

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

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

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. Lessmann A., Juan J.  
Puentes F., Luis A.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

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

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Eli Saúl Puchi C.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. Lessmann A., Juan J.  
Puentes F., Luis A.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

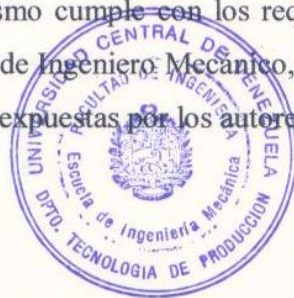
Caracas, 2007

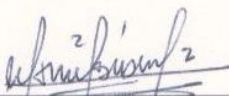
Caracas, 12 de febrero de 2007


Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Espacial de Grado presentado por los bachilleres Juan J. Lessman A. y Luis A. Puentes F., titulado:


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

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



  
Prof. Manuel Martínez  
Jurado

  
Prof. Alberto Pertuz  
Jurado

  
Prof. Eli Saúl Puchi C.  
Tutor Académico

“La vida es tan corta, el arte es tan largo, la oportunidad es fugaz, el experimento traicionero y el juicio difícil.”

*Hipócrates.*

## ***DEDICATORIA***

*A Dios*, por darnos la oportunidad de estar donde estamos.

*A mis padres* por su enseñanza, paciencia y apoyo que me han brindado.

*A mis hermanos* porque siempre han creído en mí.

*A Irene* por su inmenso apoyo en todo momento.

A todos aquellos que omito pero que de una u otra manera ayudaron para la elaboración de este proyecto.

***Juan J. Lessmann***

## ***DEDICATORIA***

Quiero dedicar este trabajo a una persona muy especial, mi mamá; a mi papá con su sabiduría y experiencia que siempre trata de transmitirme; a mis hermanos, que siempre están ahí para mí; a mis abuelos que siempre han creído en mí; a todos mis familiares, amigos y demás personas que han formado parte de mi vida y han ayudado a que sea la persona que soy. A Dios, por hacerlo todo posible.

*Gracias.*

***Luis A. Puentes***

## ***AGRADECIMIENTOS***

*A Dios*, por darnos la fortaleza y voluntad para seguir adelante.

*A nuestros padres*, por habernos ofrecido una vida llena de valores y principios, siendo motivo de inspiración para lograr nuestras metas y seguir creciendo como profesionales.

*A Nuestros Hermanos* y demás familiares que con su solidaridad y apoyo han hecho posible este logro.

*A mi compañero y amigo* (Juan, Luis), por su trabajo y dedicación que hicieron posible la culminación de este proyecto.

A todos los profesores de la *Escuela de Ingeniería Mecánica* que nos ayudaron en el desarrollo de este proyecto.

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

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

Al *Profesor Engels Ochoa*, por brindarnos su orientación y apoyo durante la realización de este trabajo.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en nuestra formación y en el desarrollo de este trabajo.

Lessmann A. Juan J., Puentes F. Luis A.

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

**Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera. Tesis. Caracas, U. C. V.  
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.  
Año 2006, 141 p.**

**Palabras claves:** DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN FUNCIONAMIENTO,  
ENSAYOS A TEMPERATURAS MODERADAS, TRACCIÓN UNIAXIAL.

**Resumen.** El presente trabajo consistió en diseñar, construir y poner en funcionamiento un dispositivo que permitiera realizar ensayos de tracción uniaxial a temperaturas moderadas (hasta de aproximadamente 500°C), el cual se adapta a una máquina universal de ensayos mecánicos, marca Instron, modelo 8502, de la cual se dispone en el Laboratorio Nacional de Referencia para la Evaluación de Propiedades Mecánicas, Desgaste y Corrosión de Materiales ubicado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. El dispositivo consta de dos extensores en los cuales va sujeta la probeta dentro del horno, cada uno de los cuales se acopla a una base que posee una cavidad interna por la que se hace pasar un fluido refrigerante que evita que la temperatura de trabajo de la celda de carga y del sistema hidráulico de la máquina se vea afectado por el calentamiento de la probeta.

El calentamiento de la probeta se logra por medio de un horno eléctrico marca Instron, modelo SF 375D, al cual se le adaptó un equipo PLC para controlar su temperatura y garantizar que el ensayo de tracción se realice a una temperatura estable con no más de 3°C de variación. Como objetivo de este proyecto se estableció una temperatura máxima de aproximadamente 500°C la cual se mide directamente sobre la superficie de la probeta. A su vez, se hace un seguimiento de la temperatura de las bases de los extensores para que estas no superen los 35°C. El fluido refrigerante es agua proveniente de un “chiller” existente, al cual se le hizo una conexión para extraer el caudal necesario para refrigerar los dispositivos.



# *Índice de contenido*

|   |                  |
|---|------------------|
| <b>Índice de contenido</b> .....  | <b><i>i</i></b>  |
| <b>Índice de figuras</b> .....  | <b><i>vi</i></b> |
| <b>Índice de tablas</b> .....   | <b><i>x</i></b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b><i>1</i></b>  |
| <b>CAPÍTULO I</b> .....   | <b><i>4</i></b>  |
| 1.1.- Ensayo de tracción .....  | <b><i>5</i></b>  |
| 1.1.1.- Curva esfuerzo-deformación ingenieril .....                             | <b><i>6</i></b>  |
| 1.1.2.- Curva esfuerzo-deformación real.....                                    | <b><i>8</i></b>  |
| 1.1.2.1.- Esfuerzo real a la carga máxima .....                                 | <b><i>11</i></b> |
| 1.1.2.2.- Deformación real a la fractura.....                                   | <b><i>12</i></b> |
| 1.2.- Ensayos de tracción a altas y a bajas temperaturas.....                   | <b><i>12</i></b> |
| 1.2.1.- Características generales.....  | <b><i>14</i></b> |
| 1.2.2.- Métodos experimentales .....  | <b><i>18</i></b> |
| 1.2.3.- Probeta para ensayos de tracción uniaxial .....                         | <b><i>20</i></b> |
| 1.3.- Características de materiales de ingeniería a temperaturas elevadas.....  | <b><i>21</i></b> |
| 1.3.1.- Características de los aceros inoxidables.....                          | <b><i>24</i></b> |
| 1.3.1.1.- Aceros inoxidables austeníticos .....                                 | <b><i>26</i></b> |
| 1.3.3.- Características de las aleaciones de aluminio .....                     | <b><i>29</i></b> |
| <b>CAPÍTULO II</b> .....  | <b><i>31</i></b> |
| 2.1.- Metodología del diseño. ....  | <b><i>32</i></b> |
| 2.2.- Establecimiento de una necesidad .....                                    | <b><i>33</i></b> |
| 2.3.- Concepción del sistema.....   | <b><i>35</i></b> |
| 2.3.1.- Tormenta de ideas. ....   | <b><i>35</i></b> |
| 2.3.2.- Propuestas para el diseño de extensores y sistema de enfriamiento ..... | <b><i>36</i></b> |
| 2.3.2.1- Propuesta N° 1.....  | <b><i>36</i></b> |
| 2.3.2.2.- Propuesta N° 2.....   | <b><i>37</i></b> |
| 2.3.2.3.- Propuesta N° 3.....   | <b><i>37</i></b> |
| 2.3.2.4.- Propuesta N° 4.....   | <b><i>38</i></b> |
| 2.3.2.5.- Propuesta N° 5.....   | <b><i>39</i></b> |
| 2.3.2.6.- Propuesta N° 6.....   | <b><i>39</i></b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3.2.7.- Propuesta N° 7.....  | 40        |
| 2.3.3.- Análisis de las propuestas.....                                  | 41        |
| 2.3.3.1.- Parámetros a evaluar.....                                      | 41        |
| 2.3.3.2.- Matriz Morfológica.....  | 43        |
| 2.3.4.- Toma de decisiones .....   | 45        |
| 2.4.- Ingeniería de detalles .....                                       | 45        |
| 2.5.- Fabricación del prototipo.....                                     | 46        |
| 2.7.- Puesta en funcionamiento y evaluación final .....                  | 46        |
| <b>CAPÍTULO III.....</b>   | <b>47</b> |
| 3.1.- Desarrollo del equipo .....  | 48        |
| 3.2. - Descripción general del equipo .....                              | 48        |
| 3.3.- Cálculo y selección de los elementos que conforman el equipo ..... | 49        |
| 3.3.1.- Carga máxima de trabajo .....                                    | 51        |
| 3.3.2.- Extensores.....  | 52        |
| 3.3.2.1.- Bases refrigeradas.....  | 52        |
| 3.3.2.2.- Estudio de los pernos de la base:.....                         | 56        |
| 3.3.2.2.1.- Cálculos adicionales .....                                   | 59        |
| 3.3.2.3.- Pasador.....   | 62        |
| 3.3.2.3.- Eje.....   | 63        |
| 3.4.- Cálculos de transferencia de calor .....                           | 67        |
| 3.4.1.- Cálculo del flujo de calor a través de los extensores.....       | 67        |
| 3.5.- Evaluación y puesta en funcionamiento del horno Instron .....      | 76        |
| <b>CAPÍTULO IV.....</b>  | <b>78</b> |
| 4.1.- Selección de materiales. ....                                      | 79        |
| 4.1.1.- Acero Inoxidable AISI 304.....                                   | 79        |
| 4.1.2.- Acero AISI 4340 .....  | 81        |
| 4.1.3.- Controlador .....  | 82        |
| 4.1.4.- Sello para la cavidad de refrigeración .....                     | 82        |
| 4.1.5.- Aislante térmico .....   | 83        |
| 4.1.6.- Sensor de temperatura .....                                      | 83        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.2.- Construcción.....   | 83         |
| 4.2.1.- Bases refrigeradas .....  | 87         |
| 4.2.2.- Pasador .....   | 88         |
| 4.2.3.- Eje.....  | 89         |
| <b>CAPÍTULO V .....</b>   | <b>90</b>  |
| 5.1.- Descripción del equipo.....   | 91         |
| 5.2.- Especificaciones de equipos .....                                       | 91         |
| 5.2.1.- Horno.....  | 91         |
| 5.2.2.- Termocupla .....  | 91         |
| 5.2.3.- Controlador lógico programable (PLC).....                             | 92         |
| 5.3.- Procedimiento para el montaje de la probeta .....                       | 93         |
| 5.4.- Ensayos a temperaturas moderadas .....                                  | 93         |
| 5.5.- Instalación del programa de recopilación de datos .....                 | 96         |
| 5.6.- Plano eléctrico .....   | 97         |
| <b>CAPÍTULO VI.....</b>   | <b>98</b>  |
| 6.1.- Proceso de validación.....  | 99         |
| 6.2.- Cálculo del esfuerzo real, deformación real y tasa de deformación ..... | 100        |
| 6.3.- Datos experimentales .....  | 105        |
| 6.3.1.- Ensayo 1 .....  | 105        |
| 6.3.2.- Ensayo 2 .....  | 106        |
| 6.3.3.- Ensayo 3 .....  | 108        |
| 6.3.4.- Ensayo 4 .....  | 109        |
| 6.3.5.- Ensayo 5 .....  | 111        |
| 6.3.6.- Ensayo 6 .....  | 112        |
| 6.4.- Interpretación de los resultados obtenidos .....                        | 114        |
| <b>CAPÍTULO VII .....</b>   | <b>117</b> |
| 7.1.- Conclusiones.....   | 118        |
| 7.2.- Recomendaciones .....   | 119        |
| <b>Apéndice .....</b>   | <b>120</b> |
| <b>Referencias bibliográficas.....</b>  | <b>124</b> |

ÍNDICE DE CONTENIDO

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Anexos .....</b>                         | <b>126</b> |
| Pieza superior de la base del extensor..... | 127        |
| Pieza Inferior de la base del extensor..... | 129        |
| Eje del extensor.....                       | 132        |
| Pasador .....                               | 133        |
| Dispositivo construido .....                | 135        |

## *Índice de figuras*

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 1.1 Curva esfuerzo-deformación.....</i>  | <i>7</i>  |
| <i>Figura 1.2 Comparación de las curvas esfuerzo-deformación real e ingenieril .....</i>   | <i>10</i> |
| <i>Figura 1.3 Máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8502.....</i>   | <i>14</i> |
| <i>Figura 1.4 Diagramas esfuerzo-deformación para un acero inoxidable 304 .....</i>  | <i>15</i> |
| <i>Figura 1.5 Efecto de la temperatura en la ductilidad y resistencia mecánica .....</i>   | <i>15</i> |
| <i>Figura 1.6 Efecto de la temperatura en la ductilidad y en la resistencia.....</i>   | <i>16</i> |
| <i>Figura 1.7 Probeta cilíndrica para ensayos de tracción uniaxial .....</i>   | <i>21</i> |
| <i>Figura 1.8 Composición y propiedades en la familia de los aceros inoxidables.....</i>   | <i>25</i> |
| <i>Figura 1.9 Resistencia a la tracción de aleaciones de aluminio.....</i>   | <i>29</i> |
| <i>Figura 1.10 Esfuerzos de fluencia de aleaciones de aluminio.....</i>  | <i>30</i> |
| <i>Figura 2.5 Propuesta número 1 .....</i>   | <i>36</i> |
| <i>Figura 2.6 Propuesta número 2 .....</i>   | <i>37</i> |
| <i>Figura 2.7 Propuesta número 3 .....</i>   | <i>38</i> |
| <i>Figura 2.8 Propuesta número 4 .....</i>   | <i>38</i> |
| <i>Figura 2.9 Propuesta número 5 .....</i>   | <i>39</i> |
| <i>Figura 2.10 Propuesta número 6 .....</i>  | <i>40</i> |
| <i>Figura 2.11 Propuesta número 7 .....</i>  | <i>40</i> |
| <i>Figura 3.1 Estados de esfuerzo .....</i>  | <i>50</i> |
| <i>Figura 3.2 Probeta de aluminio para ensayos de tracción .....</i>   | <i>51</i> |
| <i>Figura 3.3 Base del extensor.....</i>   | <i>53</i> |
| <i>Figura 3.4 Distribución de los esfuerzos en una viga sometida a tracción.....</i>   | <i>54</i> |
| <i>Figura 3.5 Esquema de la base de los extensores.....</i>  | <i>54</i> |
| <i>Figura 3.6 Sección transversal A .....</i>  | <i>55</i> |
| <i>Figura 3.7 Sección transversal B .....</i>  | <i>55</i> |
| <i>Figura 3.8 a) Esquema del pasador con las fuerzas de tracción, b) Diagrama de cuerpo libre del pasador y sección transversal.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 3.9 Esquema del eje del extensor.....</i>  | <i>64</i> |
| <i>Figura 3.10 Sección transversal A .....</i>   | <i>64</i> |
| <i>Figura 3.11 Variación de la temperatura en una aleta de sección circular.....</i>   | <i>68</i> |
| <i>Figura 3.12 Balance de energía para una aleta de sección circular uniforme. ....</i>  | <i>68</i> |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Figura 4.1 Torneado</i> .....  | 84  |
| <i>Figura 4.2 Taladrado</i> .....   | 85  |
| <i>Figura 4.3 Fresado periférico</i> .....  | 86  |
| <i>Figura 4.4 Fresado de frente</i> .....   | 86  |
| <i>Figura 4.5 a) Vista inferior y b) vista superior del pie de la base del extensor</i> ..... | 88  |
| <i>Figura 4.7 a) Vista superior y b) vista inferior de la tapa de la base del extensor</i> .. | 88  |
| <i>Figura 4.8 Pasador</i> .....   | 89  |
| <i>Figura 4.8 Eje del extensor</i> .....  | 89  |
| <i>Figura 5.1 Controlador Unitronics M91-2-UA2</i> .....                                      | 92  |
| <i>Figura 5.1 Pantalla de bienvenida</i> .....  | 94  |
| <i>Figura 5.2 Pantalla de temperatura de calentamiento</i> .....                              | 94  |
| <i>Figura 5.3 Pantalla de setpoint de calentamiento</i> .....                                 | 94  |
| <i>Figura 5.4 Pantalla de temperatura de enfriamiento</i> .....                               | 95  |
| <i>Figura 5.5 Pantalla de setpoint de enfriamiento</i> .....                                  | 95  |
| <i>Figura 5.6 Pantalla de temperatura de calentamiento, proceso iniciado</i> .....            | 96  |
| <i>Figura 5.7 Plano eléctrico de la instalación del controlador</i> .....                     | 97  |
| <i>Figura 6.1 Tratamiento térmico para eliminar la condición T6 de la aleación</i> .....      | 99  |
| <i>Figura 6.2 Gráfica Fuerza vs Elongación</i> .....  | 101 |
| <i>Figura 6.3 Sistema de resortes en serie</i> .....  | 102 |
| <i>Figura 6.4 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva</i> .....                             | 105 |
| <i>Figura 6.3 Tasa de deformación vs Deformación</i> .....                                    | 106 |
| <i>Figura 6.5 Tasa de deformación, Temperatura vs Deformación</i> .....                       | 107 |
| <i>Figura 6.7 Tasa de deformación, Temperatura vs Deformación</i> .....                       | 109 |
| <i>Figura 6.8 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva</i> .....                             | 110 |
| <i>Figura 6.9 Tasa de deformación, Temperatura vs Deformación</i> .....                       | 110 |
| <i>Figura 6.10 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva</i> .....                            | 111 |
| <i>Figura 6.11 Tasa de deformación, Temperatura vs Deformación</i> .....                      | 112 |
| <i>Figura 6.12 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva</i> .....                            | 113 |
| <i>Figura 6.13 Tasa de deformación, Temperatura vs Deformación</i> .....                      | 113 |
| <i>Figura 6.14 Esfuerzo vs Deformación de la aleación de aluminio 7075 S</i> .....            | 115 |



|   |            |
|---|------------|
| <i>Figura 6.15 Esfuerzo vs Deformación de la aleación de aluminio 7075 N.....</i>   | <i>116</i> |
| <i>Figura 6.16 Esfuerzo vs Deformación de la aleación de aluminio 7075 y 7075/10%<br/>de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.....</i> | <i>116</i> |
| <i>Anexo 1 Vista frontal .....</i>  | <i>127</i> |
| <i>Anexo 2 Vista inferior .....</i>   | <i>127</i> |
| <i>Anexo 3 Vista superior.....</i>  | <i>128</i> |
| <i>Anexo 4 Vista lateral.....</i>   | <i>128</i> |
| <i>Anexo 5 Corte lateral.....</i>   | <i>129</i> |
| <i>Anexo 6 Vista frontal .....</i>  | <i>129</i> |
| <i>Anexo 7 Vista inferior .....</i>   | <i>130</i> |
| <i>Anexo 8 Vista superior.....</i>  | <i>130</i> |
| <i>Anexo 9 Vista lateral.....</i>   | <i>131</i> |
| <i>Anexo 10 Corte frontal.....</i>  | <i>131</i> |
| <i>Anexo 11 Vista frontal, superior y lateral.....</i>  | <i>132</i> |
| <i>Anexo 12 Vista frontal.....</i>  | <i>133</i> |
| <i>Anexo13 Plano eléctrico de control del horno Instron.....</i>  | <i>134</i> |
| <i>Anexo 14 Eje del extensor y pasador.....</i>   | <i>135</i> |
| <i>Anexo 15 Base de refrigeración del extensor.....</i>   | <i>135</i> |
| <i>Anexo 16 Base y eje del extensor ensamblados.....</i>  | <i>136</i> |
| <i>Anexo 17 Dispositivo para ensayos de tracción a temperaturas moderadas .....</i>   | <i>137</i> |
| <i>Anexo 18 Termocupla insertada dentro de la probeta .....</i>   | <i>137</i> |
| <i>Anexo 19 Ensayo de tracción uniaxial a temperaturas moderadas .....</i>  | <i>138</i> |

## *Índice de tablas*

|  |            |
|--|------------|
| <i>Tabla 1.1 Temperaturas máximas sugeridas en operaciones petroquímicas .....</i>   | <i>23</i>  |
| <i>Tabla 1.2 Temperaturas límites de materiales de tubos de súper calentadores .....</i>   | <i>23</i>  |
| <i>Tabla 1.3 Efectos de la temperatura en el módulo de elasticidad de varios aceros<br/>inoxidables austeníticos .....</i>                             | <i>27</i>  |
| <i>Tabla 1.4 Efectos de la temperatura en la resistencia a la fluencia, ksi (MN/m<sup>2</sup>), de<br/>aceros inoxidables austeníticos .....</i>       | <i>27</i>  |
| <i>Tabla 1.5 Efectos de la temperatura en la resistencia última a la tensión, ksi<br/>(MN/m<sup>2</sup>), de aceros inoxidables austeníticos .....</i> | <i>28</i>  |
| <i>Tabla 2.1. Porcentajes asignados a cada parámetro de evaluación.....</i>  | <i>44</i>  |
| <i>Tabla 2.3 Matriz morfológica (extensores y sistema de enfriamiento) .....</i>   | <i>44</i>  |
| <i>Tabla 4.1 Análisis químico del acero inoxidable austenítico AISI 304, expresado en<br/>% de los elementos.....</i>                                  | <i>80</i>  |
| <i>Tabla 4.2 Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero inoxidable<br/>austenítico 304.....</i>                                   | <i>80</i>  |
| <i>Tabla 4.1 Análisis químico del acero AISI 4340, expresado en % de los elementos .</i>   | <i>81</i>  |
| <i>Tabla 4.2 Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero AISI 4340<br/>.....</i>   | <i>81</i>  |
| <i>Tabla 6.1 Ejemplo de datos generados por la máquina de ensayos .....</i>  | <i>100</i> |
| <i>Tabla A-1 Diámetros y áreas de roscas unificadas de tornillos UNC y UNF .....</i>   | <i>121</i> |
| <i>Tabla A-2 Procedimiento sugerido para determinar la rigidez del sujetador.....</i>  | <i>121</i> |
| <i>Tabla A-3 Parámetros de la rigidez de varios materiales de elementos .....</i>  | <i>122</i> |
| <i>Tabla A-4 Efectos de la temperatura de operación en la resistencia a tensión de<br/>acero .....</i>   | <i>123</i> |

# ***INTRODUCCIÓN***

Al diseñar estructuras y elementos de máquinas, es necesario analizar su comportamiento cuando estén sometidas a las condiciones de operación para poder asegurar un buen funcionamiento durante su vida útil.

Cuando los metales son sometidos a temperaturas elevadas, sus propiedades mecánicas se pueden ver afectadas, disminuyendo la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza, aumentando el alargamiento de rotura y la estricción.

Existen muchas aplicaciones en áreas como la generación de energía, aeroespacial, metal-mecánica, etc., en las que los metales que conforman estructuras, elementos de máquinas, herramientas, entre otros, están sometidos a temperaturas moderadamente altas. Por lo que surge la necesidad de abordar el tema realizando estudios que permitan analizar el comportamiento de los materiales bajo estas condiciones. Esto se puede lograr incorporando sistemas de calentamiento con temperatura controlada en los equipos en los que se realizan los ensayos mecánicos tradicionales, con el fin de simular las condiciones de operación del elemento en estudio, y así obtener información acerca de su desempeño.

Entre los ensayos mecánicos más comunes usados para obtener información sobre la resistencia de los materiales se encuentra el de *tracción uniaxial*, que consiste en someter una probeta normalizada a esfuerzos progresivos y crecientes de tracción en la dirección de su eje hasta que llegue a la deformación plástica y a la consecuente fractura. Este tipo de ensayo se puede realizar en una máquina universal de ensayos mecánicos, que se encargará de aplicar las cargas deseadas a la probeta.

La finalidad de este Trabajo Especial de Grado es el de diseñar y construir un dispositivo que pueda ser acoplado a una máquina universal de ensayos mecánicos, por medio del cual se pueda realizar un ensayo de tracción uniaxial a temperaturas moderadas.

El dispositivo a diseñar debe ser capaz de acoplarse a la máquina universal de ensayos Instron 8502, ajustándose tanto al espacio disponible como a las condiciones de trabajo de la máquina. Debe contar con un sistema de seguimiento y control de temperatura de la cámara de calentamiento, un instrumento que registre de manera precisa la temperatura de la muestra y un sistema de refrigeración para los extensores que proteja a la celda de carga de las altas temperaturas, la cual para este proyecto será de un máximo de 500 °C.

Tanto el diseño como la construcción deben cumplir con los parámetros básicos a evaluar en un proceso de diseño, como son: seguridad, rendimiento, confiabilidad, facilidad de fabricación, bajos costos de operación y mantenimiento entre otros. Todo esto para elaborar un equipo de calidad, manteniéndose dentro del presupuesto destinado a este proyecto.

En los capítulos siguientes se plantea de forma más detallada las características del ensayo de tracción a temperaturas elevadas y los aceros más comunes para aplicaciones que requieren resistencia a altas temperaturas, se establecerán los parámetros para el desarrollo, evaluación y selección del diseño. Siguiendo con un estudio exhaustivo apoyado en cálculos teóricos de cada componente, culminando con los diversos procesos de fabricación, puesta en funcionamiento y evaluación final del equipo.

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

### *1.1.- Ensayo de tracción*

El ensayo de tracción consiste en sujetar una muestra de forma y tamaño específico y someterla a una carga uniaxial que va incrementando gradualmente hasta que ocurre la fractura <sup>(1)</sup>.

Dicho ensayo ha recibido una importante aceptación a nivel mundial, lo que le ha otorgado una gran confianza a su valor y significado. Sus principales ventajas son que el estado de esfuerzo está bien establecido, el procedimiento para realizar el ensayo ha sido cuidadosamente estandarizado y es relativamente sencillo y económico de realizar <sup>(1)</sup>.

Unos de los principales objetivos de llevar a cabo este u otros ensayos mecánicos, es el de determinar la conformidad de los datos obtenidos con las especificaciones de un material. De esta manera, la información que se obtiene puede servir como un medidor de calidad de un producto en comparación con datos obtenidos previamente de otras fuentes <sup>(1)</sup>. Estos datos también pueden ser usados para comparar un material dado con otros materiales y esto junto a otros factores, puede asistir en la decisión de reemplazar o mejorar un material.

Los fabricantes de productos metálicos emplean regularmente los datos de ensayos de tracción para controlar los métodos de manufactura, así como una guía de desarrollo de nuevos materiales.

El ensayo de tracción se usa también para establecer las bases en la selección de materiales para el diseño. Cuando es realizado correctamente en muestras apropiadas, el ensayo de tracción puede ser usado para evaluar propiedades mecánicas fundamentales para su uso en el diseño, aunque hay que acotar que las propiedades de tensión no pueden predecir por sí solas el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de carga <sup>(1)</sup>. Cuando se utiliza un método



estandarizado de ensayo, los resultados obtenidos otorgan una garantía de que el material o pieza en cuestión mostrará un comportamiento satisfactorio cuando se encuentre en servicio.

El ensayo de tracción no está limitado a muestras preparadas, ya que piezas fabricadas o miembros estructurales también pueden ser ensayados. Realizar estos ensayos de forma adecuada en piezas representativas es de gran utilidad para determinar el rendimiento de componentes estructurales sometidos a las cargas de trabajo y observar el desarrollo de puntos de concentradores de esfuerzos y de cargas críticas.

El ensayo de tracción es ampliamente usado para proporcionar información básica sobre la resistencia de los materiales <sup>(1)</sup>. En este ensayo la muestra es sujeta a una fuerza uniaxial que aumenta continuamente mientras que se realizan simulaciones simultáneas de la elongación.

### ***1.1.1.- Curva esfuerzo-deformación ingenieril***

En el ensayo de tracción se construye una curva de esfuerzo-deformación ya sea nominal o real, a partir de mediciones de carga-elongación hechas sobre la muestra (figura 1.1) <sup>(1)</sup>. El esfuerzo nominal,  $S$ , usado en la curva esfuerzo-deformación nominal o ingenieril es el promedio longitudinal de esfuerzos en la muestra. Es obtenido al dividir la carga,  $P$ , entre el área de la sección transversal inicial de la muestra,  $A_0$ .

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (\text{Ec. 1})$$

La deformación nominal,  $e$ , utilizada en la curva esfuerzo-deformación nominal es la deformación lineal promedio, la cual se obtiene dividiendo la elongación de la longitud estándar de la muestra,  $\delta$ , entre su longitud original,  $L_0$ .

$$e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L-L_0)}{L_0} \quad (\text{Ec. 2})$$

Debido a que el esfuerzo y la deformación se obtienen al dividir la carga y la elongación entre factores constantes, la curva esfuerzo-deformación nominal tiene la misma forma que la curva carga-elongación.

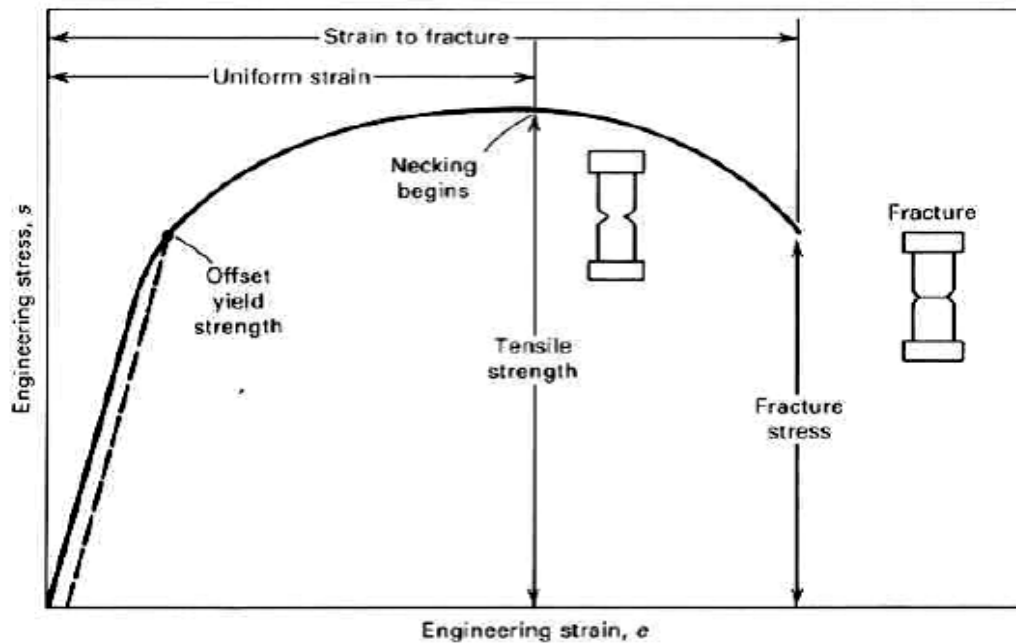


Figura 1.1 Curva esfuerzo-deformación <sup>(1)</sup>

La forma y magnitud de la curva esfuerzo-deformación nominal de un metal depende de su composición, tratamiento térmico, historial de deformación plástica, tasa de deformación, temperatura y estado de esfuerzo impuesto durante el ensayo. Los parámetros usados para escribir la curva esfuerzo-deformación de un metal son la resistencia a la tracción, la resistencia a la fluencia, el porcentaje de elongación y la

reducción de área. Los dos primeros son parámetros de resistencia y los dos últimos indican la ductilidad <sup>(1)</sup>.

La forma de la curva esfuerzo-deformación nominal (figura 1.1), consiste en lo siguiente: en la región elástica el esfuerzo es linealmente proporcional a la deformación. Cuando el esfuerzo excede el valor de resistencia a la fluencia, la muestra comienza a deformarse plásticamente, momento en el que si la carga se reduce a cero la muestra conservaría su deformación. El esfuerzo requerido para producir una deformación plástica aumenta con el incremento de la deformación. El volumen de la muestra (área de la sección transversal x longitud) permanece constante durante la deformación plástica. Mientras que la muestra se elonga, el área de la sección transversal decrece uniformemente <sup>(1)</sup>.

