

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANA TIPO FORD A TEMPERATURAS MODERADAS.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Jácome V. Luis R.
Rivas C. Carlos L.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANA TIPO FORD A TEMPERATURAS MODERADAS.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Eli S. Puchi C.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Jácome V. Luis R.
Rivas C. Carlos L.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009.



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



Caracas, 03 de julio de 2.009

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

LUIS JACOME y CARLOS RIVAS

Titulado:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANTA TIPO FORD A TEMPERATURAS MODERADAS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



Prof. Antonio Barragán
Jurado

Prof. Eli Saúl Puchi
Tutor



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



Caracas, 03 de julio de 2.009

Prof. GERARDO RAMÍREZ
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería

Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:

LUIS JACOME (C.I.V.- 18.039.108) y CARLOS RIVAS (C.I.V.- 18.033.679)

“MENCIÓN HONORÍFICA”

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado titulado:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANTA TIPO FORD A TEMPERATURAS MODERADAS”

Sin otro particular a que hacer referencia quedamos de usted,

Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



Prof. Eli Saúl Puchi
Tutor

Prof. Antonio Barragán
Jurado

“Hacia el 50^o Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante”

DEDICATORIA

A esas personas que con su ejemplo me muestran día a día como la vida no es sólo cuestión de pasión sino también de constancia y dedicación, que ningún logro puede ser producto de la casualidad sino del esfuerzo, que el triunfo de tus hijos también lo es tuyo. A ustedes papás.

A mis abuelos, quienes tuvieron la capacidad de enseñar a sus hijos y nietos que el logro de las metas no es nada, si la consecución de éstas no ha ido de la mano de los valores que ellos inculcaron en nuestra familia. Quienes nos mostraron que la familia no sólo se basa en el cariño, sino también en el respeto a las costumbres y en el apoyo mutuo. Gracias, ustedes son responsables directos de todos nuestros éxitos.

A mi hermano, Víctor Manuel, a quien a pesar de ser menor que yo, en muchas ocasiones me ha servido de inspiración y ejemplo. Te he visto crecer y convertirte en una persona muy diferente al resto, por tu inigualable inteligencia y fortaleza mental, las cuales estoy seguro te servirán de herramientas para el logro de todas tus metas. Siempre contarás con mi apoyo.

A Andreyna Sereno, quien ha compartido todos mis logros y me ha ayudado a superar los problemas durante los últimos cuatro años. Gracias por tu incondicional apoyo y oportunos consejos, espero haber sabido corresponder a tu cariño durante este tiempo. Conserva siempre la misma fuerza para defender tus ideales pero sin olvidar que como dijo Heráclito “todo cambia, todo fluye”, Panta Rei (πάντα ρει).

A una persona a quien admiro, Ramón Jácome, que tuvo el valor para afrontar serios inconvenientes. Quien sin pretenderlo me enseñó que en algunas ocasiones los problemas pueden originar cambios en nuestra perspectiva de vida, pero sin embargo debemos tener la capacidad de continuar adelante. A quien empezó siendo mi compañero de tesis y con el tiempo se convirtió en un gran amigo.

CARLOS LUIS RIVAS CAMACHO.

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la salud, la fuerza y motivación para superar todos los obstáculos.

A mi Padre, por haber sido mi tutor principal durante este trabajo y a lo largo de mi vida. Por ser un modelo a seguir, por ayudarme a superar las frustraciones y brindarme todo el apoyo que un ser humano puede dar.

A mi Madre, por brindarme todos los días el apoyo y la atención necesaria para alcanzar mis metas. Por estar siempre dispuesta a ayudar en los pequeños detalles, con el amor que sólo una madre puede dar.

A mis hermanas, Luisa y Mónica. Este paso no hubiera sido posible sin su compañía, ayuda y apoyo durante todos estos años. Estoy orgulloso en decir que hoy en día son el mejor ejemplo y modelo a seguir de cualquier mujer que desee ser exitosa. Las quiero mucho, hermanas.

A mi “hermano”, Alfredo Mayorca. Por estar estos 5 años de carrera a mi lado. Por compartir los momentos buenos y malos. Amigo, gran parte de este título te lo debo y dedico a ti.

A mi novia. Por siempre estar allí en los buenos y malos momentos. Por tener paciencia cuando mi humor y ánimo no eran los mejores. Gracias Meli por ser “la excusa para no amargarme”,

A mi compañero de Tesis, Carlos Rivas. Hoy en día estoy feliz de poder decir que más que un compañero, eres un gran amigo. Tu constante interés, y sabios consejos, sobre mis problemas dentro y fuera de este trabajo, no hacen más que dejar en ridículo cualquier intento de dedicatoria o agradecimiento que pueda redactar. Simplemente espero que podamos seguir cosechando logros y superando inconvenientes “bajo otro esquema de trabajo...” jaja.

Luis Ramón Jácome Vanegas.

AGRADECIMIENTOS

A Crisanto Villalobos, por ser más que un co-tutor, un Amigo Incondicional. Por siempre estar pendiente de nosotros sin importar cuántas obligaciones pueda tener encima. Por dar la palabra de aliento precisa cuando las cosas se pusieron cuesta arriba, eso vale más que cualquier consulta técnica. Sin ti, este trabajo no hubiera sido posible, la palabra gracias queda corta Crisanto.

A nuestro tutor, Eli Saúl Puchi. Por su constante apoyo e interés a pesar de la distancia. Por atender nuestras dudas y consultas al momento, y transmitirnos parte de sus grandísimos conocimientos con toda la humildad y paciencia posibles.

Al señor Ramón Jácome, por compartir con nosotros su valiosa experiencia y ayudarnos desinteresadamente a lo largo de todo el proyecto.

A la Sra. Omi Camacho, por preocuparse del desarrollo de nuestro trabajo y su disposición a ayudarnos dentro de sus posibilidades.

A nuestros amigos que se encuentran lejos, que de una u otra forma son parte de la culminación de nuestra carrera universitaria, Carlos Roos, Cesar Rodríguez y Alfredo Mayorca.

A nuestros compañeros de clase: El Portu, Chino, Chicho, Pedro, Eduardo... Gracias por todo, muchachos. También al Profesor Pedro Álvarez, por compartir su oficina, y “Vacilar” con nosotros.

A todas aquellas personas que nos ayudaron desinteresadamente, Arnaldo Malpica, Prof. Ramón Sánchez, Prof. Limongi, Prof. Julio Segura, Señor Ángel Delgado del CEDEA, Ing. Miguel Arellano de Instituto de Ingeniería, José Izturis del CEDEA, Juan Pereira del CEDEA... muchísimas gracias a todos.

CARLOS RIVAS, RAMON JACOME

Jácome V. Luis R.
Rivas C. Carlos L.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANA TIPO FORD A TEMPERATURAS MODERADAS.

Tutor Académico: Dr. Eli S. Puchi C. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009, 133p.

Palabras Claves: Ensayos Mecánicos, Compresión Plana tipo “Ford”, Aluminio de uso Naval.

Resumen: El presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un dispositivo de compresión plana tipo “Ford”, capaz de llevar a cabo ensayos sobre aluminios y aceros de uso naval. El mismo, es capaz de proporcionar las propiedades mecánicas de dichos materiales bajo condiciones de deformación plana y puede ser empleado en la simulación de procesos de laminación en caliente, ya que en ambos modos de deformación se obtienen texturas cristalográficas similares. Dicho dispositivo posee la capacidad de acoplarse a la máquina universal de ensayos mecánicos de 250 kN de capacidad, de la que se dispone en la Fundación Instituto de Ingeniería. Los principales parámetros que se consideraron para el diseño del mismo son: dimensiones de los indentores, alineación, coeficiente de fricción, tasa de deformación y temperatura del ensayo. El diseño, además de acoplarse a la máquina universal de ensayos, debió ajustarse tanto al espacio disponible como a las condiciones de operación de dicho equipo. El presente trabajo comprende una revisión bibliográfica y estudio de antecedentes del Dispositivo de Compresión Plana Tipo Ford, luego gracias a una tormenta de ideas se presentaron varias propuestas para la construcción del mismo, posteriormente se realizó el proceso de toma de decisiones y la ingeniería de detalles de la opción elegida. Adicionalmente, se incluyen planos de los elementos diseñados, un manual de operación para el correcto funcionamiento del equipo, y finalmente, conclusiones y recomendaciones para mejorar, a futuro, el desempeño del dispositivo.

Jácome V. Luis R.
Rivas C. Carlos L.

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ACCESSORY FOR
CONDUCTING “FORD” PLANE STRAIN COMPRESSION TESTS AT
MODERATE TEMPERATURES.**

Supervisor: Dr. Eli S. Puchi-Cabrera. Undergraduate Thesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Faculty of Engineering, School of Mechanical Engineering, 2009, 133 pages.

Keywords: Mechanical testing, “Ford” plane strain compression tests, aluminum for naval applications.

Abstract: In order to encourage the production of naval vessels in our country, a joint project between the Universidad Central de Venezuela (UCV) and the Fundación Instituto de Ingeniería (FII) has been established. For this purpose, UCV has been represented by the School of Metallurgical Engineering and Materials Science and the School of Mechanical Engineering. The first stage of the project involves the manufacture of an accessory for conducting “Ford” plane strain compression tests (FPSCTs) at elevated temperatures in aluminum alloys. The second stage involves the upgrading of the accessory in order to carry out tests in steels for naval applications. FPSCTs conducted with this accessory will allow the determination of important information concerning the mechanical behavior of the tested materials under, for example, hot rolling operations. Also, such tests could be employed in order to study the microstructural evolution of these materials under the aforementioned deformation conditions. This possibility arises from the fact that the crystallographic textures develop in rolling and plane strain compression are similar. The accessory will be employed in conjunction with an universal testing machined of 250 kN capacity, available at the FII. The main parameters to be considered are indentors dimensions, alignment, friction coefficient, strain rate and deformation temperature. The accessory should be able to fit into the available space in the testing machine and comply with its operation conditions. Once operative, the FII will be able to provide research services regarding the conduction of FPSCTs at elevated temperatures. Such tests would be useful to metalworking industries interested in the determination of the mechanical behavior of materials under these conditions. The present study involves a literature review and analysis of previous work carried out in this field. Also, several options for the construction of the accessory are analyzed. Detailed sketches of the different elements composing the dispositive are provided, as well as an operation manual for its correct use. Conclusions and suggestions for improving the prototype are also provided in this study.

<i>Índice General</i>	<i>Pag.</i>
<i>Dedicatorias y Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Resumen</i>	<i>vi</i>
<i>Índice General</i>	<i>vii</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>xi</i>
<i>Índice de Tablas</i>	<i>xvi</i>
<i>Abreviaturas y Símbolos</i>	<i>xvii</i>
CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO	4
2.1 <i>Ensayo De Tracción Uniaxial</i>	<i>5</i>
2.2 <i>Ensayo De Torsión.</i>	<i>7</i>
2.3 <i>Ensayo De Compresión.</i>	<i>8</i>
2.3.1 <i>Ensayo de compresión axial</i>	<i>9</i>
2.3.2 <i>Ensayo de compresión plana tipo Ford</i>	<i>10</i>
2.3.2.1 <i>Estado de deformación plana</i>	<i>12</i>
2.3.2.2 <i>Factores que afectan el estado de deformación plana</i>	<i>14</i>
2.3.2.3 <i>Cálculo de la deformación equivalente</i>	<i>16</i>
2.3.2.4 <i>Cálculo del esfuerzo equivalente</i>	<i>18</i>
2.4 <i>Aluminios Navales</i>	<i>19</i>
2.4.1 <i>Composición química de la serie 5XXX</i>	<i>19</i>
2.5 <i>Coficiente De Fricción.</i>	<i>20</i>
CAPÍTULO III - METODOLOGÍA DEL DISEÑO	21
3.1 <i>Establecimiento de una necesidad.</i>	<i>22</i>
3.1.1 <i>Planteamiento del problema</i>	<i>23</i>
3.2 <i>Diseño Conceptual</i>	<i>23</i>
3.2.1 <i>Propuestas para el diseño de los indentores</i>	<i>23</i>
3.2.1.1 <i>Propuesta N° 1</i>	<i>24</i>
3.2.1.2 <i>Propuesta N°2</i>	<i>25</i>
3.2.2 <i>Propuestas para el diseño de las bases refrigeradas.</i>	<i>27</i>
3.2.2.1 <i>Propuesta N° 1</i>	<i>27</i>

ÍNDICE

3.2.2.2 Propuesta N° 2	29
3.2.2.3 Propuesta N° 3	32
3.2.3 Propuesta para el diseño del acople.	34
3.2.4 Propuestas para el diseño del mecanismo de transporte.	35
3.2.4.1 Propuesta N° 1	36
3.2.4.2 Propuesta N° 2	39
3.2.4.3 Propuesta N° 3	43
3.2.5 Propuesta para el diseño del chasis.	46
3.2.6 Pieza de Alineación	57
3.2.6.1 Propuesta N°1	48
3.2.6.2 Propuesta N°2	49
3.3 Análisis de las Propuestas.	50
3.3.1 Parámetros a evaluar.	50
3.3.2 Ponderación de las variables.	53
3.3.3 Evaluación de las propuestas	55
3.4 Diseño de Detalles.	57
3.4.1 Indentores.	57
3.4.2 Base Refrigerada.	57
3.4.3 Mecanismo de Transporte.	59
3.4.4 Chasis.	60
3.4.5 Probeta.	61
CAPÍTULO IV-DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	63
4.1 Evaluación de materiales	64
4.1.1 Aceros de herramienta tipo D2	64
4.1.2 Aceros para trabajo en caliente tipo H13	65
4.1.3 Aceros Inoxidables tipo 420	66
4.1.4 Aluminio 6063	67
4.1.4.1 Ejes calibrados	68
4.1.4.2 Bloque fijo	68
4.1.4.3 Mango de agarre	68
4.1.4.4 Chasis	69

ÍNDICE

4.1.4.5 <i>Pieza de alineación</i>	70
4.2 <i>Dimensionamiento del equipo</i>	70
4.2.1 <i>Indentores.</i>	70
4.2.2 <i>Estudio de cargas en la base refrigerada.</i>	77
4.2.3 <i>Estudio del disco del indentor</i>	78
4.2.4 <i>Estudio del disco del acople.</i>	79
4.3 <i>Cálculos de Transferencia de Calor</i>	81
4.3.1 <i>Balance de Energía.</i>	81
4.3.2 <i>Cálculo del coeficiente convectivo.</i>	82
4.3.2 <i>Cálculo del coeficiente de radiación.</i>	84
4.3.2 <i>Cálculo del calor transferido al indentor.</i>	87
4.3.3 <i>Cálculo del calor transferido a la base refrigerada.</i>	87
4.3.4 <i>Cálculo del caudal de refrigeración</i>	88
4.4 <i>Equipos auxiliares.</i>	89
4.4.1 <i>Hornos y Resistencias.</i>	89
4.4.2 <i>“Chiller”</i>	91
4.4.3 <i>O-ring</i>	92
4.4.4 <i>Termocuplas</i>	92
4.4.5 <i>Sistema de Recolección de Datos</i>	92
4.4.6	93
<i>Tornillería</i>	
4.4.7 <i>Papel de empackadura:</i>	94
4.4.7.1 <i>Mantenimiento de la unión apernada</i>	94
4.5 <i>Construcción del dispositivo</i>	95
4.5.1 <i>Torneado</i>	95
4.5.2 <i>Fresado</i>	97
4.5.3 <i>Taladrado</i>	97
4.5.4 <i>Maquinado por Electrodescarga</i>	99
4.5.5 <i>Rectificado</i>	100
4.5.6 <i>Soldadura</i>	100
4.6 <i>Tratamiento térmico</i>	101

ÍNDICE

<i>4.6.1 Templado</i>	<i>101</i>
<i>4.6.2 Revenido</i>	<i>101</i>
<i>CAPÍTULO V- MANUAL DE OPERACIONES</i>	<i>102</i>
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	<i>108</i>
<i>APÉNDICE</i>	<i>113</i>
<i>RESEÑA BIBLIOGRÁFICA</i>	<i>115</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>119</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Índice de figuras	Pág.
Figura 2.1 Curva esfuerzo-deformación nominal obtenida en el ensayo de tracción.	6
Figura 2.2 Curva Momento torsor vs ángulo de giro en el ensayo de torsión.	8
Figura 2.3 Modos de deformación en el ensayo de compresión axial.	10
Figura 2.4 A) Esquema del ensayo de compresión plana tipo Ford, b) esquema de la probeta luego de ser ensayada.	11
Figura 2.5 Esquema de estado de deformación plana.	12
Figura 2.6 Esquema de "ensanchamiento lateral".	13
Figura 2.7 Deformación en "Z" ocasionada por una desalineación de 1 mm.	15
Figura 2.8 Deformación en "U" debido a diferentes coeficientes de fricción en los contactos espécimen-herramienta.	15
Figura 2.9 Deformación en "Z" debido a la variación del coeficiente de fricción a través del grosor de la herramienta.	16
Figura 2.10 Curva carga-desplazamiento, obtenida en el ensayo de compresión plana Ford.	16
Figura 3.1 Indentor primera propuesta	24
Figura 3.2 Agujeros para unión, Propuesta 1	24
Figura 3.3 Guías para alineación en el indentor (propuesta 1)	25
Figura 3.4 Columna para alineación de la propuesta 1 del indentor	25
Figura 3.5 Vista superior e inferior del disco del indentor, respectivamente	26
Figura 3.6 Vistas del indentor (propuesta 2)	26
Figura 3.7 Ensamble propuesta 2 para el diseño del indentor	27
Figura 3.8 Agujeros de entrada y desagüe del refrigerante, base refrigerada prop. 1	28
Figura 3.9 Tapa de base refrigerada, propuesta 1	28
Figura 3.10 Ensamble de la propuesta 1 de la base refrigerada	29
Figura 3.11 Vista Superior de la base refrigerada, propuesta 2	30
Figura 3.12 Agujero de entrada del refrigerante, propuesta 2	30
Figura 3.13 Agujero de desagüe del refrigerante, propuesta 2	30
Figura 3.14 Agujeros para fijar indentor a la base, propuesta 2	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.15	Vistas superior e inferior de la tapa de la base refrigerada (propuesta 2)	31
Figura 3.16	Ensamble de la propuesta 2 para la base refrigerada	31
Figura 3.17	Vista superior e inferior de la propuesta 3 para la base refrigerada	32
Figura 3.18	Ranura para la refrigeración	33
Figura 3.19	Entalla para O-ring.	33
Figura 3.20	Agujeros de entrada y desagüe del refrigerante, propuesta 3	33
Figura 3.21	Agujeros para la colocación del indentor, propuesta 3	33
Figura 3.22	Ensamble de la propuesta 3 para la base refrigerada	33
Figura 3.23	Acople	34
Figura 3.24	Colas de milano para permitir el avance, en la propuesta 1 del mecanismo de transporte	36
Figura 3.25	Bloque móvil en la propuesta 1 del mecanismo de transporte	37
Figura 3.26	Bloque móvil colocado en el mecanismo de transporte (propuesta 1)	37
Figura 3.27	Bloque que define la posición final	37
Figura 3.28	Bloque acoplado al resto del equipo	37
Figura 3.29	Bloque sobre el cual se colocará el conjunto de agarre de la probeta	38
Figura 3.30	Sistema de sujeción de las tenazas, prop. 1 del mecanismo de transporte.	38
Figura 3.31	Tenaza para soporte de la probeta	39
Figura 3.32	Sistema en Forma de "Y"	39
Figura 3.33	Montaje del Sistema en forma de "Y" para garantizar el paralelismo de las tenazas	39
Figura 3.34	Ensamble de la propuesta 1 del mecanismo de transporte	39
Figura 3.35	Agujero para tornillo de sujeción de chapa móvil, propuesta 2 del mecanismo de transporte	40
Figura 3.36	Ejes calibrados colocados en el bloque fijo (propuesta 2)	40
Figura 3.37	Placa para la colocación de la barra desmontable	41
Figura 3.38	Montaje de la placa para la barra desmontable, propuesta 2	41
Figura 3.39	Base que soportará los brazos encargados de sujetar la probeta, propuesta 2 del mecanismo de transporte.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.40	Montaje de la puerta del horno sobre la base destinada al soporte de los brazos de sujeción, propuesta 2 del mecanismo de transporte	42
Figura 3.41	Pines destinados a sujetar la puerta del horno, propuesta 2 del mecanismo de transporte	42
Figura 3.42	Ensamble de la propuesta 2 del mecanismo de transporte	42
Figura 3.43	Chapas circulares	43
Figura 3.44	Montaje de ejes calibrados, propuesta 3 del mecanismo de transporte	43
Figura 3.45	Barra mediante la cual se podrá mover el mecanismo de transporte	44
Figura 3.46	Montaje de la barra	44
Figura 3.47	Bloque móvil, propuesta 3	44
Figura 3.48	Montaje de bloque móvil, propuesta 3	44
Figura 3.49	Sistema de sujeción de las tenazas, propuesta 3 del mecanismo de transporte	45
Figura 3.50	Unión de la tenaza con la pieza destinada a su sujeción, propuesta 3 mecanismo de transporte	45
Figura 3.51	Ensamble de la propuesta 3 del mecanismo de transporte	45
Figura 3.52	Estructura del chasis.	46
Figura 3.53	Patas para el chasis	46
Figura 3.54	Imagen de las patas de la máquina universal de ensayos	47
Figura 3.55	Agujeros para los tornillos prisioneros en chasis	47
Figura 3.56	Montaje de la primera propuesta para la pieza de alineación.	49
Figura 3.57	Montaje de la segunda propuesta para la pieza de alineación	50
Figura 3.58	Agujeros para tornillos de mantenimiento.	57
Figura 3.59	Expulsión de la camisa.	57
Figura 3.60	Roscas NPT	58
Figura 3.61	Entalla para tornillos de sujeción	59
Figura 3.62	1) Bocina. 2) Pines de Posicionamiento. 3) Sistema de Refrigeración	60
Figura 3.63	Patas de la máquina universal de ensayos mecánicos	60
Figura 3.64	1) Ruedas. 2) Manubrio.	61
Figura 3.65	Diseño de la probeta actual.	61
Figura 3.66	Modificaciones a la probeta actual	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.67	Esquema de la Probeta recomendada para futuros ensayos	62
Figura 4.1	Esquema de las dimensiones del perfil N 1077 usado en el Chasis	69
Figura 4.2	Esquema de las dimensiones del perfil N 1249 usado en el Chasis.	69
Figura 4.3	Esquema de las dimensiones de la probeta e indenter	71
Figura 4.4	Dimensiones de la probeta.	71
Figura 4.5	Esquema de las dimensiones del indenter en la zona de contacto	72
Figura 4.6	Zonas críticas de estudio en el indenter	74
Figura 4.7	Esquema de la zona de estudio en la base refrigerada	77
Figura 4.8	Esquema de la zona de estudio en el Disco	78
Figura 4.9	Esquema de la zona de estudio en el Acople	80
Figura 4.10	Esquema del análisis de Transferencia de Calor	81
Figura 4.11	Esquema del análisis para el caso de radiación	84
Figura 4.12	Horno de precalentamiento	89
Figura 4.13	Controlador	89
Figura 4.14	Horno de Ensayo	90
Figura 4.15	Vista superior del horno de ensayo	90
Figura 4.16	Brazo de Soporte.	90
Figura 4.17	Resistencia y Termostato	91
Figura 4.18	Resistencia Tipo Cartucho	91
Figura 4.19	Fotografía del “Chiller	91
Figura 4.20	O-ring	92
Figura 4.21	Esquema de Conexión	93
Figura 4.22	Torneado	96
Figura 4.23	Camisa montada en el torno.	96
Figura 4.24	Base Refrigerada	96
Figura 4.25	Disco del Indenter.	96
Figura 4.26	Fresado.	97
Figura 4.27	Indenter construido	97
Figura 4.28	Cavidad mecanizada por fresado	97
Figura 4.29	Agujeros hechos por taladrado.	98
Figura 4.30	Los agujeros del indenter fueron realizados por el proceso de	98

ÍNDICE DE FIGURAS

	taladrado	
Figura 4.31	Los agujeros del indentor fueron realizados por el proceso de taladrado	99
Figura 4.32	Rectificado	100
Figura 5.1	Colocación del papel de empackadura	103
Figura 5.2	Esquema de la instalación del dispositivo de compresión	103
Figura 5.3	Dispositivo de compresión plana ensamblado	104
Figura 5.4	Colocación de tuercas.	105
Figura 5.5	Colocación del soporte para el mango	105
Figura 5.6	Alineación de indentores.	106
Figura 5.7	Colocación de la barra de soporte del horno.	106

ÍNDICE DE TABLAS

Índice de Tablas.	Pág.
Tabla 2.1 Composición química de la serie 5XXX.	20
Tabla 3.1 Ficha técnica de la propuesta 1 de la base refrigerada	29
Tabla 3.2 Ficha técnica de la propuesta 2 de la base refrigerada.	31
Tabla 3.3 Ficha técnica de la propuesta 3 de la base refrigerada.	34
Tabla 3.4 Criterios de evaluación de los indentes.	54
Tabla 3.5 Criterios de evaluación de la base refrigerada.	54
Tabla 3.6 Criterios de evaluación del dispositivo de transporte.	54
Tabla 3.7 Criterios de evaluación de la pieza de alineación.	55
Tabla 3.8 Escala para la evaluación.	55
Tabla 3.9 Evaluación de las propuestas de los Indentes.	55
Tabla 3.10 Evaluación de las propuestas de las bases refrigeradas.	56
Tabla 3.11 Evaluación de las propuestas de los dispositivos de transporte.	56
Tabla 3.12 Evaluación de las propuestas de la pieza de alineación.	56
Tabla 4.1 Composición química del acero D2.	64
Tabla 4.2 Propiedades mecánicas del acero de herramienta D2.	65
Tabla 4.3 Composición química del acero H13.	65
Tabla 4.4 Propiedades mecánicas del acero H13.	66
Tabla 4.5 Composición química del acero inoxidable 420.	66
Tabla 4.6 Propiedades mecánicas del acero inoxidable 420.	67
Tabla 4.7 Composición química del aluminio 6063.	67
Tabla 4.8 Propiedades mecánicas del Aluminio 6063.	68
Tabla 4.9 Sistema de Recolección de datos.	93

Abreviaturas y símbolos.

E	Módulo de elasticidad.
S	esfuerzo nominal.
G	Módulo de corte elástico.
Mt	Momento torsor.
θ	Ángulo de giro.
σ	Esfuerzo real.
ε	Deformación real.
$\bar{\varepsilon}$	Deformación equivalente.
f	Factor de corrección de expansión lateral.
b	Ancho instantáneo de probeta.
b_0	Ancho inicial de la probeta.
b_f	Ancho final de la probeta.
l	Largo de la probeta.
w	Ancho del indentor.
h	Grosor instantáneo de la probeta.
h_0	Grosor inicial de la probeta.
h_f	Grosor final de la probeta.
C	Coefficiente de ensanchamiento.
\bar{n}	Exponente de ensanchamiento.
\bar{p}	Presión media.
F	Carga aplicada.
μ	Coefficiente de fricción.
L.	Largo del indentor.

H_{\max}	Longitud máxima permisible ante pandeo.
T	Temperatura.
ν	Coefficiente de Poisson.
f_{sp}	Factor de seguridad para pandeo.
I	Momento de inercia.
n	Factor de seguridad.
K	Factor de concentración de esfuerzos.
σ_{nom}	Esfuerzo nominal presente en la pieza.
σ_{ef}	Esfuerzo efectivo en la pieza.
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales en la probeta.
A_t	Area transversal.
q_{kb}	Calor conducido en la base de la aleta.
q_{kl}	Calor conducido por la parte superior de la aleta.
q_r	Calor irradiado.
q_c	Calor convectado.
η	Eficiencia de la aleta.
A_s	Área superficial.
T_f	Temperatura de película.
K	Conductividad térmica.
Pr.	Número de Prandtl.
α	Difusividad térmica.
ν	Viscosidad cinemática.
Ra_1	Número de Raleigh.

g	Gravedad.
Un	Número de Nussel.
hc	Coefficiente convectivo.
hr	Coefficiente radiativo.
ht	Coefficiente total.
Eb	Potencia Emisiva.
R	Resistencia a la radiación.
Q	Caudal
\dot{m}	Flujo másico.

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico mundial avanza a una velocidad vertiginosa, por lo que Venezuela no puede permanecer al margen de esta realidad. En la actualidad nuestro país atraviesa graves problemas, muchos de los cuales radican en la dependencia de tecnología foránea en diferentes ámbitos de la economía productiva. Entre ellos podemos nombrar la construcción de embarcaciones marítimas, las cuales son requeridas en diversas áreas de interés nacional, tales como la pesquera, petrolera y turística entre otras; así como también existe una gran necesidad por parte del sector militar de la ampliación, a menores costos, de su flota de navegación.

Es bien conocido, que nuestro país posee algunas ventajas importantes en la producción tanto de un grupo de aleaciones de aluminio como de aceros al carbono; sin embargo, no hemos desarrollado lo suficiente el sector de manufactura capaz de transformar estas materias primas, incrementando su valor agregado. En la actualidad producimos básicamente aceros estructurales y en cuanto al aluminio, producimos fundamentalmente aleaciones de las series 1XXX, 3XXX, 6XXX y 8XXX, las cuales nutren al parque de la industria de manufactura de productos semi-elaborados. Por lo tanto, se hace imperativa la necesidad de iniciar en el país programas de laminación de aleaciones de aluminio de uso naval, específicamente aluminios de la serie 5XXX, con miras a proveer la materia prima necesaria para la construcción de las citadas embarcaciones.

