicas, Desgaste y Corrosión de Materiales

Una vez determinado, el comportamiento carga-elongación, éste puede ser transformado en esfuerzos y deformaciones ingenieriles usando fórmulas normalizadas. Los esfuerzos y las deformaciones reales, por lo menos hasta el comienzo del encuellamiento, también pueden ser calculados. El comienzo del encuellamiento es difícil de identificar, especialmente a temperaturas elevadas.

### ***1.1.1.- Características generales***

Los diagramas esfuerzo-deformación a temperaturas bajas/elevadas son similares en apariencia a los realizados a temperatura ambiente (Figura 1.2). A medida que la temperatura desciende desde la ambiente, los materiales se vuelven más fuertes pero menos dúctiles, mientras que al aumentar la temperatura los materiales se vuelven más débiles (figura 1.3) <sup>(1)</sup>. A pesar de que las aleaciones estables muestran un incremento en la ductilidad al incrementar la temperatura, el

comportamiento temperatura-ductilidad para la mayoría de los materiales en la ingeniería varía significativamente.

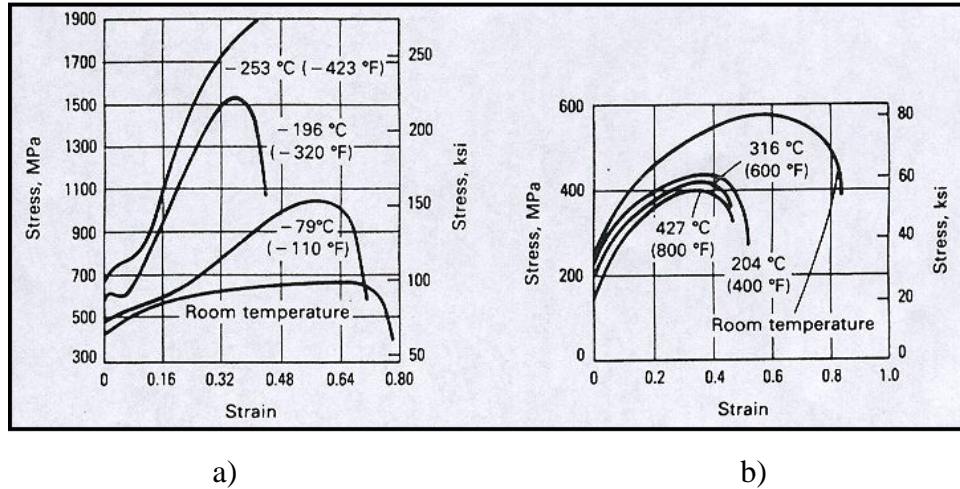


Figura 1.2. Diagrama esfuerzo-deformación para un acero inoxidable 304: a) a bajas temperaturas y b) a altas temperaturas <sup>(1)</sup>

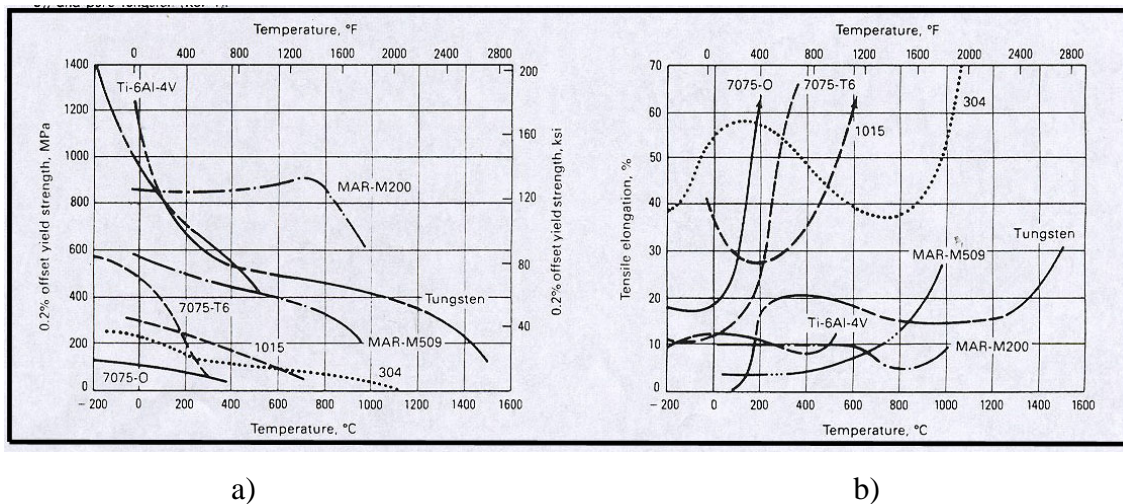


Figura 1.3. Efectos de la temperatura en la resistencia y la ductilidad de varios materiales a) resistencia vs. Temperatura, b) elongación a la tracción <sup>(1)</sup>

Debido a la relativamente alta tasa de deformación – usualmente  $8.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (0.5%/min) y  $8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  (5%/min) – que se producen en los ensayos de tracción, la deformación ocurre por desplazamiento (deslizamiento de dislocaciones a través de

planos cristalográficos definidos). Así, los cambios en la resistencia y ductilidad debidos a la temperatura generalmente pueden ser relacionados con el efecto de la temperatura en los deslizamientos. A bajas temperaturas (menos de 0.3 temperatura homóloga, que es la relación de la temperatura de ensayo respecto al punto de fusión del material, ambas en Kelvin), el número de sistemas de deslizamiento está limitado y los procesos de recuperación son imposibles. Por lo tanto, los mecanismos de endurecimiento por deformación, como la interacción entre las dislocaciones y los apilamientos, son responsables de las grandes fuerzas requeridas para la deformación continua. Esto sigue hasta que los esfuerzos locales en los apilamientos exceden el esfuerzo de fractura y ocurre la falla <sup>(1)</sup>.

A altas temperaturas (entre 0.3 y 0.5 temperatura homóloga), procesos activados térmicamente como los deslizamientos múltiples y los deslizamientos cruzados permiten que los altos esfuerzos locales se relajen disminuyendo la resistencia. Para temperaturas muy superiores a la mitad de la temperatura homóloga, los procesos de difusión son importantes y mecanismos como la recuperación, ascenso de las dislocaciones, la recristalización y el crecimiento de grano pueden reducir la densidad de las dislocaciones, prevenir los apilamientos y posteriormente reducir la resistencia <sup>(1)</sup>.

La deformación bajo condiciones de tensión está gobernada en gran medida por la estructura cristalina. Los materiales cúbicos centrados en las caras presentan un cambio gradual en la resistencia y la ductilidad a medida que la temperatura descende (figura 1.3 para el acero inoxidable 304). Algunas aleaciones cúbicas centradas en las caras, al contrario, muestran cambios abruptos a la temperatura de transición dúctil-frágil (aproximadamente a 200°C o 390°F para el tungsteno en la figura 1.3) en donde hay bajo flujo plástico. En materiales hexagonales compactos y cúbicos centrados en las caras la formación en agregado de cristales también puede ocurrir durante el ensayo. De igual manera, esta formación contribuye poco para la elongación total; su papel más importante es el de reorientar sistemas de deslizamiento desfavorables anteriores a posiciones en las que ellos puedan ser activados <sup>(1)</sup>.

Otros factores pueden afectar el comportamiento a tracción, pero los efectos específicos no pueden ser predecidos fácilmente. Por ejemplo la precipitación y el envejecimiento (crecimiento de partículas controladas por difusión) puede ocurrir en aleaciones bifásicas durante el proceso de calentamiento antes del ensayo o durante el mismo. Estos procesos pueden provocar una gran variedad de respuestas en el comportamiento mecánico, dependiendo del material. Los procesos de difusión también están relacionados con el punto de fluencia y con los fenómenos de envejecimiento por deformación. Bajo ciertas combinaciones de tasa de deformación y temperatura, los átomos intersticiales pueden ser arrastrados con dislocaciones, o las dislocaciones pueden disociarse y luego recombinarse, produciendo saltos en la curva esfuerzo-deformación.

Hay excepciones para estas generalizaciones, especialmente a altas temperaturas. Por ejemplo, a temperaturas suficientemente altas los límites de grano en materiales policristalinos son más débiles que el interior de los granos y la fractura intergranular ocurre a elongaciones relativamente bajas.

### ***1.1.2.- Métodos experimentales***

Los métodos y procedimientos específicos para realizar los ensayos a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas han sido normalizadas por ASTM (American Society for Testing and Materials) en las normas E8 y E21 respectivamente. A pesar de que no ha sido adoptada ninguna norma para realizar ensayos a bajas temperaturas, los requerimientos generales de ASTM E8 y E21 pueden ser logrados a bajas temperaturas. Asumiendo que para los ensayos es usada una máquina con un apropiado control de la carga y de la velocidad, la validez de un ensayo reside en la medición de la deformación, el control de la temperatura y el comportamiento del material.

- *Medición de la deformación*: El método más simple de medir la deformación está basado en el desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos. Pero, el desplazamiento del cabezal incluye no sólo la deformación en la sección

calibrada, sino también la deformación en el resto de la muestra, el tren de carga y la máquina de ensayos. Este método es conveniente solo para mediciones de grandes deformaciones plásticas donde otros factores pueden ser despreciados. Para una determinación precisa de la deformación debe ser usado un extensómetro. Éstos van acoplados directamente a la probeta, lo que excluye cualquier contribución de la máquina de ensayos. No obstante, también pueden ser aplicados métodos correctivos que consideran la deformación elástica de los elementos de máquina involucrados con la aplicación de la carga en los especímenes.

- *Control de la temperatura:* La temperatura actual debe ser mantenida a pocos grados de la temperatura deseada y no puede fluctuar considerablemente con el tiempo o variar a lo largo de la longitud calibrada.

La selección de la termocupla adecuada depende del ambiente y temperatura del ensayo. La temperatura del ensayo puede ser controlada adecuadamente con uno de los tantos tipos de controladores de temperatura disponibles en el mercado que refieren la fuerza electromotriz de la termocupla central.

La posibilidad de minimizar el gradiente de temperatura a lo largo de la longitud calibrada depende del método de enfriamiento o calentamiento. A pesar de que la inmersión dentro de líquidos, gases o mezclas como hielo seco/acetona puede proporcionar temperaturas uniformes, los sistemas de refrigeración con fluidos refrigerantes líquidos puede ser problemático y requiere mezclar y/o incrementar el flujo del refrigerante para minimizar el gradiente.

Un control apropiado de la temperatura de ensayo y la minimización del gradiente térmico a lo largo de la longitud calibrada son importantes debido a la dependencia de los mecanismos de flujo plástico y el comportamiento del material a la temperatura. Por ejemplo, los puntos calientes de las probetas generalmente serán más débiles que el resto de ella y pueden convertirse en lugares para deformaciones localizadas y falla prematura, lo que se traduce en información imprecisa y poco confiable del ensayo de tracción.

- *Comportamiento del material:* Debido a que las aleaciones sometidas a ensayos de tracción a altas temperaturas sufrirán un temple antes de ser cargados, podrán ocurrir cambios en la microestructura y producir un material que no está acorde con el original. Por lo tanto, el calentamiento lento o prolongado deberá ser evitado <sup>(1)</sup>.

El ambiente del ensayo puede afectar las propiedades evaluadas. Generalmente, la atmósfera debe reflejar el uso que se supone que tendrá el material. A pesar de que el ambiente no podrá ser nunca una simulación exacta de las condiciones de operación, éste debe producir los mismos efectos básicos y no debe introducir mecanismos de ataque ajenos.

### ***1.1.3.- Probeta para ensayos de tracción uniaxial***

El tipo de la probeta utilizada va a depender del tipo de ensayo, del equipo, su capacidad, y la disponibilidad del material. La preparación de las probetas requiere el máximo cuidado debiendo ser torneadas en torno de precisión, lubricado abundantemente para que la temperatura no supere los 50° C, dejando 0,2mm de tolerancia y rectificadas con refrigeración abundante <sup>(1)</sup>.

Las probetas utilizadas por los diferentes grupos de investigación y evaluación que han estudiado las propiedades de los materiales a tracción son muy diversas, tanto del punto de vista de la forma como de las dimensiones.

El ejemplo más significativo para este trabajo, es la probeta para ensayos de tracción uniaxial dispuesta en la norma ASTM A370 tal como se muestra en la Figura

1.4



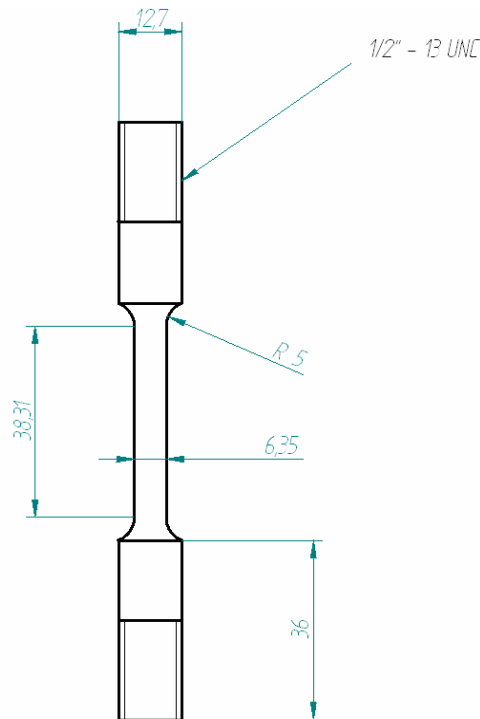


Figura 1.4 Probeta para ensayos de Tracción Uniaxial según la norma ASTM A370

### ***1.2.- Comportamiento de los aceros a bajas temperaturas***

Con el rápido desarrollo de la industria de las bajas temperaturas en estos últimos años, entre las cuales se puede mencionar la industria del oxígeno, el transporte de grandes cantidades de metano desde las zonas donde se produce, nace la necesidad de estudiar un tipo de material metálico económico, dúctil a las bajas temperaturas de hasta  $-196^{\circ}\text{C}$ , para la construcción de todos aquellos elementos de producción, transporte y almacenamiento.

Los aceros al carbono y las aleaciones para servicios a bajas temperaturas necesitan brindar una alta resistencia, ductilidad y tenacidad en vehículos, recipientes y estructuras que deberán funcionar a temperaturas por debajo de  $-45^{\circ}\text{C}$ . Debido a que un gran número de aceros están especialmente diseñados para trabajar a bajas temperaturas, la selección del material óptimo viene de un completo entendimiento de la aplicación y un conocimiento de las propiedades mecánicas que cada acero brinda.

Existen muchos aceros que se comportan muy bien a temperaturas de servicio relativamente bajas. En el manejo, almacenamiento y transporte de los gases licuados, como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y helio, hay relativamente pocos aceros capaces de soportar estas condiciones de trabajo. Estos gases licuados bullen a temperaturas conocidas como criogénicas, es decir, alrededor de  $-70^{\circ}\text{C}$  <sup>(2)</sup>.

Para evitar el problema de la fractura frágil, las estructuras y los equipos están diseñados para minimizar la concentración de esfuerzos y para emplear materiales que, basados en ensayos y pruebas de campo, tendrán un alto nivel de tenacidad bajo condiciones de servicio.

A temperaturas por debajo de la ambiente el comportamiento de un metal esta caracterizado un poco por su estructura cristalina. En los aceros cúbicos centrados en el cuerpo (Hierro, Molibdeno, Vanadio y Cromo) la resistencia a la tracción y a la fluencia dependen en gran medida de la temperatura. Estos metales muestran una pérdida de ductilidad en una región pequeña de temperaturas por debajo del ambiente. La resistencia a la tracción de los metales con estructuras cúbicas centradas en las caras (Aluminio, Cobre, Níquel y acero inoxidable austenítico) es más dependiente de la temperatura que su esfuerzo de fluencia <sup>(2)</sup>.

Aunque la tenacidad de un material a bajas temperaturas es de extrema importancia en el diseño de equipos criogénicos, otras propiedades deben tomarse en cuenta. Por ejemplo, las propiedades de tracción de un material son importantes debido a que éstas determinan los espesores de dichos equipos. Además, las características de expansión térmica de los materiales, debido a que grandes cambios en la temperatura pueden imponer a su vez grandes esfuerzos en alguna pieza de un equipo. También, debido a que las temperaturas criogénicas son difíciles de mantener, la conductividad térmica y el calor específico del material son importantes para los diseñadores de equipos criogénicos.

Una familia de aceros que son muy usados en estas condiciones de servicio por su excelente desempeño son los aceros inoxidables austeníticos. De aquí en adelante se estudiarán las propiedades mecánicas y físicas antes descritas, tanto de los aceros inoxidables austeníticos como de otros aceros comunes.

### 1.2.1.- Aceros inoxidables austeníticos

La serie 300 de los aceros inoxidables ofrece una buena combinación de tenacidad y soldabilidad para servicios a bajas temperaturas. Cuando existe un temple sus propiedades de resistencia son adecuadas para equipos robustos pero inadecuados para estructuras livianas. Para aplicaciones aeroespaciales los fabricantes pueden tomar ventaja de las características de endurecimiento por deformación de las aleaciones y usarlas en condiciones de extremo trabajo en frío. De la serie 300 de los aceros inoxidables, los tipos 304, 304L, 310, y 347 son los más empleados para condiciones de temperaturas criogénicas <sup>(3)</sup>.

En cuanto al estudio de las propiedades de los aceros inoxidables austeníticos primero, se deben considerar los efectos de las temperaturas criogénicas en las propiedades de tracción. En la tabla 1.1 se muestran las propiedades de tracción a temperatura ambiente 75°F (24°C), -320°F (-196°C) y a -425°F (-254°C) de los cuatro aceros inoxidables austeníticos nombrados anteriormente. Se debe notar que la ductilidad (elongación y reducción de área) se mantiene a temperaturas criogénicas. También se puede notar que la resistencia a la tracción y a la fluencia es inversamente proporcional a la disminución de la temperatura.

AISI Type	Testing temp, F	Yield strength (0.2% offset), psi	Tensile strength, psi	Elongation in 2 in., %	Reduction in area, %
304	75	33,000	85,000	60	70
304	-320	57,100	205,500	43	45
304	-425	63,700	244,500	48	43
304L	75	28,000	85,000	60	60
304L	-320	35,000	194,500	42	50
304L	-425	33,900	220,000	41	57
310	75	45,000	95,000	60	65
310	-320	84,900	157,500	54	54
310	-425	115,500	177,500	56	61
347	75	35,000	90,000	50	60
347	-320	41,200	186,000	40	32
347	-425	45,500	210,500	41	50

Tabla 1.1. Propiedades a tracción de algunos aceros inoxidables austeníticos <sup>(3)</sup>

Como es de esperarse, de la gran ductilidad mostrada por los aceros inoxidable austeníticos, la tenacidad es excelente a temperaturas criogénicas. Según ensayos Charpy realizados a estos materiales la tenacidad disminuye de la temperatura ambiente a los  $-196^{\circ}\text{C}$ , mientras que a  $-254^{\circ}\text{C}$  esta propiedad se mantiene casi igual. La tabla 1.2 muestra los resultados de ensayos de impacto realizados en un acero inoxidable 304 mantenido a  $-196^{\circ}\text{C}$  por un año, en donde se demuestra que es muy estable y no presenta una degradación considerable en la tenacidad debido a la exposición prolongada a temperaturas criogénicas.

AISI Type	Energy absorbed, ft-lb, at		
	80 F	-320 F	-425 F
304	154	87	90
304L	118	67	67
310	142	89	86
347	120	66	57

Tabla 1.2. Propiedades a tracción de algunos aceros inoxidables austeníticos <sup>(3)</sup>

En las zonas afectadas por el calor cercanas a las soldaduras en los aceros inoxidables austeníticos precipitarán carburos de cromo. Estas precipitaciones conocidas como sensitización dependen del contenido de carbono del acero inoxidable y del tiempo de exposición en el rango de  $800$  a  $1600^{\circ}\text{F}$  <sup>(3)</sup>. Debido a que estos carburos precipitan en los límites de grano de los aceros, pueden afectar la tenacidad de los mismos. Como se ve en la figura 1.5 para un acero con gran contenido de carbono como el 302 la sensitización ha reducido considerablemente su tenacidad a  $300^{\circ}\text{F}$  ( $-185^{\circ}\text{C}$ ), mientras que en el caso de los aceros de bajo carbono (304 y 304L) este valor se mantiene considerablemente alto. Debido a esto, los aceros de bajo carbono como el 304 parecen ser mejor material de construcción para equipos criogénicos que presenten soldaduras, que los de alto carbono como el 302.

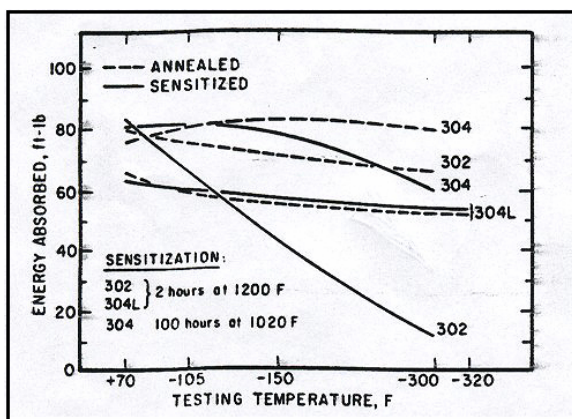


Figura 1.5. Resultados de ensayos de impacto Charpy para aceros de templados o templados y sensitizados <sup>(3)</sup>

Es importante recordar que como se dijo anteriormente, la severidad de la sensitización está en función de la cantidad de carbono y del tiempo al que esté sometido a este proceso. En la tabla 1.3 se muestran resultados de ensayos de impacto a temperaturas criogénicas a probetas tomadas de la zona afectada por el calor de láminas de aceros inoxidable austeníticos soldadas con diversos procesos. Los resultados muestran que la zona afectada por el calor en aceros inoxidable austeníticos no se ve muy afectada por las condiciones de soldadura <sup>(3)</sup>.

AISI Type	Welding method	Energy absorbed, ft-lb*			
		Notch in weld metal	Notch in heat-affected zone at indicated distance from notch to fusion line, in.		
			1/16	1/8	1/2
<i>Impact Values at -320 F</i>					
304	Manual covered electrode	15	44	49	55
	Gas metal-arc	38.5	51.5	63	64.5
	Submerged arc, heavy pass	12	56	68	†
304L	Manual covered electrode	10	51	59	57
	Gas metal-arc	23	58	60.5	63.5
	Submerged arc, heavy pass	48.5	58.5	56	65.5
310	Manual covered electrode	17.5	58.5	60	†
	Gas metal-arc	18	59	57.5	60
	Submerged arc, light pass	43	71	74	79.5
<i>Impact Values at -421 F</i>					
304	Manual covered electrode	12	47	55	52.5
	Gas metal-arc	22.5	53	62	60
	Submerged arc, heavy pass	20	55.5	66	†
304L	Manual covered electrode	8	50	60	60
	Gas metal-arc	14	59	52	55
	Submerged arc, heavy pass	45	53	45	64
310	Manual covered electrode	21	53	57.5	†
	Gas metal-arc	16	52	56	62.5
	Submerged arc, light pass	37	70.5	71	73.5

Tabla 1.3. Resultados de ensayos de impacto a temperaturas criogénicas a probetas tomadas de la zona afectada por el calor de láminas de aceros inoxidable austeníticos soldadas <sup>(3)</sup>

Otra propiedad importante en equipos criogénicos sujetos a vibraciones es la resistencia a la fatiga. Existe relativamente poca información en cuanto a la fatiga en aceros inoxidable austeníticos a temperaturas criogénicas, pero la información disponible indica que el límite de resistencia a la fatiga incrementa a medida que la temperatura disminuye (figura 1.6) <sup>(3)</sup>. Este incremento en el límite de resistencia a la fatiga con la disminución de la temperatura es consistente el aumento de la resistencia a la tracción, y muchos estudiosos creen que ambas están relacionadas entre sí.

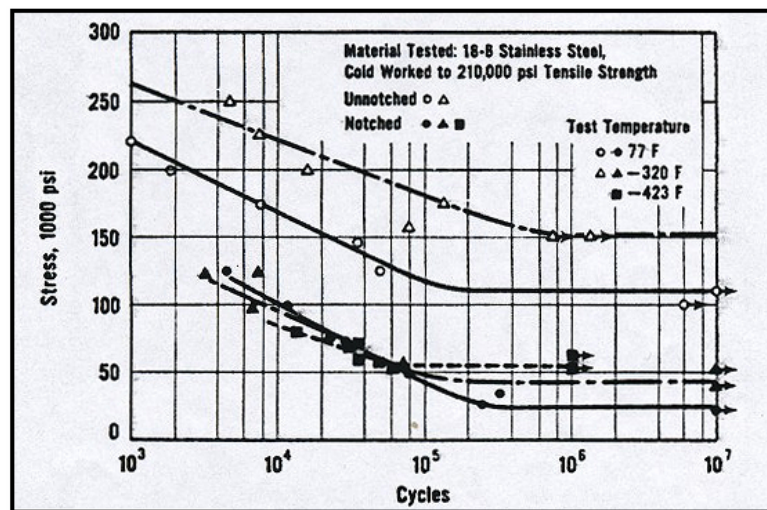


Figura 1.6. Resultados de ensayos de flexión rotativa de un acero 304 trabajado en frío <sup>(3)</sup>

En algunas aplicaciones criogénicas es deseable tener aceros con altas resistencias que puedan ser obtenidas con los aceros inoxidable austeníticos recocidos. Las altas resistencias pueden ser alcanzadas únicamente por trabajo en frío. En la figura 1.7 se muestra el efecto del trabajo en frío en los aceros inoxidable 304 y 304L. Como es de esperarse, el trabajo en frío logra un descenso leve en la tenacidad debido principalmente a la transformación de austenita a martensita que ocurre a las temperaturas criogénicas <sup>(3)</sup>.



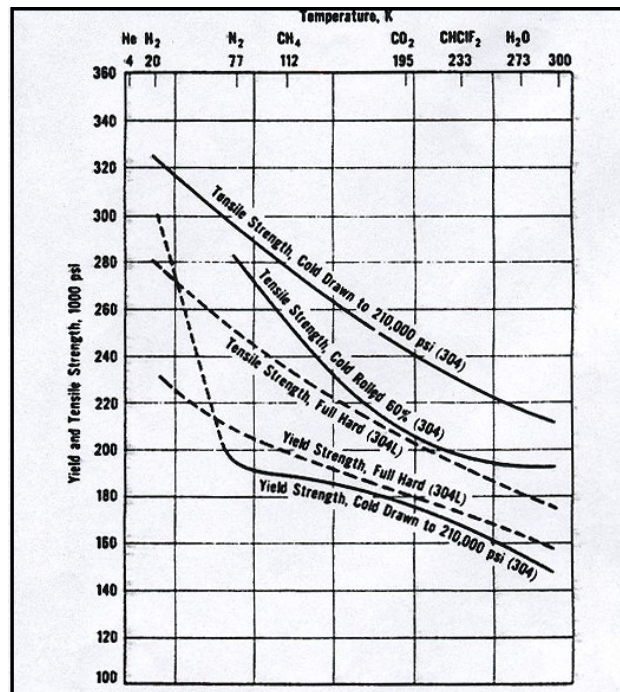


Figura 1.7. Efecto del trabajo en frío en los aceros inoxidables 304 y 304L <sup>(3)</sup>

Como fue mencionado, algunas propiedades físicas como densidad, expansión térmica, conductividad térmica y calor específico son de vital importancia para los diseñadores. La densidad incrementa considerablemente a medida que desciende la temperatura y, excepto para el acero 301, el incremento de la densidad es lineal. La conductividad térmica y el calor específico descienden con la disminución de la temperatura (Figuras 1.8 y 1.9). La expansión térmica es una propiedad particularmente importante en estructuras sometidas a temperaturas criogénicas debido a los grandes esfuerzos a los que pueden estar sometidas por los cambios de temperaturas. (Tabla 1.4) <sup>(3)</sup>.

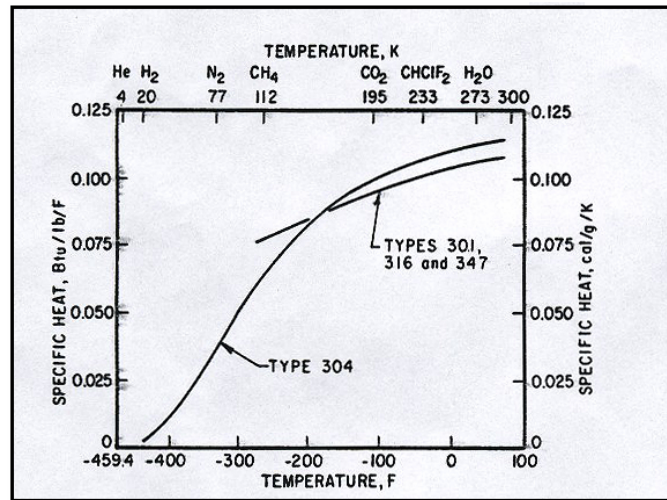


Figura 1.8. Efecto de la temperatura en el calor específico de los aceros inoxidables 304 y 304L<sup>(3)</sup>

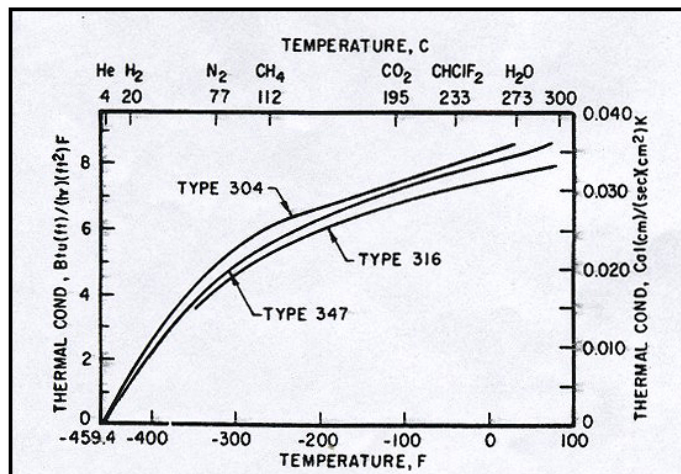


Figura 1.9. Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de los aceros inoxidables 304 y 304L<sup>(3)</sup>

AISI Type	Coefficients, in micro-in./in./°F			
	-300 F	-200 F	-100 F	0 F
	to 70 F	to 70 F	to 70 F	to 70 F
301	7.6	7.8	8.2	8.7
304	7.4	7.7	8.2	8.7
310	7.0	7.5	7.8	8.0
316	7.1	7.4	7.8	8.2
347	7.5	8.1	8.5	8.7

Tabla 1.4. Coeficiente de expansión térmica de distintos aceros inoxidables a varias temperaturas<sup>(3)</sup>



Con respecto a las aplicaciones, los aceros inoxidable austeníticos son usados casi exclusivamente para el transporte, almacenamiento y manejo de fluidos criogénicos donde la pureza es esencial así como el manejo de combustibles para cohetes. La superficie de los aceros inoxidable permanece químicamente limpia; no forman depósitos, tienen buenas características de flujo y son generalmente más resistentes a agentes corrosivos que cualquier otro material disponible comercialmente para los diseñadores. Además los aceros inoxidable austeníticos, en particular el 304, son populares para el uso criogénico en general debido a que son relativamente fáciles de fabricar y soldar, no requieren tratamientos térmicos después de la fabricación, y muestran resistencias relativamente altas con excelente estabilidad y tenacidad a muy bajas temperaturas <sup>(4)</sup>.

### ***1.2.2.- Otros aceros para usos a bajas temperaturas***

En el caso de un acero dulce sin entalla, la elongación y la reducción de área es aceptable hasta los -130°C y luego disminuye drásticamente. Se consigue casi exclusivamente en los aceros ferríticos que un descenso abrupto en el valor IZO-D ocurre a temperaturas cercanas a los cero grados centígrados. Para evitar la temperatura de transición en donde ocurre la fractura frágil se debe cumplir <sup>(4)</sup>:

- Una disminución en el contenido de carbono, menos de 0.15% es deseable.
- Una reducción en la velocidad de deformación.
- Una reducción en la profundidad de la entalla.
- Un incremento en el radio de la entalla, 6mm mínimo.
- Un incremento en el contenido de níquel, 9%.
- Una reducción en el tamaño de grano.
- Un incremento en el contenido de manganeso; la relación Mn/C debe ser mayor 21.

Un lijado de la superficie con un elemento de granulometría elevada (< 180) causa fragilización a -100°C debido a un endurecimiento superficial que es corregido por un temple a 650-700°C por una hora <sup>(4)</sup>. Este tratamiento superficial también

provee protección del inicio de la fractura frágil de estructuras soldadas removiendo los esfuerzos residuales.

El acero al 2.25% de níquel es igualmente utilizado para tanques, recipientes a presión, tuberías para propano licuado y para otras aplicaciones con una temperatura mínima de trabajo de  $-60^{\circ}\text{C}$  aceptada por la Norma ASTM A-300, tipo 2 <sup>(5)</sup>. Para trabajar a estas temperaturas el acero al 2.25% de níquel debe ser normalizado a  $900^{\circ}\text{C}$  y revenido depuse de la construcción a  $635^{\circ}\text{C}$ .

El acero al 3.5% níquel puede tener aplicaciones hasta la temperatura del etileno liquido ( $-103^{\circ}\text{C}$ ) por lo que es utilizado en todos aquellos elementos que tienen contacto con gas licuado, tales como propano, anhídrido carbónico, acetileno, etano y etileno y en las plantas productoras de plástico <sup>(5)</sup>. Sus excelentes propiedades a bajas temperaturas lo hacen ideal para tanques para el transporte de etileno líquido. Las características de este acero se encuentran en la Norma ASTM A.203 tipo D y E.

Un acero 4% Mn Ni es apropiado para fundiciones que se usarán por debajo de los  $-196^{\circ}\text{C}$ . Hay que ser cuidadosos de seleccionar láminas sin defectos superficiales y libres de entallas en el diseño y la fabricación.

Después de algunas catástrofes causadas por la selección errónea del material usado a estas temperaturas, se recurrió al uso de formulas precisas que lograron seleccionar materiales como el acero al 9% níquel para la fabricación de contenedores y tanques soldados.

Los estudios para el desarrollo de este material se iniciaron en The International Nickel Company en 1944 y ya desde 1952 se comenzó la fabricación de elementos y tanques para la producción y almacenamiento de oxígeno liquido.

Los aceros 9% níquel brindan una atractiva combinación de propiedades a un precio moderado <sup>(3)</sup>. Su excelente tenacidad se debe a una estructura de granos finos de níquel-ferrita desprovista de redes de carburos fragilizantes que son convertidos en formas estables de austenita en la solución durante un temple a  $570^{\circ}\text{C}$ . Este temple es particularmente importante debido a las bajas temperaturas de transformación ferrita-austenita.

Este acero esta en la Norma ASTM A-353 en dos tipos A y B, donde prevee que su utilización debe ser con una doble normalización y revenido. Visto que en la industria estos elementos son de un gran tamaño y se hace imposible el tratamiento térmico se realizaron diversos estudios los cuales arrojaron como resultado que se pueden utilizar estos materiales solo con los tratamientos de temple en agua y revenido.

Por sus excelentes propiedades y su bajo costo el acero 9% níquel esta siendo empleado en las industrias a nivel mundial, como ejemplo se pueden nombrar los tanques de almacenamiento de oxígeno liquido en los Estados Unidos que llegan a tener un diámetro de 15m y 17.5m de altura con una capacidad de 500.000 galones; en Francia este acero es utilizado para la construcción de barcos que transportan metano liquido.

Para la soldadura de este tipo de acero es usado en general la soldadura eléctrica con electrodos especiales con una alta cantidad de níquel combinados con un 15% Cr, 10% Fe, 1 o 2%Nb o también un 3% de Ti en el lugar del Nb. También da excelente resultado la soldadura en argón con cordón desnudo <sup>(3)</sup>.

Los materiales empleados en la fabricación de tuberías tienen más importancia en la industria del gas natural que en la industria petrolera. Por ejemplo, el gas comprimido se traslada entre -25°C a -4°C haciendo que el crecimiento de grietas y la fragilización sean un problema severo en ambientes frío. Alcanzar bajas temperaturas, lograr el control del tamaño de grano y tener bajos contenidos de azufre fueron los mayores problemas para el desarrollo de estos aceros desde que la parte económica tuvo que tomarse en cuenta.

Los aceros conformados en caliente presentan una buena oportunidad para disminuir tanto el peso como el costo y así reducir la relación costo-resistencia. A medida que la resistencia de los aceros de baja aleación y alta resistencia sube, la tenacidad usualmente baja.

Los aceros aleados con Molibdeno, Manganeso y Columbio son usados para este tipo de tuberías, el Molibdeno eleva la resistencia y la dureza <sup>(4)</sup>. El porcentaje de Carbono es reducido para hacer el columbio más soluble, y para mejorar la

soldabilidad y la resistencia al impacto. Los aceros con pequeñas y grandes cantidades de Columbio poseen una cinética de precipitación similar; una más alta resistencia es producida por una mayor cantidad de columbio. El columbio también genera endurecimiento, el cual es necesario para desarrollar una estructura ferrítica acircular. El Manganeso, junto con el Molibdeno ayuda a inhibir la transformación a ferrítica poligonal en el acero <sup>(4)</sup>.

Donde el azufre no puede mantenerse bajo, la adición de tierras raras controlará la forma de las inclusiones sulfatadas. Durante el trabajo en caliente, el refinamiento del grano mejora porque tiene un efecto sobre el anclaje del límite de grano. Este efecto hace posible la formación de una sub-estructura austenítica superior antes de la transformación lo cual ayuda a asegurar la transformación a finos granos ferríticos acirculares.

Además de ser usados en tuberías, estos aceros pueden emplearse en automóviles, rieles, equipos pesados, industria de la construcción y aplicaciones en áreas en las cuales la característica clave es el bajo costo por unidad de resistencia <sup>(4)</sup>.

***CAPÍTULO II***  
***Metodología del diseño***

### ***2.1.- Metodología del diseño***

El diseño es un proceso cuyo objetivo es transformar los recursos en sistemas o productos para la satisfacción de necesidades de cualquier índole, entendiéndose como recursos no solamente los materiales utilizados sino también, entre otros, el tiempo disponible para el diseño, la disponibilidad económica y los conocimientos tecnológicos <sup>(6)</sup>.

En ingeniería mecánica, el desarrollo de soluciones a un sinnúmero de necesidades se basa en el diseño de objetos, mecanismos y maquinas, haciendo uso en su mayor parte de las ciencias y del estudio de los materiales, aplicados a la ingeniería, así como de la termodinámica y mecánica de los fluidos. Todo esto debe ir de la mano de la creatividad y de un conocimiento profundo de las implicaciones y limitaciones involucradas en el proceso de diseño.

No se puede establecer una metodología estricta sobre la forma de diseñar, el fin es diseñar, el medio es aquel que más se adapte a cada individuo y a cada situación particular <sup>(7)</sup>, sin embargo, se pueden seguir ciertos pasos que facilitan la resolución del problema planteado. De manera general, las fases de la metodología éste diseño son <sup>(7)</sup>:

- Establecimiento de una necesidad.
- Concepción del sistema u objeto.
- Análisis de las propuestas.
- Diseño de detalles.
- Fabricación del prototipo.
- Puesta en funcionamiento y evaluación final.

### ***2.2.- Establecimiento de una necesidad***

El proceso de diseño parte, no de la existencia de un problema, sino de la voluntad de querer darle una solución, por lo que una definición apropiada de éste se traduciría en soluciones creativas y adaptadas a la realidad.

En esta primera fase se debe hacer un análisis exhaustivo de la necesidad y todo lo que ésta involucra para así poder enmarcar el problema y lograr enfocar de una forma más eficiente el esfuerzo, que en fases sucesivas, llevará a la solución definitiva.

Es bien conocido que las propiedades mecánicas de las aleaciones y materiales de ingeniería son en gran parte dependientes de la temperatura. Es así como se puede ver que materiales en condiciones de servicio que involucran desempeño a temperaturas ambientales presentan un excelente comportamiento en relación a propiedades tales como tenacidad de fractura, ductilidad, etc. Sin embargo en condiciones de servicio en donde estos materiales son expuestos a ambientes donde la temperatura es muy baja (como por ejemplo temperaturas criogénicas), mucho de este comportamiento se ve seriamente comprometido al extremo de presentar el fenómeno conocido como fractura frágil, de aquí la necesidad de estudiar los materiales bajo condiciones de ensayo a bajas temperaturas.

Dado que los dispositivos existentes para la realización de ensayos mecánicos a bajas temperaturas no existen en el mercado nacional y la posibilidad de adquisición en el extranjero representa una inversión bastante elevada, se presenta la necesidad de diseñar un dispositivo capaz de ser competitivo a nivel económico y que a su vez ofrezca notables mejoras respecto a los dispositivos similares existentes en el mercado.

Para lograr la competitividad económica se debe emprender la búsqueda de materiales que cumplan con los requerimientos establecidos, de acuerdo a sus condiciones de trabajo, y que a su vez tengan costos razonables y existan en el mercado nacional. Además de esto se debe seleccionar los procesos de fabricación más eficiente para cada pieza y así poder aminorar el costo final del prototipo.

Una vez realizado un estudio minucioso de los equipos existentes en el mercado se plantea lograr las siguientes mejoras en el dispositivo a desarrollar:

- Facilitar el montaje de la probeta a ensayar.
- Facilitar la incorporación del dispositivo a la maquina universales de ensayos.
- Reducir las dimensiones y por consiguiente el peso.

- Mejorar la hermeticidad.
- Mejorar la apariencia.
- Mejorar el sistema de control de temperatura empleando una termocupla de superficie que permite el monitoreo en el espécimen y no en la cámara.
- Crear una interfaz más amigable con el usuario.
- Diseñar sujetadores de probetas acordes con el dispositivo y con la maquina de ensayo.
- Incorporar un sistema de registro de datos de temperaturas respecto al tiempo.
- Ofrecer, además de ensayos a bajas temperaturas, la posibilidad de hacer ensayos a temperaturas elevadas.
- Ofrecer un equipo confiable y seguro.

### ***2.3.- Concepción del sistema.***

Al haber descrito el problema y determinado las características y limitaciones que el sistema a diseñar debe tener, se procede a la concepción del mismo, es decir a generar la mayor cantidad de alternativas posibles de solución para el sistema. Esta es la fase de diseño más creativa, porque se tiene una libertad muy grande de acción. Para que se logren resultados apropiados es necesario tener siempre presente la factibilidad de las soluciones propuestas. Para esta fase del diseño se empleará el método de la Tormenta de Ideas (Brainstorming)<sup>(7)</sup>.

#### ***2.3.1.- Tormenta de Ideas.***

Este método consiste en reunir un grupo de entre cuatro a doce personas para trabajar sobre un problema, haciendo que los participantes generen ideas y las expongan en la forma más espontánea posible, para evitar que las mismas sean evaluadas o enjuiciadas internamente por las personas. Debe buscarse cantidad de ideas ya que esto generará calidad. Además, se debe promover entre los miembros del grupo la construcción sobre las ideas de los otros, para desembocar en ideas superiores a las iniciales<sup>(7)</sup>.



Para el caso de este trabajo, el diseño se separará en tres conjuntos diferentes: cámara para ensayos mecánicos a bajas temperaturas, sistema de sujeción de la cámara para su soporte y acople a la maquina Instron 8502 y los extensores que sujetarán la probeta dentro de la cámara.