Inicialmente, el endurecimiento por deformación compensa la disminución del área y el esfuerzo continúa incrementándose junto con la deformación. Eventualmente, se alcanza un punto donde la disminución del área de la sección transversal de la muestra es mayor que el incremento de la deformación. Esta condición se alcanza en un punto de la muestra que es ligeramente más débil que el resto <sup>(1)</sup>. Luego toda la deformación plástica se concentra en este punto y en la muestra empieza a aparecer un encuellamiento. Debido a que el área transversal ahora decrece mucho más rápido que lo que aumenta la elongación debido al endurecimiento por deformación, la carga requerida para deformar la muestra cae y el esfuerzo decrece hasta que ocurre la fractura.

### ***1.1.2.- Curva esfuerzo-deformación real***

La curva esfuerzo-deformación ingenieril no da una indicación real de las deformaciones características de un metal debido a que está basada en las dimensiones originales de la muestra y esas dimensiones cambian continuamente durante el ensayo. Además los metales dúctiles a los que se les aplica tensión se

hacen inestables y se les forma un cuello durante el ensayo. En este punto el área transversal de la muestra decrece rápidamente y la carga requerida para continuar la deformación también <sup>(1)</sup>.

El esfuerzo promedio basado en el área original también decrece, lo que ocasiona que la curva esfuerzo-deformación ingenieril caiga a partir del punto de carga máxima. En la práctica la deformación del metal continúa aumentando hasta la fractura, por lo que el esfuerzo requerido para producirla también debería aumentar. Si el esfuerzo real, basado en el área de la sección transversal, es usado, la curva esfuerzo deformación crece continuamente hasta la fractura. Si la deformación se obtiene por medio de mediciones instantáneas, la curva que se obtiene es la de esfuerzo-deformación real. Ésta también es conocida como la curva de flujo, ya que representa las características básicas del flujo plástico de los metales.

El valor mostrado en cualquier punto de la curva de flujo puede ser considerado como el esfuerzo de fluencia para un metal deformado en tensión. Por esto, si la carga es removida en un punto de la curva y luego se aplica nuevamente, el material se comportará elásticamente hasta alcanzar dicho punto. El esfuerzo real,  $\sigma$ , es expresado en términos del esfuerzo ingenieril,  $s$ , por:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} (e + 1) = S(e + 1) \quad (\text{Ec. 3})$$

La derivada de la ecuación 3 considera un volumen constante y una distribución uniforme de la deformación a lo largo de la muestra. Por lo tanto, sólo ser usada hasta el punto donde comienza a formarse el cuello. Después de alcanzada la carga máxima, el esfuerzo real se debe determinar por medio de mediciones de la carga y del área de sección transversal <sup>(1)</sup>.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 4})$$

La deformación real,  $\epsilon$ , se puede determinar a partir de la deformación ingenieril de la manera siguiente:

$$e = \ln(e + 1) = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Esta ecuación es aplicable sólo hasta el comienzo del encuellamiento por las razones mencionadas anteriormente. Al sobrepasar la carga máxima, la deformación real debe estar basada en mediciones del área o diámetro:

$$e = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \ln\left(\frac{\left(\frac{\pi}{4}\right)D_0^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right)D^2}\right) = 2 \ln\left(\frac{D_0}{D}\right) \quad (\text{Ec. 6})$$

La figura 1.2 compara la curva esfuerzo-deformación real con la curva esfuerzo-deformación ingenieril correspondiente. Nótese que debido a las deformaciones plásticas relativamente largas, la región elástica ha sido comprimida en el eje y. En concordancia con las ecuaciones 3 y 5, la curva esfuerzo-deformación real siempre está a la izquierda de la ingenieril hasta que la carga máxima es alcanzada <sup>(1)</sup>.

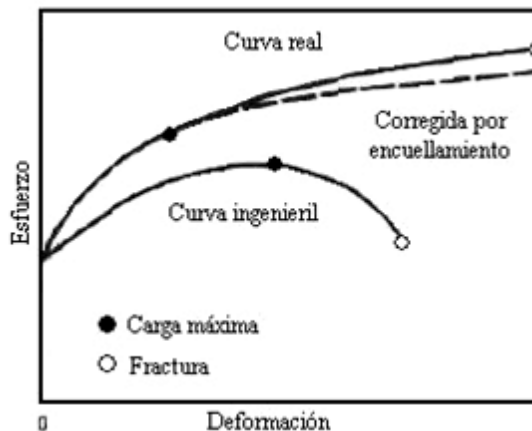


Figura 1.2 Comparación de las curvas esfuerzo-deformación real e ingenieril <sup>(1)</sup>

Sin embargo, más allá de la carga máxima, las deformaciones localizadas en la región del cuello que son usadas en la ecuación 4 exceden por mucho a las deformaciones ingenieriles calculados por la ecuación 2. En muchos casos, la curva de flujo es lineal a partir de la carga máxima hasta la fractura, y en otros su pendiente decrece continuamente. La formación del cuello introduce esfuerzos triaxiales que hacen difícil el poder determinar con exactitud el esfuerzo longitudinal de tensión desde la aparición del cuello hasta que ocurre la fractura <sup>(1)</sup>.

### 1.1.2.1.- Esfuerzo real a la carga máxima

El esfuerzo real a la carga máxima corresponde a la resistencia a la tensión real. Para la mayoría de los materiales, el cuello aparece en la carga máxima a un valor de deformación donde el esfuerzo real es igual a la pendiente de la curva de flujo. Si  $\sigma_u$  y  $\epsilon_u$  denotan al esfuerzo real y la deformación real en el punto de carga máxima cuando el área de sección transversal es  $A_u$ , la resistencia última a la tensión viene dada por:

$$S_u = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (\text{Ec. 7})$$

y

$$\sigma_u = \frac{P_{max}}{A_u} \quad (\text{Ec. 8})$$

Eliminando  $P_{max}$

$$\sigma_u = S_u \frac{A_0}{A_u} \quad (\text{Ec. 9})$$

y

$$\sigma_u = S_u e^{\epsilon_u} \quad (\text{Ec. 10})$$

### ***1.1.2.2.- Deformación real a la fractura***

La deformación real a la fractura,  $\varepsilon_f$ , es la deformación real basada en el área original,  $A_0$ , y el área después de la fractura,  $A_f$ .

$$\varepsilon_f = \ln \left( \frac{A_0}{A_f} \right) \quad (\text{Ec. 11})$$

Este parámetro representa la deformación máxima real que el material puede soportar antes de fracturar y es análogo a la deformación total hasta la fractura de la curva esfuerzo-deformación ingenieril. Debido a que la ecuación 5 no es válida una vez aparece el cuello, no es posible calcular  $\varepsilon_f$  a partir de las mediciones de  $e_f$ . Sin embargo, para muestras cilíndricas la reducción de área,  $q$ , está relacionada con la deformación a la fractura real por:

$$\varepsilon_f = \ln \left( \frac{1}{1-q} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

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

Los ensayos de tracción a temperaturas altas o bajas son realizados como parte de las medidas de control de calidad o estudios de caracterización general para materiales de ingeniería que son utilizados a temperaturas, que van desde las relacionadas con aplicaciones criogénicas, como los sistemas de refrigeración líquido-gas, a extremadamente altas, como en las turbinas de gas o en los propulsores de los cohetes <sup>(1)</sup>.

Un ensayo de tracción tiene muchas ventajas. Se usa una probeta de diseño simple que puede ser fundida directamente o maquinada. Las mediciones pueden ser realizadas con equipos que están disponibles en la mayoría de los laboratorios

metalúrgicos y el ensayo puede durar pocos minutos, sin tomar en cuenta el período de calentamiento o enfriamiento <sup>(1)</sup>. A pesar de que estas ventajas simplifican las pruebas de control de calidad, un ensayo de tracción debe ser usado con precaución como un indicador del nivel de calidad, debido a que la relevancia del ensayo está limitada por su correlación con el desempeño.

En otras palabras, un material puede pasar previamente un control de calidad establecido según norma para resistencia a la tracción y ductilidad y a la vez puede ser inaceptable para las condiciones de operación deseadas. Por ejemplo, diferentes programas de procesamiento termomecánico pueden ser aplicados a un acero tratable térmicamente para producir una combinación de propiedades de tensión, pero sólo uno de estos tratamientos térmicos puede ser capaz de brindarle las otras propiedades mecánicas críticas para su uso. De esta manera, deben ser realizados ensayos adicionales como fatiga, dureza, resistencia a la corrosión y fluencia lenta o “creep”, así como estudios microestructurales, para una evaluación adecuada de un material.

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





Figura 1.3 Máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8502, ubicada en el Laboratorio Nacional de Referencia para la Evaluación de Propiedades Mecánicas, Desgaste y Corrosión de Materiales, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Una vez determinado el comportamiento carga-elongación, éste puede ser transformado en esfuerzos y deformaciones nominales o ingenieriles usando fórmulas normalizadas. Los esfuerzos y las deformaciones reales, parámetros mucho más importantes a los fines del presente trabajo, también pueden ser calculados, por lo menos hasta el comienzo del encuellamiento de la muestra, fenómeno difícil de identificar, especialmente a temperaturas elevadas.

### ***1.2.1.- Características generales***

Los diagramas esfuerzo-deformación a temperaturas bajas/elevadas son similares en apariencia a los realizados a temperatura ambiente (figura 1.4)<sup>(1)</sup>. A

medida que la temperatura desciende por debajo de la ambiente, los materiales se vuelven más fuertes pero menos dúctiles, mientras que, al aumentar la temperatura los materiales se vuelven más débiles (figura 1.5) <sup>(1)</sup>. A pesar de que las aleaciones estables muestran un incremento en la ductilidad al incrementar la temperatura, el comportamiento temperatura-ductilidad para la mayoría de los materiales en ingeniería varía significativamente.

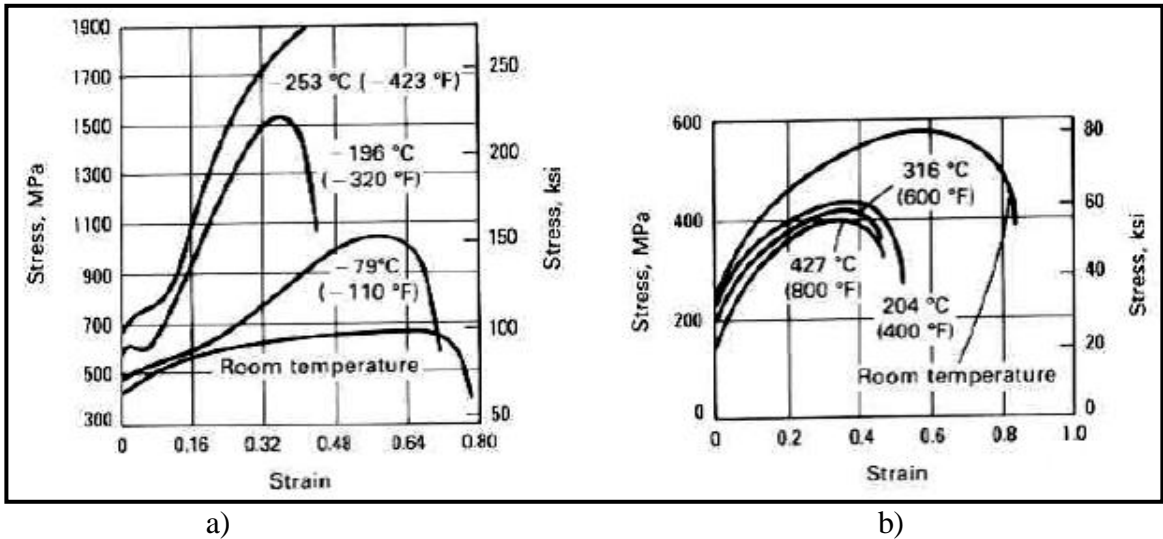


Figura 1.4 Diagramas esfuerzo-deformación para un acero inoxidable 304: a) a bajas temperaturas y b) a altas temperaturas <sup>(1)</sup>

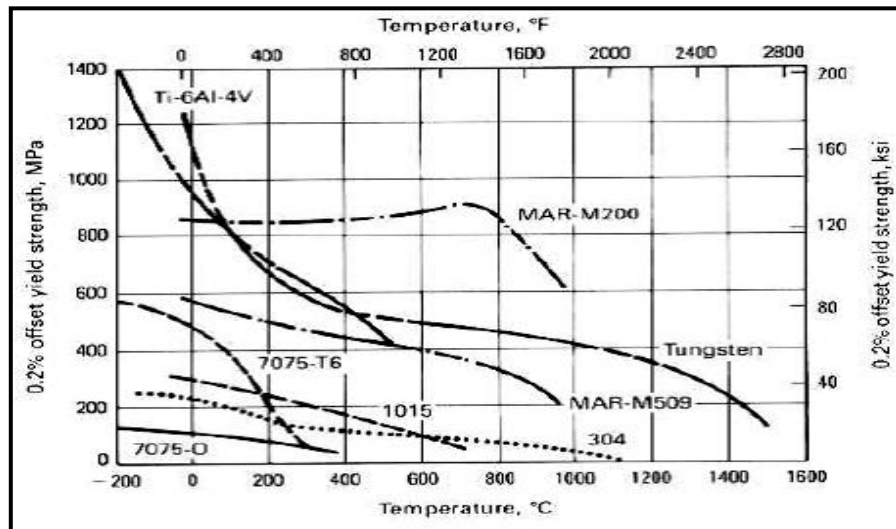


Figura 1.5 Efecto de la temperatura en la ductilidad y resistencia mecánica de varios materiales. La resistencia a la fluencia ha sido evaluada mediante la regla de 0.2% de deformación <sup>(2)</sup>

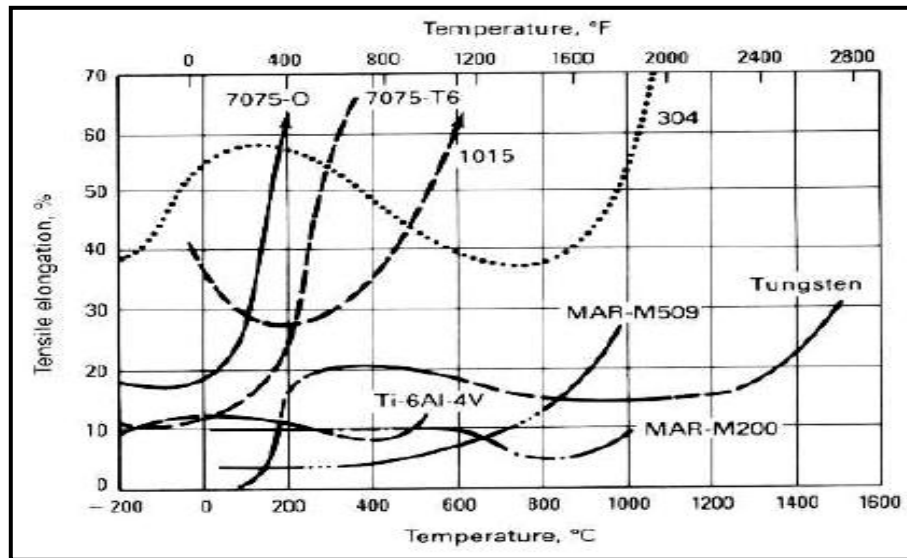


Figura 1.6 Efecto de la temperatura en la ductilidad y en la resistencia de varios materiales, elongación por tensión <sup>(2)</sup>

Debido a la relativamente alta tasa de deformación – usualmente  $8,33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (0,5%/min) y  $8,33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  (5%/min) – que se producen en los ensayos de tracción, la deformación ocurre por deslizamiento de dislocaciones a través de planos cristalográficos bien definidos. Así, los cambios en la resistencia y ductilidad debidos a la temperatura generalmente pueden ser relacionados con el efecto de la temperatura en el deslizamiento.

A bajas temperaturas (menos de 0,3 temperatura homóloga, que es la relación de la temperatura de ensayo respecto al punto de fusión absoluto del material, ambas en Kelvin), el número de sistemas de deslizamiento está limitado y los procesos de recuperación son imposibles. Por lo tanto, los mecanismos de endurecimiento por deformación, como la interacción entre las dislocaciones y los apilamientos son responsables de las grandes fuerzas requeridas para la deformación continua. Esto sigue hasta que los esfuerzos locales en los apilamientos exceden el esfuerzo de fractura y ocurre la falla <sup>(1)</sup>.

A altas temperaturas (entre 0,3 y 0,5 temperatura homóloga), procesos activados térmicamente como los deslizamientos múltiples y los deslizamientos cruzados permiten que los altos esfuerzos locales se relajen disminuyendo la resistencia. Para temperaturas muy superiores a la mitad de la temperatura homóloga, los procesos de difusión son importantes y mecanismos como la recuperación, ascenso de las dislocaciones, recristalización y crecimiento de grano pueden reducir la densidad de las dislocaciones, prevenir los apilamientos y posteriormente reducir la resistencia <sup>(1)</sup>.

La deformación bajo condiciones de tensión está gobernada en gran medida por la estructura cristalina. Los materiales cúbicos centrados en las caras presentan un cambio gradual en la resistencia y ductilidad a medida que la temperatura desciende (figura 1.4 para el acero inoxidable 304). Algunas aleaciones cúbicas centradas en el cuerpo, por el contrario, muestran cambios abruptos a la temperatura de transición dúctil-frágil (aproximadamente 200°C o 390°F para el tungsteno en la figura 1.6) <sup>(1)</sup>, por debajo de la cual hay poco flujo plástico.

En materiales hexagonales compactos y cúbicos centrados en el cuerpo, también puede ocurrir el *maclado mecánico* (mecanismo de deformación plástica, mediante el cual los átomos de un lado de un plano se desvían para formar una imagen especular de los átomos de otro lado del plano <sup>(9)</sup>) durante el ensayo. Sin embargo, el maclado contribuye muy poco al alargamiento total; su papel más importante es el de reorientar sistemas de deslizamiento previamente desfavorables a posiciones en las que ellos puedan ser activados <sup>(1)</sup>.

Otros factores pueden afectar el comportamiento a tracción, pero los efectos específicos no pueden ser predecidos fácilmente. Por ejemplo la precipitación y el envejecimiento (crecimiento de partículas controladas por difusión) puede ocurrir en aleaciones bifásicas durante el proceso de calentamiento antes del ensayo o durante el mismo. Estos procesos pueden provocar una gran variedad de respuestas en el

comportamiento mecánico, dependiendo del material. Los procesos de difusión también están relacionados con el punto de fluencia y con los fenómenos de envejecimiento por deformación.

Bajo ciertas combinaciones de tasa de deformación y temperatura, los átomos intersticiales pueden ser arrastrados con dislocaciones, o las dislocaciones pueden disociarse y luego recombinarse, produciendo saltos en la curva de esfuerzo-deformación.

Hay excepciones para estas generalizaciones, especialmente a altas temperaturas. Por ejemplo, a temperaturas suficientemente altas los límites de grano en materiales policristalinos son más débiles que el interior de los granos y la fractura intergranular ocurre a elongaciones relativamente bajas <sup>(1)</sup>.

### *1.2.2.- Métodos experimentales*

Los métodos y procedimientos específicos para realizar los ensayos a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas han sido normalizados por la ASTM (American Society for Testing and Materials) en las normas E8 y E21 respectivamente. Asumiendo que para los ensayos es usada una máquina con un apropiado control de la carga y de la velocidad, la validez de un ensayo reside en la medición de la deformación, el control de la temperatura y el comportamiento del material.

- *Medición de la deformación:* El método más simple de medir la deformación está basado en el desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos. Pero, este movimiento incluye no sólo la deformación en la sección calibrada, sino también la que se produce en el resto de la muestra, el tren de carga y la máquina de ensayos <sup>(1)</sup>.

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

- *Control de la temperatura:* La temperatura real debe ser mantenida a pocos grados de la temperatura deseada y no puede fluctuar considerablemente con el tiempo o variar a lo largo de la longitud calibrada. La selección de la termocupla adecuada depende del ambiente y temperatura del ensayo. La temperatura del ensayo puede ser controlada adecuadamente con uno de los tantos tipos de controladores de temperatura disponibles en el mercado que refieren la fuerza electromotriz de la termocupla central.

La posibilidad de minimizar el gradiente de temperatura a lo largo de la longitud calibrada depende del método de enfriamiento o calentamiento. A pesar de que la inmersión dentro de líquidos, gases o mezclas como hielo seco/acetona puede proporcionar temperaturas uniformes, los sistemas de refrigeración con fluidos refrigerantes líquidos puede ser problemático y requiere mezclar y/o incrementar el flujo del refrigerante para minimizar el gradiente<sup>(1)</sup>.

Un control apropiado de la temperatura de ensayo y la minimización del gradiente térmico a lo largo de la longitud calibrada son importantes debido a la dependencia de los mecanismos de flujo plástico y el comportamiento del material a la temperatura. Por ejemplo, los puntos calientes de las probetas generalmente serán más débiles que el resto de ellas

y pueden convertirse en lugares para deformaciones localizadas y fallas prematuras, lo que se traduce en información imprecisa y poco confiable del ensayo de tracción.

- *Comportamiento del material:* Debido a que las aleaciones sometidas a ensayos de tracción a altas temperaturas sufrirán un recocido antes de que se aplique alguna carga, pueden ocurrir cambios en la microestructura y formar un material con características diferentes al original. Por lo tanto, el calentamiento lento o prolongado deberá ser evitado <sup>(1)</sup>.

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

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

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

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

El ejemplo más significativo para este trabajo, es la probeta para ensayos de tracción uniaxial dispuesta en la norma ASTM E8-M <sup>(10)</sup> tal como se muestra en la Figura 1.7.

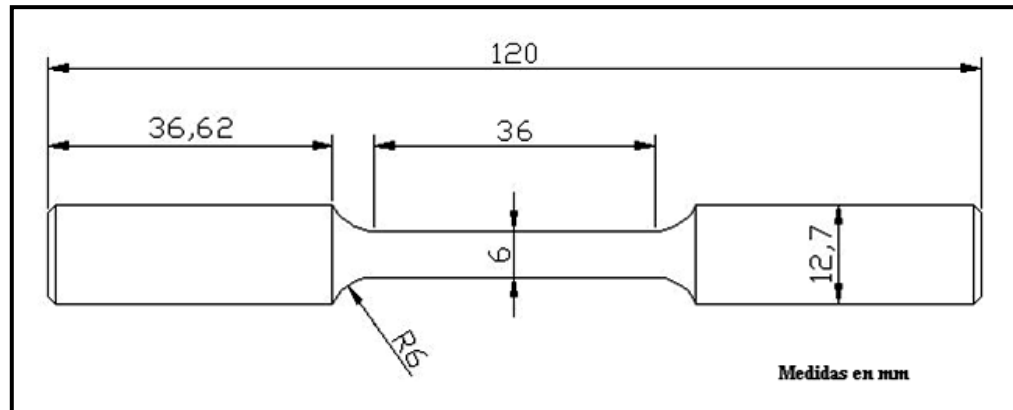


Figura 1.7 Probeta cilíndrica para ensayos de tracción uniaxial según la norma ASTM E8-M <sup>(10)</sup>

### 1.3.- Características de materiales de ingeniería a temperaturas elevadas

Cuando se habla de aleaciones a alta temperatura se hace referencia a materiales que proporcionan fuerza, resistencia al medio ambiente y estabilidad dentro de un intervalo de temperatura entre los 260° y los 1200°C, aproximadamente. Estas aleaciones por lo general han sido usadas en presencia de fuentes de calor por combustión, como turbinas, máquinas reciprocantes, plantas de generación, hornos, así como equipos de control de la contaminación, entre otros. A fin de garantizar la resistencia bajo estas condiciones, es imperativo que la microestructura se mantenga estable en operaciones a alta temperatura.

Durante las últimas décadas, un mejor entendimiento de las propiedades mecánicas de las aleaciones, el mejoramiento de la tecnología de fusión de metales y el desarrollo controlado de procesos termomecánicos ha devenido en nuevas aleaciones a altas temperaturas. La mayoría de estas aleaciones tienen suficientes cantidades de cromo (con y sin aditivos de aluminio o silicio) para formar hierro cromado ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y/o dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), los cuales



proveen a la pieza de resistencia contra las degradaciones producidas por el medio ambiente. Sin embargo, estos óxidos no pueden proteger contra fallas por desgaste, “creep”, fatiga térmica, fatiga mecánica, choques térmicos o fragilidad. Las fallas que se presentan en los materiales o componentes mientras están en operación son normalmente producidas por una combinación de dos o más modos de ataques, los cuales aceleran la degradación <sup>(2)</sup>.

Entre las propiedades mecánicas de interés para aplicaciones a temperaturas elevadas se encuentran las de tensión en tiempos cortos, esfuerzos de ruptura, bajos y altos ciclos de fatiga, fatiga térmica, mecánica y elevada dureza.

La influencia de la temperatura en la resistencia de los materiales puede ser demostrada aplicando pruebas estándares de tensión de corto tiempo con una serie de incrementos de temperaturas.

Como se muestra en la figura 1.5, los materiales se vuelven más débiles mientras se incrementa la temperatura de los mismos. Sin embargo, aleaciones simples y estables muestran un crecimiento de la ductilidad para la mayoría de los materiales de ingeniería (figura 1.6)

Tales discontinuidades en la ductilidad con incremento de temperatura pueden ser explicadas en términos de inestabilidades metalúrgicas.

En aplicaciones a bajos esfuerzos, el acero al carbono puede ser usado a temperaturas menores o iguales a 450°C. En temperaturas de hasta 540°C pueden ser usados en periodos cortos y bajo cargas continuas son normalmente usados hasta 370°C. Los aceros al carbono-molibdeno con 0.5% Mo no son usados por encima de los 540°C, mientras que los aceros de aleaciones con 0.5 a 1% de Mo en combinación con 0.5 a 9.0% Cr pueden llegar hasta los 650°C. Para temperaturas por encima de los

650°C, son usados generalmente los aceros inoxidable. Sin embargo, estas limitaciones de temperatura no aplican siempre <sup>(2)</sup>.

Las tablas 1.1 y 1.2 muestran una lista de las temperaturas máximas sugeridas en tres ejemplos de aplicaciones con diferentes criterios de diseño. Estas tablas sólo muestran aceros al carbono y aceros de baja aleación que tienen aplicaciones en tuberías de presión y no incluye los aceros cromo-molibdeno-vanadio que son usados en rotores de turbinas así como en tuberías de alta presión.

Tabla 1.1 Temperaturas máximas sugeridas en operaciones petroquímicas <sup>(2)</sup>

| Material                      | Maximum temperature based on creep rate |      | Maximum temperature based on rupture |      |
|-------------------------------|---|------|--------------------------------------|------|
|                               | °C                                      | °F   | °C                                   | °F   |
| Carbon steel                  | 450                                     | 850  | 540                                  | 1000 |
| C-0.5Mo                       | 510                                     | 950  | 595                                  | 1100 |
| 2.5Cr-1Mo                     | 540                                     | 1000 | 650                                  | 1200 |
| Type 304 stainless steel      | 595                                     | 1100 | 815                                  | 1500 |
| Alloy C-276 nickel-base alloy | 650                                     | 1200 | 1040                                 | 1900 |

Tabla 1.2 Temperaturas límites de materiales de tubos de súper calentadores <sup>(2)</sup>

| Material                   | Maximum-use temperature                             |         |                                     |      |
|----------------------------|---|---------|-------------------------------------|------|
|                            | Oxidation/graphitization criteria, metal surface(a) |         | Strength criteria, metal midsection |      |
|                            | °C  | °F      | °C                                  | °F   |
| SA-106 carbon steel        | 400-500   | 750-930 | 425                                 | 795  |
| Ferritic alloy steels      |   |         |                                     |      |
| 0.5Cr-0.5Mo                | 550   | 1020    | 510                                 | 950  |
| 1.2Cr-0.5Mo                | 565   | 1050    | 560                                 | 1040 |
| 2.25Cr-1Mo                 | 580   | 1075    | 595                                 | 1105 |
| 9Cr-1Mo                    | 650   | 1200    | 650                                 | 1200 |
| Austenitic stainless steel |   |         |                                     |      |
| Type 304H                  | 760   | 1400    | 815                                 | 1500 |

### 1.3.1.- Características de los aceros inoxidable

Los aceros inoxidable son aleaciones de hierro que contienen un mínimo aproximado de 1.1% Cr, cantidad necesaria para prevenir la formación de óxido en una atmósfera descontaminada. Pocos aceros inoxidable contienen más de un 30% Cr o menos de un 50% Fe. Ellos logran las características inoxidable mediante la formación de una película invisible y adherente en la superficie enriquecida de cromo. Esta película de óxido se forma y se cura ella misma en presencia de oxígeno<sup>(2)</sup>.

Otros elementos agregados para mejorar características particulares incluyen níquel, molibdeno, cobre, titanio, aluminio, silicio, nitrógeno, azufre y selenio. El carbono está normalmente presente en cantidades desde 0.03% hasta 1% en ciertos aceros martensíticos<sup>(2)</sup>. La figura 1.7 proporciona un resumen de algunas composiciones y propiedades en la familia de los aceros inoxidable.

La resistencia a la corrosión es usualmente el primer criterio para seleccionar los aceros inoxidable. Sin embargo, la resistencia es un factor importante en la mayoría de las aplicaciones a altas temperaturas y puede ser de hecho el factor clave que determina la elección de un acero inoxidable. Los aceros inoxidable usados en aplicaciones donde la resistencia a altas temperaturas es importante son a veces llamados como *aceros de resistencia en caliente*. Muchos aceros inoxidable usados en aplicaciones a altas temperaturas son designados para temperaturas de servicio por encima de los 650°C.

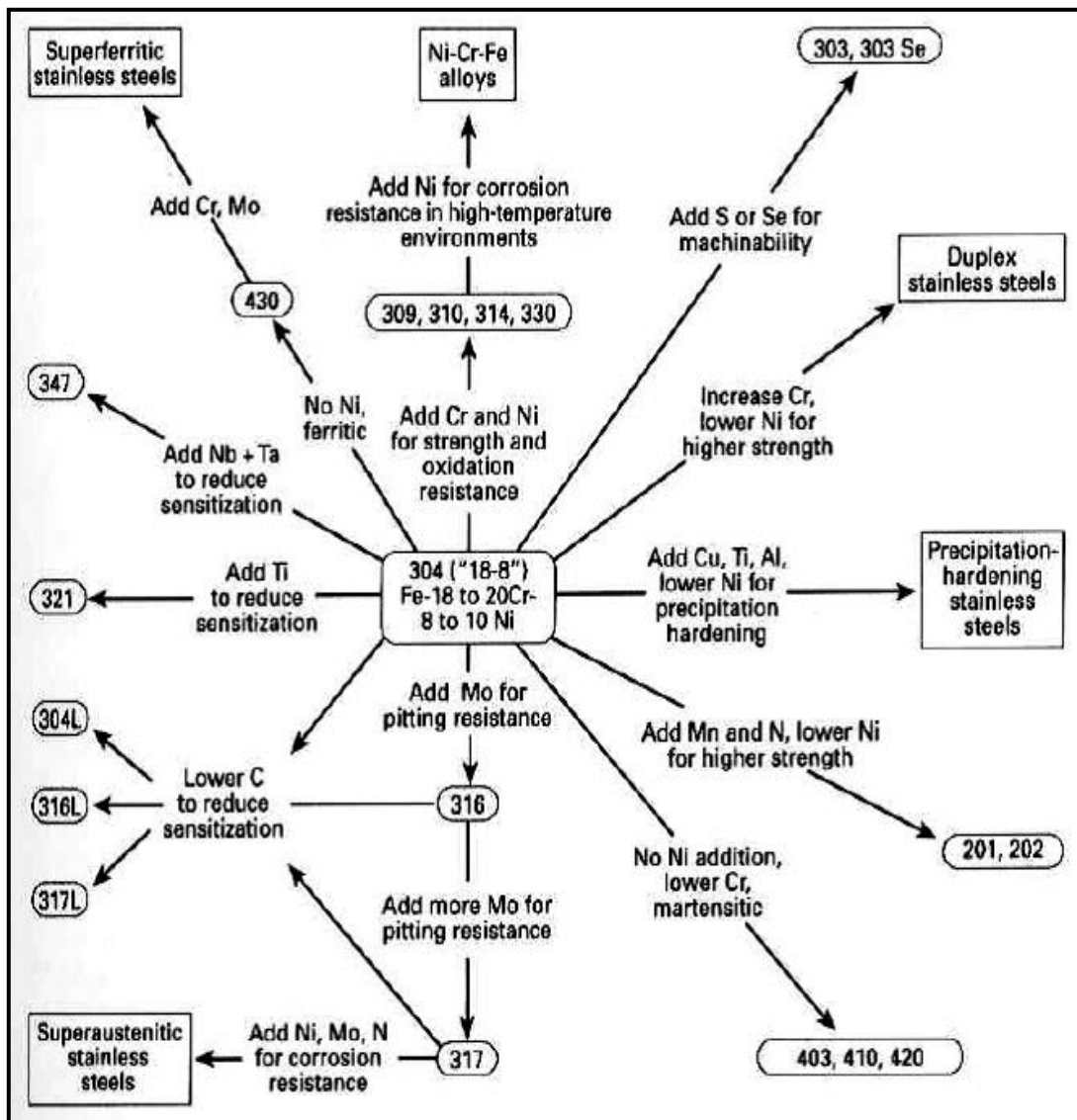


Figura 1.8 Composición y propiedades en la familia de los aceros inoxidable<sup>(2)</sup>

### *Clasificación de los aceros inoxidable*

Los aceros inoxidable pueden ser divididos en 5 familias. Cuatro de ellas se basan en su microestructura: ferrítica, martensítica, austenítica y dúplex (austenítica-ferrítica). La quinta familia, las aleaciones endurecidas por precipitación (PH), se basan en el tipo de tratamiento térmico usado, en lugar de la microestructura. De

todos los tipos de aceros inoxidable, los de grado austenítico tienen la mayor resistencia a temperaturas elevadas<sup>(2)</sup>.