Debido a lo antes mencionado el Estado Venezolano, con el apoyo de la Fundación Instituto de Ingeniería (FII), ha decidido desarrollar un proyecto de mediano plazo, tendiente a diseñar los programas de laminación en frío y en caliente de materiales utilizados (aceros y aleaciones de aluminio) en la fabricación de naves en el país.

En este sentido, la FII llevará a cabo un estudio sobre el proceso de laminación en caliente de aceros y aluminios navales, específicamente dirigido al diseño de los pases conducentes a los espesores requeridos para estas aplicaciones.

Ahora bien, es sumamente importante tener en cuenta que para la realización de dicho proceso de conformado deben ser conocidas las relaciones constitutivas de los materiales, las cuales describen la resistencia mecánica de los mismos en función de la

deformación aplicada, tasa y temperatura de deformación durante el proceso laminado, así como de su microestructura. Sabiendo que durante un proceso de laminación de chapas, éstas se encuentran sometidas a un estado de deformación plana, se desea construir un dispositivo para la realización de ensayos de compresión plana tipo Ford, capaz de operar en esta primera fase del desarrollo hasta temperaturas del orden de 600°C.

CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO

Dentro de las diversas disciplinas que engloba el que hacer de la ingeniería, una de las actividades más distintivas es el diseño en su concepción más amplia. El concebir una idea y luego plasmarla en un conjunto de notas descriptivas para luego ser materializada, parte sin lugar a dudas, bajo una visión moderna de los procesos productivos, de la aspiración subyacente que los productos que se introducen al mercado pronto disfruten de un porcentaje más grande de este mercado y por lo tanto mayores de utilidades, lo cual nos lleva a dos premisas o principios básicos: (1) la comprensión de las funciones del producto y rendimiento esperado desde su producción y (2) el mercado del producto, por lo que sus usos anticipados deben ser definidos con claridad.

Por lo tanto, desde la concepción de la idea es imperativo conocer la naturaleza del entorno o medio en el cual se utilizará esta idea ya materializada, ya que el conocimiento de la naturaleza del medio permite definir el origen y tipo de solicitudes a las que se estará expuesto. Dentro de este sin fin de posibilidades, las exigencias de naturaleza mecánica tienen un peso específico importante en el diseño desde la fase conceptual hasta el dimensionamiento, por lo que se hace necesario conocer la respuesta de los materiales involucrados en el diseño a las solicitudes mecánicas externas.

Para lograr este objetivo, se cuenta con diversos métodos que permiten evaluar las propiedades mecánicas de los materiales involucrados. Dentro de estos ensayos, los más importantes son los siguientes:

2.1 Ensayo De Tracción Uniaxial.

Es comúnmente usado para obtener información básica acerca de la resistencia mecánica de los materiales. Durante la ejecución de este ensayo un espécimen es sometido a carga axial en aumento, a medida de lo cual se observa una elongación en la muestra ^[1]. Mediante esta prueba se pueden conocer propiedades que definirán de cierta manera el entorno al que puede estar sometido el material para futuras aplicaciones en cualquier diseño, ya que las mismas describen la dependencia de la resistencia mecánica del material, de las condiciones de deformación y su microestructura.

De este ensayo se obtiene una gráfica carga-desplazamiento y aplicando una serie de transformaciones a la misma finalmente se consiguen las curvas de esfuerzo-deformación, tanto ingenieril (Fig 2.1) como real. Para efectos de la aplicación de las teorías de falla se utilizan las propiedades mecánicas determinadas por la curva esfuerzo-deformación. En esta última podemos identificar el mayor esfuerzo que puede soportar el material siendo este capaz de desarrollar una proporcionalidad lineal entre esfuerzo y deformación, punto que se conoce como el límite de proporcionalidad del material.

Previo a dicho límite se cumple una relación lineal entre esfuerzo y deformación la cual viene definida por el módulo de elasticidad (E), constante que representa la pendiente de la línea recta trazada a través de los puntos de la curva esfuerzo-deformación, previa al límite de proporcionalidad. Una vez superado este punto encontramos el esfuerzo al cual el material sufre un alargamiento específico mayor a la deformación asociada con el límite elástico, dicho punto se conoce Esfuerzo de cedencia ó límite a la fluencia, a partir del cual el material comienza a deformarse elasto-plásticamente.

Al mayor esfuerzo registrado en la curva esfuerzo-deformación ingenieril se le denomina **resistencia a la tracción**, siendo necesario destacar que a partir de aquí no se cumple el criterio de la conservación de volumen ^[2]. El último punto que puede apreciarse en la gráfica es conocido como punto de ruptura, el cual no tiene aplicación ingenieril y puede ocurrir en cualquier momento luego de superada la carga máxima.

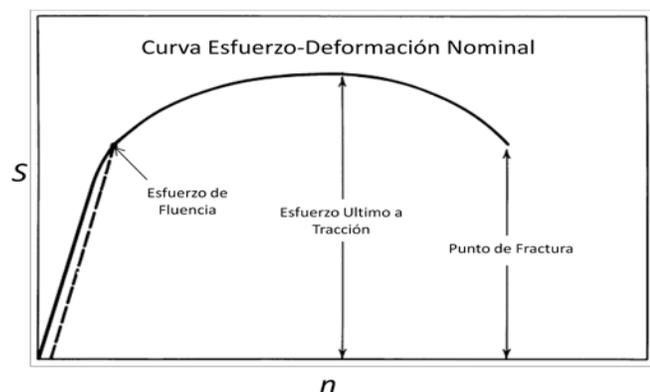


Figura 2. 1. Curva esfuerzo-deformación nominal obtenida en el ensayo de tracción.

La forma de la curva esfuerzo-deformación depende varios factores como son: la composición química del material, temperatura, deformación plástica previa, velocidad de deformación, tratamiento térmico, etc.

2.2 Ensayo De Torsión.

El ensayo de tracción permite determinar propiedades intrínsecas de los materiales. Sin embargo existen situaciones en las que la sollicitación del material dista mucho a las características de un ensayo de tracción. Es por esta razón que pruebas como el **ensayo de torsión** toma mucha importancia para conocer el comportamiento del material bajo esta situación ya que de esta prueba se obtienen propiedades como el módulo de corte elástico (G), siendo este la relación lineal entre el esfuerzo cortante y la deformación cortante asociada, en el régimen elástico de esta curva. Se pueden obtener también el esfuerzo de fluencia en corte, esfuerzo último en corte, módulo de ruptura en corte y ductilidad ^[3].

Durante la ejecución de este ensayo se aplica un momento torsor sobre el eje longitudinal de una barra de sección transversal circular. Esta prueba otorga información fundamental sobre las propiedades de los materiales sometidos a corte, y son principalmente usadas en el diseño de remaches, pernos, árboles y toda pieza que pueda estar sometida a cargas cortantes en su aplicación. La curva de este ensayo puede obtenerse por mediciones simultáneas del torque aplicado y el ángulo de giro de la probeta (Figura 2.2).

El ensayo de tracción presenta limitaciones al momento de estudiar deformaciones plásticas ya que la probeta sufre un encuellamiento antes de llegar a la ruptura, por lo que sólo se alcanzan deformaciones homogéneas relativamente pequeñas. En el ensayo de torsión, por otra parte, sí pueden aplicarse grandes deformaciones plásticas antes que ocurra la ruptura y tampoco existen complicaciones debido a la fricción entre el espécimen y las mordazas.

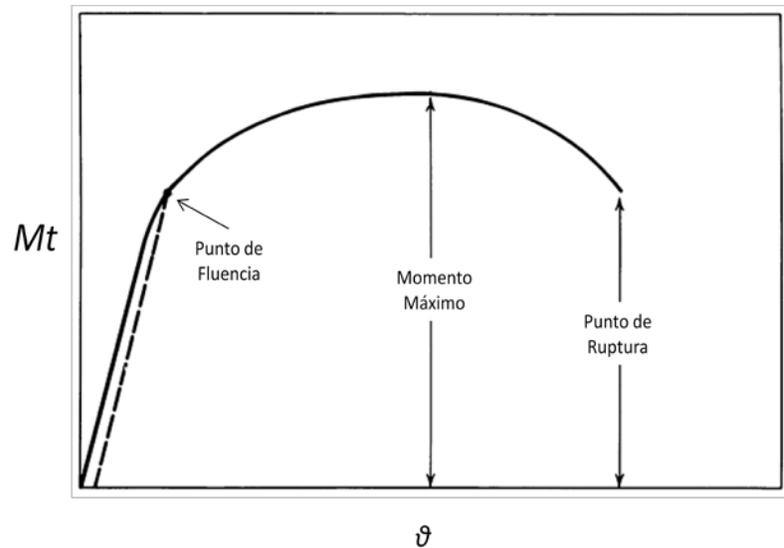


Figura 2. 2. Curva Momento torsor vs ángulo de giro en el ensayo de torsión.

Los parámetros derivados de los ensayos mecánicos también son utilizados para el diseño de procesos de conformado de metales y aleaciones. Dichos procesos permiten darle forma a los metales ya sea por doblado, corte, perforación, forja, extrusión y laminación, entre otros.

El análisis de los procesos de conformado de metales requiere del conocimiento del comportamiento del material en las condiciones en que estos se llevan a cabo. Independientemente de los valores de las propiedades determinadas por los ensayos mecánicos, estos crean texturas cristalográficas particulares en cada prueba. Dichas texturas pueden ser comparadas con las generadas en algunos procesos de conformado. Por esta razón ciertos ensayos mecánicos, además de arrojar información sobre las propiedades de los materiales, pueden ser simulativos de algunos procesos.

2.3 Ensayo De Compresión.

Las cargas de compresión son aplicadas a estructuras de diversas dimensiones, desde los grandes pilares de los puentes hasta las delgadas láminas de las alas de una aeronave. De allí la necesidad de establecer el comportamiento mecánico de los materiales ante estas condiciones mediante **ensayos de compresión**.

2.3.1 Ensayo de compresión axial.

Entre los ensayos de compresión podemos mencionar el **ensayo de compresión axial** que consiste en la aplicación de una carga distribuida, tanto en las superficies superiores como inferiores de los especímenes, los cuales pueden ser de sección transversal circular o rectangular. A pesar de que este ensayo es sumamente utilizado hoy en día, presenta varios inconvenientes durante su ejecución. Una de las principales limitaciones es la fricción que pueda existir entre la probeta y las superficies de la máquina que se encontrarán en contacto con la misma; este problema puede ser resuelto mediante una adecuada lubricación, obteniendo así la misma tensión de fluencia que los ensayos de tracción, con pequeñas deformaciones. Sin embargo, a medida que aumenta la deformación, la capa de lubricante disminuye restringiendo la expansión de la probeta en la zona que está en contacto con la máquina. Esta condición provoca un ensanchamiento en la zona media de la probeta, produciendo un estado de esfuerzo-deformación no uniforme. Éste fenómeno es conocido como **abarrilamiento** y es la razón por la cual este ensayo no admite grandes deformaciones ^[3].

Otro fenómeno que puede ocurrir en este ensayo es el pandeo de la muestra. Si éste se presenta, el esfuerzo calculado a partir de las cargas registradas en la prueba será incorrecto. Sin embargo, el riesgo de pandeo puede reducirse tomando una especial atención a la alineación del equipo, una correcta fabricación de la probeta como especifica la norma y tomando en consideración la fricción entre el espécimen y las superficies de la máquina con las que se encontrarán en contacto.

La fricción y la geometría del espécimen, pueden ser responsables de otras irregularidades que pudieran presentarse en el ensayo de compresión axial, como se muestra en la figura 2.3.

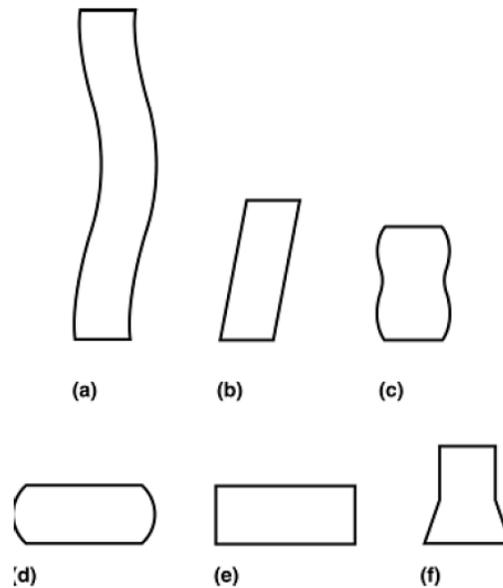


Figura 2. 3. Modos de deformación en el ensayo de compresión axial.

a) Pandeo, cuando $L/D > 5$, b) Cizallamiento cuando $L/D > 2,5$, c) Doble abarrilamiento, cuando $L/D > 2$ y hay fricción presente en los contactos de las superficies, d) Abarrilamiento, cuando $L/D < 2$ y hay fricción en el contacto de las superficies, e) Compresión homogénea, cuando $L/D < 2$ y no existe fricción, f) Inestabilidad en la compresión debido al ablandamiento por deformación del material.

2.3.2 Ensayo de compresión plana tipo Ford.

El proceso de laminación involucra grandes deformaciones debido a la aplicación de esfuerzos de compresión. Durante la ejecución de los procesos de laminación industrial, la deformación del material se realiza en varios pases, controlando los intervalos de tiempo entre ellas. Durante la ejecución del proceso la velocidad de deformación varía entre pases generando de esta forma una microestructura particular. De allí la necesidad de desarrollar un ensayo capaz de simular las condiciones de este proceso, con el fin de obtener la información necesaria para comprender el comportamiento del material bajo un estado de deformación plana en el régimen plástico. De esta forma, se pueden obtener experimentalmente parámetros del material, aplicables en las leyes que rigen el proceso de laminación.

El ensayo de compresión con deformación plana fue propuesto y puesto en marcha por primera vez por Orowan en 1943 como una modificación del ensayo de compresión axial,

pudiendo simular de esta forma el comportamiento de materiales sometidos a procesos de laminación. Watts y Ford en 1952 y 1955, respectivamente, usaron el ensayo de compresión plana para determinar el fuerza de fluencia de materiales a través de su compresión mediante dos placas paralelas completamente lisas^[4]. Mediante este ensayo se comprobó que la microestructura generada en materiales deformados en ensayos de compresión plana es muy similar a la desarrollada debido a la laminación, lo cual sugiere en principio que sería posible inferir el comportamiento del material durante este proceso de conformado a través de ensayos de esta naturaleza. A continuación se muestra un esquema del mismo (figura 2.4).

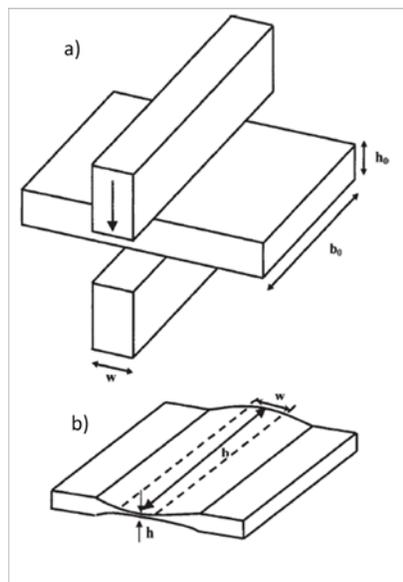


Figura 2. 4. a) Esquema del ensayo de compresión plana tipo Ford, b) esquema de la probeta luego de ser ensayada.

De modo que se puede afirmar que el ensayo de compresión plana, también conocido como ensayo tipo Ford, es una prueba de laboratorio que tiene por objetivo principal la determinación de la curva esfuerzo-deformación real de un material bajo condiciones de tasa de deformación y temperatura dados. Este ensayo arroja originalmente una relación entre la carga aplicada y el desplazamiento.

El ensayo de compresión plana tipo Ford presenta ventajas sobre otros ensayos, tales como el de tracción y compresión axial. Este puede ser utilizado para obtener

información a grandes deformaciones, ya que grandes volúmenes del material pueden ser deformados, lo cual es beneficioso para el estudio a nivel microestructural de un estado de deformación plana.

2.3.2.1 Estado de deformación plana.

Para analizar la deformación plástica en el material a ensayar se debe conocer en principio su estado de esfuerzo. En el ensayo de compresión plana, la probeta está sometida a tres componentes de esfuerzo y deformación perpendiculares entre sí. En la figura 2.5 observamos una representación de los mismos en un elemento de volumen de la probeta.

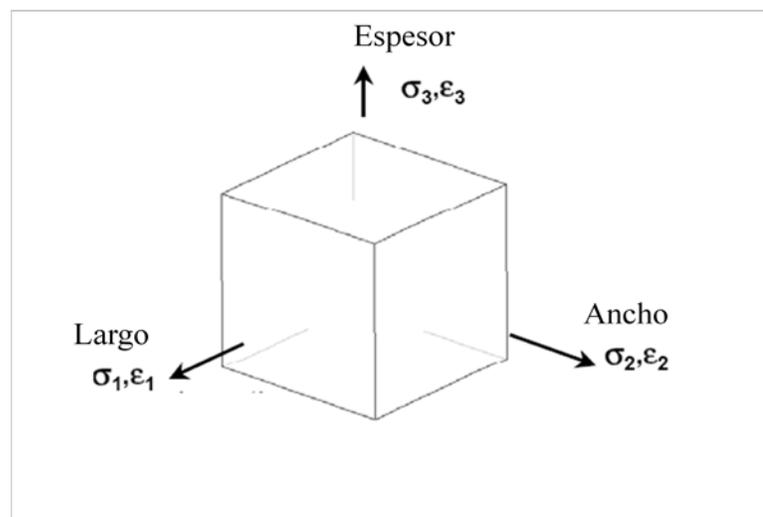


Figura 2. 5. Esquema de estado de deformación plana.

En el caso particular del ensayo de compresión plana, se busca que la deformación en la dirección 2 (ancho de la probeta) sea igual a 0. Aunque en la práctica ocurre un leve ensanchamiento, denominado “ensanchamiento lateral”, existen factores de corrección que aplicados a los datos arrojados por el ensayo, garantizan resultados característicos de un estado de deformación plana (deformaciones en el plano 1-3) ^[5].

El “ensanchamiento lateral” depende directamente del espesor y ancho de la muestra, así como del coeficiente de fricción. Resultados de simulaciones realizadas mediante análisis de elemento finito concluyeron que la propagación lateral disminuye con el aumento del ancho inicial. Sin embargo, este aumento acarrea un incremento en la carga

requerida para la ejecución del ensayo. El “ensanchamiento lateral” decrece con la disminución del espesor de la probeta, esto como resultado del aumento de limitaciones relacionadas con la fricción, de la misma manera que al aumentar el coeficiente de fricción en la zona de contacto, disminuye el “ensanchamiento lateral” [6]. Los gradientes de temperatura a través del ancho de la probeta no tienen efecto en la propagación lateral, ni en la curva esfuerzo-deformación, siempre y cuando esta variación no supere los 16°C [4]. A continuación se observa un dibujo esquemático del “ensanchamiento lateral” en la figura 2.6.

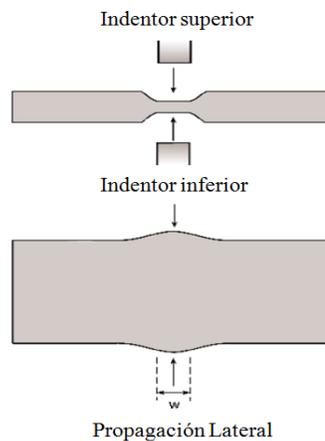


Figura 2. 6. Esquema de "ensanchamiento lateral".

La fricción es otro de factores que debe ser corregido al momento de reportar la relación esfuerzo-deformación. Experimentalmente se debe tratar que la misma sea lo más pequeña posible; que sea igual en ambos contactos espécimen-herramienta y que sea uniforme a lo largo del contacto de cada indentor con la probeta. Esta condición puede alcanzarse aplicando el lubricante uniformemente sobre las superficies involucradas en la compresión. El mismo no debe presentar afinidad química con los indentores o la probeta a la temperatura a la cual se realice el ensayo. [7]. Es necesario aclarar que este ensayo puede realizarse a diferentes temperaturas. Para efectos de simular el laminado en caliente, se hace necesario que la prueba se realice a temperaturas moderadas (500°C aproximadamente para aluminio).

2.3.2.2 Factores que afectan el estado de deformación plana.

Existen varios factores que pueden comprometer el estado de deformación plana deseado en este ensayo. Entre los que se encuentran:

- Temperatura no uniforme dentro del espécimen. Se pueden presentar gradientes de temperatura a través del espesor de la probeta o a través del ancho de la misma, debido al sistema de calentamiento empleado.
- Diferencia de temperatura entre el espécimen y los indentores.
- Desalineación de los indentores en la dirección de aplicación de carga.
- Diferentes condiciones de contacto entre las dos superficies de la probeta.

Cualquiera de estas condiciones puede crear una deformación distorsionada del espécimen, obteniendo formas en “U” o en “Z”. La segunda es más común.

Las diferencias de temperatura en el espécimen, debido a gradientes iniciales en la misma, o a la diferencia de temperatura entre ésta y las herramientas, producen una distorsión en la deformación de la probeta en forma de “U”. Cuando el gradiente de temperatura a lo largo del grosor de la probeta no supera los 12°C ^[4] no hay diferencia en la curva de esfuerzo-deformación obtenida, a la derivada de un ensayo con condiciones uniformes de temperatura. Sin embargo, estas condiciones deben ser tomadas en cuenta al momento de realizar un estudio microestructural de la muestra

Experimentalmente se ha podido concluir que la desalineación de los indentores en la dirección de aplicación de carga genera una deformación distorsionada en “Z” como se muestra en la figura 2.7. Sorprendentemente esta condición no afecta la curva obtenida de esfuerzo-deformación ^[7]. Sin embargo, si se desea realizar un estudio microestructural, la desalineación no puede exceder el 1% de w ^[4]. A pesar de no existir un valor máximo de

desalineación permitido se puede asegurar que si la muestra será comprimida con el fin de obtener bajas deformaciones, se puede tolerar una desalineación más grande a que se comprima la misma de forma tal que las superficies de los indentores queden muy cerca del contacto.

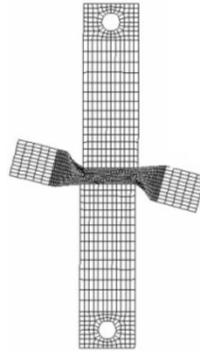


Figura 2. 7. Deformación en “Z” ocasionada por una desalineación de 1 mm. ^[7]

Por otra parte una lubricación no uniforme entre las superficies superior e inferior de los indentores y el espécimen, ocasiona una distorsión en la deformación en “U” como se observa en la figura 2.8; y cambiando la fricción a través del grosor de la herramienta ocasiona distorsión en “Z” (figura 2.9), pero de nuevo estas condiciones no afectan la curva esfuerzo-deformación, en comparación con un ensayo bajo condiciones uniformes de fricción. Sin embargo, aunque las curvas no varían de forma significativa, la microestructura de las muestras deformadas dista mucho de la de un espécimen ensayado bajo las condiciones ideales para el ensayo de compresión plana.

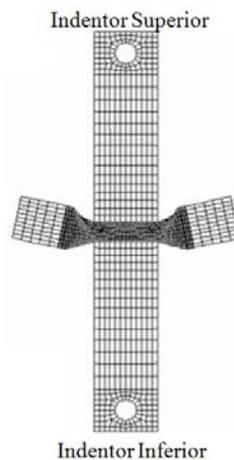


Figura 2. 8. Deformación en “U” debido a diferentes coeficientes de fricción en los contactos espécimen-herramienta.

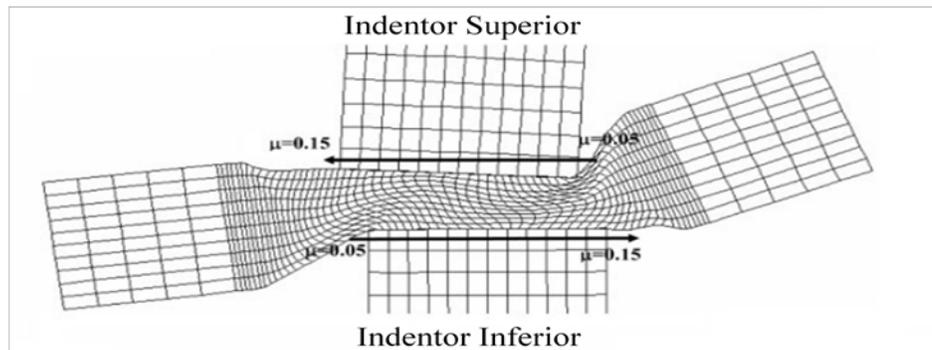


Figura 2. 9. Deformación en “Z” debido a la variación del coeficiente de fricción a través del grosor de la herramienta.

2.3.2.3 Cálculo de la deformación equivalente.

Como se mencionó anteriormente, de este ensayo se obtiene una relación entre carga aplicada vs desplazamiento, tal y como se muestra en la siguiente figura 2.10.

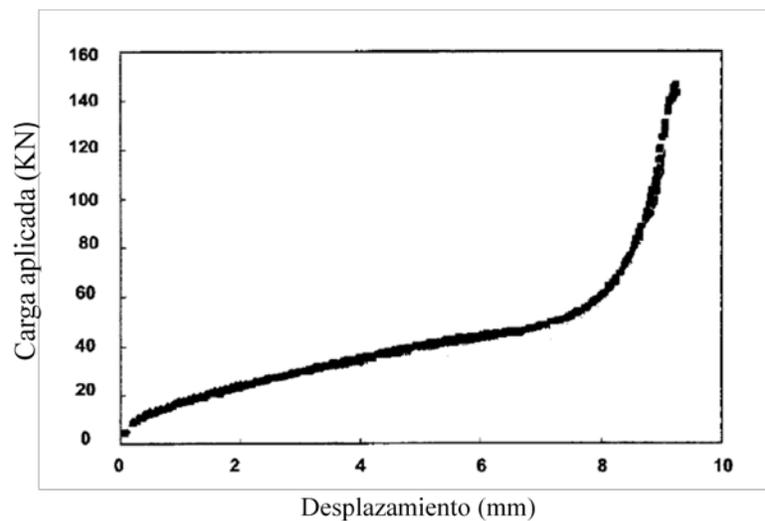


Figura 2. 10. Curva carga-desplazamiento, obtenida en el ensayo de compresión plana Ford.

Como se puede observar en esta curva no se hace apreciable las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente, como el límite de fluencia. Por esta razón es necesaria la construcción de la curva esfuerzo-deformación real, mediante una serie de procedimientos definidos, tomando en cuenta factores de corrección que garanticen que los resultados obtenidos son intrínsecos de un estado de deformación plana.

Para obtener la deformación equivalente de acuerdo al criterio de von Mises ($\bar{\epsilon}$), es necesaria la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} [(\epsilon_2^2 + \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 + \epsilon_3^2)^{1/2}] \quad (2.1)$$

Donde:

$$\epsilon_2 = \ln \left(\frac{b}{b_0} \right) \quad (2.2)$$

$$\epsilon_3 = \ln \left(\frac{h}{h_0} \right) \quad (2.3)$$

Sin embargo, con el fin de establecer un estado de deformación plano se desea que $\epsilon_2 = 0$. Por esta razón se incluye un factor de corrección en el cuál se considera el efecto de la propagación lateral, resultando la siguiente expresión:

$$\bar{\epsilon} = -f \cdot \epsilon_3 \quad (2.4)$$

Donde f puede obtenerse de la siguiente manera:

$$f = 1,155 - 0,155 \cdot \frac{b}{w} \quad (2.5)$$

W se refiere al ancho de la herramienta, y b se puede definir como el ancho instantáneo de la probeta debido a la propagación lateral.

$$b = b_0 \left[1 + C - C \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\bar{n}} \right] \quad (2.6)$$

En esta expresión h es el grosor instantáneo de la probeta, obtenida como el grosor inicial menos el desplazamiento que registra la máquina.

El valor \bar{n} , se conoce como el exponente de ensanchamiento, y depende del material a ensayar. Experimentalmente se ha determinado que para aleaciones de aluminio el exponente de ensanchamiento idóneo es de 0,18.

La constante C se conoce como coeficiente de ensanchamiento, y se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{(b_f/b_0)-1}{1-(h_f/h_0)^n} \quad (2.7)$$

Finalmente se puede obtener la deformación equivalente establecido en la expresión (2.4).

2.3.2.4 Cálculo del esfuerzo equivalente.

Como se mencionó anteriormente, de este ensayo se obtiene una curva carga aplicada vs desplazamiento. Para obtener la relación esfuerzo-deformación es necesario aplicar las siguientes operaciones.

Primero debe calcularse la presión instantánea. Éste término viene dado por la siguiente expresión:

$$\bar{p} = \frac{F}{w \cdot b} \quad (2.8)$$

Donde F es la carga aplicada. El término w es el ancho del indentor, y finalmente b es el ancho instantáneo de la probeta.