A continuación se presentan las distintas propuestas obtenidas al aplicar este método:

### ***2.3.1.1.- Propuesta N° 1***

- Cámara: la propuesta contempla una cámara de forma cilíndrica vertical y que encerrará la probeta y los extensores. Tendrá una puerta con visor, que coincidirá con la parte frontal de la máquina Instron. Estará construida de acero inoxidable. Contará con una bomba para generar vacío dentro de la cámara con el fin de aislar la probeta, y así mejorar la eficiencia del sistema de enfriamiento. Este sistema estará conformado por una pieza cilíndrica hueca, dentro de la cual se hará circular nitrógeno líquido. El fluido criogénico estará en contacto directo con uno de los extremos de la probeta (figura 2.2 a). La temperatura será controlada mediante el uso de unas resistencias colocadas alrededor de la pieza cilíndrica de sujeción. Para la automatización del proceso, el equipo estará provisto de un controlador lógico programable PLC.
- Sistema de sujeción: consiste en dos brazos paralelos de acero que estarán articulados en un extremo sobre un eje vertical anclado a la máquina Instron, mientras que en su otro extremo soportarán la cámara por su parte posterior.
- Extensores: la pieza cilíndrica del sistema de enfriamiento servirá como extensor superior ya que posee una lengüeta sobre la cual la mordaza de la maquina Instron ejercerán presión. El extensor inferior será geoméricamente similar al superior con la diferencia que éste es macizo y no cumplirá ninguna función en cuanto al enfriamiento de la probeta

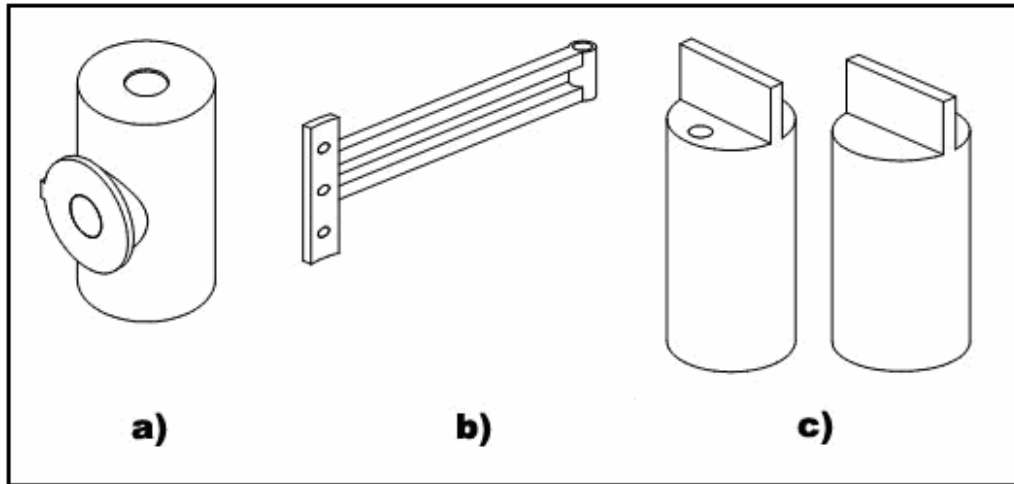


Figura 2.1. Propuesta N°1: a) Cámara, b) Sistema de sujeción y c) Extensores

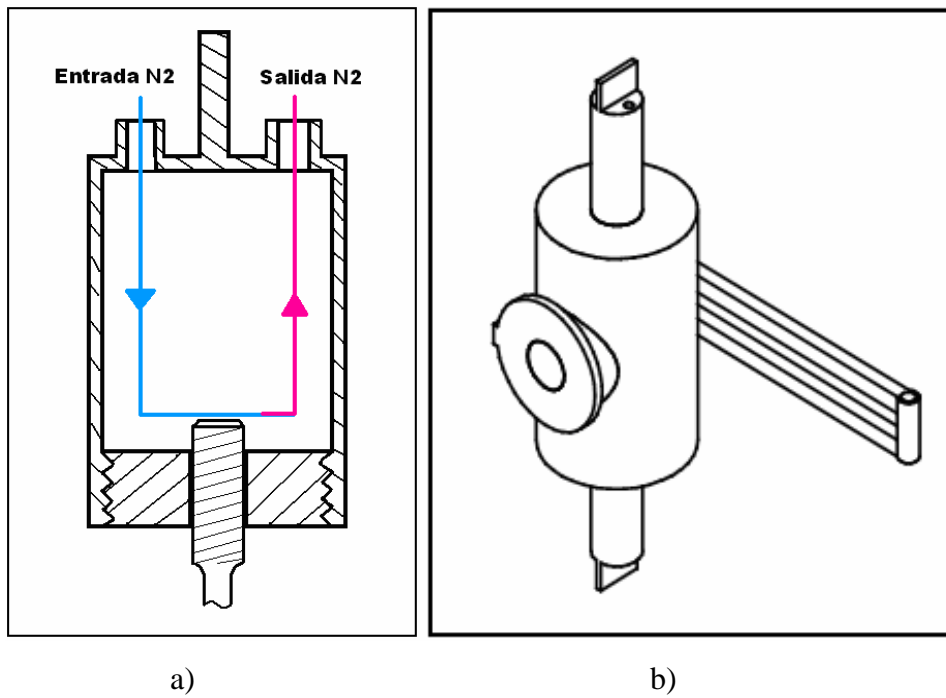


Figura 2.2. Propuesta N° 1: a) Detalle del extensor con el sistema de enfriamiento, b) Ensamble de la propuesta

### 2.3.1.2.- Propuesta N° 2

- Cámara: será de forma cilíndrica vertical y encerrará la probeta y los extensores. Este cilindro estará seccionado longitudinalmente con el fin de formar dos medios cilindros idénticos que al separarse permiten acoplar la probeta y los extensores a la máquina Instron de una forma sencilla. Se empleará el mismo sistema para el enfriamiento de la probeta con nitrógeno líquido usado en la Propuesta N° 1 junto con la inyección de un gas inerte (por ejemplo argón) en el interior de la cámara una vez cerrada, para evitar la formación de hielo alrededor de la probeta ya que será desplazado todo el aire húmedo. Para la automatización del proceso, el equipo estará provisto de un controlador lógico programable PLC.
- Sistema de sujeción: éste estará formado por una barra de acero, el cual en un extremo podrá girar sobre un eje vertical anclado a la máquina Instron, mientras que en el otro tendrá dos brazos más pequeños articulados individualmente que soportarán a cada una de las mitades de la cámara, permitiendo separarlas o unir las.
- Extensores: serán similares a los expuestos en la Propuesta N° 1.

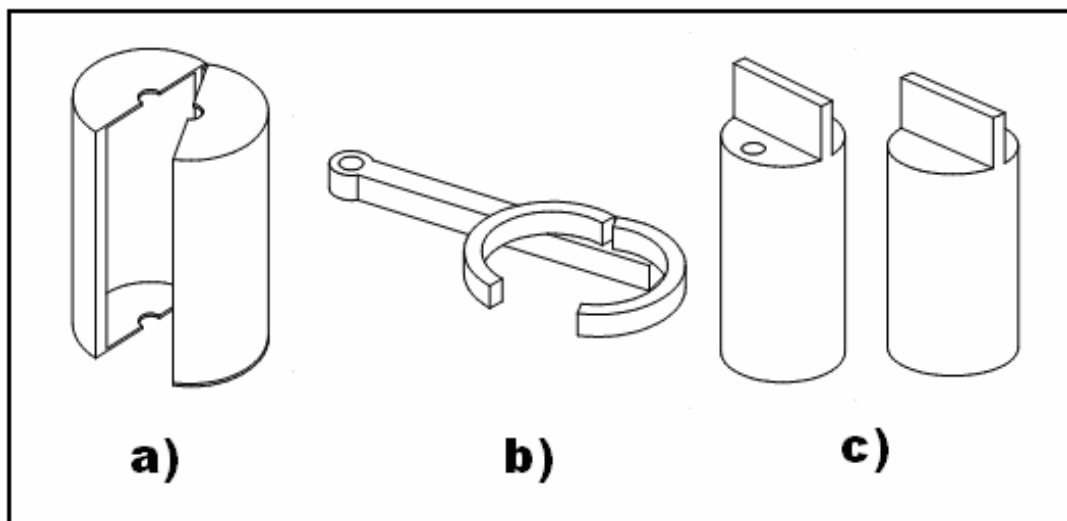


Figura 2.3. Propuesta N° 2: a) Cámara, b) Sistema de sujeción y c) Extensores

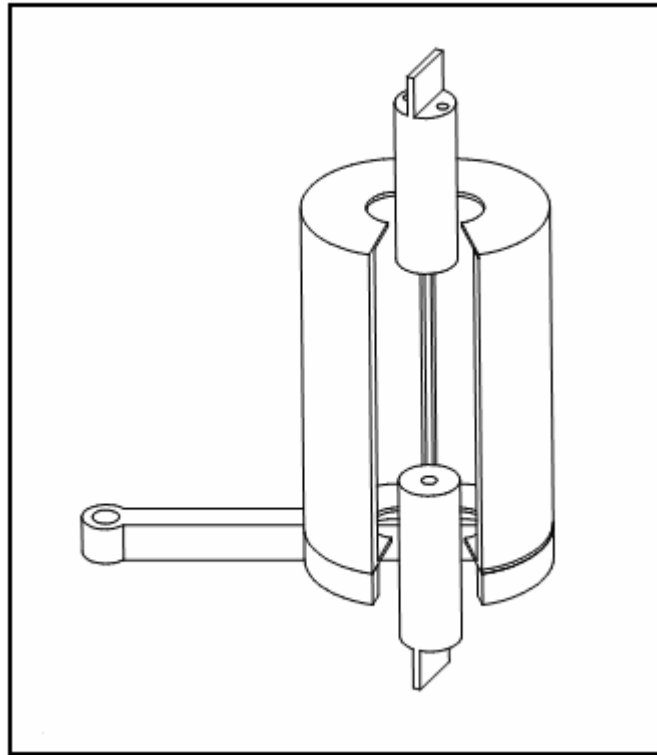


Figura 2.4. Ensamble de la Propuesta N° 2

### 2.3.1.3.- Propuesta N° 3

- Cámara: será de base cuadrada y encerrará la probeta y los extensores. Estará formada por dos cajas concéntricas donde el espacio que quedará entre ellas albergará poliuretano expandido que servirá de aislante térmico. Estará construida de acero inoxidable y tendrá una puerta en la cara frontal. Para facilitar el montaje de las probetas la cámara contará con dos piezas removibles en las caras superior e inferior que permitirán que la probeta con los extensores se posicione en el interior de la cámara de una manera sencilla. Para el enfriamiento de la probeta se inyectará dentro de la cámara nitrógeno líquido, que al pasar a su fase gaseosa se dará un proceso de transferencia de calor por convección entre dicho gas y la probeta. Tendrá instalado un ventilador que, al recircular el nitrógeno gas, asegurará la homogeneidad de la

temperatura dentro de la cámara. Para la automatización del proceso, el equipo estará provisto de un controlador lógico programable PLC.

- Sistema de sujeción: éste estará formado por dos barras que estarán articuladas entre si, una de ellas podrá girar sobre un eje vertical anclado a la máquina Instron mientras que la otra servirá de apoyo a la cámara. Este brazo estará articulado en tres puntos distintos lo cual dará una gran libertad de movimientos que lograrán hacer del montaje una acción sencilla.
- Extensores: esta formado por un eje que en uno de sus extremos sujetará al portaprobetas mientras el otro estará acoplado a otra pieza a través de un pasador. Esta pieza en su parte inferior posee una lengüeta sobre la cual la mordaza de la maquina Instron ejercerá presión.

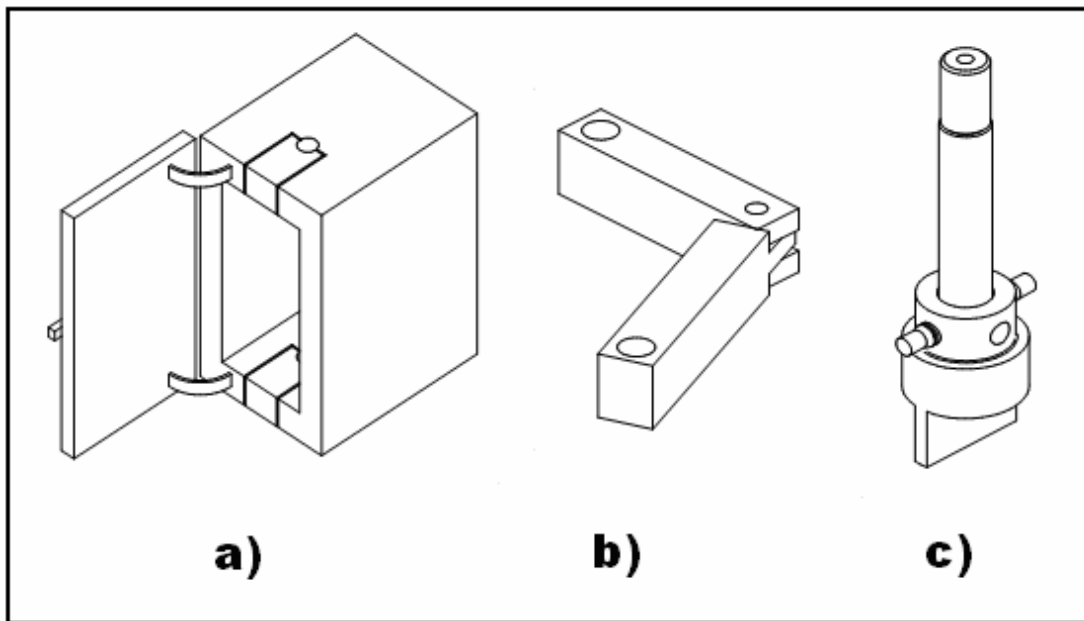


Figura 2.5. Propuesta N° 3: a) Cámara, b) Sistema de sujeción y c) Extensores

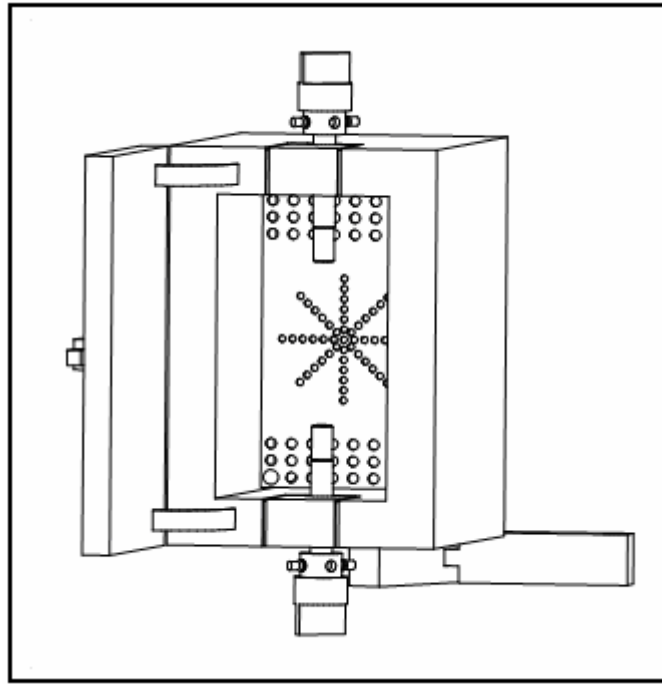


Figura 2.6. Ensamble de la Propuesta N° 3

#### ***2.3.1.4.- Propuesta N° 4***

- Cámara: será básicamente igual a la de la Propuesta N° 3 con la diferencia que la refrigeración de la probeta se hará con un sistema en cascada para llevar el aire que esta dentro de la cámara a la temperatura deseada de ensayo.
- Sistema de sujeción: la cámara será colocada en su posición mediante un sistema de rieles que estarán apoyados sobre la máquina Instron.
- Extensores: esta formado por un eje que en uno de sus extremos sujetará al portaprobetas mientras el otro estará acoplado a un disco que será sujeta a la maquina Instron mediante pernos.

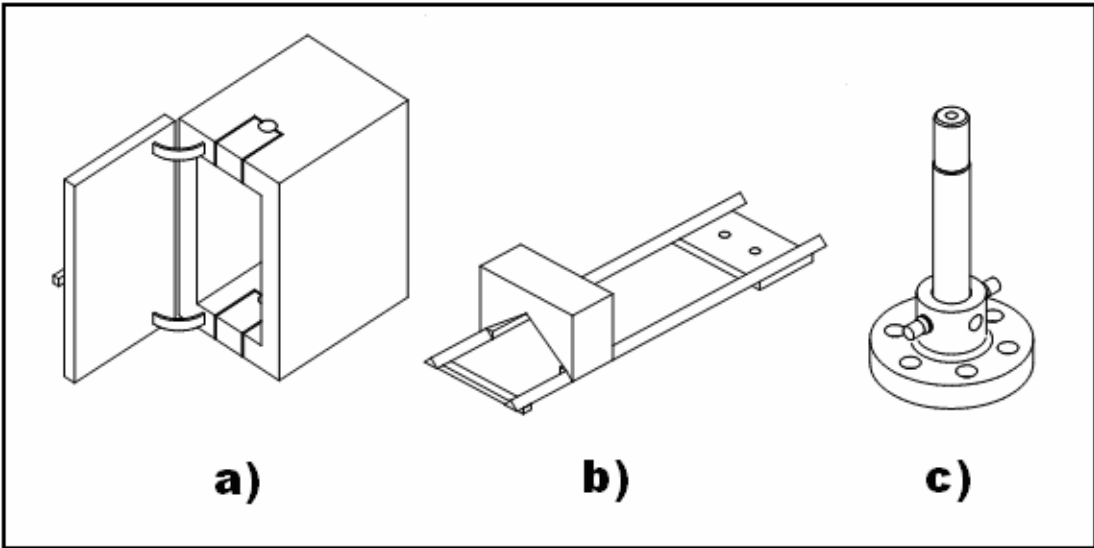


Figura 2.7. Propuesta N° 4: a) Cámara, b) Sistema de sujeción y c) Extensores

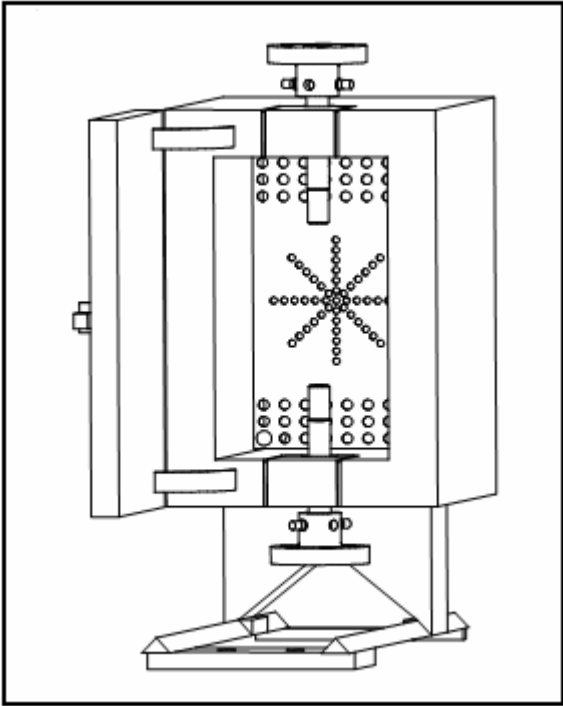


Figura 2.8. Ensamble de la Propuesta N° 4

### 2.3.1.5.- Propuesta N° 5

- Cámara: será de base cuadrada y encerrará la probeta y los extensores. Esta cámara estará dividida en la mitad formando dos partes idénticas que al separarse permiten acoplar la probeta y los extensores a la máquina Instron de una forma sencilla. Cada mitad estará formada por dos cajas concéntricas donde el espacio que quedará entre ellas albergará poliuretano expandido que servirá de aislante térmico. La probeta se enfriará utilizando el mismo sistema expuesto en la propuesta N° 3. Para la automatización del proceso, el equipo estará provisto de un controlador lógico programable PLC.
- Sistema de sujeción: consiste en dos brazos paralelos de acero que estarán articulados en un extremo sobre un eje vertical anclado a la máquina Instron, mientras que en su otro extremo soportarán la cámara por su cara lateral.
- Extensores: serán similares a los expuestos en la Propuesta N° 1.

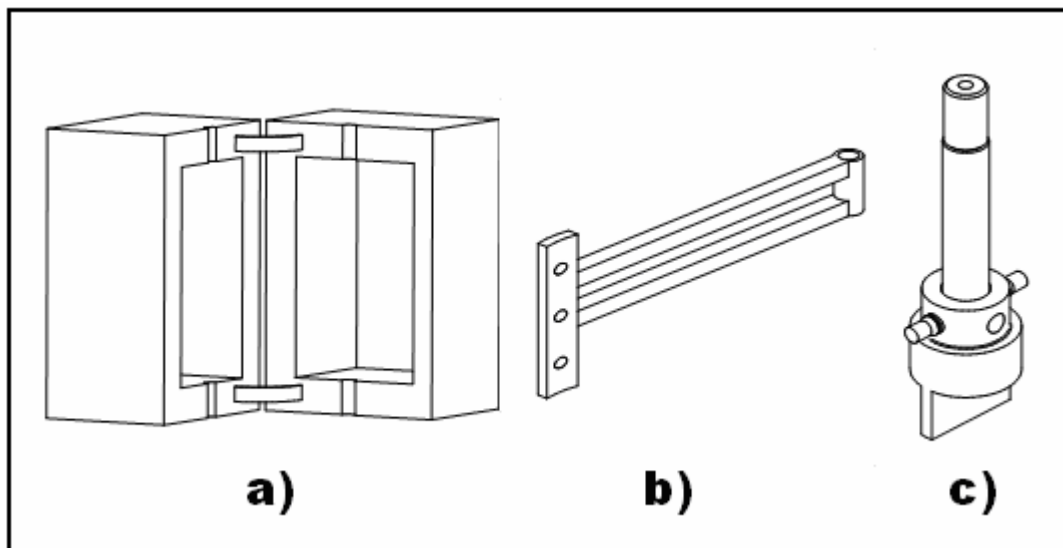


Figura 2.9. Propuesta N° 5: a) Cámara, b) Sistema de sujeción y c) Extensores



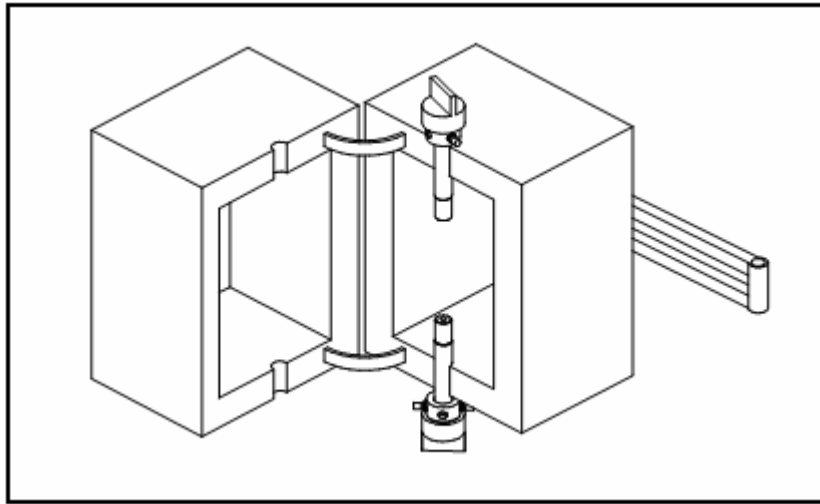


Figura 2.10. Ensamble de la Propuesta N° 5

#### ***2.4.- Análisis de las propuestas***

Una vez culminada la “Tormenta de Ideas” y obtenidas las posibles soluciones al problema planteado, cada una de ellas será evaluada en base a parámetros que permitirán compararlas con el fin de seleccionar la solución más acertada.

El análisis de las propuestas debe iniciar con la selección de los parámetros y la determinación de su importancia, junto con la predicción del funcionamiento de las soluciones con respecto a tales parámetros. Una vez hecho esto, se procede a comparar y evaluar las alternativas mediante la elaboración de una matriz morfológica que arrojará la mejor propuesta.

##### ***2.4.1.- Parámetros a evaluar***

Los parámetros que se evaluarán posteriormente en la matriz morfológica serán seleccionados basándose en los criterios más relevantes en el diseño en ingeniería mecánica. A continuación se definen dichos parámetros:

- *La confiabilidad:* es la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un cierto período de tiempo<sup>(8)</sup>.

- *La operabilidad:* es la facilidad con que un equipo en particular puede ser manejado por un operador o por un sistema automatizado <sup>(8)</sup>.
- *La disponibilidad:* es la cantidad de tiempo total que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. La disponibilidad de un equipo no implica necesariamente que esté funcionando, sino que se encuentra en condiciones de funcionar <sup>(6)</sup>.
- *Mantenimiento:* es la facilidad que ofrece el equipo para realizar las tareas necesarias con el fin de conservarlo o restaurarlo, de manera que pueda permanecer de acuerdo con una condición especificada <sup>(8)</sup>.
- *Seguridad:* se refiere a la probabilidad de que ocurran imprevistos o accidentes que pongan en riesgo la integridad física del operador <sup>(9)</sup>.
- *Fabricación:* determina la facilidad del proceso de construcción de cada elemento del equipo por separado y su posterior ensamblaje <sup>(6)</sup>.
- *Estilo:* una vez construido y probado el equipo, el siguiente paso puede ser la comercialización del mismo, por lo que es necesario tomar en consideración que el aspecto visual sea atractivo, sobrio y elegante.
- *Ergonomía:* propiedad por la cual, un equipo es cómodo de utilizar, adaptándose al usuario <sup>(9)</sup>.
- *Adquisición de los componentes:* es la facilidad para hallar los elementos necesarios para la fabricación del equipo en el mercado nacional y, de ser necesario, el internacional.
- *Peso:* un equipo pesado trae como consecuencia dificultades en su traslado y operabilidad, por lo que un diseño liviano es el más apropiado <sup>(8)</sup>.
- *Tamaño:* se refiere al espacio que ocupará el equipo en su lugar de trabajo. Un diseño compacto evitará en gran medida la interferencia con los demás equipos o actividades que se desarrollarán alrededor del mismo <sup>(8)</sup>.
- *Tiempo de construcción:* tiempos de construcción reducidos ayudan a disminuir el costo total del equipo ayudando en su competitividad al momento de comercializarlo.

- *Costo total del equipo:* se refiere a los recursos empleados a lo largo del diseño, construcción y puesta en funcionamiento del equipo como por ejemplo el tiempo y la disponibilidad económica.

#### **2.4.2.- Matriz Morfológica.**

Una vez definidos los parámetros a evaluar, la matriz morfológica se elabora a partir de la asignación de un porcentaje a cada uno de éstos, según su importancia. Se establecerá una escala de evaluación para dichos parámetros que posteriormente serán multiplicados por los porcentajes antes mencionados. Se sumarán todos los resultados de cada propuesta con el fin de compararlas y el diseño que obtenga el mayor valor será el seleccionado.

Cada parámetro será evaluado empleando la siguiente escala:

- La menos apropiada (1).
- Poco apropiada (2).
- Apropiada (3).
- Muy apropiada (4).
- La más apropiada (5).

A continuación se presentan los porcentajes asignados a cada parámetro de evaluación:

Parámetros	Porcentaje ( % )
Seguridad	12
Confiabilidad	12
Disponibilidad	11
Operabilidad	11
Costos de fabricación	10
Fabricación	8
Adquisición de componentes	8
Mantenimiento	7
Ergonomía	7
Tiempo de construcción	5
Tamaño	3
Peso	3
Estilo	3

Tabla 2.1. Porcentajes asignados a cada parámetro de evaluación

A continuación se presenta la matriz morfológica de las propuestas:

Parámetros	( % )	<i>Prop.1</i>		<i>Prop.2</i>		<i>Prop.3</i>		<i>Prop.4</i>		<i>Prop.5</i>	
		Ptos	Valor	Ptos	Valor	Ptos	Valor	Ptos	Valor	Ptos	Valor
<i>Confiabilidad</i>	12	3	0,36	3	0,36	4	0,48	2	0,24	4	0,48
<i>Seguridad</i>	12	3	0,36	3	0,36	4	0,48	4	0,48	3	0,36
<i>Disponibilidad</i>	11	3	0,33	4	0,44	4	0,44	2	0,22	4	0,44
<i>Operabilidad</i>	11	2	0,22	2	0,22	4	0,44	3	0,33	4	0,44
<i>Costos de fabricación</i>	10	2	0,2	2	0,2	3	0,3	2	0,2	3	0,3
<i>Fabricación</i>	8	1	0,08	1	0,08	3	0,24	2	0,16	2	0,16
<i>Adqui. de componentes</i>	8	2	0,16	3	0,24	3	0,24	3	0,24	3	0,24
<i>Mantenimiento</i>	7	3	0,21	3	0,21	4	0,28	2	0,14	3	0,21
<i>Ergonomía</i>	7	2	0,14	3	0,21	4	0,28	3	0,21	3	0,21
<i>Tiempo de construcción</i>	5	3	0,15	2	0,1	3	0,15	3	0,15	2	0,1
<i>Tamaño</i>	3	4	0,12	3	0,09	3	0,09	1	0,03	2	0,06
<i>Peso</i>	3	4	0,12	4	0,12	3	0,09	1	0,03	3	0,09
<i>Estilo</i>	3	2	0,06	3	0,09	5	0,15	3	0,09	4	0,12
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>		<b>2,51</b>		<b>2,72</b>		<b>3,66</b>		<b>2,52</b>		<b>3,21</b>

Tabla 2.2 Matriz morfológica

### 2.4.3.- Toma de decisiones

Una vez construida la matriz morfológica, y observados los resultados de la evaluación de los parámetros, se puede notar que la propuesta N° 3 fue la que obtuvo mayor puntuación, por lo que será el diseño que se desarrollará en los siguientes capítulos.

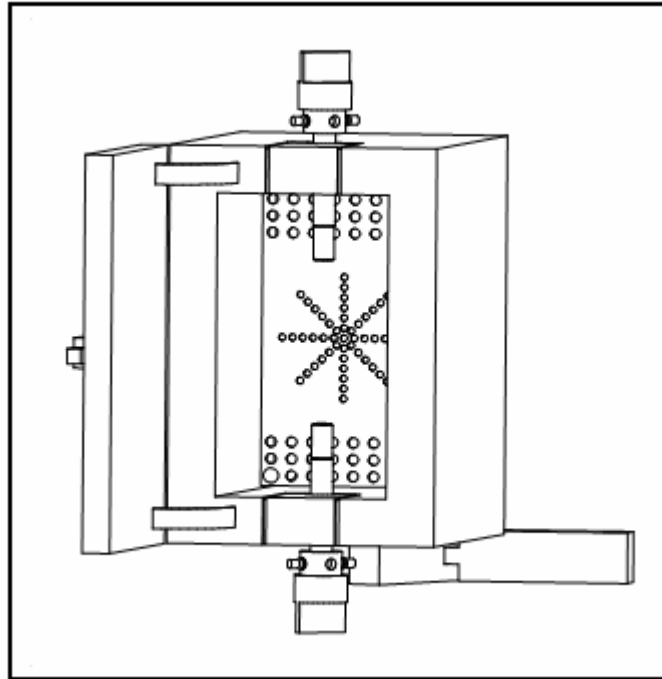


Figura 2.11. Propuesta seleccionada

### 2.5.- Ingeniería de detalles

En esta fase del proceso del diseño se estudiarán de manera exhaustiva todos los elementos que componen la propuesta seleccionada anteriormente. Todas aquellas consideraciones y cálculos necesarios para asegurar un desempeño óptimo serán realizados en esta sección, como por ejemplo determinación de la geometría de las piezas, cálculos de resistencia mecánica y diseño de todos aquellos elementos que no fueron considerados en la fase de concepción del sistema pero que son esenciales para el correcto funcionamiento del equipo. En el capítulo III se hará este estudio exhaustivo.

### ***2.6.- Fabricación del prototipo***

Al haber definido todos los detalles del diseño, se procede a la elaboración de los planos definitivos de todos los elementos que deberán ser fabricados según las especificaciones establecidas, así como, la selección de los materiales a ser utilizados y los procesos de fabricación que se emplearán. Se definirán todas aquellas piezas y equipos a ser comprados y que posteriormente serán ensamblados junto con las demás piezas fabricadas. Todas estas decisiones serán tomadas con el asesoramiento del personal que se encargará de la fabricación con el fin de optimizar y disminuir costos de dicho proceso.

### ***2.7.- Puesta en funcionamiento y evaluación final***

Una vez fabricado el prototipo y determinada la mejor manera de producirlo, se realizan pruebas para verificar su funcionamiento. Es aquí donde se deben hacer los ajustes finales y así dar por concluido el proceso de diseño. Esta es la fase final, donde se describen detalladamente las especificaciones finales en un manual de operaciones y se propone el diseño como una máquina para comercializar.

***CAPÍTULO III***  
***Desarrollo del dispositivo***

### ***3.1.- Desarrollo del equipo***

Una vez realizada la selección del diseño base, se estudiarán de manera exhaustiva todos los elementos que componen la propuesta realizando las consideraciones y cálculos necesarios para asegurar un desempeño óptimo, además del diseño de todos aquellos elementos que no fueron considerados en la fase de concepción del sistema pero que son esenciales para el correcto funcionamiento del equipo. Es aquí donde se da inicio a un proceso iterativo cuando, una vez planteado un sistema en particular, se pasa a un análisis en profundidad del mismo y, posteriormente, éste se evalúa para determinar si se ha llegado a un diseño adecuado. Si no se logra esta condición se deberá volver al inicio de este proceso tantas veces como sea necesario hasta que se cumplan las expectativas.

En el capítulo anterior se seleccionó como diseño definitivo la propuesta N° 3, por lo que a continuación se procederá a realizar los cálculos pertinentes para asegurar su correcto funcionamiento.

### ***3.2.- Descripción general del equipo***

El dispositivo para realizar ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas que se pretende desarrollar en este trabajo, basa su funcionamiento en la inyección de nitrógeno líquido (temperatura de ebullición a presión atmosférica de  $-196^{\circ}\text{C}$ ) en el interior de cámara, donde éste pasa a fase gaseosa convirtiéndose en el fluido encargado de la transferencia de calor con la probeta. Este nitrógeno gas será recirculado, para asegurar la homogeneidad de la temperatura dentro de la cámara y facilitar la transferencia de calor por convección. La cámara estará provista de un agujero que permitirá la salida del nitrógeno gas para evitar la presurización de la misma. Los elementos que forman parte de la cámara de ensayos son:

- Inyector
- Ventilador
- Válvula solenoide
- Resistencia
- Sensor de temperatura



- Las secciones removibles
- Goma
- Aislante
- Controlador PLC

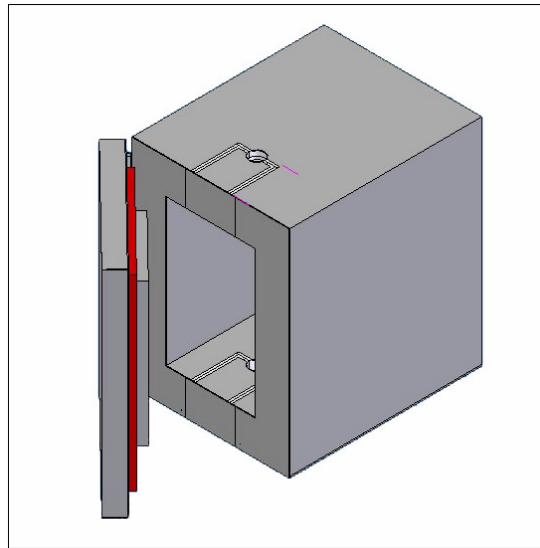


Figura 3.1. Esquema de la cámara de ensayos

El sistema de sujeción para el dispositivo estará formado por dos barras que estarán articuladas entre sí, una de ellas podrá girar sobre un eje vertical anclado a la máquina Instron mientras que la otra servirá de apoyo a un disco que sujetará la cámara por su parte inferior. Este brazo estará articulado en tres puntos distintos lo cual dará una gran libertad de movimientos que lograrán hacer del montaje una acción sencilla.

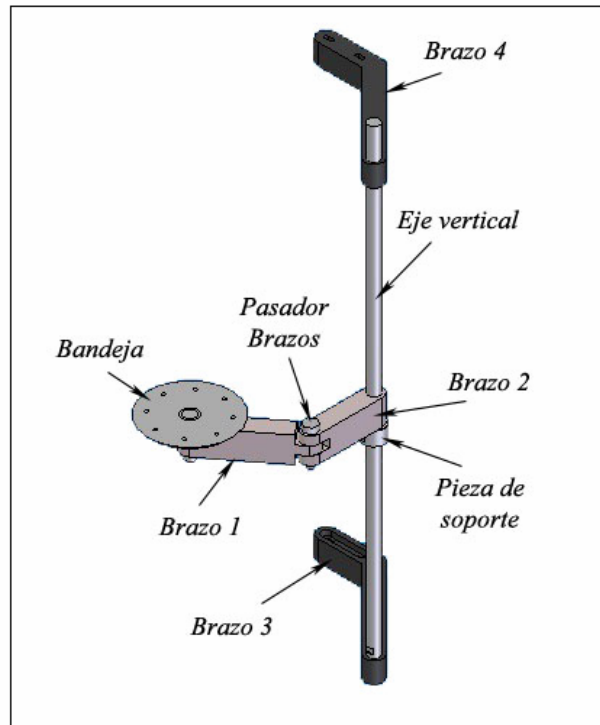


Figura 3.2. Esquema del sistema de sujeción

Los extensores estarán formados por un eje que en uno de sus extremos sujetará al portaprobetas mientras el otro estará acoplado a otra pieza a través de un pasador. Esta pieza en su parte inferior posee una lengüeta que servirá para que las mordazas de la máquina Instron aprieten sobre ellas.

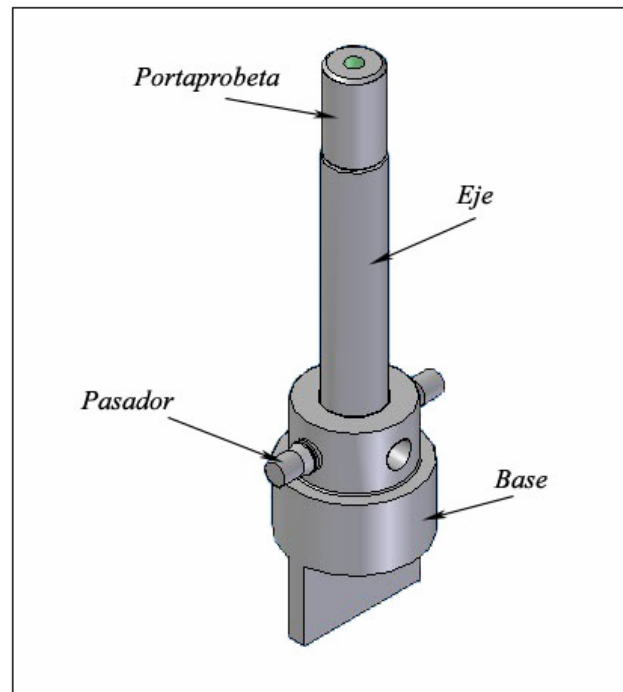


Figura 3.3. Esquema de los extensores

### 3.3.- Cálculo y selección de los elementos que conforman el equipo

El desempeño de un elemento de maquina va directamente asociado a la resistencia del material con el que está fabricado. Las tablas de las propiedades de los materiales de ingeniería no informan sobre las resistencias de las partes, ya que ésta no depende de que esa parte se someta a su carga proyectada <sup>(10)</sup>.

Una carga estática es una fuerza estacionaria o un par de torsión que se aplica a un elemento. Para ser estacionaria, la fuerza o el par de torsión no deben cambiar su magnitud, ni el punto de aplicación, ni su dirección. Una carga estática produce tensión o compresión axial, una carga cortante, una carga flexionante, una carga torsional o cualquier combinación de éstas.

En este capítulo se considera la relación entre la resistencia y la carga estática de un elemento, con objeto de tomar decisiones respecto al material, geometría y confiabilidad de las piezas que componen el dispositivo.

La falla de un elemento puede significar que una parte se ha separado en dos o más piezas; se ha distorsionado permanentemente, arruinando de esta manera su geometría; se ha degradado su confiabilidad; o se ha comprometido su función, por cualquier razón. Para la predicción de fallas en los elementos de este diseño se utilizará la *hipótesis de la energía de deformación* o *hipótesis de von Mises-Hencky* que predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total en un volumen unitario (esfuerzo de von Mises  $\sigma'$ ) alcanza o excede la energía de deformación en el mismo volumen correspondiente a la resistencia de fluencia en compresión o en tensión. El esfuerzo de von Mises para la condición de esfuerzo plano está dado por:

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (\text{Ec. 1})$$

En condiciones generales, el estado de esfuerzo en un punto está caracterizado por seis componentes independientes de esfuerzo normal y cortante las cuales actúan sobre las caras de un elemento de material localizado en el punto, sin embargo, este estado de esfuerzo no se presenta a menudo en la práctica de la ingeniería por lo que se trata de estudiar el esfuerzo generado en un elemento mecánico en un solo plano; de esta simplificación se obtiene el estado de esfuerzo plano.

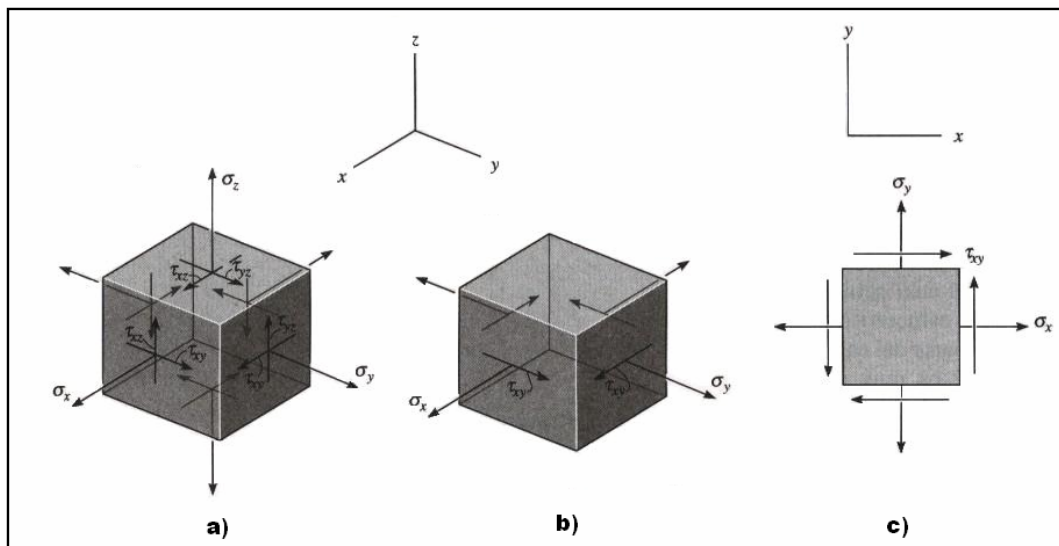


Figura 3.4. Estados de esfuerzo: a) general, b) plano y c) plano (vista bidimensional) <sup>(11)</sup>

Cada elemento será dimensionado y calculado según las condiciones de trabajo en las que se encuentre, planteando modelos aproximados que ayudan a la estimación de los esfuerzos generados por las cargas presentes, con el fin de predecir la ocurrencia de una falla.

Como se ha venido haciendo en el capítulo anterior, la selección y el cálculo de los componentes se separará en tres conjuntos: cámara de ensayos, sistema de sujeción y extensores.

### ***3.3.1.- Cámara de ensayos.***

#### ***3.3.1.1.- Estructura***

Son todas aquellas partes que sirven de esqueleto y dan forma a la cámara de ensayos, brindando soporte a los demás accesorios que tendrá el dispositivo. La estructura se compondrá básicamente de dos cajas concéntricas de acero donde el espacio existente entre ellas será ocupado por un material aislante.

Para la selección de las medidas de la cámara se tomó en cuenta las limitaciones de espacio en las condiciones de trabajo del dispositivo, como por ejemplo la distancia máxima entre las mordazas y entre las columnas de la maquina Instron 8502, así como las dimensiones de las probetas a ensayar y la de los extensores.