### ***1.3.1.1.- Aceros inoxidables austeníticos***

Los aceros inoxidables austeníticos poseen una estructura cúbica centrada en las caras. Esta estructura es lograda por el uso libre de elementos austeníticos como el níquel, manganeso y nitrógeno. Estos aceros son esencialmente no magnéticos en condiciones anheladas y pueden ser endurecidos solos por enfriamiento. Normalmente tienen excelentes propiedades criogénicas y buena resistencia a temperaturas elevadas. El contenido de cromo generalmente varía desde 16 hasta 26%, el contenido de níquel no mayor al 35% y el de manganeso hasta un 15%. La serie 200 de los aceros contienen nitrógeno, desde 4 hasta 15.5% Mn, y hasta 7% Ni. La serie 300 contiene grandes cantidades de níquel y hasta 2% de Mn. Elementos tales como molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, pueden ser agregados para obtener ciertas propiedades como resistencia a la oxidación. El azufre o el selenio por su parte pueden ser agregados hasta cierto punto para mejorar la capacidad de ser maquinado el material<sup>(2)</sup>.

Normalmente la serie 300 cromo-níquel de los aceros inoxidables tiene una resistencia de fluencia a temperatura ambiente entre 200 y 275 MPa y las aleaciones de alto nitrógeno tienen una resistencia a la fluencia de hasta 500 MPa.

En la tabla 1.3 se puede apreciar la variación del módulo de elasticidad con el incremento de la temperatura para algunos grados de aceros inoxidables austeníticos y en las tablas 1.4 y 1.5 se muestra como varía la resistencia a la fluencia y la resistencia última a la tensión respectivamente.

Tabla 1.3 Efectos de la temperatura en el módulo de elasticidad de varios aceros inoxidables austeníticos<sup>(3)</sup>

| Temperature |     |          | Grades       |              |              |              |              |              |
|-------------|-----|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| °F          | °C  | Modulus* | 302          | 304          | 310          | 316          | 321          | 347          |
| 200         | 93  | E        | 27.9 (192.4) | 27.9 (192.4) | 28.2 (194.4) | 28.1 (193.7) | 28.0 (193.1) | 28.2 (194.4) |
|             |     | G        | 10.8 (74.5)  | 11.1 (76.5)  | 10.9 (75.2)  | 11.0 (75.8)  | 10.8 (74.5)  | 11.0 (75.8)  |
| 300         | 149 | E        | 27.3 (188.2) | 27.1 (186.9) | 27.5 (189.6) | 27.5 (189.6) | 27.3 (188.2) | 27.5 (189.6) |
|             |     | G        | 10.4 (71.7)  | 10.8 (74.5)  | 10.6 (73.1)  | 10.6 (73.1)  | 10.6 (73.1)  | 10.7 (73.8)  |
| 400         | 204 | E        | 26.7 (184.1) | 26.6 (183.4) | 26.8 (184.8) | 26.9 (185.5) | 26.5 (182.7) | 26.8 (184.8) |
|             |     | G        | 10.1 (69.6)  | 10.5 (72.4)  | 10.3 (71)    | 10.3 (71)    | 10.3 (71)    | 10.4 (71.7)  |
| 500         | 260 | E        | 26.0 (179.3) | 26.0 (179.3) | 26.2 (180.6) | 26.3 (181.3) | 25.8 (177.9) | 26.1 (180)   |
|             |     | G        | 9.8 (67.6)   | 10.2 (70.3)  | 10.0 (69)    | 10.0 (69)    | 9.9 (68.3)   | 10.1 (69.6)  |
| 600         | 316 | E        | 25.4 (175.1) | 25.6 (176.5) | 25.5 (175.8) | 25.6 (176.5) | 25.3 (174.4) | 25.4 (175.1) |
|             |     | G        | 9.5 (65.5)   | 9.9 (68.3)   | 9.7 (66.9)   | 9.7 (66.9)   | 9.7 (66.9)   | 9.8 (67.6)   |
| 700         | 371 | E        | 24.8 (171)   | 24.7 (170.3) | 24.9 (171.7) | 24.9 (171.7) | 24.5 (168.9) | 24.8 (171)   |
|             |     | G        | 9.3 (64.1)   | 9.7 (66.9)   | 9.4 (64.8)   | 9.4 (64.8)   | 9.4 (64.8)   | 9.5 (65.5)   |
| 800         | 427 | E        | 24.2 (166.9) | 24.1 (166.2) | 24.2 (166.9) | 24.2 (166.9) | 23.8 (164.1) | 24.1 (166.2) |
|             |     | G        | 9.0 (62.1)   | 9.5 (65.5)   | 9.1 (62.7)   | 9.1 (62.7)   | 9.1 (62.7)   | 9.2 (63.4)   |
| 900         | 482 | E        | 23.6 (162.7) | 23.2 (160)   | 23.6 (162.7) | 23.5 (162)   | 23.2 (160)   | 23.4 (161.3) |
|             |     | G        | 8.8 (60.7)   | 9.2 (63.4)   | 8.8 (60.7)   | 8.8 (60.7)   | 8.8 (60.7)   | 8.9 (61.4)   |
| 1000        | 538 | E        | 23.0 (158.6) | 22.5 (155.1) | 23.0 (158.6) | 22.8 (157.2) | 22.5 (155.1) | 22.8 (157.2) |
|             |     | G        | 8.6 (59.3)   | 8.9 (61.4)   | 8.5 (58.6)   | 8.5 (58.6)   | 8.5 (58.6)   | 8.6 (59.3)   |
| 1110        | 593 | E        | 22.3 (153.8) | 21.8 (150.3) | 22.4 (154.4) | 22.2 (153.1) | 21.9 (151)   | 22.0 (151.7) |
|             |     | G        | 8.4 (57.9)   | 8.6 (59.3)   | 8.2 (56.5)   | 8.3 (57.2)   | 8.2 (56.5)   | 8.3 (57.3)   |
| 1200        | 649 | E        | 21.8 (150.3) | 21.1 (145.5) | 21.8 (150.3) | 21.5 (148.2) | 21.2 (146.2) | 21.4 (147.6) |
|             |     | G        | 8.2 (56.5)   | 8.3 (57.2)   | 7.9 (54.5)   | 8.1 (55.8)   | 7.9 (54.5)   | 8.1 (55.8)   |
| 1300        | 704 | E        | 21.2 (146.2) | 20.4 (140.7) | 21.2 (146.2) | 20.8 (143.4) | 20.4 (140.7) | 20.7 (142.7) |
|             |     | G        | 7.9 (54.5)   | 8.0 (55.2)   | 7.6 (52.4)   | 7.9 (54.5)   | 7.7 (53.1)   | 7.8 (53.9)   |
| 1400        | 760 | E        | 20.6 (142)   | 19.4 (133.8) | 20.5 (141.3) | 20.0 (137.9) | 19.7 (135.8) | 20.0 (137.9) |
|             |     | G        | 7.7 (53.1)   | 7.7 (53.1)   | 7.2 (49.6)   | 7.7 (53.1)   | 7.4 (51)     | 7.5 (51.7)   |
| 1500        | 816 | E        | 20.0 (137.9) | 18.1 (124.8) | 19.0 (131)   | 19.1 (131.7) | 19.1 (131.7) | 19.4 (133.8) |
|             |     | G        | 7.5 (51.7)   | 7.4 (51)     | 6.9 (47.6)   | 7.5 (51.7)   | 7.1 (49)     | 7.2 (49.6)   |

Tabla 1.4 Efectos de la temperatura en la resistencia a la fluencia, ksi (MN/m<sup>2</sup>), de aceros inoxidables austeníticos<sup>(3)</sup>

| Temperature |     | Grades       |              |              |              |              |
|-------------|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| °F          | °C  | 304          | 304L         | 316          | 316L         | 321          |
| 75          | 24  | 36.9 (254.4) | 33.8 (233.1) | 38.0 (262)   | 33.7 (232.4) | 29.7 (204.8) |
| 100         | 38  | 35.4 (244.1) | 32.8 (226.2) | 36.9 (254.4) | 32.7 (225.5) | 28.8 (198.6) |
| 200         | 93  | 30.6 (211)   | 28.7 (197.9) | 32.7 (225.5) | 28.6 (197.2) | 25.2 (173.8) |
| 300         | 149 | 27.7 (191)   | 26.0 (179.3) | 29.7 (204.8) | 25.6 (176.5) | 22.6 (155.8) |
| 400         | 204 | 25.5 (175.8) | 23.7 (163.4) | 26.6 (183.4) | 23.6 (162.7) | 20.5 (141.3) |
| 500         | 260 | 24.0 (165.5) | 22.0 (151.7) | 25.1 (173.1) | 21.6 (148.9) | 19.0 (131)   |
| 600         | 316 | 22.5 (155.1) | 21.0 (144.8) | 23.9 (164.8) | 20.6 (142)   | 18.1 (124.8) |
| 700         | 371 | 21.8 (150.3) | 20.3 (140)   | 22.8 (157.2) | 19.5 (134.5) | 17.5 (120.7) |
| 800         | 427 | 20.7 (142.7) | 19.6 (135.1) | 22.4 (154)   | 18.5 (127.6) | 16.9 (116.5) |
| 900         | 482 | 19.9 (137.2) | 18.9 (130.3) | 22.0 (151.7) | 17.9 (123.4) | 16.9 (116.5) |
| 1000        | 538 | 19.2 (132.4) | 17.9 (123.4) | 21.7 (148.6) | 16.9 (116.5) | 16.6 (114.5) |
| 1100        | 593 | 18.1 (124.8) | 16.9 (116.5) | 20.9 (144.1) | 15.8 (108.9) | 16.3 (112.4) |
| 1200        | 649 | 17.3 (119.3) | 15.2 (104.8) | 20.5 (141.3) | 14.2 (97.9)  | 15.7 (108.3) |
| 1300        | 704 | 16.2 (111.7) |              | 19.4 (133.8) |              | 14.8 (102)   |
| 1400        | 760 | 14.4 (99.2)  |              | 18.2 (125.5) |              | 14.0 (96.5)  |
| 1500        | 816 | 11.4 (78.6)  |              | 16.3 (112.4) |              | 13.7 (94.5)  |
| 1600        | 871 | 7.4 (51)     |              |              |              |              |

Tabla 1.5 Efectos de la temperatura en la resistencia última a la tensión, ksi (MN/m<sup>2</sup>), de aceros inoxidables austeníticos <sup>(3)</sup>

| Temperature |     | Grades       |              |              |              |              |              |
|-------------|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| °F          | °C  | 304          | 304L         | 316          | 316L         | 321          | 347          |
| 75          | 24  | 83.9 (578.5) | 79.2 (546.1) | 83.3 (574.4) | 78.9 (544)   | 81.8 (564)   | 87.0 (600)   |
| 100         | 38  | 81.4 (561.3) | 76.8 (529.5) | 80.8 (557.1) | 76.5 (527.5) | 79.3 (546.8) | 84.4 (581.9) |
| 200         | 93  | 72.1 (497.1) | 68.1 (469.5) | 75.8 (522.6) | 69.4 (478.5) | 72.8 (502)   | 75.7 (522)   |
| 300         | 149 | 87.1 (600.6) | 62.6 (431.6) | 74.1 (510.9) | 65.5 (451.6) | 68.7 (473.7) | 69.6 (480)   |
| 400         | 204 | 65.4 (450.9) | 60.2 (415.1) | 72.5 (499.9) | 63.9 (440.6) | 67.9 (468.2) | 65.3 (450.2) |
| 500         | 260 | 64.6 (445.4) | 59.4 (409.6) | 72.5 (499.9) | 63.1 (435.1) | 67.9 (468.2) | 63.5 (437.8) |
| 600         | 316 | 64.6 (445.4) | 58.6 (404)   | 73.3 (505.4) | 63.1 (435.1) | 67.9 (468.2) | 62.7 (432.3) |
| 700         | 371 | 64.6 (445.4) | 57.8 (398.5) | 72.5 (499.9) | 63.1 (435.1) | 67.9 (468.2) | 61.8 (426.1) |
| 800         | 427 | 63.8 (439.9) | 57.0 (393)   | 71.6 (493.7) | 62.3 (429.6) | 67.9 (468.2) | 61.8 (426.1) |
| 900         | 482 | 62.1 (428.2) | 55.4 (382)   | 69.1 (476.4) | 60.0 (413.7) | 67.9 (468.2) | 61.8 (426.1) |
| 1000        | 538 | 58.7 (404.7) | 52.3 (360.6) | 65.0 (448.2) | 56.8 (391.6) | 64.6 (445.4) | 60.9 (419.9) |
| 1100        | 593 | 52.9 (364.7) | 47.5 (327.5) | 59.1 (407.5) | 52.1 (359.2) | 58.1 (400.6) | 58.3 (402)   |
| 1200        | 649 | 46.1 (317.9) | 42.0 (289.6) | 51.6 (355.8) | 46.6 (321.3) | 50.0 (344.8) | 53.9 (371.6) |
| 1300        | 704 | 38.6 (266.1) | 35.6 (245.5) | 43.3 (298.6) | 39.5 (272.4) | 40.1 (276.5) | 47.0 (324.1) |
| 1400        | 760 | 29.4 (202.7) | 28.5 (196.5) | 34.2 (235.8) | 32.3 (222.7) | 30.3 (208.9) | 37.4 (257.9) |
| 1500        | 816 | 21.0 (144.8) | 20.6 (142)   | 25.0 (172.4) | 24.5 (168.9) | 20.5 (141.3) | 24.4 (168.2) |

### 1.3.2.- Otros aceros aleados

Existen muchas aplicaciones donde las condiciones de trabajo son muy exigentes para aceros estándares o aceros inoxidables por la severa combinación de ácidos, temperaturas elevadas, etc. En estos casos, se recurre a los aceros de baja aleación como los del tipo *romo-níquel-molibdeno* que tienen la habilidad de retener su resistencia a temperaturas elevadas. Estas aleaciones poseen un contenido de 0,38 a 0,43% de carbono, 0,70 a 0,90% de cromo, 1,65 a 2,00% de níquel y 0,20 a 0,30% de molibdeno. Se caracterizan por su alta templabilidad y resistencia a la fatiga, ofrecen buenas propiedades en piezas de grandes secciones y no presentan fragilidad de revenido. Pueden ser usadas en conjunto con piezas forjadas de materiales similares o pueden servir como mejoras en componentes de bombas y válvulas en un sistema de acero inoxidable.

### 1.3.3.- Características de las aleaciones de aluminio

Algunas aleaciones de aluminio son usadas en aplicaciones de temperaturas moderadamente elevadas (por ejemplo, pistones en motores de combustión interna). Una de las aleaciones más comúnmente usadas es la aleación 242 (Al-4Cu-2Ni-2.5Mg). Como se muestra en la figura 1.8, esta aleación mantiene su resistencia hasta temperaturas de 150°C. Otras aleaciones, pueden ser usadas a temperaturas un poco más elevadas (175°C). Las aleaciones de la serie 7xxx basadas en el sistema Al-Zn-Mg-Cu poseen la resistencia a la tensión más elevada de cualquier aluminio. Sin embargo, la resistencia de estas aleaciones decrece rápidamente si son expuestas a temperaturas elevadas (figura 1.9). Esto se debe principalmente al crecimiento de los precipitados finos de los cuales depende su resistencia. Las aleaciones de la serie 2xxx, como la 2014 y la 2024, tienen un mejor desempeño a estas temperaturas, pero no son usados en aplicaciones de temperaturas elevadas <sup>(2)</sup>.

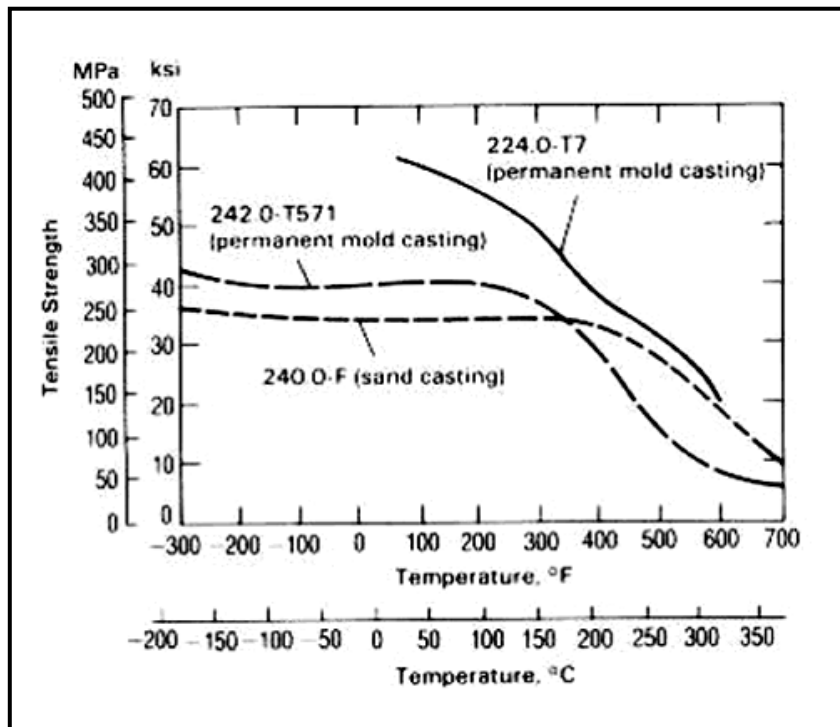


Figura 1.9 Resistencia a la tracción de aleaciones de aluminio en función de la temperatura <sup>(2)</sup>



La resistencia a temperaturas por encima de los 100 o 200°C se mejora principalmente por medio del endurecimiento por solución sólida o endurecimiento de segunda fase. Otra forma de mejorar el rendimiento de las aleaciones de aluminio a temperaturas elevadas es el uso de la tecnología de solidificación rápida para crear polvos que contengan altas súper saturaciones de elementos como hierro o cromo que se difunde lentamente en el aluminio sólido.

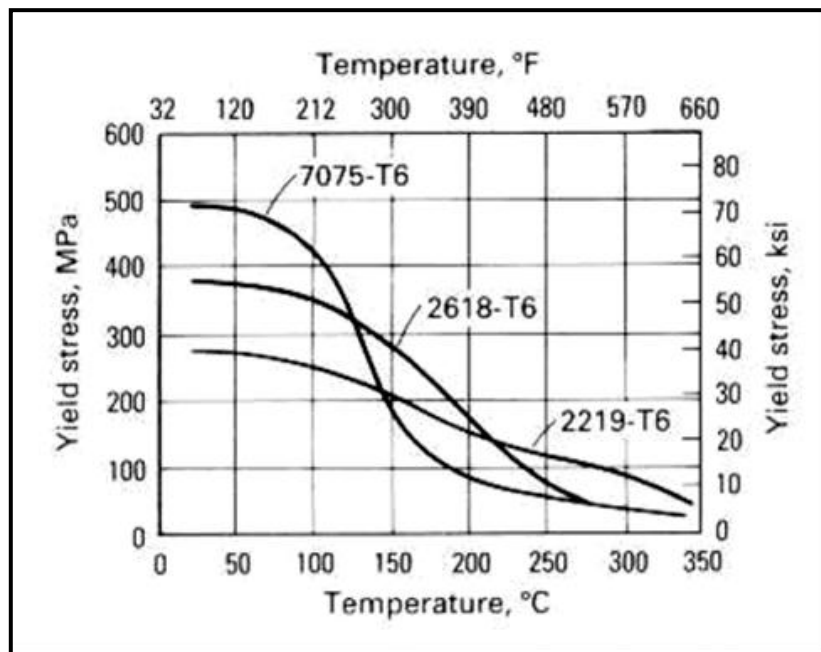


Figura 1.10 Esfuerzos de fluencia de aleaciones de aluminio luego 10000h de exposición a temperaturas elevadas <sup>(2)</sup>

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

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

El diseño de un producto, componente, sistema o estructura ingenieril es una actividad difícil, compleja, multidisciplinaria, con final abierto y enfocada a la resolución de problemas. No es fácil satisfacer los requisitos comerciales y de ingeniería que se imponen al diseño y más difícil aún cuando se tienen que satisfacer regulaciones ambientales y legales.

El procedimiento de diseño siempre comienza con una necesidad o problema que es necesario resolver. Este procedimiento generalmente requiere atravesar una serie de etapas o fases las cuales requieren cumplir con una serie de actividades cuyo objetivo es transformar los recursos en sistemas o productos para la satisfacción de necesidades de cualquier índole apoyándose en las fuentes de conocimiento y respetando los principios y restricciones técnicas, económicas, comerciales y gubernamentales.

Si la solución del problema conlleva a un bien físico, este debe de cumplir ciertos parámetros como, ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que se pueda fabricar y si se puede hasta comercializar.

Es de fundamental importancia en el proceso de diseño saber tomar decisiones porque siempre existirán varias alternativas de solución y en cada caso debemos seleccionar aquella que más se adapte al caso en estudio, tomando en cuenta todos los factores involucrados, no solamente técnicos sino económicos, psicológicos y ambientales entre otros <sup>(4)</sup>.

Para buscar esta solución se pueden seguir ciertos pasos que facilitan la resolución del problema planteado. Mas no se puede establecer una metodología estricta sobre la forma de diseñar; el fin es diseñar; el medio es aquel que más se

adapte a cada individuo y a cada situación particular <sup>(5)</sup>. De manera general, las fases del proceso de diseño son:

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

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

El establecimiento de una necesidad y expresarla con un determinado número de palabras es una actividad bastante creativa, pues la necesidad puede manifestarse simplemente como un vago descontento o bien por la intuición de una dificultad o en la sensación de que algo no es correcto <sup>(4)</sup>.

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

Es bien conocido que las propiedades mecánicas de las aleaciones y materiales de ingeniería son en gran parte dependientes de la temperatura. Es así como se puede ver que materiales en condiciones de servicio que involucran desempeño a temperaturas ambientales presentan un excelente comportamiento en relación a propiedades tales como tenacidad de fractura, ductilidad, deformación, etc. Sin embargo en condiciones de servicio en donde estos materiales son expuestos a ambientes donde la temperatura es elevada, estos comportamientos pueden verse seriamente comprometidos.

El ensayo de tracción uniaxial a altas temperaturas permite conocer las propiedades mecánicas de los materiales sometidos a estas condiciones y dado que los equipos disponibles en el país que son capaces de realizar este tipo de ensayo son de fabricación extranjera o se encuentran fuera de funcionamiento, nace la necesidad de diseñar y construir un equipo capaz de realizar este tipo de estudios y que a su vez sea competitivo y ofrezca mejoras respecto a otros dispositivos similares presentes en el mercado.

El dispositivo a diseñar debe ser capaz de acoplarse a la máquina universal de ensayos mecánicos Instron 8502, ajustándose tanto al espacio disponible como a las condiciones de trabajo de la máquina. Debe contar con un sistema de refrigeración para los extensores que proteja a la celda de carga de temperaturas altas, un sistema de montaje que no requiera mayores cambios en la máquina de ensayos, un instrumento que registre de manera precisa la temperatura en la superficie de la muestra, un sistema de control que permita alcanzar y mantener temperaturas uniformes de hasta 500°C durante el ensayo y un sistema de monitoreo que genere una gráfica de temperatura en función del tiempo.

Tanto el diseño como la construcción deben cumplir con los parámetros básicos a evaluar en un proceso de diseño, como son: seguridad, rendimiento, confiabilidad, facilidad de fabricación, bajos costos de operación y mantenimiento, entre otros.

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

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

Una vez descrito el problema y determinadas las características y limitaciones que el sistema a diseñar debe tener, se procede a la concepción del mismo. En esta etapa el equipo de diseño debe expresar todas sus opiniones e ideas por descabelladas que estas sean para generar la mayor cantidad de alternativas posibles de solución. En algunos casos se sondan opiniones de personas que no estén relacionadas o “contaminadas” con el proyecto para que ofrezcan posibles soluciones. Esta es la fase de diseño más creativa, porque se tiene una libertad muy grande de acción. El resultado puede desembocar en innovaciones o mejoras sustanciales. En esta etapa se utilizan todas las fuentes del conocimiento que permitan tomar la decisión correcta. Para esta fase del diseño se empleará el método de la Tormenta de Ideas (“Brain storming”)<sup>(5)</sup>.

#### ***2.3.1.- Tormenta de ideas.***

Este método fue ideado por Alex Osborn (1953) y consiste en reunir un grupo de 4 a 12 personas para trabajar sobre un problema<sup>(5)</sup>.

El grupo de trabajo debe trabajar sobre las siguientes reglas:

- No se permite ninguna evaluación o juicio sobre las ideas; de no ser así los participantes estarían más preocupados en defender sus ideas que en buscar nuevas ideas.
- Tratar de que las ideas que se generen se expongan lo más rápido posible. De esta manera, se logra evitar que las mismas sean enjuiciadas internamente por las personas.
- Debe buscarse cantidad de ideas, ya que en este caso cantidad genera calidad.

- Debe promoverse entre los miembros del grupo que construyan sobre (o modifiquen) las ideas de otros, por que esto generalmente desemboca en ideas superiores a las iniciales.

A continuación se presentan las distintas propuestas de los extensores y del sistema de enfriamiento de los mismos:

### 2.3.2.- Propuestas para el diseño de extensores y sistema de enfriamiento

#### 2.3.2.1- Propuesta N° 1

- *Extensor:* Consistirá en un eje, el cual en uno de sus extremos sujetará al porta probeta y en el otro se acoplará a una base por medio de un pasador. Esta base tendrá en su parte inferior una lengüeta sobre la cual la mordaza de la máquina de ensayos ejercerá presión.
- *Sistema de enfriamiento:* Constará de un serpentín de cobre conectado a la parte superior de la base del extensor, a través del cual circulará un fluido refrigerante (agua) proveniente de un “chiller”.

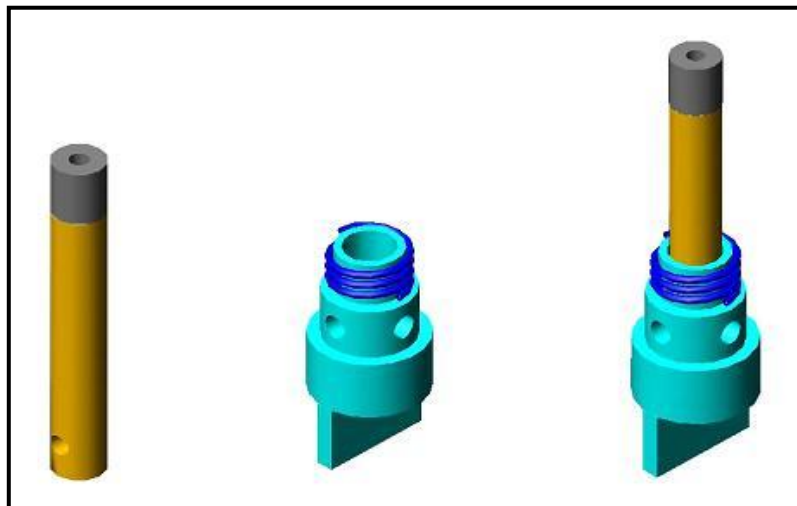


Figura 2.5 Propuesta número 1

### 2.3.2.2.- Propuesta N° 2

- *Extensor:* Será similar al expuesto en la propuesta N°1.
- *Sistema de enfriamiento:* Constará de un serpentín de cobre conectado a la parte inferior del extensor, a través del cual circulará un fluido refrigerante (agua) proveniente de un “chiller”.

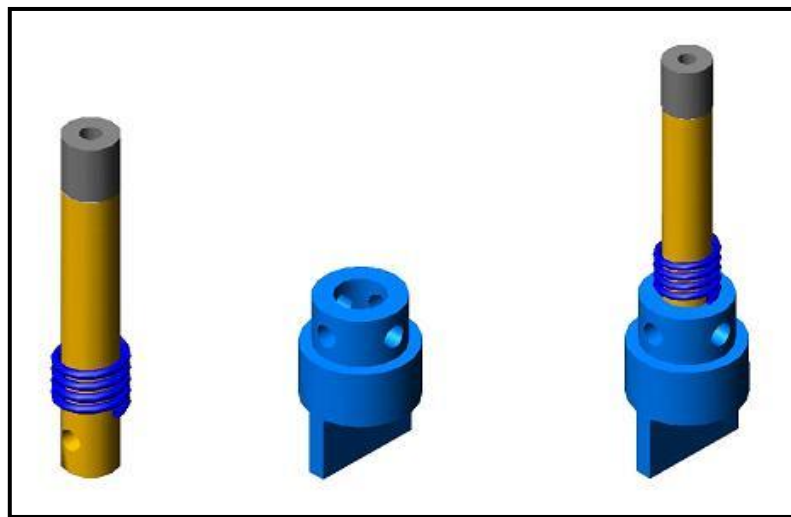


Figura 2.6 Propuesta número 2

### 2.3.2.3.- Propuesta N° 3

- *Extensor:* Será similar al expuesto en la propuesta N°1.
- *Sistema de enfriamiento:* Consiste en un sistema de aletas distribuidas alrededor de la base del extensor, las cuales disiparán calor al ambiente por convección forzada.