Seguido al cálculo de \bar{p} debe calcularse el factor 2K de la siguiente manera.

$$\frac{\bar{p}}{2K} = \frac{h}{\mu w} \left[\exp \left[\frac{\mu w}{h} \right] - 1 \right] \quad (2.9)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción, el cual debe ser obtenido experimentalmente ensayando muestras de espesores diferentes.

Finalmente se puede calcular el esfuerzo equivalente con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{2K}{f} \quad (2.10)$$

Donde f es el factor de corrección explicado anteriormente en el cálculo de la deformación equivalente y expresado en la ecuación (2.5).

2.4 Aluminios Navales.

Una vez explicado el ensayo de compresión plana tipo Ford, se hace necesario hacer una introducción al material a ensayar. Algunas aleaciones de aluminio son comúnmente usadas en aplicaciones navales, tal es el caso de las aleaciones de la serie 5xxx. El componente principal de esta aleación es el magnesio, variando su contenido desde un 0,5 hasta 6% en peso. En esta serie se pueden tener aleaciones que van desde los 110 a 310 MPa de resistencia a la tracción y un esfuerzo de fluencia de 40 a 160 MPa ^[11].

Las aleaciones aluminio-magnesio combinan una alta resistencia con una buena conformabilidad, maquinabilidad y facilidad para ser soldado. Además de estas propiedades, las aleaciones de aluminio de la serie 5xxx son altamente resistentes a la corrosión, por lo que el mantenimiento de estructuras hechas con estos materiales, contra ataques corrosivos o biológicos es mucho menor. Esta condición permite crear diseños de embarcaciones a la mitad del peso, en comparación con diseños similares hechos en acero.

El módulo de elasticidad relativamente bajo de estas aleaciones ofrece ciertas ventajas. Doblar un casco en aluminio ocasiona menos esfuerzo en el material, que al realizar la misma operación en acero. Por esta razón, se pueden tener extensiones continuas amplias de la estructura en aluminio sin utilizar juntas de expansión ^[12].

También esta serie es empleada en el fuselaje, flotadores y otras partes de hidroaviones. Además, pueden emplearse en tanques de combustible y lubricantes.

2.4.1 Composición química de la serie 5XXX

A continuación se muestra una tabla con la composición química general de las aleaciones de la serie 5xxx ^[8]:

Tabla 2. 1. Composición química de la serie 5XXX.

Elemento	%
Fe	Hasta 0,8%
Mg	Hasta 6%
Si	Hasta 1%
Mn	Hasta 2%
Cr	Hasta 0,35%
Cu	Hasta 0,3%
Ni	Hasta 0,05%
Zn	Hasta 3%
Ti	Hasta 0,2%
Be	Hasta 0,01%

2.5 Coeficiente De Fricción.

Tal y como se ha mencionado hasta ahora la fricción es un factor que puede influir de forma directa en la correcta obtención de resultados. Ahora bien, es de suma importancia tener en cuenta que al momento de la ejecución de procesos industriales, específicamente de operaciones de procesamiento de metales, las fuerzas de fricción en el contacto matriz-pieza contribuyen significativamente en las características de la deformación. Además, cuando el coeficiente de fricción es mayor, la carga necesaria para alcanzar una deformación específica también aumentará.

Por otra parte, en los ensayos de compresión plana tipo Ford es necesario realizar una correcta selección del lubricante a utilizar ya que esto influiría directamente en la reducción de las fuerzas de fricción, lo que a su vez repercutiría en una disminución de la carga necesaria para llevar a cabo el ensayo y ayudaría a evitar todos los inconvenientes que se han venido mencionando durante el desarrollo de este capítulo ^[9].

Ciertos sólidos, particularmente el grafito y el disulfuro de molibdeno, ofrecen poco rozamiento hasta temperaturas elevadas ^[10].

En el caso de los ensayos de compresión plana en aleaciones de aluminio realizados a temperaturas del orden de 300°-500°C, generalmente como lubricante se utiliza una mezcla de grasa a base de grafito y disulfuro de molibdeno.

El valor de coeficiente de fricción puede ser determinado siguiendo los pasos que se presentan a continuación:

- Elaborar graficas de presión media (\bar{p}) en función de la deformación equivalente ($\bar{\epsilon}$) para probetas con diferentes espesores.
- Para cada grafica fijar aproximadamente seis valores de deformación equivalente ($\bar{\epsilon}$), por ejemplo: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2. Posteriormente se debe determinar el valor de presión media (\bar{p}) correspondiente a cada deformación.
- Elaborar graficas con los valores de presión media (\bar{p}) obtenidos anteriormente en función de la relación ancho de probeta entre espesor de probeta a $\bar{\epsilon}$ constantes. El cálculo de las pendientes de estas rectas corresponden a un valor proporcional de los distintos μ .
- Los valores obtenidos mediante el cálculo de las pendientes tal y como se mencionó en el paso anterior se utilizan para construir la grafica de μ en función de la deformación equivalente. Calculando el área bajo esta curva y dividiendo por el intervalo de deformación escogido, se puede determinar el valor promedio de μ .

CAPÍTULO III-
METODOLOGÍA DEL DISEÑO

El proceso de diseño consiste en crear y seleccionar los componentes y sistemas para el desarrollo de soluciones a una o más necesidades. En el caso específico de la ingeniería mecánica, corresponde al desarrollo de componentes de naturaleza mecánica como: piezas, estructuras, dispositivos, mecanismos y diversos instrumentos ^[14]. Para lograr este objetivo se requiere del conocimiento de las ciencias, estudios de los materiales aplicados a la ingeniería, que deben ir de la mano con la creatividad del diseñador, considerando las implicaciones y limitaciones propias del diseño en cuestión.

La metodología del diseño establece una serie de pasos a seguir para alcanzar la solución de un problema. En general este proceso consta de las siguientes fases ^[15]:

- Establecimiento de una necesidad.
- Diseño conceptual
- Análisis de las propuestas.
- Diseño de detalles.
- Fabricación y especificaciones.

3.1 Establecimiento de una necesidad.

El desarrollo tecnológico mundial avanza a una velocidad vertiginosa, por lo que Venezuela no puede permanecer al margen de esta realidad. En la actualidad nuestro país atraviesa graves problemas, muchos de los cuales radican en la dependencia de tecnología foránea en diferentes ámbitos de la economía productiva. Entre ellos podemos nombrar la construcción de embarcaciones marítimas, las cuales son requeridas en diversas áreas de interés nacional, tales como la pesquera, petrolera y turística entre otras; así como también existe una gran necesidad por parte del sector militar de la ampliación, a menores costos, de su flota de navegación.

Debido a lo antes mencionado el Estado Venezolano, con el apoyo de la Fundación Instituto de Ingeniería, ha decidido desarrollar un proyecto de mediano plazo, tendiente a diseñar los programas de laminación en frío y en caliente de materiales utilizados (aceros y aleaciones de aluminio) en la fabricación de naves en el país.

En este sentido, la Fundación Instituto de Ingeniería llevará a cabo un estudio sobre el proceso de laminación en caliente de aceros y aluminios navales, específicamente

dirigido al diseño de los pases conducentes a los espesores requeridos para estas aplicaciones.

Ahora bien, es sumamente importante tener en cuenta que para la realización de dicho proceso de conformado deben ser conocidas las relaciones constitutivas de los materiales, las cuales describen la resistencia mecánica de los mismos en función de la deformación aplicada, tasa y temperatura de deformación durante el proceso laminado, así como de su microestructura.

3.1.1 Planteamiento del problema

Sabiendo que durante un proceso de laminación de chapas, éstas se encuentran sometidas a un estado de deformación plana, se desea construir un dispositivo para la realización de ensayos de compresión plana tipo Ford, capaz de operar hasta temperaturas del orden de 500°C.

3.2 Diseño Conceptual

Una vez establecida la necesidad, se procede a la concepción de múltiples ideas capaces de dar solución al problema previamente planteado.

3.2.1 Propuestas para el diseño de los indentores:

Las herramientas que harán contacto con el espécimen durante la compresión se denominan indentores. El diseño de los mismos deben cumplir con los requerimientos propios del ensayo de compresión plana mencionados anteriormente, además de restricciones de espacio y adaptabilidad.

Debido a que el ensayo se realizará dentro del horno, los indentores deben tener una longitud suficiente para ser introducido en el mismo y comprimir la probeta. Deben tener una sección transversal rectangular cuyas dimensiones cumplan los requerimientos de la Good Practice Guide ^[4], anteriormente citados.

A continuación se describen 2 dos de las propuestas más relevantes:

3.2.1.1 Propuesta N° 1.

Este primer diseño consistía en una única pieza, tal y como se puede observar en la figura 3.1, la parte superior es un disco con dos agujeros diametralmente opuestos, a través de los cuales pasan los tornillos que fijan la pieza al resto del equipo (Figura 3.2). El resto de la pieza, es una barra rectangular que presenta un cambio de sección hasta alcanzar las dimensiones calculadas para la zona de contacto con la probeta.

Como se ha comentado anteriormente, la probeta es colocada en la posición de ensayo por un mecanismo de transporte, el cual debe ser diseñado para colocar el espécimen de una forma completamente horizontal y con la zona de prueba alineada verticalmente con el resto del equipo. En un principio, se consideró la posibilidad de agregar guías a los costados del indector (Figura 3.3) para así garantizar la buena colocación de este sistema, y por ende el correcto posicionamiento de la probeta, esta idea fue descartada debido a que las entallas necesarias para elaboración de la guías, habrían ocasionado concentradores de esfuerzos que pudiesen comprometer la integridad de la pieza durante el ensayo.



Figura 3. 1. Indector primera propuesta

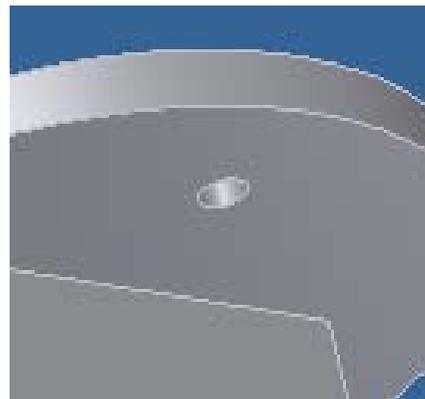


Figura 3. 2. Agujeros para unión, Propuesta 1

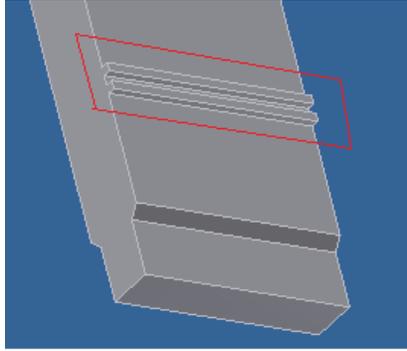


Figura 3. 3. Guías para alineación en el indenter (propuesta 1).

En la figura 3.4, que se presenta a continuación, se puede apreciar una columna, cuya función es la de garantizar la alineación con el resto del equipo.

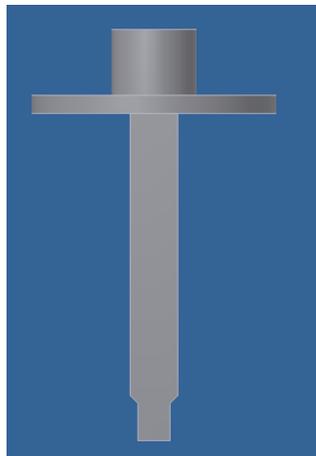


Figura 3. 4. Columna para alineación de la propuesta 1 del indenter.

3.2.1.2 Propuesta N°2.

Este modelo constaba de dos piezas, la primera un asiento de sección transversal circular con tres agujeros, los primeros dos ubicados en posiciones diametralmente opuestas mediante los cuales se uniría a la base refrigerada del dispositivo por medio de tornillos, el tercer agujero estaría ubicado en la cavidad presente en el centro del disco y serviría para la sujeción del indenter a esta pieza (Figura 3.5). en la parte superior de este asiento se encuentra un cilindro destinado a garantizar la alineación del indenter respecto al resto del equipo (Figura 3.5).

La segunda parte de este diseño, es una estructura de sección transversal rectangular, la cual será colocada en la cavidad anteriormente nombrada y unida mediante

un tornillo Allen (Figura 3.6). Esta pieza además presenta un agujero en su parte inferior en el cual será colocada una resistencia eléctrica denominada cartucho (Figura 3.6), el cual será utilizado para el calentamiento del indenter de forma conjunta con el horno. Todo esto tiene por finalidad lograr una temperatura uniforme entre la probeta y las herramientas.

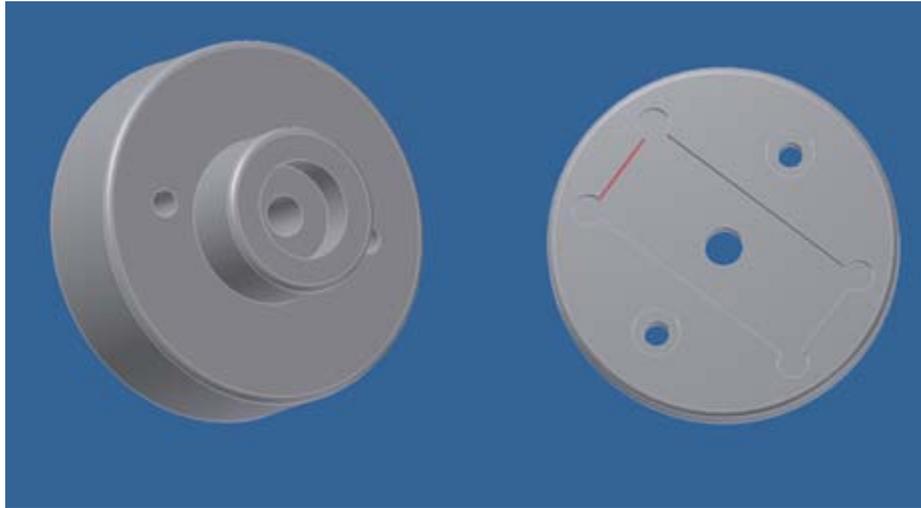


Figura 3. 5. Vista superior e inferior del disco del indenter, respectivamente.

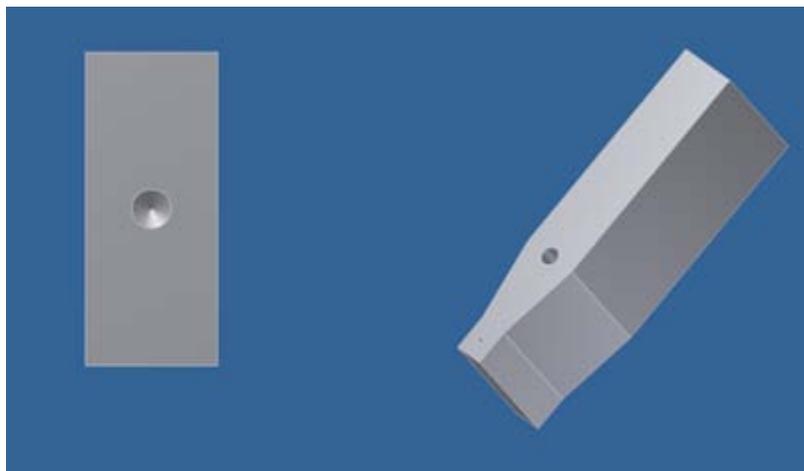


Figura 3. 6. Vistas del indenter (propuesta 2).

El ensamble de esta propuesta se presenta a continuación en la figura 3.7.

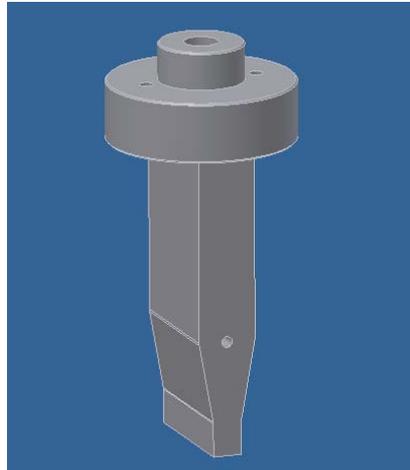


Figura 3. 7. Ensamble propuesta 2 para el diseño del indentor.

3.2.2 Propuestas para el diseño de las bases refrigeradas.

La máquina de universal de ensayos mecánicos marca Shimadzu, cuenta con un dispositivo denominado “celda de carga”. Este componente se encarga de la lectura de la fuerza aplicada durante la prueba, por lo que es vital para obtener información en los numerosos ensayos que se realizan en este equipo. Por especificaciones del fabricante, la información que suministra la “celda de carga” no es fiable cuando se encuentra a temperaturas mayores de 35°C. Considerando que la temperatura en el horno, y por lo tanto de los indentores, será de 500 °C aproximadamente, fue necesario el diseño de una pieza que además de ser capaz de soportar las cargas, pudiera disminuir la transferencia de calor hacia la “celda de carga” y el resto de la máquina universal de ensayos.

La idea general para esta base refrigerada sería una pieza rígida por la cual se introduciría un refrigerante por el extremo más cercano a las fuentes generadoras de calor, y saldría por el extremo más alejado. De esta forma se garantiza que la zona con mayor temperatura del equipo estaría en contacto con el fluido recién refrigerado.

3.2.2.1 Propuesta N° 1.

Este bosquejo presenta una sección transversal circular, las paredes de la parte superior se diseñaron con el fin de resistir las cargas que se manejarían durante el ensayo, las mismas presentan dos agujeros diametralmente opuestos. El primero, ubicado en la parte superior (figura 3.8), será utilizado como desagüe del fluido de intercambio. El

segundo, se encuentra en la parte inferior (figura 3.8), mediante éste se dará acceso al refrigerante.

En la parte central del modelo será perforada una cavidad, destinada a aumentar el área de transferencia, lo cual permitirá extraer el calor proveniente de la zona inferior de la pieza que está en contacto con el indentor, el cual es el elemento que presenta la mayor temperatura en el dispositivo, por encontrarse en contacto directo con las fuentes generadoras de calor. El cambio de sección que tiene lugar en este diseño obedece fundamentalmente a la disminución del peso de la pieza, sin que esto comprometa la resistencia del elemento a las cargas requeridas por el ensayo.

Por otra parte, la hermeticidad del dispositivo sería garantizada gracias a la colocación de la tapa que se observa en la figura 3.9, la misma sería asegurada mediante la acción de seis tornillos, y presenta una columna destinada a garantizar la alineación de la pieza.

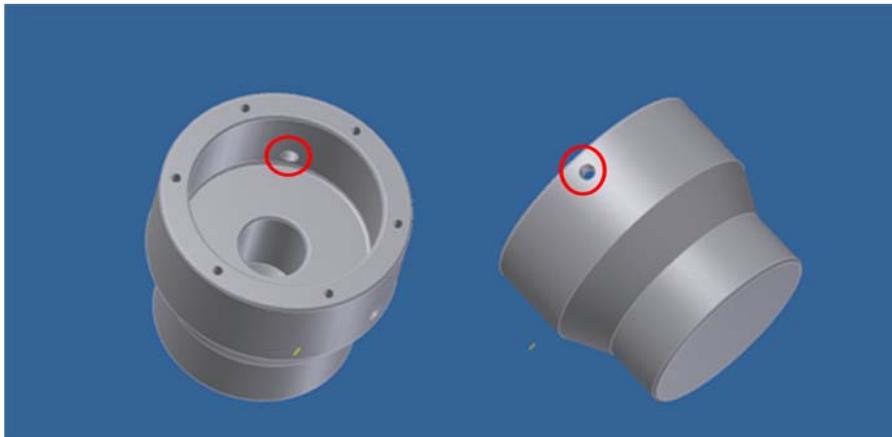


Figura 3. 8. Agujeros de entrada y desagüe del refrigerante, base refrigerada propuesta 1.

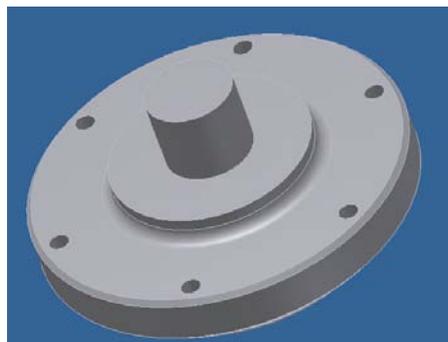


Figura 3. 9. Tapa de base refrigerada, propuesta 1.

A continuación se presenta el ensamble de esta propuesta (Figura 3.10):

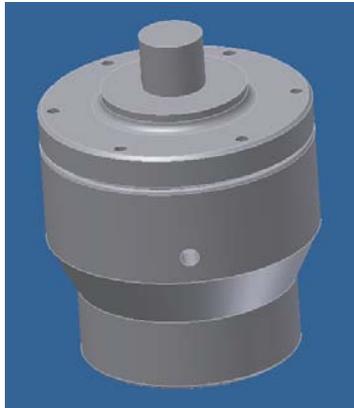


Figura 3. 10. Ensamble de la propuesta 1 de la base refrigerada.

Tabla 3. 1. Ficha técnica de la propuesta 1 de la base refrigerada.

FICHA TÉCNICA	
PESO [Kg]	14,57
ALTURA [mm]	185
ÁREA DE TRANSFERENCIA [mm^2]	30650

3.2.2.2 Propuesta N° 2:

Este modelo se fundamenta en una pieza de sección transversal circular, en el centro del mismo se puede apreciar una columna (figura 3.11), destinada a cumplir dos funciones fundamentales, la primera otorgar rigidez al sistema ya que se encontraría en contacto con la tapa del diseño y la segunda aumentar el área de transferencia de calor. Con el fin de disminuir el peso del conjunto, en la pieza tendría lugar un cambio de sección, además se deberían mecanizar ranuras a los costados de las paredes, removiendo así una mayor cantidad de material.

El fluido de refrigeración, ingresaría en el dispositivo a través de un agujero ubicado en la parte inferior de la base tal y como se aprecia en la figura 3.12, el desagüe tendría lugar a través de otra cavidad presente en la parte superior (figura 3.13).

En la figura 3.14, se pueden observar los agujeros en los cuales se insertarían los tornillos destinados a sujetar el indentador.

La tapa presenta una sección transversal circular con una columna mediante la cual será sujeta al acople y además tendrá por finalidad garantizar la alineación de la base con la máquina universal de ensayos mecánicos (Figura 3.15). Además, en su parte inferior, estaría ubicado un cilindro (figura 3.15), el cual se encontraría en contacto con la columna presente en la parte central de la base con el fin de aumentar la rigidez del sistema, tal y como se mencionó anteriormente. La misma se uniría a la base mediante el uso de pernos.

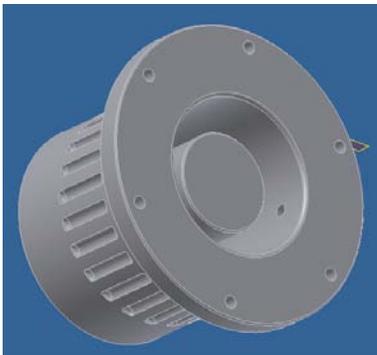


Figura 3.11. Vista Superior de la base refrigerada, propuesta 2.



Figura 3.12. Agujero de entrada del refrigerante, propuesta 2.



Figura 3.13. Agujero de desagüe del refrigerante, propuesta 2.

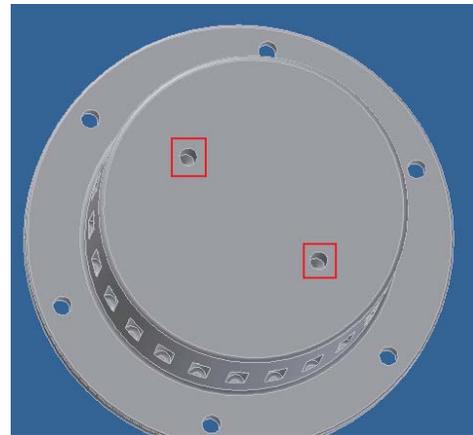


Figura 3.14. Agujeros para fijar indentor a la base, propuesta 2.

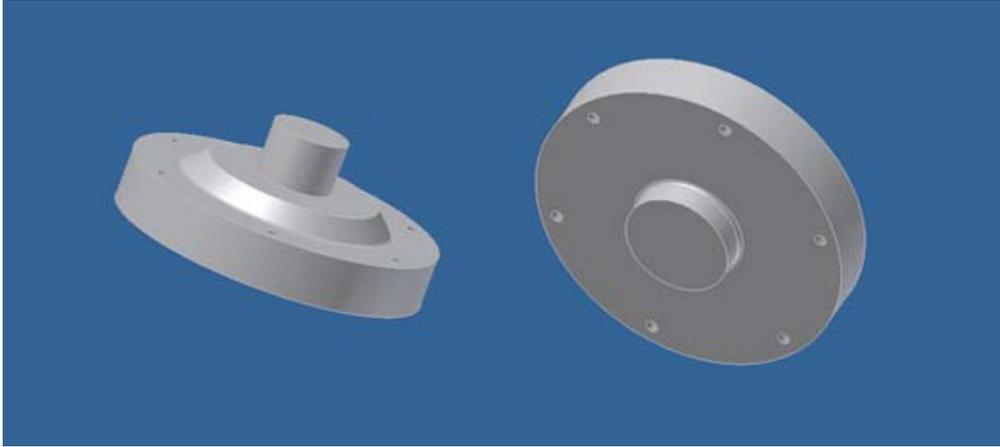


Figura 3. 15. Vistas superior e inferior de la tapa de la base refrigerada (propuesta 2).

A continuación se muestra el ensamble de las piezas anteriores (Figura 3.16):



Figura 3. 16. Ensamble de la propuesta 2 para la base refrigerada.

Tabla 3. 2. Ficha técnica de la propuesta 2 de la base refrigerada.

FICHA TÉCNICA	
PESO [Kg]	16,31
ALTURA [mm]	157
ÁREA DE TRANSFERENCIA [mm^2]	41547

3.2.2.3 Propuesta N° 3.

Esta opción estaría formada por dos piezas. En la figura 3.17 se aprecia la primera de ellas, la cual presenta una sección transversal circular, la misma tiene una columna que permite garantizar la alineación de los mecanismos. De igual forma en la zona inferior existe una cavidad (figura 3.17), cuya función es la correcta alineación del indentor.

Con el fin de aumentar el área de transferencia de calor y facilitar el manejo del caudal de refrigeración, sería mecanizada una ranura a lo largo de la columna (Figura 3.18).

La entalla que puede observarse en la porción superior tiene como objetivo servir de asiento para un O-ring, que garantice la estanqueidad del fluido (Figura 3.19).

La segunda pieza es una camisa que se colocaría a presión sobre el elemento antes descrito. Ambas piezas estarán unidas por 6 tornillos, además de la fuerza de fricción que otorga el ajuste. La camisa presentará dos perforaciones destinadas al paso del fluido refrigerante, bajo el mismo esquema de ubicación presentado en los diseños anteriores (Figura 3.20).

Por otra parte, el indentor se unirá a esta pieza por medio de tornillos. En la figura 3.21 podemos observar los agujeros por donde pasarán los mismos.

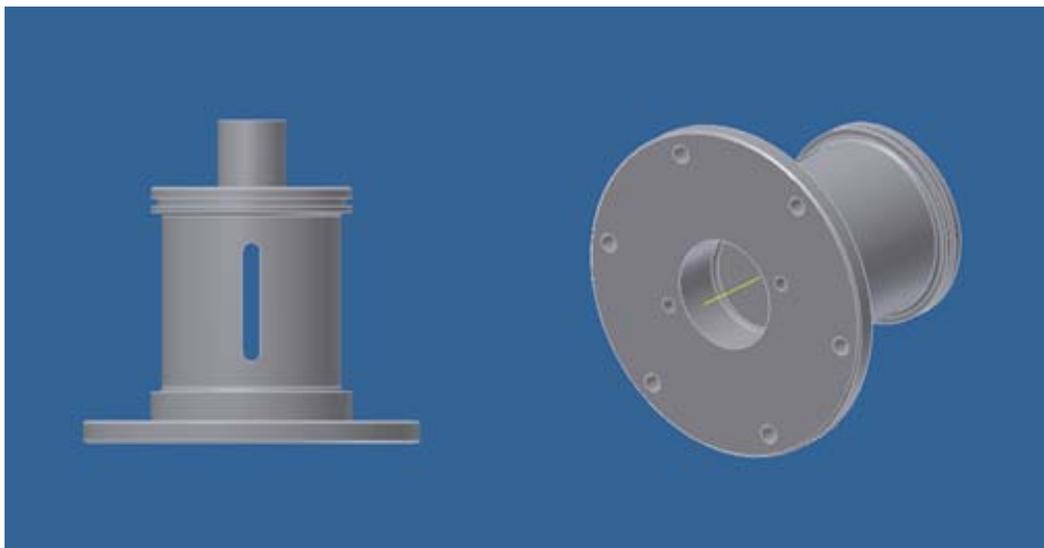


Figura 3. 17. Vista superior e inferior de la propuesta 3 para la base refrigerada.

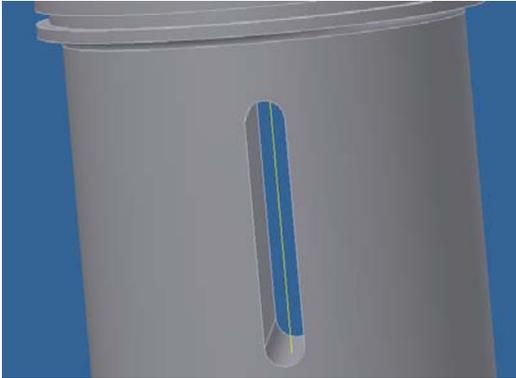


Figura 3. 18. Ranura para la refrigeración.