Se emplearán láminas de acero inoxidable 304 de  $3mm$  de espesor tanto para la base como para la pared posterior externas para dar rigidez a la estructura mientras que para el resto se utilizará láminas de  $1,2mm$  de espesor. La caja interna de la cámara tendrá  $320mm$  de alto,  $200mm$  de ancho y  $350mm$  de profundidad. Las dimensiones de la caja externa dependen directamente del espesor de aislante que se empleará, por lo que éste será el punto que se estudiará a continuación

Con el fin de reducir considerablemente la ganancia de calor a través de las paredes del dispositivo, así como para garantizar que en las paredes exteriores de la cámara se pueda tener una temperatura segura se utilizará un material aislante que se colocará en el espacio que existe entre las cajas concéntricas, así como en el interior de la puerta.

Se utilizará poliuretano expandido de conductividad térmica  $0.026\text{W/m.K}$  <sup>(21)</sup> como material aislante. Con el empleo de este tipo de material se asegura que todo el espacio será ocupado por el aislante, ya que éste se introduce de forma líquida en la cámara.

La obtención del espesor óptimo de aislante se realiza siguiendo los pasos a continuación expuestos:

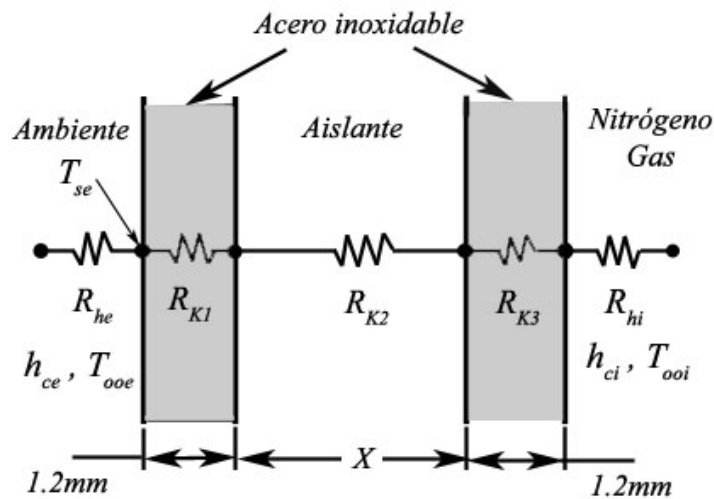


Figura 3.5. Esquema de una de las paredes de la cámara con su respectivo circuito térmico equivalente.

Dado que existe una analogía entre la difusión de calor y la conducción eléctrica, es posible simular las resistencias térmicas de un sistema como un circuito eléctrico. Es aquí donde se propone el circuito térmico equivalente de las paredes de la cámara de ensayos que se muestra en la figura 3.5. Éste está compuesto, de izquierda a derecha, por las resistencias térmicas del aire ambiental, la pared exterior de acero inoxidable, el aislante térmico, la pared interior de acero inoxidable y el nitrógeno gas que se encuentra en el interior de la cámara.

Para la realización de los cálculos de transferencia de calor referentes al espesor de aislante a utilizar, se partió de las siguientes suposiciones <sup>(12)</sup>:

- El calor se transfiere en condiciones unidimensionales de estado estable, es decir, hay transferencia sólo en la dirección normal a las paredes de la cámara y la temperatura en cada punto del sistema es independiente del tiempo.
- El intercambio de radiación entre la superficie externa de la cámara y los alrededores es insignificante.
- No existe generación interna de calor.
- En el interior de la cámara se encuentra sólo nitrógeno en estado gaseoso a una temperatura de  $-150^{\circ}\text{C}$ .
- Por la seguridad de los usuarios y operadores, se define una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  en la superficie exterior de la cámara.
- Una temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ .
- Un coeficiente convectivo de transferencia de calor para el aire quieto en el exterior de la cámara de  $7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$  <sup>(13)</sup>
- Un caudal de aire en el ventilador de  $100 \text{pcm}$

Los datos que se tienen son los siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 T_{\infty e} = 25^{\circ}\text{C} & Q = 100 \text{pcm} = 0.0472 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\
 T_{\infty i} = -150^{\circ}\text{C} & D_{\text{vent}} = 6'' = 153 \text{mm} \\
 T_{se} = 10^{\circ}\text{C} & h_{ce} = 7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}
 \end{array}$$

A partir de las tablas 4.2 y 4.7 de este trabajo se obtienen los valores de la conductividad térmica del acero inoxidable  $K_1 = K_3 = 16.2 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  y del poliuretano expandido  $K_2 = 0.026 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ , respectivamente.

De las tablas del apéndice A <sup>(12)</sup> obtenemos los valores de la conductividad térmica, la viscosidad cinemática y el número de Prandtl del nitrógeno a  $-150^{\circ}\text{C}$  ( $123\text{K}$ ):

$$K_N = 11.57 \cdot 10^{-3} \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\nu_{N(123K)} = 3.13 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$Pr_{N(123K)} = 0.764$$

Ahora, la transferencia de calor se determina mediante la consideración por separado de cada elemento en el sistema de la figura 3.5. Como el calor es constante a lo largo de todo el enmallado, éste se puede definir en términos de la diferencia total de temperatura como

$$q_T = \frac{T_{\infty e} - T_{\infty i}}{R_T} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde,  $q_T$  será la transferencia de calor a lo largo de todas las paredes de la cámara y  $R_T$  será la resistencia térmica total y viene dada por la suma de las resistencia individuales de cada elemento del sistema

$$R_T = R_{he} + R_{K1} + R_{K2} + R_{K3} + R_{hi} \quad (\text{Ec. 3})$$

Para transferencia de calor por convección, la ecuación de la resistencia térmica es

$$R_{convección} = \frac{1}{h_c \cdot A} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde  $h_c$  es el coeficiente convectivo y  $A$  es el área normal a la dirección de la transferencia de calor, mientras que para transferencia de calor por conducción, la ecuación es

$$R_{conducción} = \frac{L}{K \cdot A} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde  $L$  es el espesor de la pared,  $K$  es la conductividad térmica del material y  $A$  es el área normal a la dirección de la transferencia de calor.

Al sustituir las ecuaciones 4 y 5 en la ecuación 3, y ésta a su vez en la ecuación 2 nos queda:



$$q_T = \frac{T_{\infty e} - T_{\infty i}}{\frac{1}{h_{ce} \cdot A_T} + \frac{L_1}{K_1 \cdot A_T} + \frac{X}{K_2 \cdot A_T} + \frac{L_2}{K_3 \cdot A_T} + \frac{1}{h_{ci} \cdot A_T}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Como se observa en esta ecuación, existen tres incógnitas ( $X$ ,  $q_T$ , y  $h_{ci}$ ), por lo que primero se calculará el coeficiente convectivo en el interior de la cámara ( $h_{ci}$ ).

El coeficiente de convección viene dado por

$$h_{ci} = \frac{Nu \cdot K_N}{L} \quad (\text{Ec. 7})$$

donde,  $Nu$  es el número de Nusselt

$K_N$  es la conductividad térmica del nitrógeno, y

$L$  es la longitud de la pared medida en el sentido del flujo.

Para flujo a lo largo de una superficie plana en régimen turbulento con temperatura superficial uniforme (Kays) el número de Nusselt se calcula a partir de

$$Nu = 0.0295 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/2} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde  $Re$  es el número de Reynold, y viene dado por

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu_{N(123K)}} \quad (\text{Ec. 9})$$

La velocidad del flujo de nitrógeno  $u$  se calcula por la relación entre el caudal del ventilador y el área de su descarga:

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0.0472 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} \cdot (0.152m)^2} = 2.59 \frac{m}{s}$$

por lo que, al sustituir este valor en la ecuación 9, se tiene:

$$Re = \frac{2.59m/s \cdot 0.35m}{3.13 \cdot 10^{-6} m^2/s} = 2.90 \cdot 10^5$$

De la ecuación 8 se calcula el número de Nusselt:

$$Nu = 0.0295 \cdot (2.90 \cdot 10^5)^{4/5} \cdot (0.764)^{1/2} = 603.71$$

Una vez obtenido el número de Nusselt, se procede a calcular el coeficiente convectivo en el interior de la cámara:

$$h_{ci} = \frac{603.71 \cdot 11.57 \cdot 10^{-3} \text{ W / m} \cdot \text{K}}{0.35 \text{ m}} = 19.96 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Ahora procederemos con el cálculo de la segunda variable de la ecuación 6, la transferencia de calor  $q_T$ , que está dado por la suma del calor transferido por cada una de las paredes.

$$q_e = \frac{T_{\infty e} - T_{se}}{R_{he}} = \frac{T_{\infty e} - T_{se}}{\frac{1}{h_{ce} \cdot A}} = (T_{\infty e} - T_{se}) \cdot h_{ce} \cdot A \quad (\text{Ec. 10})$$

donde  $A$  es el área de cada pared

\* *Paredes laterales*

El área de cada pared lateral es

$$A_1 = \text{base} \cdot \text{altura} = 0.35 \text{ m} \cdot 0.32 \text{ m} = 0.112 \text{ m}^2$$

y el calor transferido a través de cada pared es

$$q_{e1} = (25^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C}) \cdot 7 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.112 \text{ m}^2 = 7.84 \text{ W}$$

\* *Paredes superior e inferior*

$$A_2 = 0.35 \text{ m} \cdot 0.2 \text{ m} = 0.07 \text{ m}^2$$

$$q_{e2} = (25^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C}) \cdot 7 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.07 \text{ m}^2 = 4.90 \text{ W}$$

\* *Paredes posterior y frontal*

$$A_3 = 0.32 \text{ m} \cdot 0.2 \text{ m} = 0.064 \text{ m}^2$$

$$q_{e3} = (25^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C}) \cdot 7 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.064 \text{ m}^2 = 4.48 \text{ W}$$

Ahora, el área total de transferencia de calor y el calor total transferido a través de las paredes de la cámara son:

$$A_T = 2 \cdot (A_1 + A_2 + A_3) = 2 \cdot (0.112m^2 + 0.07m^2 + 0.064m^2) = 0.492m^2$$

$$q_T = 2 \cdot (q_{e1} + q_{e2} + q_{e3}) = 2 \cdot (7.84W + 4.90W + 4.48W) = 34.44W$$

Una vez obtenidas estas dos incógnitas ( $q_T$  y  $h_{ci}$ ), procedemos al despeje del espesor del aislante ( $X$ ) de la ecuación 6, quedando:

$$X = K_2 \left[ \frac{(T_{\infty e} - T_{\infty i}) \cdot A_T}{q_T} - \frac{1}{h_{ce}} - \frac{1}{h_{ci}} - \frac{2 \cdot L_1}{K_1} \right] \quad (\text{Ec. 11})$$

$$X = 0.026 \frac{W}{m \cdot K} \left[ \frac{(25^\circ C - (-150^\circ C)) \cdot 0.492m^2}{34.44W} - \frac{1}{7 \frac{W}{m^2 \cdot K}} - \frac{1}{19.96 \frac{W}{m \cdot K}} - \frac{2 \cdot 0.0012m}{16.2 \frac{W}{m \cdot K}} \right]$$

$$X = 6.01 \cdot 10^{-2} m = 60.1mm$$

El espesor mínimo de aislante para garantizar que en la superficie exterior de la cámara exista una temperatura superior a los  $15^\circ C$  es de  $60.1mm$ , por lo que emplearemos un espesor de aislante de  $70mm$ .

Al haber hallado el espesor del aislante, se estima que las dimensiones de la caja externa de la cámara de ensayos serán de  $460mm$  de alto,  $340mm$  de ancho y  $420mm$ .

Obtenidos las dimensiones de la cámara, se puede realizar el cálculo aproximado de la masa de la estructura, multiplicando el volumen de las láminas utilizadas por la densidad del acero inoxidable 304.

$$V_{láminas} = 0.00316 m^3$$

$$\rho_{inox} = 7850 Kg/m^3$$

$$m_{estructura} = V_{láminas} \cdot \rho_{inox} = 25 Kg$$

### **3.3.1.2.- Inyector**

Sirve para introducir el nitrógeno líquido que proviene de la válvula solenoide a la cual se encuentra conectado. La geometría está diseñada para rociar el fluido en la cámara, lo cual facilita el cambio de fase y su posterior transferencia de calor. El inyector estará fabricado en acero inoxidable 304 y tendrá un diámetro de  $12\text{mm}$  que se prolonga  $220\text{mm}$  desde la válvula solenoide hasta el interior de la cámara, al final de este tubo se encuentra una boquilla con un diámetro interno de  $2\text{mm}$  y  $20\text{mm}$  de largo con una ranura en uno de sus costados para dirigir el fluido criogénico perpendicular al flujo del ventilador.

### **3.3.1.3.- Ventilador**

Hará circular el nitrógeno gas para asegurar la homogeneidad de la temperatura dentro de la cámara y facilitar la transferencia de calor por convección. Éste forzará al gas a pasar por una resistencia colocada antes de la succión del mismo. Será accionado por un motor eléctrico colocado en el exterior de la cámara para protegerlo de las temperaturas extremas que se alcanzarán en el interior.

Se seleccionó un ventilador axial helicoidal de 5 palas de  $153\text{mm}$  ( $6''$ ) de diámetro, fabricadas en aluminio, ya que son ideales para aplicaciones a baja presión. El chorro de descarga del aire tiene forma circular y tiene un movimiento de rotación debido a la acción de las palas y a la ausencia de dispositivos enderezadores. La carcasa tiene forma de estrechamiento gradual para dirigir el aire hacia la hélice. Visto que el espacio en el interior de la cámara es bastante reducido y que no se necesita una elevada presión estática se seleccionó un motor de  $9\text{W}$  de potencia marca General Electric de  $120\text{VAC}/60\text{Hz}$ . El ventilador maneja un caudal de  $100\text{pcm}$  ( $0.0472\text{m}^3/\text{s}$ ).

### **3.3.1.4.- Válvula solenoide**

Se encargará de controlar la entrada de nitrógeno líquido a la cámara. Estará en el exterior de la misma. Se seleccionó una válvula marca Asco serie 8263 G205LT normalmente cerrada de  $\frac{1}{4}$  NPT de  $120/60$  VAC. Esta válvula está fabricada en acero

inoxidable con sellos de PTFE (Teflón) y está diseñada para trabajar en condiciones de funcionamiento extremas para el control de fluidos criogénicos como oxígeno líquido (-183°C), argón líquido (-186°C) y nitrógeno líquido (-196°C). Opera con presiones diferenciales entre 0 y 7 bar.

#### **3.3.1.5.- Resistencia**

Servirá para la generación de calor en el interior de la cámara, ya sea para el control de la temperatura del gas, así como para acelerar el restablecimiento de la temperatura ambiente dentro de la misma.

Se usará una resistencia tipo tubular fabricada de Incoloy de 8mm de diámetro y 600mm de largo, doblada en “M” (170mm x 100mm). Tendrá una potencia de 160W y estará alimentada con corriente de 120VAC.

#### **3.3.1.6.- Sensor de temperatura**

Se empleará para registrar la temperatura en la superficie de la probeta a ensayar para luego enviarla al controlador. El sensor de temperatura seleccionado es una termocupla tipo “K” (Chromel–Alumel) flexible con una punta de 1mm de diámetro y 10mm de largo, con una extensión de cable compensado flexible de 1200mm de largo y un conector macho miniatura. Tendrá un recubrimiento de Teflón ® en toda su extensión, para resguardarla de cualquier agente nocivo.

#### **3.3.1.7.- Secciones removibles**

Están diseñadas para facilitar la colocación del dispositivo en su posición de trabajo. Estas piezas se retiran dejando un espacio que permite a los extensores de las probetas, que ya se encuentran acoplados a la maquina Instron 8502, posicionarse en el interior del dispositivo. Éstas estarán fabricadas en Polietileno de ultra alto peso molecular UHMW-PE (Cestilene HD-100) y poseen una geometría tal, que logran sellar la cámara evitando en gran medida fugas de nitrógeno.

La masa del UHMW-PE empleado para la fabricación de las secciones removibles es de 5Kg.

**3.3.1.8.- Goma**

Estará colocada en la puerta de forma tal que al cerrarla quedará presionada con la cámara para así evitar fugas que se traducen en costos agregados y en un peligro para los usuarios. Esta goma esta fabricada en silicona, que brinda un excelente desempeño tanto en altas como en bajas temperaturas. Se seleccionó un perfil cuadrado de 12,7mm x 12,7mm (1/2"x1/2").

**3.3.1.9.- Controlador**

Para la automatización de todos los procesos se utilizará un Controlador Lógico Programable (PLC, según sus siglas en inglés) marca Unitronics modelo M91-2-UA2. Este dispositivo, a través de su pantalla digital, permitirá una interacción amigable con el usuario.

El usuario introducirá la temperatura a la cual se realizará el ensayo de tracción uniaxial y, una vez verificado el valor especificado, se dará inicio al proceso de enfriamiento/calentamiento, encendiendo el ventilador y abriendo la válvula solenoide para permitir la entrada de nitrógeno o encendiendo las resistencias, según sea el caso. El ventilador permanecerá activado durante todo el proceso de enfriamiento/calentamiento y durante el ensayo. Una vez alcanzada la temperatura deseada en la probeta se mostrará un mensaje en pantalla, informándole al usuario para que éste dé inicio al ensayo de tracción en la máquina Instron 8502.

Luego de dos minutos de alcanzada la temperatura deseada se mostrará un mensaje invitando al usuario a pulsar un botón para detener el proceso de enfriamiento/calentamiento si el ensayo en la máquina Instron se ha culminado o si el usuario así lo desea. Mientras no se pulse ese botón la cámara seguirá funcionando manteniendo la temperatura seleccionada. En caso contrario la válvula solenoide se cerrará y las resistencias funcionarán junto con el ventilador hasta lograr subir la temperatura a un valor en el que sea seguro para el usuario retirar la probeta. En ese momento se apagará el ventilador y las resistencias, además de emitir un nuevo mensaje invitando a desmontar la probeta. Si se trata de un ensayo a temperaturas altas, al momento de detener el proceso se apagarán las resistencias y se abrirá la

válvula solenoide para permitir el descenso de la temperatura en la cámara y la probeta.

Para controlar y mantener la temperatura deseada (en el caso del enfriamiento) se pretende combinar la apertura y cierre de la válvula solenoide con el encendido y apagado de las resistencias.

El controlador será capaz de elaborar y almacenar una base de datos de la variación de la temperatura con respecto al tiempo que podrá ser fácilmente descargada a un computador personal.

### **3.3.2.- Sistema de sujeción.**

#### **3.3.2.1.- Bandeja**

Es un disco de  $240\text{mm}$  de diámetro y  $10\text{mm}$  de espesor en donde estará anclada la cámara a través de 8 pernos  $5/16'' - 16\text{UNF}$  con  $15\text{mm}$  de profundidad y cabeza plana. Tendrá un eje de  $31.75\text{mm}$  ( $1\frac{1}{4}''$ ) de diámetro y  $90\text{mm}$  de largo que permitirá el movimiento rotacional del mismo. Todo el conjunto será fabricado en acero inoxidable 304.

Sabiendo que el volumen total del conjunto es de  $5.53 \times 10^{-4} \text{m}^3$  tenemos que la masa de la bandeja será

$$m_{\text{bandeja}} = 4.37\text{Kg}$$

Debido a que la cámara estará apoyada aproximadamente en su centro de masa las solicitaciones a las que estará sometida la bandeja pueden considerarse despreciables, por lo que este conjunto no será objeto de estudio para los cálculos de falla.

#### **3.3.2.2.- Brazo 1**

Éste alojará la bandeja en uno de sus extremos mientras que en el otro estará conectado al Brazo 2 por medio de un pasador de  $19.05\text{mm}$  de diámetro ( $3/4''$ ). Estará fabricado en aluminio 6063-T6. Tendrá una sección transversal de  $70\text{mm}$  de alto y  $50\text{mm}$  de ancho, una longitud de  $300\text{mm}$  (fig. 3.7). Sabiendo que la densidad

del aluminio es  $\rho_{\text{aluminio}} = 2700 \text{Kg/m}^3$  y que el Brazo 1 tiene un volumen de  $V_{\text{brazo1}} = 8.74 \times 10^{-4} \text{m}^3$ , la masa del Brazo 1 ( $m_{\text{brazo1}}$ ) es de  $2.36 \text{Kg}$ .

Para el estudio de este elemento se deben identificar las cargas que actúan sobre él, para lo que se representará como una viga empotrada en el extremo del pasador y en voladizo en el otro extremo, que estará sometida a flexión (fig 3.6).

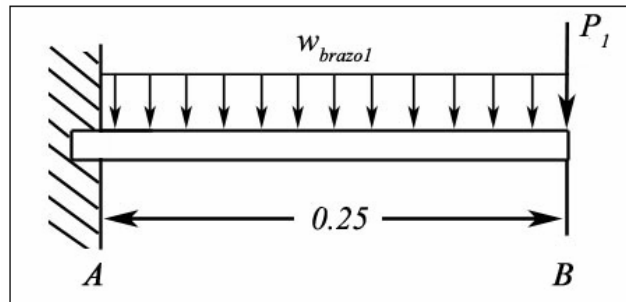


Figura 3.6. Representación en viga del Brazo 1

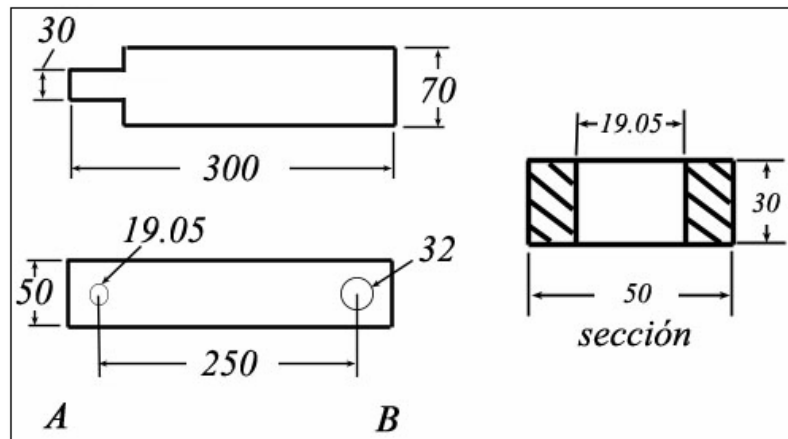


Figura 3.7. Esquema, dimensiones y sección transversal del Brazo 1 (medidas en milímetros)

El brazo está sometido a una carga puntual  $P_1$ , que viene dada por la suma de los pesos de la estructura ( $m_{\text{estructura}}$ ), de la bandeja ( $m_{\text{bandeja}}$ ) y de los accesorios y demás elementos no estructurales ( $m_a$ ), y a su peso propio, representado con la carga distribuida  $w_{\text{brazo1}}$ .



La masa total de los accesorios y demás elementos no estructurales (motor, hélice, inyector, válvula solenoide, resistencias eléctricas, termocupla, aislante y UHMW-PE) es de 10Kg.

\* Magnitudes de las fuerzas:

$$P_1 = (m_{estructura} + m_{bandeja} + m_a) \cdot g = 386.22N$$

$$w_{brazo1} = \frac{P_{brazo1}}{l_{brazo1}} = \frac{m_{brazo1} \cdot g}{l_{brazo1}} = \frac{2.36Kg \cdot 9.81m/s^2}{0.3m} = 77.27 \frac{N}{m}$$

Una vez obtenidas las magnitudes de las fuerzas que actúan sobre el brazo se procede a la elaboración de los diagramas de fuerza cortante V y de momento flector M.

De la sumatoria de fuerzas en la dirección “Y” e igualando a cero se obtiene la siguiente ecuación para la fuerza cortante a lo largo del brazo:

$$V = w_{brazo1} \cdot x + P_1 \quad (\text{Ec. 12})$$

mientras que la ecuación para la construcción del diagrama de momento flector es:

$$M = \frac{w_{brazo1} \cdot x^2}{2} + P_1 \cdot x \quad (\text{Ec. 13})$$

donde  $x$  es la distancia medida desde el extremo en voladizo

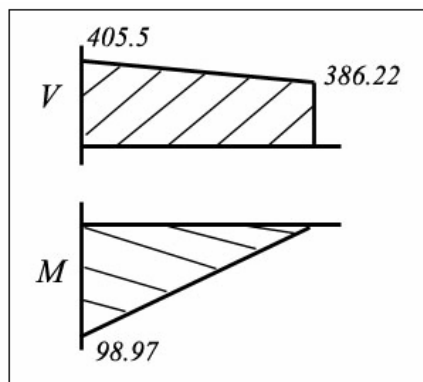


Figura 3.8 Diagrama de Fuerza cortante V ( en N) y momento flector M (en N.m)

El punto más crítico del brazo es el ubicado en el extremo empotrado ya que es aquí donde el momento flector y la fuerza cortante alcanzan su valor máximo ( $M_A = 98.97N.m$  y  $V_A = 405.5N$ , respectivamente).

Para vigas sometidas a flexión pura, como es el caso, se generan esfuerzos normales  $\sigma$  que producen compresión abajo del eje neutro y tensión por encima del mismo (estado de esfuerzo uniaxial,  $\sigma_y = 0$ ), obteniéndose una distribución de esfuerzos triangular con un máximo en la periferia del elemento y un  $\sigma = 0$  en el eje neutro. Además de los esfuerzos normales, se generan esfuerzos cortantes  $\tau$  que tienen una distribución parabólica cuyo valor máximo se encuentra sobre el eje neutro y disminuye hasta que es cero en la superficie exterior. Para un eje de sección transversal rectangular el valor del esfuerzo cortante máximo es de ( $\tau_{\max} = 3V/2A$ ) donde  $V$  es la fuerza cortante y  $A$  es el área de la sección transversal <sup>(11)</sup>.

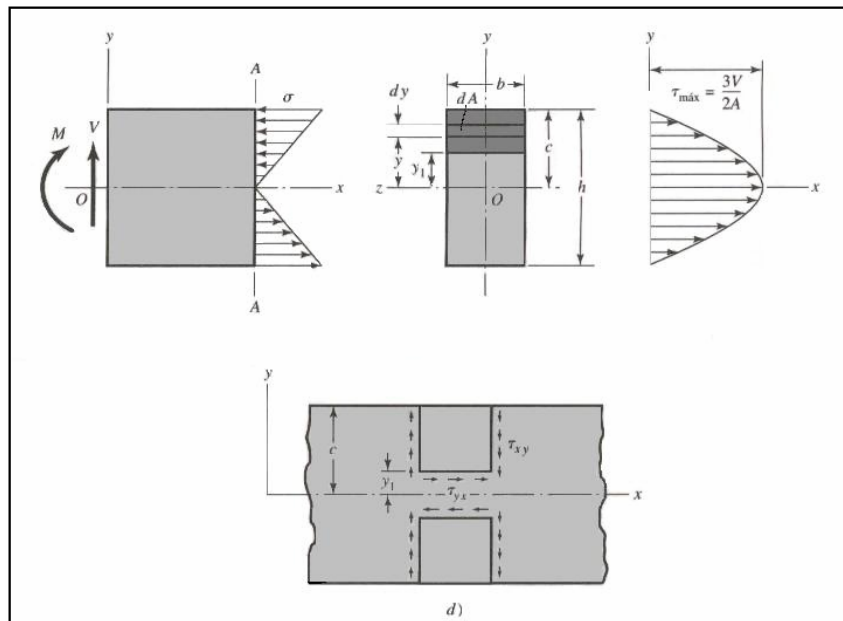


Figura 3.9. Distribución de los esfuerzos normales y cortantes en una viga de sección transversal rectangular<sup>(10)</sup>

Como se observa en la figura 3.9 las distribuciones de esfuerzos plantean a la periferia y al eje neutro como los puntos con mayor interés de estudio para el análisis de falla.

- *Estudio en la periferia del brazo*

Como es un estado de esfuerzo uniaxial ( $\sigma_y = 0$ ), la ecuación de von Mises queda de la siguiente manera:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (\text{Ec. 14})$$

El esfuerzo normal es

$$\sigma_x = \frac{M_A \cdot c}{I} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde  $c$  es la distancia desde el eje neutro al punto en estudio e  $I$  es el momento de inercia de la sección transversal respecto al eje X.

$$c = 0.015m$$

$$I_x = \frac{\text{base} \cdot \text{altura}^3}{12} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$I = I_{\text{sección}} - I_{\text{hueco}} = \frac{0.05m \cdot (0.03m)^3 - 0.01905m \cdot (0.03m)^3}{12} = 6.96 \cdot 10^{-8} m^4$$

Ahora:

$$\sigma_x = \frac{98.97N \cdot m \cdot 0.015m}{6.96 \cdot 10^{-8} m^4} = 21.32MPa$$

En la periferia, el esfuerzo cortante es cero ( $\tau_{xy} = 0$ ), por lo que el esfuerzo de von Mises queda:

$$\sigma' = \sqrt{(21.32MPa)^2} = 21.32MPa$$

- Estudio en el centro del brazo

En este caso, como se explicó anteriormente, el esfuerzo normal es cero ( $\sigma_x = 0$ ) mientras que el esfuerzo cortante es máximo y se obtiene por la siguiente ecuación:

$$\tau_{xy} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_A}{A} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\tau_{xy} = \frac{3}{2} \cdot \frac{405.50N}{9.29 \cdot 10^{-4} m^2} = 0.66MPa$$

El esfuerzo de von Mises es

$$\sigma' = \sqrt{3 \cdot (0.66MPa)^2} = 1.14MPa$$

Al comparar los esfuerzos de von Mises obtenidos en los análisis anteriores, se observa que en la periferia del brazo es donde el esfuerzo es mayor, por lo tanto es el punto más susceptible a fallar.

Se utilizará el esfuerzo de von Mises obtenido en la periferia del brazo para calcular el esfuerzo mínimo a la fluencia ( $S_y$ ) y así verificar que el material y secciones escogidas soportan los esfuerzos a los que estará sometido, empleando un factor de seguridad igual a 2 ya que todas las sollicitaciones son cargas estáticas.

El factor de seguridad es

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (\text{Ec. 18})$$

Por lo que el esfuerzo a la fluencia se calcula de la siguiente manera:

$$S_y = \sigma' \cdot n = 21.32MPa \cdot 2 = 42.64MPa$$

Se tiene que el esfuerzo a la fluencia del aluminio 6063-T6 es de  $214MPa$ , que es muy superior al  $S_y$  mínimo calculado lo cual asegura que el Brazo 1 no fallará.

### 3.3.2.3.- Brazo 2

Éste estará conectado con el brazo 1 en uno de sus extremos por medio de un pasador de  $19.05\text{mm}$  de diámetro ( $3/4''$ ), mientras que en el otro estará articulado a un eje vertical de  $31.75\text{mm}$  de diámetro ( $1\ 1/4''$ ) anclado a la maquina universal de ensayos mecánicos Instron 8502. Estará fabricado en aluminio 6063-T6. Tendrá una sección transversal de  $70\text{mm}$  de alto y  $50\text{mm}$  de ancho, una longitud de  $235\text{mm}$ . Teniendo una densidad del aluminio  $\rho_{\text{aluminio}} = 2700\text{Kg}/\text{m}^3$  y un volumen del Brazo 2  $V_{\text{brazo2}} = 6.74 \times 10^{-4}\text{m}^3$ , la masa del Brazo 2 ( $m_{\text{brazo2}}$ ) es de  $1.82\text{Kg}$ .

Los esfuerzos a los que estará sometido el Brazo 2 dependerán de la posición en la que se encuentre el Brazo 1, donde habrán dos posiciones críticas que generarán flexión pura o flexión y torsión, respectivamente.

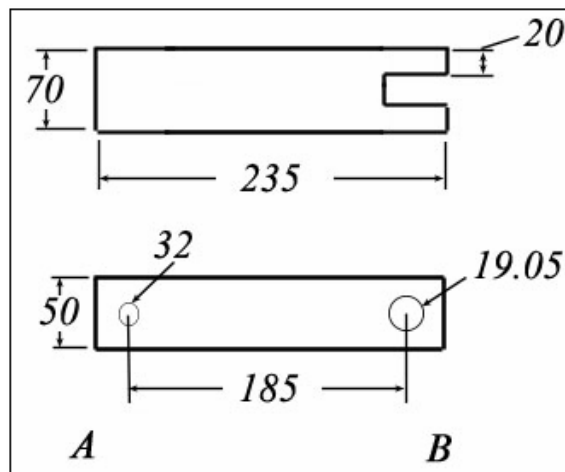


Figura 3.10. Esquema, dimensiones y sección transversal del Brazo 2 (medidas en milímetros)

- Caso 1: Flexión Pura

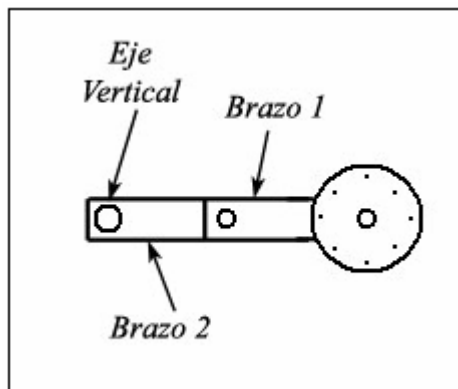


Figura 3.11. Vista superior de la posición del Brazo 1 respecto al Brazo 2 para generar flexión pura

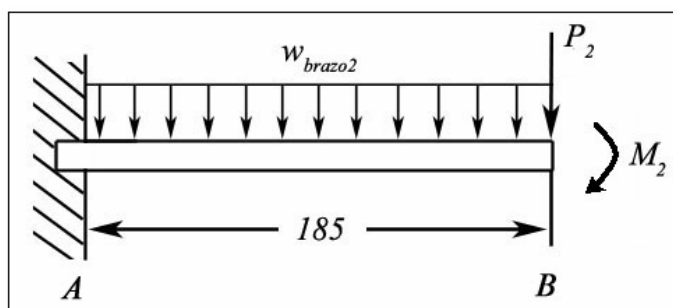


Figura 3.12. Representación en viga del Brazo 2 sometido a flexión pura (medidas en milímetros)

El brazo está sometido a una carga puntual  $P_2$  y a un momento flector  $M_2$  que son la reacción a la fuerza cortante y al momento resultante en el extremo del pasador del Brazo 1, respectivamente. También está sometido a su peso propio, representado con la carga distribuida  $w_{brazo2}$ .

\* Magnitudes de las fuerzas:

$$P_2 = 405.5 \text{ N}$$

$$w_{brazo2} = \frac{P_{brazo2}}{l_{brazo2}} = \frac{m_{brazo2} \cdot g}{l_{brazo2}} = \frac{1.82 \text{ Kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2}{0.235 \text{ m}} = 75.74 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$M_2 = 98.97 \text{ N} \cdot \text{m}$$

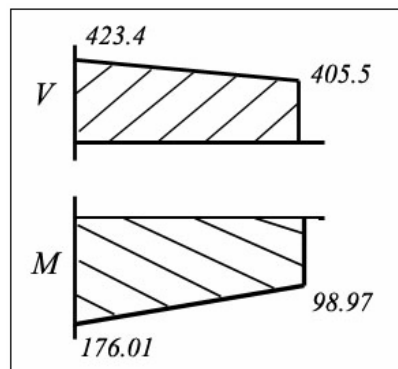


Figura 3.13. Diagrama de Fuerza cortante  $V$  ( en  $N$ ) y momento flector  $M$  (en  $N.m$ )

Se estudiarán los extremos A y B del Brazo 2 ya que presentan distintas secciones transversales y ambos están sometidos a momentos. ( $M_A = 176.01N.m$  y  $M_B = 98.97N.m$ , respectivamente).

- Estudio para el extremo A

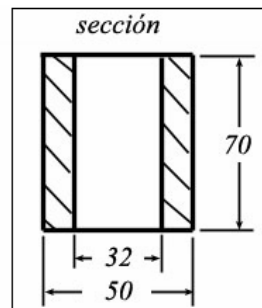


Figura 3.14. Sección transversal del Brazo 2 en el extremo A (medidas en milímetros)

$$c = 0.035m$$

$$I = I_{\text{sección}} - I_{\text{hueco}} = \frac{0.05m \cdot (0.07m)^3}{12} - \frac{0.03175m \cdot (0.07m)^3}{12} = 5.22 \cdot 10^{-7} m^4$$

Ahora, de la ecuación 15:

$$\sigma_x = \frac{176.01N \cdot m \cdot 0.035m}{5.22 \cdot 10^{-7} m^4} = 11.80MPa$$

por lo que el esfuerzo de von Mises queda:

$$\sigma' = \sqrt{(11.80MPa)^2} = 11.80MPa$$

- Estudio para el extremo B

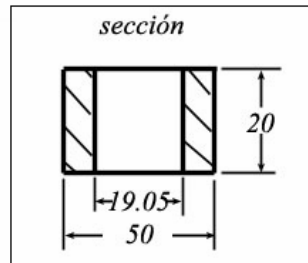


Figura 3.15. Sección transversal del Brazo 2 en el extremo B (medidas en milímetros)

De la ecuación 16:  $I = 4.60 \cdot 10^{-8} m^4$

$$\sigma_x = \frac{98.97N \cdot m \cdot 0.035m}{4.60 \cdot 10^{-8} m^4} = 75.30MPa$$

por lo que el esfuerzo de von Mises queda:

$$\sigma' = \sqrt{(75.30MPa)^2} = 75.30MPa$$

- Caso 2: Flexión y torsión.

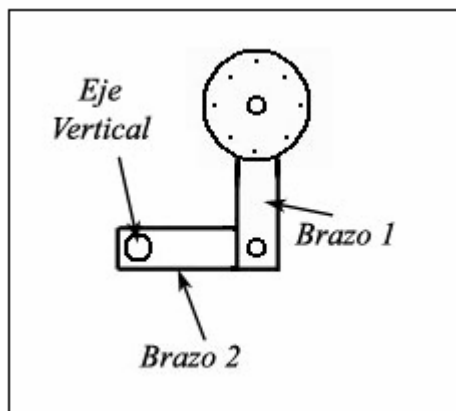


Figura 3.16. Vista superior de la posición del Brazo 1 respecto al Brazo 2 para generar flexión y torsión.



Cualquier vector momento que sea colineal con un eje de un elemento mecánico se llama *vector de par de torsión*, porque el momento causa que el elemento se tuerza respecto a ese eje. Una barra sometida a un momento de ese tipo se dice que esta sometida a torsión <sup>(10)</sup>. El momento flector que se genera en el extremo del pasador del Brazo 1 pasa a hacer un momento torsor ( $T$ ) en el extremo B del brazo 2 con un modulo de  $98.97N.m$ .

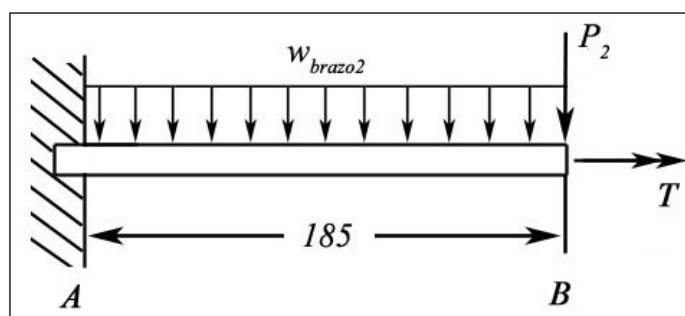


Figura 3.17. Representación en viga del Brazo 2 sometido a flexión y torsión (medidas en milímetros)

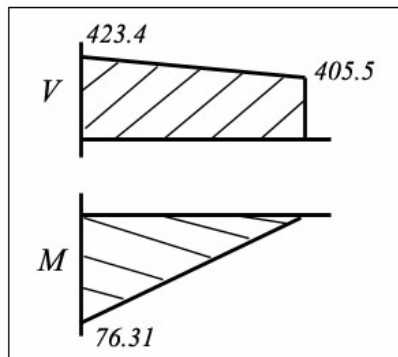


Figura 3.18. Diagrama de Fuerza cortante V ( en N) y momento flector M (en  $N.m$ )

- *Estudio para el extremo A*

El punto A está sometido a un momento flector de  $76.31N.m$  lo que produce un esfuerzo normal ( $\sigma_x$ ) en la periferia de  $5.19MPa$ .

El momento torsor ( $T$ ) genera un esfuerzo cortante en A que para secciones rectangulares (ver figura 3.14) se calcula de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{T}{b \cdot c^2} \cdot \left( 3 + \frac{1.8}{b/c} \right) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$\tau = \frac{98.97N \cdot m}{0.07m \cdot (0.018m)^2} \cdot \left( 3 + \frac{1.8}{0.07m/0.018m} \right) = 15.11MPa$$

El esfuerzo de von Mises es:

$$\sigma' = \sqrt{(5.19MPa)^2 + 3 \cdot (15.11MPa)^2} = 26.17MPa$$

- *Estudio para el extremo B*

El punto A (ver figura 3.15) no está sometido a un momento flector por lo tanto el esfuerzo normal ( $\sigma_x$ ) es cero.

El esfuerzo cortante en B es :

$$\tau = \frac{98.97N \cdot m}{0.04m \cdot (0.0309m)^2} \cdot \left( 3 + \frac{1.8}{0.04m/0.0309m} \right) = 11.38MPa$$

El esfuerzo de von Mises es:

$$\sigma' = \sqrt{3 \cdot (11.38MPa)^2} = 19.71MPa$$

Al comparar el esfuerzo de von Mises de cada uno de los casos, el esfuerzo a la fluencia mínimo será calculado a partir del valor obtenido para flexión pura en el punto B.

$$S_y = \sigma' \cdot n = 75.30MPa \cdot 2 = 150.60MPa$$

Sabiendo que la resistencia a la fluencia del aluminio 6063 T6 es de 214MPa se puede asegurar que el Brazo 2 no fallará para ninguna de las condiciones a las que estará sometido.

### 3.3.2.4.- Pasador brazos

Éste permitirá que los brazos 1 y 2 estén articulados entre si. Estará fabricado en acero inoxidable 304 y tendrá un diámetro de  $19.05\text{mm}$  ( $3/4''$ ) y un largo de  $80\text{mm}$ . Contará con una rosca en su parte inferior que junto con una tuerca permitirá fijar los brazos en una posición específica cuando así se requiera.

El pasador está sometido a un momento flector de  $98.97\text{N}\cdot\text{m}$  sin importar en la posición en la que se encuentren los brazos. El diagrama es el siguiente:

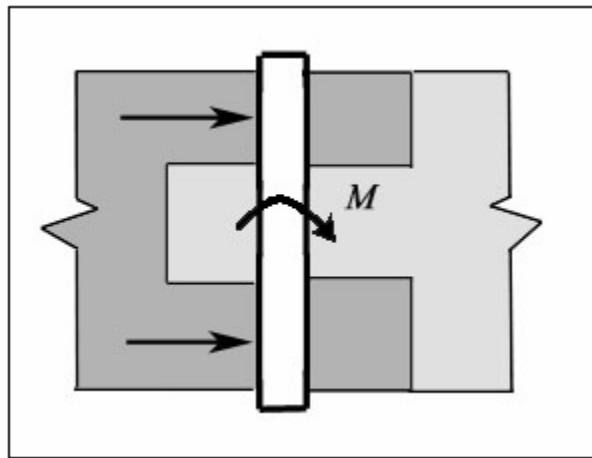


Figura 3.19. Esquema del pasador entre los brazos 1 y 2, con el momento al que está sometido

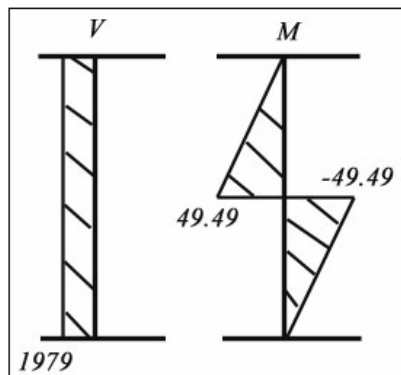


Figura 3.20. Diagrama de Fuerza cortante V ( en N) y momento flector M (en  $\text{N}\cdot\text{m}$ )

Del momento obtenido del diagrama, el esfuerzo normal en la periferia es

$$\sigma_x = \frac{49.49\text{N} \cdot \text{m} \cdot 9.53 \cdot 10^{-3}\text{m}}{7.03 \cdot 10^{-9}\text{m}^4} = 67.09\text{MPa}$$

El esfuerzo de von Mises es

$$\sigma' = \sqrt{(67.09MPa)^2} = 67.09MPa$$

$$S_y = \sigma' \cdot n = 134.67MPa \cdot 2 = 269.54MPa$$

Sabiendo que el  $S_y$  del acero inoxidable 304 es de 276MPa se puede asegurar que el pasador no fallará.