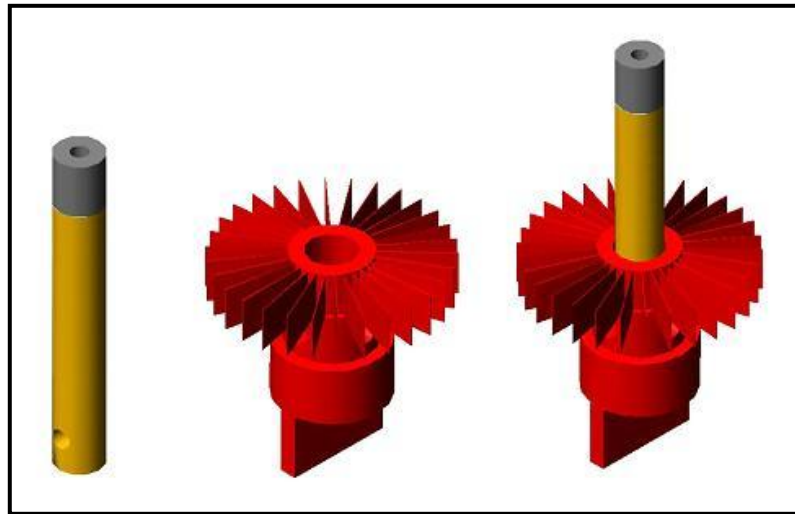


Figura 2.7 Propuesta número 3

#### 2.3.2.4.- Propuesta N° 4

- *Extensor:* Estará formado por un eje que en uno de sus extremos sujetará a la probeta y en el otro se acoplará a una base por medio de un pasador. Esta base en forma de disco se sujetará a la máquina de ensayo por medio de pernos.
- *Sistema de enfriamiento:* Será similar al expuesto en la propuesta N°2

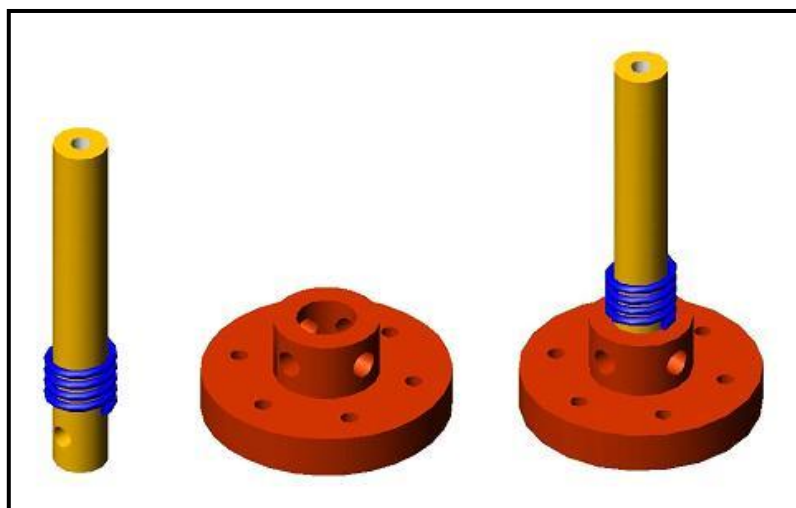


Figura 2.8 Propuesta número 4

### 2.3.2.5.- Propuesta N° 5

- *Extensor:* Será similar al expuesto en la propuesta N°4.
- *Sistema de enfriamiento:* Consistirá en una cavidad que se encuentra entre dos discos que forman la base del extensor, a través de la cual circulará un fluido refrigerante (agua) proveniente de un “chiller”.

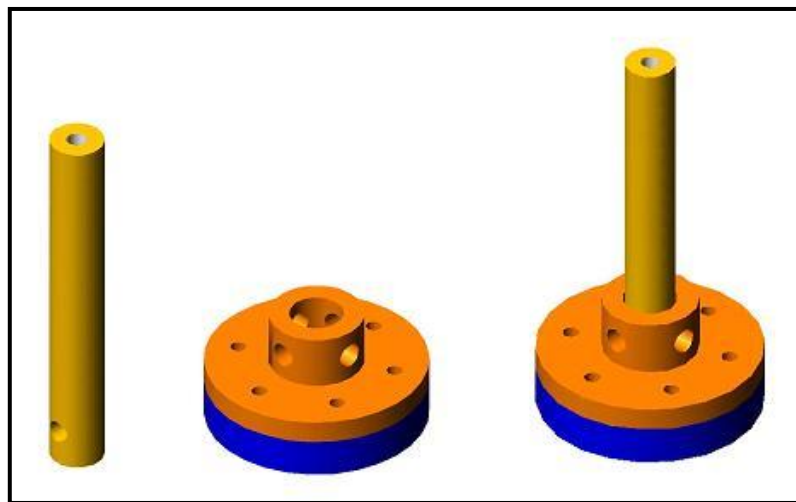


Figura 2.9 Propuesta número 5

### 2.3.2.6.- Propuesta N° 6

- *Extensor:* Estará formado por un eje que en uno de sus extremos sujetará a la probeta y en el otro se acoplará a una base por medio de un pasador. Esta base tendrá en su parte inferior una lengüeta sobre la cual la mordaza de la máquina de ensayos ejercerá presión.
- *Sistema de enfriamiento:* Consistirá en una cavidad que se encuentra entre dos piezas que forman la base del extensor, a través de la cual se hará pasar un fluido refrigerante (agua) proveniente de un “chiller”.

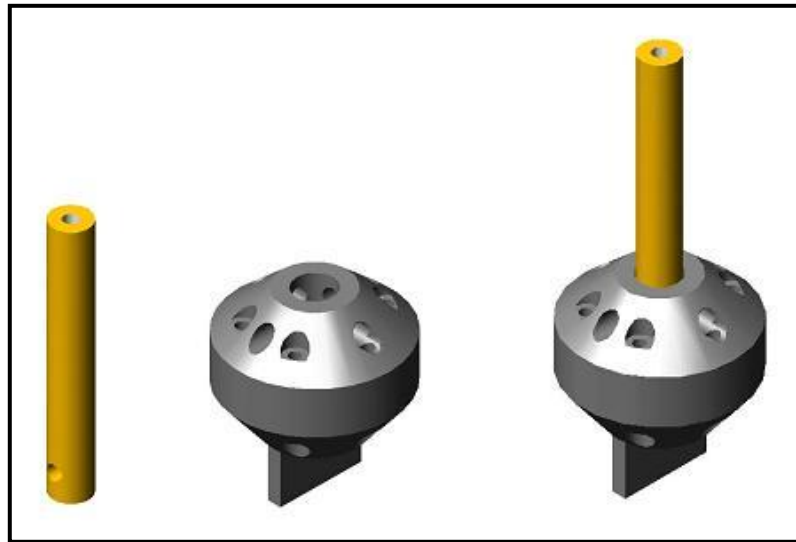


Figura 2.10 Propuesta número 6

### 2.3.2.7.- Propuesta N° 7

- *Extensor*: consistirá en un eje, el cual en uno extremos se conecta al porta probeta mientras que en el otro extremo se acopla a una base insertándose dentro de ella. Dicha base tiene en su parte inferior una lengüeta, sobre la cual la mordaza de la máquina de ensayos ejercerá presión.
- *Sistema de enfriamiento*: Similar al expuesto en la propuesta N°2

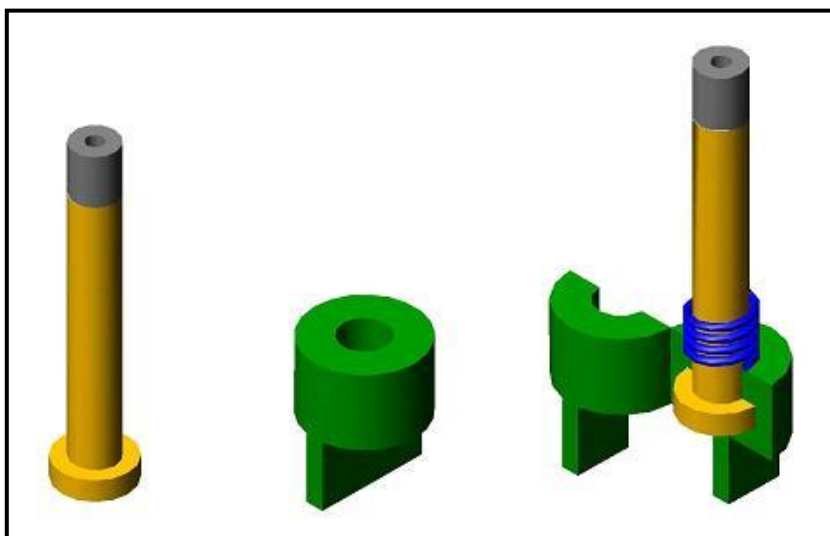


Figura 2.11 Propuesta número 7

### 2.3.3.- Análisis de las propuestas

Una vez realizada la “Tormenta de Ideas” y obtenidas las alternativas posibles de solución al problema planteado, se procederá a evaluarlas en base a parámetros que permitirán compararlas entre sí con el fin de seleccionar la solución más acertada.

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

#### 2.3.3.1.- Parámetros a evaluar

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

- *Confiabilidad:* es la probabilidad que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un cierto período de tiempo <sup>(8)</sup>.
- *Operabilidad:* es la facilidad con que un equipo en particular puede ser manejado por un operador o por un sistema automatizado <sup>(8)</sup>.
- *Disponibilidad:* es la cantidad de tiempo total que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. La disponibilidad de un equipo no implica necesariamente que esté funcionando, sino que se encuentra en condiciones de funcionar <sup>(6)</sup>.

- *Mantenimiento*: es la facilidad que ofrece el equipo para realizar las tareas necesarias con el fin de conservarlo o restaurarlo, de manera que pueda permanecer de acuerdo con una condición especificada <sup>(8)</sup>.
- *Seguridad*: se refiere a la probabilidad de que ocurran imprevistos o accidentes que pongan en riesgo la integridad física del operador <sup>(9)</sup>.
- *Fabricación*: determina la facilidad del proceso de construcción de cada elemento del equipo por separado y su posterior ensamblaje <sup>(6)</sup>.
- *Estilo*: una vez construido y probado el equipo, el siguiente paso puede ser la comercialización del mismo, por lo que es necesario tomar en consideración que el aspecto visual sea atractivo, sobrio y elegante.
- *Ergonomía*: propiedad por la cual, un equipo es cómodo de utilizar, adaptándose al usuario <sup>(9)</sup>.
- *Adquisición de los componentes*: es la facilidad para hallar los elementos necesarios para la fabricación del equipo en el mercado nacional y de ser necesario, en el internacional.
- *Peso*: un equipo pesado trae como consecuencia dificultades en su traslado y operabilidad, por lo que un diseño liviano es el más apropiado <sup>(8)</sup>.
- *Tamaño*: se refiere al espacio que ocupará el equipo en su lugar de trabajo. Un diseño compacto evitará en gran medida la interferencia con los demás equipos o actividades que se desarrollarán alrededor del mismo <sup>(8)</sup>.

- *Tiempo de construcción:* tiempos de construcción reducidos ayudan a disminuir el costo total del equipo ayudando en su competitividad al momento de comercializarlo.
- *Costo total del equipo:* se refiere a los recursos empleados a lo largo del diseño, obstrucción y puesta en funcionamiento del equipo como por ejemplo el tiempo y la disponibilidad económica.

#### **2.3.3.2.- Matriz Morfológica.**

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

Cada parámetro será evaluado empleando la siguiente escala:

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

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

Tabla 2.1. Porcentajes asignados a cada parámetro de evaluación

| Parámetros a evaluar   | (%)        |
|------------------------|------------|
| Confiabilidad          | 12         |
| Seguridad              | 12         |
| Disponibilidad         | 11         |
| Operabilidad           | 11         |
| Costo total del equipo | 10         |
| Fabricación            | 8          |
| Adqui. componentes     | 8          |
| Mantenimiento          | 7          |
| Ergonomía              | 7          |
| Tiempo de construcción | 5          |
| Tamaño                 | 3          |
| Peso                   | 3          |
| Estilo                 | 3          |
| <b>TOTAL</b>           | <b>100</b> |

A continuación se presenta la matriz morfológica de las propuestas:

Tabla 2.3 Matriz morfológica (extensores y sistema de enfriamiento)

| <i>Parámetros a evaluar</i>   | <i>(%)</i> | <i>Prop. 1</i> |              | <i>Prop. 2</i> |              | <i>Prop. 3</i> |              | <i>Prop. 4</i> |              |
|-------------------------------|------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
|                               |            | <i>Pts</i>     | <i>Valor</i> | <i>Pts</i>     | <i>Valor</i> | <i>Pts</i>     | <i>Valor</i> | <i>Pts</i>     | <i>Valor</i> |
| <i>Confiabilidad</i>          | 12         | 2              | 0,24         | 2              | 0,24         | 2              | 0,24         | 3              | 0,36         |
| <i>Seguridad</i>              | 12         | 3              | 0,36         | 3              | 0,36         | 3              | 0,36         | 3              | 0,36         |
| <i>Disponibilidad</i>         | 11         | 3              | 0,33         | 3              | 0,33         | 2              | 0,22         | 4              | 0,44         |
| <i>Operabilidad</i>           | 11         | 3              | 0,33         | 4              | 0,44         | 3              | 0,33         | 2              | 0,22         |
| <i>Costo total del equipo</i> | 10         | 3              | 0,3          | 4              | 0,4          | 2              | 0,2          | 4              | 0,4          |
| <i>Fabricación</i>            | 8          | 4              | 0,32         | 4              | 0,32         | 2              | 0,16         | 3              | 0,24         |
| <i>Adqui. componentes</i>     | 8          | 4              | 0,32         | 4              | 0,32         | 3              | 0,24         | 4              | 0,32         |
| <i>Mantenimiento</i>          | 7          | 3              | 0,21         | 3              | 0,21         | 2              | 0,14         | 3              | 0,21         |
| <i>Ergonomía</i>              | 7          | 2              | 0,14         | 2              | 0,14         | 2              | 0,14         | 3              | 0,21         |
| <i>Tiempo de construcción</i> | 5          | 4              | 0,2          | 4              | 0,2          | 2              | 0,1          | 3              | 0,15         |
| <i>Tamaño</i>                 | 3          | 4              | 0,12         | 4              | 0,12         | 2              | 0,06         | 3              | 0,09         |
| <i>Peso</i>                   | 3          | 4              | 0,12         | 4              | 0,12         | 3              | 0,09         | 3              | 0,09         |
| <i>Estilo</i>                 | 3          | 3              | 0,09         | 3              | 0,09         | 4              | 0,12         | 4              | 0,12         |
| <b>TOTAL</b>                  | <b>100</b> |                | <b>3,08</b>  |                | <b>3,29</b>  |                | <b>2,4</b>   |                | <b>3,21</b>  |

Tabla 2.3 (cont.) Matriz morfológica (extensores y sistema de enfriamiento)

| <i>Parámetros a evaluar</i>   | <i>(%)</i> | <i>Prop. 5</i> |              | <i>Prop. 6</i> |              | <i>Prop. 7</i> |              |
|-------------------------------|------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
|                               |            | <i>Pts</i>     | <i>Valor</i> | <i>Pts</i>     | <i>Valor</i> | <i>Pts</i>     | <i>Valor</i> |
| <i>Confiabilidad</i>          | 12         | 4              | 0,48         | 4              | 0,48         | 3              | 0,36         |
| <i>Seguridad</i>              | 12         | 3              | 0,36         | 4              | 0,48         | 3              | 0,36         |
| <i>Disponibilidad</i>         | 11         | 4              | 0,44         | 4              | 0,44         | 3              | 0,33         |
| <i>Operabilidad</i>           | 11         | 2              | 0,22         | 3              | 0,33         | 3              | 0,33         |
| <i>Costo total del equipo</i> | 10         | 3              | 0,3          | 3              | 0,3          | 4              | 0,4          |
| <i>Fabricación</i>            | 8          | 3              | 0,24         | 3              | 0,24         | 3              | 0,24         |
| <i>Adqui. componentes</i>     | 8          | 3              | 0,24         | 3              | 0,24         | 4              | 0,32         |
| <i>Mantenimiento</i>          | 7          | 4              | 0,28         | 4              | 0,28         | 3              | 0,21         |
| <i>Ergonomía</i>              | 7          | 3              | 0,21         | 3              | 0,21         | 3              | 0,21         |
| <i>Tiempo de construcción</i> | 5          | 3              | 0,15         | 3              | 0,15         | 4              | 0,2          |
| <i>Tamaño</i>                 | 3          | 2              | 0,06         | 2              | 0,06         | 3              | 0,09         |
| <i>Peso</i>                   | 3          | 3              | 0,09         | 2              | 0,06         | 3              | 0,09         |
| <i>Estilo</i>                 | 3          | 4              | 0,12         | 4              | 0,12         | 3              | 0,09         |
| <b>TOTAL</b>                  | <b>100</b> |                | <b>3,19</b>  |                | <b>3,39</b>  |                | <b>3,23</b>  |

#### 2.3.4.- Toma de decisiones

Una vez construida la matriz morfológica y observado los resultados de la evaluación de los parámetros, se puede apreciar que la propuesta N° 6 fue la que obtuvo mayor puntuación, por lo que será el diseño que se desarrollará en los siguientes capítulos.

#### 2.4.- Ingeniería de detalles

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



el correcto funcionamiento del equipo. En el capítulo III se hará este estudio exhaustivo.

### ***2.5.- Fabricación del prototipo***

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

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

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

## ***CAPÍTULO III***

### ***Desarrollo del dispositivo***

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

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

En el capítulo anterior se seleccionaron como diseños finales la propuesta N° 4 para el sistema de calentamiento y la propuesta N° 6 para los extensores y sistema de enfriamiento, por lo que a continuación se procederá a realizar los cálculos pertinentes para asegurar su correcto funcionamiento.

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

El dispositivo para realizar ensayos de tracción uniaxial a temperaturas moderadas que se pretende desarrollar en este trabajo, basa su funcionamiento en el calentamiento por medio de resistencias eléctricas que transfieren su calor a unas paredes de material refractario que se calientan uniformemente. Al aumentar la temperatura de las paredes del horno, también aumenta la temperatura del medio y la probeta es calentada por convección y radiación.

La probeta es fijada dentro del horno por medio de los extensores y estos a su vez se acoplan en su otro extremo a las bases refrigeradas por medio de un pasador. Dichas bases poseen en su parte inferior una lengüeta que les permite ser sujetadas

por las mordazas de la máquina de ensayos. De esta manera, la carga aplicada es transmitida a la probeta y gracias a que las bases son refrigeradas, se aísla a la celda de carga del contacto con temperaturas elevadas que podrían alterar su buen funcionamiento.

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

El desempeño de un elemento de máquina va directamente asociado a la resistencia del material del cual está fabricado. Las tablas de propiedades de materiales de ingeniería nos informan sobre la resistencia de los materiales producto de su identidad, tratamientos o procesamiento para crear su geometría, etc. Lo que nos puede dar una idea de las características de un elemento antes de que se ensamble con otros en una máquina o en un sistema <sup>(4)</sup>.

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

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

La falla por fatiga o fractura de un elemento puede significar que este se ha separado en dos o más partes; asimismo, la falla por deformación plástica implica que el elemento se ha distorsionado permanentemente, alterando de esta manera su geometría y degradado su confiabilidad; o se ha comprometido su función, por cualquier razón. Para la predicción de fallas en los elementos de este diseño se utilizará la *hipótesis de la energía de deformación o hipótesis de von Mises-Hencky*

que predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total en un volumen unitario (esfuerzo de von Mises  $\sigma'$ ) alcanza o excede la energía de deformación en el mismo volumen correspondiente a la resistencia de fluencia en compresión o en tensión.

El esfuerzo de von Mises para la condición de esfuerzo plano esta dado por:

$$\sigma' = \left( \sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 \right)^{1/2} \quad (\text{Ec. 13})$$

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

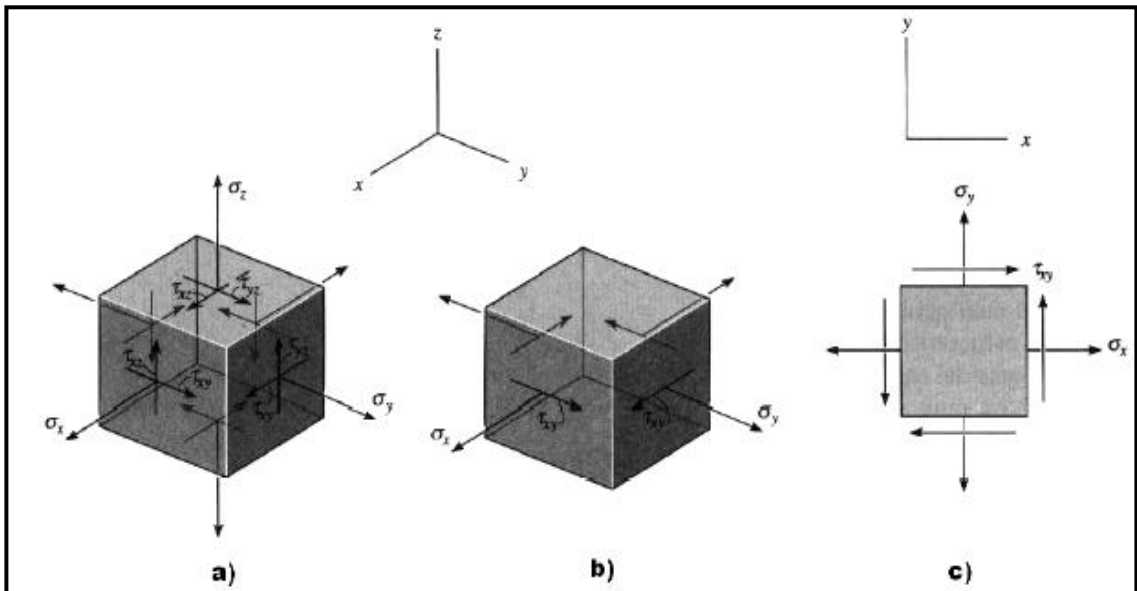


Figura 3.1 Estados de esfuerzo: a) general, b) plano y c) plano (vista bidimensional)<sup>(11)</sup>

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

A continuación se comienza con el estudio detallado de cada una de las partes que conforman el diseño.

### 3.3.1.- Carga máxima de trabajo

Para realizar todos los cálculos de resistencia de los materiales encargados de sujetar la probeta durante el ensayo, se procederá a hallar el valor máximo de carga necesario para fracturar una probeta de aluminio en pruebas de tracción.

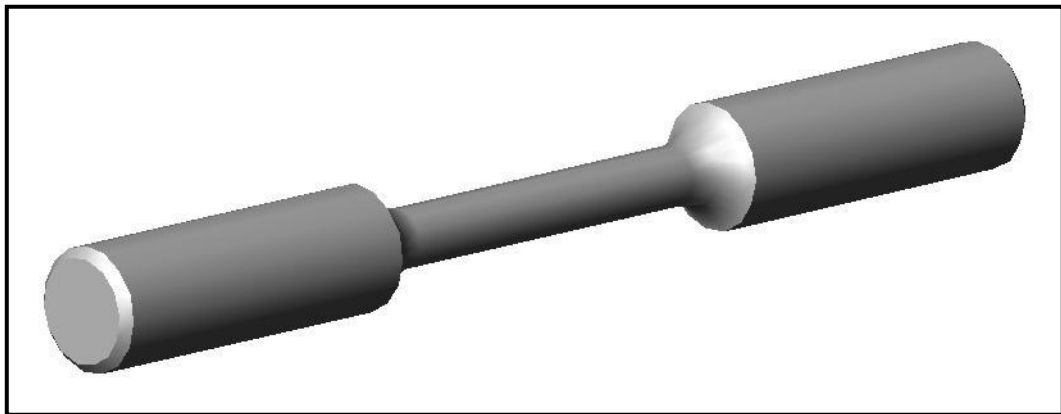


Figura 3.2 Probeta de aluminio para ensayos de tracción

Sabiendo que el diámetro de la probeta en la sección de calibrada es de  $6\text{mm}^{(10)}$ , se procede a calcular el área de la sección transversal:

$$D = 6 \text{ mm} = 0,006 \text{ m}$$

$$\text{Área de sección transversal} = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times (0,006\text{m})^2}{4} = 2,83 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Conociendo que el valor de resistencia a la tensión más elevada conocida para una aleación de aluminio es de 700 MPa (para la aleación 7075-T77511) <sup>(11)</sup>, podemos determinar el valor máximo de la carga que se aplicará en los ensayos de tracción que abarcan este trabajo especial de grado.

$$S_y = 700 \text{ MPa}$$

$$F = S_y \times A = 700 \text{ MPa} \times 2,83 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = 19782 \text{ N}$$

Esta es la fuerza máxima que se utilizará como referencia en los cálculos de resistencia de los elementos que conforman el dispositivo diseñado.

### **3.3.2.- Extensores**

#### **3.3.2.1.- Bases refrigeradas**

Estos elementos servirán para anclar a los extensores que soportarán la probeta en la máquina de ensayos Instron, así como para asegurar el aislamiento térmico del equipo, de modo que éste no se vea afectado por la temperatura de ensayo.

Estarán fabricados de acero inoxidable 304 y serán de forma cilíndrica con caras semicónicas con una lengüeta en uno de sus extremos que servirá para sujetarlas en las mordazas hidráulicas de la máquina Instron, mientras que en el otro extremo estará sujeto un eje mediante un pasador. Esta base se divide en dos placas existiendo una cavidad entre estas por donde circulará el fluido refrigerante (figura 3.3).

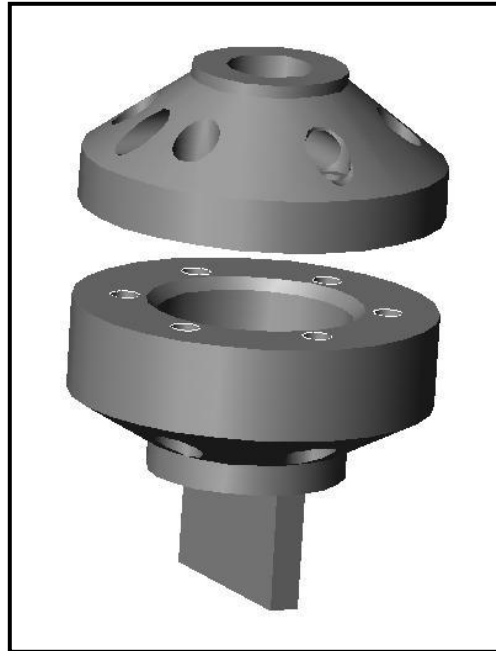


Figura 3.3 Base del extensor

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

Una fuerza axial  $F$ , actuando sobre los extremos de una barra prismática recta homogénea, causará una distribución de esfuerzo normal uniforme sobre el área de la sección transversal. Este esfuerzo tiene una magnitud de  $\sigma = F/A$  y un sentido que es igual al de la fuerza interna  $F$  resultante, ya que todos los esfuerzos normales sobre la sección transversal actúan con este sentido para generar esta resultante <sup>(12)</sup>.



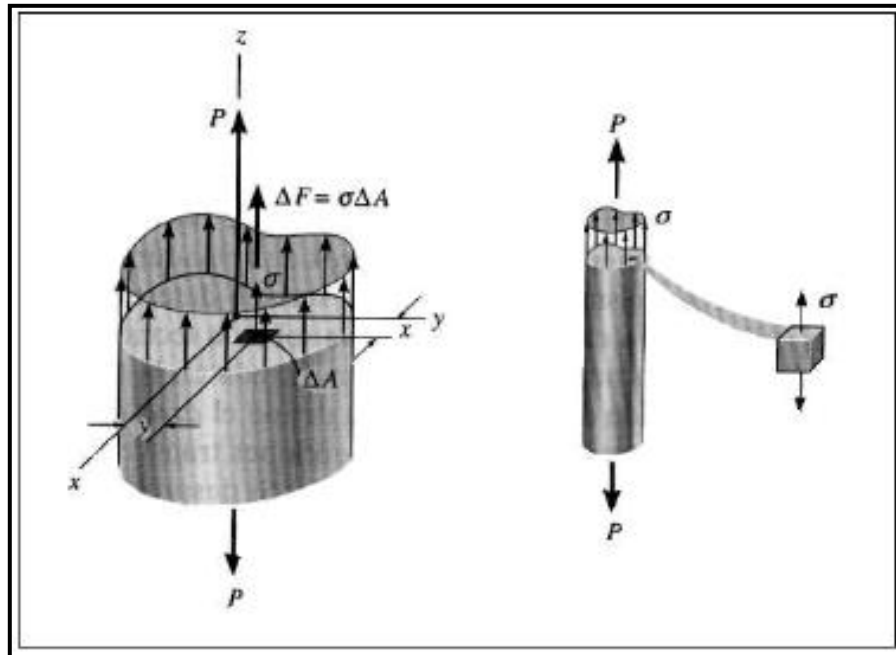


Figura 3.4 Distribución de los esfuerzos en una viga sometida a tracción <sup>(12)</sup>

A continuación se hará un estudio de esfuerzos en aquellas regiones de las bases refrigeradas que tienen menor área de sección (figura 3.5):

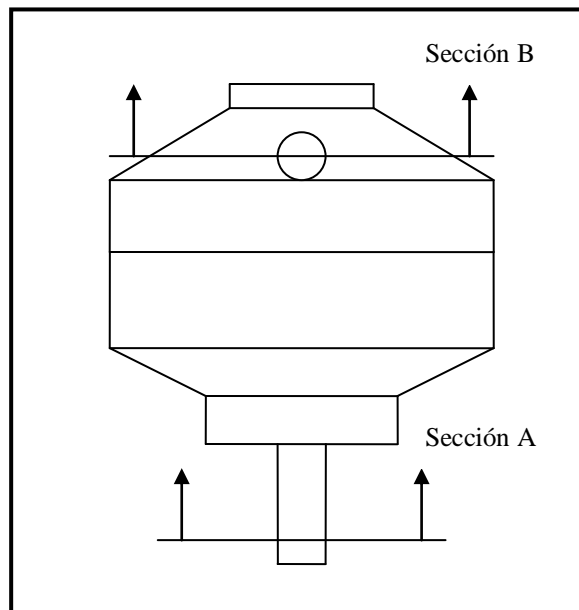


Figura 3.5 Esquema de la base de los extensores

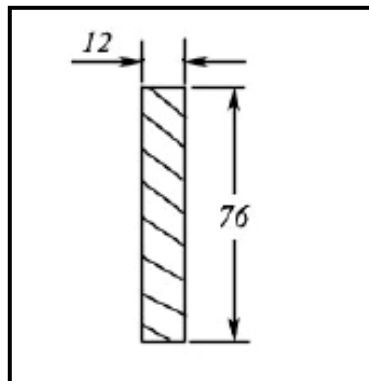
**- Estudio en la Sección A:**

Figura 3.6 Sección transversal A (medidas en mm)

Sabiendo que

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 14})$$

donde  $F= 19782\text{N}$

$$A= 9,12 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$\sigma = \frac{19872\text{N}}{9,12 \times 10^{-4} \text{m}^2} = 21,69 \text{MPa}$$

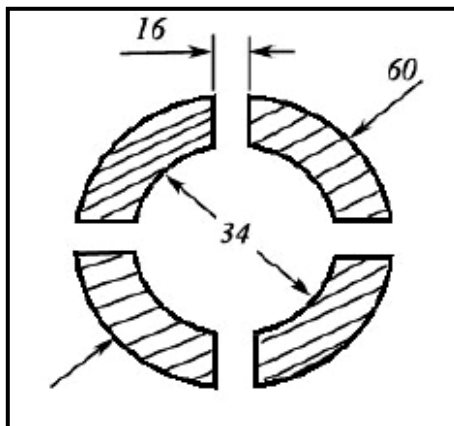
**- Estudio en la Sección B:**

Figura 3.7 Sección transversal B (medidas en milímetros)

Sabiendo que

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde  $F= 19782\text{N}$

$$A= 0,00108\text{m}^2$$

$$\sigma = \frac{19782\text{N}}{0,00108\text{m}^2} = 18,31\text{MPa}$$

Ahora se aplica von Mises para el valor máximo de los esfuerzos nominales obtenidos en las secciones de esta pieza

$$\sigma' = \sqrt{(21,69\text{MPa})^2} = 21,69\text{MPa}$$

$$S_y = \sigma' \times n = 21,69\text{MPa} \times 2 = 43,38\text{MPa}$$

Sabiendo que la resistencia a la fluencia del acero inoxidable 304 es de 244 MPa, se asegura que esta base no fallará para la carga a la cual estará sometida en estas secciones.