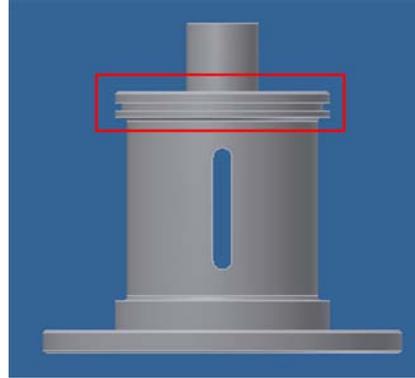


Figura 3. 19. Entalla para O-ring.

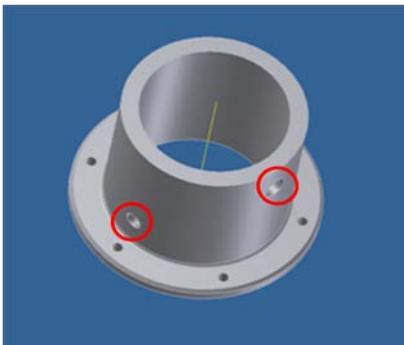


Figura 3. 20. Agujeros de entrada y desagüe del refrigerante, propuesta 3.

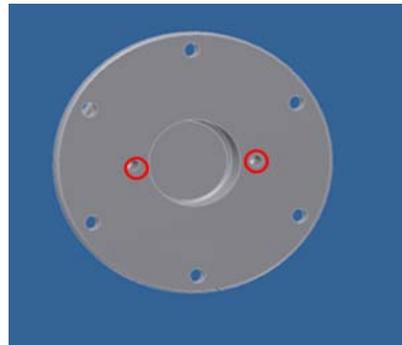


Figura 3. 21. Agujeros para la colocación del indenter, propuesta 3.

El ensamble de esta propuesta se presenta a continuación (Figura 3.22):

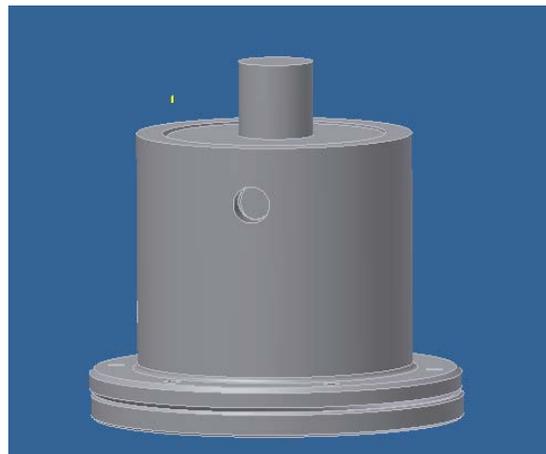


Figura 3. 22. Ensamble de la propuesta 3 para la base refrigerada.

Tabla 3. 3. Ficha técnica de la propuesta 3 de la base refrigerada.

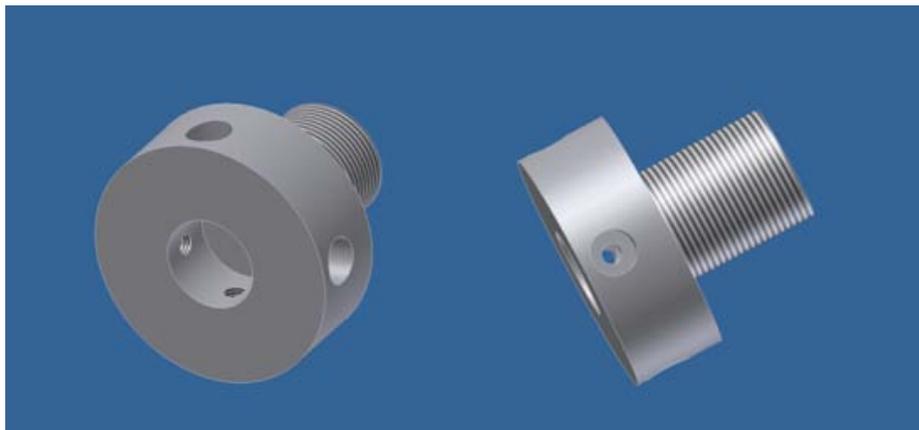
FICHA TÉCNICA	
PESO [Kg]	8,69
ALTURA [mm]	145
ÁREA DE TRANSFERENCIA [mm^2]	27500

3.2.3 Propuesta para el diseño del acople.

Es importante aclarar que el acople del que dispone la máquina de ensayos no sería capaz de soportar las cargas que se manejarían durante la ejecución de la prueba; es por ello, que nos vimos en la obligación de diseñar un método de sujeción lo suficientemente rígido y que además permitiera garantizar la perfecta alineación de los indentores con respecto a la máquina universal de ensayos mecánicos.

Este acople consiste en una pieza de sección transversal circular. En el extremo de mayor diámetro presenta una perforación donde se acoplará y fijará la base refrigerada mediante 4 tornillos prisioneros dispuestos cada 90 grados. (Figura 3.23).

En el otro extremo, el acople presenta una rosca de pulgada y media de diámetro y de 12 hilos por pulgada mediante la cual se unirá a la máquina universal de ensayos mecánicos (Figura 3.23).

**Figura 3. 23.** Acople.

Para esta pieza sólo se presentó una propuesta, ya que el diseño se basó en el sistema de sujeción comúnmente usado en ensayos de tracción y compresión tipo canal, llevados a cabo en la máquina universal de ensayos modelo Shimadzu AG-IS 250 KN presente en el Instituto de Ingeniería.

3.2.4 Propuestas para el diseño del mecanismo de transporte.

Debido a las altas temperaturas que se manejarán durante la ejecución del ensayo, se hace imperativo el uso de un mecanismo capaz de trasladar la probeta desde el horno de precalentamiento al de ensayo, y de esta manera, se podrá evitar que la persona encargada de la ejecución de la prueba entre en contacto con los elementos calientes.

Es necesario aclarar, que los hornos se encontrarán dispuestos a 90° entre sí, por lo que el dispositivo deberá rotar y permitir el avance del espécimen hacia el interior de los hornos. Para ello, la idea general consiste en la utilización de dos placas ambas de sección transversal circular. La primera de mayor diámetro, fija a un chasis cuya función sería la de vincular el mecanismo de transporte a la máquina universal de ensayos en una posición determinada, dicha pieza debe garantizar que cada vez que se acople el dispositivo este no varíe su posición y comprometa la colocación de la probeta durante el ensayo. La segunda placa, sería colocada sobre la anterior, y tendría la posibilidad de rotar con respecto a esta última. Sobre la placa móvil se colocará un sistema que permita el movimiento de avance de la probeta.

Al momento de colocar el espécimen, se debe tener en cuenta las siguientes condiciones:

- Paralelismo entre las superficies de la muestra a ensayar y las caras de los indentores que aplicarán la carga al espécimen.
- La entrada de la probeta debe ser completamente perpendicular a la puerta del horno de ensayo.
- Toda el área de estudio debe estar en contacto con las herramientas.

Además de las variables anteriores, fue necesario tomar en cuenta otras condicionantes durante el desarrollo de los diseños. Un ejemplo claro de ello, es que el elemento que soporta a la probeta debe permitir el flujo de material hacia los lados, debido a la compresión y conservación de volumen en el espécimen. También el dispositivo debe

admitir un leve desplazamiento vertical, sin sufrir deformaciones permanentes, al momento en que el indentor superior entre en contacto con la probeta, y la comprima contra la herramienta inferior.

Por otra parte, también sería necesario colocar la puerta del horno, de forma tal de minimizar las pérdidas de calor en los mismos.

3.2.4.1 Propuesta N° 1.

Tal y como se mencionó anteriormente este diseño cuenta con dos placas, unidas por un tornillo que permite la rotación entre ellas. En la base móvil serían mecanizadas dos colas de milano, con la intención de servir de guías para el avance de la probeta, como se puede apreciar en la figura 3.24.

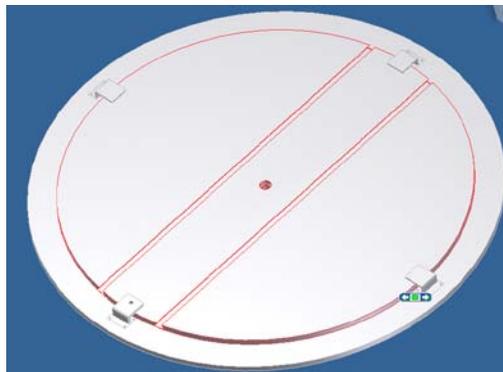


Figura 3. 24. Colas de milano para permitir el avance, en la propuesta 1 del mecanismo de transporte.

Sobre estas guías, sería colocado un bloque capaz de realizar el movimiento de avance, gracias a la acción de un tubo roscado, mediante el cual la persona encargada de llevar a cabo la prueba ejercerá el empuje necesario. Del otro lado este bloque presenta dos agujeros roscados, donde se insertarán dos tubos que soportarán el sistema de agarre de la probeta (Figura 3.25). En la figura 3.26 se muestra el bloque acoplado a las bases antes descritas.

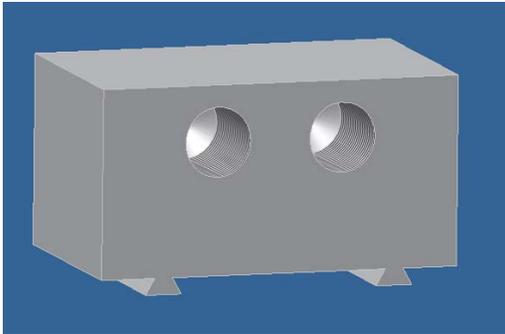


Figura 3. 25. Bloque móvil en la propuesta 1 mecanismo de transporte.

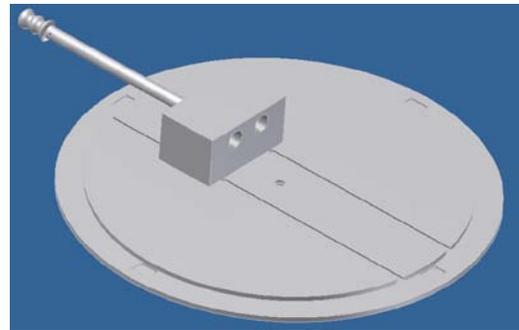


Figura 3. 26. Bloque móvil colocado en el del mecanismo de transporte (prop. 1).

La posición final en la carrera del bloque será definida mediante la colocación de otro bloque sujeto a la mesa gracias a la acción de un tornillo prisionero (Figura 3.27). En la figura 3.28 se observa el tope acoplado al resto del equipo.

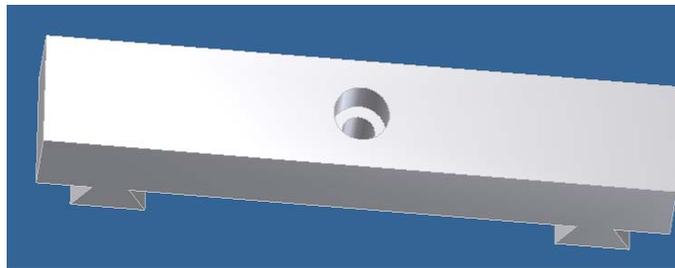


Figura 3. 27. Bloque que define la posición final.

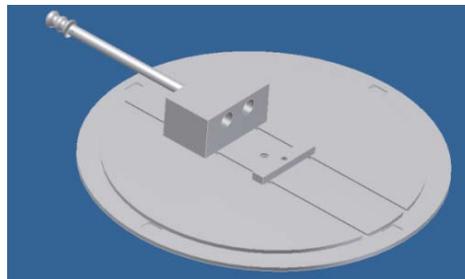


Figura 3. 28. Bloque acoplado al resto del equipo.

Como se dijo anteriormente, dos guías se unirían al bloque móvil. En el extremo de estas, existiría un segundo bloque de menor dimensión, sobre el cual se colocaría el conjunto de agarre de la probeta (figura 3.29). En dicho sistema serían mecanizados agujeros con la finalidad de insertar en ellos tornillos para fijarlo a este segundo bloque (Figura 3.30). Además, de lo anterior en el centro del mismo sería soldada una sección a la

cual se sujetaría un resorte con el fin de garantizar el paralelismo entre las barras de soporte.

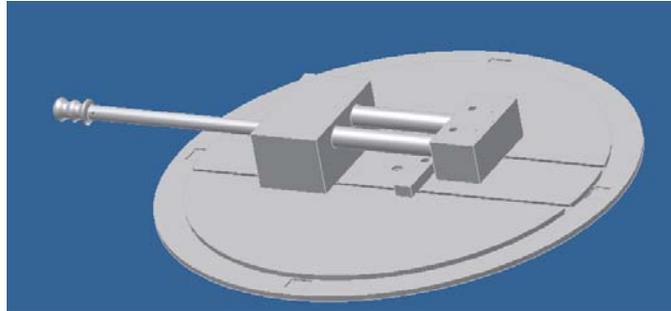


Figura 3. 29. Bloque sobre el cual se colocará el conjunto de agarre de la probeta.

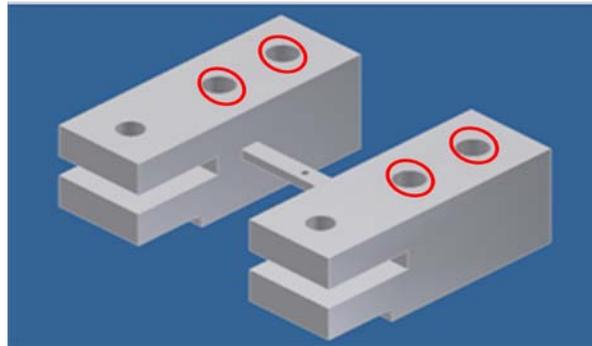


Figura 3. 30. Sistema de sujeción de las tenazas, propuesta 1 del mecanismo de transporte.

Las barras destinadas a funcionar de soporte a las probetas serán de sección transversal rectangular Figura 3.31, en el extremo que ingresará en los hornos se encontrarán dos pines roscados, los mismos tendrán por función la sujeción del espécimen. En su parte media se encontrarían dos juegos de placas verticales soldadas, las cuales se encargarían de posicionar la puerta del horno, a fin de aminorar las pérdidas de calor.

Además, las barras contarían con agujeros mediante los cuales se sujetaría un sistema en forma de “Y”, tal y como se muestra en la figura 3.32, conformado por tres varillas conectadas a un resorte, este mecanismo garantizaría el paralelismo entre las barras como se observa en la figura 3.33.

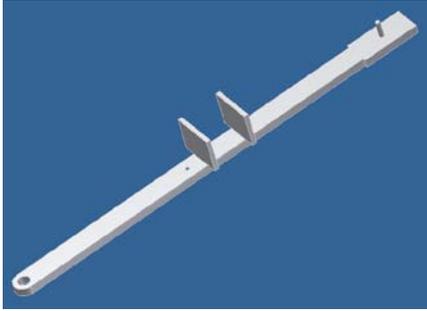


Figura 3.31. Tenaza para soporte de la probeta, propuesta 1.



Figura 3.32. Sistema en Forma de "Y".

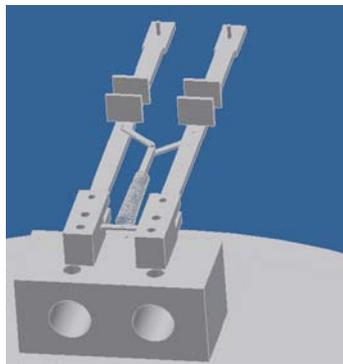


Figura 3.33. Montaje del Sistema en forma de "Y" para garantizar el paralelismo de las tenazas.

A continuación se presenta el ensamble de las piezas anteriormente descritas en la figura 3.34.

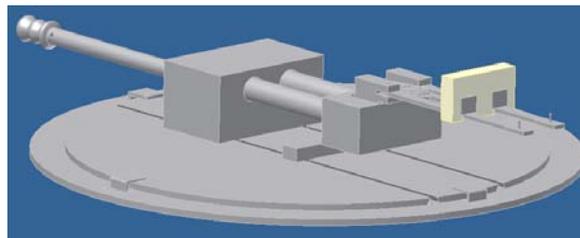


Figura 3.34. Ensamble de la propuesta 1 del mecanismo de transporte.

3.2.4.2 Propuesta N° 2.

Al igual que en el caso anterior este sistema consiste de un asiento fijo sobre el cual se apoyará una base rotatoria asegurada al primero mediante el uso de un tornillo central (figura 3.35), el cual sería capaz de permitir el giro de una chapa con respecto a la otra,

asegurando así alcanzar la correcta colocación de la probeta durante la elaboración del ensayo.

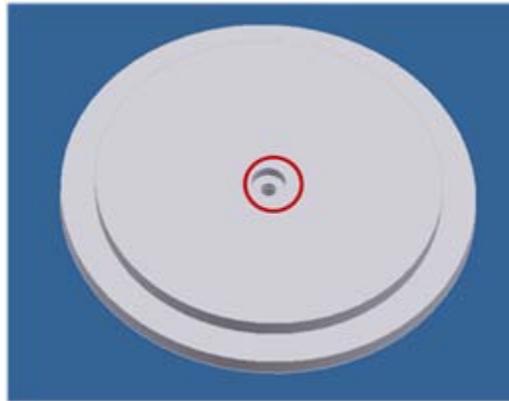


Figura 3. 35. Agujero para tornillo de sujeción de chapa móvil, propuesta 2 del mecanismo de transporte.

A diferencia del dispositivo anterior, los ejes calibrados serían móviles mientras que el bloque encargado de sostener los mismos permanecería en una misma posición, éste se sujetaría a la chapa giratoria mediante el uso de tornillos (figura 3.36).

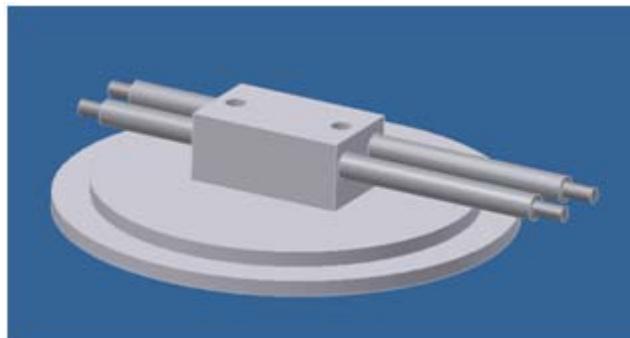


Figura 3. 36. Ejes calibrados colocados en el boque fijo (propuesta 2).

El movimiento del dispositivo se realizaría mediante una barra desmontable, sujeta por el operador, la misma sería conectada a una placa colocada en los ejes calibrados gracias a la acción de tuercas (Figura 3.37). La posibilidad de desmontar esta pieza tiene por objeto prevenir el calentamiento excesivo de la parte que se encuentre en contacto con la mano del operario, y además los ejes calibrados serían sometidos a menores cargas garantizando así una mayor vida útil y una menor probabilidad de sufrir deflexión (Figura 3.38).

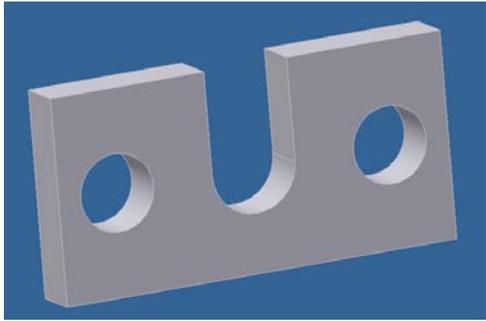


Figura 3. 37. Placa para la colocación de la barra desmontable, propuesta 2.

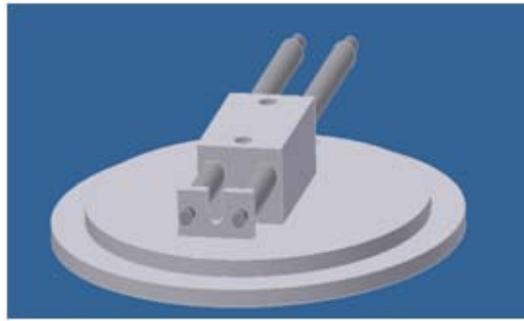


Figura 3. 38. Montaje de la placa para la barra desmontable, propuesta 2

En el extremo de los ejes más cercano a los hornos sería colocada la base que soportaría los brazos encargados de ingresar la probeta a los equipos de calentamiento. Este asiento sería unido a los ejes mediante el uso de tuercas, facilitando el montaje y desmontaje para la ejecución de mantenimientos preventivos o correctivos según sea el caso.

En el centro de la base se maquinaría una cavidad con el fin de colocar una chapa capaz de garantizar la alineación de los brazos, gracias al uso de resortes adecuadamente colocados, el uso de “pines” para este fin sería indispensable. Por otra parte, los soportes se unirían a la base mediante el uso de pernos de sujeción que permitirían la rotación relativa entre estas dos piezas (Figura 3.39).

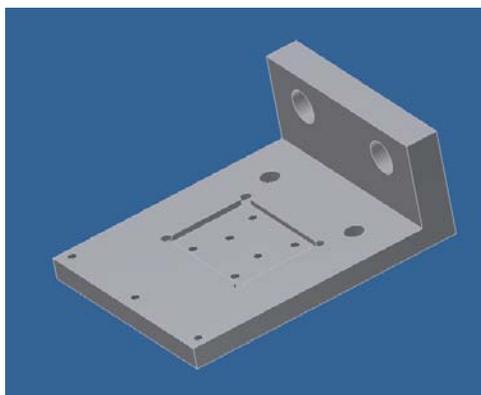


Figura 3. 39. Base que soportará los brazos encargados de sujetar la probeta, propuesta 2 del mecanismo de transporte.

Al igual que el diseño anterior, este mecanismo transportaría también una puerta para reducir las pérdidas de calor, bien sea en el horno de precalentamiento o en el de ensayo (Figura 3.40). En esta propuesta la puerta sería sujeta mediante el uso de tres pines roscados, y no mediante placas soldadas como en el boceto anterior (Figura 3.41).

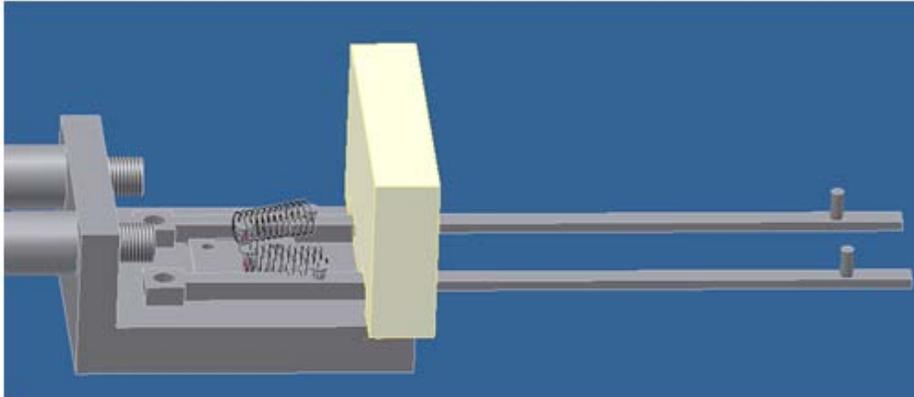


Figura 3. 40. Montaje de la puerta del horno sobre la base destinada al soporte de los brazos de sujeción, propuesta 2 del mecanismo de transporte.

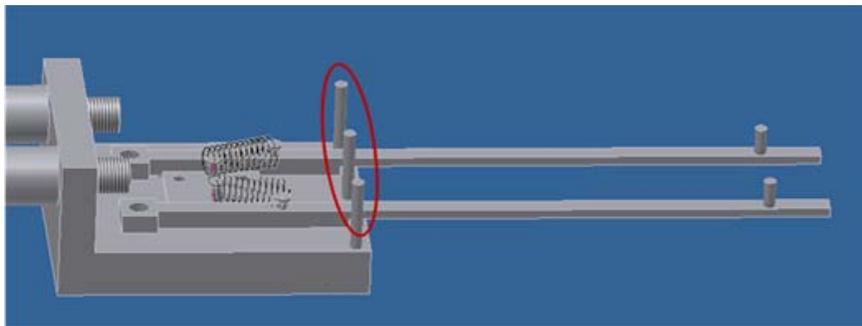


Figura 3. 41. Pines destinados a sujetar la puerta del horno, propuesta 2 del mecanismo de transporte.

A continuación se puede observar el ensamble de la propuesta número 3.42:

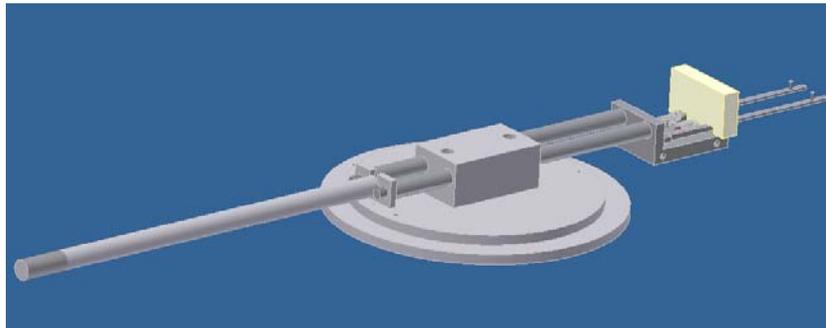


Figura 3. 42. Ensamble de la propuesta 2 del mecanismo de transporte.

3.2.4.3 Propuesta N° 3.

El principio básico del funcionamiento de esta propuesta es similar al de los modelos anteriores, ya que consta de dos chapas circulares, con la capacidad de rotar una respecto a la otra (Figura 3.43). Por otro lado, el mecanismo que permita el avance de la probeta hasta su posición final para realizar el ensayo.

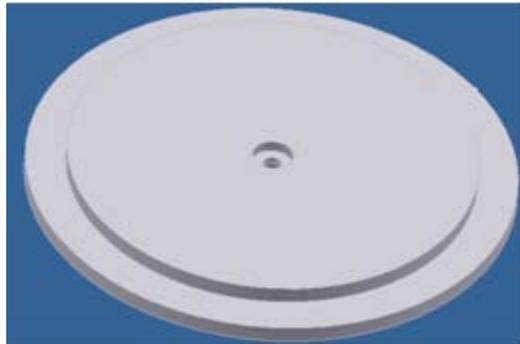


Figura 3. 43. Chapas circulares.

En este caso los ejes calibrados se encontrarían fijos a unos bloques que cumplirían la función de sujetadores, los cuales a su vez estarían unidos a la chapa móvil gracias al uso de tornillos (Figura 3.44).

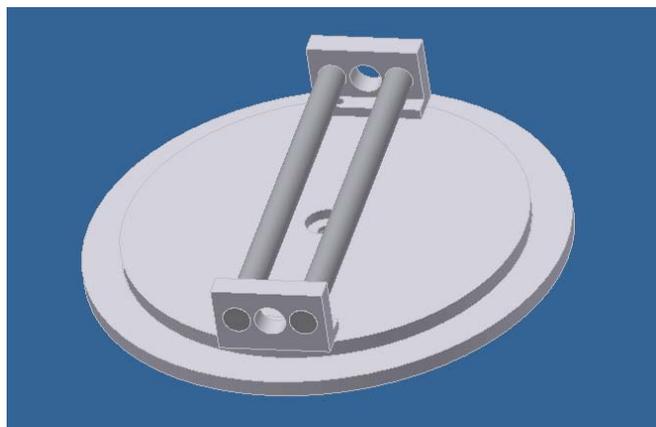


Figura 3. 44. Montaje de ejes calibrados, propuesta 3 del mecanismo de transporte.

El agujero central que se puede observar en estos bloques tiene como finalidad servir de guía a la barra, mediante la cual, el operador podrá mover el dispositivo (Figura

3.45). La misma se muestra a continuación, ensamblada con el resto del equipo descrito hasta ahora (Figura 3.46).

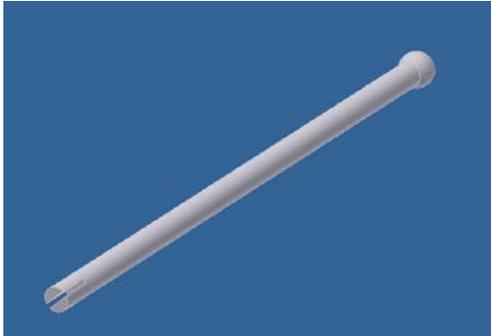


Figura 3. 45. Barra mediante la cual se podrá mover el mecanismo.

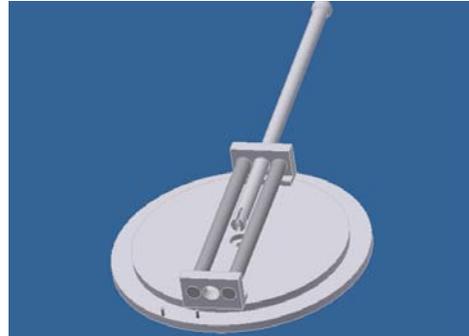


Figura 3. 46. Montaje de la barra.