### **3.3.2.5.- Eje vertical Instron**

Estará fabricado en acero inoxidable 304 y tendrá un diámetro de 31.75mm (1 ¼”) y un largo de 1500mm. En él estará articulado el Brazo 2 y está empotrado en su extremo inferior mediante una rosca 1” – 12UNF a un elemento anclado a la maquina Instron, mientras que la parte superior estará sujeto a un brazo que podrá deslizar sobre su superficie junto con el cabezal de la maquina. Tendrá una masa de 9.53Kg.

Este eje vertical se estudiará como una viga empotrada en un extremo y simplemente apoyada en el otro, que estará sometida a un momento flector y a una carga axial. El momento flector se genera a raíz de la reacción en el extremo A del Brazo 2 (fig. 3.21). La carga axial es producto del peso de todos los elementos que a él están sujetos y del peso propio. El diagrama es el siguiente:

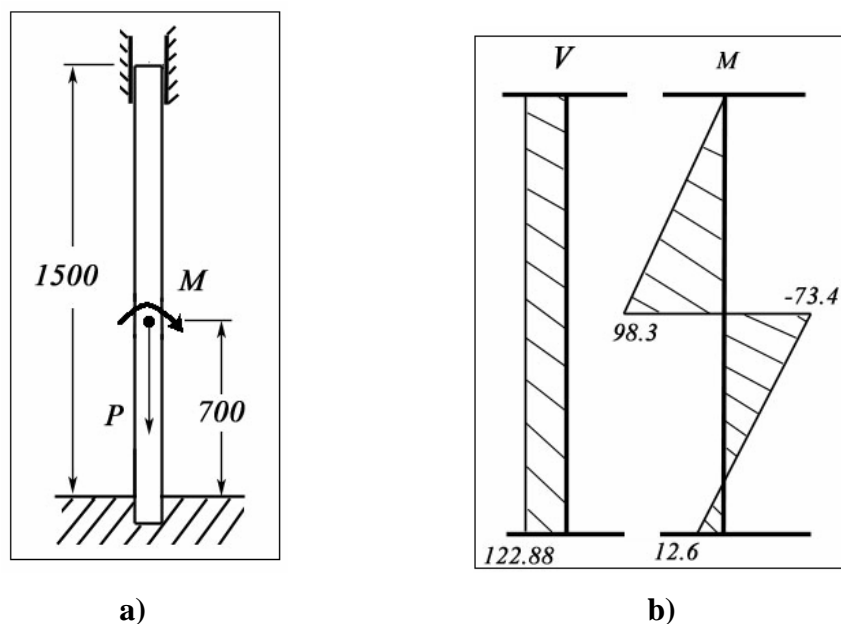


Figura 3.21. a) Representación en viga del Eje vertical sometido a un momento flector y a una carga axial (medidas en milímetros), b) Diagrama de Fuerza cortante V ( en N) y momento flector M (en N.m)

En el extremo empotrado la carga axial genera esfuerzos de compresión ( $\sigma_{compresión}$ ) en la misma dirección de la fuerza ( $P$ ) mientras que el momento flector produce esfuerzos tanto de compresión ( $\sigma_{flexión}$ ) como de tracción ( $-\sigma_{flexión}$ ) por lo que el punto más crítico sobre la periferia del eje será donde estos esfuerzos tengan la misma dirección.

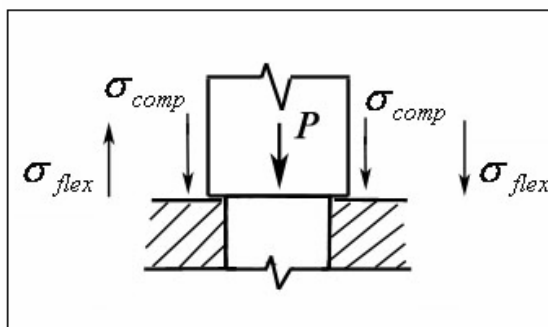


Figura 3.22. Esquema de los esfuerzos que intervienen en el extremo empotrado, a raíz de la carga axial y de la flexión

## - Estudio en el empotramiento

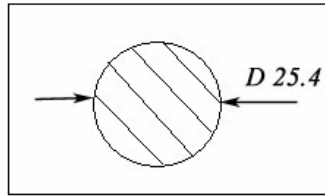


Figura 3.23. Sección transversal del Eje vertical en el extremo empotrado (medidas en milímetros)

Para la acción de la fuerza **P** el esfuerzo de compresión está dado por

$$\sigma_{\text{compresión}} = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 20})$$

donde  $A$  es el área de la sección transversal en estudio

$$A = 5.07 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$P = 520.69 N$$

De la ecuación 20, se tiene:

$$\sigma_{\text{compresión}} = \frac{520.69 N}{5.07 \cdot 10^{-4} m^2} = 1.03 MPa$$

Para la acción del momento flector  $M$ , el esfuerzo generado es

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (\text{Ec. 21})$$

donde  $M = 12.60 N.m$

$$c = 0.0127 m$$

$$I = 2.04 \cdot 10^{-8} m^4$$

obteniendo que  $\sigma_{\text{flexión}} = 7.62 MPa$

El esfuerzo normal total se obtiene sumando  $\sigma_{\text{compresión}}$  y  $\sigma_{\text{flexión}}$

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{flexión}} + \sigma_{\text{compresión}} = 8.65 MPa \quad (\text{Ec. 22})$$

- Estudio en el punto de momento flector máximo

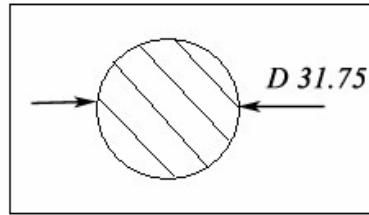


Figura 3.24. Sección transversal del Eje vertical en punto de momento flector máximo (medidas en milímetros)

De la ecuación 21:

$$\sigma_{flexión} = \frac{M \cdot c}{I}$$

donde  $M = 98.3 \text{ N.m}$

$$c = 0.0159 \text{ m}$$

$$I = 4.99 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

obteniendo que  $\sigma_{flexión} = 31.33 \text{ MPa}$

El esfuerzo de von Mises es:

$$\sigma' = \sqrt{(31.33 \text{ MPa})^2} = 31.33 \text{ MPa}$$

$$S_y = \sigma' \cdot n = 31.33 \text{ MPa} \cdot 2 = 62.66 \text{ MPa}$$

Sabiendo que la resistencia a la fluencia del acero inoxidable 304 es de  $276 \text{ MPa}$  se puede asegurar que el eje no fallará.

### 3.3.2.6.- Pieza de soporte

Servirá de apoyo al Brazo 2, manteniéndolo en la altura seleccionada por el usuario. Estará fabricada en acero inoxidable 304 y tendrá un diámetro interno de  $31.75 \text{ mm}$  ( $1 \frac{1}{4}''$ ), un diámetro externo de  $60 \text{ mm}$  y  $40 \text{ mm}$  de altura. Albergará dos tornillos prisioneros de cabeza hueca hexagonal  $3/8'' - 16 \text{ UNF}$  que lo mantendrán solidario al eje vertical.

### 3.3.2.7.- Brazo 3

En él estará empotrado el eje vertical y soportará todo el conjunto de sujeción de la cámara. Este brazo será anclado a la maquina Instron mediante tornillos M10 x 1.5 de cabeza hueca hexagonal. Estará hecho en fundición de aluminio A356 y tendrá una sección transversal cuadrada de  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  y una masa de  $3.32\text{Kg}$ .

Visto que el brazo se encontrará apoyado a la maquina Instron hasta una longitud determinada, el estudio del mismo se realizará considerando solo la parte del brazo que se encuentra en voladizo iniciando desde la sección A (ver figura 3.25) donde se asumirá un empotramiento con un extremo libre.

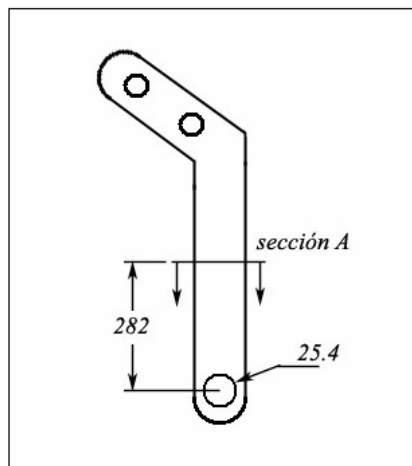


Figura 3.25. Esquema del Brazo 3 (medidas en milímetros)

El Brazo 3 estará sometido a dos condiciones críticas según la posición en la que se encuentren los demás elementos, éstas son flexión pura y, torsión y flexión.



- Caso 1: Flexión pura

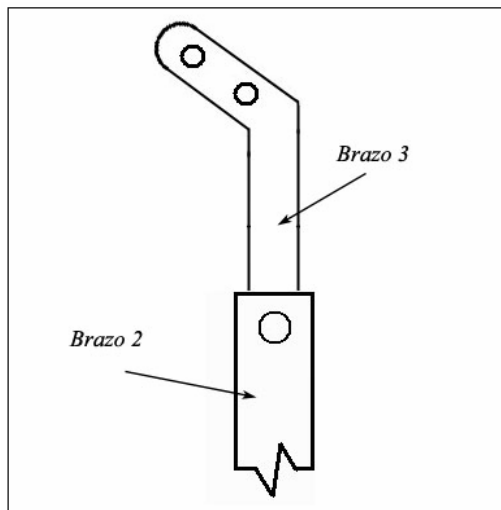


Figura 3.26. Vista superior de la posición del Brazo 2 respecto al Brazo 3 para generar flexión pura

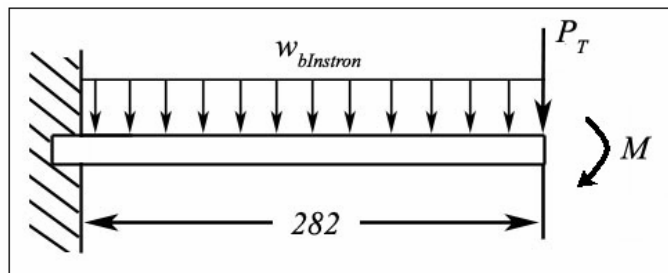


Figura 3.27. Representación en viga del Brazo 3 sometido a flexión (medidas en milímetros)

El brazo está sometido a una carga puntual  $P_T$  y a un momento flector  $M$  representados por el peso de todos los elementos del sistema de sujeción, y el momento resultante en el extremo empotrado del eje vertical, y a su peso propio, representado con la carga distribuida  $w_{bInstron}$ .

- *Magnitudes de las fuerzas:*

$$P_T = 520.69N$$

$$w_{bInstron} = \frac{P_T}{l_{bInstron}} = \frac{m_{bInstron} \cdot g}{l_{bInstron}} = \frac{3.32Kg \cdot 9.81m/s^2}{0.493m} = 66.23 \frac{N}{m}$$

$$M = 12.60N \cdot m$$

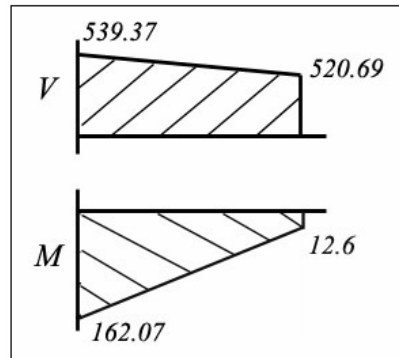


Figura 3.28. Diagrama de Fuerza cortante V ( en N) y momento flector M (en N.m)

Se estudiará el extremo A ya que es la sección transversal que está sometido al mayor momento ( $M_A = 162.07N.m$ ).

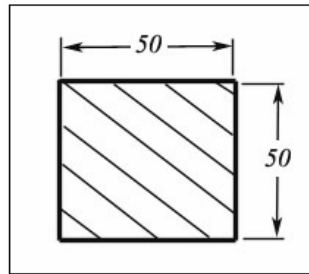


Figura 3.29. Sección transversal del Brazo 3 en el extremo A (medidas en milímetros)

El esfuerzo normal es  $\sigma_x = \frac{M \cdot c}{I}$

$$c = 0.025m$$

$$I = \frac{(0.05m)^4}{12} = 5.21 \cdot 10^{-7} m^4$$

$$\sigma_x = \frac{162.07N \cdot m \cdot 0.025m}{5.21 \cdot 10^{-7} m^4} = 7.78MPa$$

por lo que el esfuerzo de von Mises queda:

$$\sigma' = \sqrt{(7.78MPa)^2} = 7.78MPa$$

- Caso 2: Flexión y torsión.

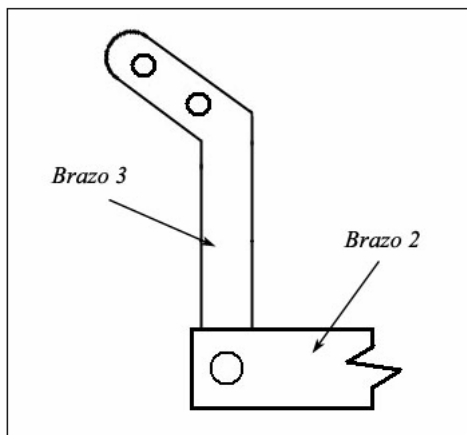


Figura 3.30. Vista superior de la posición del Brazo 2 respecto al Brazo 3 para generar flexión y torsión

El momento flector que se genera en el extremo empotrado del eje vertical pasa a hacer un momento torsor ( $T$ ) en el extremo B del brazo Instron con un modulo de 12.60  $N.m$ .

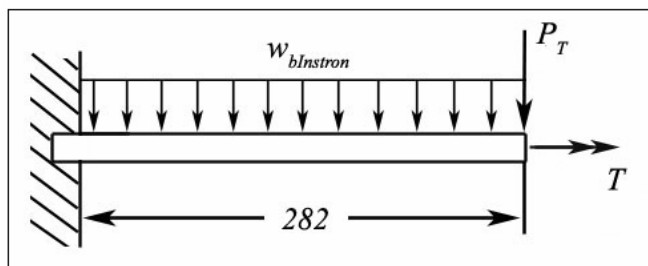


Figura 3.31. Representación en viga del Brazo 3 sometido a flexión y torsión (medidas en milímetros)

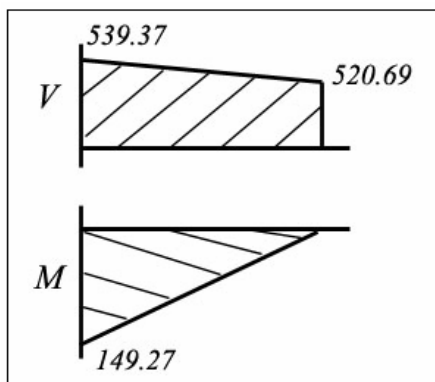


Figura 3.32. Diagrama de Fuerza cortante  $V$  ( en  $N$ ) y momento flector  $M$  (en  $N.m$ )

- *Estudio para el extremo A*

El punto A (ver figura 3.29) está sometido a un momento flector de  $149.27N.m$  lo que produce un esfuerzo normal ( $\sigma_x$ ) en la periferia de  $19.63MPa$ .

El momento torsor ( $T$ ) genera un esfuerzo cortante en A que se calcula con la ecuación 19:

$$\tau = \frac{12.60N \cdot m}{0.05m \cdot (0.05m)^2} \cdot \left( 3 + \frac{1.8}{0.05m/0.05m} \right) = 0.48MPa$$

El esfuerzo de von Mises es:

$$\sigma' = \sqrt{(19.63MPa)^2 + 3 \cdot (0.48MPa)^2} = 19.64MPa$$

- *Estudio para el extremo B*

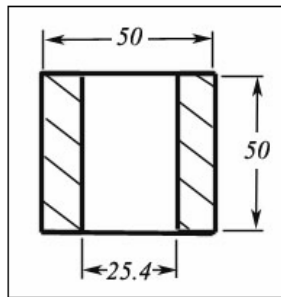


Figura 3.33. Sección transversal del Brazo 3 en el extremo B (medidas en milímetros)

El punto B no está sometido a un momento flector por lo tanto el esfuerzo normal ( $\sigma_x$ ) es 0.

El esfuerzo cortante en B es:

$$\tau = \frac{12.60N \cdot m}{0.05m \cdot (0.0246m)^2} \cdot \left( 3 + \frac{1.8}{0.05m/0.0246m} \right) = 1.62MPa$$

El esfuerzo de von Mises es:

$$\sigma' = \sqrt{3 \cdot (1.62MPa)^2} = 2.80MPa$$

Al comparar el esfuerzo de von Mises de cada uno de los casos, el esfuerzo a la fluencia mínimo será calculado a partir del valor obtenido para flexión y torsión en el punto A.

$$S_y = \sigma' \cdot n = 19.64MPa \cdot 2 = 39.28MPa$$

Sabiendo que la resistencia a la fluencia de la fundición de aluminio A356 es de  $165MPa$  se puede asegurar que el Brazo 3 no fallará para ninguna de las condiciones a las que estará sometido.

#### **3.3.2.8.- Brazo 4**

Será igual al Brazo 3 pero éste tendrá un agujero pasante de  $31.75mm$  ( $1 \frac{1}{4}$ "") por donde podrá deslizar el eje vertical y estará sujeto al cabezal móvil de la máquina Instron mediante dos pernos M10 x 1.5 de cabeza hueca hexagonal. Como se vio en el estudio del eje vertical, este brazo no estará sometido a ningún momento flector, no soportará ninguna carga asociada al peso de la cámara y la fuerza cortante a la que está sometido es la misma que la del brazo inferior por lo que se asegura que no fallará.

#### **3.3.2.9.- Arandelas**

Servirán para facilitar el deslizamiento entre algunos de los elementos, además de evitar el desgaste de los mismos. Estarán fabricadas de PTFE (Teflón) y estarán ubicadas entre la bandeja y el brazo 1, entre el brazo 1 y brazo 2 y entre el brazo 2 y la pieza de soporte.

### 3.3.3.- Extensores

#### 3.3.3.1.- Base

Este elemento servirá para lograr anclar los extensores, que soportarán a la probeta, en la máquina de ensayos Instron. Estarán fabricados de acero AISI 4140 templado y serán de forma cilíndrica con una lengüeta en uno de sus extremos que servirá para sujetarla en las mordazas hidráulicas de la máquina Instron, mientras que en el otro estará sujeto un eje mediante un pasador (fig. 3.3).

Como los extensores serán los encargados de sujetar la probeta durante el ensayo, todos sus elementos estarán sometidos a cargas axiales de tensión. La carga que se empleará para los cálculos de resistencia de los materiales será de  $50.000N$ .

Una fuerza axial  $F$ , actuando sobre los extremos de una barra prismática recta homogénea, causará una distribución de esfuerzo normal uniforme sobre el área de la sección transversal. Este esfuerzo tiene una magnitud de  $\sigma = F/A$  y un sentido que es igual al de la fuerza interna  $F$  resultante, ya que todos los esfuerzos normales sobre la sección transversal actúan con este sentido para generar esta resultante <sup>(11)</sup>.

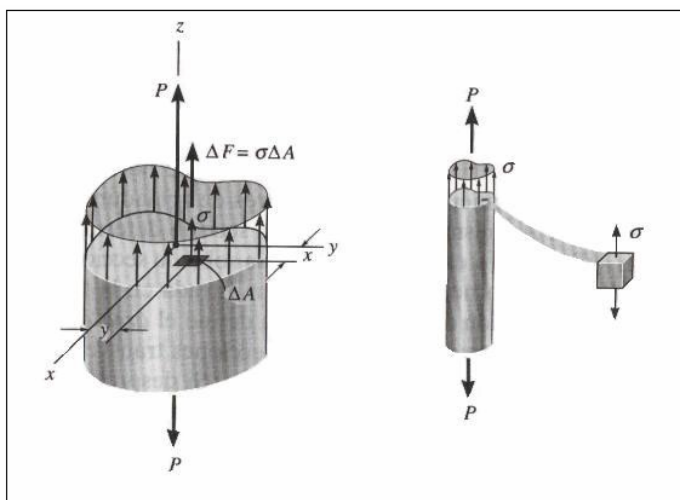


Figura 3.34. Distribución de los esfuerzos en una viga sometida a tracción <sup>(11)</sup>

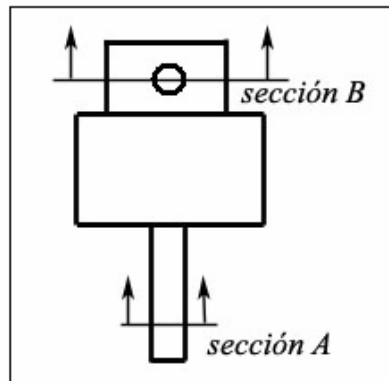


Figura 3.35. Esquema de la base de los extensores

- Estudio en la sección A

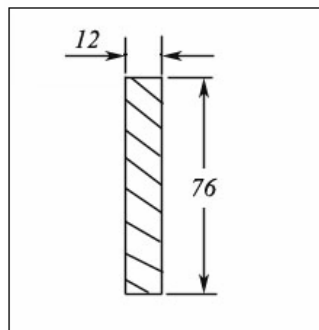


Figura 3.36. Sección transversal A (medidas en milímetros)

Sabiendo que

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 23})$$

donde:  $F = 50000N$

$$A = 9.12 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$\sigma = \frac{50000N}{9.12 \cdot 10^{-4} m^2} = 54.82 MPa$$

- Estudio en la sección B

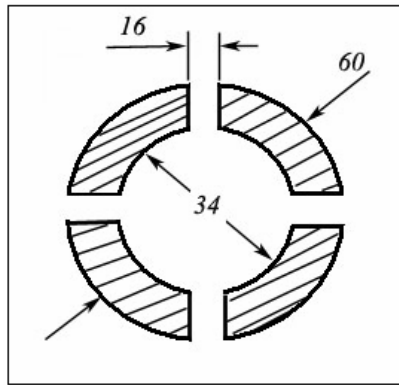


Figura 3.37. Sección transversal B (medidas en milímetros)

$$F = 50000N$$

$$A = 1.08 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$\sigma = \frac{50000N}{1.08 \cdot 10^{-3} m^2} = 46.29MPa$$

Ahora se aplica von Mises a partir del valor máximo del esfuerzo normal obtenido:

$$\sigma' = \sqrt{(54.82MPa)^2} = 54.82MPa$$

$$S_y = \sigma' \cdot n = 54.82MPa \cdot 2 = 109.64MPa$$

Sabiendo que la resistencia a la fluencia del acero AISI 4140 templado es de 1140MPa se puede asegurar que la base con lengüeta no fallará para la carga a la que estará sometida.

### 3.3.3.2.- Pasador

Será el encargado de unir la base con el eje de los extensores, pasando a través de agujeros en ambos elementos. Estará fabricado de acero AISI 4140 templado y será de forma cilíndrica con un diámetro de 12mm.



El pasador está en una condición de cortante doble <sup>(11)</sup>, donde la fuerza cortante interna resultante es  $V = P/2$ . Esta fuerza se encuentra distribuida uniformemente sobre toda la sección transversal.

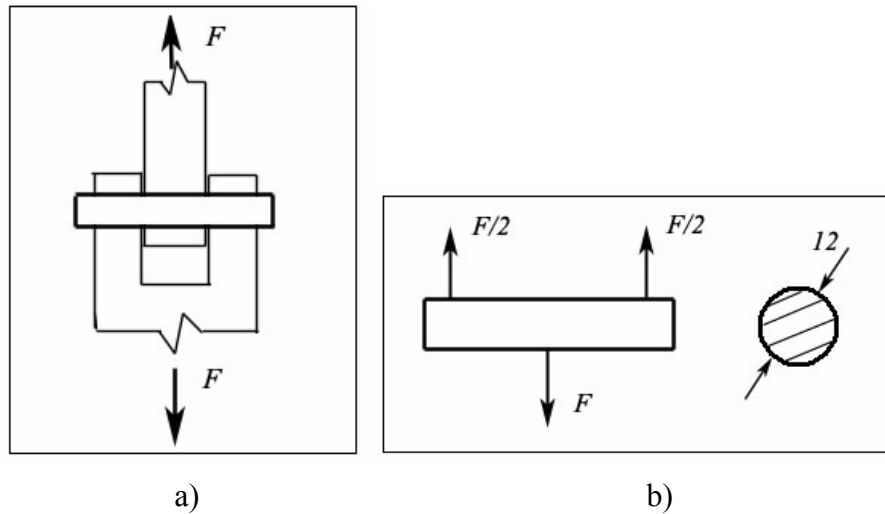


Figura 3.38. a) Esquema del pasador con las fuerzas de tracción, b) Diagrama de cuerpo libre del pasador y sección transversal (medidas en milímetros)

$$\text{Tenemos } \tau = \frac{F/2}{A} \quad (\text{Ec. 24})$$

donde  $F = 50000N$

$$A = 11.3 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$\tau = \frac{50000N/2}{11.3 \cdot 10^{-3} m^2} = 221.20MPa$$

El esfuerzo de von Mises es:

$$\sigma' = \sqrt{3 \cdot (221.20MPa)^2} = 383.20MPa$$

El  $S_y$  mínimo para que no falle es:

$$S_y = \sigma' \cdot n = 383.20MPa \cdot 2 = 766.40MPa$$

La resistencia a la fluencia del acero AISI 4140 templado es de  $1140\text{MPa}$  por lo que se asegura que el pasador no fallará.

### 3.3.3.3.- Eje

Éste estará conectado a la base a través de un pasador en uno de sus extremos, mientras que en el otro sujetará el portaprobetas mediante una rosca M20 x 2.5. Estará fabricado de acero inoxidable 304 y tendrá un diámetro de  $31.75\text{mm}$  ( $1\frac{1}{4}''$ ) y  $200\text{mm}$  de largo.

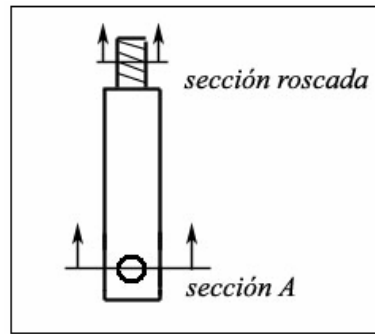


Figura 3.39. Esquema del eje del extensor

#### - Estudio en la sección A

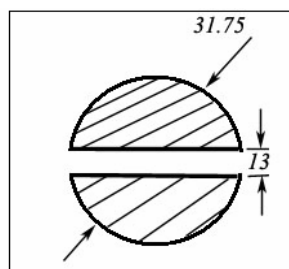


Figura 3.40. Sección transversal A (medidas en milímetros)

De la ecuación 23:

$$F = 50000N$$

$$A = 4.22 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$\sigma = \frac{50000N}{4.22 \cdot 10^{-4} m^2} = 118.48MPa$$

Ahora se aplica von Mises a partir del valor máximo del esfuerzo normal obtenido:

$$\sigma' = \sqrt{(118.48MPa)^2} = 118.48MPa$$

$$S_y = \sigma' \cdot n = 118.48MPa \cdot 2 = 236.97MPa$$

Sabiendo que la resistencia a la fluencia del acero inoxidable 304 es de 276MPa, se puede asegurar que el eje no fallará en esta sección.

- *Estudio en la sección roscada.*

A continuación se realizará un cálculo aproximado de la unión roscada en el eje del extensor. Se sabe que la rosca de esta sección es M20 con 28mm de profundidad.

La fuerza a la que está sometido el perno es

$$F_b = C \cdot P + F_i \quad (\text{Ec. 24})$$

donde  $F_i$  es la precarga aplicada al perno, y es cero para este caso

$C$  es la fracción de la carga externa  $P$  soportada por el perno y esta dada por

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} \quad (\text{Ec. 25})$$

$K_b$  es la rigidez del sujetador (de la rosca del eje) y es

$$K_b = \frac{A_d \cdot A_t \cdot E}{A_d \cdot l_t + A_t \cdot l_d} \quad (\text{Ec. 26})$$

$A_t$  es el área de esfuerzo de tensión y es de  $384 \cdot 10^{-6} m^2$ <sup>(10)</sup>

$A_d$  es el área del diámetro mayor del sujetador, que para una rosca de 24mm es de  $3.14 \cdot 10^{-4} m^2$

$l_t$  es la longitud de la parte roscada de agarre y es  $0.028m$

$l_d$  es la longitud de la parte sin rosca en agarre que en este caso es cero.

$E$  es el modulo de elasticidad del acero inoxidable 304 ( $193GPa$ )

$K_m$  es la rigidez del elemento, y para este caso es cero debido a que no existe ningún elemento entre el perno y la tuerca.

Entonces se tiene que  $C = \frac{K_b}{K_b} = 1$

Por lo que  $F_b = C \cdot P = 1 \cdot 50000N = 50000N$

Ahora el esfuerzo normal es:

$$\sigma = \frac{F_b}{A_t} \quad (\text{Ec. 27})$$

se tiene que  $\sigma = \frac{50000N}{384 \cdot 10^{-6}m^2} = 130.21MPa$

El esfuerzo de von Mises es

$$\sigma' = \sqrt{(130.21MPa)^2} = 130.21MPa$$

$$S_y = \sigma' \cdot n = 130.21MPa \cdot 2 = 260.42MPa$$

Sabiendo que la resistencia a la fluencia del acero inoxidable 304 es de  $276MPa$  se puede asegurar que el eje no fallará en esta sección.

#### **3.3.3.4.- Portaprobeta.**

Estarán hechos de acero inoxidable 304 y servirán para la sujeción de la probeta dentro de la cámara. Éstos tendrán rosca M20 x 2.5 en uno de sus extremos, mientras que en el otro tendrá una rosca  $\frac{1}{2}'' - 20UNF$ . Estas roscas permitirán unir el portaprobetas al eje del extensor y a la probeta.

### **3.3.4.- Otros cálculos**

El dispositivo que se pretende diseñar y construir en este trabajo es un prototipo, cuyo correcto funcionamiento está sujeto en gran medida a los ajustes que se le deban realizar una vez ensambladas las partes y probado su desempeño. Esto lleva a que los parámetros del proceso conocidos antes de la construcción y puesta en marcha, resulten insuficientes para poder predecir de manera exacta el comportamiento del mismo. A este hecho se le suman las características mismas del proceso, es decir, el empleo de un líquido criogénico para alcanzar temperaturas extremadamente bajas, ya que intervienen un sinnúmero de variables y factores difíciles de controlar, y mucho menos de predecir. A pesar de esto, a continuación se presentan una serie de cálculos con la finalidad de servir de guía y de apoyo para el diseño del dispositivo.

#### **3.3.4.1.- Cálculo del flujo másico de nitrógeno requerido para mantener una temperatura de $-150^{\circ}\text{C}$ en el interior de la cámara**

Para efecto de los cálculos, se considerará que el proceso se desarrolla a régimen permanente con flujo estable dentro de un volumen de control que confina a la cámara de ensayos. Un volumen de control es un volumen en el espacio en el que se tiene interés para un estudio, cuya superficie será cerrada y la masa, así como el calor y el trabajo pueden cruzar la superficie de control. En este tipo de procesos se tiene que <sup>(14)</sup>:

- El volumen de control no se mueve en relación al marco de coordenadas.
- El estado de la masa en cada punto del volumen de control no varía con el tiempo.
- Las razones de cambio con que la masa, el calor y el trabajo cruzan la superficie de control permanecen constantes en el tiempo.
- Se desprecia el calentamiento de la probeta, producto de la deformación.

Para procesos a régimen permanente con flujo estable, donde sólo hay una corriente de flujo que sale y una que entra es posible escribir la ecuación de la Primera ley de la termodinámica como:

$$\dot{Q} + \dot{m} \cdot \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot Z_e \right) = \dot{m} \cdot \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot Z_s \right) + \dot{W} \quad (\text{Ec. 28})$$

donde,  $m$  es el flujo másico que entra y sale del volumen de control

$h_e$  y  $h_s$  son las entalpías del fluido a las condiciones de entrada y salida, respectivamente

$Z_e$  y  $Z_s$  son las cotas desde el marco de referencia en la entrada y la salida, respectivamente

$Q$  es el calor retirado del volumen de control

$W$  es el trabajo que se genera en el interior del volumen de control

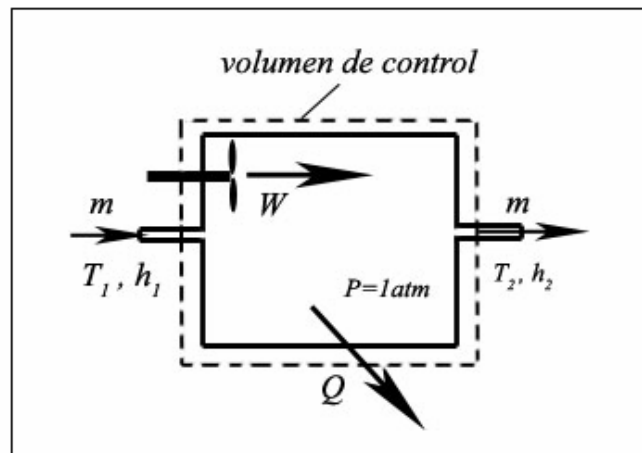


Figura 3.41. Esquema del volumen de control seleccionado

Para nuestro caso, las variaciones en la cota y en la energía cinética pueden ser despreciadas, por lo que la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\dot{Q} + \dot{m} \cdot h_1 = \dot{m} \cdot h_2 + \dot{W} \quad (\text{Ec. 29})$$

De esta ecuación despejamos el flujo másico, obteniendo:

$$\dot{m} = \frac{\dot{W} - \dot{Q}}{h_1 - h_2} \quad (\text{Ec. 30})$$

Se debe suponer que el ambiente interior de la cámara, así como todos los elementos que se encuentran dentro de ella se encuentran a  $-150^\circ\text{C}$ .

Los datos que se tienen son:

$$\begin{array}{ll} T_1 = -196^\circ\text{C} & Q = 34.44\text{W} \\ h_1 = -6435.46\text{KJ} / \text{Kmol} & W = 9\text{W} \\ T_2 = -150^\circ\text{C} & M = 28\text{Kg} / \text{Kmol} \\ h_2 = -5098.47\text{KJ} / \text{Kmol} & P = 1\text{atm} \end{array}$$

Ahora se calcula el flujo másico de nitrógeno, multiplicando la ecuación 30 por la masa molecular del nitrógeno para obtener el flujo en base masa:

$$\dot{m} = \left( \frac{\dot{W} - \dot{Q}}{h_1 - h_2} \right) \cdot M = \left( \frac{9\text{W} - 34.44\text{W}}{-6435.46 \cdot 10^3 \text{J} / \text{Kmol} - (-5098.47 \cdot 10^3 \text{J} / \text{Kmol})} \right) \cdot 28 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

$$\dot{m} = 5.33 \cdot 10^{-4} \text{Kg} / \text{s} = 1.92 \text{Kg} / \text{h}$$

Se necesitan  $1.92\text{Kg/h}$  de nitrógeno para mantener una temperatura constante de  $-150^\circ\text{C}$  dentro de la cámara.

### **3.3.4.2.- Cálculo del tiempo necesario para obtener una temperatura de $-125^\circ\text{C}$ en la superficie de la probeta partir de la temperatura ambiente.**

Si se supone que el interior de la cámara se mantiene a una temperatura constante de  $-150^\circ\text{C}$ , y que la probeta con sus extensores se introducen cuando éstos se encuentran a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ), se desea calcular el tiempo aproximado que se requerirá para alcanzar una temperatura superficial en la probeta de  $-125^\circ\text{C}$ .

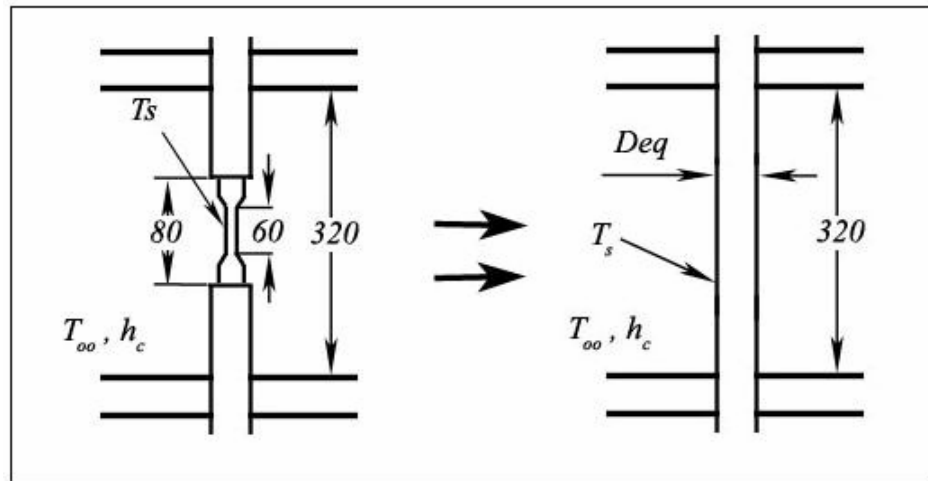


Figura 3.42. Esquema la probeta y los extensores con su cambio a diámetro equivalente (medidas en milímetros)

$$T_{\infty} = -150^{\circ}C$$

$$T_s = 25^{\circ}C$$

$$T = -125^{\circ}C$$

donde  $T_s$  es la temperatura de superficie de la probeta y  $T$  es la temperatura que se desea alcanzar.

Primero, para facilitar los cálculos, se determinará un diámetro equivalente para los extensores y la probeta, con el fin de reducir este sistema a un solo cilindro de diámetro  $D_{eq}$  y longitud  $L$ . El diámetro equivalente se obtiene a partir de que se debe conservar la misma área superficial:

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1}{2} \cdot L_1 + 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_2}{2} \cdot L_2 + 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1}{2} \cdot L_2 \quad (\text{Ec. 31})$$

$$A_T = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{eq}}{2} \cdot L_T \quad (\text{Ec. 32})$$

donde,  $D_1$  y  $L_1$  son el diámetro y la longitud de la sección calibrada de la probeta.

$D_2$  y  $L_2$  son el diámetro y la longitud de la sección roscada de la probeta.



$D_3$  y  $L_3$  son el diámetro y la longitud de los extensores.

$D_{eq}$  es el diámetro equivalente.

$L_T$  es la longitud total.

De los datos:

$$D_1 = 6.35mm$$

$$D_2 = 12.70mm$$

$$D_3 = 31.75mm$$

Al igualar las ecuaciones 31 y 32, se tiene que:

$$D_{eq} = \frac{D_1 \cdot L_1 + D_2 \cdot L_2 + D_3 \cdot L_3}{L_T} \quad (\text{Ec. 33})$$

$$D_{eq} = \frac{6.35mm \cdot 60mm + 12.7mm \cdot 20mm + 31.75mm \cdot 240mm}{320mm} = 25.80mm = 0.0258m$$

El tiempo que se requiere para completar el proceso de enfriamiento se obtiene a partir de los resultados para una resistencia interna despreciable, representados por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p}{h_c \cdot A_s} \cdot \ln\left(\frac{T_s - T_\infty}{T - T_\infty}\right) = \frac{\rho \cdot D_{eq} \cdot c_p}{4 \cdot h_c} \cdot \ln\left(\frac{T_s - T_\infty}{T - T_\infty}\right) \quad (\text{Ec. 34})$$

El coeficiente convectivo  $h_c$  se calcula a partir de la ecuación 7, siguiendo el mismo procedimiento empleado en ocasión del cálculo del aislante, y se obtiene un valor de  $h_c = 42.38W/m^2 \cdot K$

Luego de obtener las propiedades del acero inoxidable a 223K ( $\rho = 7850Kg/m^3$  y  $c_p = 405J/Kg \cdot K$ ), se calcula el tiempo:

$$t = \frac{7850Kg/m^3 \cdot 0.0258m \cdot 405J/Kg \cdot K}{4 \cdot 42.38W/m^2 \cdot K} \cdot \ln\left(\frac{25^\circ C - (-150^\circ C)}{-125^\circ C - (-150^\circ C)}\right) = 894.2s$$

$$t = 14.90 \text{ min}$$

Se requerirán 14.9 minutos para poder alcanzar una temperatura de  $-125^{\circ}\text{C}$  en la superficie de la probeta.

Además del tiempo necesario para enfriar la probeta, se puede calcular la transferencia de calor entre el nitrógeno y la misma, bajo las condiciones del problema anterior.

El calor transferido de la probeta al ambiente se calcula a través de la ley de enfriamiento de Newton (ecuación 10) ajustada a los datos de este problema.

$$q_e = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) = h_c \cdot \pi \cdot D_{eq} \cdot L_T \cdot (T_s - T_{\infty})$$

$$q_e = (42.38 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \pi \cdot 0.0258 \text{ m} \cdot 0.32 \text{ m} \cdot (25^{\circ}\text{C} - (-150^{\circ}\text{C})) = 185.12 \text{ W}$$

#### ***3.3.4.3.- Cálculo del flujo másico de nitrógeno requerido para disminuir la temperatura en el interior de la cámara de $25^{\circ}\text{C}$ a $-150^{\circ}\text{C}$***

Si al calor que se gana a través de las paredes se le suma el calor apenas calculado, al sustituir ese resultado en la ecuación de la primera ley de la termodinámica (ecuación 29), se puede obtener el flujo másico de nitrógeno que se necesita para disminuir la temperatura en el interior de la cámara de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $-150^{\circ}\text{C}$ .

$$\dot{m} = \left( \frac{\dot{W} - \dot{Q}}{h_1 - h_2} \right) \cdot M = \left( \frac{9 \text{ W} - (34.44 \text{ W} + 185.12 \text{ W})}{-6435.46 \cdot 10^3 \text{ J} / \text{Kmol} - (-5098.47 \cdot 10^3 \text{ J} / \text{Kmol})} \right) \cdot 28 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

$$\dot{m} = 4.41 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} / \text{s} = 15.87 \text{ Kg} / \text{h}$$

***CAPÍTULO IV***  
***Construcción del dispositivo***

Una vez culminado el desarrollo teórico del dispositivo y habiendo realizado los planos respectivos que lo componen, se da inicio a la fabricación de las distintas piezas, y posteriormente, al ensamble con los demás elementos que fueron seleccionados y adquiridos con el fin de obtener el prototipo terminado. En esta etapa se deben escoger los procesos de fabricación que logren solventar de una manera efectiva las necesidades de calidad, tiempo y economía.

#### ***4.1.- Selección de Materiales***

Los materiales que serán empleados para la fabricación de los elementos que compondrán el dispositivo fueron seleccionados según sus especificaciones técnicas en función de los requerimientos de servicio de cada uno. También se tomó en cuenta la disponibilidad en el mercado nacional y los costos de los mismos.

##### ***4.1.1.- Acero Inoxidable AISI 304***

Es un acero inoxidable austenítico, cuyos principales aleantes son el cromo (Cr) y níquel ( Ni ) y bajo contenido de carbono ( C ), y que presenta una excelente resistencia a la corrosión debido a su alto contenido de cromo que, al ser un metal muy reactivo, se combina con el oxígeno del aire o en cualquier otra condición oxidante para formar una película que lo aísla del medio agresivo (pasivación). Este tipo de acero tiene propiedades para ser embutido profundo, no es templable ni magnético y puede ser endurecido sólo mediante trabajo en frío. Posee excelentes propiedades criogénicas y buena resistencia a altas temperaturas. Exhiben una buena soldabilidad y son fáciles para fabricar, si se mantienen procedimientos adecuados. Su aplicación es frecuente en la industria de transporte, almacenamiento y manejo de gases licuados, en la industria alimenticia, en maquinaria industrial como en los cuerpos de bombas y tubos, entre otras aplicaciones <sup>(19)</sup>.