### 3.3.2.2.- Estudio de los pernos de la base:

Sabemos que el factor de seguridad en pernos viene dado por

$$n = \frac{Sp \times At - Fi}{C \times (F/N)} \quad (\text{Ec. 15})$$

donde  $Fi$  es la precarga del perno y para una conexión reutilizable viene dada por

$$Fi = 0,75 \times At \times Sp \quad (\text{Ec. 16})$$

Al sustituir la ecuación 16 en la ecuación 15 y despejar el esfuerzo en el perno (Sp) nos queda que

$$Sp = \frac{n \times C \times (F/N)}{0,25 \times At} \quad (\text{Ec. 17})$$

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

$$C = \frac{Kb}{Kb + Km} \quad (\text{Ec. 18})$$

donde Kb es la rigidez del sujetador y se expresa como

$$Kb = \frac{Ad \times At \times E}{Ad \times lt + At \times ld} \quad (\text{Ec. 19})$$

donde Ad es el área del diámetro mayor del sujetador, que para una rosca de 10 mm de diámetro es

$$Ad = \pi \times \frac{D^2}{4} = \pi \times \frac{(0,010\text{m})^2}{4} = 7,85 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

At es el área de esfuerzo de tensión (tabla A-1) que para un diámetro serie paso fino de 10 mm es la siguiente:

$$At = 61,2 \text{mm}^2 = 6,12 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

E es el módulo de elasticidad, para un acero común E= 201 GPa

lt es la longitud de la parte roscada de agarre (tabla A-2), para L= 49,56 mm y D= 10 mm tenemos que

$$lt = 2 \times D + 6mm = 2 \times 10mm + 6mm = 26mm = 0,026m$$

$ld$  es la longitud de la parte sin rosca del perno, por tanto

$$ld = L - lt = 55,83mm - 26mm = 29,83mm = 0,02983m$$

Entonces, de la ecuación 19 nos queda

$$Kb = \frac{0,0000785m^2 \times 6,12 \times 10^{-5}m^2 \times 207GPa}{0,0000785m^2 \times 0,026m + 6,12 \times 10^{-5}m^2 \times 0,02983m}$$

$$Kb = 257,19 \text{ MN/m}$$

$Km$  es la rigidez del elemento y se expresa como <sup>(13)</sup>

$$Km = E \times D \times A \times e^{(B \times D)/L} \quad (\text{Ec. 20})$$

donde  $D$  es el diámetro = 0,010m

$L$  es la longitud = 0,05583m

$E$  es el modulo de elasticidad de los elementos o placas, para el acero inoxidable  $E=190GPa$

$A$  y  $B$  se extraen de la tabla A-3 y para el acero toman los siguientes valores  $A= 0,78715$  y  $B= 0,62873$

$$Km = 190000 \text{ MPa} \times 0,011 \text{ m} \times 0,78715 \times e^{(0,62873 \times 0,011 \text{ m})/0,05583 \text{ m}}$$

$$Km = 1673,86 \text{ MN/m}$$

Sustituyendo  $Kb$  y  $Km$  en la ecuación 18 tenemos

$$C = \frac{Kb}{Kb+Km} = \frac{257,19 \frac{MN}{m}}{257,19 \frac{MN}{m} + 1673,86 \frac{MN}{m}} = 0,1331$$

Sustituyendo la fracción de la carga externa soportada por el perno (C) en la ecuación 17, donde el factor de seguridad es  $n= 2,5$  y el número de pernos  $N= 6$  obtenemos lo siguiente

$$Sp = \frac{2,5 \times 0,1331 \times \left( \frac{19782N}{6} \right)}{0,25 \times 6,12 \times 10^{-5} m^2} = 71,75 \text{MPa}$$

Como se puede apreciar, el esfuerzo a la resistencia límite mínima a la tensión en los pernos da por debajo de la resistencia mínima de tensión de los pernos de clases métricas de propiedad de 12,9 que se usarán, los cuales tienen una resistencia de 1220 MPa, por lo que se asegura que los pernos no fallarán.

### 3.3.2.2.1.- Cálculos adicionales

A continuación se calcularán diversos valores de diferentes fuerzas para garantizar el correcto funcionamiento y desempeño de los pernos.

***Fuerza mínima de apriete que garantiza la unión de las placas a la hora de aplicar cargas externas***

$$Fi_{min} = \frac{Km}{Km+Kb} \times P \quad (\text{Ec. 21})$$

$$Fi_{min} = \frac{1673,86 \frac{MN}{m}}{1673,86 \frac{MN}{m} + 257,19 \frac{MN}{m}} \times 19782N = 17147,25N$$

**Fuerza máxima de apriete para que el perno no falle**

$$F_{i\_max} = S_y \times A_t - \frac{K_b}{K_b + K_m} \times P \quad (\text{Ec. 22})$$

$$F_{i\_max} = 1220\text{MPa} \times 6,12 \times 10^{-5} \text{ m}^2 - \frac{257,19 \frac{\text{MN}}{\text{m}}}{1673,86 \frac{\text{MN}}{\text{m}} + 257,19 \frac{\text{MN}}{\text{m}}} \times 19782\text{N}$$

$$F_{i\_max} = 64685,25\text{N}$$

**Torque requerido para el apriete**

$$T = 0,2 \times F_i \times D \quad (\text{Ec. 23})$$

donde  $F_i$  viene dado por:

$$F_i = 0,75 \times A_t \times S_p = 0,75 \times 0,0000612\text{mm}^2 \times 71752,23\text{Pa} = 3293,42\text{N}$$

y

$$T = 0,2 \times F_i \times D = 0,2 \times 3293,32\text{N} \times 0,01\text{m} = 6,58\text{N} \times \text{m}$$

**Precarga máxima a fatiga**

$$F_{i\_max\_f} = S_{ut} \times A_t - \frac{C \times P}{2 \times N} \times \left( \frac{S_{ut}}{S_n} + 1 \right) \quad (\text{Ec. 24})$$

donde  $S_{ut}$  es la resistencia última a la tensión que para un perno de clase 12.9 es  $S_{ut} = 1220\text{MPa}$

$S_n$  es el límite de resistencia a la fatiga del perno y viene dado por

$$S_n = K_a \times K_b \times K_c \times K_d \times K_e \times 0,504 \times S_{ut} \quad (\text{Ec. 25})$$

$K_a$  es el factor de superficie y viene dado por

$$K_a = a \times S_{ut}^b \quad (\text{Ec. 26})$$

donde el factor “a” para un acabado de superficie maquinado o estirado en frío es 4,51 y el factor “b” es de -0,265

$S_{ut}$  es la resistencia mínima a la tensión = 1220 MPa

Quedando lo siguiente:

$$K_a = 4,51 \times (1220 \text{Mpa})^{-0,265} = 0,685$$

$K_b$  es el factor de tamaño y cuando existen cargas axiales toma el valor de 1

$K_c$  es el factor de carga, y tiene un valor de 0,923 para  $S_{ut} \leq 1520 \text{ Mpa}$

$K_d$  es el factor de temperatura y según la tabla A-4 para una temperatura de 25 °C tiene un valor de 1,0013

$K_e$  es el factor de esfuerzos diversos y viene dado por

$$K_e = \frac{1}{K_f} \quad (\text{Ec. 27})$$

donde  $K_f$  para roscas laminadas y tornillos grado métrico entre 6.6 a 12.9 toma un valor de 3

Por tanto tenemos que

$$K_e = \frac{1}{3} = 0,33$$

Sustituyendo los diversos factores calculados en la ecuación 25 obtenemos el siguiente valor para el límite de resistencia a la fatiga del perno

$$S_n = 0,685 \times 1 \times 0,923 \times 1,0013 \times 0,33 \times 262,08 \text{MPa} = 55,38 \text{MPa}$$

De modo que la precarga máxima a la fatiga es de



$$F_{i\_max\_f} = 1220\text{MPa} \times 0,0000612\text{m}^2 - \frac{0,1331 \times 19782\text{N}}{2 \times 6} \times \left( \frac{1220\text{MPa}}{55,38\text{MPa}} + 1 \right)$$

$$F_{i\_max\_f} = 69607,42\text{N}$$

### 3.3.2.3.- Pasador

Será el encargado de unir la base con el eje de los extensores, pasando a través de agujeros en ambos elementos. Estará fabricado de acero AISI 4340 templado y será de forma cilíndrica con un diámetro de 12 mm.

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

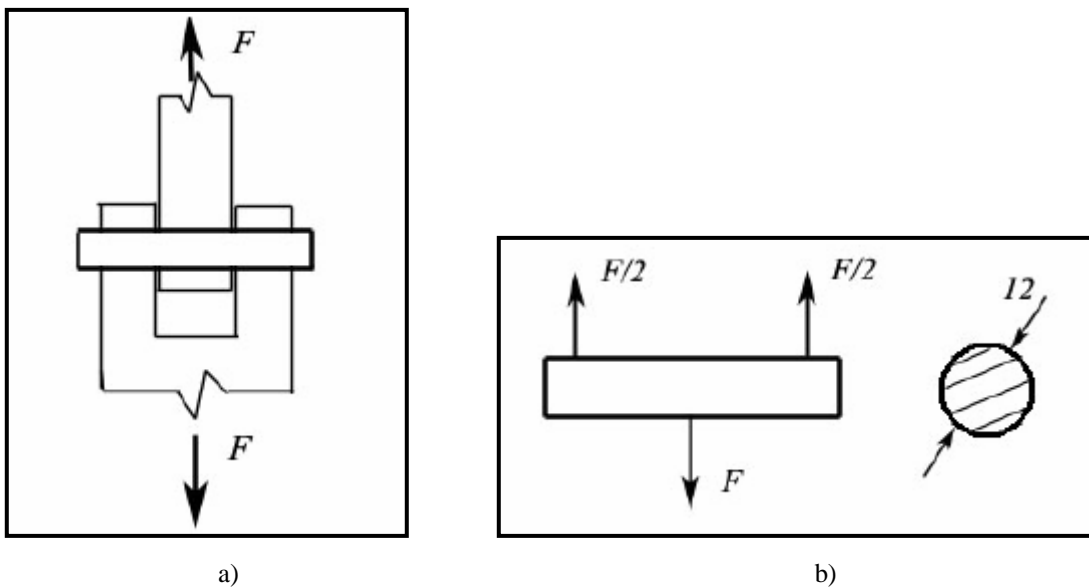


Figura 3.8 a) Esquema del pasador con las fuerzas de tracción, b) Diagrama de cuerpo libre del pasador y sección transversal (medidas en milímetros)

Tenemos que

$$\tau = \frac{F/2}{A} \quad (\text{Ec. 28})$$

donde  $F = 19782 \text{ N}$  y  $A = 11,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

$$\tau = \frac{19782\text{N}/2}{11,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 87,5\text{MPa}$$

El esfuerzo de von Misses es:

$$\sigma' = \sqrt{3 \times (87,5\text{MPa})^2} = 151,55\text{MPa}$$

El  $S_y$  mínimo para que no falle es con un factor de seguridad de 2 es:

$$S_y = \sigma' \times n \quad (\text{Ec. 29})$$

$$S_y = 303,10\text{MPa}$$

La resistencia a la fluencia del acero AISI 4340 templado es de 700 MPa a temperatura ambiente, y disminuye hasta aproximadamente 550MPa a 500°C por lo que se asegura que el pasador no fallará.

### 3.3.2.3.- Eje

Éste estará conectado a la base a través de un pasador en uno de sus extremos, mientras que en el otro sujetará la probeta dentro del horno mediante una rosca ½” – 13UNF. Estará fabricado de acero AISI 4340 templado y tendrá un diámetro de 32mm y 215mm de largo.

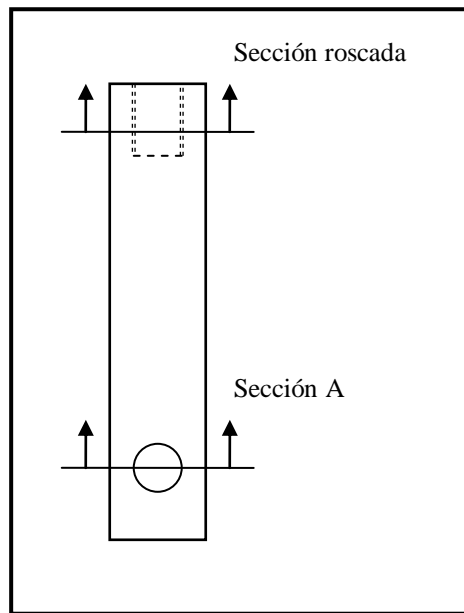


Figura 3.9 Esquema del eje del extensor

*- Estudio de la sección A*

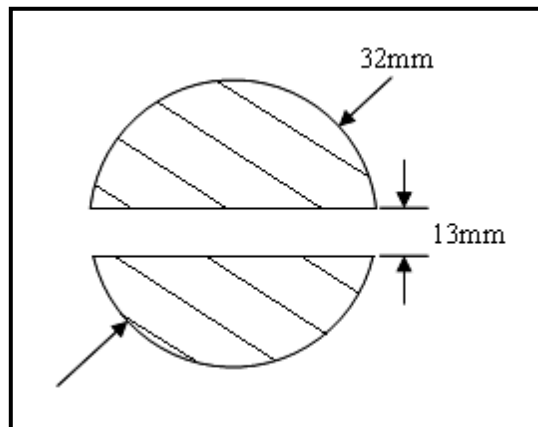


Figura 3.10 Sección transversal A (medidas en milímetros)

Conociendo que

$$F= 19782 \text{ N}$$

$$A= 4,22 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Se puede determinar el esfuerzo a partir de la ecuación 24, quedando

$$\sigma = \frac{19782N}{4,22 \times 10^{-4} m^2} = 46,87 MPa$$

Aplicando von Mises tenemos que

$$\sigma' = \sqrt{(46,87 MPa)^2} = 46,87 MPa$$

$$Sy = \sigma' \times n = 46,87 MPa \times 2 = 93,73 MPa$$

Como la resistencia a la fluencia del acero AISI 4340 templado es de 700 MPa a temperatura ambiente, y disminuye hasta aproximadamente 550 MPa a 500°C, se puede asegurar que el eje no fallara.

#### **- Estudio de la sección roscada**

Se realizará un cálculo aproximado de la unión roscada en el eje del extensor sabiendo que la rosca de esta sección es 1/2" – 13 UNC con 20mm de profundidad.

La fuerza a la que está sometido el perno es

$$Fb = C \times P + Fi \quad (\text{Ec. 30})$$

donde Fi es la precarga al perno y en este caso es cero

$$C = \frac{Kb}{Kb + Km} \quad (\text{Ec. 31})$$

donde Kb es la rigidez del sujetador (rosca del eje) y es

$$Kb = \frac{Ad \times At \times E}{Ad \times lt + At \times ld} \quad (\text{Ec. 32})$$

At es el área de esfuerzo de tensión y es de  $103,16 \times 10^{-6} m^2$

$A_d$  es el área del diámetro mayor del sujetador, que para una rosca de 20mm es de  $126,61 \times 10^{-6} \text{m}^2$

$l_t$  es la longitud de la parte roscada de agarre y es 0,020m

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

$E$  es el modulo de elasticidad del acero 4340 (205GPa)

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

Por lo que nos queda que

$$C = \frac{K_b}{K_b} = 1$$

Al sustituir en la ecuación 30, nos queda que

$$F_b = C \times P + F_i = 1 \times 19782N + 0 = 19782N$$

El esfuerzo normal viene dado por

$$\sigma = \frac{F_b}{A_t} = \frac{19782N}{103,16 \times 10^{-6} \text{m}^2} = 191,76 \text{MPa}$$

Aplicando el esfuerzo de von Mises

$$\sigma' = \sqrt{(191,76 \text{MPa})^2} = 191,76 \text{MPa}$$

$$S_y = \sigma' \times n = 191,76 \text{MPa} \times 2 = 383,52 \text{MPa}$$

Como la resistencia a la fluencia del acero 4340 templado es de 700 MPa a temperatura ambiente, y disminuye hasta aproximadamente 550MPa a 500°C, se asegura que el eje no fallará en esta sección.

### ***3.4.- Cálculos de transferencia de calor***

El dispositivo que se pretende diseñar y construir en este trabajo es un prototipo el cual le permitirá a la máquina de ensayos ampliar la variedad de estudios que con ella se pueden realizar. Al hacer esto, las condiciones normales de trabajo de la máquina se podrían alterar deteriorando sus componentes, por lo que es de vital importancia que el prototipo no sólo se acople a la máquina sino que lo haga de tal manera que al cumplir con su función, las condiciones de trabajo no se vean alteradas y afecten el correcto funcionamiento del equipo.

En el caso del ensayo de tracción a temperaturas moderadas, en el que se puede alcanzar hasta 500°C, es necesario, en lo posible, aislar a la máquina de esta fuente de calor. Esto se logra haciendo circular un fluido refrigerante (agua) a través de las cavidades de las bases de los extensores, que extraerá el calor generado manteniendo la temperatura en un nivel adecuado (alrededor de 30°C).

Para tener una idea de cuánto calor hay que extraer de los extensores y la cantidad de fluido refrigerante que se va a necesitar, se deben realizar ciertos cálculos teóricos que nos pueden dar una idea aproximada de lo que ocurrirá en la realidad.

#### ***3.4.1.- Cálculo del flujo de calor a través de los extensores***

Para la resolución del problema de transferencia de calor planteado, se considerarán las barras de los extensores como aletas de sección transversal circular uniforme, en las cuales los cambios de temperatura en la dirección longitudinal son mucho más grandes que los de la dirección transversal (figura 3.11), por lo que

podemos suponer conducción unidimensional en la dirección  $x$ . Consideraremos condiciones de estado estable (una vez alcanzada la temperatura de trabajo) y también supondremos que la conductividad térmica es una constante y que el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_c$  es uniforme sobre la superficie.

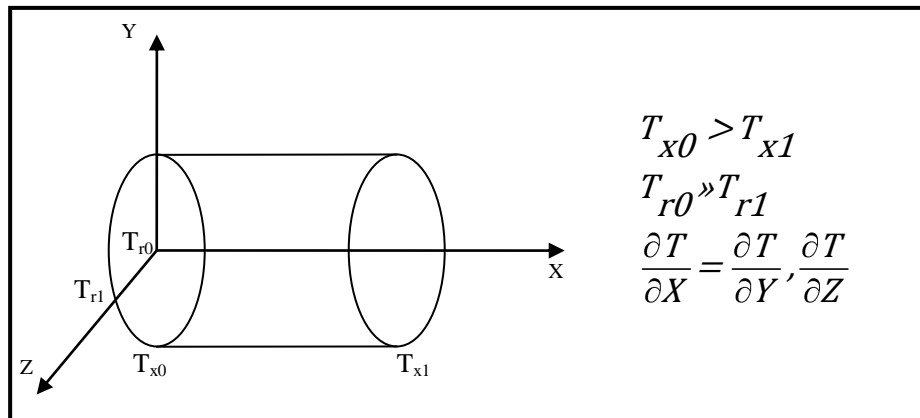


Figura 3.11 Variación de la temperatura en una aleta de sección circular. La variación de la temperatura a lo largo del eje  $x$  es mucho mayor que en la dirección de los ejes  $y$  y  $z$ .

Los cálculos se harán para el segmento de la barra que se encuentra fuera del horno (figura 3.12), suponiendo que el segmento interno permanece a temperatura constante durante todo el estudio.

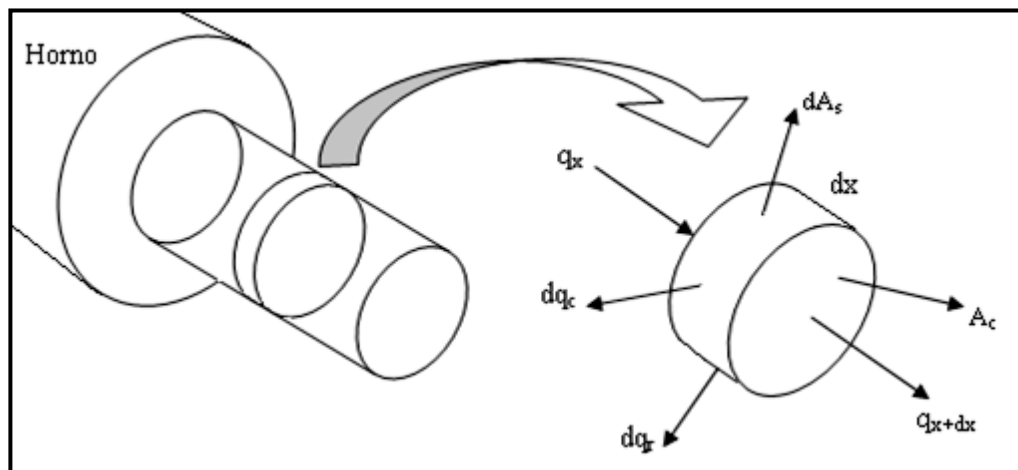


Figura 3.12 Balance de energía para una aleta de sección circular uniforme.

Al aplicar la ley de la conservación de la energía al elemento diferencial de la figura 3.12 obtenemos,

$$q_x = q_{x+dx} + dq_c + dq_r \quad (\text{Ec. 33})$$

donde  $q_x$  es el calor conducido en la dirección de  $x$

$q_{x+dx}$  es el de calor conducido  $x+dx$

$dq_c$  es el calor convectado al aire

$dq_r$  es el calor irradiado desde la superficie

De la ley de Fourier sabemos que

$$q_x = -kA_c \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 34})$$

donde  $k$  es la conductividad térmica del material

$A_c$  es el área de la sección transversal

Como la conducción de calor en  $x+dx$  se expresa como

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (\text{Ec. 35})$$

se sigue que

$$q_{x+dx} = -kA_c \frac{dT}{dx} - k \frac{d}{dx} \left( -A_c \frac{dT}{dx} \right) dx \quad (\text{Ec. 36})$$

La transferencia de calor por convección se expresa como

$$dq_c = h_c dA_s (T - T_\infty) \quad (\text{Ec. 37})$$

donde  $dA_s$  es el área superficial del elemento diferencial

$h_c$  es el coeficiente convectivo

$T_\infty$  es la temperatura de los alrededores

La transferencia de calor por radiación se expresa como



$$dq_r = \varepsilon \sigma dA_s (T^4 - T_\infty^4) \quad (\text{Ec. 38})$$

donde  $\varepsilon$  es la emisividad del material

$\sigma$  es la constante de Boltzmann igual a  $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$

Sustituyendo las ecuaciones 34, 35, 36, 37 y 38 en la ecuación del balance de energía, obtenemos

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{1}{kA_c} \times \frac{dA_s}{dx} [h_c (T - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4)] = 0 \quad (\text{Ec. 39})$$

Se tiene que

$$A_s = P \cdot x \Rightarrow \frac{dA_s}{dx} = P \quad (\text{Ec. 40})$$

donde P es el perímetro

Sustituyendo la ecuación 20 en la 19, queda

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{P}{kA_c} [h_c (T - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4)] = 0 \quad (\text{Ec. 41})$$

Para simplificar el cálculo de la ecuación diferencial se linealiza el término  $(T^4 - T_\infty^4)$ , quedando

$$(T^4 - T_\infty^4) = (T - T_\infty)(T + T_\infty)(T^2 - T_\infty^2) \quad (\text{Ec. 42})$$

Al sustituir la ecuación 22 en la 21, obtenemos

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{P}{kA_c} \left[ h_c (T - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T - T_\infty) (T + T_\infty) (T^2 + T_\infty^2) \right] = 0 \quad (\text{Ec. 43})$$

$$\text{Haciendo a } \varepsilon \sigma (T + T_\infty) (T^2 + T_\infty^2) = h_r \quad (\text{Ec. 44})$$

y sustituyendo en la ecuación 22 tenemos que

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{P}{kA_c} (T - T_\infty)(h_c - h_r) = 0$$

Reagrupando queda

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{(h_c - h_r)P}{kA_c} (T - T_\infty) = 0 \quad (\text{Ec. 45})$$

Para resolver se hacen los siguientes cambios de variable

$$\theta(x) = T(x) - T_\infty \quad y \quad (\text{Ec. 46})$$

$$m^2 = \frac{h_c + h_r}{kA_c} P \quad (\text{Ec. 47})$$

Quedando

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (\text{Ec.48})$$

que es una ecuación diferencial lineal de segundo orden, homogénea, con coeficientes constantes.

Su solución es

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (\text{Ec.49})$$

Resolviendo para el caso de temperaturas establecidas en los extremos, con las condiciones de borde

$$\begin{aligned} x = 0 \\ \theta_b(0) = T_b - T_\infty \end{aligned} \quad (\text{Ec. 50})$$

$$\begin{aligned} x = L \\ \theta_L(L) = T_L - T_\infty \end{aligned} \quad (\text{Ec. 51})$$

Las expresiones resultantes son

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\left(\frac{\theta_L}{\theta_b}\right) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \quad (\text{Ec. 52})$$

$$q_f = \sqrt{h_c + h_r} PkA_c \theta_b \frac{\cosh mL - \left(\frac{\theta_L}{\theta_b}\right)}{\sinh mL} \quad (\text{Ec. 53})$$

Ahora se procederá a realizar los cálculos para un extensor de acero AISI 4340 con siguientes datos:

Conductividad térmica (K): 44,5 W/m.K

Emisividad térmica ( $\epsilon$ ): 0,8

Diámetro del extensor (D): 0,032 m

Longitud de la porción de extensor fuera del horno (L): 0.06 m

Otros datos:

Área:

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0,032m^2}{4} = 8,04 \times 10^{-4} m^2$$

Perímetro:

$$P = \pi \times D = \pi \times 0,032m = 0,101m$$

Se calcula la temperatura de película ( $T_f$ ) que se usará como valor aproximado de la temperatura del aire, todo esto para el caso más desfavorable que es cuando el horno alcanza la temperatura máxima de 500°C.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (\text{Ec. 54})$$

$$T_f = \frac{773 + 298}{2} = 535,5K$$

donde  $T_s$  es la temperatura de superficie del extensor

Para la temperatura de película calculada, se tiene que las propiedades del aire son las siguientes:

Viscosidad cinemática ( $\nu$ ):  $4,3604 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Número de Prandtl (Pr): 0,6833

Conductividad térmica (K):  $4,297 \times 10^{-2} \text{ W/mK}$

Continuamos con el cálculo del coeficiente de expansión ( $\beta$ ), el número de Grashof (Gr) y el número de Nusselt (Nu).

Utilizando las correlaciones conocidas de para el estudio de la convección libre, nos queda lo siguiente:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (\text{Ec. 55})$$

$$\beta = \frac{1}{535,5} = 0,001867 \text{ K}^{-1}$$

$$Gr = \frac{g\beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \quad (\text{Ec. 56})$$

$$Gr = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,001867 \text{ K}^{-1} \times 777 - 298 \text{ K} \times 0,06 \text{ m}^3}{4,3604 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2} = 988571,79$$

Para realizar el cálculo del número de Nusselt (Nu) se utilizará la ecuación de LeFevre y Ede (1956) la cual toma en cuenta los efectos de la curvatura del cilindro.

$$Nu = \frac{h_c \times L}{k} = \frac{4}{3} \left[ \frac{7Gr.Pr^2}{5 \cdot 20 + 21 \cdot Pr} \right]^{1/4} + \frac{4 \cdot 272 + 315Pr}{35 \cdot 64 + 63Pr} \frac{L}{D} \quad (\text{Ec. 57})$$

$$Nu = \frac{4}{3} \left[ \frac{7 \times 988571,79 \cdot 0,68^2}{5 \cdot 20 + 21 \cdot 0,68} \right]^{1/4} + \frac{4 \cdot 272 + 315 \cdot 0,68}{35 \cdot 64 + 63 \cdot 0,68} \frac{0,06m}{0,032m}$$

$$Nu = 16,59$$

Se calcula el coeficiente convectivo ( $h_c$ )

$$h_c = \frac{Nu \times k}{L} \quad (\text{Ec. 58})$$

$$h_c = \frac{16,59 \times 4,297 \times 10^{-2} \text{ W/mK}}{0,06m} = 11,88 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Y a partir de la ecuación 44 se calcula el coeficiente radiativo ( $h_r$ )

$$h_r = 0,4 \times 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}^4} (773 + 298) \text{ K} \left( 773 \text{ K}^2 + 298 \text{ K}^2 \right)$$

$$h_r = 16,67 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

De las ecuaciones 40 y 41 tenemos:

$$\theta_b = T_b - T_\infty = 778 - 298 \text{ K} = 475 \text{ K}$$

$$\theta_L = T_L - T_\infty = 303 - 298 \text{ K} = 5 \text{ K}$$

Finalmente con el uso de las expresiones 11.2 y 15 obtenidas anteriormente, se procede a realizar el cálculo del calor transferido a través del extensor.

$$m^2 = \frac{\left(11,882W/m^2K + 16,671W/m^2K\right)0,100531m}{44,5W/mK \times 8,042 \times 10^{-4} m^2}$$

$$m^2 = 80,21 \frac{1}{m^2}$$

$$m = \sqrt{80,21 \frac{1}{m^2}} = 8,96 \frac{1}{m}$$

$$q_f = \sqrt{11,88W/m^2K + 16,67W/m^2K} \cdot 0,10053m \times 44,5W/mK \times 8,042m^2 \times \dots$$

$$\dots \times 475K \times \frac{\cosh\left(8,96 \frac{1}{m} \times 0,06m\right) - \frac{5K}{475K}}{\sinh\left(8,96 \frac{1}{m} \times 0,06m\right)}$$

$$q_f = 307,25W$$

Siendo éste el calor que debe ser extraído de cada uno de los extensores para evitar que la máquina de ensayos pueda calentarse a causa de las altas temperaturas del horno.

#### 3.4.2.- Cálculo del flujo másico de agua requerido para refrigerar los extensores

Por motivos de seguridad para los cálculos del flujo másico de agua, el calor que debe ser extraído se tomará como 500 W.

El flujo másico se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \frac{q}{C_p \times \Delta T} \quad (\text{Ec. 59})$$

donde  $\dot{m}$  es el flujo másico de agua

$C_p$  es el calor específico del agua

$\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura de salida y de entrada

$$\dot{m} = \frac{500W}{4182,2 J/Kg.K \times 294 - 293 K} = 0,12 Kg/s$$

Siendo este el flujo másico de agua que debe circular a través de cada una de las bases para refrigerar los extensores.

El cálculo del caudal se hace a través de la siguiente expresión:

$$Q = \dot{m} \times v_f \times 60000 l.s/m^3 .m in \quad (Ec. 60)$$

donde Q es el caudal

$v_f$  es el volumen específico del agua

$$Q = 0,12 Kg/s \times 0,0010016 m^3/Kg \times 60000 l.s/m^3 .m in$$

$$Q = 7,211 l/min$$

Siendo este el caudal requerido para cada extensor, dando un total de 14 l/min para todo el sistema. Sabiendo que el “chiller” disponible en el laboratorio de ensayos mecánicos tiene una capacidad de ofrecer hasta aproximadamente 90 l/min de fluido refrigerante (agua) y actualmente sólo se emplean 40 l/min, lo que nos da una diferencia de casi 50 l/min que se encuentran disponibles, por lo que puede ser empleado en la refrigeración de las bases del extensor.

### ***3.5.- Evaluación y puesta en funcionamiento del horno Instron***

En el proceso de recuperación de este equipo se realizó un levantamiento de los planos de control y potencia del sistema eléctrico/electrónico del mismo. Todo

esto con la finalidad de entender su funcionamiento y poder determinar si sus componentes se encontraban en buenas condiciones.

Con la ayuda del plano de control (anexo 13), se identificaron las señales de entrada, lo que nos permitió poner en funcionamiento el horno, comprobándose que si calentaba.

Una vez se verificó que el equipo se encontraba apto para su uso, se procedió en fases siguientes a su puesta en funcionamiento por medio de un controlador lógico programable (P.L.C. por sus siglas en inglés).



## ***CAPÍTULO IV***

### ***Construcción del dispositivo***

Una vez finalizada la fase de ingeniería de detalle y establecidas las especificaciones definitivas de cada elemento, se dio inicio a la fabricación de las diferentes piezas, seleccionándose los materiales y procesos de manufactura que logren resolver de manera efectiva las necesidades de calidad, tiempo y economía. Posteriormente se realizó el ensamblaje de todas las piezas, elementos y equipos contruidos o adquiridos.