En las imágenes anteriores se puede observar una entalla al final de la barra, esta tiene por objeto permitir la unión al bloque móvil sobre el cual se colocará el sistema de agarre de la probeta. La unión de estas dos piezas se realizaría a través de la colocación de una oreja en la que se insertaría un perno. Este bloque móvil presenta una serie de perforaciones en la parte superior (figura 3.47), destinadas a la colocación de tornillos, que permitan la unión del sistema de soporte de la probeta con el resto del mecanismo de transporte. El ensamble del bloque móvil se muestra en la figura 3.48.

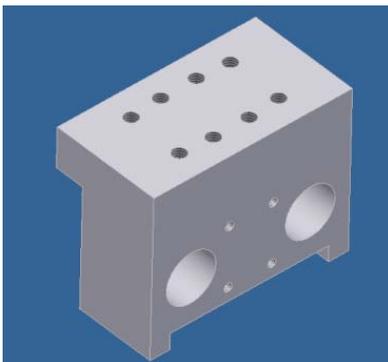


Figura 3. 47. Bloque móvil, propuesta 3.

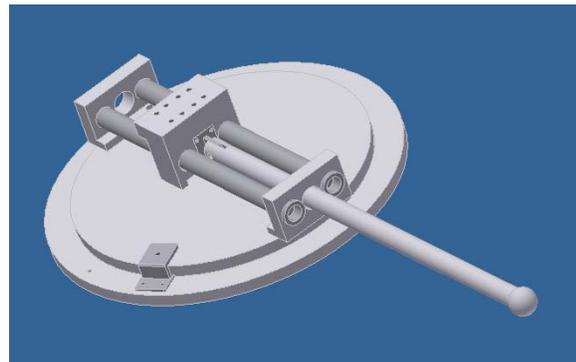


Figura 3. 48. Montaje de bloque móvil, propuesta 3.

Sobre elemento mostrado anteriormente serían colocados bloques a los cuales se unirían las barras sobre las que descansaría la probeta. Éstos contarían con agujeros en los que se insertaría tornillos para ser fijado al bloque móvil (Figura 3.49).

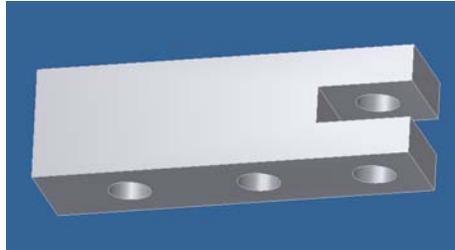


Figura 3. 49. Sistema de sujeción de las tenazas, propuesta 3 del mecanismo de transporte.

Los brazos sobre los que descansaría la probeta se encontrarían unidos a las piezas anteriores mediante el uso de tornillos (Figura 3.50). En este modelo, tanto la puerta del horno como el espécimen, serían sujetados mediante “pines” roscados en las barras.

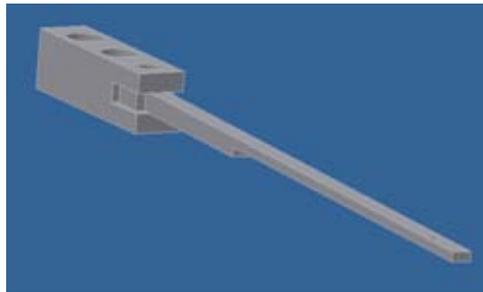


Figura 3. 50. Unión de la tenaza con la pieza destinada a su sujeción, propuesta 3 mecanismo de transporte.

El ensamble de este modelo se puede apreciar a continuación en la figura 3.51.

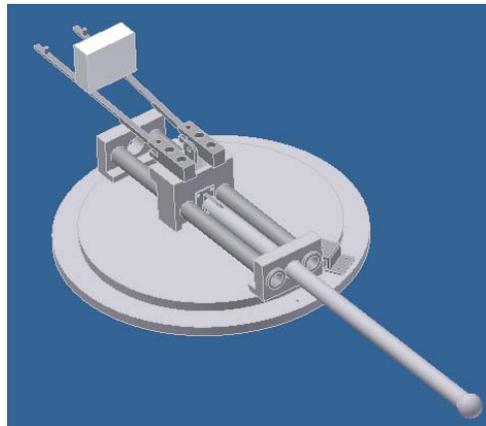


Figura 3. 51. Ensamble de la propuesta 3 del mecanismo de transporte.

3.2.5 Propuesta para el diseño del chasis.

En vista que el equipo de ensayos mecánicos a ser utilizado no posee una plataforma donde apoyar el mecanismo de transporte, nos vimos en la obligación de diseñar una estructura, la cual será denominada chasis. Ésta además, deberá cumplir la función de acoplarse a la máquina, de forma tal que siempre se tenga una posición particular con respecto a la misma, sin importar que el equipo de ensayos mecánicos sea reubicado.

Es necesario recordar que el correcto posicionamiento de la probeta depende de la posición relativa entre la máquina universal de ensayos mecánicos y el dispositivo de transporte, por lo que sería recomendable que el chasis encargado de soportar este último sea capaz de permanecer inmóvil durante la ejecución del ensayo, de allí la importancia de garantizar un anclaje rígido a la máquina.

El diseño que se presentó consta de dos partes. La primera consiste en una placa cuadrada horizontal, de aluminio, apoyada sobre dos soportes. Estos últimos, constan de dos barras, del mismo material, de sección cuadrada soldados en ángulo (Figura 3.52), con la finalidad de distribuir mejor el peso hacia la parte delantera del chasis, donde se encontrará la segunda parte de la estructura, formada por dos apoyos o patas (Figura 3.53), las cuales estarán vinculadas mediante tornillos a una estructura que presenta la máquina universal de ensayos, tal como se muestra en la figura 3.54.

La unión entre ambas partes será regulable, es decir, la persona encargada del ensayo podrá ajustar y fijar la posición vertical del chasis mediante la acción de dos tornillos prisioneros, como se muestra en la figura 3.55 con el ensamble del chasis.



Figura 3. 52. Estructura del chasis.

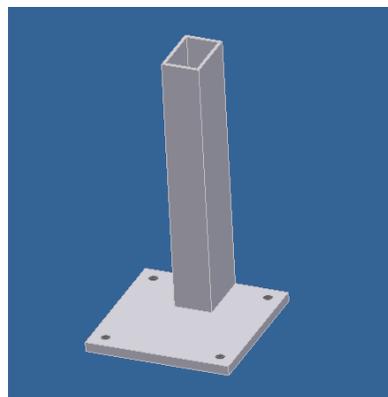


Figura 3. 53. Patas para el chasis.



Figura 3. 54. Imagen de las patas de la máquina universal de ensayos.

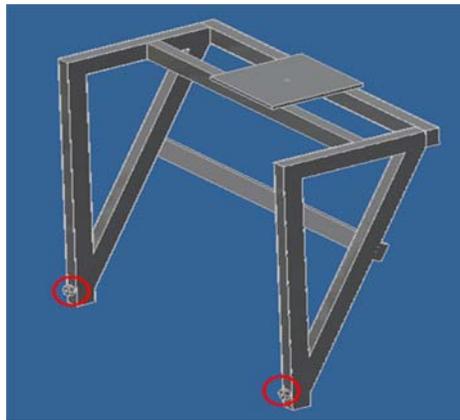


Figura 3. 55. Agujeros para los tornillos prisioneros en chasis.

3.2.6 Pieza de Alineación

Como se ha mencionado anteriormente, la probeta será transportada del horno de precalentamiento al de ensayo por un mecanismo de transporte recién descrito. Es de suma importancia que este dispositivo coloque a la probeta en una posición determinada, que cumpla con las siguientes características:

- Paralelismo entre las superficies de la muestra a ensayar y las caras de los indentores que aplicarán la carga al espécimen.
- La entrada de la probeta debe ser completamente perpendicular a la puerta del horno de ensayo.
- Toda el área de estudio debe estar en contacto con las herramientas.

En fin podemos concluir que para alcanzar la colocación adecuada para el ensayo de compresión plana, es necesario que la posición final del mecanismo de transporte garantice la alineación de ambos indentores con la zona de ensayo.

Por esta razón se diseñó una pieza capaz de simular la zona de ensayo de la probeta, con el fin de usarla para alinear los elementos anteriormente descritos. Esta pieza debe asegurar que si los indentores están alineados con ella, también lo estarán con la probeta durante el ensayo. A continuación se presentaran las propuestas más relevantes para esta pieza de alineación.

3.2.6.1 Propuesta N°1:

Consiste en una placa de sección rectangular, con el mismo ancho y largo de la probeta, donde se maquinarián dos ranuras sobre las cuales se presentarían los indentores. Las mismas simularán la zona de ensayo en el espécimen, por lo tanto al alinear ambos indentores con éstas y ajustar los tornillos prisioneros del acople, se garantizaría que durante el ensayo ambos indentores estarán alineados con la zona de ensayo.

Como el indentor inferior se encontraría por debajo del mecanismo de transporte, esta pieza de alineación deberá presentar un nivel, el cual permita que al realizar el movimiento de avance con el mecanismo de transporte, dicho indentor entre en la funda de la pieza de alineación sin ningún inconveniente cuando se encuentre perfectamente posicionado. Para alinear el indentor superior este deberá descender manipulando la máquina universal de ensayos y entrará en la ranura superior cuando se encuentre alineado (Figura 3.56).

Por último, esta pieza se sujetaría al mecanismo de transporte por dos agujeros en los que penetrarían dos pines, los mismos usados para el montaje de la probeta.

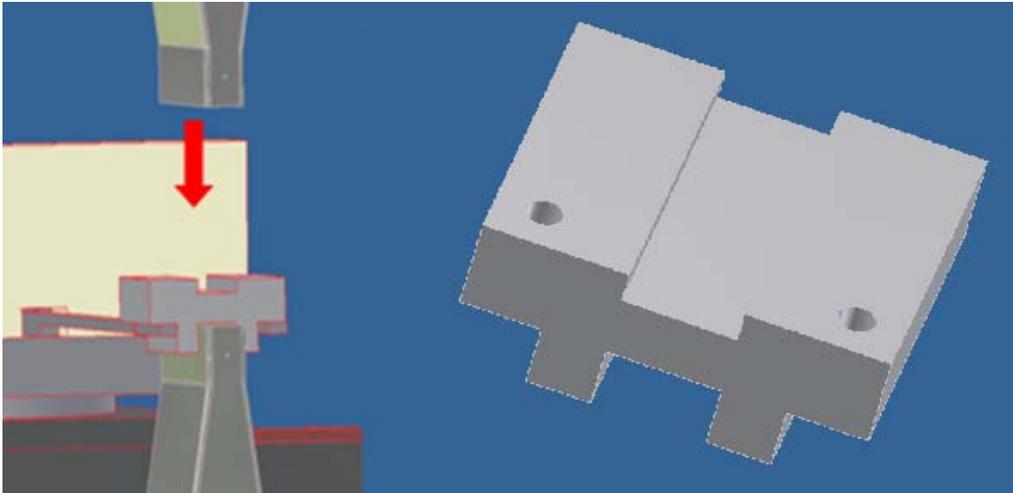


Figura 3. 56. Montaje de la primera propuesta para la pieza de alineación.

3.2.6.2 Propuesta N°2.

Consiste en una pieza de sección transversal en forma de “U”, la cual sería sujeta en los pines destinados para el montaje de la probeta. Al igual que en la propuesta anterior, la forma en “U” busca simular la zona de ensayo en la probeta, y su función es la de alinear los indentores haciendo contacto en 3 de sus cuatro caras. Por otro lado, en su parte inferior, la funda en forma de “U” permitiría la correcta colocación del otro indentor, garantizando que ambas herramientas estén alineadas con la zona de ensayo.

Una vez que ambos indentores penetren en la funda, se puede proceder a apretar los tornillos del acople. De esta manera estaremos garantizando que los indentores estarán alineados con la zona de ensayo de la probeta, una vez que el mecanismo de transporte alcance su posición final.

A continuación en la figura 3.57, se muestra un esquema de los indentores alineados mediante el uso de esta pieza.

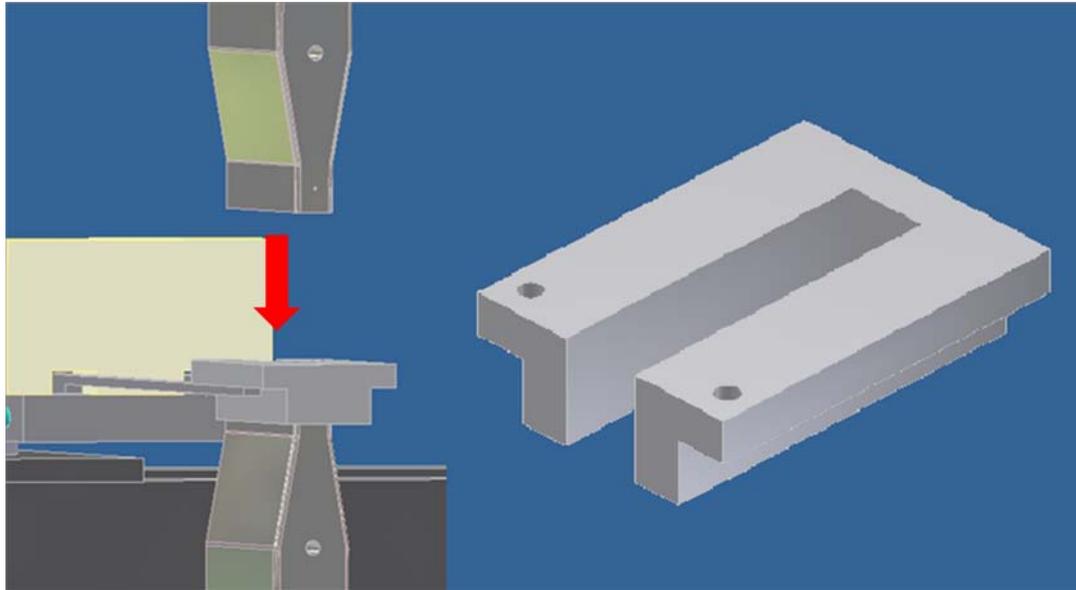


Figura 3. 57. Montaje de la segunda propuesta para la pieza de alineación.

3.3 Análisis de las Propuestas.

Habiendo finalizado el proceso de diseño de los diversos dispositivos y obtenido posibles soluciones para el problema planteado, es necesaria la evaluación de las mismas con base en parámetros que permitan la comparación entre ellas, con el fin de seleccionar la solución más óptima.

Para ello, es importante la selección de los parámetros a evaluar, además de la determinación de la importancia de cada uno de ellos. Una vez hecho esto, se procede a evaluar y comparar las opciones gracias a la preparación de una matriz de decisión, la cual permitirá la selección objetiva de la propuesta que mejor se ajuste a los requerimientos del ensayo.

3.3.1 Parámetros a evaluar.

Es necesario aclarar que cada una de las piezas del dispositivo de compresión plana (acople, base refrigerada, indentor) deben ser ensambladas antes del inicio de la prueba. A continuación, se instalará el chasis donde se apoya el dispositivo de transporte. Luego de alinear perfectamente los indentores será colocado en posición el horno de ensayo.

La ejecución del ensayo constará de varias etapas, en la primera de ellas, la probeta deberá ser colocada sobre los pines de sujeción, para posteriormente, ser introducida en el horno de precalentamiento hasta que la misma alcance la temperatura requerida. Una vez

cumplido este paso, el espécimen deberá ser trasladado a un segundo horno, denominado de ensayo, mediante el mecanismo de transporte. Luego de alcanzar la posición final y las condiciones térmicas deseadas se procederá al ensayo de compresión y al registro de resultados.

Luego de describir a grandes rasgos el proceder del ensayo de compresión plana tipo Ford, se pueden identificar las variables que funcionarán de parámetros para comparar y seleccionar las distintas propuestas, obteniendo así el diseño final que mejor se adapte a las condiciones del ensayo.

- **PESO:** Es preciso recordar que el dispositivo de compresión plana será acoplado a la máquina universal de ensayos mecánicos del Instituto de Ingeniería. Estos equipos cuentan con dispositivos muy precisos para registrar fuerzas, además de una construcción capaz de garantizar la axialidad en la aplicación de carga. De modo que mientras más componentes adicionales se coloquen en la máquina, se corre el riesgo de comprometer los resultados del ensayo e incluso la integridad del equipo, debido a las deformaciones elásticas ocasionadas por el peso de estos accesorios.
- **DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS.** Vale la pena acotar que una incorrecta distribución de esfuerzos comprometería la integridad del indentor. Fenómenos como la fatiga y esfuerzos, y la concentración de toda la carga aplicada en la zona de contacto (80mm x 17mm), afectarían también directamente el ensayo y la máquina universal. Por esta razón se requiere una geometría que sea capaz de soportar las condiciones de funcionamiento de esta pieza.
- **TAMAÑO:** Es necesario aclarar que el ensayo será llevado a cabo en un espacio confinado, delimitado por la máquina universal de ensayos mecánicos. En el interior de la misma serán colocados el dispositivo de compresión plana y el horno de ensayos. Por lo que el tamaño de estos componentes no puede superar el espacio disponible, siendo éste de 1,04 m.
- **SIMPLICIDAD EN EL MECANIZADO O CONSTRUCCIÓN:** Al momento del diseño es necesario estar consciente que hay geometrías muy complejas para ser

mecanizadas, o en caso de ser posible, el costo en términos de horas de trabajo y pérdida de material son elevados. Por lo tanto, la complejidad en el mecanizado ocasionará demoras en el tiempo de entrega.

- **MANTENIMIENTO:** Algunas piezas del dispositivo de compresión plana trabajan con agua como fluido refrigerante, de modo que se debe realizar un mantenimiento preventivo cada cierto tiempo para evitar problemas de corrosión. Por esta razón, es importante que los dispositivos tengan una forma que no haga muy engorroso este procedimiento de mantenimiento.
- **SEGURIDAD EN EL MANEJO:** Como se ha mencionado anteriormente, durante el ensayo se manejarán temperaturas por el orden de los 500°C. Por esta razón es necesario realizar un diseño cuyo funcionamiento no comprometa la integridad física de la persona encargada de llevar a cabo el ensayo.
- **RIGIDEZ:** Considerando las cargas aplicadas en este ensayo es importante que las piezas tengan la rigidez necesaria para soportarlas, sin sufrir deformaciones significativas que comprometan, tanto los resultados de la prueba, como la axialidad e integridad del equipo. En el caso de los indentores la rigidez es sumamente importante para que no ocurra pandeo en este elemento. Por último, en el caso del dispositivo de transporte, la rigidez debe permitir la deflexión necesaria de las guías, para garantizar de esta forma un movimiento vertical de la probeta, que permita que ambos lados de la misma estén en contacto con las herramientas.
- **PRESICIÓN:** Debe recordarse que la probeta será transportada de un horno de pre calentamiento al horno de ensayo por un mecanismo de transporte. Es importante que este dispositivo coloque a la probeta en una posición donde se cumplan las siguientes características:
 1. Paralelismo entre las superficies de la probeta a ensayar y las caras de los indentores que aplicarán la carga al espécimen.

2. La entrada de la probeta debe ser completamente perpendicular a la puerta del horno de ensayo.
 3. Toda el área de estudio debe estar en contacto con las herramientas.
- MONTAJE: la facilidad que presente el equipo para el manejo por parte del operador será sumamente importante para la preservación del dispositivo. Además de la adecuada colocación de cada una de sus partes, permitirá una correcta lectura de resultados.
 - GARANTIA LA ALINEACIÓN. La máquina universal de ensayos está construida de forma que garantiza la perfecta axialidad entre sus dos mordazas. El dispositivo de compresión que se seleccione no debe alterar esta condición, es decir, debe asegurar que una vez acoplado esta axialidad se siga cumpliendo entre los dos indentores. Además de alterar los resultados del ensayo, una desalineación entre las herramientas puede ocasionar deformación plástica e inclusive fractura de algunas de las piezas del dispositivo o de la máquina universal de ensayos.
 - CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE CALOR. Como se mencionó anteriormente, la celda de carga de la máquina universal de ensayos no debería trabajar a temperaturas superiores de los 35°C, por esta razón es importante considerar la capacidad de extracción de calor de los dispositivos.

3.3.2 Ponderación de las variables.

Habiendo discutido las principales características de los diferentes equipos previamente descritos, la matriz de decisión es un medio conveniente para la selección de la solución óptima. Esto no es más que una forma de comparar las soluciones propuestas de una manera tal que asignándole valores a los diferentes parámetros tomados en cuenta al momento del diseño, y evaluando cada una de las propuestas en función de ellos, se obtiene la mejor solución.

Es necesario aclarar que no todas las características que se mencionaron anteriormente son aplicables para la evaluación de todos los equipos. A continuación se presentarán los parámetros a evaluar en cada uno de los diseños con su correspondiente valor porcentual.

Tabla 3. 4. Criterios de evaluación de los indentores.

INDENTORES	
CRITERIO	VALOR (%)
Peso	5
Distribución de esfuerzos	40
Simplicidad en el mecanizado	10
Rigidez	20
Montaje	5
Alineación	20

Tabla 3. 5. Criterios de evaluación de la base refrigerada.

BASE REFRIGERADA	
CRITERIO	VALOR (%)
Peso	10
Simplicidad en el mecanizado	10
Rigidez	15
Montaje	5
Alineación	20
Tamaño	5
Mantenimiento	15
Extracción de calor	20

Tabla 3. 6. Criterios de evaluación del dispositivo de transporte.

DISPOSITIVO DE TRANSPORTE	
CRITERIO	VALOR (%)
Simplicidad en la construcción	20
Mantenimiento	10
Precisión	30
Rigidez	25
Seguridad en el manejo	10
Cinemática	5

Tabla 3. 7. Criterios de evaluación de la pieza de alineación.

PIEZA DE ALINEACION	
CRITERIO	VALOR (%)
Simplicidad en la construcción	35
Montaje	15
Precisión	50

Para la evaluación de las propuestas en cada uno de los criterios, se utilizará la siguiente escala numérica:

Tabla 3. 8. Escala para la evaluación.

Desfavorable	1
Poco favorable	2
Favorable	3
Muy Favorable	4

3.3.3 Evaluación de las propuestas.

El puntaje otorgado a cualquier diseño se multiplicará por su valor porcentual. Este procedimiento se hará con cada parámetro y luego se sumarán. De esta forma, se obtendrá un número final por cada diseño. A continuación se realizará un cálculo tipo para selección del diseño de los indentes.

Primero se procede a evaluar los distintos parámetros de los diseños.

Tabla 3. 9. Evaluación de las propuestas de los Indentes.

INDENTES			
CRITERIO	VALOR (%)	Propuesta N°1	Propuesta N°2
Peso	5	4	1
Distribución de esfuerzos	40	2	4
Simplicidad en el mecanizado	10	2	3
Rigidez	20	3	4
Montaje	5	4	2
Alineación	20	3	4

Luego se multiplica el puntaje por el valor porcentual de cada parámetro.

Propuesta N°1

$$(4 \cdot 0,05) + (2 \cdot 0,4) + (2 \cdot 0,1) + (3 \cdot 0,2) + (4 \cdot 0,05) + (3 \cdot 0,2) = 2,6$$

Propuesta N°2

$$(1 \cdot 0,05) + (4 \cdot 0,4) + (3 \cdot 0,1) + (4 \cdot 0,2) + (2 \cdot 0,05) + (4 \cdot 0,2) = 3,65$$

Por lo tanto será seleccionada la Propuesta N° 2, ya que obtuvo un puntaje más alto.

Tabla 3. 10. Evaluación de las propuestas de las bases refrigeradas.

BASE REFRIGERADA			
CRITERIO	Propuesta N°1	Propuesta N°2	Propuesta N°3
Peso	2	1	4
Simplicidad en el mecanizado	3	1	3
Rigidez	2	3	4
Montaje	3	3	2
Alineación	2	2	4
Tamaño	2	3	4
Mantenimiento	4	3	2
Extracción de calor	3	4	1
TOTAL	2,65	2,6	2,9

Tabla 3. 11. Evaluación de las propuestas de los dispositivos de transporte.

DISPOSITIVO DE TRANSPORTE			
CRITERIO	Propuesta N°1	Propuesta N°2	Propuesta N°3
Simplicidad en la construcción	1	4	3
Mantenimiento	2	4	3
Precisión	1	3	4
Rigidez	4	3	2
Seguridad en el manejo	3	4	3
Cinemática	1	4	3
TOTAL	2,05	3,45	3,05

Tabla 3. 12. Evaluación de las propuestas de la pieza de alineación.

PIEZA DE ALINEACION		
CRITERIO	Propuesta N°1	Propuesta N°2
Simplicidad en la construcción	4	2
Montaje	4	4
Precisión	3	3
TOTAL	3,5	2,8

3.4 Diseño de Detalles.

Una vez seleccionadas las propuestas definitivas para el diseño de cada componente del dispositivo de compresión plana tipo Ford, es necesario desarrollar los detalles de cada elemento para así obtener un desempeño más óptimo de los mismos.

A continuación se realizará un estudio de todos los elementos involucrados en el dispositivo de compresión plana, señalando las variantes que se aplicaron a los diseños seleccionados.

3.4.1 Indentores.

Como se dijo anteriormente esta pieza estará en contacto con la probeta durante el ensayo, es decir, comprimirán al espécimen.

En este caso no se introdujo ningún cambio a la propuesta seleccionada, ya que su geometría está limitada por las condiciones de la prueba.

3.4.2 Base Refrigerada.

Esta pieza está encargada de refrigerar el calor conducido por el indentor y así evitar que la temperatura afecte la celda de carga.

A este diseño le fueron añadidos ciertos elementos para mejorar su funcionamiento.

En principio vale la pena destacar el mecanismo de mantenimiento que será utilizado en este elemento, el cual consta de la colocación de dos tornillos prisioneros en los agujeros que se muestran en la figura 3.58. Al enroscarlos, éstos ejercerán una fuerza de empuje sobre la camisa colocada a presión, permitiendo la separación de ambas piezas (Figura 3.59).

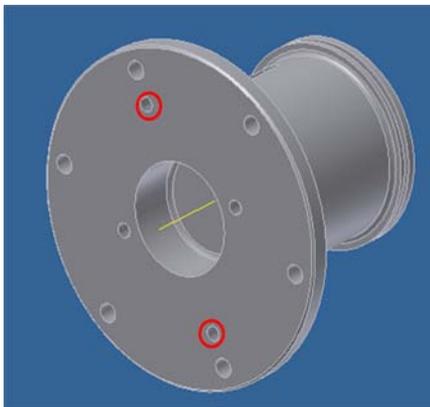


Figura 3. 58. Agujeros para tornillos de mantenimiento.

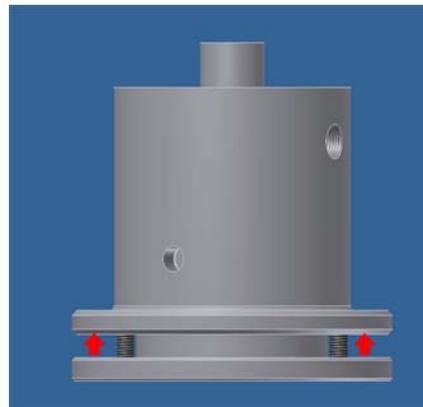


Figura 3. 59. Expulsión de la camisa.

Las mangueras que conducen el fluido refrigerante deberán acoplarse a la camisa por medio de roscas NPT, especialmente diseñada para la unión de tuberías. En la figura 3.60 se muestran dichas roscas.

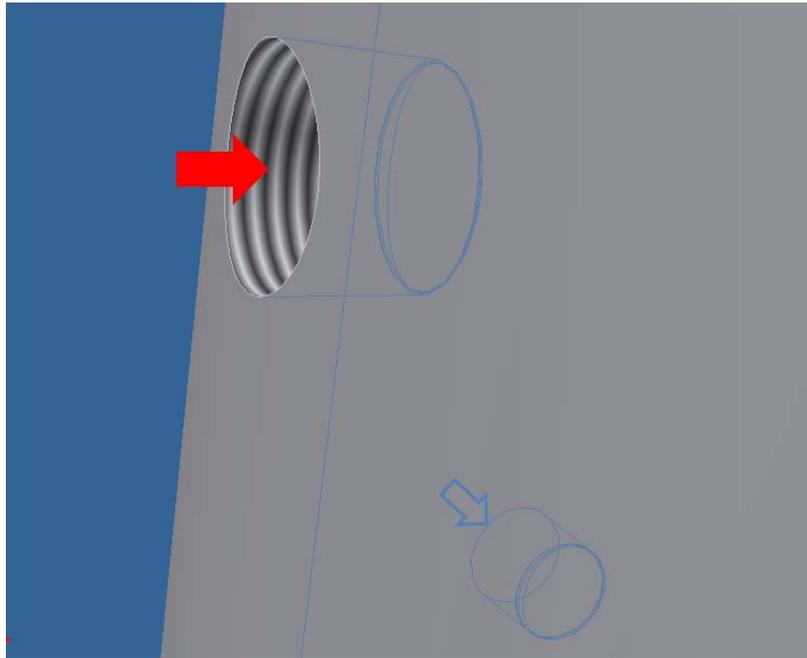


Figura 3. 60. Roscas NPT.