Tipo AISI o nombre común (UNS)	C	Cr	Ni	Mo	Otro
304 (S30400)	0.08	18.0 - 20.0	8.0 - 10.5	-	0.10 N

Tabla 4.1. Análisis químico del acero inoxidable austenítico AISI 304, expresado en % de los elementos <sup>(19)</sup>.

Densidad	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Dureza Brinell	123
Dureza Rockwell B	70
Dureza Vickers	129
Resistencia última a la tracción	505 MPa
Resistencia a la cedencia	276 MPa
Elongación a la ruptura	70 %
Módulo de elasticidad	193 Gpa
Calor específico	0,5 J/g.°C
Conductividad térmica	16,2 W/m.K

Tabla 4.2. Principales propiedades físicas mecánicas y térmicas del acero inoxidable austenítico 304<sup>(19)</sup>.

El acero inoxidable *AISI* 304 se empleará para la construcción de los siguientes elementos:

- las estructuras interna y externa de la cámara
- los ejes de los extensores
- el pasador de los brazos 1 y 2
- la bandeja
- el eje vertical
- la pieza de soporte
- el inyector

Tanto las estructuras interna y externa de la cámara como los ejes de los extensores estarán sometidos a bajas o a altas temperaturas, por lo que el acero inoxidable 304 es ideal debido a que en cualquiera de esas condiciones los cambios

en sus propiedades mecánicas no afectarán el desempeño de dichos elementos. Además, este acero posee una excelente resistencia a la corrosión, incluso a las temperaturas a las que se someterá.

En cuanto a los demás elementos que se enumeraron arriba, éstos tendrán aplicadas diversas cargas estáticas que, como se constató en el capítulo anterior, pueden ser soportadas satisfactoriamente por este material. En éste caso también es primordial la acción corrosiva del ambiente sin tener que aplicar ningún tipo de recubrimiento ya que éste afectaría su desempeño.

Otras variables de menor ponderación que igualmente se han consideraron fueron: el aspecto relacionado con la estética del equipo y la economía. En el primero, el acero inoxidable 304 brinda grandes ventajas sobre los demás aceros debido a su acabado superficial, mientras que en otro aspecto, si bien es cierto que algunos de los elementos anteriormente anunciados estarían sobrediseñados al ser fabricados con este material, es obvio que en aras de la economía del diseño es posible utilizar retazos generados de la fabricación de las piezas principales para construir algunos de los elementos accesorios no estructurales.

#### ***4.1.2.- Acero AISI 4140***

Es un acero especial de baja aleación y alta resistencia al cromo-molibdeno, templado y revenido que tiene buena resistencia a la torsión, la tracción, al impacto y al desgaste. Es utilizable en temperaturas de hasta 450°C sin perder su historial termomecánico (bonificado) equivalente al AISI 4142 y ASTM a-193 Grado B-7. Se emplea en la construcción de vehículos, engranajes y motores, partes y repuestos de maquinarias tales como árboles de transmisión, brazos de ejes, cardanes, cigüeñales, pines y émbolos, entre otros <sup>(19)</sup>.

Densidad	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Dureza Brinell	385
Dureza Rockwell B	101
Dureza Vickers	408
Resistencia última a la tracción	1380 MPa
Resistencia a la fluencia	1140 MPa
Elongación a la ruptura	15 %
Módulo de elasticidad	205 Gpa
Calor específico	0,473 J/g.°C
Conductividad térmica	42,6 W/m.K

Tabla 4.3. Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero AISI 4140 templado a 425°C en aceite <sup>(19)</sup>.

Para la base de los extensores y sus pasadores el factor que tiene más peso específico en cuanto a la selección del material es la resistencia mecánica, por lo que debido a que estos elementos estarán sometidos a cargas de tracción considerables, se empleará el acero *AISI* 4140 para su construcción.

#### 4.1.3.- UHMW – PE ( *Cestilene HD 1000* )

El UHMW-PE es un polietileno de ultra elevado peso molecular (del inglés ultra high molecular weight). De todos los tipos de UHMW-PE, el Cestilene HD 1000 ofrece un mejor balance en el perfil de sus propiedades. Combina una excelente resistencia al desgaste y a la abrasión, con una gran resistencia al impacto, incluso a temperaturas por debajo de -200°C. Se aplica principalmente en la fabricación de equipos criogénicos, piezas mecánicas en general, maquinaria de embotellado, enlatado y envasado, industria química, industria textil, entre otras aplicaciones <sup>(20)</sup>.

Entre sus principales características se pueden nombrar:

- Buena resistencia al desgaste y a la abrasión
- Elevada resistencia al impacto, incluso a bajas temperaturas
- Excelente estabilidad química
- Bajo coeficiente de rozamiento

- Resistencia mecánica, a la fluencia y rigidez, moderadas
- Muy buenas propiedades dieléctricas y de aislamiento eléctrico
- Fisiológicamente inerte
- Buena resistencia a las radiaciones de energía elevada (rayos gama y X)

El UHMW se empleará para la construcción de las secciones removibles de la cámara, ya que la geometría de las partes que las componen requieren que el material sea de fácil maquinado, debe tener un coeficiente de fricción bajo debido a que existirá deslizamiento entre las partes y el costo es reducido en comparación a otros materiales con las mismas características. Además, el material de las secciones removibles debe soportar bajas temperaturas sin que se vean afectadas sus propiedades y la vez ofrecer una conductividad térmica aceptable para no afectar el aislamiento del sistema.

<b>PROPIEDADES</b>	Metodos de ensayo ISO / (IEC)	Unidades	<b>CESTILENE HD 1000</b>
Color	—	—	natural (blanco)/ negro/verde
Peso molecular	—	10 <sup>6</sup> g/mol	4,5
Densidad	1183	g/cm <sup>3</sup>	0,93
Absorción de agua hasta saturación en agua a 23 °C	—	%	0,01
<b>Propiedades térmicas (3)</b>			
Punto de fusión (DSC, 10 °C/min)	11357	°C	130–135
Conductividad térmica 23 °C	—	W/(K·m)	0,40
Coefficiente de dilatación valor medio entre 23 y 100 °C	—	10 <sup>-6</sup> m/(m·K)	200
Temperatura máxima de servicio en aire:			
- en periodos cortos	—	°C	120
- en continuo: durante 20.000 h	—	°C	80
Temperatura mínima de servicio	—	°C	-200
Inflamabilidad : - "Índice de oxígeno"	4589	%	< 20
<b>Propiedades mecánicas a 23 °C (9)</b>			
Ensayo a tracción			
- esfuerzo en el punto de fluencia	527	MPa	19
- elongación en el punto de fluencia	527	%	15
- elongación nominal a la rotura	527	%	> 50
- módulo de elasticidad	527	MPa	750
Ensayo a compresión - esfuerzo al 1/2/5 % de deformación	604	MPa	4,5/8/14

Tabla 4.4. Principales propiedades del UHMW (Cestilene HD 100) <sup>(20)</sup>.



#### 4.1.4.- PTFE (Teflón®)

PTFE (Poli-Tetra-Fluoro-Etileno) es un polímero con una estructura de cadena molecular que es conocido también con el nombre de Teflon®. Las macromoléculas de PTFE están encadenados por la más estable unión covalente en compuestos orgánicos conocidos hasta ahora. Debido a esta fuerte unión, las macromoléculas son muy compactas, dando al PTFE excelentes propiedades físicas (insolubilidad, resistencia térmica y química, anti-adherencia, auto lubricación, buenas propiedades dieléctricas). El PTFE puede usarse indefinidamente en temperaturas de  $-260^{\circ}\text{C}$  hasta  $260^{\circ}\text{C}$  <sup>(21)</sup>.

Se empleará PTFE para la elaboración de las arandelas que estarán entre los brazos de aluminio, sobre la pieza de soporte y debajo de la bandeja de la cámara, ya que es un material autolubricante.

<i>Propiedades mecánicas a 23°C</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valores</i>
Peso específico	<i>Grs/cm<sup>3</sup></i>	2.13 A 2.21
Resistencia a la tracción	<i>Kg/cm<sup>2</sup></i>	70 - 210
Resistencia a la compresión	<i>Kg/cm<sup>2</sup></i>	44 - 100
Alargamiento a la rotura (mínima)	<i>%</i>	200
Resistencia al choque sin entalla	<i>Kg.cm/cm<sup>2</sup></i>	NO ROMPE
Dureza	<i>Shore D</i>	50 A 55
Coefficiente de roce estático s/acero		0.06 A 0.09
Coefficiente de roce dinámico s/acero		0.13
<i>Propiedades térmicas</i>		
Temperatura de uso continuo	<i>°C</i>	-260 A 260
Coefficiente de dilatación lineal de 23 a 100 °C	<i>Por °C</i>	0.000125
Coefficiente de conducción térmica	<i>Kcal/m.h.°C</i>	0.24

Tabla 4.5. Principales propiedades del PTFE Teflón® <sup>(21)</sup>

#### ***4.1.5.- Poliuretano expandido***

Los sistemas de poliuretano, son básicamente el conjunto de dos componentes viscosos, el Polioliol y el Isocianato, que son líquidos a temperatura ambiente. La mezcla del Polioliol y el Isocianato se efectúa habitualmente con una maquinaria específica, y produce una reacción química exotérmica que se caracteriza por la formación de enlaces entre ambos componentes, consiguiendo una estructura sólida, uniforme y muy resistente. Además, el calor que desprende la reacción puede utilizarse para evaporar un agente que rellena las celdillas que se forman, de tal modo que se obtiene un producto sólido, que posee una estructura celular, con un volumen muy superior al que ocupaban los productos líquidos <sup>(22)</sup>. Esta reacción química que da lugar a la espuma rígida, tiene transcurso "in situ", es decir, en el mismo sitio de la aplicación.

En la espuma rígida de poliuretano para el aislamiento térmico, los componentes están diseñados para conseguir una estructura ligera, rígida y de celdas cerradas. Éstas encierran en su interior un agente que, al estar inmóvil, otorga unas características de aislamiento térmico muy superiores a las que encierran otros materiales en su interior (aire, anhídrido carbónico, etc.). Esta espuma se caracteriza fundamentalmente por su bajo coeficiente de transferencia de calor, lo que la convierte en un aislante térmico por excelencia.

<b>Características</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	
DENSIDAD	UNE 1602	<i>Kg/m<sup>3</sup></i>	30
COEFICIENTES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	UNE 92202	<i>W/m.K</i>	0,026
ABSORCIÓN DE AGUA	DIN 53428	<i>%Volumen</i>	<4,1
PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA	UNE 92226	-	>98
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	UNE EN 826	<i>kPa</i>	>115
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	UNE EN 1607		>180
ESTRUCTURA CELULAR	ISO 4590	<i>%Cerrada</i>	>90
COMPORTAMIENTO AL FUEGO	UNE 23727		M4
COEFICIENTE DE DILATACIÓN O CONTRACCIÓN		<i>K-1</i>	5 a 8.10-5

Tabla 4.6. Propiedades del poliuretano expandido <sup>(22)</sup>.

Espuma rígida de poliuretano	Lana mineral	Caucho	Espuma de vidrio	Madera aglomerada
Kcal. (m c °C) R				
0.026	0.035	0.035 - 0.120	0.047	0.070 - 0.040

Tabla 4.7. Cuadro comparativo de las conductividades térmicas de varios aislantes <sup>(22)</sup>.

#### 4.1.6.- Aluminio

El aluminio es un metal ligero, con resistencia moderada, cuya densidad es aproximadamente un tercio de la del acero o el cobre, es muy maleable y dúctil, y apto para el mecanizado y la fundición. Debido a su elevado potencial de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido impermeable firmemente adherido con un volumen específico similar al del aluminio que evita su desprendimiento y que pasiva al metal deteniendo el proceso de oxidación. Esto le proporciona gran resistencia a la corrosión y durabilidad <sup>(19)</sup>.

Su ligereza, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y bajo punto fusión le convierten en un material idóneo para una multitud de aplicaciones, entre las que se pueden nombrar:

- Recipientes criogénicos (hasta  $-200^{\circ}\text{C}$ ).
- Transporte, como material estructural en aviones, automóviles, tanques, superestructuras de buques, etc.
- Construcción; ventanas, puertas, perfiles estructurales, etc.
- Bienes de uso; utensilios de cocina, herramientas, etc.
- Transmisión eléctrica.

<b>Densidad</b>	2700 <i>Kg/m<sup>3</sup></i>
<b>Dureza Brinell</b>	73
<b>Dureza Vickers</b>	83
<b>Resistencia última a la tracción</b>	241 <i>MPa</i>
<b>Resistencia a la fluencia</b>	214 <i>MPa</i>
<b>Elongación a la ruptura</b>	12 %
<b>Módulo de elasticidad</b>	68,9 <i>Gpa</i>
<b>Calor específico</b>	0,9 <i>J/g.°C</i>
<b>Conductividad térmica</b>	200 <i>W/m.K</i>

Tabla 4.8. Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio AA-6063-T6 <sup>(19)</sup>.

<b>Densidad</b>	2700 <i>Kg/m<sup>3</sup></i>
<b>Dureza Brinell</b>	105
<b>Dureza Vickers</b>	99
<b>Resistencia última a la tracción</b>	234 <i>MPa</i>
<b>Resistencia a la fluencia</b>	165 <i>MPa</i>
<b>Elongación a la ruptura</b>	3,5 %
<b>Módulo de elasticidad</b>	72,4 <i>Gpa</i>
<b>Calor específico</b>	0,963 <i>J/g.°C</i>
<b>Conductividad térmica</b>	151 <i>W/m.K</i>

Tabla 4.9. Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la fundición de aluminio A-356 (vaciada en molde de arena) <sup>(19)</sup>.

Para la elaboración de los brazos 1 y 2 se empleará aluminio estruido de aleación AA-6063-T6 debido a que es fácilmente maquinable y a que su peso es

reducido, mientras que para los brazos 3 y 4 de la máquina Instron, se utilizará una fundición de aluminio tipo A-356 (vaciado en molde de arena) que cumple con las características antes mencionadas, y además es la mejor opción para lograr la geometría deseada. En ambos casos, tanto el aluminio estruido como el fundido ofrecen propiedades mecánicas que aseguran que los elementos no fallarán ante las cargas a las que estarán sometidos.

## **4.2.- Construcción**

### **4.2.1.- Estructura**

Para la fabricación de la estructura se emplearon cuatro láminas de  $1000mm \times 640mm \times 1.3mm$ , una lámina de  $1220mm \times 530mm \times 3mm$  y un perfil angular de  $90^\circ$ ,  $30mm$  de ala,  $3mm$  de espesor y  $1500mm$  de longitud.

#### **4.2.1.1.- Corte y doblado.**

Luego de realizar los cortes necesarios a las láminas de  $1.3mm$  de espesor, de éstos se obtuvieron las siguientes piezas:

- Pieza 1: a una lámina de  $840mm \times 350mm$  se le realizan dos dobleces a  $90^\circ$  para formar las paredes laterales y superior de la estructura interna de la cámara.

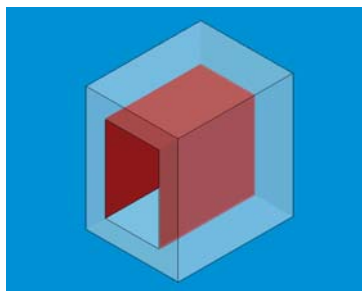


Figura 4.1. Pieza 1

- Pieza 2: para formar las caras inferior y posterior de la estructura interna se dobla en un ángulo de  $90^\circ$  una lámina de  $670\text{mm}$  x  $200\text{mm}$ .

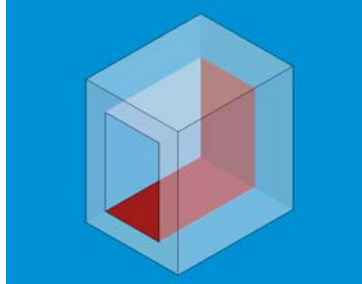


Figura 4.2. Pieza 2

- Pieza 3: en una lámina de  $240\text{mm}$  de altura y  $200\text{mm}$  de ancho se le realizó un embutido de forma circular.

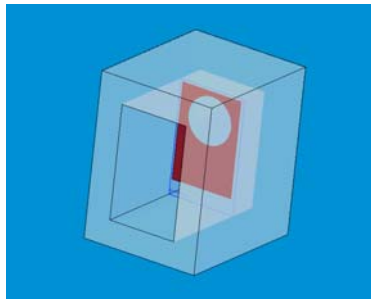


Figura 4.3. Pieza 3

- Pieza 4: a un retazo de  $800\text{mm}$  x  $420\text{mm}$  se le realiza un doblado de  $90^\circ$  para formar lo que serán la pared lateral izquierda y la cara superior de la estructura externa de la cámara.

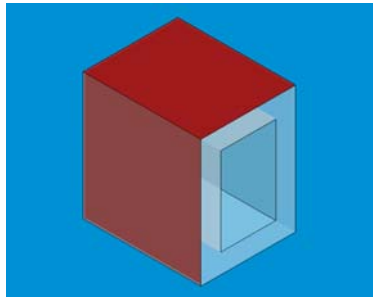


Figura 4.4. Pieza 4

- Pieza 5: la pared lateral derecha externa de la cámara se obtiene de un corte de  $460\text{mm} \times 420\text{mm}$ .

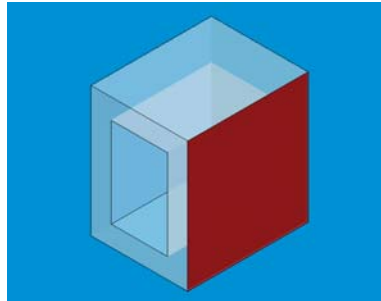


Figura 4.5. Pieza 5

- Pieza 6: de un corte de  $318\text{mm} \times 198\text{mm}$  se obtendrá la cara interior de la puerta.

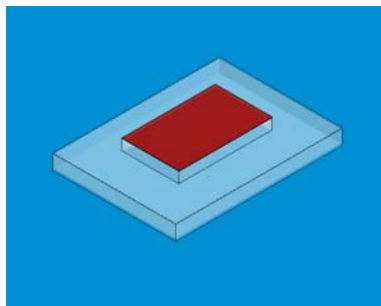
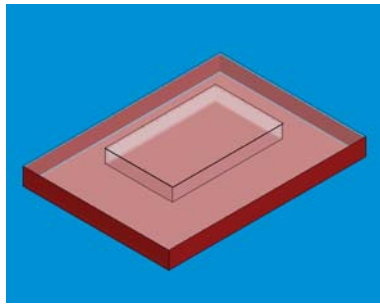
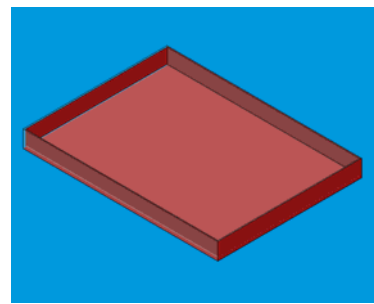


Figura 4.6. Pieza 6

- Pieza 7: a una lámina de  $620\text{mm} \times 500\text{mm}$  se le realizan cortes cuadrados de  $40\text{mm}$  de lado en sus cuatro esquinas, para que luego al doblarla se obtuviera una bandeja que pasará a ser la cara exterior de la puerta.



a)



b)

Figura 4.7. Pieza 7 a) y b): Lámina doblada para formar la parte posterior de la puerta

De la lámina de  $3\text{mm}$  de espesor se obtuvieron la siguiente pieza:

- Piezas 8 y 9: Se obtienen a partir de dos tiras de  $460\text{mm} \times 40\text{mm}$  y  $260\text{mm} \times 40\text{mm}$

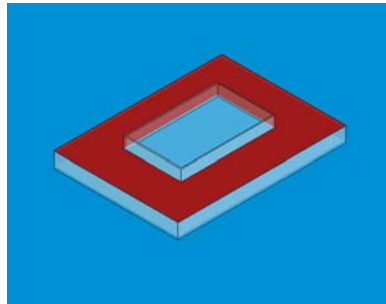


Figura 4.8. Piezas 8 y 9

- Pieza 10: para formar las caras inferior y posterior de la estructura externa se dobla en un ángulo de  $90^\circ$  una lámina de  $880\text{mm} \times 340\text{mm}$ .



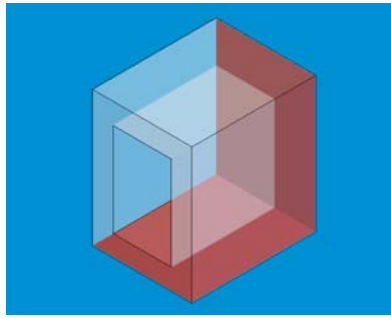


Figura 4.9. Pieza 10

Luego de realizar los cortes en el perfil angular se obtienen:

- Piezas 11 y 12: Serán las encargadas de formar el marco para la parte de la puerta que entrará dentro de la cámara.

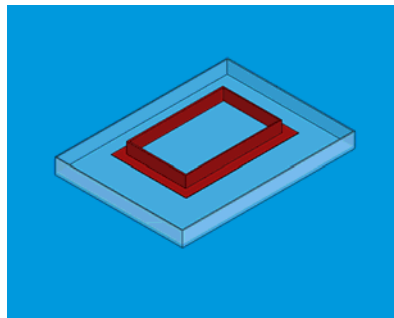


Figura 4.10. Piezas 11 y 12

#### ***4.2.1.2.- Soldadura de las piezas***

Para formar las estructuras que conforman la cámara se empleó un proceso de soldadura por arco con gas protector TIG (Tungstein Inert Gas). En este proceso la unión se logra por el calor generado por un arco eléctrico que se genera entre un electrodo y las piezas, pero el electrodo se encuentra protegido por una copa por la que se inyecta un gas inerte, en este caso argón. Con lo anterior se genera un arco protegido contra la oxidación y además perfectamente controlado. En la soldadura TIG el electrodo de la máquina es de tungsteno, por lo que el metal de aporte (acero inoxidable) se debe añadir por separado.

El proceso de soldadura de las piezas de la estructura de la cámara comienza colocando pequeños puntos con el fin de mantener firmemente unido el conjunto en su posición definitiva. Luego se dará paso a la soldadura definitiva generando los cordones con el material de aporte en las uniones a tope de las piezas.

La estructura interna esta formada por las piezas 1 y 2 mientras que la externa por la 4, 5 y 10. La puerta estará compuesta por las piezas 6, 7, 8, 9, 11 y 12.

#### **4.2.2.- Sistema de sujeción.**

##### **4.2.2.1.- Bandeja**

Se utilizó un disco de 250mm de diámetro y 8mm de espesor, que fue perforado en su centro consecutivamente con brocas de ½’’ (12.7mm), ¾’’ (19.05mm), y 31mm. Terminado este proceso se procedió a un mandrinado en dicho agujero para llevar su diámetro a 45mm. Se realizó un refrentado en una de las caras del disco para brindar un apoyo plano al eje (A). En la cara opuesta se realizó un chaflán de 45° (B) en el agujero para luego ser rellenado por el material de aporte de la soldadura al acoplarle el eje de la bandeja.

Para realizar el eje de la bandeja se utilizó un tocho de sección circular y 2’’ (50.8mm) de diámetro y 90mm de longitud al cual se le realizó un refrentado en ambas caras y un cilindrado externo con el fin de obtener medidas aproximadas. Además se le realizó un chaflán de 45° (C) en el lado del eje que entrará en la bandeja. Se colocó el eje en el interior del agujero de la bandeja y luego ambas piezas fueron soldadas con un proceso de soldadura por arco con gas protector TIG.

El conjunto fue refrentado en sus caras planas y se le hizo un cilindrado en toda su geometría hasta obtener las medidas referidas en los planos. Luego se le hizo un chaflán de 45° en toda la periferia del disco (D) y se le realizó una rosca 1 ¼’’ – 14 UNF con 32mm de profundidad en el extremo del eje (E). Se taladraron y avellanaron los ocho agujeros con una broca para los tornillos que sujetarán la cámara (F).

Los procesos de refrentado, cilindrado, chaflaneado y perforado se realizaron en un torno paralelo mientras que los agujeros para los tornillos de sujeción fueron realizados en un taladro fresa usando aceite para la lubricación y refrigeración.

Para todas las operaciones realizadas en el torno se usó una velocidad de giro de  $520rpm$  y un avance de  $50mm/min$ .

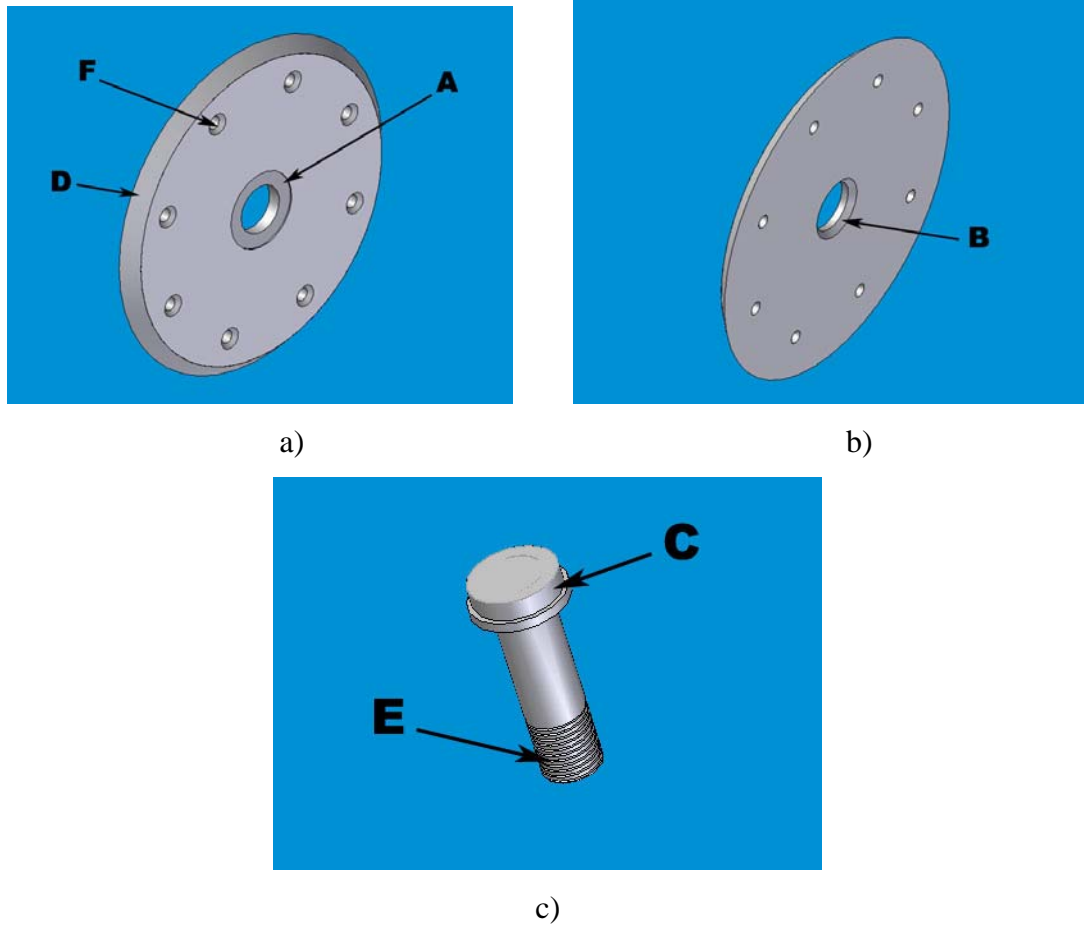


Figura 4.11. a) y b): Bandeja, c) eje de la bandeja

#### 4.2.2.2.- Brazo 1

Se utilizó un tocho de sección circular de 4'' ( $101.6mm$ ) de diámetro y  $320mm$  de largo, la cual fue refrentada para llevarla a su medida de longitud especificada en los planos. Mediante el uso de una fresadora universal y un portaherramienta con cuchilla y con  $770rpm$  en el cabezal,  $132mm/min$  de avance y  $1.5mm$  de profundidad por pasada, se desbastó la barra para obtener una sección transversal rectangular con medidas  $2mm$  por encima de las especificadas en los planos.

Se marcaron los centro de los agujeros con un centro punto y se procedió a perforar el agujero pequeño (A) usando, consecutivamente, brocas de  $\frac{1}{4}$ " (6.35mm),  $\frac{1}{2}$ " (12.7mm) y 18mm, mientras que para el agujero grande (B) se usaron brocas de  $\frac{1}{2}$ " (12.7mm),  $\frac{3}{4}$ " (19.05mm), y 31mm. Para lograr las medidas especificadas en los planos se le realizó un escareado al agujero de menor diámetro mientras que el del diámetro mayor se barrenó.

Con un disco (fresa) de 20 dientes, 120mm de diámetro y 3mm de ancho, y con 770rpm en el cabezal, 132mm/min de avance y 1.5mm de profundidad, se desbastaron ambas superficies del brazo con la finalidad de realizar el encaje en el extremo del pasador (C).

Empleando una fresa cilíndrica helicoidal de cuatro cortes, y la misma velocidad de corte y avance anteriores, se obtuvieron las medidas del brazo especificadas en los planos. Utilizando el plato divisor, con la misma fresa y los mismos parámetros se realizaron los redondeados en los extremos del brazo (D).

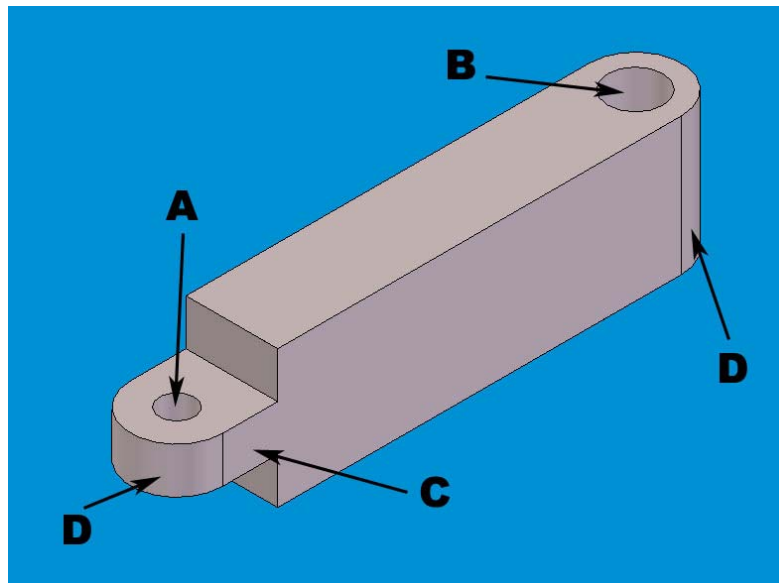


Figura 4.12. Brazo 1

#### 4.2.2.3.- Brazo 2

Se utilizó una barra de sección cuadrada de  $80\text{mm}$  de lado, a la que se le realizaron las mismas operaciones que al brazo 1 con la diferencia de que el disco de  $120\text{mm}$  fue empleado para hacer la ranura en el extremo del pasador (A).

En los procesos realizados tanto al brazo 1 como al brazo 2 se empleó keroseno como refrigerante y lubricante.

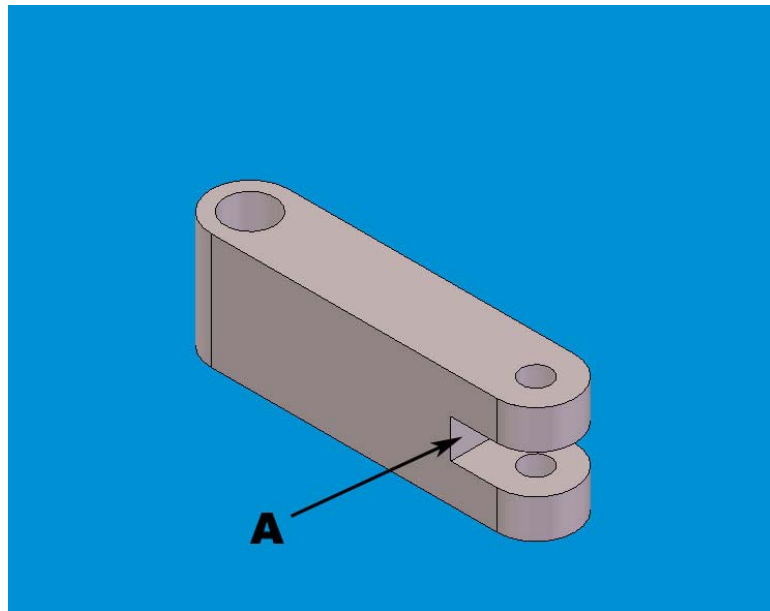


Figura 4.13. Brazo 2

#### 4.2.2.4.- Pasador brazos

A partir de un tocho de  $\frac{3}{4}''$  ( $19.05\text{mm}$ ) de diámetro y  $100\text{mm}$  de longitud y mediante procesos de refrentado y cilindrado se obtuvo el pasador con las medidas especificadas en los planos.

De una barra hexagonal de  $12\text{mm}$  de lado se obtuvo la cabeza del pasador que posteriormente fue soldada al mismo (A). Al pasador se le realizó una rosca  $\frac{3}{4}'' - 16$  UNF con  $18\text{mm}$  de profundidad en el extremo opuesto a la cabeza hexagonal (B). De la misma barra hexagonal se fabricó la tuerca que dará ajuste a los brazos.

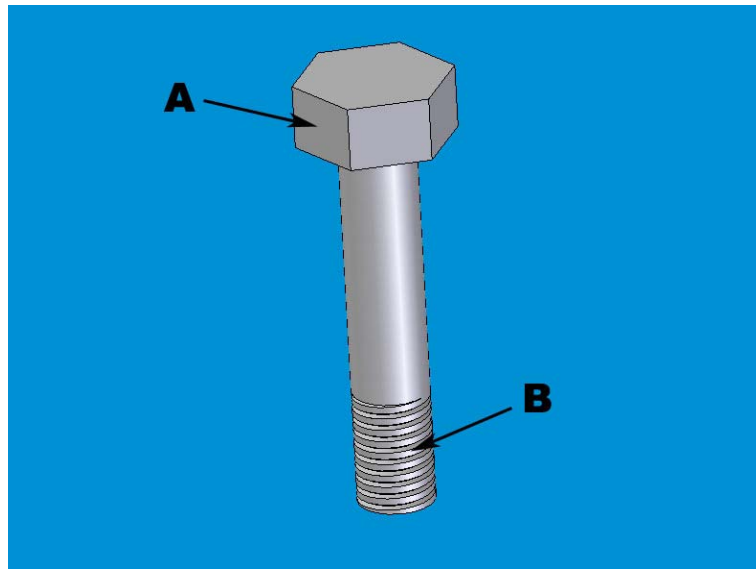
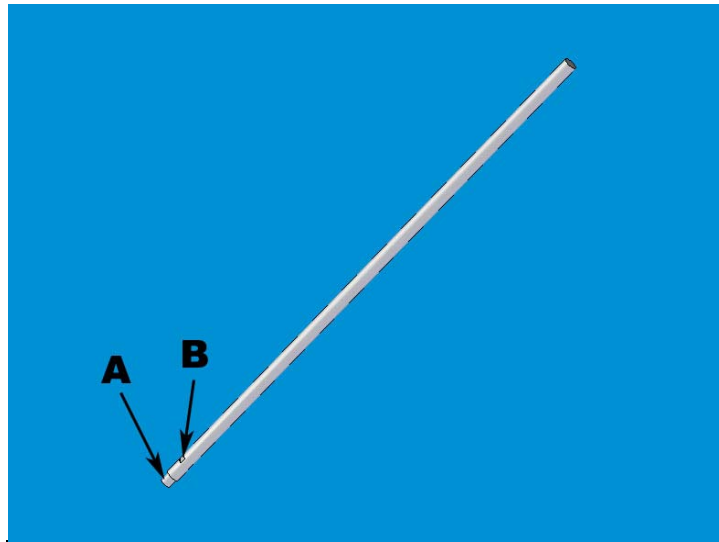


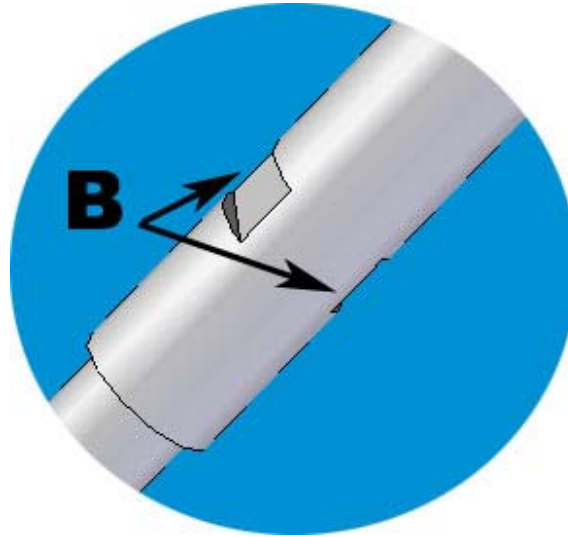
Figura 4.14. Pasador brazos

#### 4.2.2.5.- Eje vertical Instron

Se utilizó una barra de sección transversal circular de 1 ¼" (31.75mm) de diámetro y 1500mm de longitud a la cual se le realizó un refrentado en ambas caras y una rosca 1" – 12 UNF con 44mm de profundidad en uno de sus extremos (A). Se colocó la barra en la fresadora con el fin de crear dos caras paralelas de 20mm de ancho y 6mm de profundidad (B).



a)



b)

Figura 4.15. a) Eje vertical, b) detalle del eje vertical

#### 4.2.2.6.- Pieza de soporte

A un tocho de sección transversal circular de  $2\frac{1}{2}$ " ( $63.75\text{mm}$ ) de diámetro y  $45\text{mm}$  de longitud se le realizó un agujero pasante en el centro de la cara plana con brocas de  $\frac{1}{2}$ " ( $12.7\text{mm}$ ),  $\frac{3}{4}$ " ( $19.05\text{mm}$ ) y  $31\text{mm}$  consecutivamente empleando el torno (A), para luego realizar un cilindrado interno con una cuchilla y así obtener las medidas especificadas en el plano. En la periferia del cilindro se le hicieron dos agujeros pasantes de  $5\text{mm}$  de diámetro (B) para luego ser roscados internamente (rosca  $\frac{3}{8}$ " – 16 UNF).

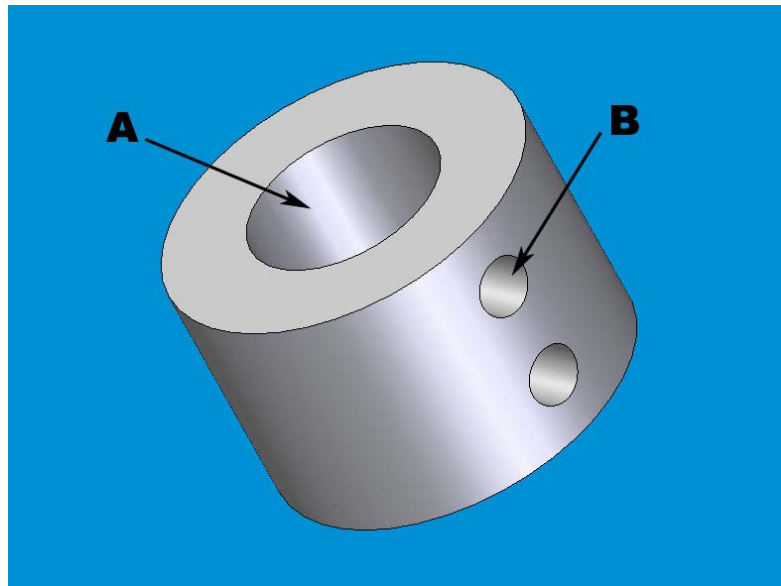


Figura 4.16. Pieza de soporte

#### 4.2.2.7.- Brazo 3

Se fabricó un modelo en madera del brazo con las medidas aproximadas que servirá para la elaboración del molde de la fundición.

Una vez fundido el brazo de aluminio se desbastaron sus caras en la fresadora empleando un portaherramienta con cuchilla (770rpm en el cabezal, 132mm/min de avance y 1.5mm de profundidad por pasada) y se obtuvieron las medidas especificadas en los planos. Se perforó el agujero pasante donde se introducirá el eje vertical con una broca de 1'' (25.4mm) (A) y luego se le hizo un roscado interno de 1'' – 12 UNF con 45mm de profundidad.

Se perforaron dos agujeros pasantes en el segmento que se apoyará en la máquina Instron (B) con una broca de 12mm y, empleando una fresa cilíndrica helicoidal de cuatro cortes de 12mm de diámetro, se le hizo dos ranuras de 30mm de longitud a partir de los agujeros anteriores (C). Con una fresa de 25mm se procedió a hacer una ranura de 50mm de longitud y 10mm de profundidad (D) sobre cada uno de los agujeros anteriormente realizados.



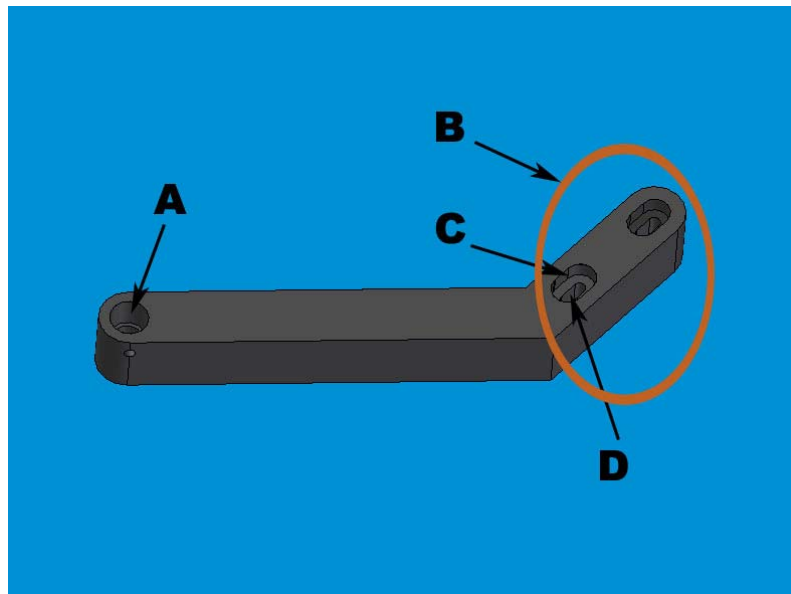


Figura 4.17. Brazo 3

#### 4.2.2.8.- Brazo 4

Se le realizaron las mismas operaciones que en el Brazo 3 con la diferencia de que el agujero donde pasará el eje vertical de acero inoxidable es pasante y de  $1\frac{1}{4}$ " (31.75mm) (A).