#### ***4.1.- Selección de materiales.***

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

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

Es un acero inoxidable austenítico, cuyos principales aleantes son Cr y Ni, con un bajo contenido de C, y que presenta una excelente resistencia a la corrosión debido a su alto contenido de Cr, que al ser un metal muy reactivo, se combina con el oxígeno del aire o en cualquier otra condición oxidante para formar una película que lo aísla del medio agresivo (pasivación). Este tipo de acero tiene propiedades para embutido profundo, no es templable ni magnético y puede ser endurecido sólo mediante trabajo en frío. Posee buena resistencia a altas temperaturas. Exhibe una buena soldabilidad y son fáciles para fabricar, si se mantienen procedimientos adecuados. Su aplicación es frecuente en la industria de transporte, almacenamiento y manejo de gases licuados, en la industria alimenticia, industria de construcción, en maquinaria industrial como en los cuerpos de bombas, ejes y tubos, entre otras aplicaciones<sup>(14)</sup>.

Tabla 4.1 Análisis químico del acero inoxidable austenítico AISI 304, expresado en % de los elementos <sup>(14)</sup>

| Tipo AISI | C    | Cr          | Ni         | Mo | Otro  |
|-----------|------|-------------|------------|----|-------|
| 304       | 0.08 | 18.0 – 20.0 | 8.0 – 10.5 | -  | 0.10N |

Tabla 4.2 Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero inoxidable austenítico 304 <sup>(14)</sup>

|   |                        |
|---|------------------------|
| <b>Densidad</b>                         | 7850 Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Dureza Brinell</b>                   | 160                    |
| <b>Dureza Rockwell B</b>                | 70                     |
| <b>Dureza Vickers</b>                   | 129                    |
| <b>Resistencia última a la tracción</b> | 588 MPa                |
| <b>Resistencia a la cedencia</b>        | 276 MPa                |
| <b>Elongación a la ruptura</b>          | 70 %                   |
| <b>Módulo de elasticidad</b>            | 193 GPa                |
| <b>Calor específico</b>                 | 0,5 J/g.°C             |
| <b>Conductividad térmica</b>            | 16,2 W/m.K             |

Las bases refrigeradas transmiten la carga a los ejes extensores y mantienen aislada a la máquina de las altas temperaturas gracias a que a través de ellas circula un fluido refrigerante (agua) proveniente de un “chiller”. Por lo tanto, estas bases deben estar construidas con un material que posea una resistencia mecánica suficiente para soportar las cargas durante los ensayos y que sea capaz de mantener su integridad al estar en contacto directo con el agua.

El acero inoxidable AISI 304 es el ideal para esta aplicación debido a que posee una excelente resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas están muy por encima de las requeridas en este trabajo especial de grado.

#### 4.1.2.- Acero AISI 4340

Es un acero de baja aleación cuyos principales aleantes son Cr, Ni y Mo. Es un acero de especial resistencia a la tracción y torsión. Muy buena resistencia al desgaste y al impacto. Por lo general se suministra en el mercado en estado de temple y revenido, lo que permite su aplicación sin necesidad de un tratamiento térmico adicional.

Se puede utilizar a temperaturas de hasta de 500°C sin que llegue a perder sus propiedades mecánicas. Sus aplicaciones incluyen partes y repuestos sometidos a muy altos esfuerzos dinámicos como cigüeñales ejes de leva, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes cardán, tuercas de alta tensión, piñones, ruedas dentadas, moldes para inyección de plásticos, entre otros <sup>(15)</sup>.

Tabla 4.1 Análisis químico del acero AISI 4340, expresado en % de los elementos <sup>(15)</sup>

| Tipo AISI | C    | Cr  | Ni  | Mo   | Si   | Mn  |
|-----------|------|-----|-----|------|------|-----|
| 4340      | 0.34 | 1.5 | 1.5 | 0.20 | 0.30 | 0.5 |

Tabla 4.2 Principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero AISI 4340 <sup>(15)</sup>

|   |                        |
|---|------------------------|
| <b>Densidad</b>                         | 7750 Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Dureza Brinell</b>                   | 352                    |
| <b>Dureza Rockwell B</b>                | 99                     |
| <b>Dureza Vickers</b>                   | 372                    |
| <b>Resistencia última a la tracción</b> | 1127 MPa               |
| <b>Resistencia a la fluencia</b>        | 735 MPa                |
| <b>Elongación a la ruptura</b>          | 14,2 %                 |
| <b>Módulo de elasticidad</b>            | 205 GPa                |
| <b>Calor específico</b>                 | 0,475 J/g.°C           |
| <b>Conductividad térmica</b>            | 44,5 W/m.K             |

Los ejes extensores sujetan a la probeta dentro del horno y le transmiten la carga aplicada por la máquina. Por lo tanto, deben estar contruidos con un material con suficiente resistencia mecánica para soportar los niveles de carga que se vayan a aplicar en los ensayos y también que sea capaz de mantener sus propiedades mecánicas al estar sometido a temperaturas de hasta 500°C.

El acero AISI 4340 cumple con todas las especificaciones y además posee un precio accesible, lo que lo hace el indicado para esta aplicación. El pasador también será construido de este material.

#### ***4.1.3.- Controlador***

Para la automatización del proceso se utilizó un Controlador Lógico Programable (PLC, según sus siglas en inglés) marca Unitronics modelo M91-2-UA2. Este dispositivo posee entradas y salidas digitales y analógicas. Las digitales le permiten controlar el calentamiento del horno y las analógicas le permiten medir la temperatura por medio de termocuplas. También posee una pantalla digital para la interacción con el usuario.

#### ***4.1.4.- Sello para la cavidad de refrigeración***

El O-ring es un anillo de goma de sección circular usado como sello mecánico, puede ser estático cuando las piezas no tienen movimiento, o dinámico de vaivén, oscilante o rotativo. Permite el sellado en todas direcciones, son de bajo peso y costo reducido.

Para prevenir la fuga de fluido refrigerante en la base de los extensores, se utilizó un o-ring de caucho de 2,4 mm de diámetro con un diámetro interno de 75 mm para un sellado en diagonal.

#### ***4.1.5.- Aislante térmico***

El Kaowool es una fibra de cerámica ampliamente usada como revestimiento refractario para hornos, calentadores, conductos, etc. Sus propiedades únicas de baja conductividad, alta refractariedad, extrema ligereza e inmunidad al cambio brusco de temperatura, le dan muchas ventajas sobre otro tipo de refractarios tradicionales.

Para reducir las pérdidas a través de las cavidades superior e inferior del horno se emplearon recortes de láminas de la fibra de cerámica Kaowool que se colocaron como tapas en cada una de ellas. Estas tapas son de fácil remoción y bajo costo, lo que permite reponerlas cuando se crea necesario.

#### ***4.1.6.- Sensor de temperatura***

Para registrar la temperatura en la superficie de la probeta y en la superficie de las bases refrigeradas se emplearon termocuplas tipo K (Chromel–Alumel), las cuales operan en un intervalo de temperaturas entre  $-200^{\circ}\text{C}$  y  $+1200^{\circ}\text{C}$ . Este tipo de sensores tienen la ventaja de que se pueden fabricar de diferentes formas, tamaños y diámetros de espesor, ajustándose al cualquier tipo de requerimientos.

#### ***4.2.- Construcción***

Una vez seleccionados los materiales a ser usados para los diferentes elementos que componen el dispositivo, se procedió a aplicar los diferentes procesos de maquinado para así obtener las piezas deseadas.

El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la parte deseada. La acción predominante del

corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar una viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie <sup>(9)</sup>.

Hay muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta geometrías y textura superficial. Las tres operaciones más comunes y que se usarán para construir las piezas diseñadas en este trabajo especial de grado son las siguientes:

*Torneado:* se usa una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro. El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la parte de trabajo giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo como se ilustra en la figura 4.1 <sup>(9)</sup>.

El torneado se lleva a cabo tradicionalmente en una máquina herramienta llamada torno, la cual suministra la potencia para tornear la parte a una velocidad de rotación determinada con avance de la herramienta y profundidad de corte especificados <sup>(9)</sup>.

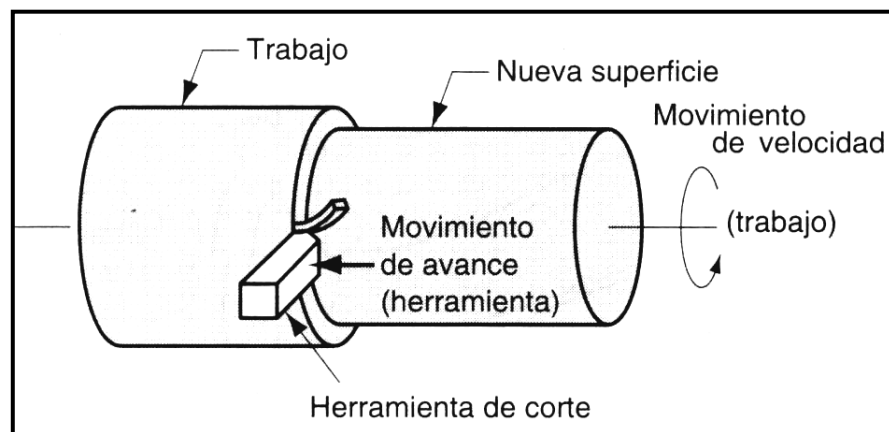


Figura 4.1 Torneado <sup>(9)</sup>

*Taladrado:* es una operación de maquinado que se usa para crear agujeros redondos en una parte de trabajo. El taladrado se realiza por lo general con una herramienta cilíndrica rotatoria, llamada *broca*, que tienen dos bordes cortantes en su extremo. La broca avanza paralela a su eje de rotación dentro de la parte de trabajo estacionaria para formar un agujero cuyo diámetro está determinado por el diámetro de la broca. El taladrado se realiza en un taladro prensa, aunque otras máquinas herramientas pueden ejecutar esta operación <sup>(9)</sup>.

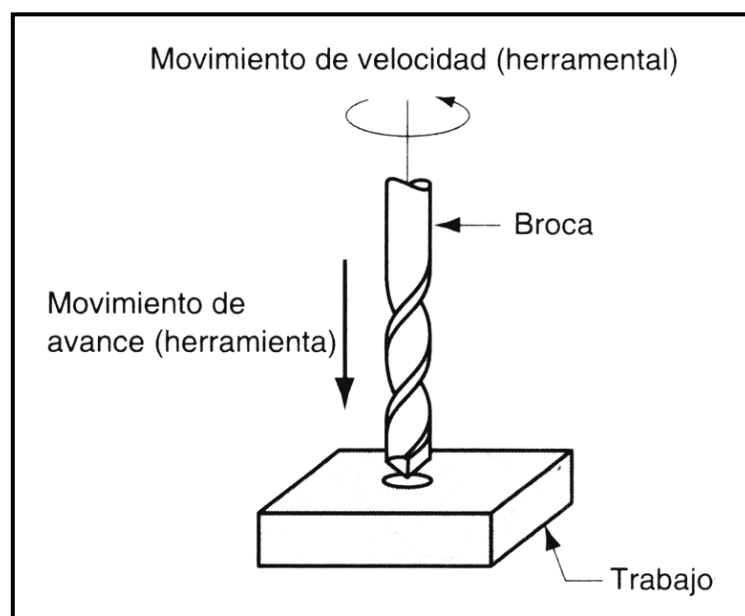


Figura 4.2 Taladrado <sup>(9)</sup>

*Fresado:* es una operación de maquinado en el cual se hace pasar una parte de trabajo enfrente de una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples bordes o filos cortantes (en algunos casos raros se usa una herramienta con un solo filo cortante volante). El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de avance. La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección del avance es la característica que distingue al fresado del taladrado <sup>(9)</sup>.

En el taladrado, la herramienta de corte avanza en dirección paralela a su eje de rotación. La herramienta de corte en fresado se llama fresa y los bordes cortantes



se llaman dientes. La máquina herramienta que ejecuta tradicionalmente esta operación es una fresadora.

Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado, el fresado periférico (figura 4.3) y el fresado de frente (figura 4.4). En el fresado periférico el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que está maquinado y la operación se realiza por los bordes periféricos. En el fresado de frente o en las caras el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta por los bordes o filos cortantes del extremo y la periferia de la fresa <sup>(9)</sup>.

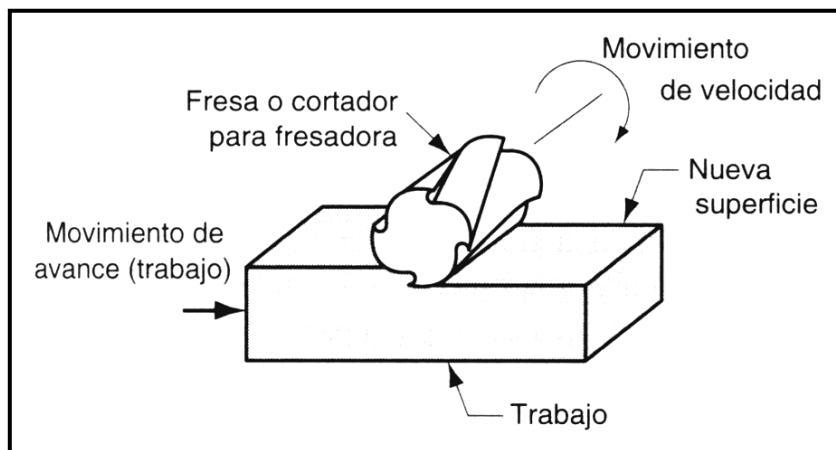


Figura 4.3 Fresado periférico <sup>(9)</sup>

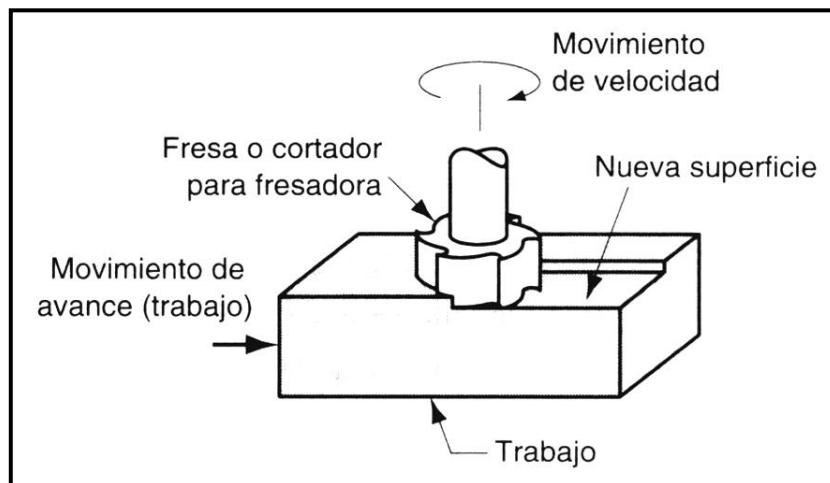


Figura 4.4 Fresado de frente <sup>(9)</sup>

#### 4.2.1.- Bases refrigeradas

Para la construcción de las bases refrigeradas se utilizaron cuatro tochos de sección circular de 152,4 *mm* de diámetro, dos de ellos con una longitud de 120 *mm* y los otros dos con una longitud de 70 *mm*. A los cuatro tochos se les realizó un refrentado en ambas caras y un cilindrado externo para llevarlos a su diámetro final (A) especificado en los planos. Luego se cilindró en los extremos de la superficie externa de los tochos para lograr la reducción de diámetro de la zona (B).

Se perforó con brocas de  $\frac{3}{4}$ " (19,05 *mm*) (C) y 31 *mm* (D) a las profundidades especificadas en los planos para crear las cavidades superiores y posteriormente se le realizó un cilindrado interno en ambos agujeros con una cuchilla P-20 rotativa de cobalto para obtener los diámetros finales.

Para el maquinado de las caras inclinadas de las bases, se inclinó el cabezal o charreo (carro longitudinal) con un ángulo de 30° (E). Las cavidades (F) se realizaron por medio de un cilindrado interno con una cuchilla P-20 rotativa de cobalto para obtener las dimensiones especificadas en los planos.

Para realizar la lengüeta (G) se colocaron ambos cilindros en la prensa de la fresadora y se procedió a desbastarlos empleando una fresa de Widia de dos cortes de 20*mm* de diámetro con una velocidad de cabezal de 160 *rpm*, un avance 40 *mm/min* y una profundidad de 1,125 *mm* por pasada.

Los agujeros pasantes se hicieron con una broca de  $\frac{3}{4}$ " (13,05 *mm*) (H), los agujeros de los pernos con una broca de  $\frac{7}{16}$ " (11,125 *mm*) (J) y las cavidades para las cabezas y las tuercas de los pernos con una broca de 16 *mm* (K) y de 25 *mm* (L) respectivamente.

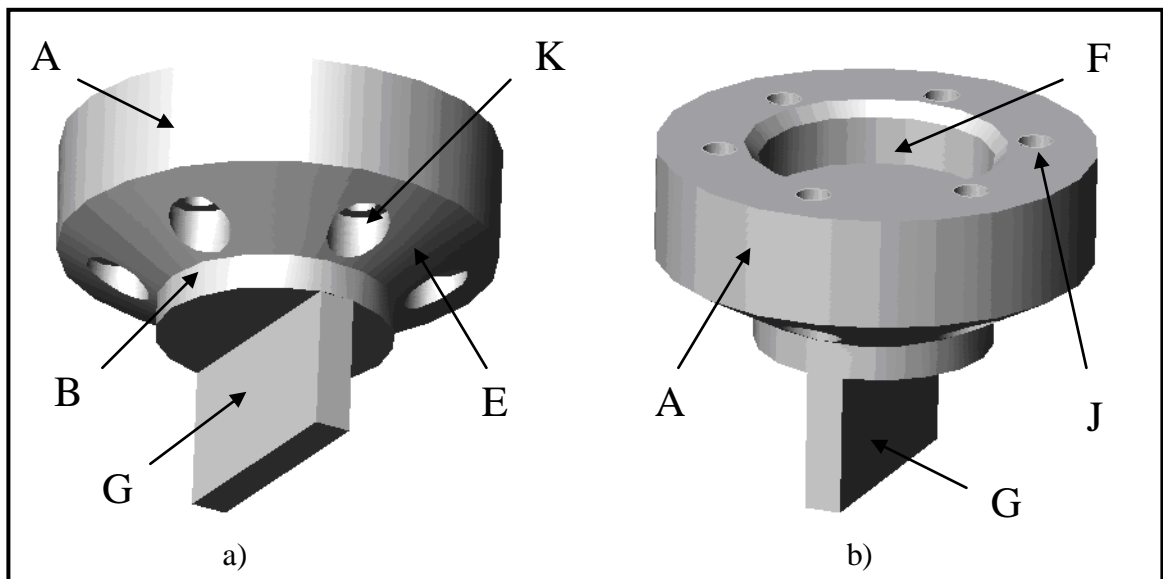


Figura 4.5 a) Vista inferior y b) vista superior del pie de la base del extensor

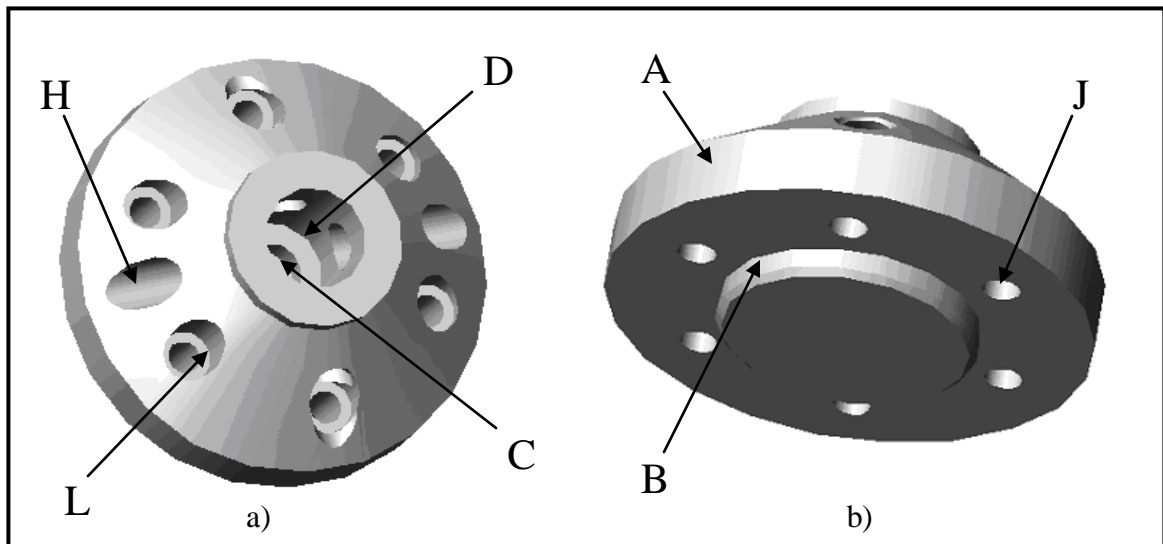


Figura 4.7 a) Vista superior y b) vista inferior de la tapa de la base del extensor

#### 4.2.2.- Pasador

Se usó una varilla de  $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm) de diámetro, se cilindró para llevarla a su diámetro final, se rectificó con un escaecador de 13 mm y en los extremos (A) se le hizo un moleteado.

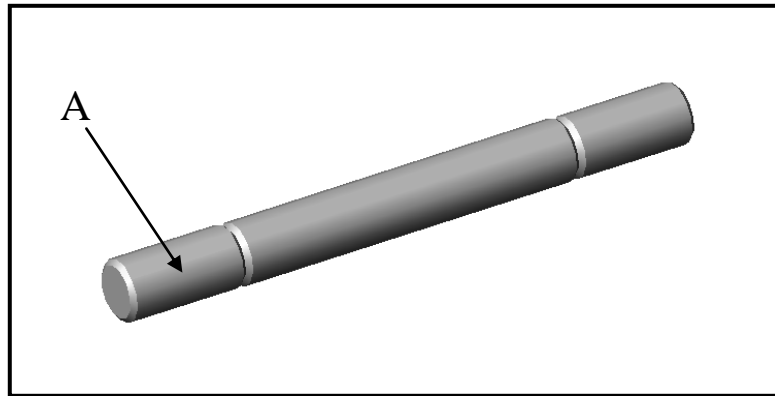


Figura 4.8 Pasador

#### 4.2.3.- Eje

Se fabricó a partir de una barra de sección transversal circular de  $1\frac{1}{4}$ " (31,75 mm) de diámetro y 300 mm de largo, fue refrentada en ambas caras para llevar a la longitud requerida. Se le hizo un roscado de  $\frac{1}{2}$ " – 13 UNF con 20 mm de profundidad en uno de sus extremos (A) y se taladró el agujero (B) en el otro utilizando una broca de  $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm).

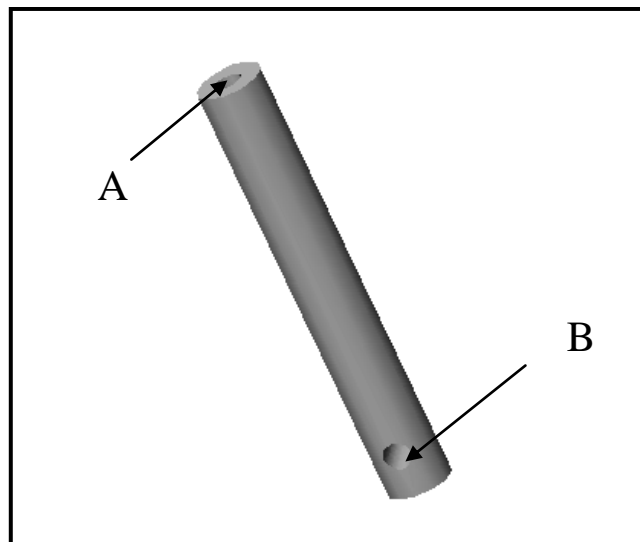


Figura 4.8 Eje del extensor

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

### 5.1.- Descripción del equipo

El dispositivo para realizar ensayos de tracción uniaxial a temperaturas moderadas desarrollado en este trabajo, basa su funcionamiento en el calentamiento por medio de resistencias eléctricas que transfieren su calor a unas paredes de material refractario que se calientan uniformemente. Al aumentar la temperatura de las paredes del horno, también aumenta la temperatura del medio y la probeta es calentada por convección y radiación.

La probeta es fijada dentro del horno por medio de los extensores y estos a su vez se acoplan en su otro extremo a las bases refrigeradas por medio de un pasador. Dichas bases poseen en su parte inferior una lengüeta que les permite ser sujetadas por las mordazas de la máquina de ensayos. De esta manera, la carga aplicada es transmitida a la probeta y gracias a que las bases son refrigeradas, se aísla a la celda de carga del contacto con temperaturas elevadas que podrían alterar su buen funcionamiento.

### 5.2.- Especificaciones de equipos

#### 5.2.1.- Horno

|                     |                               |
|---------------------|-------------------------------|
| <b>Marca</b>        | Instron                       |
| <b>Modelo</b>       | SF 375D                       |
| <b>Temp. Máxima</b> | 1000 °C                       |
| <b>Voltaje</b>      | 240 V                         |
| <b>Wattios</b>      | 900 por zona                  |
| <b>Resistencias</b> | 6 Resistencias de 30 $\Omega$ |

#### 5.2.2.- Termocupla

|              |         |
|--------------|---------|
| <b>Marca</b> | XACTPAK |
| <b>Tipo</b>  | K       |

La termocupla utilizada tiene un diámetro de 1/16", es aterrada, tiene un ángulo de 90°, largo de inmersión de 35 mm y largo vertical de 170 mm, con junta de transición y 3 m de cable con revestimiento de fibra de vidrio.

### 5.2.3.- Controlador lógico programable (PLC)

|                 |                                       |
|-----------------|---------------------------------------|
| <b>Marca</b>    | Unitronics                            |
| <b>Modelo</b>   | M91-2-UA2                             |
| <b>Voltaje</b>  | 12 V                                  |
| <b>Entradas</b> | 10 digitales, 2 analógicas            |
| <b>Salidas</b>  | 10 digitales, 2 analógicas            |
| <b>Pantalla</b> | Pantalla LCD, 2 líneas, 16 caracteres |
| <b>Conexión</b> | Conexión con el puerto serial del PC  |

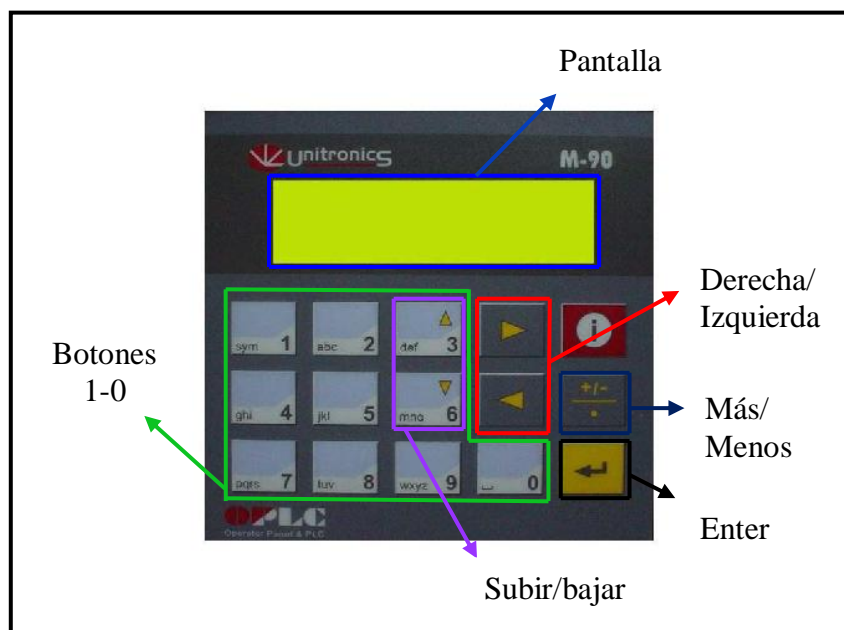


Figura 5.1 Controlador Unitronics M91-2-UA2

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

1. Introducir la lengüeta de la base del extensor, en la mordaza superior totalmente abierta hasta que haga tope sobre la misma.
2. Cerrar la mordaza superior de manera que la base quede presionada.
3. Repetir los pasos 1 y 2 para la otra base que será colocada en la mordaza inferior.
4. Elevar el cabezal superior de la máquina Instron hasta alcanzar su máxima altura.
5. Ajustar el eje superior en la base a través del pasador.
6. Enroscar la probeta en el eje superior (para ensayos a temperaturas moderadas colocar el lado de la probeta con el agujero de la termocupla hacia arriba).
7. Enroscar el eje inferior en la probeta.
8. Subir lentamente la mordaza inferior, de manera que el eje se introduzca en el agujero de la base, hasta que se hayan alineado los agujeros de ambas piezas.
9. Una vez alineados ambos agujeros, se procede a introducir el pasador.

### **5.4.- Ensayos a temperaturas moderadas**

1. Colocar la probeta, bases y extensores como fue indicado en la sección 5.1
2. Verificar que las mangueras del sistema de enfriamiento estén debidamente conectadas a las bases. De no ser así conectarlas.
3. Abrir lentamente la llave de compuerta del fluido refrigerante de las bases (esta llave se encuentra ubicada en la salida de la manguera en el “chiller”).
4. Separar las puertas del horno.
5. Mover el horno de ensayos hasta que los extensores queden posicionados dentro de la misma.
6. Introducir la termocupla dentro de la probeta.
7. Verificar la instalación de las tapas aislantes ubicadas tanto en la parte superior de horno como en la inferior.



8. Cerrar las puertas del horno.
9. Verificar la conexión de los cables de control PLC-Horno.
10. Conectar el cable de alimentación del horno.
11. Conectar el cable de comunicación del PLC al puerto serial de la computadora.
12. Conectar el cable de alimentación del PLC y esperar a que aparezca la pantalla de bienvenida.




Figura 5.1 Pantalla de bienvenida

13. Presionar la tecla  y aparecerá la siguiente pantalla.



Figura 5.2 Pantalla de temperatura de calentamiento

14. Presionar la tecla  para introducir el valor de la temperatura a la cual se desea realizar el ensayo.

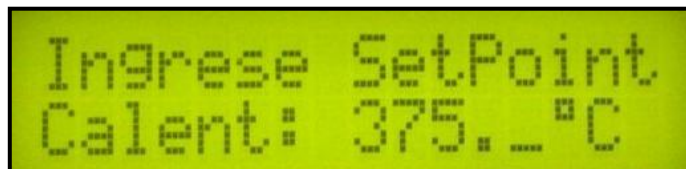




Figura 5.3 Pantalla de setpoint de calentamiento

15. Una vez introducida la temperatura deseada oprima la tecla  para volver a la pantalla anterior (figura 5.2).

16. Presionar la tecla  y aparecerá la siguiente pantalla.

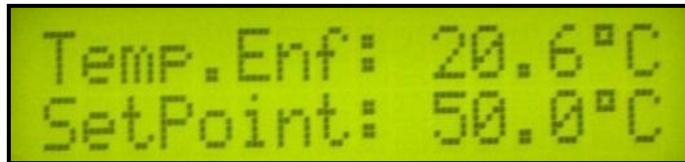



Figura 5.4 Pantalla de temperatura de enfriamiento

17. Presionar la tecla  para introducir el valor máximo de temperatura permisible en las bases de enfriamiento.

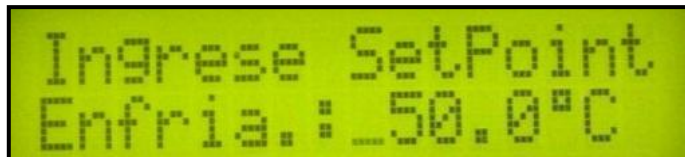





Figura 5.5 Pantalla de setpoint de enfriamiento

18. Una vez introducida la temperatura deseada oprima la tecla  para volver a la pantalla anterior (figura 5.4).

19. Presione la tecla  o  para ir a la pantalla de temperatura de calentamiento (figura 5.2).





20. Presionar la tecla  para iniciar el proceso de calentamiento (aparecerá ON en pantalla).



Figura 5.6 Pantalla de temperatura de calentamiento, proceso iniciado

21. Esperar a que el equipo alcance la temperatura deseada.
22. Si se desea cambiar el Set Point de calentamiento durante el proceso, presionar la tecla  (aparecerá OFF en pantalla), repetir los pasos 14 y 15 y oprimir la tecla  (aparecerá ON en pantalla).
23. Una vez que se haya alcanzado y estabilizado la temperatura deseada se procederá a iniciar el programa de registro de datos temperatura vs tiempo en el computador. Es necesario que se dé inicio al ensayo de tracción en la máquina Instron simultáneamente con el inicio del programa.
24. Una vez culminado el ensayo o si se desea detener el mismo pulse  para detener el proceso de calentamiento (aparecerá OFF en pantalla).
25. Cerrar el programa de registro de datos temperatura vs tiempo.
26. Esperar a que la temperatura disminuya hasta niveles apropiados.
27. Abrir las puertas del horno y alejarlo para así poder retirar la termocupla, probeta y extensores en el caso que se desee.