Vale la pena destacar que el diseño de la base refrigerada en un futuro será aplicable a ensayos de probetas de acero, en los cuales se manejarán temperaturas en el orden de los 1150°C en el horno de ensayo, por lo que no tendría sentido la utilización de un O-ring en el extremo de la base más cercana al indentor, ya que éstos resisten temperaturas de hasta 120°C. debido a lo anteriormente descrito, se decidió implementar un sistema de unión tipo brida. Para asegurar que no haya fuga de agua entre la camisa y el resto de la base, se recomienda el uso de un papel de empacadura de bronce. Aplicando un torque adecuado en los tornillos de unión, el papel se deformaría adaptándose a las irregularidades presentes entre las dos piezas, garantizando la estanqueidad del fluido.

Por otra parte, fue agregada a la columna de alineación una entalla, en la cual ingresarán los tornillos prisioneros para esta forma sujetar el dispositivo de

compresión plana. Es necesario aclarar que esta ranura fue diseñada de manera tal que los tornillos no estén sometidos a esfuerzos cortantes durante la compresión del espécimen (Figura 3.61).

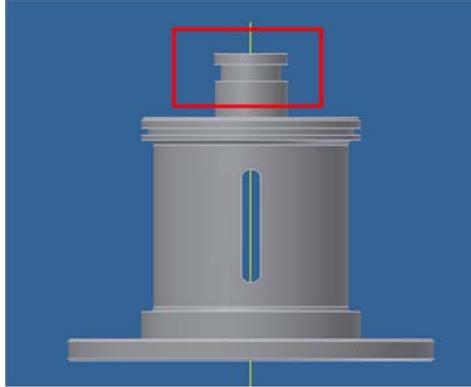


Figura 3. 61. Entalla para tornillos de sujeción.

3.4.3 Mecanismo de Transporte.

Como comento anteriormente, este es el mecanismo encargado de sujetar la probeta durante su precalentamiento, transportarla al horno de ensayo, permitir el flujo de material de la probeta hacia los lados durante la compresión debido a la conservación de volumen, y por último, retirar el espécimen al finalizar la prueba.

Al diseño seleccionado en la matriz de decisión, se le añadió la utilización de pines roscados, cuya función es la de definir la posición final en el giro de la mesa móvil (Figura 3.62). Por otra parte, sobre la guías se colocará una bocina con un tornillo prisionero, que igualmente, se desempeñará como tope, pero en este caso para marcar la posición final en el movimiento de avance, tal y como se observa en la figura 3.62.

El dispositivo de transporte nunca abandona la probeta, es decir, mientras el espécimen es precalentado, o comprimido en el horno de ensayo, las tenazas también se encuentran dentro del mismo. Es importante aclarar que una transferencia de calor hacia el mecanismo de transporte puede causar la dilatación de las guías responsables de dirigir el movimiento de avance, y por consiguiente que las mismas se traben en las bocinas del bloque fijo. Ante esta situación se diseñó un sistema de refrigeración en el soporte de las tenazas del mecanismo de transporte (Figura 3.62). El mismo consiste en canales internos

por donde circulará el fluido refrigerante, y las respectivas entradas y salidas del mismo como muestra la figura 3.62, en azul se representa la entrada de agua proveniente del chiller, mientras que en rojo se aprecia la salida del fluido refrigerante. Aunado a lo anterior en la unión de los ejes calibrados con el soporte de las tenazas, serán colocados bujes de teflón (Figura 3.62), cuya función es funcionar como aislante.

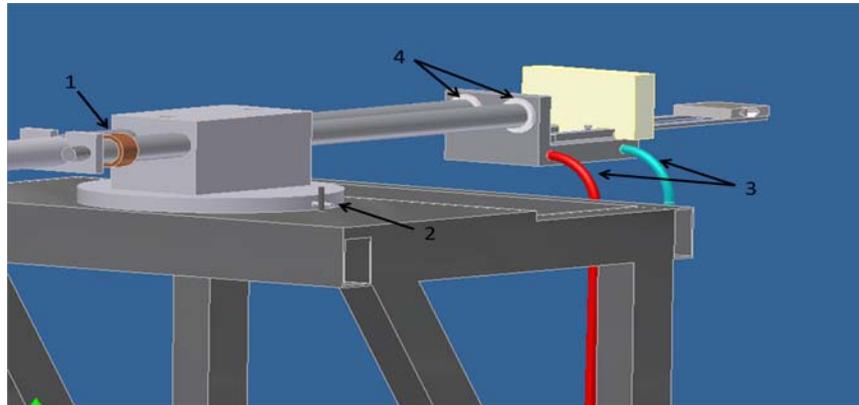


Figura 3. 62. 1) Bocina. 2) Pines de Posicionamiento. 3) Sistema de Refrigeración.

3.4.4 Chasis.

Como se explicó anteriormente, el chasis es la estructura donde se apoya el mecanismo de transporte. Además cumple con la función de garantizar una posición particular de dicho mecanismo con la máquina universal de ensayos, ya que sus patas están acopladas a la misma por medio de tornillos, a las salientes que se encuentran ubicadas en la zona inferior de la máquina universal de ensayos, tal y como se muestra en la figura 3.63. Mediante este sistema de agarré se puede garantizar que el chasis permanecerá en una posición relativa determinada con respecto a la máquina Shimadzu, sin importar que ésta sea reubicada en algún momento.



Figura 3. 63. Patas de la máquina universal de ensayos mecánicos.

Con el fin de facilitar el traslado del chasis, fue diseñado un sistema de ruedas; además, será colocado un manubrio en la parte superior, mediante el cual la persona encargada de llevar a cabo el ensayo sujetará para colocar en posición la estructura, tal como se observa en la figura 3.64.

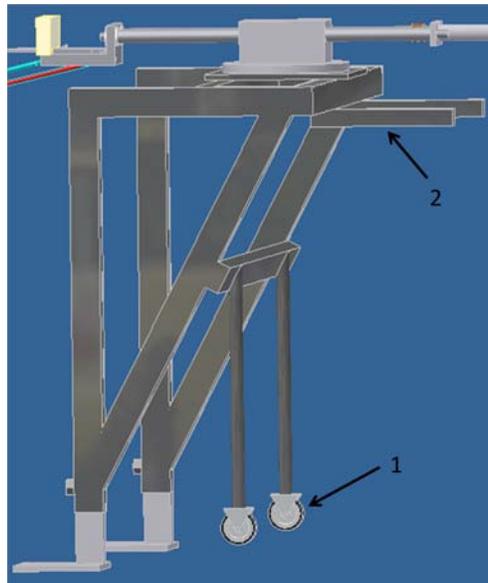


Figura 3. 64. 1) Ruedas. 2) Manubrio.

3.4.5 Probeta.

La forma que presentan las probetas actuales responden a las demandas exigidas por la Universidad de Sheffield, institución encargada en primera instancia de realizar los ensayos de compresión plana. Dicho espécimen se cuenta con un sistema de agarre formado por dos entallas, las cuales se presentan a continuación en la figura (3.65).

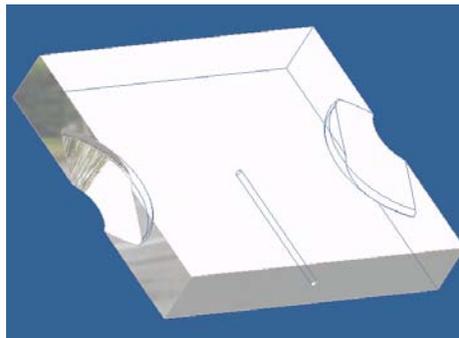


Figura 3. 65. Diseño de la probeta actual.

Dichas entallas presentan cierto nivel de complejidad ya que deben realizarse por electroerosión, el cual además de ser complicado, es un procedimiento costoso. Por esta razón, se decidió, en conjunto con el Instituto de Ingeniería, cambiar el sistema de agarre del espécimen por dos agujeros, donde se insertarán los pines de 5 mm de diámetro del mecanismo de transporte. A continuación se muestra la modificación que deberá realizarse en las probetas actuales para ser ensayadas en el dispositivo de compresión plana tipo Ford (3.66).

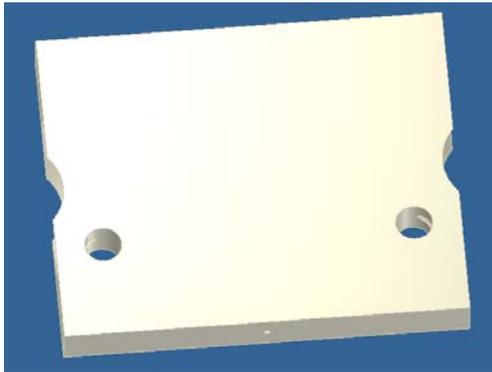


Figura 3. 66. Modificaciones a la probeta actual.

Finalmente para futuros ensayos se recomienda al Instituto de Ingeniería exigir el modelo de probeta presentado en la siguiente figura (3.67).

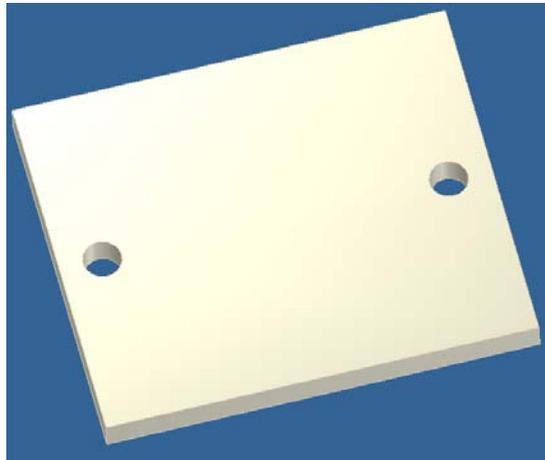


Figura 3. 67. Esquema de la Probeta recomendada para futuros ensayos.

***CAPÍTULO IV-DESARROLLO Y
CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO***

Una vez hechas las modificaciones sobre los diseños seleccionados se debe proceder a la selección de materiales y construcción de los dispositivos.

4.1 Evaluación de materiales.

4.1.1 Aceros de herramienta tipo D2.

Acero para trabajo en frío, tipo alto carbono y alto cromo, empleado en la fabricación de herramientas en las cuales las deformaciones deben ser mínimas ^[20]. Es utilizado en la fabricación de matrices cortantes, punzones, cuchillas, matrices para estampado y acuñado, entre otras aplicaciones.

La indeformabilidad de estos aceros se debe no sólo a su alto contenido de carbono sino a su enfriamiento relativamente lento durante la operación de temple, por lo que durante este proceso en las piezas no existirá una gran diferencia de temperatura entre los diversos puntos del material, evitándose así la creación de tensiones, deformaciones y roturas ^[21].

A continuación se presenta la tabla número 4.1 con la composición química del acero de herramienta D2:

Tabla 4. 1. Composición química del acero D2.

Elemento	%
C	1,4-1,6
Si	0,6
Mn	0,6
Cr	11,0-13,0
Mo	0,7-1,2
V	1,10
Ni	0,3

En la tabla número 4.2 se presentan algunas propiedades mecánicas del material en cuestión:

Tabla 4. 2. Propiedades mecánicas del acero de herramienta D2.

Propiedades Mecánicas	
Dureza	56-65 [HRC]
Esfuerzo de Fluencia	1650 [MPa]
Modulo de Elasticidad	210 [GPa]

Para la escogencia de este material fueron consideradas las características presentes en el mismo como resistencia mecánica, indeformabilidad y elevada dureza alcanzada con el tratamiento térmico, de 62 a 65 Rockwell C, que deben presentar las piezas encargadas de permitir la unión entre el dispositivo de compresión plana y la máquina universal de ensayos mecánicos.

4.1.2 Aceros para trabajo en caliente tipo H13

Este tipo de material combina un buen balance de tenacidad, alta resistencia a la formación de grietas debido a choques térmicos, resistencia moderada al desgaste junto a una dureza entre 51 y 56 HRC luego de un enfriamiento en aceite.

Las temperaturas de revenido del acero H13 se encuentran entre 570° y 650°C, lo cual permite que mantenga su dureza de temple y su resistencia a altas temperaturas, por lo que algunos de sus usos más comunes son: dados de forja, cuchillas para corte en caliente, herramientas para fundición a presión, punzones y matrices para prensar, moldes para plásticos, entre otras aplicaciones.

A continuación se presenta la tabla número 4.3, en la cual se puede observar la composición química del material antes mencionado:

Tabla 4. 3. Composición química del acero H13.

Elemento	%
C	0,39
Si	1,1
Mn	0,4
Cr	5,2
Mo	1,4
V	0,95

Las propiedades mecánicas del acero H13 se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4. 4. Propiedades mecánicas del acero H13.

Propiedades Mecánicas	
Dureza	51-53 [HRC]
Resistencia a la Tracción	1960 [MPa]
Esfuerzo de Fluencia	1570 [MPa]
Modulo de Elasticidad	210 [GPa]

Este material fue elegido para la fabricación de aquellas piezas que serían sometidas a las mayores temperaturas (indentores y soportes o brazos) durante la ejecución del ensayo, debido a la capacidad de mantener sus propiedades mecánicas a estas condiciones.

4.1.3 Aceros Inoxidables tipo 420:

El acero inoxidable martensítico tipo 420, por lo general es utilizado en aplicaciones en las que se requiere de una buena resistencia a la corrosión y al desgaste. Es ampliamente usado en la fabricación de moldes sometidos a ambientes agresivos debido a que es resistente a la oxidación y picaduras; además de lo anterior, las piezas fabricadas con este tipo de acero pueden ser guardadas durante períodos de tiempo prolongados requiriendo un mínimo mantenimiento.

Este tipo de acero martensítico es utilizado en la fabricación de moldes de diversos tipos tales como: soplado, extrusión, compresión, inyección, para vidrio, etc.

La composición química se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. 5. Composición química del acero inoxidable 420.

Elemento	%
C	0,41
Si	0,7
Mn	0,45
Cr	14,30
Mo	0,6
V	0,20

Propiedades mecánicas:

Tabla 4. 6. Propiedades mecánicas del acero inoxidable 420.

Propiedades Mecánicas	
Dureza	46-52 [HRC]
Resistencia a la Tracción	1710 [MPa]
Esfuerzo de Fluencia	690 [MPa]
Modulo de Elasticidad	200 [GPa]

Este material fue elegido para la fabricación de la base refrigerada y para la pieza que servirá de base para los soportes de la probeta, no sólo por su buena resistencia a la corrosión y desgaste, sino que además presenta una de las resistencias más elevadas para aceros inoxidables y una buena resistencia a la compresión.

4.1.4 Aluminio 6063.

Corresponde a una aleación sumamente comercial debido a su precio económico y buenas propiedades mecánicas, se aplica generalmente para piezas complicadas y que requieran dureza.

En la tabla 4.7 se presenta la composición química de esta aleación

Tabla 4. 7. Composición química del aluminio 6063.

Elemento	%
Si	0,30-0,60
Fe	0,1-3,3
Cu	0,10
Mn	0,30
Mg	0,40-0,60
Cr	0,05
Zn	0,15
Ti	0,20

En la siguiente tabla se muestran las propiedades mecánicas del aluminio 6063

Tabla 4. 8. Propiedades mecánicas del Aluminio 6063.

Propiedades Mecánicas	
Dureza	60 [HB]
Resistencia a la Tracción	185 [MPa]
Esfuerzo de Fluencia	145[MPa]
Modulo de Elasticidad	69 [GPa]

4.1.4.1 Ejes calibrados.

Debido a la baja densidad del aluminio en comparación con el acero, se decidió seleccionar los ejes calibrados de este material, de una pulgada de diámetro, ya que de esta forma se sigue garantizando precisión en el movimiento de avance reduciendo en gran medida el peso del mecanismo de transporte.

4.1.4.2 Bloque fijo.

El bloque fijo es la pieza a través de la cual se deslizarán los ejes calibrados durante el movimiento de avance o retiro de la probeta tanto del horno de ensayo como de precalentamiento. Para este componente se decidió utilizar aluminio ya que disminuye el peso final del dispositivo de transporte.

4.1.4.3 Mango de agarre.

Como se explicó anteriormente, este mango servirá para empujar o halar los ejes calibrados y así obtener el movimiento de avance o retiro, respectivamente, de la probeta. El mismo debe ser desmontable, es decir, durante la ejecución del ensayo este no estará en contacto con el mecanismo de transporte. Sólo cuando se desee movilizar la probeta de horno a horno es que este elemento será acoplado. Para efectos de comodidad a la hora de

hacer este montaje y desmontaje del eje se decidió hacer esta pieza de aluminio, ya que de esta manera el peso de la misma es muy inferior a un diseño hecho en acero.

4.1.4.4 Chasis.

Es la estructura que se acoplará a la máquina universal de ensayos mecánicos y servirá de soporte para el mecanismo de transporte. Esta estructura debe combinar buena rigidez y poco peso, ya que será transportado hasta la máquina de ensayos y colocado en posición manualmente.

Para esta pieza se decidió usar perfiles comerciales de aluminio 6063 soldados. Los mismos son cuadrados y huecos (Figura 4.1), y en ángulo, respectivamente (Figura 4.2). Sus dimensiones son las siguientes:

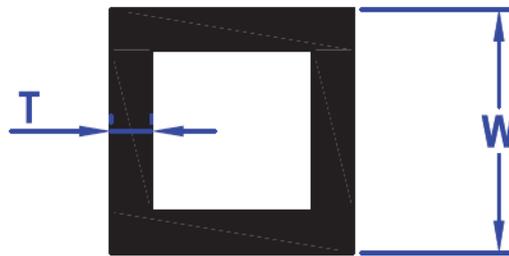


Figura 4. 1. Esquema de las dimensiones del perfil N 1077 usado en el Chasis.

Donde $W = 44,45$ mm.

$T = 2,5$ mm.

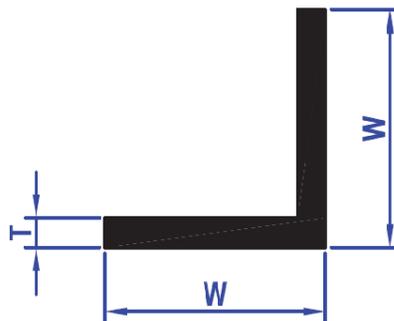


Figura 4. 2. Esquema de las dimensiones del perfil N 1249 usado en el Chasis.

Donde $W = 38,1$ mm.

$T = 3,18$ mm.

4.1.4.5 Pieza para alineación.

Tal y como se explicó anteriormente esta pieza es capaz de garantizar el correcto posicionamiento de los indentores. Es necesario aclarar que la misma no soportará grandes cargas, por lo que se justifica la selección del material en cuestión. Este elemento del diseño no será utilizado durante la ejecución del ensayo, mas debe ser lo suficientemente rígido como resistir las cargas aplicadas por los indentores durante el proceso de alineación.

4.2 Dimensionamiento del equipo.

4.2.1 Indentores.

Alguna de las relaciones importantes a tener en cuenta a fin de garantizar un estado de deformación plana en la probeta son ^[4]:

a) $\frac{b_0}{w} \geq 2$

b) $\frac{h_0}{w} \leq 0,67$

c) $\frac{l}{w} \geq 3$

d)

A continuación se puede observar gráficamente estas medidas en la figura 4.3.

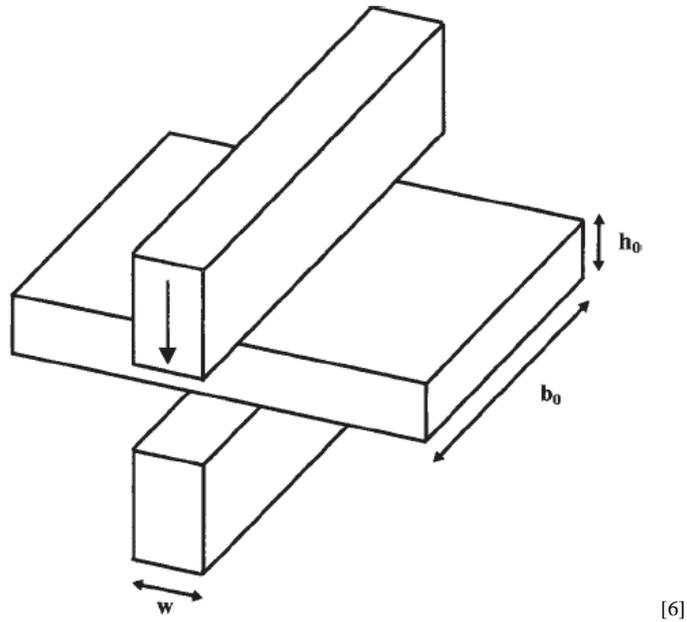


Figura 4. 3. Esquema de las dimensiones de la probeta e indente. [6]

Las dimensiones de la probeta son se presentan en la Figura 4.4.

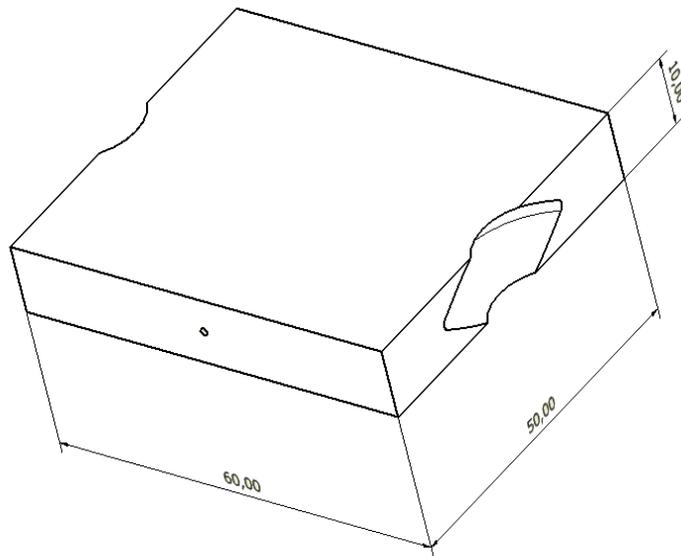


Figura 4. 4. Dimensiones de la probeta.

Siguiendo las recomendaciones para garantizar un estado de deformación plana durante el ensayo, se calcularon las medidas del indente.

Sustituyendo las medidas del espécimen en las relaciones anteriores, se obtiene:

$$\frac{50 \text{ mm}}{2} \geq w \rightarrow w \leq 25 \text{ mm}$$

$$\frac{10 \text{ mm}}{0,67} \leq w \rightarrow w \geq 14,92 \text{ mm}$$

$$\frac{60 \text{ mm}}{3} \geq w \rightarrow w \leq 20 \text{ mm}$$

Conocidos los valores anteriores se decidió utilizar un ancho efectivo del indenter:

$$w = 17 \text{ mm}$$

Por otra parte es de suma importancia el cálculo de la profundidad del indenter, la cual vendrá dada mediante la siguiente inecuación:

$$L > 1,2b_0 \rightarrow L = 1,6 \times 50 \text{ mm}$$

Finalmente, la profundidad del punzón tendrá una dimensión de:

$$L = 80 \text{ mm}$$

A fin de garantizar que no ocurrirá ningún tipo de desalineación durante el ensayo, se realizó un estudio de pandeo modelando el indenter como una columna empotrada libre ^[5] de sección transversal rectangular de medidas $w = 17 \text{ mm}$ y $L = 80 \text{ mm}$ (figura 4.5) y considerando una carga aplicada $F = 240 \text{ KN}$ (24473 Kg).

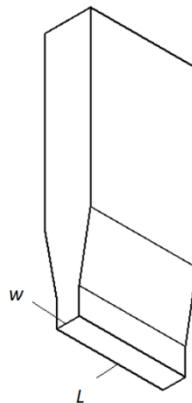


Figura 4. 5. Esquema de las dimensiones del indenter en la zona de contacto.

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{\pi}{2 \times f_{sp}} \sqrt{\frac{E \times I}{F}}$$

Es necesario aclarar que las propiedades mecánicas de los aceros se ven modificadas debido a los efectos de la temperatura, por ende fue necesaria la aplicación de la siguiente ecuación para el cálculo del módulo de elasticidad del acero H13 ^[16]:

$$E(T) = 2 \times (1 + \nu) \times \mu(T)$$

$$\text{donde: } \mu(T) = 88.885 - 37,5 \cdot T$$

La temperatura T fue considerada igual a 773 K y considerando que la relación de Poisson (ν) tiene un valor medio de 0,33:

$$\mu(T) = 88.885 - 37,5 \cdot (773 \text{ K})$$

$$\mu(T) = 59897,5$$

$$E(T) = 2 \times (1 + 0,33) \times 59897,5$$

$$E = 160 \text{ GPa}$$

$$E = 16247 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{sp} = 3,5 \text{ (Factor de seguridad)}$$

$$F = 240 \text{ KN} = 24473 \text{ Kg (Carga aplicada)}$$

$$I = \frac{H \times w^3}{12} = \frac{17 \times 80^3}{12} = 725333 \text{ mm}^4 \text{ (Momento de inercia)}$$

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{\pi}{2 \times 3,5} \sqrt{\frac{16247 \times 725333}{24473}} = 311,43 \text{ mm}$$

La longitud total del indenter es de 197mm por lo tanto el factor de seguridad ante el pandeo por compresión es el siguiente:

$$n = \frac{311,43 \text{ mm}}{197 \text{ mm}} = 1,58$$

Adicionalmente al pandeo se realizó el cálculo de esfuerzo de Von Misses calculando esfuerzos en zonas críticas del indenter.

Si se garantiza la axialidad en el ensayo, las piezas deberían estar sometidas exclusivamente a compresión, de modo que los estudios de esfuerzos se realizarán en aquellos lugares donde las piezas presenten menor área transversal.

Las zonas de estudio del indenter fueron las siguientes (figura 4.6).

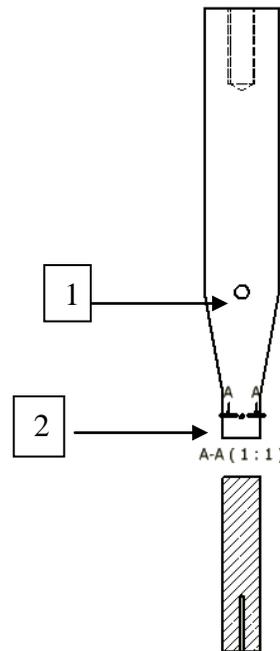


Figura 4. 6. Zonas críticas de estudio en el indenter

1-) Perforación destinada a la colocación de la resistencia eléctrica.

2-) Perforación para colocar la termocupla.

Al tratar el indenter como una barra a carga axial se obtuvo el valor de esfuerzo nominal de la siguiente manera:

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{ct}$$

Donde $F = 240000\text{N}$

t = Profundidad del indenter que es igual a 80mm.

$c = b - d$ Donde a su vez b es el ancho del indenter (34 mm) y d es el diámetro de perforación en la barra (6,35mm).

$$c = 34\text{mm} - 6,35\text{mm} = 27,65\text{mm}$$

Entonces el esfuerzo nominal es igual a:

$$\sigma_{nom} = \frac{240000\text{N}}{27,65\text{mm} * 80\text{mm}} = 108\text{MPa}$$

Como el indentor presenta una perforación para la colocación de la resistencia eléctrica, fue necesario calcular un factor de concentración de esfuerzos para el caso de barra plana con barreno ^[5]. Simulando la variación del factor de concentración de esfuerzo vs la geometría del agujero se obtuvo.

$$K = 2,56$$

Por definición el factor de concentración de esfuerzo se define como la relación del esfuerzo efectivo al esfuerzo nominal y viene dado por: ^[5].

$$K = \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_{nom}}$$

Por lo tanto se calculó el esfuerzo efectivo en el concentrador de esfuerzos como:

$$K * \sigma_{nom} = \sigma_{ef}$$

$$2,56 * 108\text{Mpa} = 276\text{MPa}$$

Otra zona crítica en el indentor es cuando éste alcanza su sección transversal más pequeña, y a su vez, se tiene la perforación donde se insertará la termocupla para el registro de la temperatura en el mismo. En este caso el esfuerzo a compresión nominal viene dado por:

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{ct}$$

Donde $F = 240000\text{N}$

t = Profundidad del indentor que es igual a 80mm.

$c = b - d$ Donde a su vez b es el ancho del indentor (17 mm) y d es el diámetro de perforación en la barra (1,2 mm).

$$c = 17\text{mm} - 1,2\text{mm} = 15,8\text{mm}$$

$$\sigma_{nom} = \frac{240000\text{N}}{15,8\text{mm} * 80\text{mm}} = 190\text{MPa}$$

El cálculo del factor de concentración de esfuerzo se realizó mediante la relación entre el diámetro de la perforación y el ancho del indentor, obteniéndose el siguiente valor de K.

$$K = 2,76$$

El esfuerzo efectivo en el concentrador de esfuerzos es:

$$K * \sigma_{nom} = \sigma_{ef}$$

$$2,76 * 190\text{MPa} = 524\text{MPa}$$

El esfuerzo efectivo de acuerdo al criterio de Von Misses viene dado por:

$$\sigma_{1,2,3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Por las condiciones en las que se realiza la compresión $\sigma_2, \sigma_3 = 0$. Por otra parte

$$\sigma_1 = 524\text{MPa}.$$

Comparando el esfuerzo calculado con las propiedades del material encontramos que el acero H13 presenta un esfuerzo de fluencia de 924 MPa a 538°C. Por lo tanto podemos asegurar que el indentor no falla con el siguiente factor de seguridad.

$$n = \frac{924\text{MPa}}{524\text{MPa}}$$

$$n = 1,76$$

El indenteo deberá entrar a la cavidad colocada en el disco de forma que sea deslizante, y montable y desmontable a mano. Se seleccionó un ajuste para estas piezas de h6-H7.