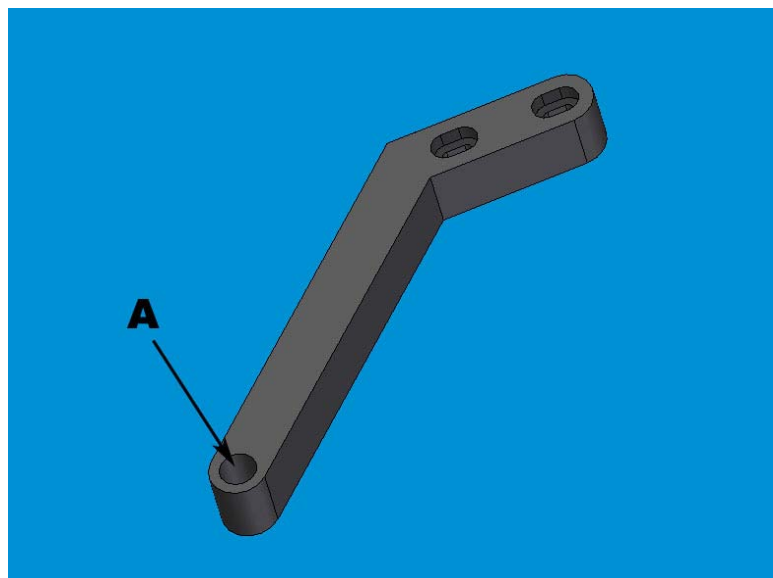


Figura 4.18. Brazo 4

#### 4.2.2.9.- Arandelas

De una lámina de PTFE de  $1mm$  de espesor se obtuvieron las arandelas con sus medidas especificadas en los planos empleando un sacabocado.

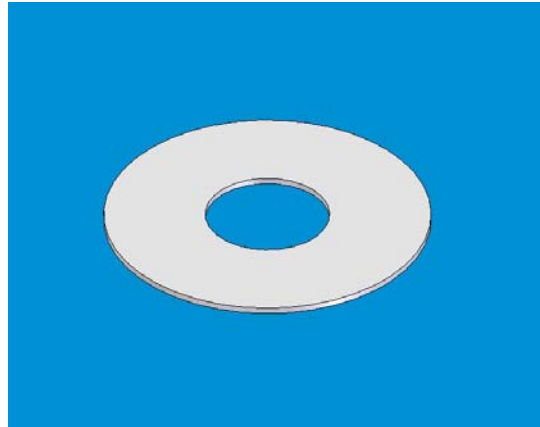


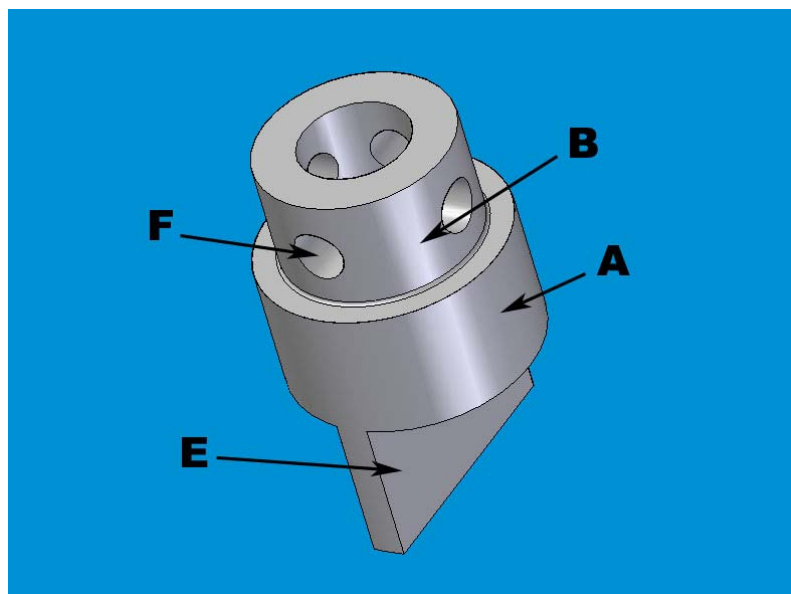
Figura 4.19. Arandela

#### 4.2.3.- Extensores

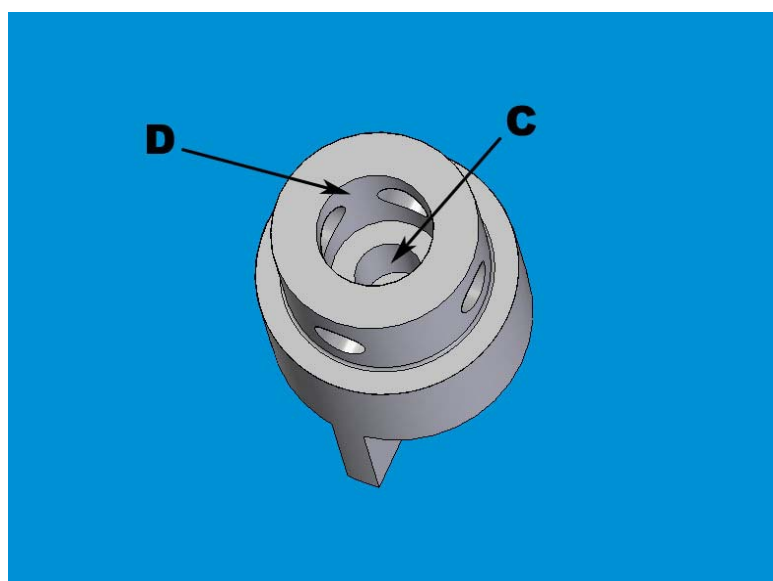
##### 4.2.3.1.- Base

Se utilizaron dos tochos de sección transversal circular de  $80mm$  de diámetro y  $125mm$  de largo que fueron refrentados en ambas caras y llevados a sus diámetros exteriores especificados en los planos (A) usando un torno. Luego se cilindró la superficie externa para obtener el cambio de diámetro necesario (B). Se perforó con brocas de  $\frac{3}{4}$ " ( $19.05mm$ ) (C) y  $31mm$  (D) a las profundidades especificadas en los planos y posteriormente se le realizó un cilindrado interno en ambos agujeros para obtener los diámetros finales.

Para realizar la lengüeta (E) se colocaron ambos cilindros en la prensa de la fresadora y se procedió a desbistarlos empleando una fresa cilíndrica helicoidal de cinco cortes de  $20mm$  de diámetro con una velocidad de cabezal de  $130rpm$ , un avance  $21mm/min$  y una profundidad de  $1.5mm$  por pasada. Para hacer los cuatro agujeros pasantes se empleó una broca de  $\frac{3}{4}$ " ( $13.05mm$ ) (F).



a)



b)

Figura 4.20 a) y b): Base de los extensores

#### 4.2.3.2.- Pasador

Se usó una varilla de  $\frac{1}{2}$ " (12.7mm) que fue llevada a su diámetro especificado en el plano usando un torno. En los extremos (A) se le hizo un moleteado.

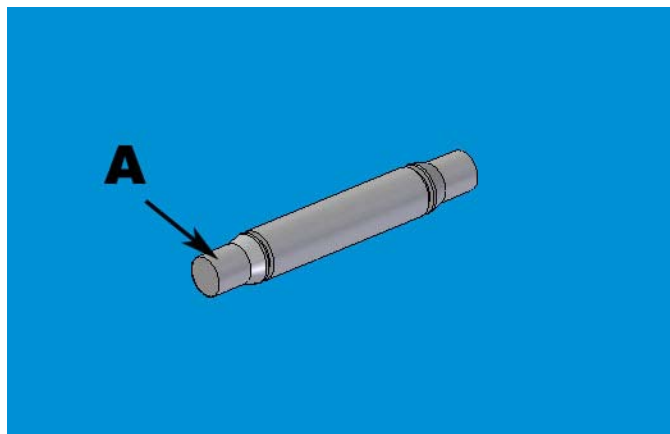


Figura 4.21. Pasador de los extensores

#### 4.2.3.3.- Eje

Se fabricó a partir de una barra de sección transversal circular de 1 ¼" (31.75mm) de diámetro y 300mm de largo que fue refrentada en ambas caras. Se le realizó un roscado M20 x 2.5 con 28mm de profundidad en uno de sus extremos (A) empleando el torno y se perforaron los agujeros (B) en el otro extremo utilizando una broca de ½" (12.7mm) en el taladro.

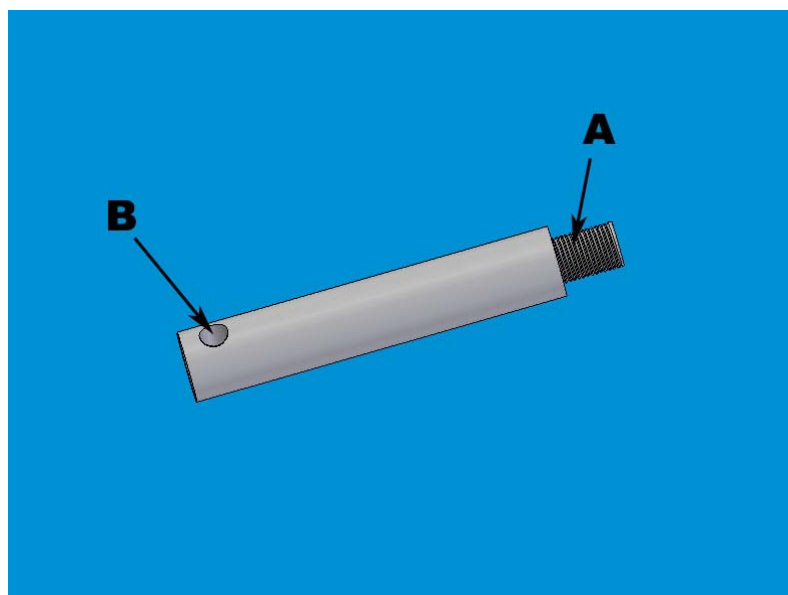
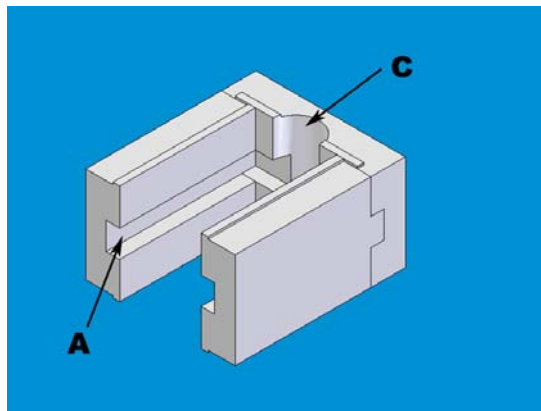


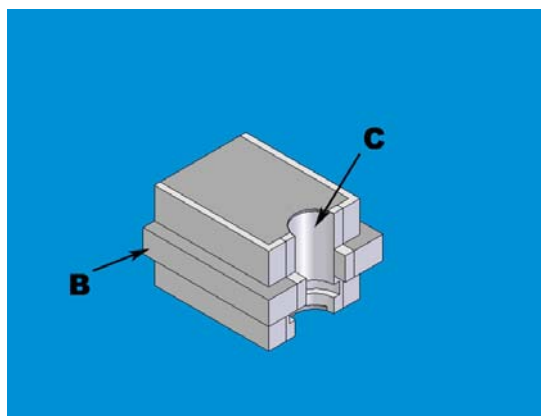
Figura 4.22. Eje de los extensores

#### 4.2.4.- Secciones removibles

Se emplearon cuatro barras de sección transversal rectangular de 85 x 25.4 x 430mm y una barra de sección transversal rectangular de 85 x 50.8 x 160mm que fueron rebajadas en la fresadora utilizando un portaherramienta con cuchilla y una velocidad de 1250rpm y un avance de 193mm/min hasta obtener caras totalmente paralelas. Con una fresa cilíndrica de dos cortes de 16mm de diámetro fueron realizadas las ranuras (A) y las lengüetas (B) en las barras de 25.4mm de espesor empleando una velocidad de cabezal de 770rpm, un avance de 132mm/min y una profundidad de 2mm. Estas barras fueron cortadas en una segueta alternativa para obtener todas las piezas y éstas fueron posteriormente llevadas las medidas especificadas en los planos mediante fresado. Se armaron los conjuntos y se perforó un agujero pasante con una broca de 1 ¼" (31.75mm) de diámetro (C).



a)



b)

Figura 4.23. Secciones removibles: a) Pieza fija a la cámara b) Pieza removible

#### 4.2.5.- Inyector

A partir de un tocho de sección circular de 18mm de diámetro y 25mm de largo se fabricó la punta del inyector perforando con una broca de 2mm y una profundidad de 20mm. Seguidamente con un disco fresa de 30mm de diámetro se realizó la ranura para permitir que el nitrógeno líquido sea introducido de forma perpendicular al eje del inyector. En uno de sus extremos se le hizo una rosca 1/4" – 20 UNC con 10mm de profundidad.

A un tubo de sección circular de 12mm de diámetro y 220mm de largo se le realizó una rosca interna 1/4" – 20 UNC con 10mm de profundidad en uno de sus extremos. Dicha rosca servirá para unir la punta del inyector con esta pieza. En el otro extremo del tubo fue soldada a un conector de 1/2" SAE que estará roscada a la válvula solenoide.

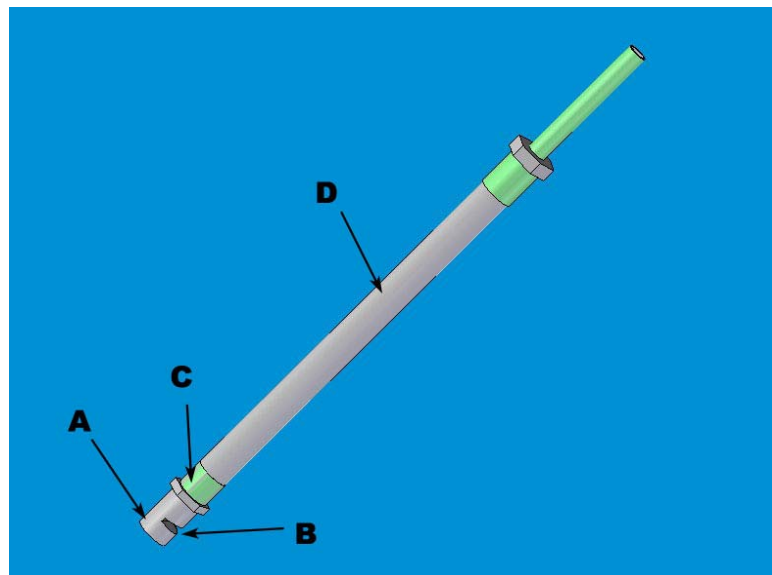


Figura 4.24. Inyector

#### 4.3.- Ensamble

Una vez construidas y soldadas las piezas de la cámara, se procedió a realizar los dos cortes (A) que permitirán la fijación de la guía de las gavetas mediante veinte tornillos “tirafondo” M5 x 3. Así mismo se usaron ocho tornillos 5/16" – 16 UNF de

cabeza plana para fijar la bandeja a la parte inferior de la cámara, cuatro tornillos de cabeza hueca hexagonal M10 x 1.5 para sujetar los dos brazos en el cabezal y la mesa de la máquina Instron, y dos tornillos prisioneros de cabeza hueca hexagonal de 3/8'' – 16 UNF que servirán para regular la altura de la pieza de soporte sobre el eje vertical del sistema de sujeción.

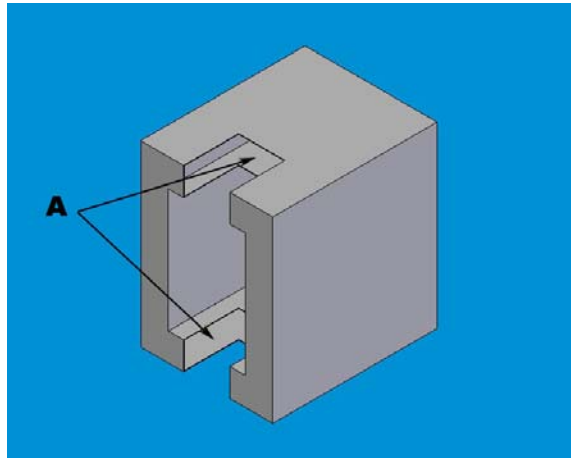


Figura 4.25. Cortes realizados a la cámara, para albergar las secciones removibles

Se sujetaron a la cámara todas las demás piezas y equipos que fueron contruidos o adquiridos (motor, válvula solenoide, inyector, termopar, resistencia, bisagras, etc.) y se unieron todas las piezas del sistema de sujeción y los extensores, para así obtener el prototipo terminado.

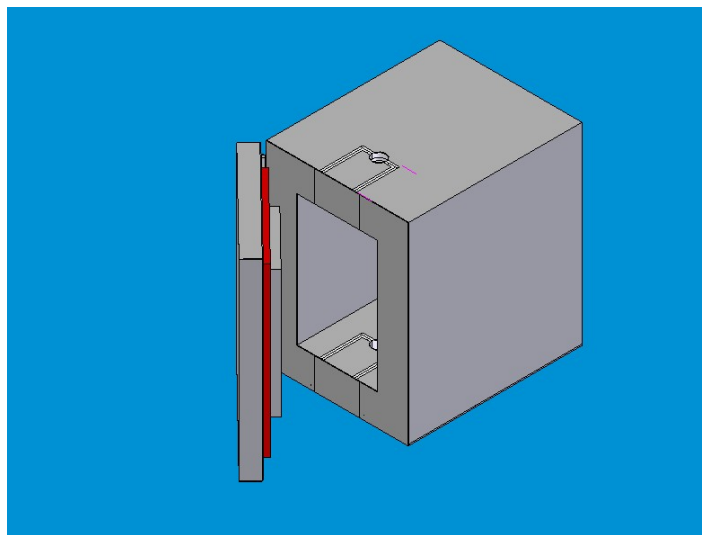


Figura 4.26. Cámara terminada

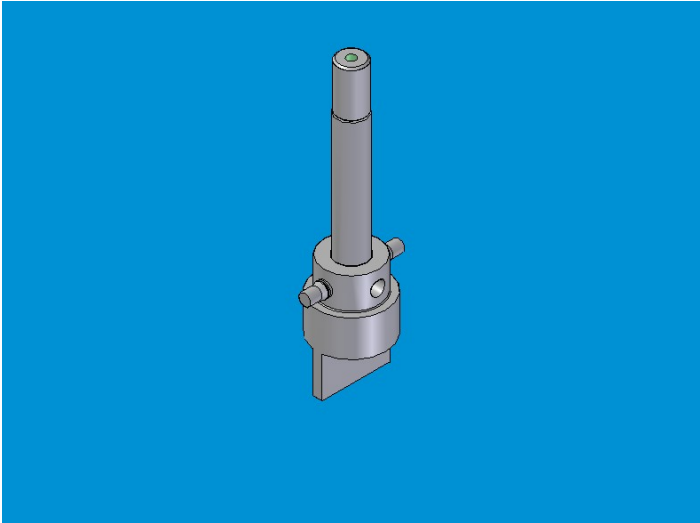


Figura 4.27. Extensores terminados

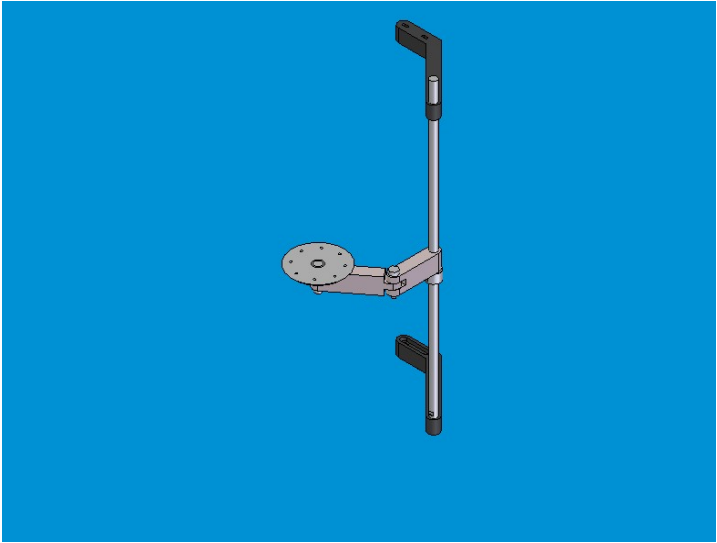


Figura 4.28. Sistema de sujeción terminado



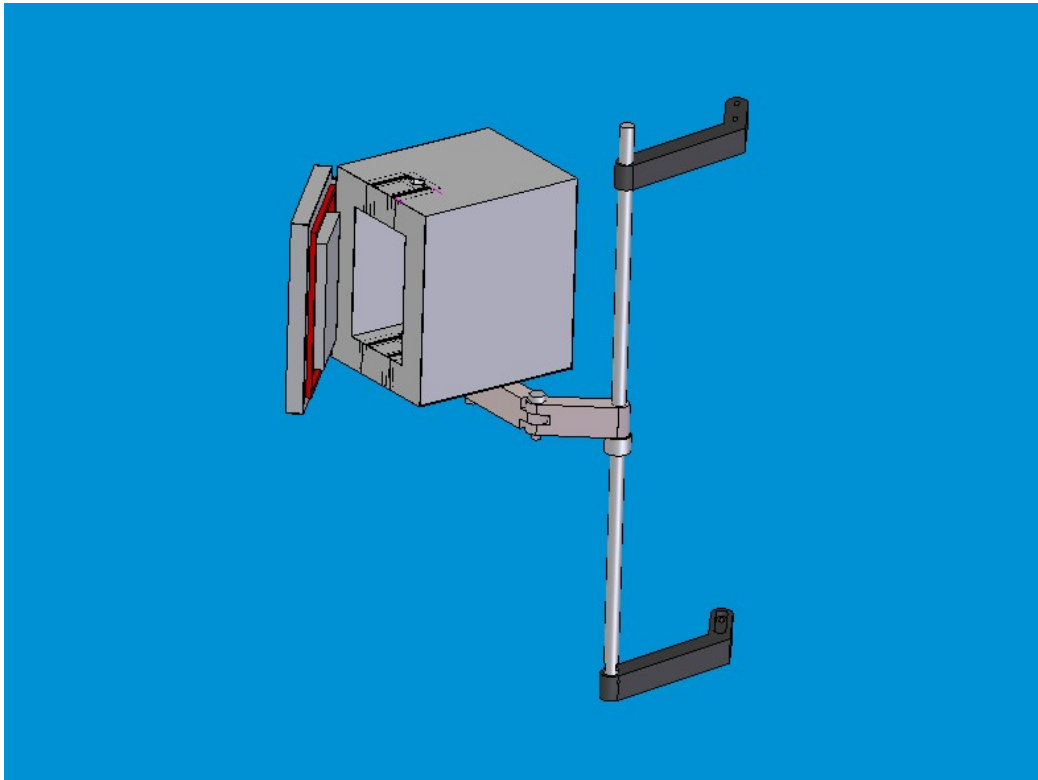


Figura 4.29. Cámara para ensayos a bajas temperaturas con todos sus elementos

***CAPÍTULO V***  
***Manual de operaciones***

### 5.1.- Descripción del equipo

El dispositivo para realizar ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas en la máquina Instron 8502 que se desarrolló en este trabajo, basa su funcionamiento en la inyección de nitrógeno líquido en el interior de cámara, donde éste pasa a fase gaseosa convirtiéndose en el fluido encargado de la transferencia de calor con la probeta. Este nitrógeno gas es recirculado para asegurar la homogeneidad de la temperatura dentro de la cámara y facilitar la transferencia de calor por convección. La cámara está provista de un agujero que permite la salida del nitrógeno gas para evitar la presurización de la misma. El equipo posee también dos extensores para mantener la probeta en contacto con las bajas temperaturas evitando así, que éstas afecten a la maquina universal de ensayos.

El sistema de sujeción para el dispositivo está formado por dos brazos que permiten acoplar la cámara a la maquina universal de ensayos mecánicos de una manera rápida y sencilla.

### 5.2.- Especificaciones del equipo

<b>Motor</b>	Marca General Electric
	1550r.p.m.
	120 VAC / 60Hz
	9W
<b>Válvula solenoide</b>	Marca ASCO modelo 8263G205LT
	Normalmente cerrada
	120 VAC / 60Hz
	Conexiones 1/4" NPT
	Presión máxima de operación: 100psi (0.689MPa)
Rango de temperatura: -196°C a 66°C	
<b>Resistencia</b>	Marca Retermoff
	120 VAC / 60Hz
	160W
	Material: Incoloy
	8mm de diámetro
600mm de largo	
<b>PLC</b>	Alimentación: 24 V
	10 entradas digitales, 2 entradas de termocuplas
	10 salidas a transistores, 2 salidas analógicas
	Pantalla LCD, 2 líneas, 16 caracteres
	Conexión con el puerto serial del PC

<b>Intervalo de temperaturas</b>	-100°C / 100°C
<b>Peso</b>	35Kg
<b>Alimentación</b>	120VAC / 60Hz
<b>Tipo de aislante</b>	Poliuretano expandido
<b>Conexiones LN2</b>	½"SAE

Dimensiones	Alto (mm)	Ancho (mm)	Profundidad (mm)
<b>Externas</b>	460	340	420
<b>Internas</b>	320	200	350

Tabla 5.1 Tabla de especificaciones de la cámara para ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas

### 5.3.- Operación

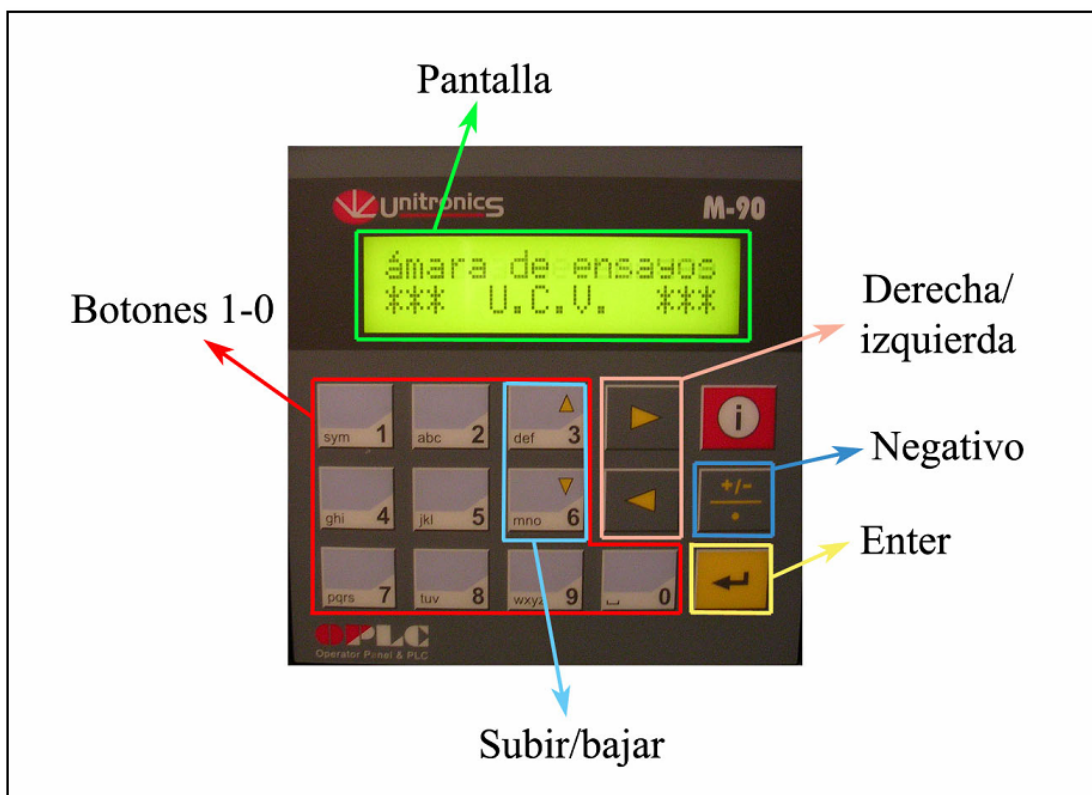


Figura 5.1 Esquema del controlador PLC

Para el correcto uso de este dispositivo se debe tomar en consideración todas aquellas precauciones y procedimientos que se presentan en este manual para el usuario.

### ***5.3.1.- Procedimiento para el montaje de la probeta***

- 1) Introducir la lengüeta de la Base del extensor, en la mordaza superior totalmente abierta hasta que haga tope sobre la misma.
- 2) Cerrar la mordaza superior de manera que la Base quede presionada.
- 3) Repetir los pasos 1 y 2 para la otra Base que será colocada en la mordaza inferior.
- 4) Elevar el cabezal superior de la máquina Instron hasta alcanzar su máxima altura.
- 5) Ajustar el Eje inferior en la Base a través del pasador.
- 6) Introducir el anillo de sujeción de la termocupla en la probeta.
- 7) Colocar en ambos extremos de la probeta los Portaprobetas.
- 8) Enroscar el conjunto del paso 6 en la punta del Eje inferior.
- 9) Bajar la mordaza inferior hasta que sea posible enroscar el Eje superior al conjunto Portaprobeta-Probeta.
- 10) Subir lentamente la mordaza inferior, de manera que el Eje se introduzca en el agujero de la Base, hasta que se hayan alineado los agujeros de ambas piezas.
- 11) Una vez alineados ambos agujeros, se procede a introducir el pasador.

### ***5.3.2.- Ensayos a bajas temperaturas***

- 1) Colocar la probeta y sus extensores, como indicado en la sección 5.3.1.
- 2) Desmontar la puerta.
- 3) Retirar las secciones removibles de la cámara de ensayos.
- 4) Mover la cámara de ensayos hasta que los extensores queden posicionados dentro de la misma.
- 5) Introducir nuevamente ambas Secciones removibles.

- 6) Colocar la termocupla en la ranura del anillo de sujeción y fijarlo a través del tornillo en el hombro de la probeta.
- 7) Colocar nuevamente la puerta en sus bisagras y cerrarla.
- 8) Conectar las mangueras, tanto de suministro de nitrógeno líquido como de purga.
- 9) Abrir lentamente la válvula del termo.
- 10) Conectar el cable de alimentación a la fuente eléctrica de 120V y el cable de comunicación al puerto serial de la computadora.
- 11) Colocar el interruptor de encendido en ON y esperar a que aparezca la pantalla de bienvenida.

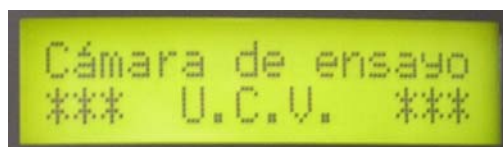


Figura 5.2 Pantalla de bienvenida


- 12) Presionar la tecla .
- 13) Desplazarse en el menú de selección de tipo de ensayo empleando las teclas Arriba/abajo.



Figura 5.3 Menú de selección del tipo de ensayo





- 14) Pulsar  para seleccionar el ensayo a bajas temperaturas.
- 15) Introducir el valor de la temperatura a la que se desea ensayar y pulsar la tecla . Use la tecla  si es necesario. Pulsar nuevamente  para confirmar la temperatura.



Figura 5.4 Pantalla para la introducción de la temperatura

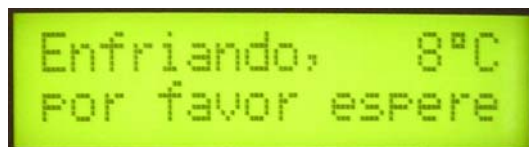



Figura 5.5 Pantalla de espera durante el enfriamiento

16) Esperar a que el equipo alcance la temperatura deseada.



Figura 5.6 Pantalla de confirmación de temperatura alcanzada

17) Presionar  para iniciar el registro de los datos en el computador. Es necesario que se dé inicio al ensayo de tracción en la máquina Instron simultáneamente con el inicio del registro de la temperatura en el computador.

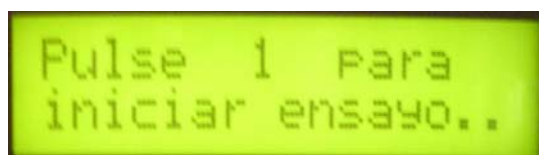


Figura 5.7 Pantalla para el inicio de la recopilación de datos


18) Una vez culminado el ensayo o, si se desea detener el mismo, pulse .



Figura 5.8 Pantalla para terminar el ensayo

- 19) Esperar a que la temperatura aumente. Un mensaje en la pantalla informará del proceso de calentamiento.

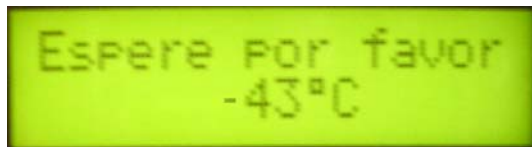



Figura 5.9 Pantalla de espera

- 20) Cuando aparezca el mensaje “Retire la probeta”, pulse  cerrar la válvula del termo y desconectar las mangueras de la cámara.

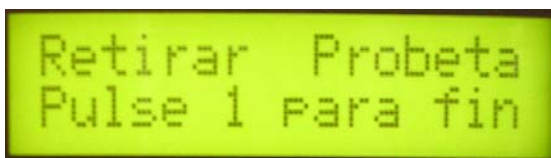


Figura 5.10 Pantalla que indica el retiro de la probeta


- 21) Desmonte la puerta y, si existe humedad en el interior de la cámara, secala.  
22) Retire las secciones removibles y aleje la cámara para poder retirar los extensores.

### ***5.3.3.- Ensayos a altas temperaturas***


- 1) Colocar la probeta y sus extensores como indicado en la sección 5.3.1
- 2) Desmontar la puerta.
- 3) Retirar las secciones removibles de la cámara de ensayos.
- 4) Mover la cámara de ensayos hasta que los extensores queden posicionados dentro de la misma.
- 5) Introducir nuevamente ambas Secciones removibles.
- 6) Colocar la termocupla en la ranura del anillo de sujeción y fijarlo a través del tornillo en el hombro de la probeta.
- 7) Colocar nuevamente la puerta en sus bisagras y cerrarla.




- 8) Conectar el cable de alimentación a la fuente eléctrica de 120V y el cable de comunicación al puerto serial de la computadora.
- 9) Colocar el interruptor de encendido en ON y esperar a que aparezca la pantalla de bienvenida (ver figura 5.2).

10) Presionar la tecla .

11) Desplazarse en el menú de selección de tipo de ensayo empleando las teclas Subir/bajar (ver figura 5.3).

12) Pulsar  para seleccionar el ensayo a altas temperaturas.

13) Introducir el valor de la temperatura a la que se desea ensayar y pulsar .

(Enter). Pulsar nuevamente  para confirmar la temperatura.



Figura 5.11 Pantalla para la introducción de la temperatura

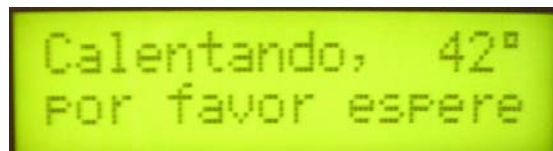




Figura 5.12 Pantalla de espera durante el calentamiento

14) Esperar a que el equipo alcance la temperatura deseada.



Figura 5.13 Pantalla de confirmación de temperatura alcanzada


15) Presionar  para iniciar el registro de los datos en el computador. Es necesario que se dé inicio al ensayo de tracción en la máquina Instron simultáneamente con el inicio del registro de la temperatura en el computador (ver figura 5.7).

16) Una vez culminado el ensayo o, si se desea detener el mismo, pulse  (ver figura 5.8).

17) Esperar a que la temperatura disminuya. Un mensaje en la pantalla informará del proceso de enfriamiento.



Figura 5.14 Pantalla de espera

18) Cuando aparezca el mensaje “Retire la probeta”, pulse la tecla , desmonte la puerta y retire las secciones removibles (ver figura 5.10).

19) Aleje la cámara y retire los extensores.

#### ***5.3.4.- Máquina inactiva***

- 1) Desconectar los cables de alimentación y comunicación de la cámara de ensayos.
- 2) Verificar que la válvula del termo de nitrógeno líquido este completamente cerrada.
- 3) Colocar la cámara en la parte posterior de la máquina Instron en una posición en la que no interfiera con ningún otro procedimiento experimental.
- 4) Mantener la puerta de la cámara cerrada, sin ejercer presión de cierre en la misma.

**5.3.5.- Instalación del programa de recopilación de datos**

- 1) Introducir el CD de instalación en la unidad de disco compacto.
- 2) Crear una carpeta en la dirección donde se desea instalar el programa.
- 3) Copiar todos los documentos de la carpeta “UCV Cámara” en la carpeta apenas creada.
- 4) Ejecutar el instalador del programa del controlador “U90LadderSetupV392 Enero 12 del 2005”
- 5) La instalación esta completada

**Nota:** Una vez instalado el programa, cada vez que se desee realizar un ensayo, se deberá ejecutar “SupervisorioCámara.exe” en conjunto con el programa “Unitronics.exe” antes de encender el PLC.

**Nota:** Cada vez que se realice un ensayo, se creará una carpeta que contendrá todos los datos recopilados del mismo en formato Microsoft Access. Esta carpeta estará localizada en la carpeta donde se haya instalado el programa.

5.3.5.- Plano eléctrico

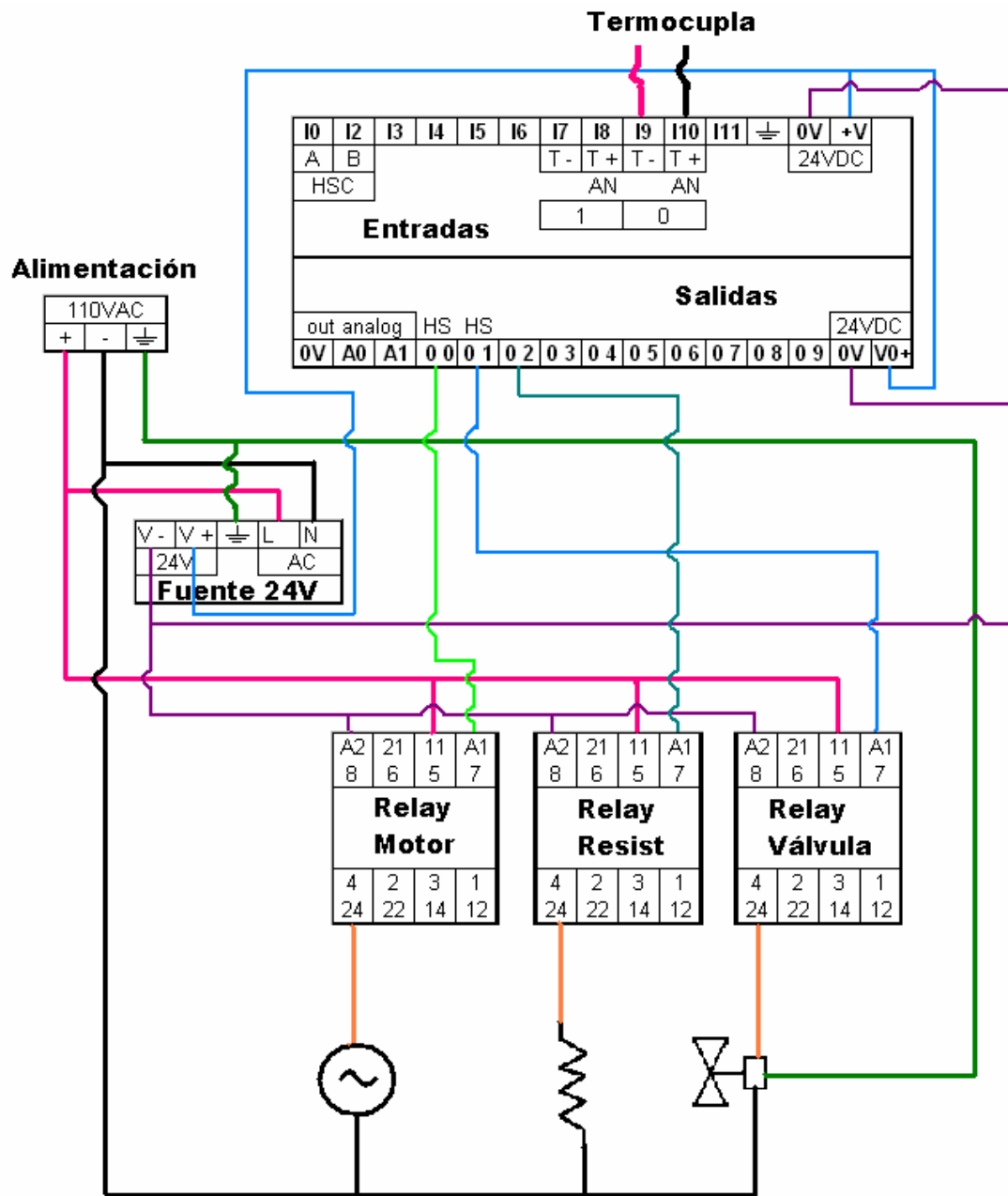


Figura 5.15 Plano eléctrico

## 5.3.6.- Hoja de seguridad

## HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL (MSDS) NITRÓGENO GASEOSO

<b>PRODUCTO</b> Nitrógeno gaseoso	<b>CAS</b> 7727-37-9 <b>DOT. N°</b> UN 1066 <b>Ficha de intervención:</b> N° 1
<b>NOMBRE COMERCIAL Y SINONIMOS</b> Nitrógeno	<b>Clase de riesgo:</b> 2 División 2.2
<b>NOMENCLATURA QUIMICA Y SINONIMOS</b> Nitrógeno	<b>Fórmula:</b> N <sub>2</sub>
<b>FECHA DE EMISION Y REVISIONES</b> Revisado en Enero de 1995/C.R.C. 11/00 AGA S.A.	<b>Familia:</b> Gas inerte

**INFORME SOBRE RIESGO PARA LA SALUD****CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMISIBLE PONDERADA EN EL TIEMPO (CMP-CPT):**

El Nitrógeno esta definido como un asfixiante simple. "F" El contenido mínimo de oxígeno debe ser del 18% molar, a presión atmosférica normal, equivalente a una presión parcial de: (pO<sub>2</sub> > 135 torr) (ACGIH 1994 -1995) OSHA 1993 PEL (8 hr. TWA) no esta listado. Ley 19587 Dec. Reg. 351/79 Anexo III Cap. 9 Art. 61 "Contaminación Ambiental".

**SINTOMAS DE EXPOSICIÓN:**

El efecto de la exposición, a concentraciones demasiado altas, de modo tal, que desplacen el oxígeno del aire necesario, para mantener la vida son: dolor de cabeza, mareos, respiración dificultosa y eventual inconsciencia.

- Sensación de hormigueo en la lengua, yemas de los dedos, y dedos del pie.
- Debilitamiento del habla con tendencia a la incapacidad de pronunciar sonidos.
- Rápida reducción en la capacidad de realizar movimientos.
- Reducida percepción de los alrededores
- Pérdida de sensaciones táctiles
- Incremento de la actividad mental

Se debe tener en cuenta, que es posible que ninguno de los síntomas expuestos, tenga lugar en una asfixia gaseosa, de modo tal que no hay síntomas de advertencia definidos.

**CARACTERISTICAS TOXICAS:**

El Nitrógeno es no tóxico, pero la liberación de una gran cantidad, en un área confinada podría desplazar la concentración de oxígeno necesario para mantener la vida.

El Nitrógeno no se encuentra registrado en el IARC, NTP o en la OSHA como carcinogénico o potencial carcinogénico.

Las personas enfermas cuya afección se viera agravada por la exposición al Nitrógeno no se les debe permitir trabajar o manipular este producto.

**TRATAMIENTO DE PRIMEROS AUXILIOS - RECOMENDACIONES**

**UNA RÁPIDA ATENCIÓN MÉDICA ES OBLIGATORIA EN TODOS LOS CASOS DE SOBRE EXPOSICIÓN AL NITROGENO. EL PERSONAL DE RESCATE DEBE ESTAR EQUIPADO CON EQUIPOS DE RESPIRACIÓN AUTÓNOMA.**

**Inhalación:** Si la persona está consciente debe ser trasladada a un área no contaminada para inhalar aire fresco. Retirla rápidamente, del área contaminada es muy importante. Si la víctima estuviera inconsciente, se le deberá trasladar a un área descontaminada, brindar ayuda respiratoria por medios mecánicos y suministro de oxígeno. El tratamiento posterior será de apoyo y continuará según los síntomas.