### ***5.5.- Instalación del programa de recopilación de datos***

1. Introducir el CD de instalación en la unidad de disco compacto.
2. Ejecutar el instalador del programa del controlador "Setup.exe" y seguir los pasos que aparecen en pantalla.

3. Abrir la carpeta “Actualización” del CD de instalación, copiar el archivo “Supervisoriohorno.exe” y pegar en el directorio donde se instaló el programa.
4. La instalación esta completada

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

**5.6.- Plano eléctrico**

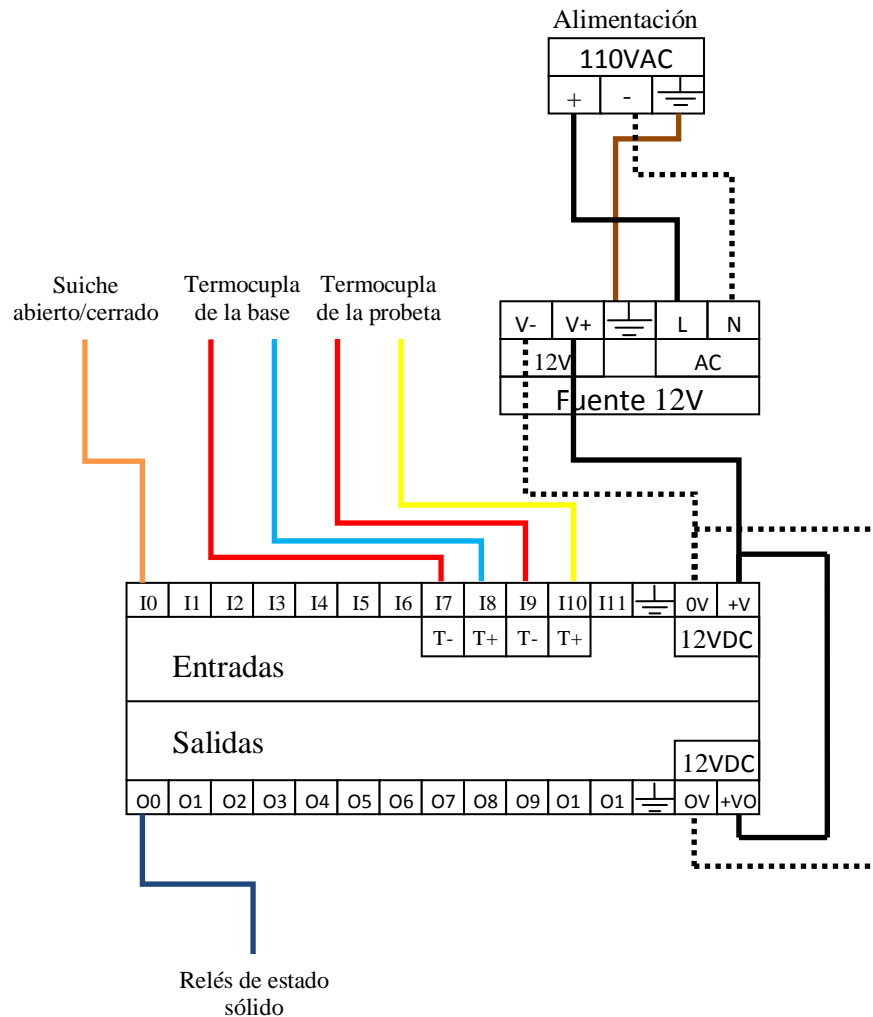


Figura 5.7 Plano eléctrico de la instalación del controlador

## ***CAPÍTULO VI***

### ***Validación del dispositivo***

### 6.1.- Proceso de validación

Tras haber culminado el diseño y la construcción del dispositivo se procedió a la validación del mismo para comprobar que cumplía con la función para la cual fue construido, para lo cual era necesario verificar que se pudieran realizar satisfactoriamente ensayos de tracción a temperaturas moderadas y facilitar la determinación de las propiedades mecánicas del material ensayado (relación entre resistencia mecánica, tasa de deformación y temperatura de deformación). Asimismo, es importante garantizar la seguridad de la máquina bajo estas condiciones de operación.

Para tener la certeza de que el dispositivo funciona correctamente se realizaron ensayos de tracción a diferentes temperaturas y velocidades de cabezal y los resultados se compararon cualitativamente con datos experimentales conseguidos en la literatura para validar su autenticidad.

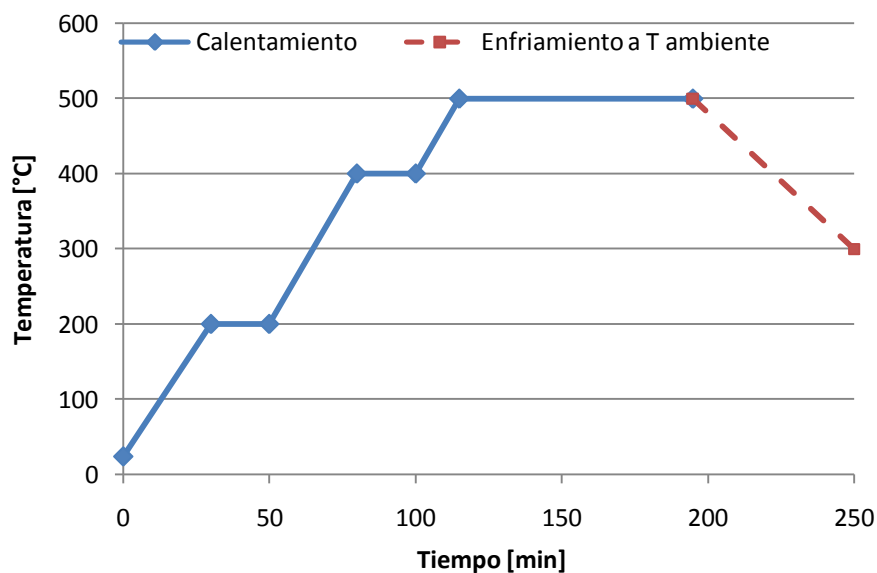


Figura 6.1 Tratamiento térmico para eliminar la condición T6 de la aleación

Se ensayaron probetas de la aleación de aluminio 7075 a tres temperaturas diferentes (300°, 375° y 450°C) y diversas velocidades de cabezal tanto constantes como variables. Las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico previo a 500°C, tal como se ilustra en la figura 6.1, a fin de eliminar su condición original T6.

### 6.2.- Cálculo del esfuerzo real, deformación real y tasa de deformación

La máquina de ensayos registra valores de fuerza, F, y variaciones de longitud,  $\Delta L$ , de la probeta (tabla 6.1), los cuales deben ser corregidos y utilizados para calcular los valores de esfuerzo real, deformación real y tasa de deformación.

Tabla 6.1 Ejemplo de datos generados por la máquina de ensayos

| Nº Ptos | $\Delta L$ (mm) | F (KN)  |
|---------|-----------------|---------|
| 1       | 0,63884         | 0,74693 |
| 2       | 0,64301         | 0,78338 |
| 3       | 0,64718         | 0,82375 |
| 4       | 0,65134         | 0,84198 |
| 5       | 0,65525         | 0,87973 |
| 6       | 0,65967         | 0,92400 |
| 7       | 0,66384         | 0,94874 |
| 8       | 0,66774         | 0,97348 |
| 9       | 0,67217         | 1,01910 |
| 10      | 0,67633         | 1,05030 |
| 11      | 0,67998         | 1,07630 |
| 12      | 0,68414         | 1,11930 |
| 13      | 0,68857         | 1,15060 |
| 14      | 0,69273         | 1,18050 |
| 15      | 0,69664         | 1,21700 |

Una vez obtenidos todos los datos arrojados por la máquina, se toman los de la zona de comportamiento elástico del material y se representan en una gráfica F vs  $\Delta L$  (figura 6.2). Los puntos se unen por medio de una línea de tendencia de manera que el valor de  $R^2$  fuera lo más cercano a la unidad para garantizar la fiabilidad de la tendencia y luego se calcula la ecuación de la recta.

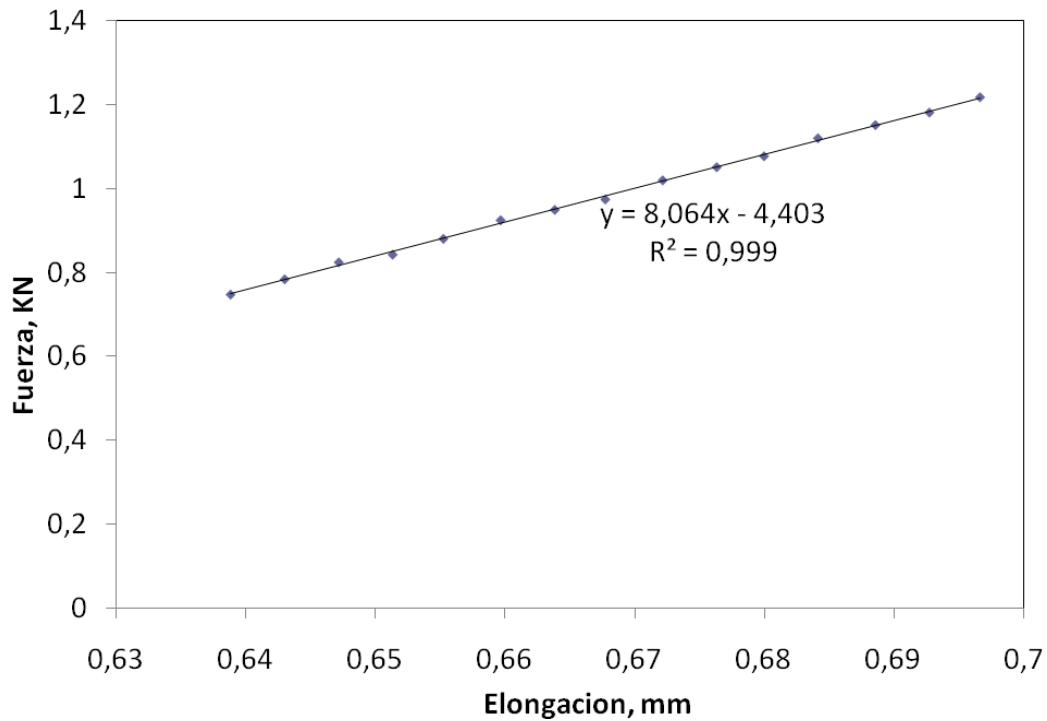


Figura 6.2 Gráfica Fuerza vs Elongación. Se muestra  $R^2$  y la ecuación de la línea de tendencia

A partir de la ecuación de la recta determinamos el valor de  $X_0$  (valor de  $X$  para el cual el valor de  $Y$  se hace cero) y obtenemos la constante de rigidez del sistema ( $K_{Total}$ ) que es igual a la pendiente.

Con el valor de  $X_0$  corregimos el valor de  $\Delta L$  para obtener la elongación total del sistema,  $\Delta L_T$ .

$$\Delta L_T = \Delta L - X_0 \quad (\text{Ec. 61})$$

Se sabe que la elongación total es igual a la suma de las elongaciones de la muestra ( $\Delta L_{muestra}$ ) y de la máquina ( $\Delta L_{máquina}$ ).

$$\Delta L_T = \Delta L_{muestra} + \Delta L_{máquina} \quad (\text{Ec. 62})$$



Haciendo la suposición de que el sistema se comporta como conjunto de dos resortes en serie, uno de ellos sería la muestra con una constante de rigidez  $K_1$  y el otro sería los componentes elásticos de la máquina con una constante de rigidez  $K_2$  (figura 6.3).

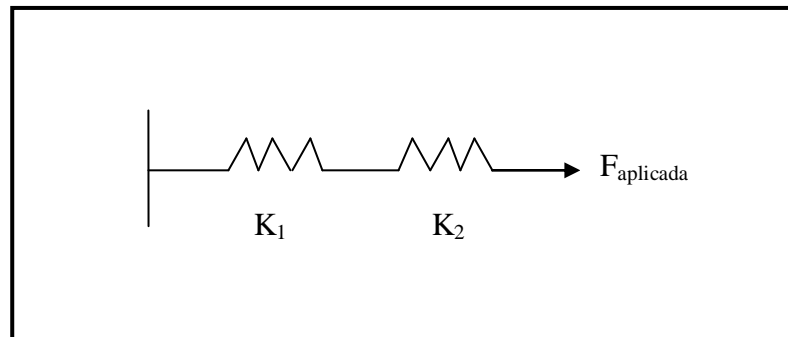


Figura 6.3 Sistema de resortes en serie

La ley de Hooke dice que la fuerza ( $F$ ) aplicada a un resorte es igual a su constante de rigidez ( $K$ ) multiplicada por la elongación ( $\Delta L$ ).

$$F = K * \Delta L \quad (\text{Ec. 63})$$

Si de la ecuación (63) despejamos  $\Delta L$  y la sustituimos en la ecuación (62) nos queda que:

$$\frac{F_{Total}}{K_{Total}} = \frac{F_{muestra}}{K_1} + \frac{F_{máquina}}{K_2} \quad (\text{Ec. 64})$$

Como la fuerza aplicada al sistema es única ( $F_{Total}=F_{muestra}=F_{máquina}$ ), la expresión queda:

$$\frac{1}{K_{Total}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \quad (\text{Ec. 65})$$

Despejando  $K_2$  obtenemos:

$$K_2 = \frac{K_1 * K_2}{K_1 - K_2} \quad (\text{Ec. 66})$$

Conociendo que:

$$K_1 = \frac{E * A_0}{L_0} \quad (\text{Ec. 67})$$

donde E es el módulo de elasticidad del material

$A_0$  es el área de sección transversal corregida de la probeta

$L_0$  es la longitud corregida de la sección calibrada de la probeta

Podemos calcular la elongación de los elementos de la máquina

$$\Delta L_{máquina} = \frac{F}{K_2} \quad (\text{Ec. 68})$$

Sustituyendo la ecuación (68) en la (62), queda que

$$\Delta L_T = \Delta L_{muestra} + \frac{F}{K_2} \quad (\text{Ec. 69})$$

Despejando podemos calcular la elongación de la muestra

$$\Delta L_{muestra} = \Delta L_{Total} - \frac{F}{K_2} \quad (\text{Ec. 70})$$

Los valores corregidos por temperatura de longitud, diámetro y área de la probeta, se calculan a partir de la expresión:

$$M_0 = M_i * (1 + \alpha * (\Delta T)) \quad (\text{Ec. 70})$$

donde  $M_0$  es la medida corregida

$M_i$  es la medida inicial

$\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha = 2,52 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )<sup>(14)</sup>

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas

Ya conocida la elongación de la muestra, se procedió al cálculo del esfuerzo ingenieril,  $S$ , y la deformación ingenieril,  $e$ , empleando las siguientes expresiones:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ec. 71})$$

$$e = \frac{\Delta L_{muestra}}{L_0} \quad (\text{Ec. 72})$$

El esfuerzo real,  $\sigma$ , y la deformación real,  $\varepsilon$ , se calculan utilizando las expresiones:

$$\sigma = S(1 + e) \quad (\text{Ec. 73})$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (\text{Ec. 74})$$

Por último se calculó la tasa de deformación ( $\dot{\varepsilon}$ )

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{L_0 * \exp(\varepsilon)} \quad (\text{Ec. 75})$$

donde  $V$  es la velocidad de cabezal en milímetros por segundo

La representación gráfica de estos datos se puede encontrar más adelante en el capítulo, o si se desea, se pueden revisar las tablas de cada ensayo en la sección de anexos (versión digital del informe).

### 6.3.- Datos experimentales

#### 6.3.1.- Ensayo 1

- Temperatura: 25°C
- Velocidad de cabezal: constante a 1 mm/min
- Diámetro: 5,96 mm
- Diámetro corregido: 5,96 mm
- Longitud: 36,0 mm
- Modulo de elasticidad: 76046,5 MPa
- $K_I$ : 58933,1 N/mm
- $K_T$ : 17285,1 N/mm
- Coeficiente de dilatación térmica  $[\alpha]$ :  $0,0000252^\circ\text{C}^{-1}$

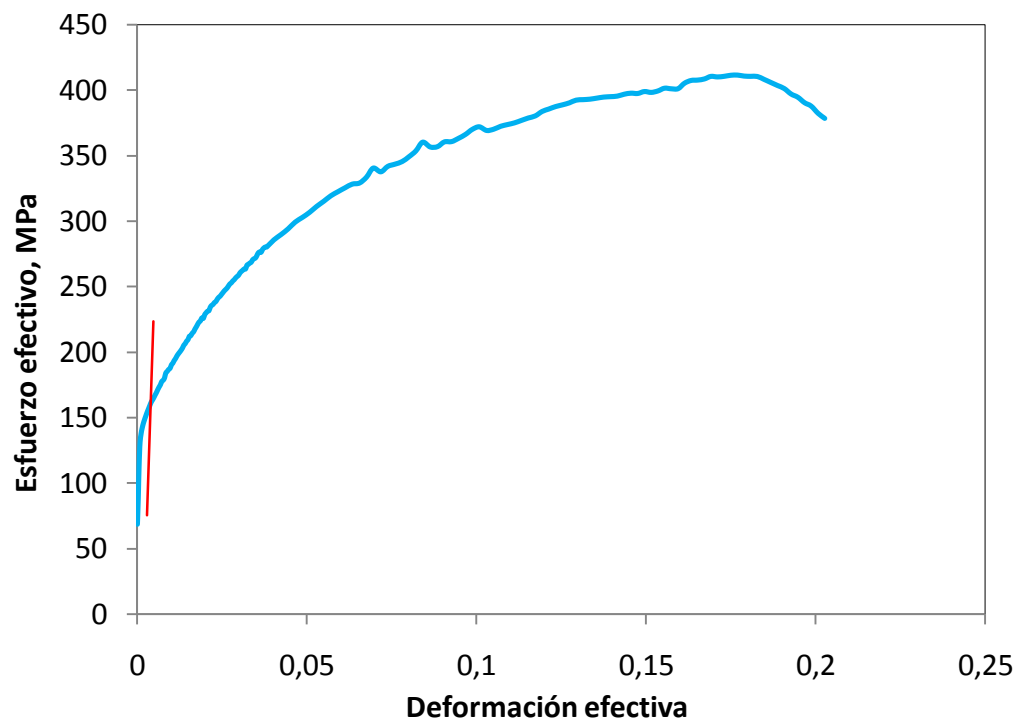


Figura 6.4 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva

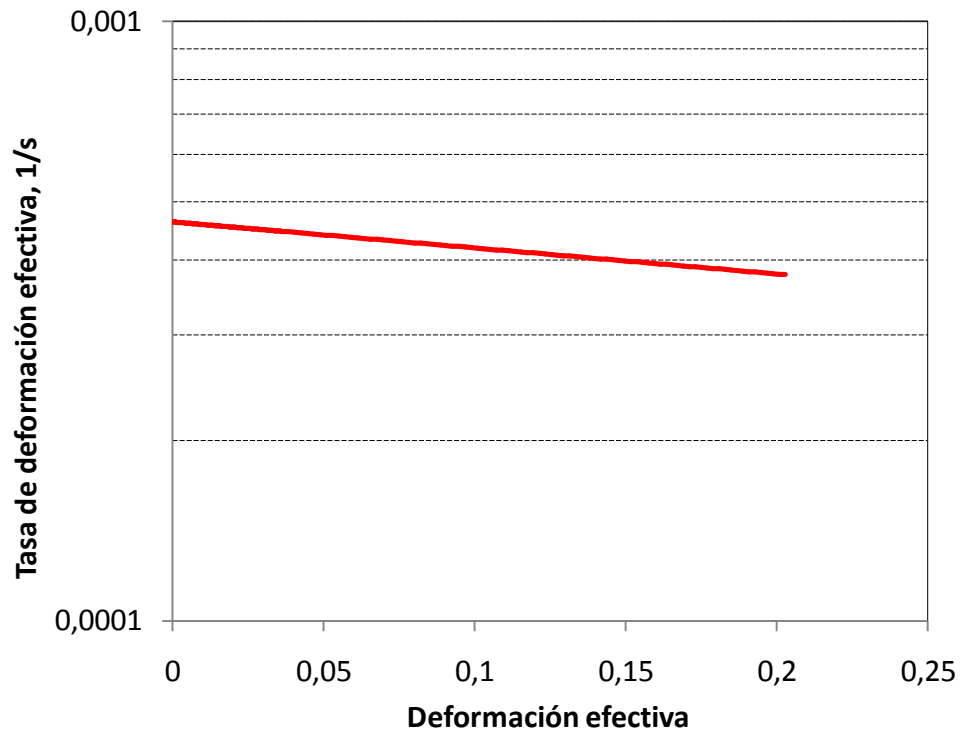


Figura 6.3 Tasa de deformación efectiva vs Deformación efectiva

### 6.3.2.- Ensayo 2

- Temperatura: 300°C
- Velocidad de cabezal: variable de 1 mm/min a 100 mm/min
- Diámetro: 5,96 mm
- Diámetro corregido: 6,00 mm
- Longitud: 36,2 mm
- Modulo de elasticidad: 60572,9 MPa
- $K_I$ : 47267 N/mm
- $K_T$ : 8064 N/mm
- Coeficiente de dilatación térmica  $[\alpha]$ : 0,0000252°C<sup>-1</sup>

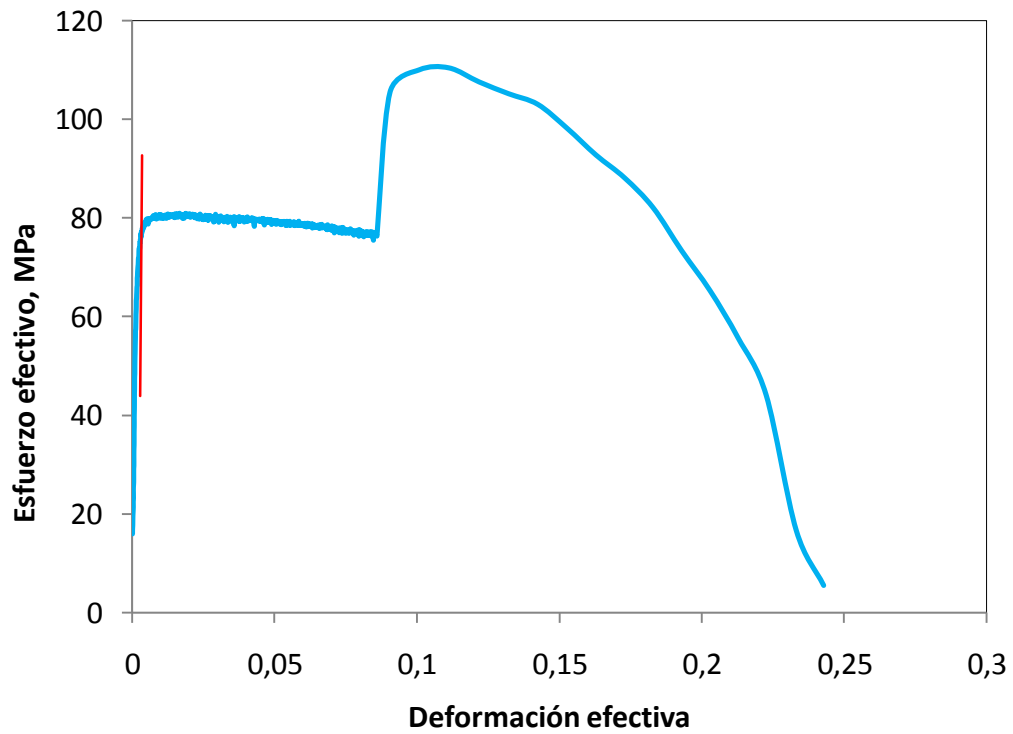


Figura 6.4 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva

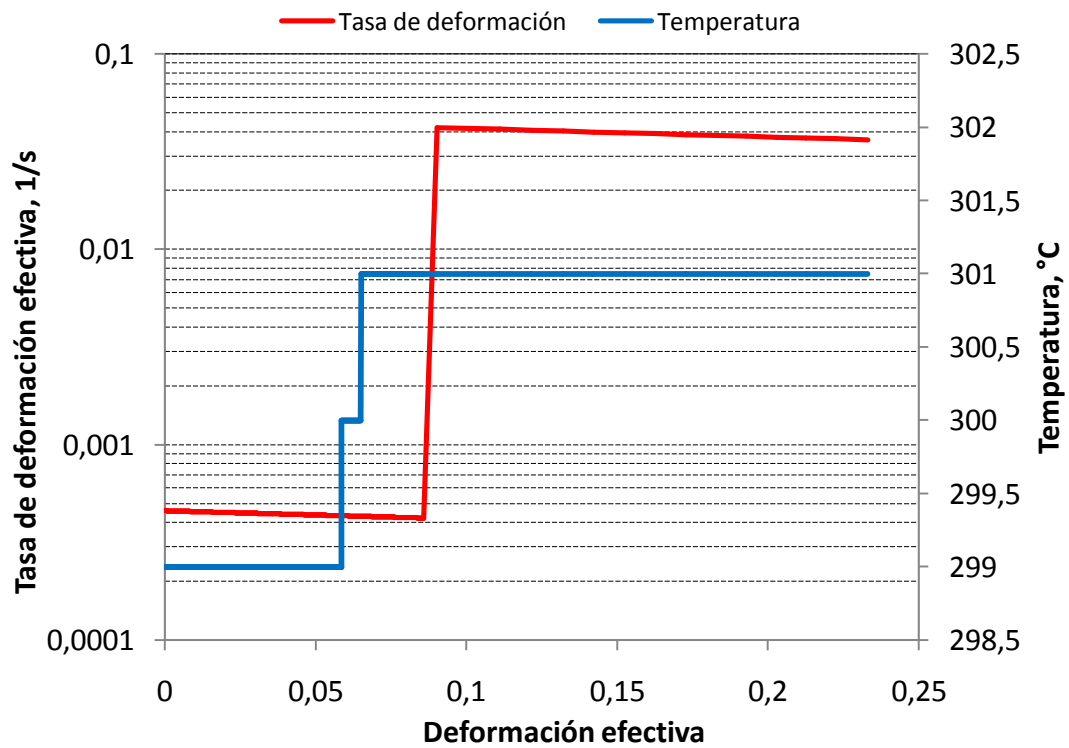


Figura 6.5 Tasa de deformación efectiva, Temperatura vs Deformación efectiva

### 6.3.3.- Ensayo 3

- Temperatura: 300°C
- Velocidad de cabezal: variable de 1mm/min a 100 mm/min
- Diámetro: 6,01 mm
- Diámetro corregido: 6,05 mm
- Longitud: 36,2 mm
- Modulo de elasticidad: 60572,9 MPa
- $K_I$ : 48063,4 N/mm
- $K_T$ : 8006 N/mm
- Coeficiente de dilatación térmica  $[\alpha]$ : 0,0000252°C<sup>-1</sup>

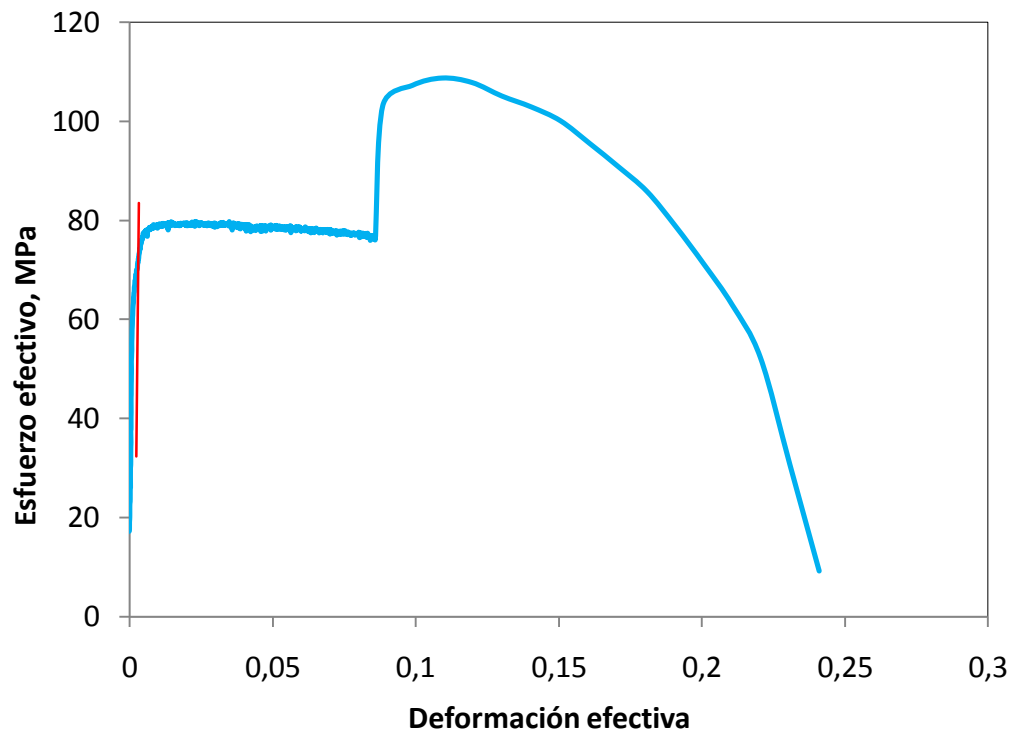


Figura 6.6 Esfuerzo efectiva vs Deformación efectiva

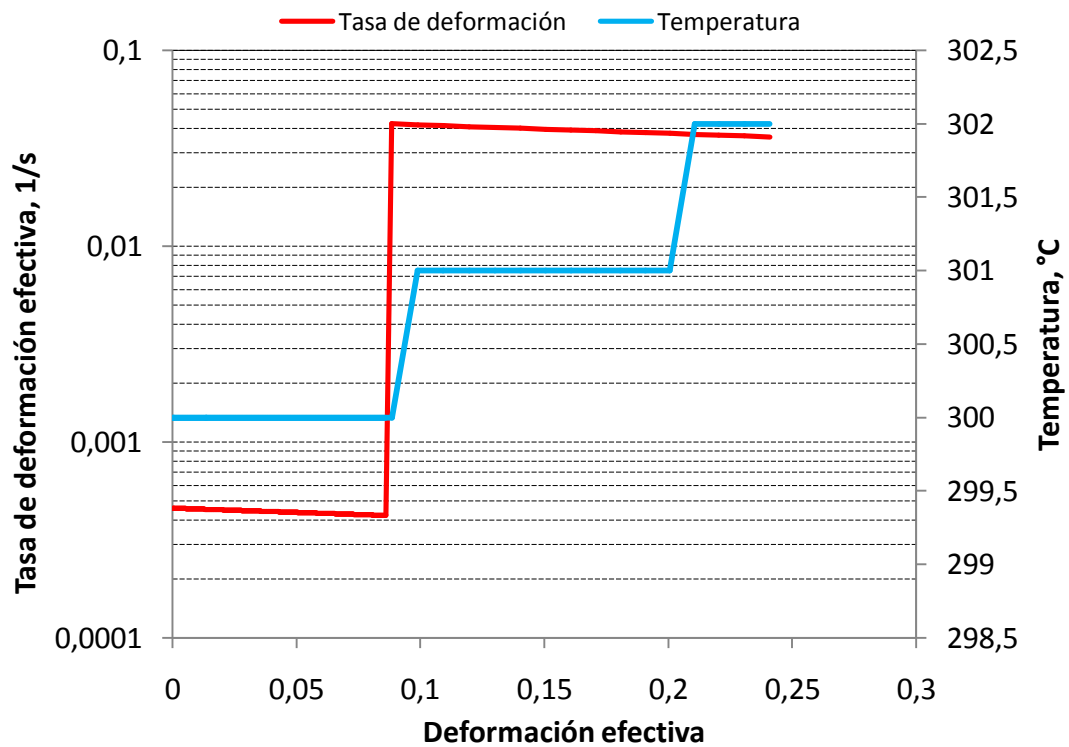


Figura 6.7 Tasa de deformación efectiva, Temperatura vs Deformación efectiva

#### 6.3.4.- Ensayo 4

- Temperatura: 300°C
- Velocidad de cabezal: constante a 100 mm/min
- Diámetro: 5,97 mm
- Diámetro corregido: 6,01 mm
- Longitud: 36,2 mm
- Modulo de elasticidad: 60572,9 MPa
- $K_I$ : 47426 N/mm
- $K_T$ : 8887 N/mm
- Coeficiente de dilatación térmica  $[\alpha]$ :  $0,0000252^\circ\text{C}^{-1}$