4.2.2 Estudio de cargas en la base refrigerada.

Para el análisis de las cargas en la base refrigerada se estudió la zona de menor área transversal (figura 4.7). Esta zona presenta además una perforación para garantizar la alineación con respecto al disco del indenteo y dos perforaciones que permitan la unión de ambos elementos.

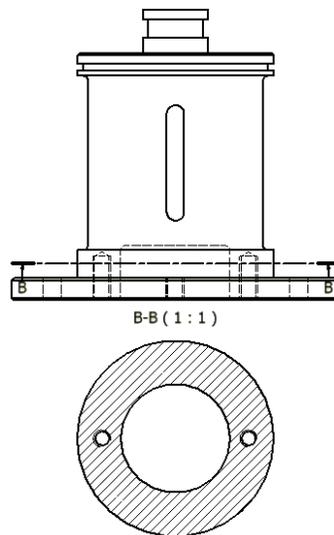


Figura 4. 7. Esquema de la zona de estudio en la base refrigerada.

El esfuerzo en esta parte de la base refrigerada será.

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{At}$$

$$At = \frac{\pi \times D^2}{4} - \frac{\pi \times Di^2}{4} - 2 \times \frac{\pi \times d^2}{4}$$

$$At = \frac{\pi \times (80mm)^2}{4} - \frac{\pi \times (50mm)^2}{4} - 2 \times \frac{\pi \times (8mm)^2}{4}$$

$$A_t = 2962,5 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{nom} = \frac{240\,000 \text{ N}}{2962,5 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{nom} = \mathbf{81 \text{ MPa}}$$

Aplicando el criterio de falla de Von Misses se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2 \cdot (81 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{81 \text{ MPa}}$$

Comparando el esfuerzo calculado con las propiedades del material encontramos que el acero AISI 420 presenta un esfuerzo de fluencia de 690 MPa. Por lo tanto podemos asegurar que la base refrigerada no falla.

4.2.3 Estudio del disco del indector.

Para esta pieza se realizó el estudio de cargas en la zona de menor área transversal bajo esfuerzo. La ubicación de esta zona crítica se representa en la figura 4.8.

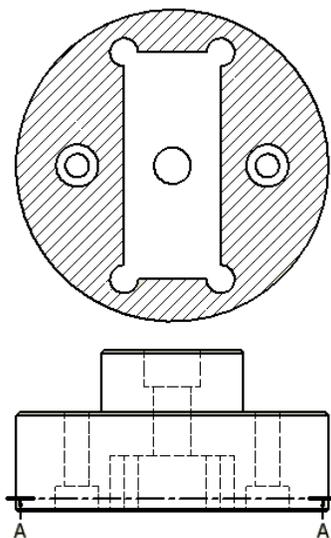


Figura 4. 8. Esquema de la zona de estudio en el Disco.

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{At}$$

$$At = \frac{\pi \times D^2}{4} - L \times t - 2 \times \frac{\pi \times d^2}{4}$$

$$At = \frac{\pi \times (110mm)^2}{4} - 34mm \times 80mm - 2 \times \frac{\pi \times (8mm)^2}{4}$$

$$At = 6682,8 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{nom} = \frac{240\,000N}{6682,8 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{nom} = 36 \text{ MPa}$$

Aplicando el criterio de falla de Von Misses se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2 \cdot (36 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_1 = 36 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo calculado con las propiedades del material, encontramos que el acero AISI H13 presenta un esfuerzo de fluencia de 924 MPa a 500°C, magnitud mucho mayor al esfuerzo que presenta la pieza. Por lo tanto podemos asegurar que el disco del indentor no falla.

4.2.4 Estudio del disco del acople.

Para esta pieza se realizó el estudio de cargas en la zona de menor área transversal (figura 7), con el fin de obtener el mayor esfuerzo presente en la misma.

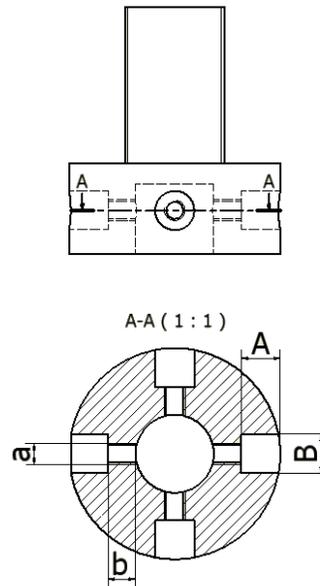


Figura 4. 9. Esquema de la zona de estudio en el Acople

Se calculó el esfuerzo como:

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{At}$$

$$At = \frac{\pi \times D^2}{4} - \frac{\pi \times d^2}{4} - 4 \times (A \times B + a \times b)$$

$$At = \frac{\pi \times (81mm)^2}{4} - \frac{\pi \times (30mm)^2}{4} - 4 \times (15mm \times 15mm + 8mm \times 10,5mm)$$

$$At = 3210,1 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{nom} = \frac{240\,000 \text{ N}}{3210,1 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{nom} = 75 \text{ MPa}$$

Aplicando el criterio de falla de Von Misses se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2 \cdot (75 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_1 = 75 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo calculado con las propiedades del material, encontramos que el acero AISI D2 presenta un esfuerzo de fluencia de 1650 MPa, magnitud mucho mayor al esfuerzo que presenta la pieza de 75 MPa. Por lo tanto podemos asegurar que el acople no falla por deformación plástica.

4.3 Cálculos de Transferencia de Calor

Para la resolución del problema de transferencia de calor, inicialmente se trató el tramo del indentor que se encuentra fuera del horno como una aleta de sección transversal rectangular uniforme, para ello fue considerada conducción de calor en estado estable (una vez alcanzada la temperatura de ensayo) por lo que la conductividad térmica fue supuesta constante al igual que los coeficientes de convección y radiación a lo largo de toda la superficie.

4.3.1 Balance de Energía.

Se estudiará la zona del indentor que se encuentra fuera del horno, en contacto con el medio ambiente y el disco del indentor. A continuación se muestra un esquema del análisis de transferencia de calor en la figura 4.10.

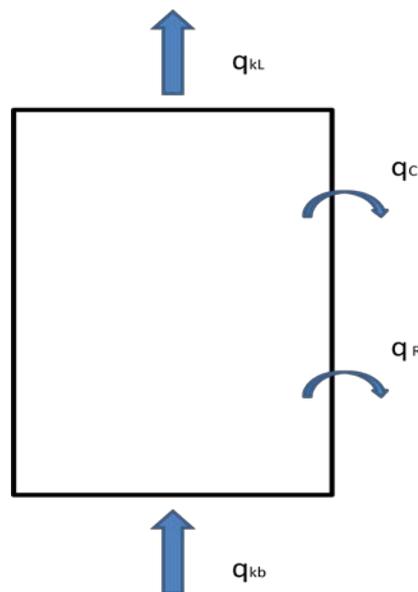


Figura 4. 10. Esquema del análisis de Transferencia de Calor.

Haciendo un balance de energía en la aleta se tiene:

$$q_{kb} = q_{kl} + q_r + q_c$$

Donde:

q_{kb} : Calor conducido en la base de la aleta.

q_{kl} : Calor conducido por la parte superior de la aleta.

q_r : Calor irradiado.

q_c : Calor convectado.

4.3.2 Cálculo del coeficiente convectivo.

$$q_c = \eta \times \bar{h}_c \times AS_1 \times (T_1 - T_{amb})$$

Los factores que intervienen en la ecuación anterior son:

η : eficiencia de la aleta.

\bar{h}_c : Coeficiente convectivo promedio.

AS_1 : Área superficial.

T_1 : Temperatura promedio.

T_{amb} : Temperatura ambiente.

Para el cálculo del coeficiente convectivo es necesario, en primer lugar establecer el valor de la temperatura de película:

$$T_f = \frac{773 + 298}{2}$$

$$T_f = 535,5 \text{ K}$$

A continuación son presentadas las propiedades del aire, para la posterior determinación del coeficiente convectivo, las cuales fueron calculadas para la temperatura de película especificada ^[18].

$$K = 42,972 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK (Conductividad Térmica)}$$

$$Pr = 0,68329 \text{ (Número de Prandtl)}$$

$$\alpha = 63,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s (Difusividad Térmica)}$$

$$\nu = 43,6038 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s (Viscosidad Cinemática)}$$

Acto seguido fue calculado el número de Raleigh, el cual se obtuvo mediante la siguiente relación:

$$Ra_l = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L^3}{\alpha \times \nu}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \rightarrow \frac{1}{535,5K}$$

Sustituyendo la expresión:

$$Ra_l = \frac{9,82 \times \frac{1}{535,5} \times (500 - 25) \times (80 \times 10^{-3})^3}{43,6038 \times 10^{-6} \times 63,8 \times 10^{-6}}$$

$$Ra_l = 1603137$$

Se pudo calcular el Nussel con esta expresión.

$$Nu_l = 0,68 + \frac{0,670 Ra_l^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$Nu_l = 0,68 + \frac{0,670(1603137)^{1/4}}{[1 + (0,492/0,68329)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$Nu_l = 18,9$$

Finalmente se dedujo el coeficiente convectivo mediante la siguiente relación:

$$Nu_l = \frac{hL}{K}$$

Despejando el coeficiente convectivo:

$$h_c = \frac{Nu_l \times K}{L}$$

$$h_c = \frac{18,90 \times 42,972 \cdot 10^{-3}}{60 \times 10^{-3}}$$

$$h_c = \frac{18,90 \times 42,972 \cdot 10^{-3}}{60 \times 10^{-3}}$$

$$h_c = 13,54 \frac{W}{m^2K}$$

4.3.2 Cálculo del coeficiente de radiación.

Para el caso de la radiación se practicó el siguiente análisis (figura 4.11):

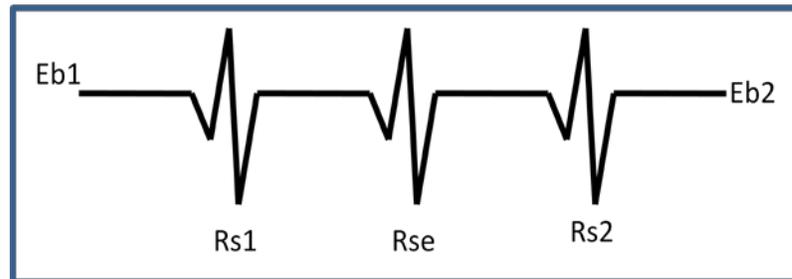


Figura 4. 11. Esquema del análisis para el caso de radiación.

Donde Eb1 es la potencia emisiva del elemento que estamos evaluando.

$$Eb1 = \sigma \times T_{1abs}^4$$

Rs1 es la resistencia a la radiación ejercida por la superficie del indenter expuesta al medio ambiente.

$$Rs_1 = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_{S_1}}$$

Re es la resistencia a la radiación ejercida por el medio ambiente.

$$Re = \frac{1}{A_{S_1} \times F_{1-2}}$$

Dado que se considera un espacio relativamente grande (la habitación designada para la máquina universal de ensayos y donde se realizará la prueba), el factor de vista tiende a 1.

Rs_2 es la resistencia a la radiación ejercida por las paredes del cuarto donde se encuentra la máquina.

$$Rs_2 = \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 As_2}$$

El área de la habitación donde se encuentra el dispositivo se considera muy grande con respecto al mismo, por esta razón As_2 tiende a infinito, por lo tanto toda la expresión Rs_2 tiende a cero.

El calor irradiado puede expresarse como:

$$qr = \frac{\Delta Eb}{R_{eq}} \rightarrow \frac{\sigma(T_{1abs}^4 - T_{2amb}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 As_1} + \frac{1}{As_1}}$$

$$qr = \frac{\Delta Eb}{R_{eq}} \rightarrow \frac{\sigma(T_{1abs}^2 + T_{2amb}^2)(T_{1abs} + T_{2amb})(T_{1abs} - T_{2amb})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 As_1} + \frac{1}{As_1}}$$

Se puede desarrollar parte de este término y sustituirlo como un coeficiente de radiación por el área de transferencia.

$$hr \times As_1 = \frac{\sigma(T_{1abs}^2 + T_{2amb}^2)(T_{1abs} + T_{2amb})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 As_1} \times \frac{1}{As_1}}$$

$$R_{equi} = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 As_1} + \frac{1}{As_1}$$

$$As_1 = (60 \times 10^{-3} \cdot 17 \times 10^{-3} \cdot 2 + 60 \times 10^{-3} \cdot 80 \times 10^{-3} \cdot 2)$$

$$As_1 = 0,01164 \text{ m}^2$$

$$R_{equi} = \frac{1 - 0,2070}{0,2070 \times (0,01164)} + \frac{1}{0,01164}$$

$$R_{equi} = 415,03 \frac{1}{m^2}$$

Se calculó entonces el coeficiente de radiación.

$$hr \times 0,01164m^2 = \frac{5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} (773K^2 + 298K^2)(773K + 298K)}{415,03 \frac{1}{m^2}}$$

$$hr = 8,63 \frac{W}{m^2K}$$

Como el área de transferencia de calor por convección y radiación es la misma podemos agrupar estos términos y tener un solo coeficiente total.

$$ht = 8,63 + \eta \cdot 13,54$$

La eficiencia de la aleta se obtuvo por el gráfico para aletas uniformes con perfil rectangular ^[19].

$$\eta = 93\%$$

$$ht = 21,22 \frac{W}{m^2K}$$

La ecuación de calor disipado por convección y radiación quedó de la siguiente manera:

$$q_r + q_c = ht \cdot As_1 \cdot (T_{1abs} - T_{amb})$$

$$q_r + q_c = 21,22 \frac{W}{m^2K} \times 0,01164m^2 \times (500^\circ C - 25^\circ C)$$

El calor total disipado al ambiente fue:

$$q_r + q_c = 117,3 W$$

4.3.2 Cálculo del calor transferido al indentor.

Luego se calculó el calor transferido a la porción del indentor expuesto al medio ambiente, modelándolo como una aleta de sección rectangular ^[19].

$$q_{kb} = \frac{M \left(\cosh(mL) - \frac{\theta_L}{\theta_b} \right)}{\sinh(mL)}$$

$$M = \sqrt{hPKAc} \cdot \theta_b$$

$$\theta_L = 30^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} \rightarrow 5^\circ\text{C}$$

$$\theta_b = 500^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} \rightarrow 475^\circ\text{C}$$

$$P \text{ (perímetro)} = 2 \cdot 17 \times 10^{-3} + 2 \cdot 80 \times 10^{-3} \rightarrow P = 0,228\text{m}$$

$$Ac = 34 \times 10^{-3} \cdot 80 \times 10^{-3} \rightarrow Ac \Rightarrow 2,72 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$M = \sqrt{21,22 \cdot 0,228 \cdot 29,13 \cdot 2,72 \times 10^{-3} \cdot 475}$$

$$M = 294,1$$

$$m = \sqrt{\frac{hP}{KAc}}$$

$$m = \sqrt{\frac{21,22 \cdot 0,228}{29,13 \cdot 2,72 \times 10^{-3}}}$$

$$m = 9,82$$

El calor transferido a la base de la aleta es:

$$q_{kb} = \frac{294,1 \left(\cosh(9,82 \cdot 60 \times 10^{-3}) - \frac{5}{475} \right)}{\sinh(9,82 \cdot 60 \times 10^{-3})}$$

$$q_{kb} = 550,7 \text{ W}$$

4.3.3 Cálculo del calor transferido a la base refrigerada.

Luego se calculó el calor que se transfiere a la base refrigerada restando el calor disipado por convección y radiación, al calor transferido a la base de la aleta.

$$q_{kb} = q_{kl} + q_r + q_c$$

$$q_{kl} = q_{kb} - (q_r + q_c)$$

$$q_{kl} = 550,7 \text{ W} - 117,3 \text{ W}$$

$$q_{kl} = 433,4 \text{ W}$$

4.3.4 Cálculo del caudal de refrigeración.

Por último se calculó el caudal de agua de refrigeración para disipar este calor transferido a la parte superior de la aleta, que se supuso en un valor de 600W para asegurar un factor de seguridad en el cálculo. Suponiendo que la diferencia de temperatura del agua de refrigeración varía en un grado a la entrada y salida del dispositivo; y que la misma entra al sistema a 12°C.

$$\dot{m}_{\text{agua}} \times C_p \times \Delta t = q_{kl}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{q_{kl}}{C_p \times \Delta t}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{600 \text{ W}}{4189 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \times 1\text{K}}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = 0,14 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

El cálculo de caudal se obtuvo de la siguiente manera:

$$Q = \dot{m}_{\text{agua}} \times v_f \times 60000 \frac{\text{l} \cdot \text{s}}{\text{m}^3 \cdot \text{min}}$$

$$Q = 0,14 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 0,001 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 60000 \frac{\text{l} \cdot \text{s}}{\text{m}^3 \cdot \text{min}}$$

$$Q = 8,4 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Considerando que son dos indentores que se necesitan refrigerar, se concluyó que el caudal de agua de necesario debe ser cercano a 20 litros por minuto.

4.4 Equipos auxiliares.

4.4.1 Hornos y Resistencias.

Los dos hornos fueron diseñados y fabricados por la empresa Cerámicas y Porcelanas ACC C.A. tomando en cuenta los requerimientos de los ensayos, así como el espacio disponible para su colocación, en la máquina universal de ensayos de la Fundación Instituto de Ingeniería. Según el fabricante, estos equipos son capaces de alcanzar temperaturas de hasta 1150 °C.

El horno de precalentamiento tiene una geometría exterior cilíndrica, con una abertura por la cual se introduciría la probeta. Interiormente este horno tiene una geometría hexagonal, recomendada por el fabricante. En la siguiente imagen se puede apreciar el mismo (Figuras 4.12) Para ambos hornos los controladores serán iguales. Mediante este dispositivo se puede fijar la temperatura de ensayo (entre 300°C a 1150°C) y observar la variación de la misma mediante la pantalla dispuesta en su parte frontal. A continuación se presenta una fotografía de dicho dispositivo en la figura 4.13



Figura 4. 12. Horno de precalentamiento



Figura 4. 13. Controlador.

El segundo horno, llamado horno de ensayo, posee también una geometría cilíndrica externa. Éste, presenta una saliente, representada en la figura 4.14, destinada a disminuir las pérdidas de calor en la ranura asignada a la entrada de la probeta. Este horno, presenta además, una abertura en su base superior y otra en la inferior (figura 4.15), por las cuales se introducirían los indentores para realizar la compresión dentro del horno. Este horno será colocado sobre una barra que servirá de eje de rotación para colocarlo en la posición

deseada, además cuenta con un brazo regulable, para facilitar el correcto posicionamiento, representado en la figura 4.16.



Figura 4. 14. Horno de Ensayo.



Figura 4. 15. Vista superior del horno de ensayo.



Figura 4. 16. Brazo de Soporte.

Es importante destacar, que para la realización de ensayos nominalmente isotérmicos se desea que los indentores y la probeta a ensayar se encuentren a la misma temperatura. Se ha demostrado que al no cumplir esta condición, la transferencia de calor entre estos elementos influye en la deformación del espécimen ^[7]. Teniendo en cuenta que parte del indentor se encuentra dentro del horno y otra parte está en contacto con el medio ambiente y con la base refrigerada, fue necesario añadir una fuente de calor adicional a estas piezas para lograr la temperatura uniforme. Por esta razón en cada indentor se introdujo una resistencia eléctrica tipo cartucho diseñada por la empresa RETERMOF C.A, capaz de elevar la temperatura de los indentores hasta 500°C (Figura 4.17 y 4.18).



Figura 4.17. Resistencia y Termostato.



Figura 4.18. Resistencia Tipo Cartucho.

4.4.2 “Chiller”

Este equipo será el encargado del enfriamiento del fluido de intercambio destinado a ingresar en la base refrigerada. La capacidad nominal del “chiller” es de 5 toneladas de refrigeración. Si la temperatura del aire que entra al condensador se encuentra alrededor de 25°C, la temperatura de salida del agua será de aproximadamente 5°C. El caudal de operación del equipo es de 12 GPM (45,42 litros por minuto) por lo que, comparando esta capacidad con la requerida para la refrigeración del dispositivo de compresión plana (aproximadamente 20 litros por minuto), podemos asegurar que el “chiller” cubrirá la demanda de refrigerante. A continuación se muestra una fotografía del mismo en la figura 4.19.



Figura 4.19. Fotografía del “Chiller.”

4.4.3 O-ring

Es un anillo de goma el cual es usado como sello mecánico. Puede ser estático, cuando las piezas no tienen movimiento ó dinámico, de vaivén, oscilante o rotativo. Son implementos de bajo peso y costo reducido.

Para prevenir la fuga de fluido de intercambio en la base refrigerada, se seleccionó un “O-ring” de 84 mm de diámetro interno, con un espesor de 3 mm. El mismo es capaz temperaturas de hasta 120°C. La imagen de este elemento se puede apreciar en la figura 4.20.

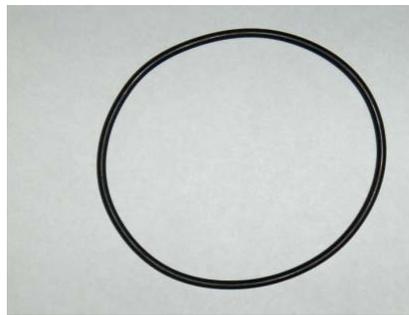


Figura 4. 20. O-ring

4.4.4 Termocuplas.

Para registrar la temperatura, tanto en la probeta como en los indentores, se emplearán termocuplas tipo K (Cromel-Alumel), las cuales operan en un intervalo de temperatura que va desde -200°C hasta 1200°C. Éste tipo de sensor de temperatura tiene la ventaja de poder ser fabricado en diferentes formas, tamaños y diámetros; ajustándose a los requerimientos del usuario.

Las termocuplas destinadas a registrar la temperatura en la probeta e indentores tendrán 1 mm de diámetro.

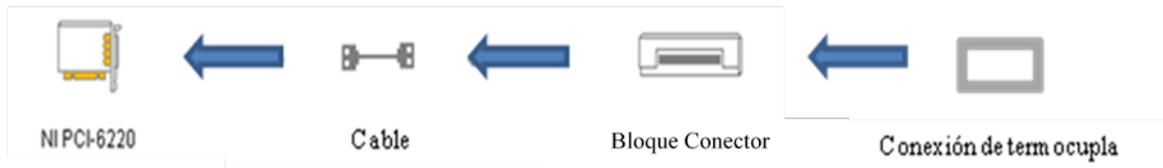
4.4.5 Sistema de Recolección de Datos

Este sistema, tal y como su nombre lo indica, se encarga de la recolección en tiempo real de los datos relacionados con la temperatura, para lo cual es necesaria la utilización de una serie de equipos, los que se enumeran en la tabla número 4.9.

Tabla 4. 9. Sistema de Recolección de datos.

Equipo	Cantidad
NI PCI-6220 (16 AI, 24 DIO)	1
SHC68-68-EPM Shielded Cable, 68-D-Type to 68 VHDCI Offset, 2 m	1
SCC-68 I/O Connector with 4 SCC Module Slots	1
SCC-TC02 Thermocouple Input Module, with Screw Terminals	3

La Forma de conectar este sistema se puede apreciar en la figura 4.21.

**Figura 4. 21.** Esquema de Conexión.

4.4.6 Tornillería

Para la unión de las diferentes piezas del dispositivo de compresión plana se usaron tornillos Allen. Los mismos son avellanados con cabeza cilíndrica o cónica, que utilizan una llave especial, denominada llave Allen, que encaja en un orificio hexagonal que se encuentra en la parte superior.

Estos tornillos fueron aplicados en la unión entre la base refrigerada y la camisa, mediante seis tornillos Allen M8 con sus respectivas arandelas de presión y tuercas. Dos M8 para unir el disco del indector con la base refrigerada y por último en el dispositivo de transporte en la unión del bloque fijo con la base se usarán dos M12 (observar apéndice 1).

Para unir la base refrigerada con el acople y para realizar labores de mantenimiento en el ajuste a presión con la camisa, se usaron tornillos prisioneros M8. Los mismos son dispositivos mecánicos con rosca y sin cabeza que sirven para impedir el movimiento entre piezas. El tornillo prisionero pasa por la rosca de la primera pieza y tiene una punta que presiona firmemente la segunda, impidiendo de esta manera el movimiento.

4.4.7 Papel de empaadura:

Las empaaduras metálicas (bronce) garantizan un sellado eficiente bajo condiciones extremas de temperatura y presión. Se encuentran disponibles en varios grosores, desde 1 a 3 mm. Para garantizar la hermeticidad en la unión entre la base refrigerada y la camisa se usará un papel de empaadura de bronce de 1 mm.

4.4.7.1 Mantenimiento de la unión apornada.

Tomando en cuenta que en nuestro sistema no se ha contemplado ningún tipo de tratamientos del agua de refrigeración, bien sea, desmineralización, desionización e incluso desoxigenación; consideraremos el sistema en condición hermética, oxigenado con temperaturas de moderadas a elevadas. Ahora bien, en condiciones hermeticidad y agua saturada de oxígeno, se podría calcular (suponiendo que solamente se forme Fe_2O_3) la pérdida de metal promedio para un acero estructural, la cual estaría alrededor de 0,0006 cm/año. Este valor podría ser elevado en nuestro caso, en principio por dos razones fundamentales; (1) ya que para este tipo de sistemas el volumen de agua tendría que ser muy grande incluso asumiendo, altos valores de oxígeno disuelto, para garantizar la reposición del oxígeno, mermada por la activación de las reacciones catódicas, lo cual no sería el caso de nuestro diseño, por manejar pequeños caudales de agua de refrigeración, en virtud de lo anteriormente expuesto, con este valor estaríamos subestimando el diseño. (2) Por otra parte, el acero aquí utilizado (AISI 420) presenta altos contenidos de cromo, alrededor de 14%, por lo que esperaríamos un comportamiento pasivante en el mismo ante la presencia de oxígeno, y asumiendo la ausencia de aniones agresivos, que podrían atentar contra la estabilidad de la capa pasivante rica en cromo.

No obstante, en función de consideraciones asociadas a la corrosión de los dispositivos en contacto con medios acuosos, es que se establecerán los tiempos para la realización de mantenimientos preventivos, el cual no estará condicionado definitivamente por disolución anódica (bien sea por oxígeno, medios alcalinos o ácidos), sino más bien por los tiempos de vida útil y la correspondiente permeabilidad de los sellos, aquí utilizados, entendiendo el fenómeno como de corrosión en hendiduras, que son más bien aspectos

geométricos, los que por activación de pilas de aireación diferencial, atentarían definitivamente en contra de la integridad física del dispositivo. Ésta consideración se hace en virtud de que es bien conocido que en metales pasivantes, las uniones ocluidas son factores críticos, que afectan su buen desempeño en medios acuosos.

4.5 Construcción del dispositivo

Una vez completadas las fases de diseño, selección de las propuestas más convenientes e ingeniería de detalle, se procedió a la elaboración de los planos para la posterior construcción de cada una de las piezas. Es necesario aclarar que una vez iniciado el proceso de mecanizado fue necesario hacer cambios menores a los diseños iniciales con el fin de adaptarnos a la realidad de los procesos de fabricación que serían ejecutados a fin de culminar satisfactoriamente los diversos componentes. Estas decisiones fueron tomadas gracias al asesoramiento del personal encargado de la fabricación. Fue así como una vez seleccionados los materiales para los diversos elementos se procedió a aplicar diversas operaciones de maquinado.

Las operaciones de maquinado aplicadas para la producción de los dispositivos fueron: torneado, fresado, taladrado y rectificado.

4.5.1 Torneado.

Durante el torneado se usa una herramienta con un borde cortante simple, destinado a la remoción de material de la pieza de trabajo, la cual se encuentra girando con el fin de dar forma a la misma ^[25]. En este proceso la pieza es sometida a un régimen de giro mientras que la herramienta realiza el movimiento de avance tal y como se muestra en la figura 4.22.

El torneado se lleva a cabo en una máquina denominada torno, la cual suministra la potencia para imprimir el movimiento de giro a una velocidad de rotación determinada. Con un avance de la herramienta y profundidad de corte especificados. ^[25].

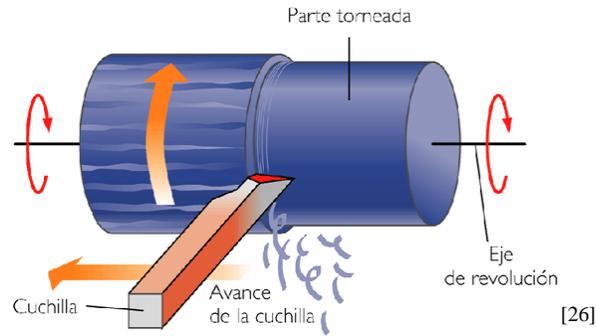


Figura 4. 22. Torneado.

Esta operación fue utilizada en la fabricación de la base refrigerada, disco del indentor, camisa y acople. Todas estas piezas partieron de tochos cilíndricos del material anteriormente especificado y mediante el uso de este proceso se maquinaron hasta sus dimensiones finales. A continuación se muestran fotografías de las piezas construidas bajo este proceso (fig 4.23, 4.24, 4.25)



Figura 4. 23. Camisa montada en el torno.