**OTRAS MEZCLAS PELIGROSAS CON OTROS LIQUIDOS, SOLIDOS O GASES**

N/A

**DATOS FÍSICOS**

<b>PUNTO DE EBULLICIÓN:</b> - 320.5°F (-195.8°C)	<b>DENSIDAD LIQUIDA A PUNTO DE EBULLICIÓN</b> 50.46 lb/ft <sup>3</sup> ( 808.3 kg/m <sup>3</sup> )
<b>PRESION DE VAPOR</b> a 70° F (21.1°C) Sobre la temperatura critica de - 232.6 °F (- 147 °C)	<b>DENSIDAD GASEOSA A 70° F.1 atm</b> .0725 lb/ft3 (1.161 kg/m <sup>3</sup> )
<b>% de Evaporación</b> N/A	<b>PUNTO DE CONGELACION</b> - 345.9 °F (-209.9 °C)
<b>SOLUBILIDAD EN AGUA</b> Despreciable	<b>GRAVEDAD ESPECÍFICA (AIRE=1)</b> a 70° F (21.1°C) = 0.97
<b>APARIENCIA Y OLOR</b> Gas incoloro, e inodoro.	

**INFORMACION SOBRE RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSION**

<b>PUNTO DE INFLAMACION</b> Método empleado N/A.	<b>TEMPERATURA DE AUTO INGNACION</b> N/A	<b>LIMITE DE INFLAMABILIDAD</b> % EN Volumen LEL: N/A UEL: N/A
<b>MEDIO DE EXTINCIÓN</b> Dióxido de carbono, polvo químico seco		<b>CLASIFICACION ELÉCTRICA</b> No peligroso
<b>PROCEDIMIENTOS ESPECIALES PARA COMBATIR EL FUEGO</b> Gas inerte no inflamable.		
<b>RIESGOS INUSUALES DE FUEGO Y EXPLOSION</b> Si los cilindros están involucrados en un incendio, llévelos a un lugar seguro, o manténgalos fríos mediante niebla de agua.		

**INFORMACION SOBRE REACTIVIDAD**

<b>ESTABILIDAD</b>		<b>CONDICIONES QUE SE DEBEN EVITAR</b>
Inestable	---	
Estable	X	N/A
<b>INCOMPATIBILIDAD (MATERIALES QUE SE DEBEN EVITAR)</b>		
Ninguna		
<b>PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN RIESGOSA</b>		
Ninguna		
<b>POLIMERIZACION RIESGOSA</b>		<b>CONDICIONES QUE SE DEBEN EVITAR</b>
Puede Ocurrir:	NO	N/A
No puede Ocurrir:	---	

**PROCEDIMIENTOS EN CASO DE DERRAMES O PERDIDAS**

<p><b>MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE QUE SE PRODUZCAN DERRAMES O PERDIDAS</b></p> <p>Evacuar a todo el personal que se encuentre dentro del área afectada. Utilizar equipos de protección adecuados. Si la pérdida se encontrara en la válvula del container o del cilindro, contactar a su proveedor más cercano o telefonar al Departamento Técnico de AGA.</p>
---

<p><b>PROCEDIMIENTO PARA ELIMINAR PRODUCTO RESIDUAL:</b></p> <p>No intente eliminar el producto residual o remanente de uso. Devuélvalos al proveedor dentro de su container o cilindro de carga adecuadamente etiquetados, con los cierres de las válvulas de salida bien asegurados y las tapas de protección de válvulas colocadas en su lugar. En caso de ayuda de emergencia, para eliminación del producto residual, contacte a su proveedor mas cercano o llame al departamento técnico de AGA S.A.</p>
--

**INFORMACION SOBRE PROTECCION ESPECIAL**

<b>PROTECCION RESPIRATORIA:</b> Para casos de emergencia debe hallarse una línea de presión positiva de aire con máscara o equipos de respiración autónoma	
<p><b>VENTILACION</b></p> <p>Campana de ventilación forzada</p>	<p><b>VENTEO DEL LOCAL:</b></p> <p>Para prevenir la acumulación, de altas concentraciones de nitrógeno, de modo tal, que reduzcan el nivel de oxígeno en el aire por debajo del 18% molar.</p> <p><b>MECANICA:</b> N/A</p>
<b>GUANTES DE PROTECCION:</b> Cualquier material	
<b>PROTECCION OCULAR:</b> Anteojos de seguridad o antiparras	
<b>OTROS MATERIALES DE PROTECCION:</b> Zapatos de seguridad	

<b>ETIQUETADO:</b> Nombre: Nitrógeno comprimido Etiqueta de embarque: Gas no inflamable	Clase de Riesgo DOT : División 2.2 I.D. N° : UN: 1066
<b>ALMACENAJE:</b> Proteger los cilindros de cualquier daño físico. Almacenar en un área fresca, seca, bien ventilada, lejos de los lugares de tráfico vehicular y de las salidas de emergencia. No permitir que en el lugar de almacenaje la temperatura exceda 125°F (52°C). Los cilindros serán colocados parados y bien asegurados para evitar que se caigan o se golpeen. Se deben separar los cilindros llenos de los vacíos. Utilizar un sistema de inventario con fecha de ingreso y egreso de las unidades para evitar que cilindros llenos queden almacenados durante periodos excesivamente largos. Para información adicional sobre recomendaciones de almacenaje, consulte los boletines de Compressed Gas Association P-1, P,9, P14 and Safety Bulletin SB-2	
<b>MANIPULEO:</b> Utilizar solamente en áreas muy bien ventiladas. Las tapas protectoras de las válvulas deben estar colocadas, a menos que el cilindro posea una conexión por medio de un flexible o tubo desde la válvula al punto de uso. No arrastrar, deslizar o hacer rodar los cilindros, sino utilizar auto elevadores o zorras para desplazarlos. Utilizar un regulador reductor de presión cuando se conectan los cilindros a una presión menor (< 3.000 psig) a cañerías o sistemas de distribución. De ninguna manera se deben calentar los cilindros para incrementar su velocidad de descarga. Utilizar una válvula de control o de retención para evitar riesgos de retroceso de flujo al interior del cilindro. Para recomendaciones adicionales sobre manipuleo, consulte los boletines de la Compressed Gas Association's P-1, P-9, P,14 y Safety Bulletin SB-2	
<b>ENVASADO</b> El nitrógeno es no es corrosivo y puede utilizarse con cualquier material de construcción.	
<b>OTRAS RECOMENDACIONES O PRECAUCIONES:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Los cilindros de gas comprimido no deben ser recargados, excepto por fabricantes calificados de gases comprimidos. La carga de cilindros de gas comprimido debe ser efectuada por el fabricante o bien se debe contar con su consentimiento escrito para poder realizarla, caso contrario, constituye una violación a las leyes vigentes.</li><li>• Asegurarse siempre que los cilindros se encuentren en posición vertical antes de transportarlos. <b>NUNCA</b> transporte cilindros en baúles de vehículos, compartimientos cerrados, cabinas de camiones o en compartimientos de pasajeros. Transporte los cilindros asegurados en plataformas o en vehículos abiertos tipo pick up.</li></ul>	



***CAPÍTULO VI***  
***Conclusiones y Recomendaciones***

### **6.1.- Conclusiones**

Una vez desarrollado el dispositivo a partir de la metodología mostrada en el presente estudio, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones, las cuales se presentan a continuación

- El dispositivo construido, logra alcanzar temperaturas de trabajo medidas en la superficie de la probeta, que van desde  $-80^{\circ}\text{C}$  hasta  $100^{\circ}\text{C}$ , lo que garantiza que las necesidades han sido solventadas satisfactoriamente.
- El equipo facilita su incorporación a la maquina universal de ensayos mecánicos, así como también, el montaje y desmontaje de las probetas.
- Tanto la hermeticidad como la apariencia fueron mejoradas considerablemente con respecto a otros equipos del mercado.
- Este diseño también brinda la posibilidad de realizar ensayos a altas temperaturas, capacidad que hace de éste un equipo que no solo cumple con las expectativas, sino que también abre aún más el campo de la investigación científica de los materiales.
- Se tiene la capacidad de monitoreo permanente, de la temperatura, durante los ensayos, manteniendo la temperatura en un intervalo aceptable, su control a través de la válvula solenoide y encendido y apagado de la resistencia interna garantizan la minimización de dicho intervalo de temperaturas, durante la realización de cada ensayo.
- En el país existe tanto la capacidad de diseño y construcción, como también los materiales y equipos necesarios para la construcción de este equipo.
- La comercialización de este equipo es factible ya que el costo de fabricación es bastante competitivo.

### 6.2.- Recomendaciones

El dispositivo desarrollado en este proyecto, como cualquier otro dispositivo, presenta la posibilidad de realizar mejoras que lograrán hacer de éste un diseño más completo, y así crear un equipo con una mayor funcionalidad, ergonomía y atractivo comercial. A tal efecto se recomienda:

- Para una medición aun más precisa de la temperatura se recomienda colocar una termocupla de referencia, como lo indica en la figura.

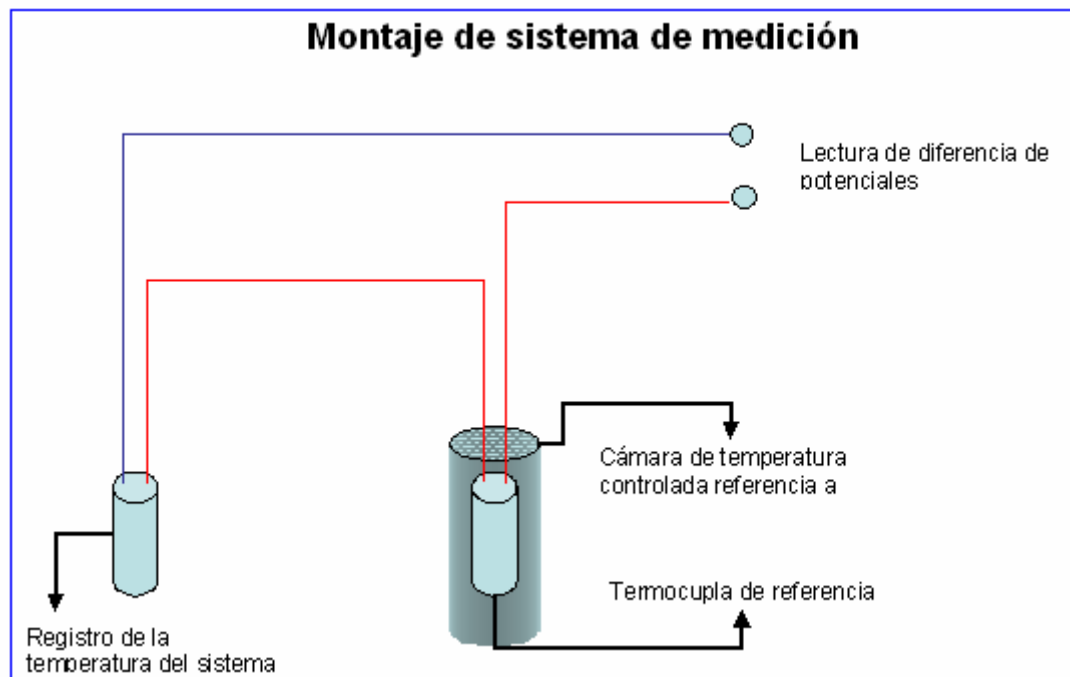


Figura 6.1. Montaje de Sistema de Medición

- Para alcanzar altas temperaturas de una manera más rápida se deberá instalar una resistencia eléctrica de mayor potencia.
- Implementar un dispositivo que se adapta al PLC y permita tener un control de acceso remoto utilizando telefonía celular. El usuario entonces podría controlar todas las variables del proceso a través de un mensaje de texto.
- Para automatizar aún más el proceso sería apropiado desarrollar una interconexión entre el programa de control y registro de la Máquina Instron

8502 y el PLC de la cámara. Esto lograría que una vez alcanzada la temperatura se inicie el ensayo de tracción uniaxial automáticamente.

Adicionalmente, para que la máquina tenga un buen desempeño en su funcionamiento se recomienda:

- Leer el manual de operaciones antes de poner en funcionamiento la cámara para realizar ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas.
- Limpieza exhaustiva de la cámara después de realizar un ensayo a bajas temperaturas.
- Se recomienda la lubricación con aceite SAE 10 de las articulaciones y partes deslizantes de todos los elementos de sujeción de la cámara.
- La cámara debe estar posicionada, en los periodos de inactividad, de forma tal que los brazos de sujeción se encuentren formando el menor ángulo posible entre ellos, para así disminuir los esfuerzos a los que están sometidos.
- En caso de que el cierre de la puerta ya no sea hermético, reemplazar la goma tomando en cuenta las especificaciones de la misma.
- En caso de que el eje del ventilador presente vibraciones excesivas o mucha resistencia al movimiento, volver a alinearlos utilizando las ranuras que posee la base del motor.
- Se recomienda limpiar el filtro de la válvula solenoide antes de realizar cada ensayo.
- Verificar periódicamente la alineación de la cámara con respecto a los extensores.

## *Referencias bibliográficas*

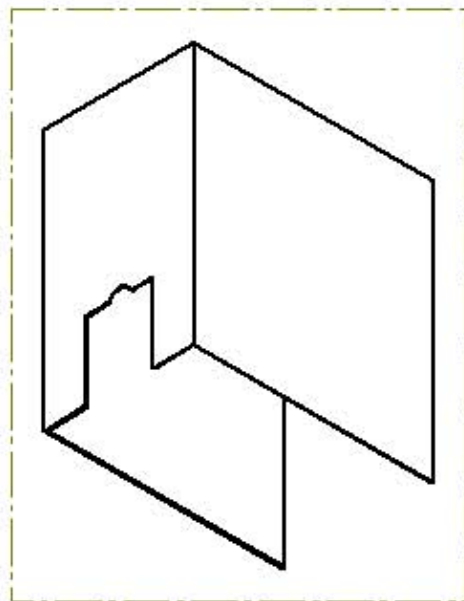
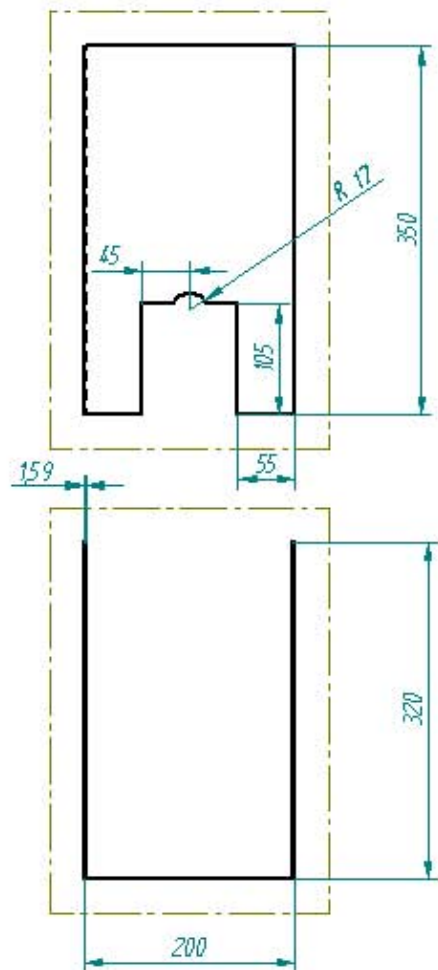
- 1) WHITTENBERGER J., (1987), Elevated/Low Temperature tension Testing, ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, ASM, Vol. 8, USA. pp.34-37
- 2) [www.Key-to-Steel.com](http://www.Key-to-Steel.com), Steels properties at Low and high Temperatures.
- 3) DAVIS JOSEPH R.,(1976), Metal Engineering Quarterly, ASM Source-book on Stainless Steels, ASM,USA. pp. 45-53.
- 4) [www.Key-to-Steel.com](http://www.Key-to-Steel.com), Steels for Cryogenic and Low-Temperature Service.
- 5) GUZZONI FRANCESCO, (1970), Acciai Speciali e inossidabili, Gli Acciai Comuni e Speciali, Tomo 3, Roma. pp. 1043- 1057.
- 6) BARAJAS O. M., (2003), El Proceso de Diseño en Proyectos de Ingeniería, , McGraw-Hill, 1<sup>ra</sup> Edición, Bogotá.
- 7) MILANI RODOLFO, (1985), Diseño para Nuestra Realidad, USB Equinoccio, 1<sup>ra</sup> Edición, Caracas.
- 8) AVALLONE E. A., BAUMEISTER THEODORE, (1995),Marks.-Manual del Ingeniero Mecánico, McGraw-Hill, 9<sup>na</sup> Edición, México.
- 9) GROOVER MIKELL P., (1997), Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas, Prentice Hall Hispanoamérica, 2<sup>da</sup> Edición, México.
- 10) SHIGLEY J. E., (2002), MISCHKE C. R., Diseño en Ingeniería Mecánica, McGRAW-Hill, 6<sup>ta</sup> Edición, México.
- 11) HIBBELER R. C., (1997), Mecánica de Materiales, Pretince Hall, 3<sup>era</sup> Edición, México.
- 12) INCROPERA FRANK P., DEWITT DAVID P., (1999), Fundamentos de Transferencia de Calor, Pretince Hall, 4<sup>ta</sup> Edición, México.
- 13) HOLMAN J.P., (1998), Transferencia de Calor, McGraw-Hill, 8<sup>va</sup> Edición, Madrid.
- 14) VAN WYLEN GORDON J., (2002), Fundamentos de Termodinámica, Limusa, 2<sup>da</sup> Edición, México.
- 15) CENGEL YUNUS, BOLES MICHAEL, (1996), Termodinámica, McGraw-Hill, 2<sup>da</sup> Edición, Nueva York.

- 16) MOTT ROBERT, (1992), Diseño de Elementos de Máquina, Prentice Hall Hispanoamericano, 2<sup>da</sup> Edición, México.
- 17) ORLOV, (1985), Ingeniería del Diseño, Mir, 1<sup>ra</sup> Edición , Moscú.
- 18) CASILLAS A. L., (2004), Máquinas.-Cálculos de Taller, Artes Gráficas ENCO, 38<sup>va</sup> Edición, Madrid.
- 19) [www.matweb.com](http://www.matweb.com).
- 20) [www.quadrantepp.com](http://www.quadrantepp.com).
- 21) [www.jp.com.ar](http://www.jp.com.ar).
- 22) [www.poliuretanosdenia.com](http://www.poliuretanosdenia.com).

# ***ANEXOS***



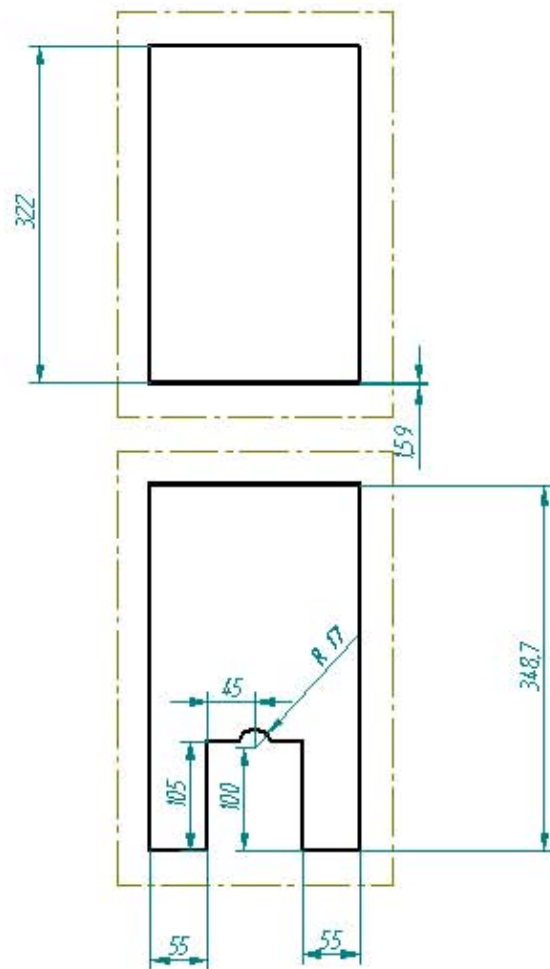
# *Cámara de ensayos*



*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pieza 1

Material: Acero Inox 304 Esc 1:5

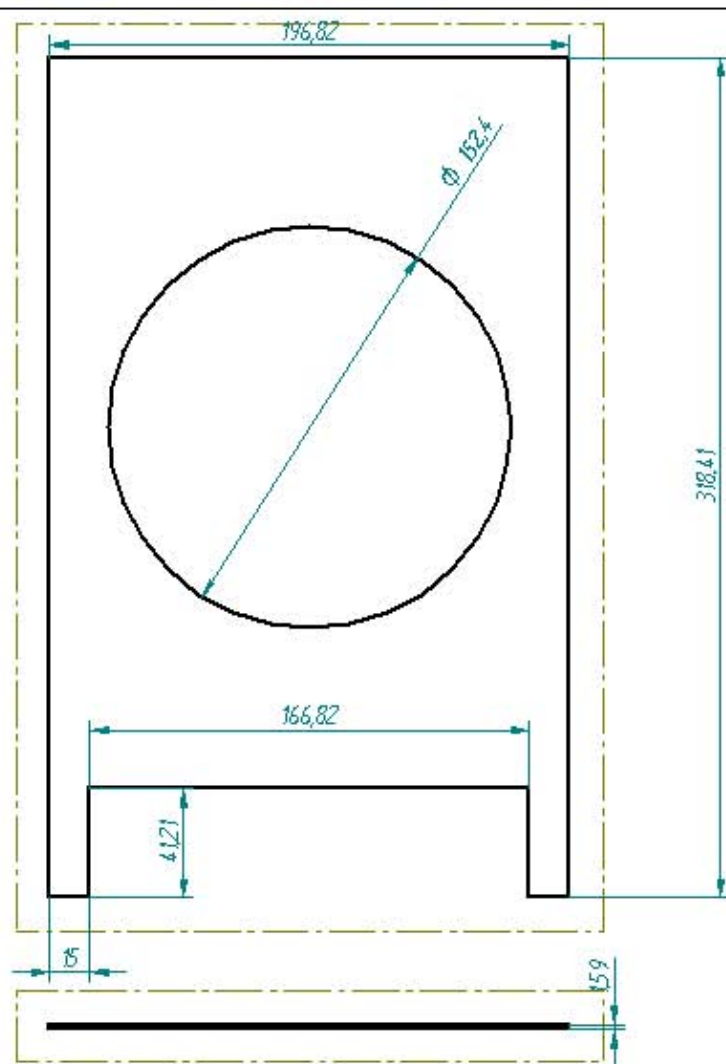


*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pieza 2

Material: Acero Inox 304

Esc 1:5

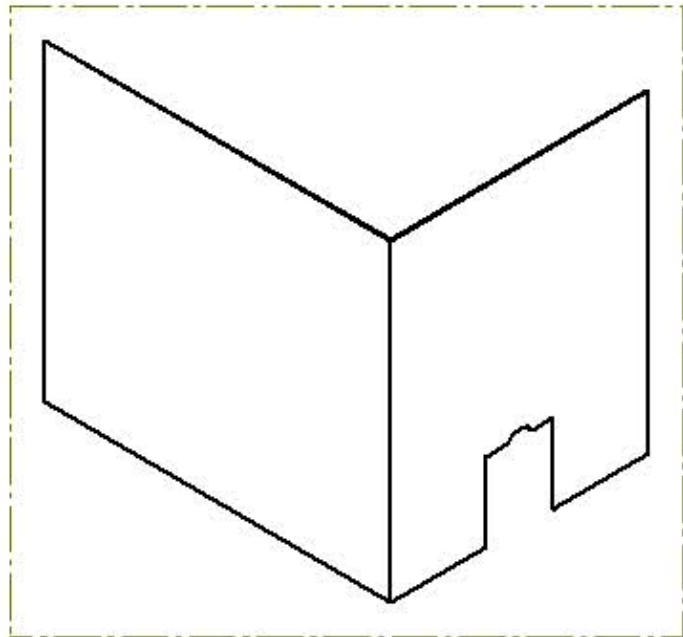
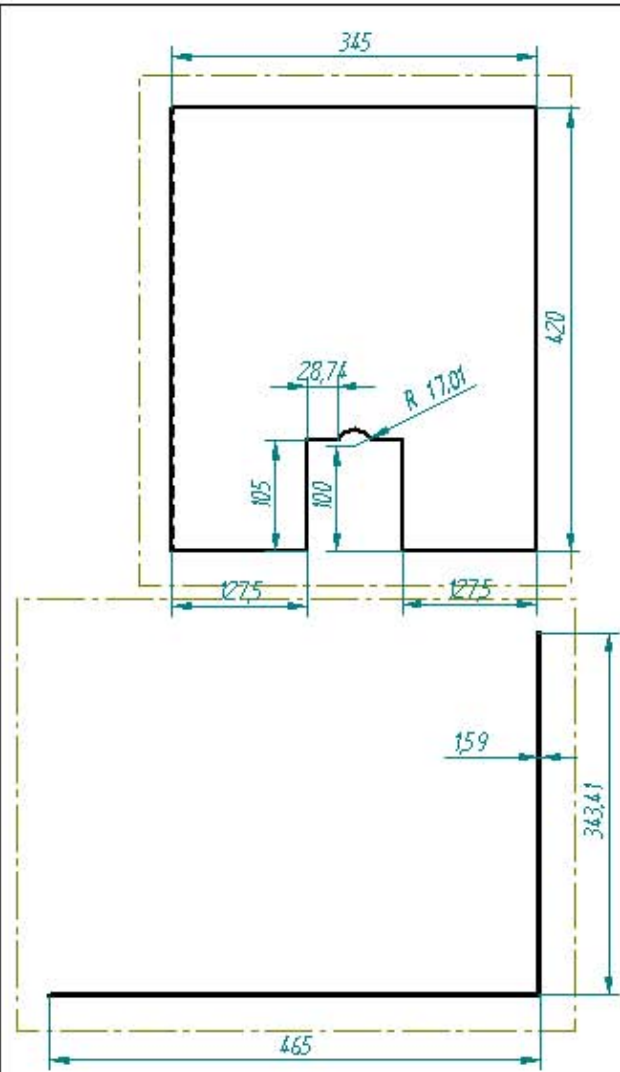


*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pieza 3

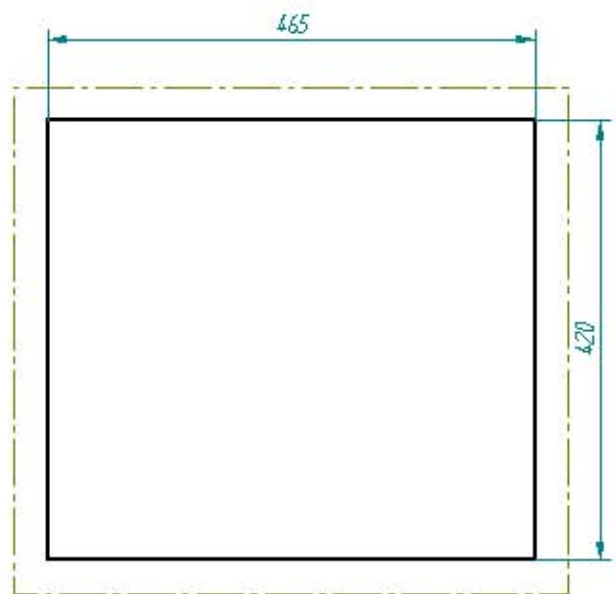
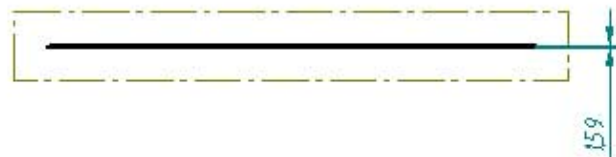
Material: Acero Inox 304

Esc 1:2



Todas las medidas en mm.

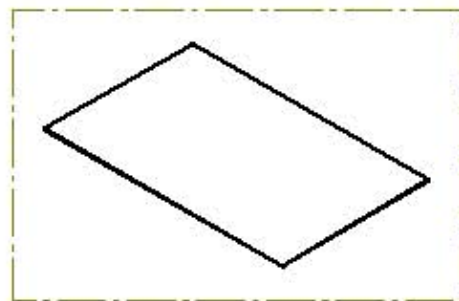
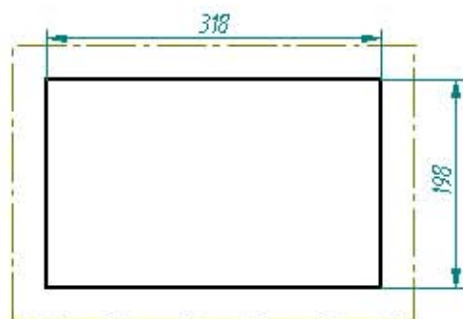
Pieza 4	
Pieza:	
Material: Acero Inox 304	Esc 1:5



*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pieza 5

Material: Acero Inox 304 Esc 1:5

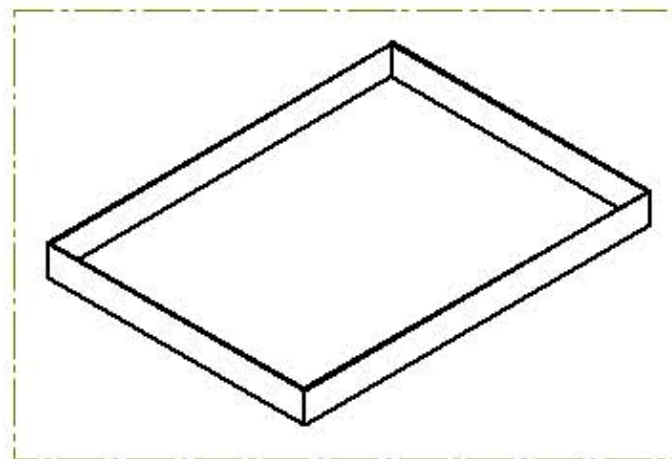
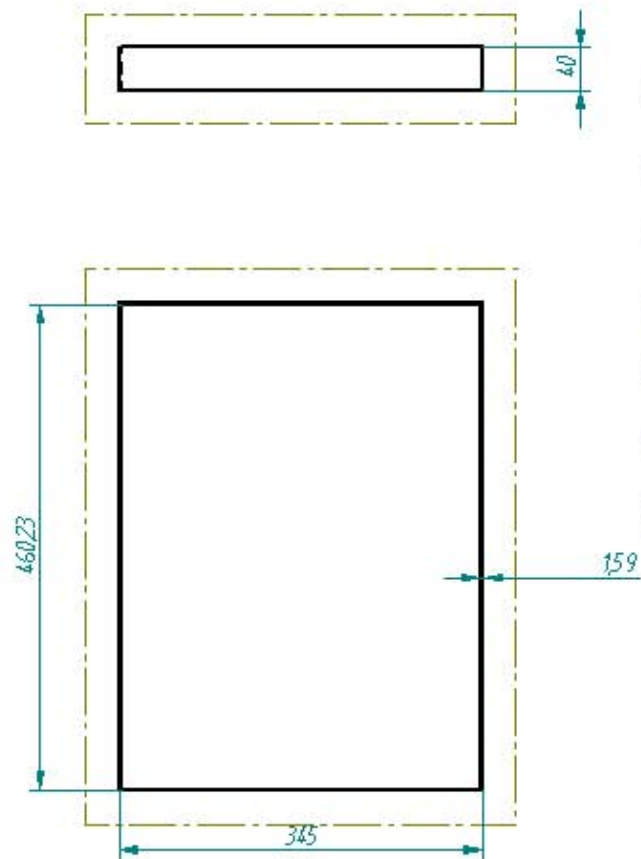


*Todas las medidas en mm*

Pieza: Pieza 6

Material: Acero Inox 304

Esc 1:5



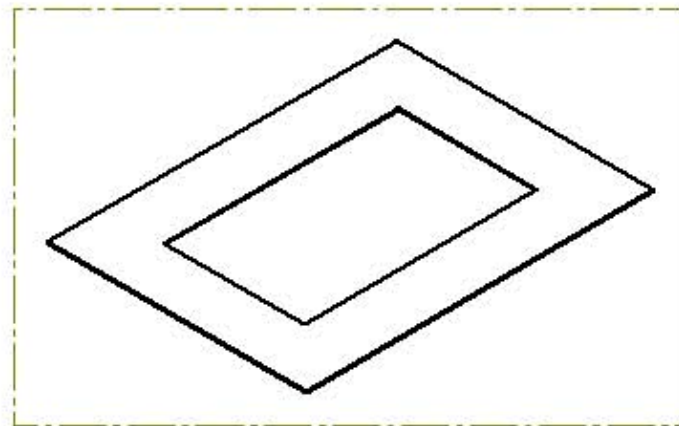
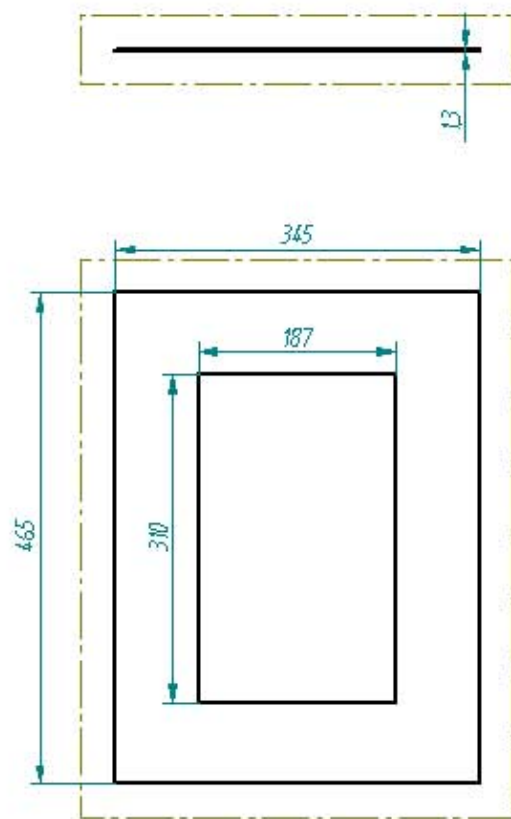
*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pieza 7

Material: Acero Inox 304

Esc 1:5



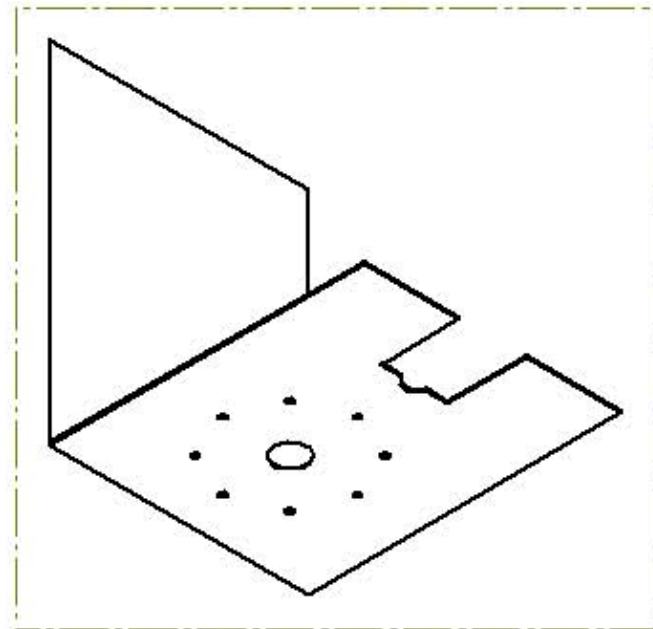
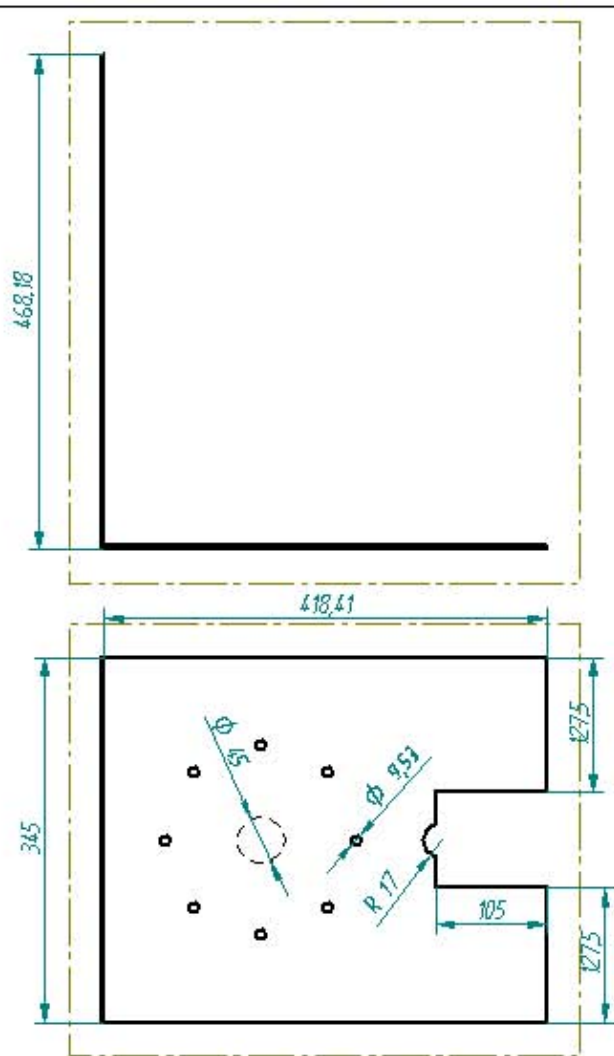


*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pieza 8 y 9

Material: Acero Inox. 304

Esc 1:5

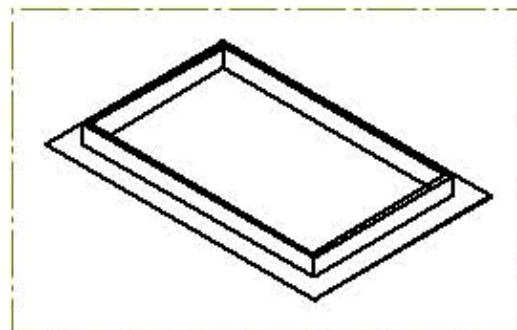
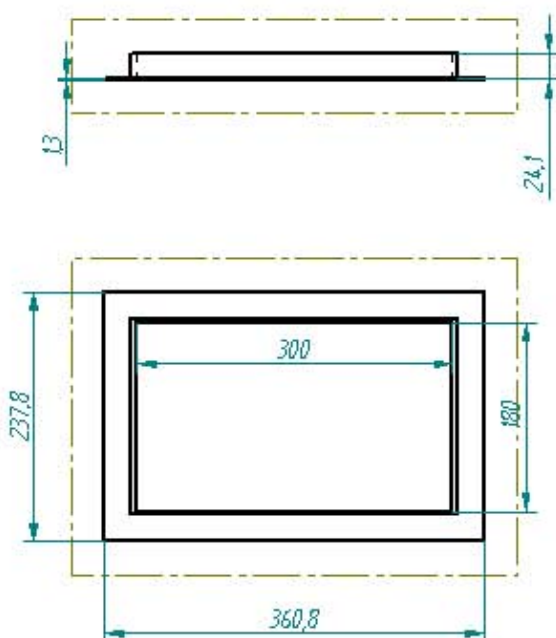


*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pieza 10

Material: Acero Inox. 304

Esc 1:5

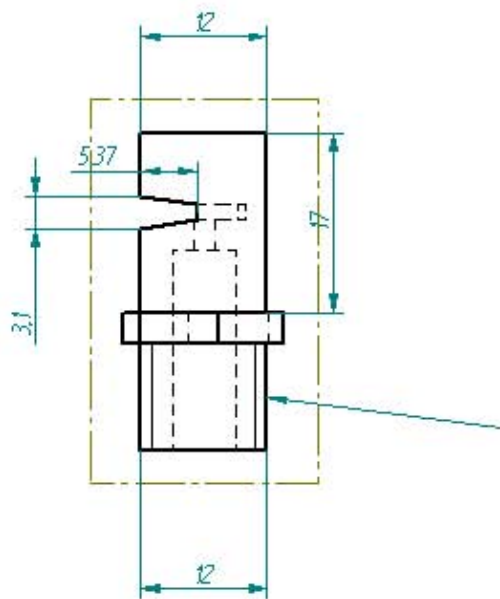
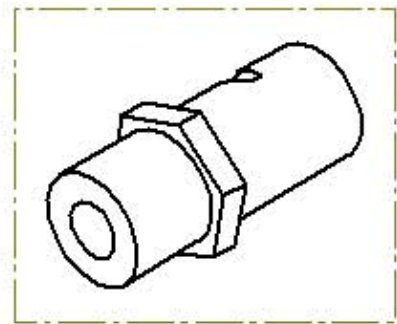
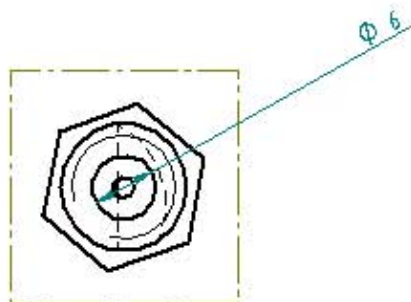


*Todas las medidas en mm*

Pieza: Pieza 11 y 12

Material: Acero Inox 304

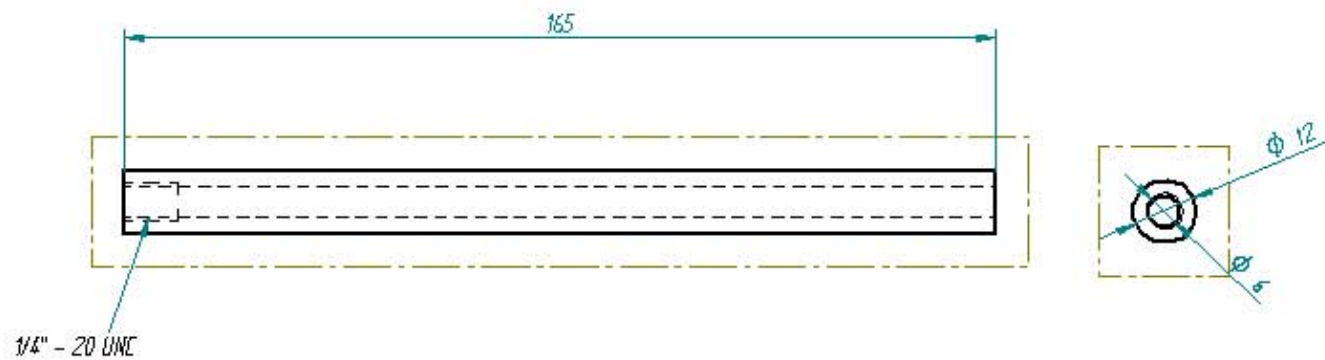
Esc 1:5



1/4" - 20 UNC

Todas las medidas en mm.