Figura 4. 24. Base Refrigerada.



Figura 4. 25. Disco del Indentor.

4.5.2 Fresado

Por otra parte, el fresado es la operación de maquinado donde se hace pasar una herramienta giratoria, con múltiples bordes cortantes a través de una pieza. Tal y como se puede observar en la figura 4.26, el eje de rotación de la herramienta es perpendicular a la dirección de avance de la misma ^[27].

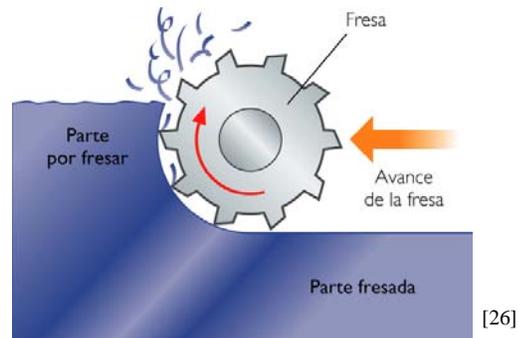


Figura 4. 26. Fresado.

La perpendicularidad entre el eje de la herramienta y la dirección del avance es la característica que diferencia al fresado y el taladrado, siendo este último un proceso para la creación de agujeros redondos en una pieza.

Este proceso fue aplicado para el mecanizado de los indentores y para el asiento del mismo en el disco como muestran las figuras 4.27 y 4.28 respectivamente.



Figura 4. 27. Indentor construido.



Figura 4. 28. Cavidad mecanizada por fresado.

4.5.3 Taladrado

El taladrado se realiza por lo general con una herramienta cilíndrica, denominada broca, la cual posee dos bordes cortantes en su extremo, con la finalidad de balancear las

fuerzas cortantes y reducir al mínimo la flexión; las acanaladuras helicoidales sirven para eliminar las virutas ^[28].

La broca avanza paralela a su eje de rotación dentro de la pieza estacionaria ^[25].

Los agujeros destinados a la colocación de tornillos en el disco del indentor (figura 4.29) e indentor (figura 4.30), los agujeros del acople y aquellos realizados en la base refrigerada, fueron realizados por taladrado.



Figura 4. 29. Agujeros hechos por taladrado.



Figura 4. 30. Los agujeros del indentor fueron realizados por el proceso de taladrado.

4.5.4 Maquinado por Electrodescarga

El maquinado por electrodescarga es uno de varios procesos que utiliza energía termoeléctrica para eliminar material de una pieza de trabajo mediante fusión o vaporización de partes seleccionadas.

Este proceso es utilizado para producir agujeros, formas, perfiles o cavidades, en una pieza de trabajo conductora de electricidad, mediante la aplicación controlada de descargas eléctricas de alta frecuencia, para vaporizar y fundir el material de la pieza de trabajo en un lugar específico ^[28].

La cavidad de la base refrigerada destinada a la refrigeración fue construida mediante este proceso. En la figura 4.31 se muestra la camisa instalada en la máquina de corte por hilo.



Figura 4. 31. Los agujeros del indenter fueron realizados por el proceso de taladrado.

4.5.5 Rectificado

Es un proceso de remoción de virutas que usa un grano abrasivo como herramienta de corte. Esta operación se lleva a cabo en una máquina denominada rectificadora ^[27].

La máquina rectificadora dispone, a modo de herramienta, de una muela abrasiva que pule la superficie de una pieza. Para ello, la muela va girando sobre la superficie rugosa, mientras la pieza se va desplazando en una dirección determinada. Las muelas pueden tener diferentes tamaños de grano: el muy grueso, con el que se desbasta la superficie; el medio y el fino, con los que se consiguen acabados finos; y el muy fino o el superfino, que permiten pulir una superficie logrando obtener en ella poca rugosidad. En la figura 4.32 se puede observar un esquema de dicho proceso.

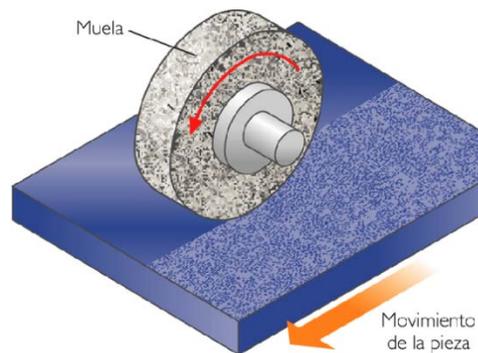


Figura 4. 32. Rectificado.

4.5.6 Soldadura

Por otra parte, la unión de las barras que compondrán el chasis para el soporte del mecanismo de transporte, se realizaría a través de la soldadura. Este es un proceso mediante el cual se pueden unir de forma permanente dos componentes mediante la aplicación de calor, presión o la combinación de ambos todo esto con el fin de obtener una única pieza.

El proceso de soldadura con aluminio es más complicado en comparación a soldar acero ya que además de ser suave y muy dúctil, al fundir se forman óxidos rápidamente, creando un problema en la soldadura ^[29].

El aluminio puede ser soldado con un electrodo de la clase A1-43 y debe usarse polaridad inversa. Estos electrodos tienen un elemento llamado silicón en el revestimiento el cual previene la oxidación excesiva y ayuda a disolver cualquier óxido que pudo haberse formado durante el proceso de soldadura. Cuando se usan estos electrodos se debe

mantener un arco pequeño, de hecho, el revestimiento debe estar tocando ligeramente el aluminio fundido ^[29].

4.6 Tratamiento térmico

A las piezas mencionadas anteriormente se les aplicaron tratamientos térmicos. A continuación se presenta una descripción de los métodos usados.

4.6.1 Templado.

Sí los aceros al carbono son enfriados rápidamente a partir de sus temperaturas críticas superiores, estos experimentarán un aumento apreciable en su dureza. El templado final dependerá exclusivamente del contenido de carbono y de la rapidez de enfriamiento. El método para enfriar se escoge de acuerdo con la rapidez a la que ha de ser enfriado el acero a fin de lograr determinadas propiedades ^[30].

4.6.2 Revenido.

Un acero simple al carbono endurecido al máximo, es frágil y en él se crean esfuerzos por templado. En tal situación este material es de escaso uso práctico y se le recalienta o reviene para reducir los esfuerzos y la fragilidad ^[30].

Cabe destacar que el mecanizado de las piezas tuvo que realizarse en dos etapas. La primera se realizó dejando algunas dimensiones sobre dimensionadas en varias centésimas de milímetro ya que al realizar el tratamiento térmico es probable que las mismas experimenten una pequeña deformación, que en los casos del ajuste a presión entre la base refrigerada y la camisa; y deslizantes (entre el indentor y el disco, entre el disco y la base refrigerada y por último entre la base refrigerada y el acople) pueden ser muy perjudiciales. Por esta razón la segunda etapa del mecanizado se realizará luego de someter las piezas al tratamiento térmico de temple y revenido para así alcanzar las dimensiones finales que garantizarán un ajuste apropiado.

CAPÍTULO V-
MANUAL DE OPERACIONES

Procedimiento para el ensamblaje del dispositivo de compresión plana.

1. Colocar el papel de empacadura en la zona de contacto entre la base refrigerada y la camisa como se indica en la figura 5.1.



Figura 5. 1. Colocación del papel de empacadura.

2. Introducir la base refrigerada a presión dentro de la camisa. Este ajuste debe hacerse mediante el uso de una prensa.
3. Colocar los 6 tornillos M8 en la unión entre la base refrigerada y la camisa.
4. Unir la herramienta al disco del indentor mediante un tornillo Allen M12.
5. Unir el ensamble indentor-disco a la base refrigerada mediante dos tornillos Allen M8, completando así el dispositivo de compresión, como se muestra en la figura 5.2.

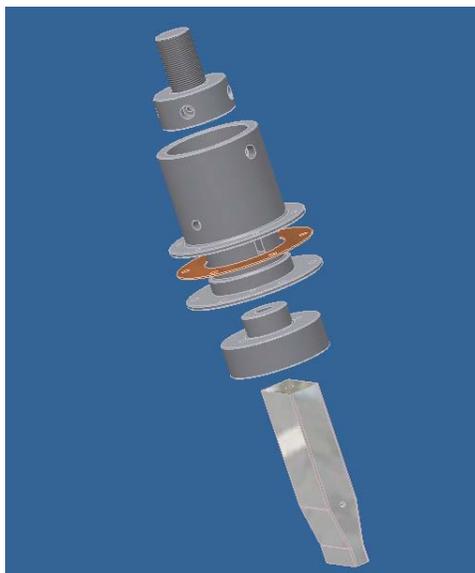


Figura 5. 2. Esquema de la instalación del dispositivo de compresión.

6. Unir el acople a la máquina universal de ensayos mecánicos.
7. Colocar el conjunto armado en la máquina universal de ensayos.
8. Instalar las mangueras provenientes del “chiller” en la base refrigerada y las resistencias eléctricas tipo cartucho en los indentores.
9. Colocar las termocuplas en los indentores.

Una vez ensamblado el dispositivo de compresión plana, tal y como se muestra en la figura 5.3, se debe proceder al montaje del mecanismo de transporte.

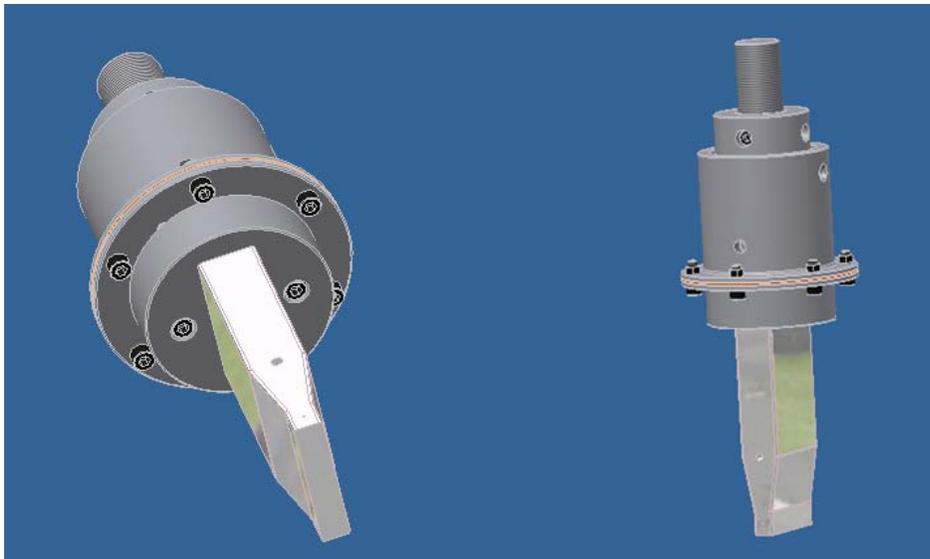


Figura 5. 3. Dispositivo de compresión plana ensamblado.

10. Ubicar el chasis en la posición adecuada respecto a la máquina universal de ensayos mediante el uso de 8 tornillos Allen M11, los cuales deberán distribuirse en las dos patas.
11. Colocar la chapa móvil del mecanismo de transporte en la placa del chasis mediante, un tornillo Allen M12, aplicando un apriete que permita la rotación relativa entre ambas.
12. Unir el bloque fijo a la base móvil mediante dos tornillos Allen M12.
13. Introducir los dos ejes calibrados en los agujeros del bloque fijo.

14. Colocar los dos bujes de teflón en los extremos de los ejes calibrados más cercanos al horno.
15. Instalar el soporte del sistema de agarre de la probeta mediante dos tuercas M15, como se muestra en la figura 5.4.

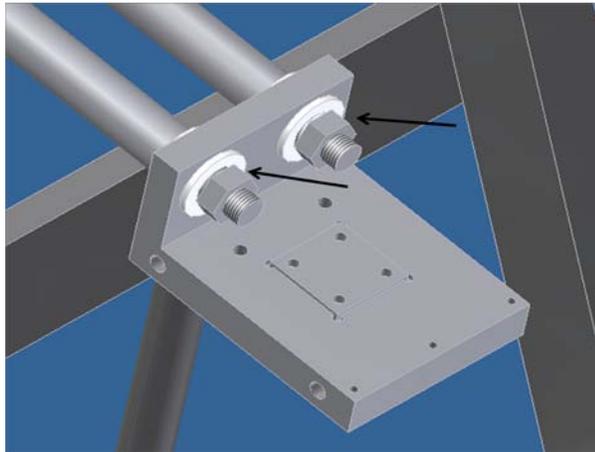


Figura 5. 4. Colocación de tuercas.

16. Incorporar las tenazas encargadas del soporte de la probeta, mediante 2 tornillos M8.
17. Colocar la puerta del horno sobre el soporte del sistema de agarre.
18. Acoplar las mangueras de refrigeración del sistema de agarre de la probeta.
19. En el extremo opuesto del mecanismo de transporte se debe colocar el soporte para el mango de agarre (figura 5.5).

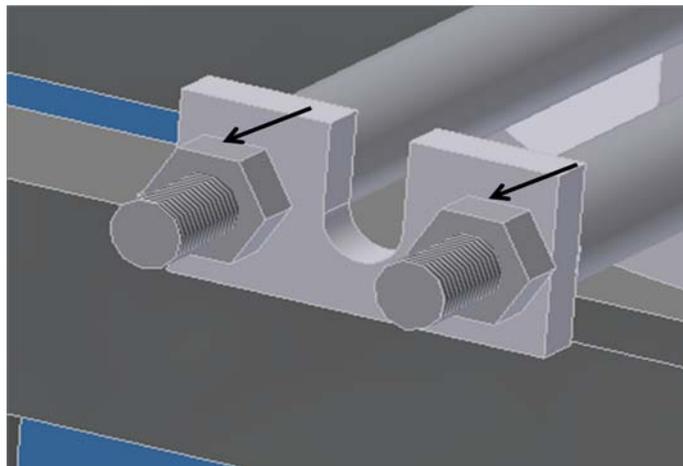


Figura 5. 5. Colocación del soporte para el mango.

20. Alinear los indentores y el mecanismo de transporte presentado la pieza diseñada para dicha función, como se muestra en la figura 5.6.

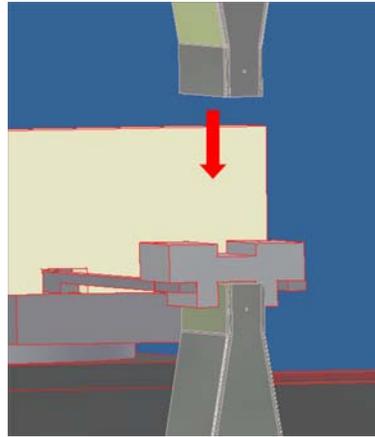


Figura 5. 6. Alineación de indentores.

21. Colocar los topes de avance y de giro en el mecanismo de transporte, para así fijar la posición final del mismo cuando la probeta esté ubicada para realizar el ensayo.
22. Colocar la barra de soporte del horno de ensayo en la máquina universal de ensayos mecánicos (figura 5.7).

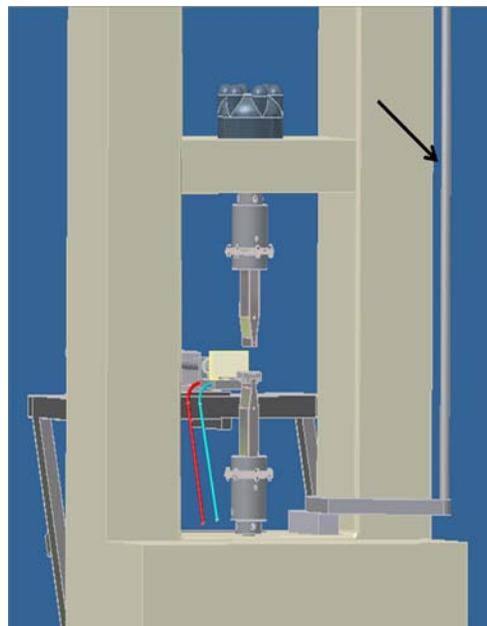


Figura 5. 7. Colocación de la barra de soporte del horno.

23. Montar el horno de ensayo y colocarlo en posición.
24. Colocar en la posición adecuada el horno de precalentamiento.
25. Abrir el flujo de refrigerante hacia la base y mecanismo de transporte.
26. Colocar la termocupla que registra la temperatura en la probeta, y conectar la misma al módulo destinado para la recolección de información.
27. Introducir la probeta en el horno de precalentamiento.
28. Introducir los indentores en el horno de ensayo.
29. Fijar las temperaturas deseadas en ambos hornos y en las resistencias eléctricas.
30. Encender ambos hornos y resistencias eléctricas.
31. Esperar hasta alcanzar temperaturas similares entre la probeta en el horno de precalentamiento y los indentores en el horno de ensayo.
32. Una vez alcanzada la temperatura deseada debe acoplarse el mango del dispositivo de transporte sobre el soporte y extraer la probeta del horno de precalentamiento.
33. Girar la base móvil del dispositivo de transporte y realizar el movimiento de avance para colocar la probeta en la posición adecuada para el ensayo.
34. Esperar hasta alcanzar temperaturas uniformes entre las herramientas y el espécimen.
35. Realizar la compresión y obtener información del ensayo. (temperatura, carga, desplazamiento).
36. Apagar los equipos de calentamiento.
37. Mover el indentor superior liberando así la probeta.
38. Extraer la probeta del horno de ensayo.
39. Cerrar el flujo de refrigerante una vez alcanzada la temperatura ambiente en los indentores.
40. Tratamiento de datos.

***CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES***

Conclusiones

Una vez concluido el proceso de desarrollo del dispositivo de compresión plana tipo Ford y por ende superadas todas las etapas del proceso de diseño, se puede afirmar que durante la ejecución de cualquier proyecto de esta índole pueden presentarse un sin número de inconvenientes, los cuales pueden ser resueltos de una forma más eficaz a partir de un programa de trabajo coherente, tal como el realizado en el presente trabajo.

El establecimiento de mesas de trabajo es de suma importancia en cada una de las fases del proceso de diseño. En muchas ocasiones, la necesidad de resolver un problema no proviene del diseñador, por lo que el mejor punto de partida se encuentra en la implementación de una comunicación efectiva entre éste y el usuario, de forma que ambas partes contribuyan a generar la solución óptima a la necesidad planteada. A partir de este momento, se puede proceder a la formulación del problema. El programa de trabajo anteriormente mencionado, debe incluir una revisión bibliográfica exhaustiva, enfocándose principalmente en antecedentes que puedan servir de punto de partida para el desarrollo del proyecto. Es necesario aclarar que el surgimiento de nuevas ideas no debe verse condicionado por las soluciones previamente aplicadas, es decir, se debe tratar de no contaminar las nuevas propuestas obtenidas de la tormenta de ideas, con los antecedentes encontrados.

También se debe tener en cuenta que el poseer conocimientos previos acerca de diversos procesos de fabricación facilita la concepción de ideas factibles para su posterior construcción. Es importante considerar que al momento de la selección de las variables que permitirán la evaluación de las diversas propuestas, así como su ponderación, deben ser tomadas en cuenta las opiniones de aquellos involucrados en la construcción, diseño y financiamiento del producto final. Tal como se mencionó en el capítulo dedicado a la construcción del equipo, en ocasiones es necesaria la aplicación de pequeños ajustes una vez iniciado el proceso de fabricación con el fin de culminar satisfactoriamente la elaboración de los elementos, por lo que se hace imperativa la necesidad de permanecer en contacto con los encargados de la construcción.

Por otra parte, se pudo comprobar que la investigación de mercado juega otro papel importante durante el desarrollo de cualquier idea, ya que en ocasiones las posibles soluciones del diseñador pueden requerir de elementos que impliquen un aumento en el costo final del equipo o incluso un retraso en la culminación del mismo. De allí, la necesidad de búsqueda de posibles proveedores, los cuales pueden aclarar las dudas que se irán presentando a medida que se avanza en el proceso de diseño, como un simple precio, el tiempo de entrega de un material o si en realidad existe en el mercado un componente similar al exigido en el diseño.

En otro orden de ideas, se puede aseverar que este es el primer dispositivo de compresión plana tipo Ford que se construye en Venezuela, capaz de llevar a cabo este tipo de ensayos a temperaturas hasta de 500°C. Por lo tanto, es posible que este diseño sea promocionado para la construcción de dispositivos similares en otros centros de investigación y laboratorios industriales, a fin de disponer de herramientas experimentales que permitan determinar el comportamiento mecánico de las aleaciones investigadas bajo tales condiciones de deformación con miras a utilizar esta información en el análisis de procesos de conformado de metales.

Una vez el dispositivo se encuentre en funcionamiento, la Fundación Instituto de Ingeniería podrá realizar los ensayos correspondientes para determinar las relaciones constitutivas de las aleaciones de aluminio de uso naval y proponerle a las empresas nacionales productoras de aluminio programas tentativos de laminación en caliente de este tipo de materiales a fin de comenzar la producción de estas chapas en el país.

Recomendaciones.

Con el fin de mejorar el dispositivo y realizar de una manera eficiente el uso del mismo, se plantean algunas recomendaciones.

- El Instituto de Ingeniería debe realizar un control de calidad de las piezas construidas para así garantizar la correcta fabricación y por ende, funcionamiento de las mismas.
- Leer el manual de operaciones antes de colocar en operación el dispositivo de compresión plana tipo Ford a temperaturas moderadas.
- Ajustar las dimensiones del mecanismo de transporte una vez realizado el montaje del dispositivo de compresión plana, ya que las dimensiones actuales fueron obtenidas mediante una simulación computarizada de la máquina de ensayos, por lo tanto estas deben ajustarse con una medición real con el dispositivo instalado.
- Seleccionar la ubicación óptima del “chiller”, de manera que no se encuentre muy alejado de la habitación donde se realizarán los ensayos de compresión plana. De esta forma se evitará transferencia de calor excesiva entre el agua refrigerada y el medio ambiente, además de reducir las pérdidas hidráulicas.
- Solicitar los manuales de uso, tanto de las resistencias eléctricas como de los hornos, a sus respectivos fabricantes.
- Instalar un software que permita el manejo de la data proveniente del bloque conector.
- Se recomienda el uso de un software que permita observar la variación de la temperatura en función del tiempo a medida que transcurre el ensayo, y pueda guardarlos en formato de archivos Excel, para así tener un manejo más cómodo de los mismos.
- Cambiar la forma de sujeción de las probetas existentes al propuesto en este trabajo, haciendo perforaciones tal y como indican los planos de probeta modificada (plano 14). Mientras que para ensayos futuros, se recomienda exigir las dimensiones de la probeta recomendada (plano 13).

- Calibrar las termocuplas a usar en el ensayo con los dispositivos registradores de temperatura de los hornos.
- Consultar con el proveedor del papel de empacadura sobre la vida útil de la misma, para así realizar mantenimientos preventivos o correctivos según sea el caso.
- Calcular el coeficiente de fricción experimentalmente, antes de realizar el primer ensayo de compresión plana tipo Ford.
- Aplicar la mezcla de grasa grafitizada con disulfuro de Molibdeno como lubricante sobre las superficies de trabajo de la probeta con antelación al ensayo de compresión plana. En el caso de los ensayos en muestras de aluminio, 30 minutos es suficiente.
- Realizar un estudio térmico especializado para el caso de ensayos de compresión en aceros (temperaturas alrededor de los 1150°C), mediante métodos computarizados, para calcular el flujo de refrigerante a implementar.

APÉNDICE

APÉNDICE

TABLA A-1. Diámetros y áreas de roscas métricas de pasos bastos y finos (todas las dimensiones en mm.) ^[14].

Diámetro mayor nominal, d	Serie de paso basto			Serie de paso fino		
	Paso P	Área de esfuerzo de tensión, A_T	Área al diámetro menor, A_r	Paso P	Área de esfuerzo de tensión, A_T	Área al diámetro menor, A_r
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.50	5.03	4.47			
3.5	0.60	6.78	6.00			
4	0.70	8.78	7.75			
5	0.80	14.2	12.7			
6	1.00	20.1	17.9			
8	1.00	36.6	32.8	1.00	39.2	36.0
10	1.25	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.50	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	1.75	115	104	1.50	125	116
16	2.00	157	144	1.50	167	157
20	2.00	245	225	1.50	272	259
24	2.50	353	324	2.00	384	365
30	3.00	561	519	2.00	621	596
36	3.50	817	759	2.00	915	884
42	4.00	1120	1050	2.00	1260	1230
48	4.50	1470	1380	2.00	1670	1630
56	5.00	2030	1910	2.00	2300	2250
64	5.50	2680	2520	2.00	3030	2980
72	6.00	3460	3280	2.00	3860	3800
80	6.00	4340	4140	1.50	4850	4800
90	6.00	5590	5360	2.00	6100	6020
100	6.00	6990	6740	2.00	7560	7470
110				2.00	9180	9080

RESEÑAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dieter, George, (1961). Mechanical Metallurgy, Tokyo: McGraw-Hill.
- [2] Dastko, Joseph, (1967). Material Properties and Manufacturing Processes, 2da. Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [3] ASM International, (2000). ASM Handbook, “Mechanical Testing” Vol. 8, USA.
- [4] Materials Centre, National Physical Laboratory (2002). Measurement Good Practice Guide, “Measuring Flow Stress in Hot Plane Strain Compression Tests” No 27, United Kingdom.
- [5] Gere, James,(2006). Mecánica de Materiales, 6ta Ed. México: Thomson.
- [6] Mirza, M.S. Sellars, C.M. (2001).Modelling the Hot Plane Strain Compression Test Part 2- Effect of Friction and Specimen Geometry on Spred. Materials Science and Technology. Vol. 17: 1142-1148.
- [7] Mirza, M.S. Sellars, C.M. (2007).Modelling the Hot Plane Strain Compression Test Part 3- Effect of Asymmetric Conditions. Materials Science and Technology. Vol. 23: 567-575.
- [8] Mondolfo, L.F. (1979). Aluminium Alloys Structures and Properties, London: The Butterworth Group. p.p. 806.
- [9] WILSON, W.R., (1.979). Friction and Lubrication in Bula Metal-Forming Processes journal of Applied Metal Working, Vol. 1, N 1, p.p. 7-19.
- [10] Rowe, Geoffrey W., (1.972). Conformado de los Metales, Bilbao: Urmo. p.p. 48-51, 101-115, 330-350.
- [11] Hatch, John, (1984). Aluminium Properties and Physical Metallurgy, USA: American Society for Metals. p.p. 245, 356,357.
- [12] ASM International, (2000). ASM Handbook, “Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials” Vol. 2, USA.
- [13] Starr, Martin, (1970). Diseños de Productos y Teoría de la Decisión, México D.F.: Herrera Hermanos Sucesores S.A. p.p. 27, 30, 112.
- [14] Shigley, J.E. (2002). Diseño de ingeniería mecánica. 6ta Ed. México: McGraw-Hill.

- [15] Krick, E.V. (1984). Introducción a la Ingeniería y al Diseño en la Ingeniería. 2da Ed, México: Limusa.
- [16] U.F. Kocks, J. Eng. Mater. Technol, 1976, Vol. 98, pag. 76
- [17] Straneo, S.L. (1965). El Dibujo Técnico Mecánico, México D.F.: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana. p.p. 191,192.
- [18] Cengel, Yunus A. (2004). Transferencia de Calor. 2da Ed, México D.F.: Mc Graw Hill.
- [19] Incropera, Frank p. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta Ed. México: Prentice Hall.
- [20] Barder, Oliver, (1.969). Diccionario Enciclopédico de Metalurgia, Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A, p.p. 30, 31, 449-452.
- [21] Apraiz, J.,(1.986). Aceros Especiales y Otras Aleaciones, Madrid: Dossat S.A., p.p. 6-7, 22, 53, 83, 87-92, 96, 97, 3335-340, 342-344.
- [22] ASM International, (2000). ASM Handbook, "Properties and Selection Irons, Steels and High-Performance Alloys" Vol. 1, USA.
- [23] Servicio Industrial Aceros Sisa. Acero AISI H13. Disponible: <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20H13.pdf> {Consulta: 2009, Febrero 26}.
- [24] Servicio Industrial Aceros Sisa. Acero AISI 420. Disponible: <http://www.sisa1.com.mx/pdf/CSM%20420%20XL.pdf> {Consulta: 2009, Febrero 26}.
- [25] Groover, Mikeel O., (1997), Fundamentos de Manufactura Moderna, materiales, Procesos y Sistemas. 2da Ed. México: Prentice Hall Hispanoamérica.
- [26] Kalipedia. Proceso de remoción de materiales. Disponible: http://www.kalipedia.com/popup/popupWindow.html%3Ftipo%3Dimprimir%26titulo%3Dimprimir%2520Art%25C3%25Adculo%26xref%3D20070822klpingtcn_42 {Consulta: 2009, Junio 3}.
- [27] Kalpajian, S. Schmid, S. (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 4ta Ed. México: Prentice Hall.

- [28] Stewart, C. Black, Vic Chiles, Martin S. J, (1999), Principios de Ingeniería de Manufactura. 3ra Ed. México: CECSA;. P 122.
- [29] Pender, James, (1968). Welding, Toronto: McGraw-Hill.
- [30] Timings, R.L. (2001), Tecnología de la Fabricación, Volumen 2, New York: Editorial Alfaomega, p.p. 15-17.