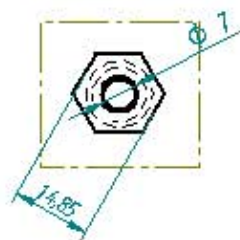
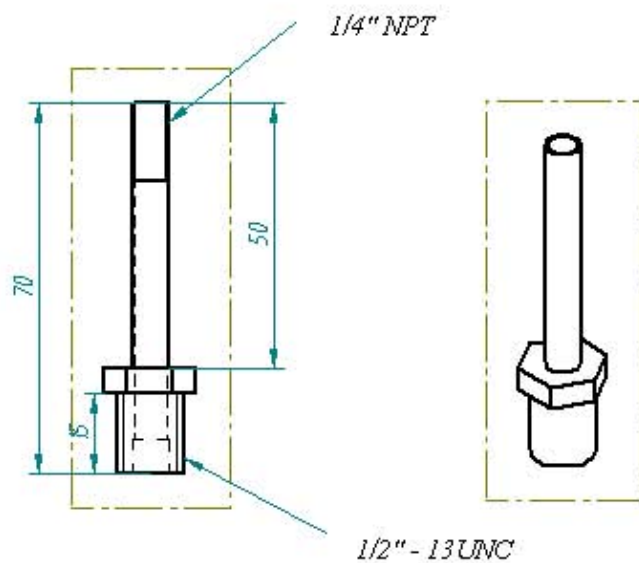
Pieza: Punta Inyector	
Material: Acero Inox. 304	Esc 2:1



*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Tubo Inyector

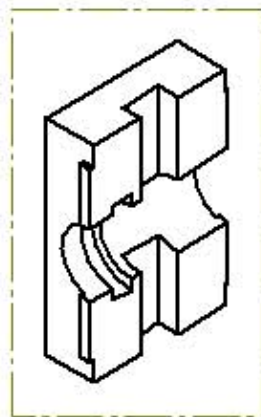
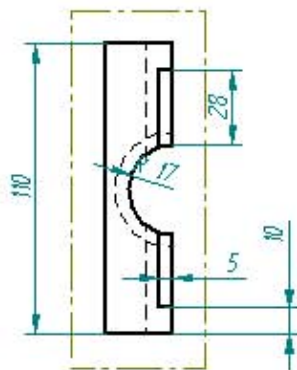
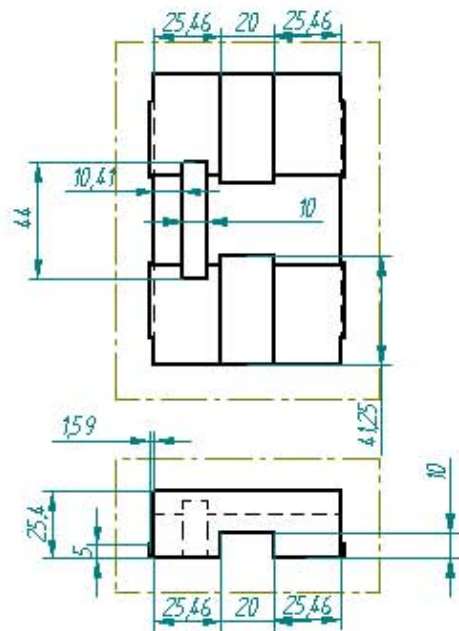
Material: Acero Inox 304 Esc 1:1



Todas las medidas en mm

Pieza: Conexión Válvula

Material: Acero Inox. 304 Esc 1:1

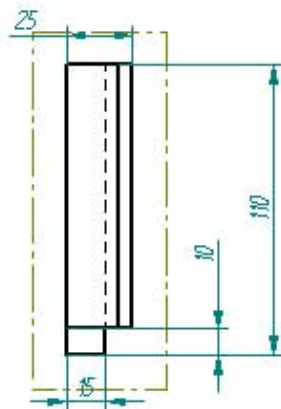
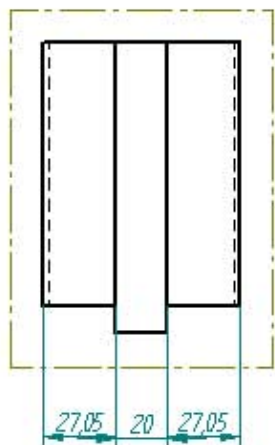
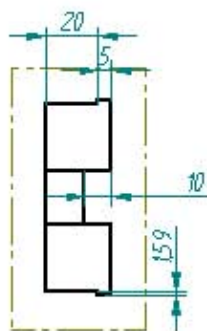
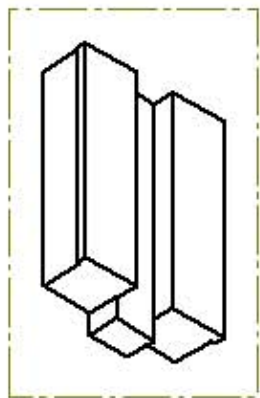


*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Guía Frontal

Material: UHMW-PE

Esc 1:2



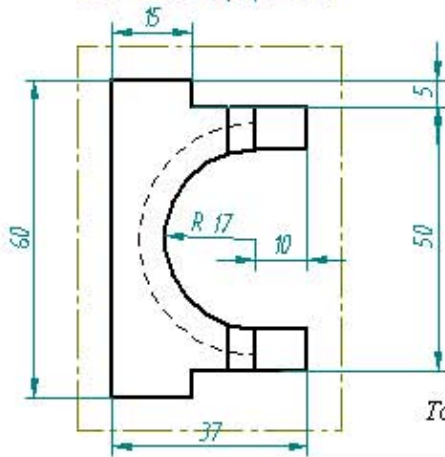
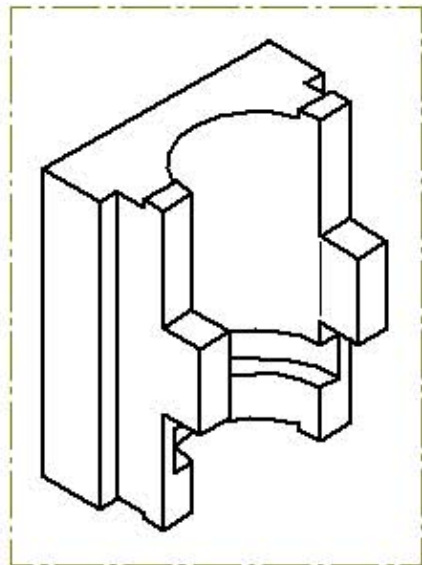
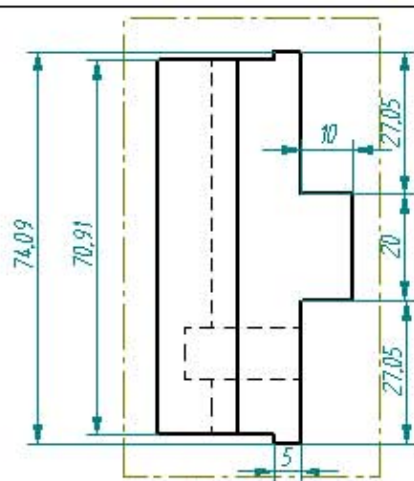
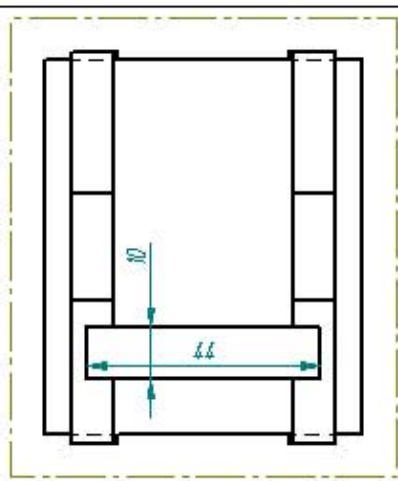
Todas las medidas en mm.

Pieza: Guía Lateral

Material: UHMW-PE

Esc 1:2



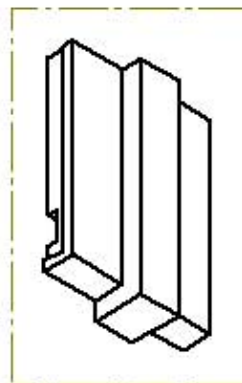
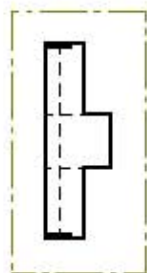
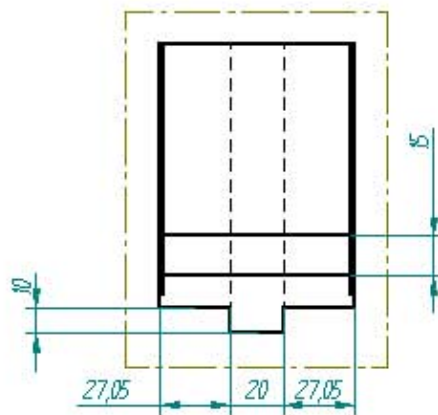
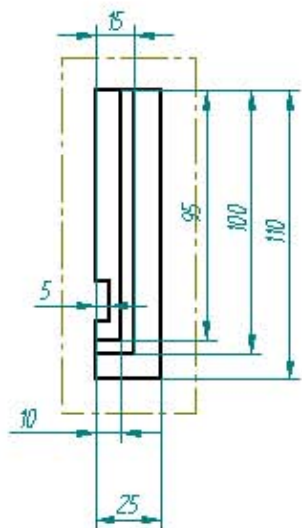


Todas las medidas en mm.

Pieza: Frontal Pieza Removible

Material: UHMW-PE

Esc 1:1



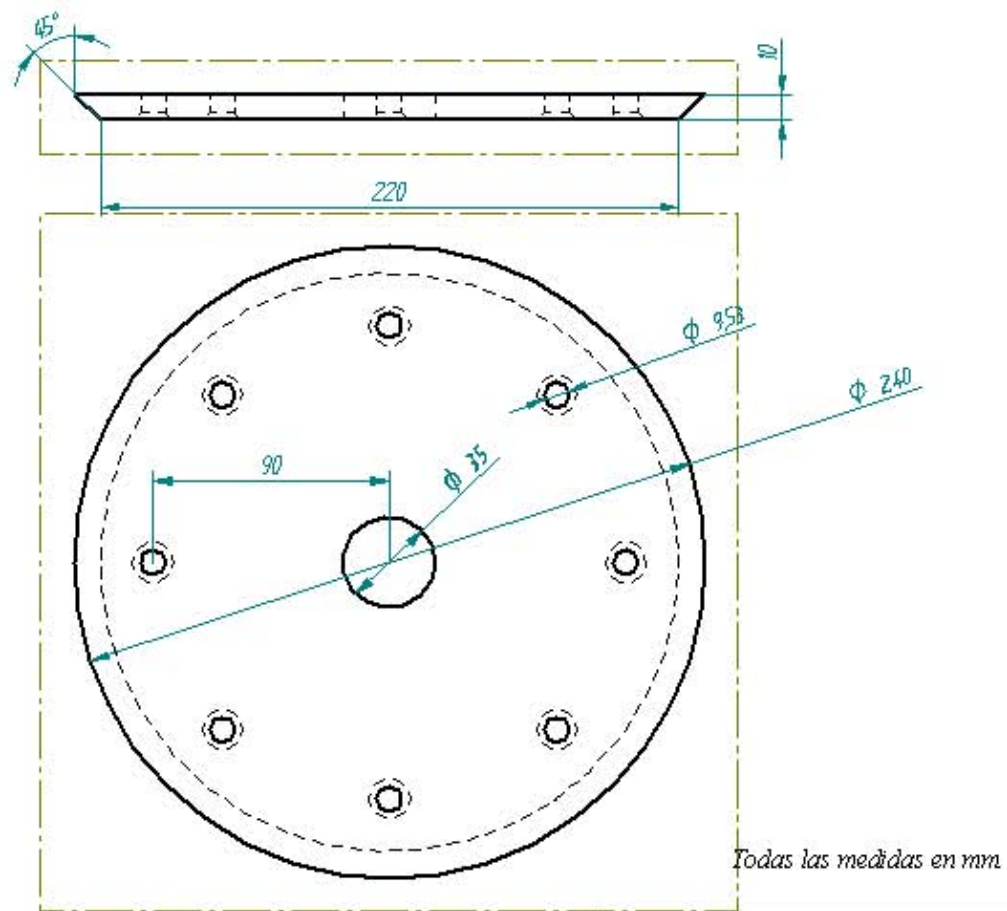
*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Lateral Pieza Removible

Material: UHMW-PE

Esc 1:2

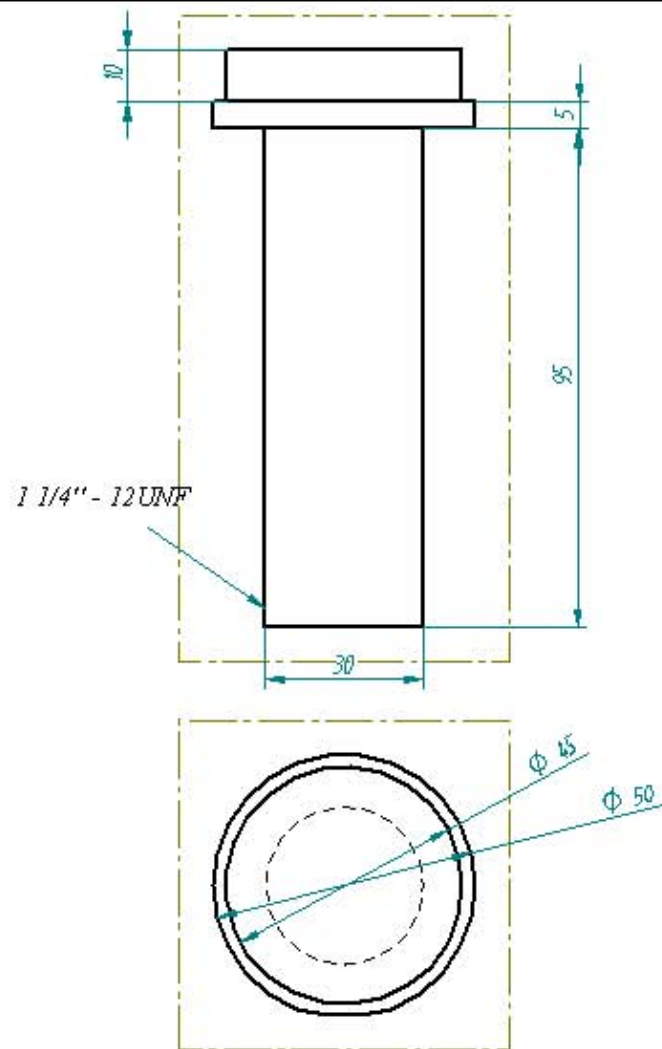
## *Sistema de sujeción*



Pieza: Bandeja

Material: Acero Inox 304

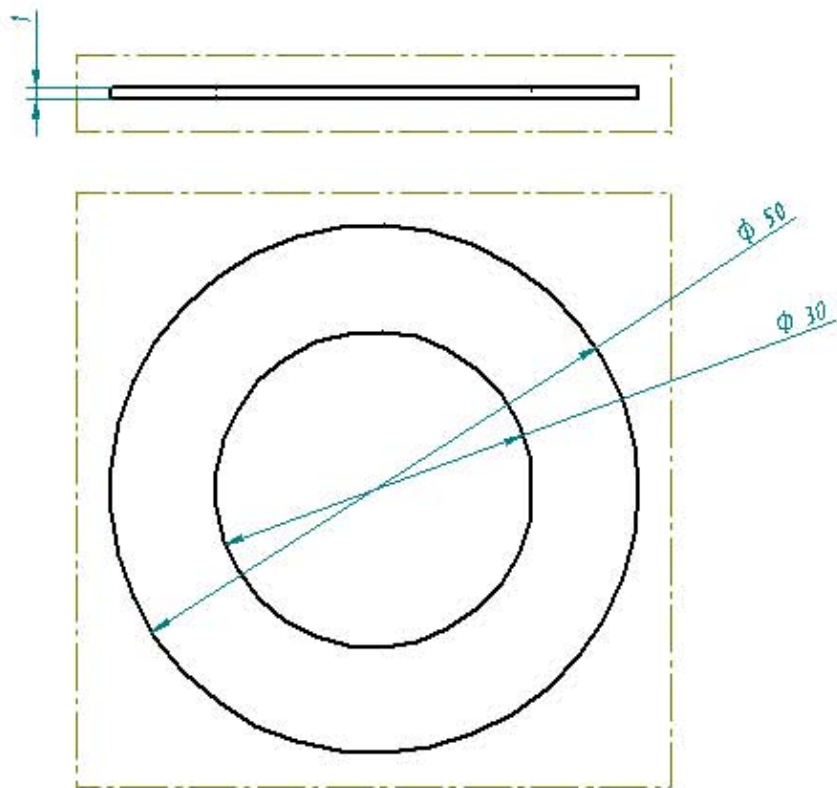
Esc 1:2



*Todas las medidas en mm*

Pieza: Pasador Bandeja

Material: Acero Inox 304 Esc 1:1

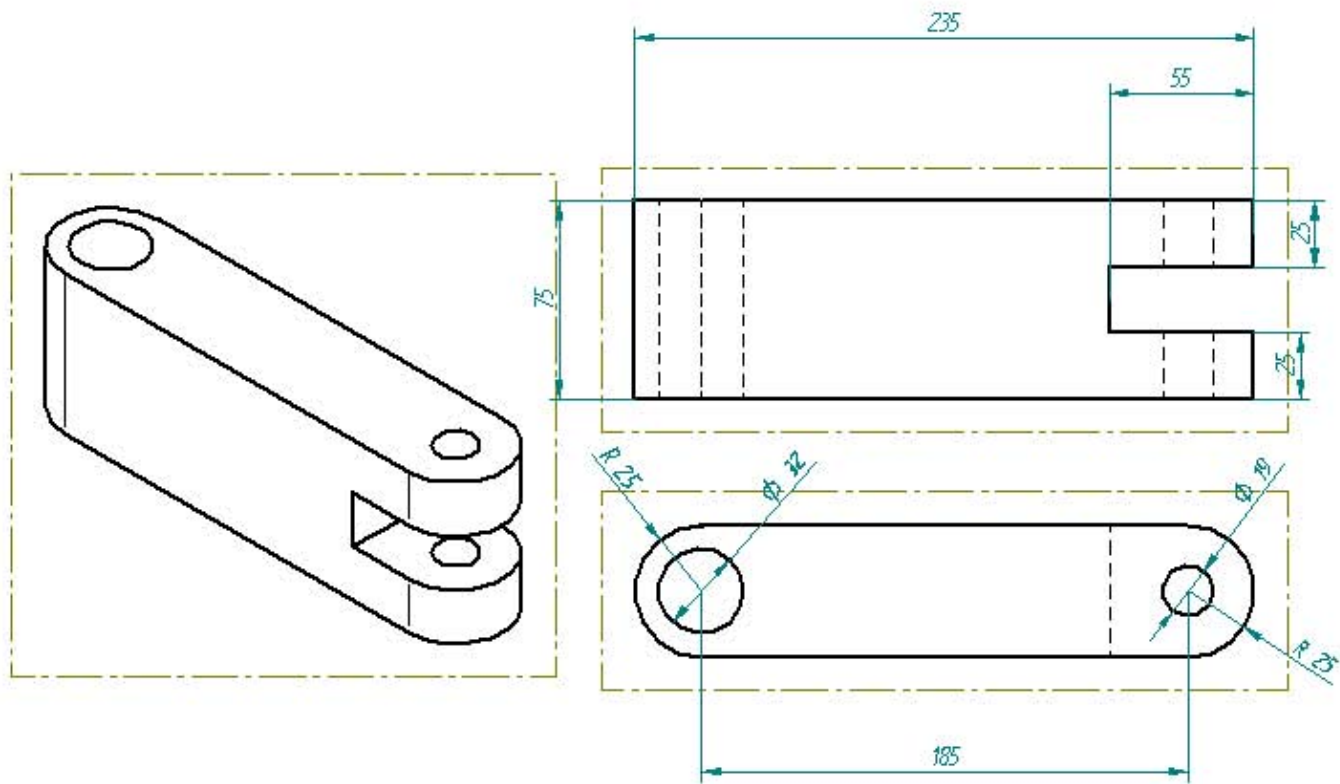


*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Arandela Bandeja

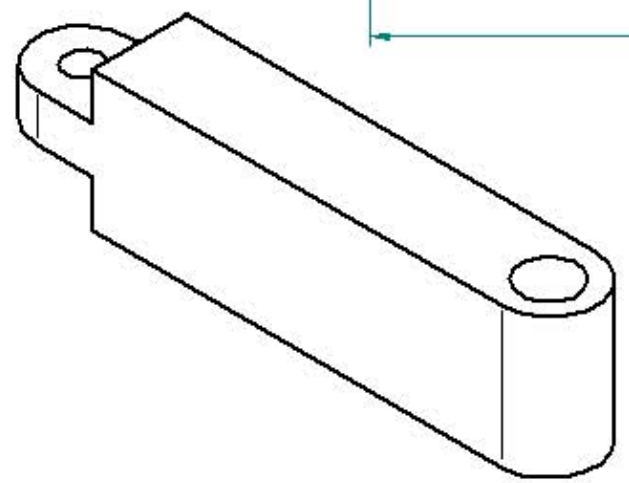
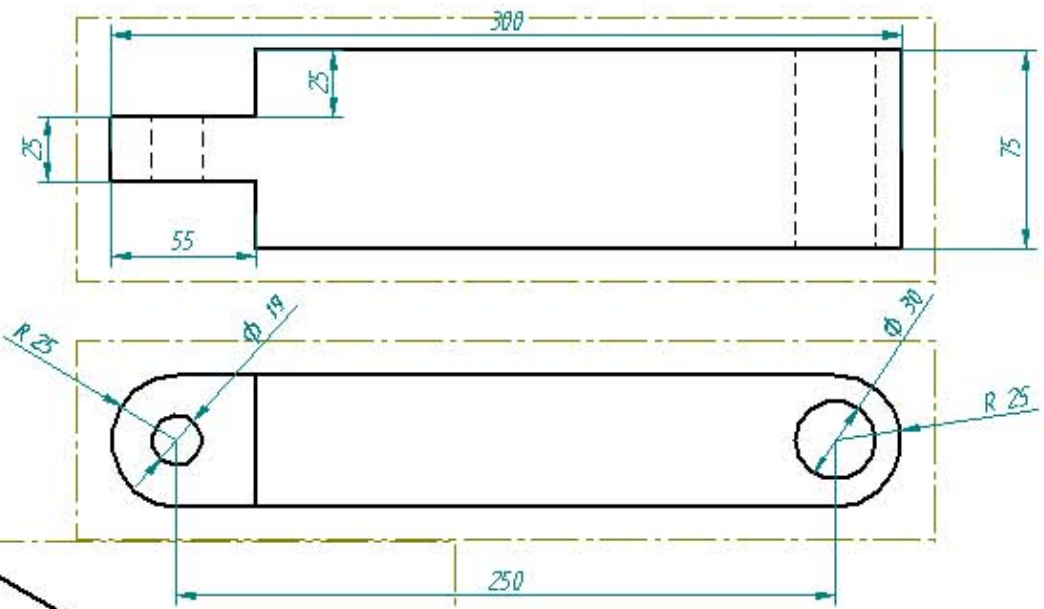
Material: PTFE (Teflón)

Esc 2:1



Todas las medidas en mm.

Pieza:	Brazo 1
Material:	Aluminio 6063 T-6 Esc 1:2

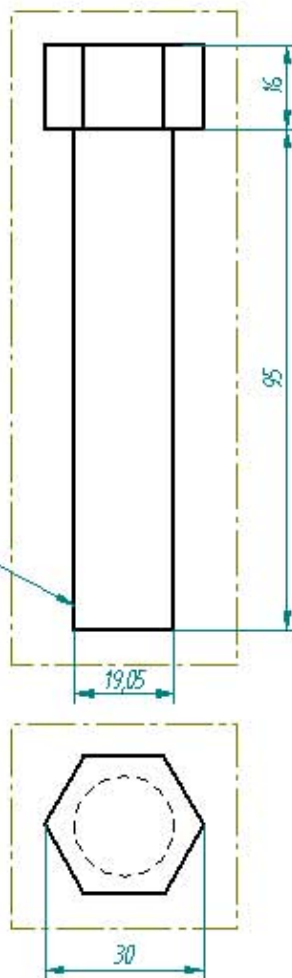


Todas las medidas en mm.

Pieza:	Brazo 2
Material:	Aluminio 6063 T-6 Esc 1:2

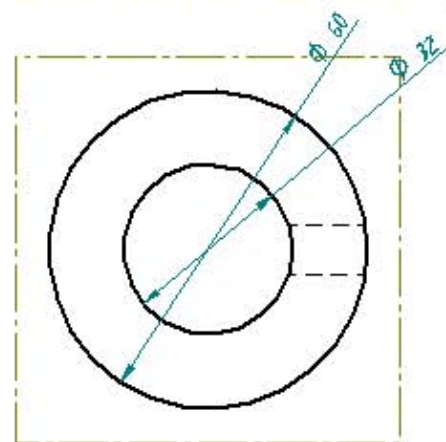
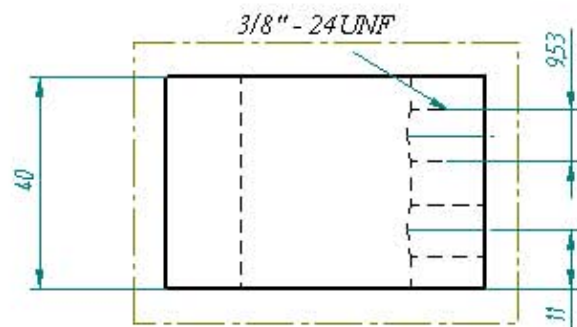
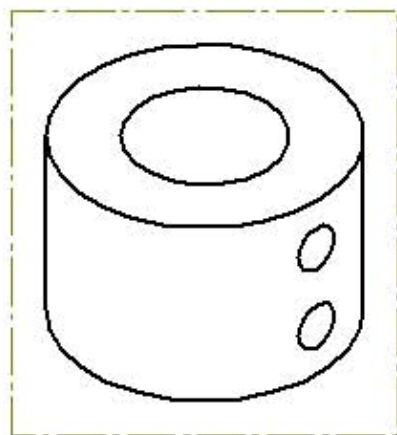


*3/4" - 16 UNF*



*Todas las medidas en mm.*

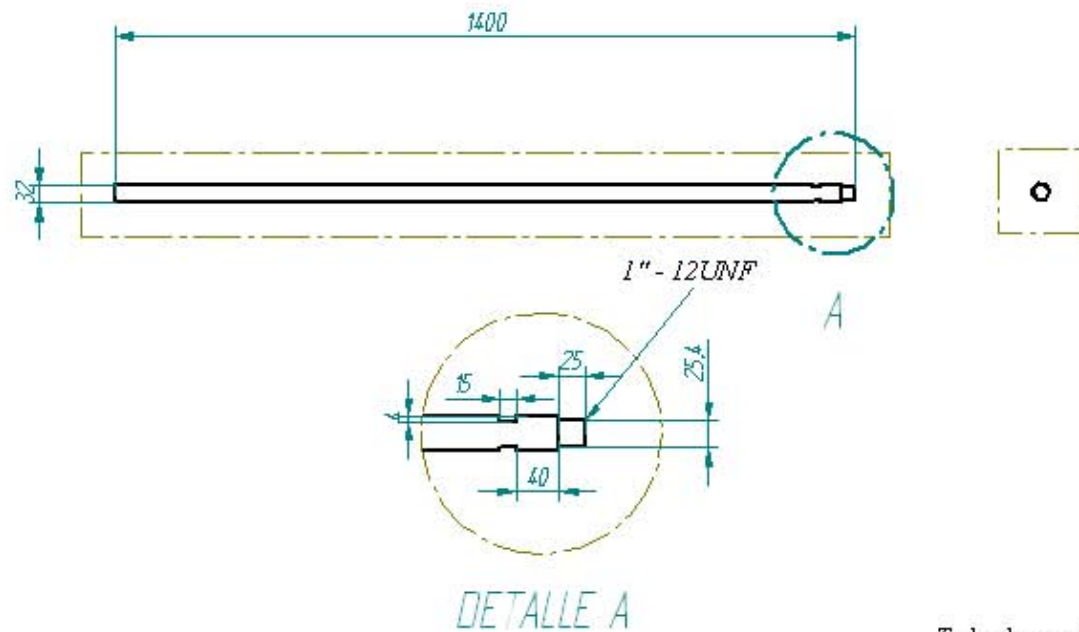
Pieza:	Pasador Brazo	
Material:	Acero Inox 304	Esc 1:1



Todas las medidas en mm

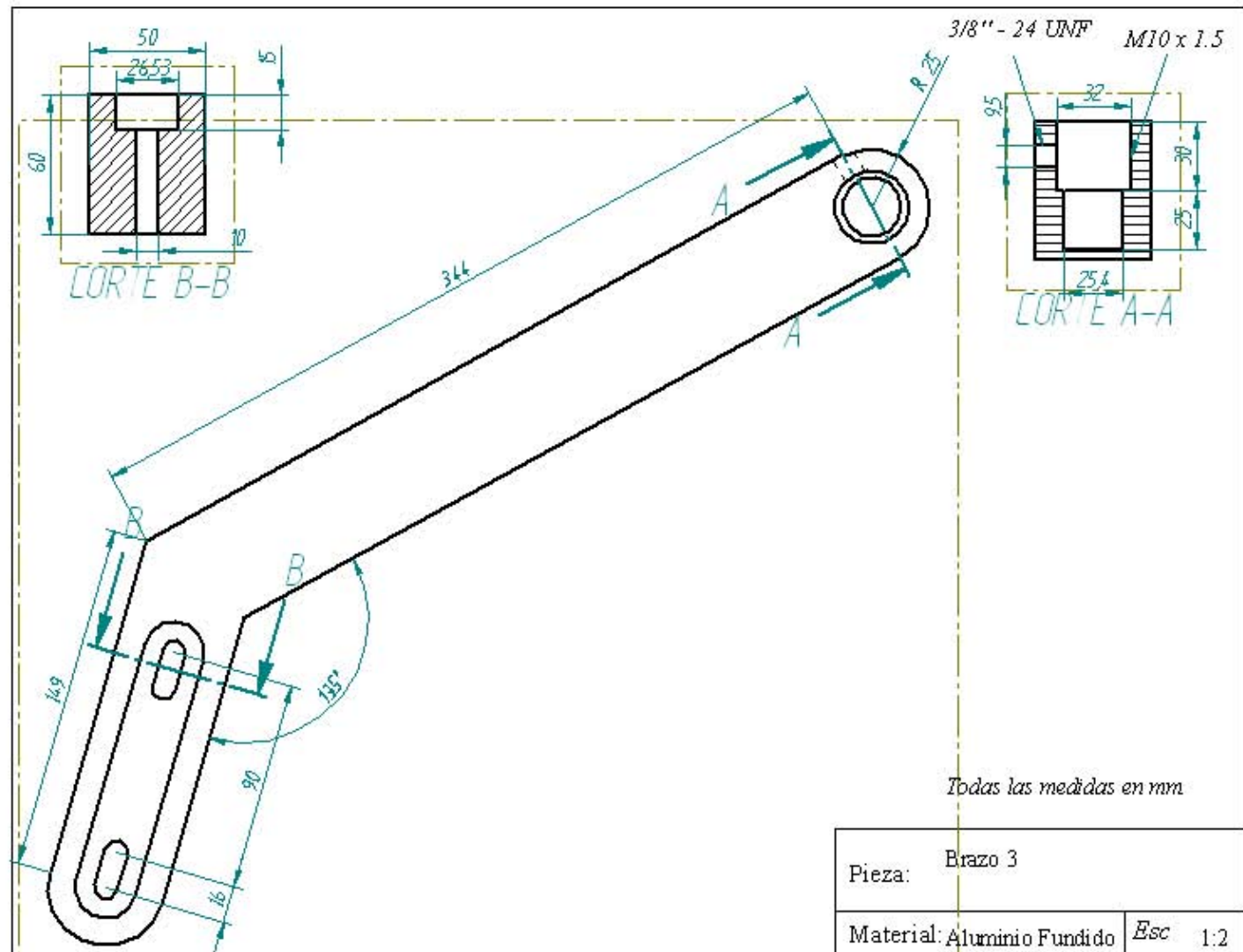
Pieza: Pieza de Soporte

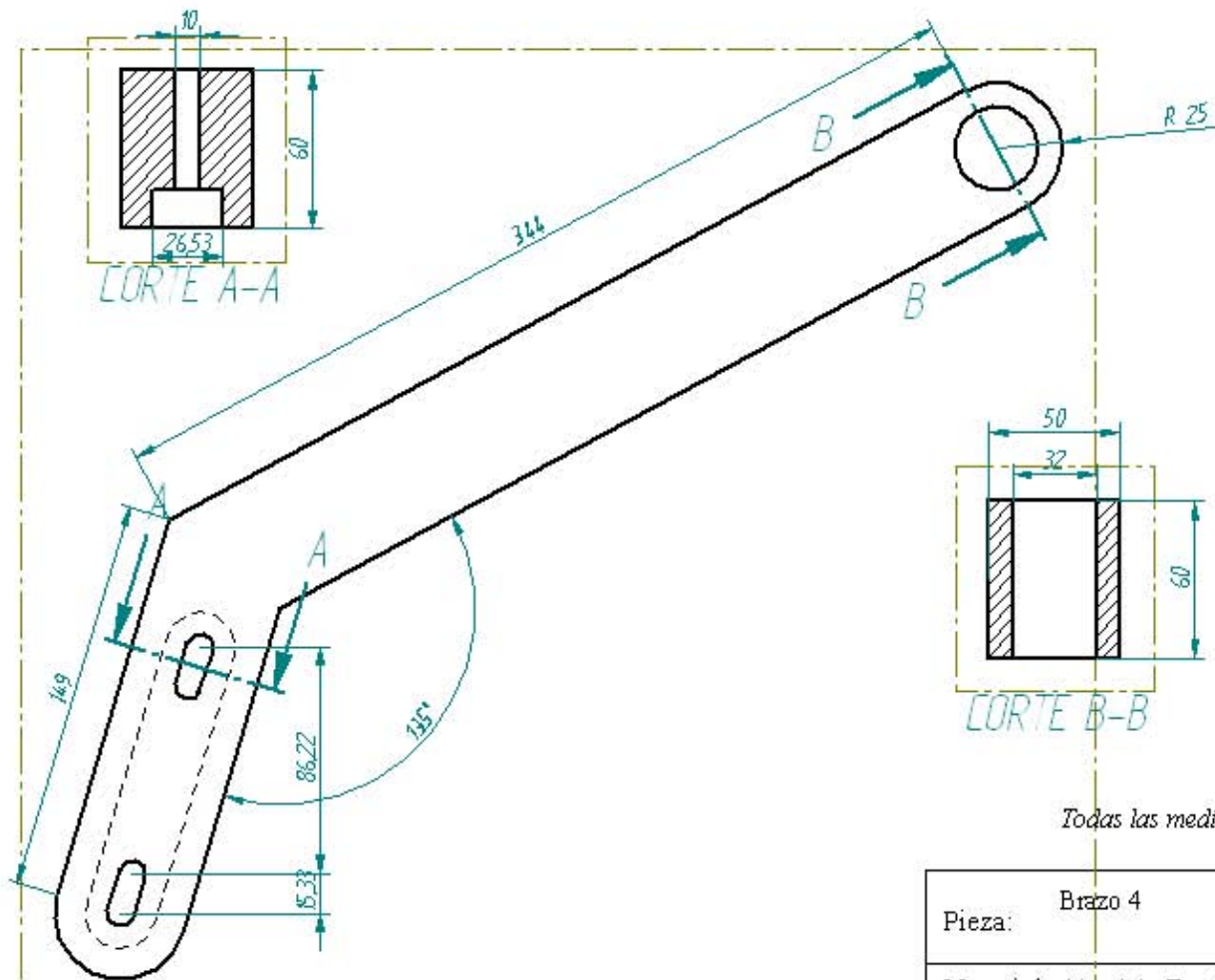
Material: Acero Inox. 304 Esc 1:1



Todas las medidas en mm.

Pieza:	Eje Vertical	
Material:	Acero Inox. 304	Esc 1:10

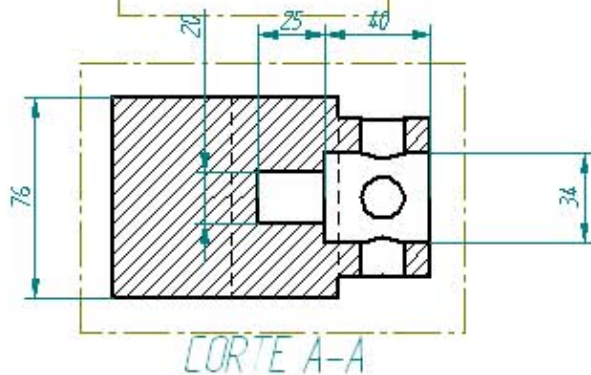
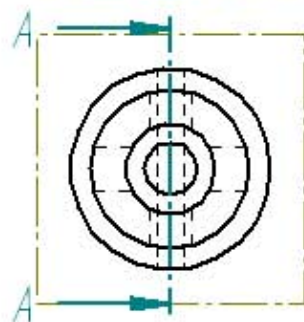
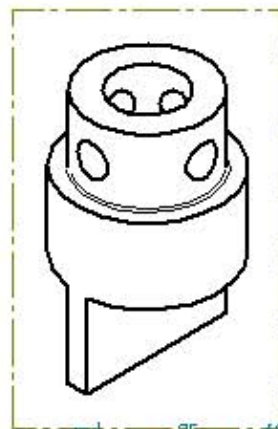
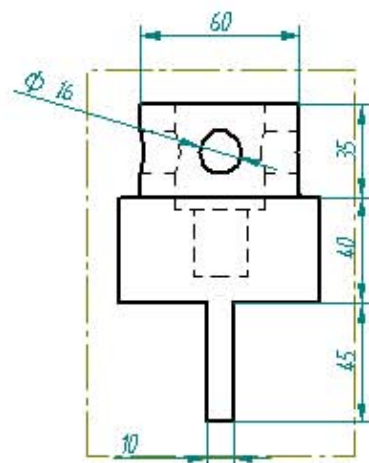




Todas las medidas en mm.

Pieza:	Brazo 4	
Material:	Aluminio Fundido	Esc 1:2

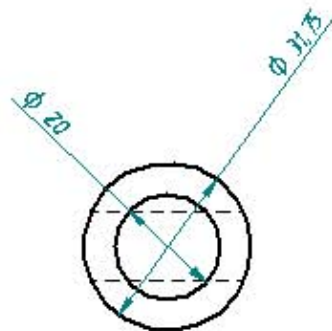
*Extensores*



Todas las medidas en mm.

Pieza: Base

Material: Acero AISI 4140 Esc 1:2



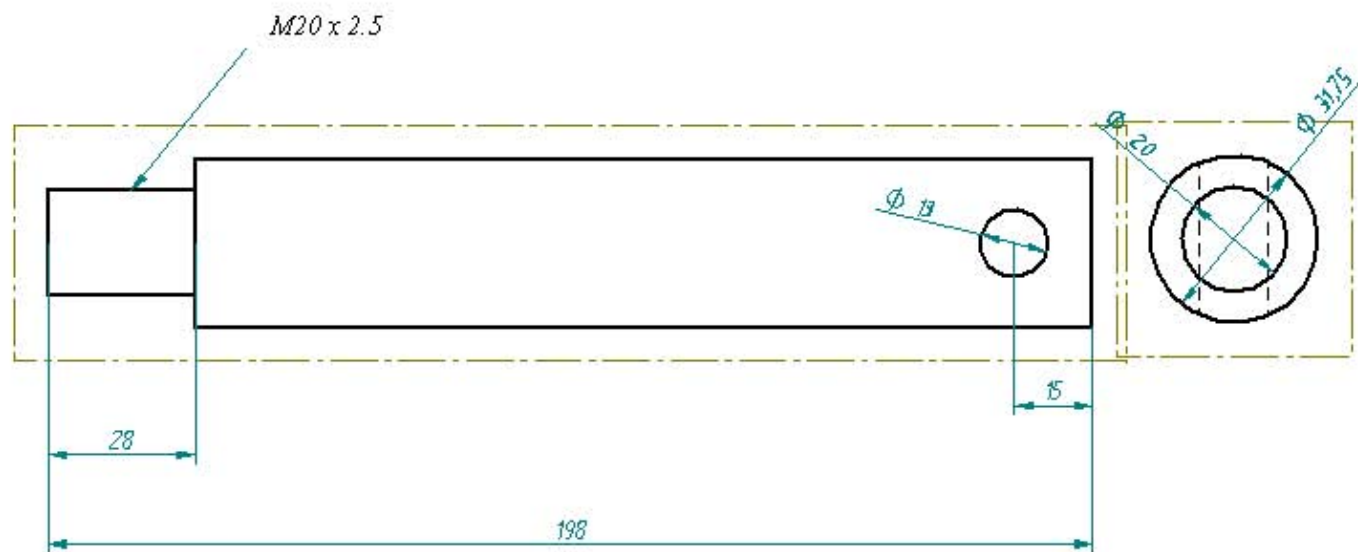
Todas las medidas en mm.

Pieza: Eje Abajo

Material: Acero Inox. 304

Esc 1:1



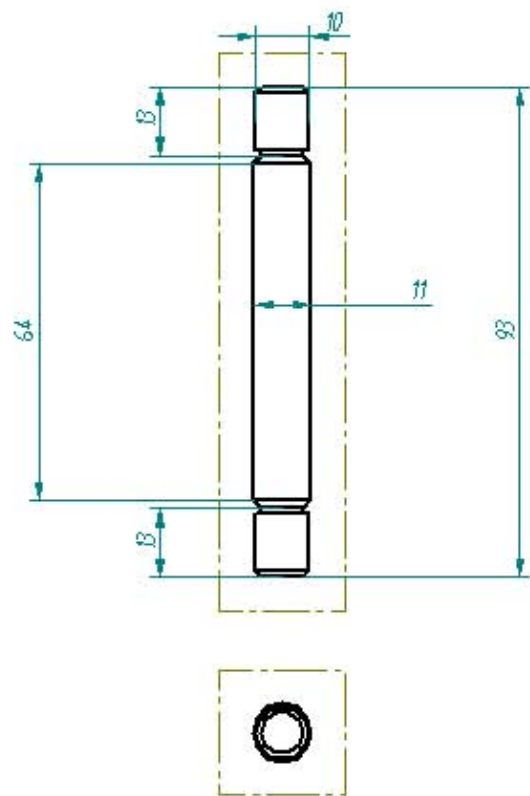


Todas las medidas en mm.

Pieza: Eje Arriba

Material: Acero Inox 304

Esc 1:1

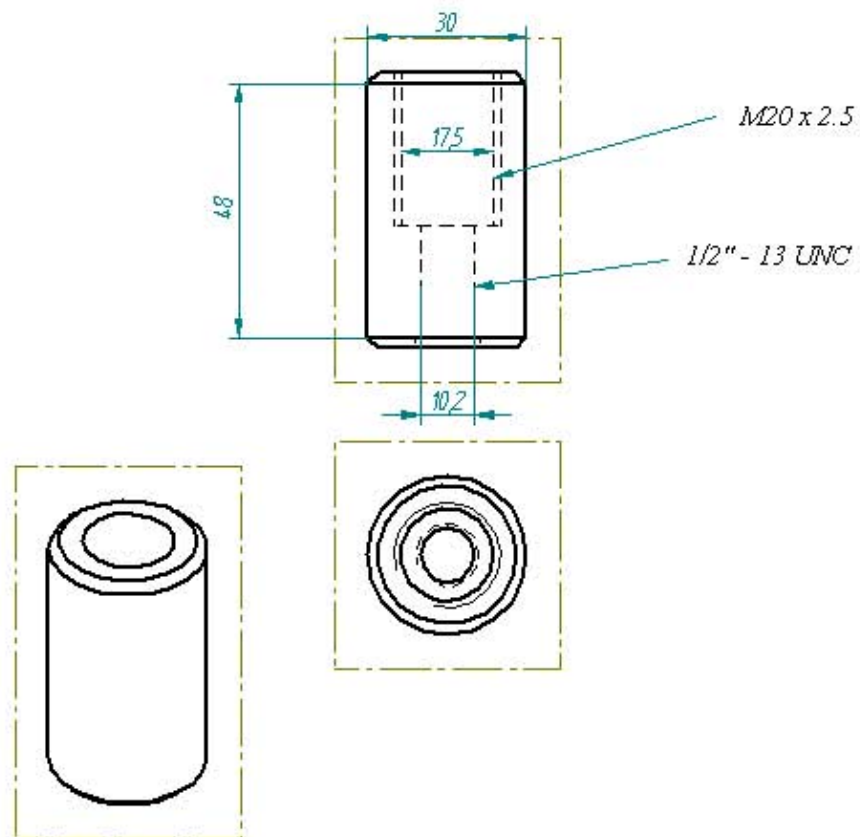


*Todas las medidas en mm.*

Pieza: Pasador

Material: Acero AISI 4140

Esc 1:1



*Todas las medidas en mm*

Pieza: Portaprobeta

Material: Acero Inox. 304

Esc 1:1