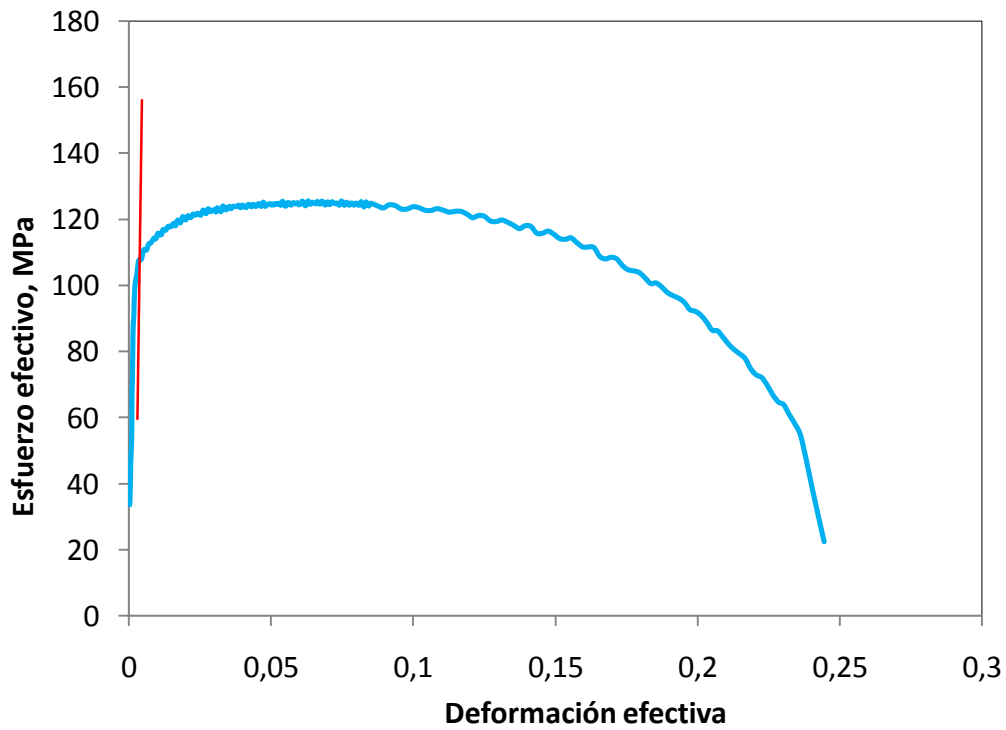


Figura 6.8 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva

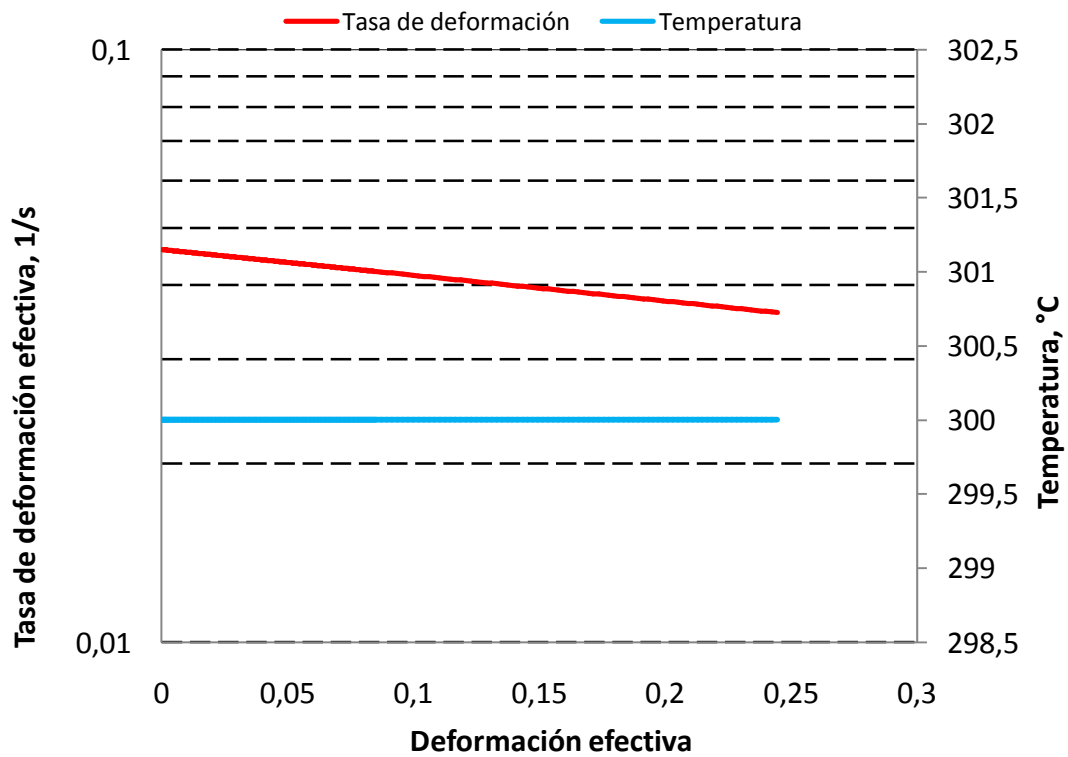


Figura 6.9 Tasa de deformación efectiva, Temperatura vs Deformación efectiva

**6.3.5.- Ensayo 5**

- Temperatura: 300°C
- Velocidad de cabezal: constante a 1 mm/min
- Diámetro: 5,96 mm
- Diámetro corregido: 6,00 mm
- Longitud: 36,25 mm
- Modulo de elasticidad: 60573 MPa
- $K_I$ : 47267 N/mm
- $K_T$ : 5420 N/mm
- Coeficiente de dilatación térmica  $[\alpha]$ :  $0,0000252^\circ\text{C}^{-1}$

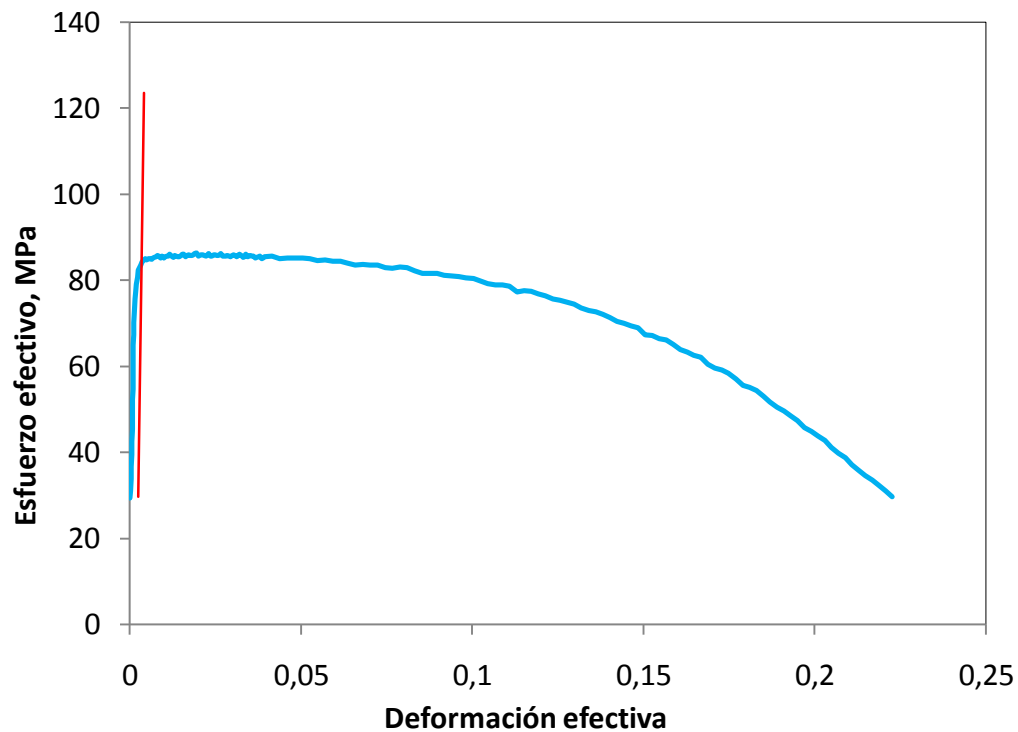


Figura 6.10 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva

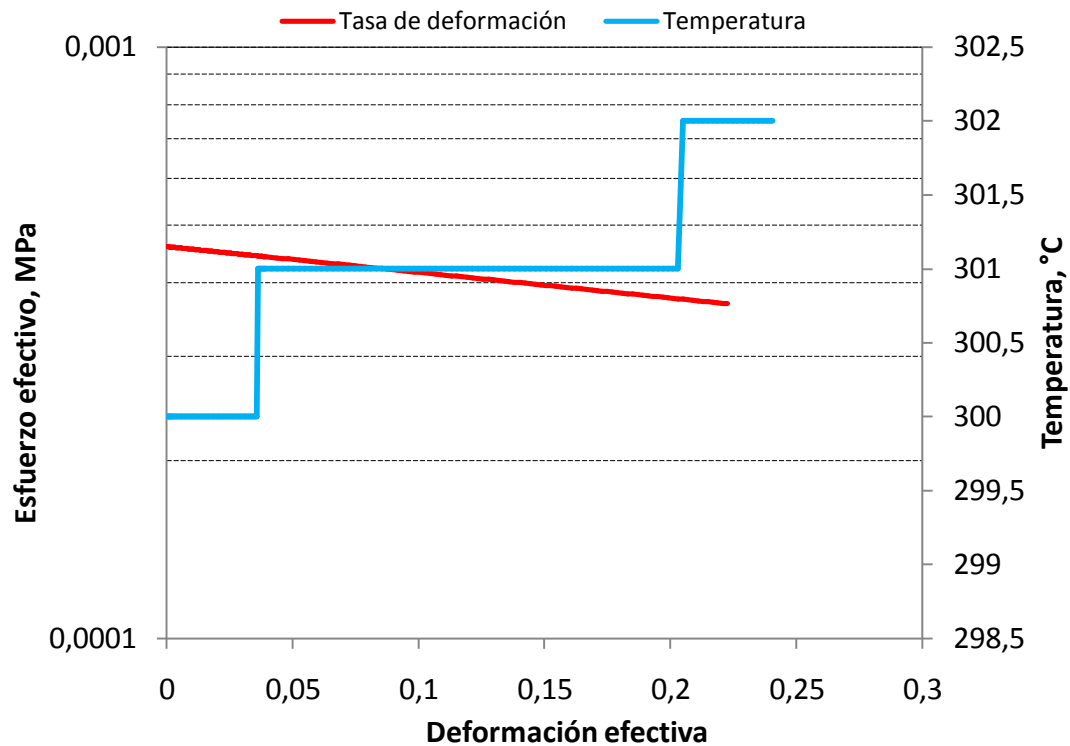


Figura 6.11 Tasa de deformación efectiva, Temperatura vs Deformación efectiva

### 6.3.6.- Ensayo 6

- Temperatura: 375°C
- Velocidad de cabezal: variable de 1 mm/min a 100 mm/min
- Diámetro: 6,00 mm
- Diámetro corregido: 6,05 mm
- Longitud: 36,3 mm
- Modulo de elasticidad: 52476,5 MPa
- $K_I$ : 41578,5 N/mm
- $K_T$ : 5993 N/mm
- Coeficiente de dilatación térmica  $[\alpha]$ :  $0,0000252^\circ\text{C}^{-1}$

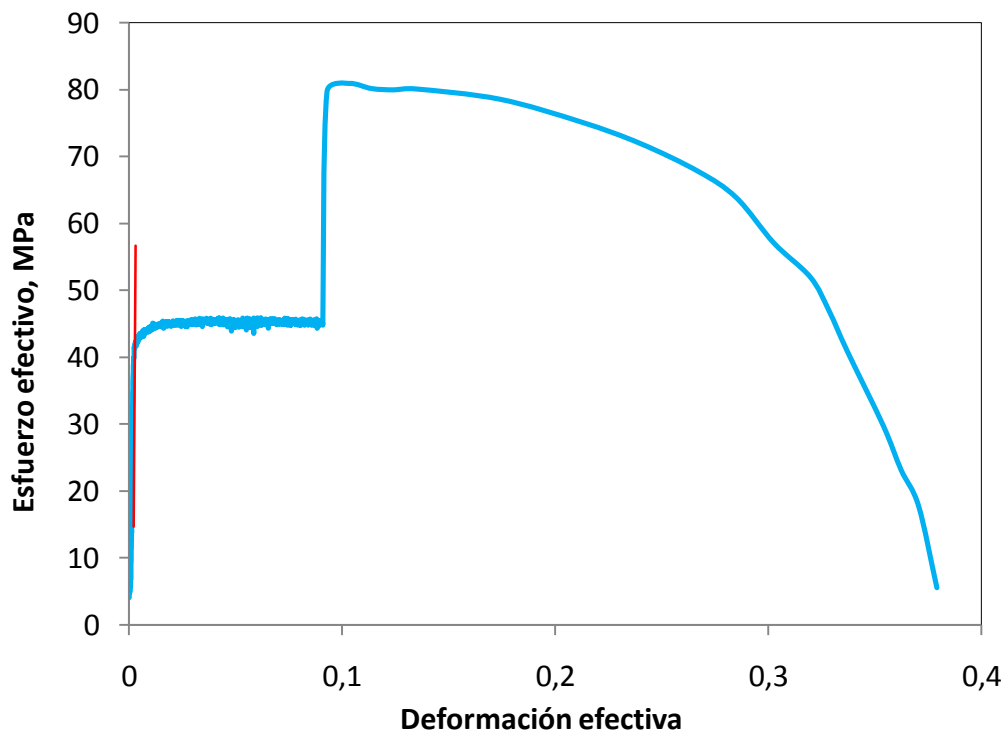


Figura 6.12 Esfuerzo efectivo vs Deformación efectiva

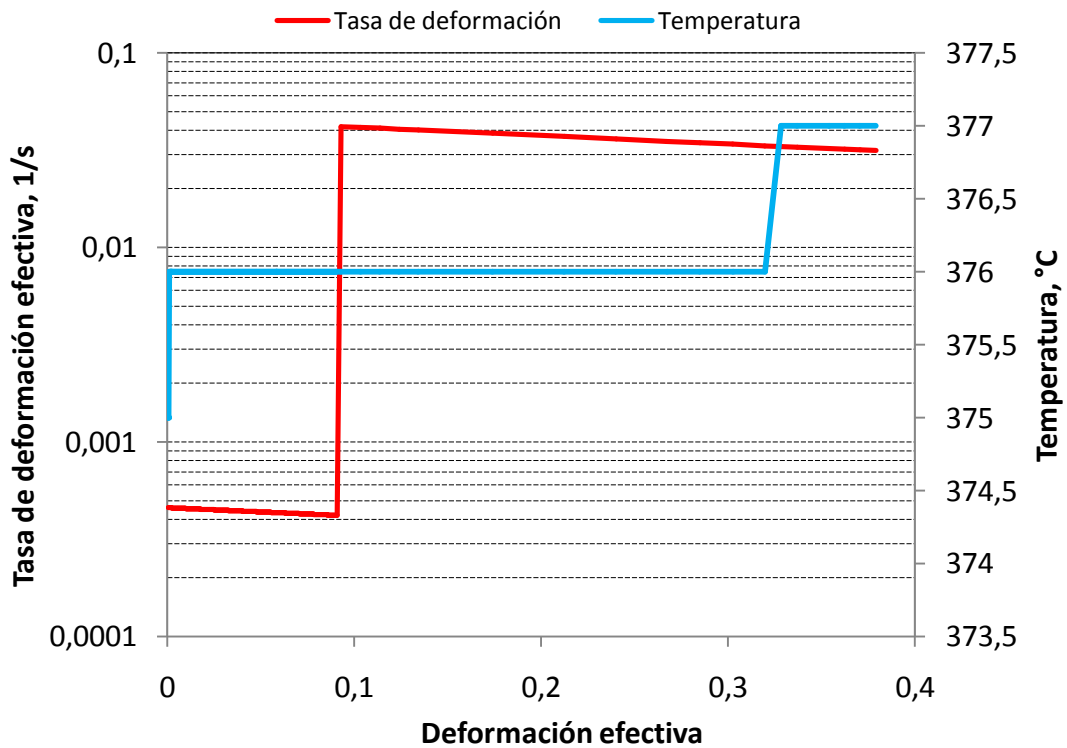


Figura 6.13 Tasa de deformación efectiva, Temperatura vs Deformación efectiva

#### 6.4.- Interpretación de los resultados obtenidos

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir de los ensayos realizados en la aleación 7075, en el presente trabajo, y particularmente a temperaturas de 300°C y superiores, se caracterizan por presentar una región bien marcada de “ablandamiento por deformación”, fenómeno contrario al típico comportamiento de “endurecimiento por deformación” que se observa por ejemplo en los ensayos a temperatura ambiente, caracterizada por la continua disminución del esfuerzo con la deformación, a partir de una cierta deformación crítica.

En los ensayos realizados a 25°C, la caída del esfuerzo con la deformación al final de la curva se atribuye al fenómeno de “encuellamiento” de la probeta de tracción, es decir a la inestabilidad plástica que ocurre cuando se cumple la condición:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (\text{Ec. 76})$$

Es decir, cuando la tasa de endurecimiento por deformación alcanza el valor del esfuerzo de fluencia del material. Sin embargo, en los ensayos a temperaturas moderadamente elevadas no se tiene certeza que la caída en el esfuerzo de fluencia ocurra debido a dicho fenómeno o a otra causa relacionada por ejemplo con cambios microestructurales que pudieran ocurrir en el material durante la deformación.

En las figuras siguientes reportadas en la literatura<sup>(16)(17)</sup> se presentan una serie de curvas esfuerzo-deformación efectivo para aleaciones muy similares a la ensayada en el presente trabajo, que son muy parecidas a aquellas obtenidas experimentalmente en esta investigación y reportadas previamente. La diferencia fundamental es que las curvas encontradas en la literatura provienen de ensayos de torsión a tasa de

deformación constante en lugar de ensayos de tracción a velocidad de cabezal constante.

Tal como puede apreciarse, la realización de ensayos de torsión permite el alcance de deformaciones efectivas mucho mayores que aquellas alcanzadas en tracción. Sin embargo, en dichas curvas también se observa una caída progresiva del esfuerzo con la deformación a partir de una cierta deformación crítica donde se alcanza un “pico” en el esfuerzo. En el caso de estos ensayos, la disminución progresiva del esfuerzo de fluencia durante el transcurso de la deformación ha sido atribuida a un fenómeno de engrosamiento dinámico de precipitados típicos de estos materiales, ya que en este tipo de ensayo no ocurre “encuellamiento” de la muestra.

En el caso de los ensayos de tracción realizados en la presente investigación, tal como se señaló anteriormente, en la actualidad no se tiene certeza de las causas que dan lugar a la disminución del esfuerzo con la deformación y constituye uno de los aspectos que serán investigados en los trabajos subsecuentes a ser realizados, por ejemplo mediante la interrupción de los ensayos a deformaciones específicas para corroborar la formación o no del cuello en las probetas de tracción.

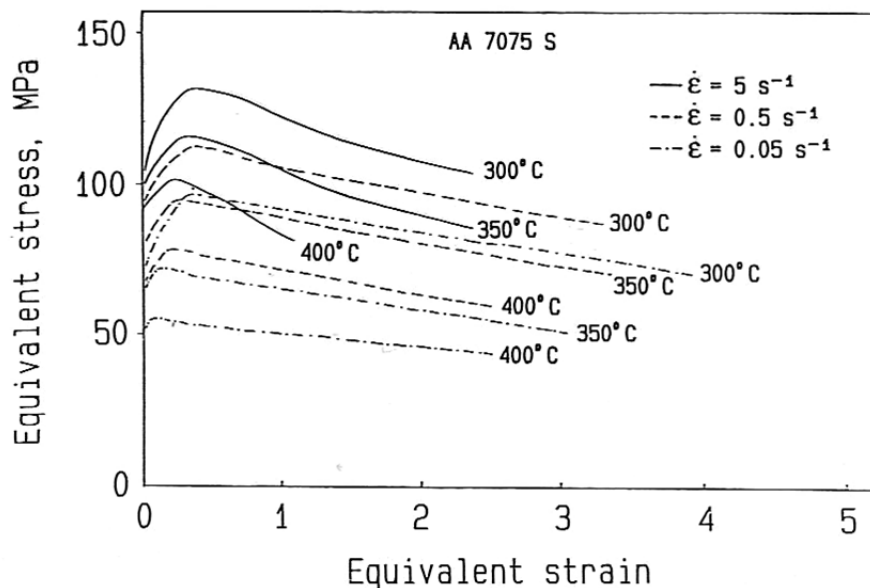


Figura 6.14 Esfuerzo equivalente vs Deformación equivalente de la aleación de aluminio 7075 S <sup>(16)</sup>

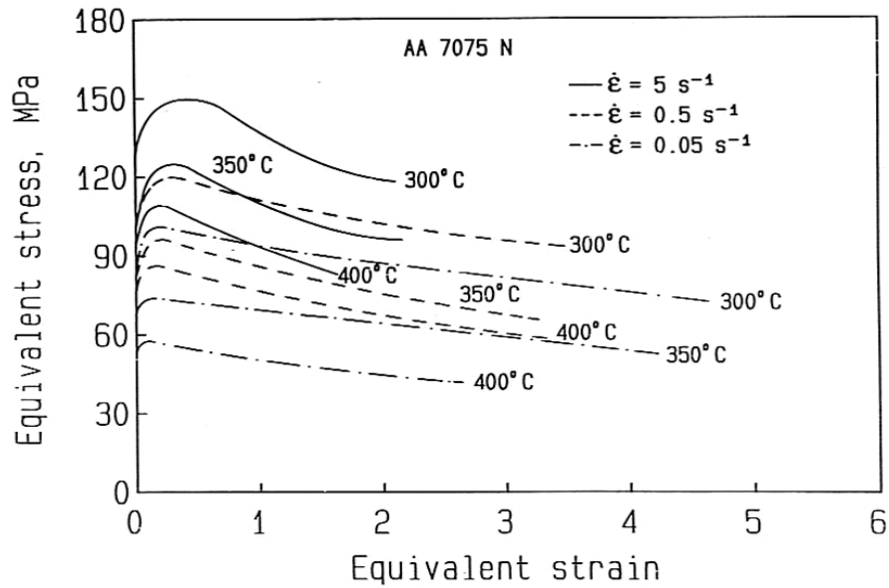


Figura 6.15 Esfuerzo equivalente vs Deformación equivalente de la aleación de aluminio 7075 N <sup>(16)</sup>

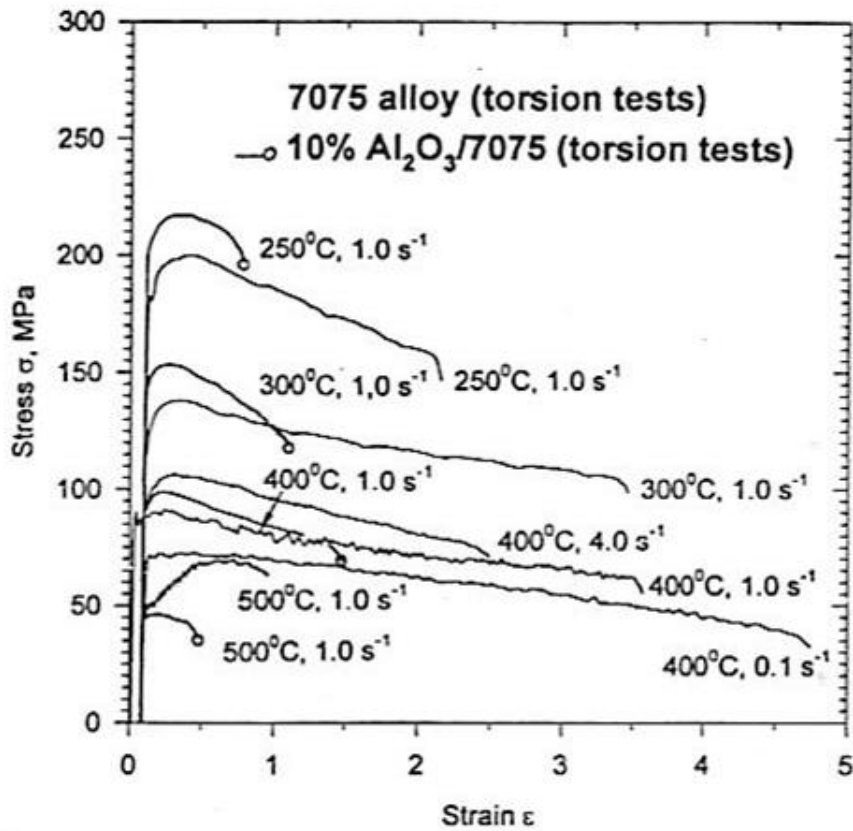


Figura 6.16 Esfuerzo vs Deformación de la aleación de aluminio 7075 y 7075/10% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <sup>(17)</sup>

## ***CAPÍTULO VII***

### ***Conclusiones y Recomendaciones***



### 7.1.- Conclusiones

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

- El dispositivo construido permite alcanzar temperaturas de trabajo medidas en el interior de la probeta, que van desde 24°C hasta 500°C, lo que garantiza que se han logrado los objetivos establecidos para este trabajo especial de grado.
- El diseño del dispositivo facilita su incorporación a la máquina universal de ensayos mecánicos, así como también, el montaje y desmontaje de las probetas.
- El sistema de enfriamiento cumple satisfactoriamente su objetivo de proteger a la “celda de carga” del calentamiento por efecto de las temperaturas elevadas en el horno.
- El equipo permite estabilizar la temperatura con un rango de variación por debajo de los límites establecidos en la norma ASTM E21, gracias a un sistema de monitoreo permanente de la temperatura dentro de la probeta.
- En el país existe tanto la capacidad de diseño como también los materiales, maquinaria y equipos necesarios para la construcción de dispositivos de esta naturaleza.
- La comercialización de este equipo es factible ya que el costo de fabricación es bastante competitivo con respecto a lo que se ofrece actualmente en el mercado para realizar este tipo de ensayos.

### 7.2.- Recomendaciones

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

- Leer el manual de operaciones antes de poner en funcionamiento el horno y realizar ensayos de tracción uniaxial a temperaturas moderadas.
- Verificar periódicamente la alineación del horno con respecto a los extensores.
- Se recomienda aplicar grafito a las roscas de las probetas a la hora de realizar un ensayo.
- Realizar una revisión de los extensores periódicamente con el fin de garantizar su buen funcionamiento.
- Automatizar aún más el proceso desarrollando una interconexión entre el programa de control y registro de la Máquina Instron 8502 y el PLC del horno. Esto lograría que una vez estabilizada la temperatura se inicie el ensayo de tracción uniaxial automáticamente.
- Incluir el uso de extensómetros durante los ensayos para obtener mayor precisión en la medición de la elongación de la probeta.
- Se recomienda la actualización del dispositivo controlando la atmosfera de calentamiento para la realización de ensayos a altas temperaturas.
- Buscar en otros mercados materiales para la fabricación de los extensores, que cubran con los requerimientos establecidos por el diseño, pero que sean más resistentes, y de esta manera se permita no sólo ampliar la gama de ensayos que se puedan realizar sino extender la vida útil de las piezas.

## *Apéndice*

Tabla A-1 Diámetros y áreas de roscas unificadas de tornillos UNC y UNF <sup>(4)</sup>

| Designación de tamaño | Diámetro mayor nominal pulg | Serie basta-UNC     |  |   | Serie fina-UNF      |  |   |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------|--|---|---------------------|--|---|
|                       |                             | Hilos por pulgada N | Área de esfuerzo de tensión A, pulg <sup>2</sup> | Área al diámetro menor A, pulg <sup>2</sup> | Hilos por pulgada N | Área de esfuerzo de tensión A, pulg <sup>2</sup> | Área al diámetro menor A, pulg <sup>2</sup> |
| 0                     | 0.0600                      |                     |  |   | 80                  | 0.001 80   | 0.001 51                                    |
| 1                     | 0.0730                      | 64                  | 0.002 63   | 0.002 18                                    | 72                  | 0.002 78   | 0.002 37                                    |
| 2                     | 0.0860                      | 56                  | 0.003 70   | 0.003 10                                    | 64                  | 0.003 94   | 0.003 39                                    |
| 3                     | 0.0990                      | 48                  | 0.004 87   | 0.004 06                                    | 56                  | 0.005 23   | 0.004 51                                    |
| 4                     | 0.1120                      | 40                  | 0.006 04   | 0.004 96                                    | 48                  | 0.006 61   | 0.005 66                                    |
| 5                     | 0.1250                      | 40                  | 0.007 96   | 0.006 72                                    | 44                  | 0.008 80   | 0.007 16                                    |
| 6                     | 0.1380                      | 32                  | 0.009 09   | 0.007 45                                    | 40                  | 0.010 15   | 0.008 74                                    |
| 8                     | 0.1640                      | 32                  | 0.014 0  | 0.011 96                                    | 36                  | 0.014 74   | 0.012 85                                    |
| 10                    | 0.1900                      | 24                  | 0.017 5  | 0.014 50                                    | 32                  | 0.020 0  | 0.017 5                                     |
| 12                    | 0.2160                      | 24                  | 0.024 2  | 0.020 6                                     | 28                  | 0.025 8  | 0.022 6                                     |
| 1/4                   | 0.2500                      | 20                  | 0.031 8  | 0.026 9                                     | 28                  | 0.036 4  | 0.032 6                                     |
| 5/16                  | 0.3125                      | 18                  | 0.052 4  | 0.045 4                                     | 24                  | 0.058 0  | 0.052 4                                     |
| 3/8                   | 0.3750                      | 16                  | 0.077 5  | 0.067 8                                     | 24                  | 0.087 8  | 0.080 9                                     |
| 7/16                  | 0.4375                      | 14                  | 0.106 3  | 0.093 3                                     | 20                  | 0.118 7  | 0.109 0                                     |
| 1/2                   | 0.5000                      | 13                  | 0.141 9  | 0.125 7                                     | 20                  | 0.159 9  | 0.148 6                                     |
| 9/16                  | 0.5625                      | 12                  | 0.182  | 0.162                                       | 18                  | 0.203  | 0.189                                       |
| 5/8                   | 0.6250                      | 11                  | 0.226  | 0.202                                       | 18                  | 0.256  | 0.240                                       |
| 3/4                   | 0.7500                      | 10                  | 0.334  | 0.302                                       | 16                  | 0.373  | 0.351                                       |
| 7/8                   | 0.8750                      | 9                   | 0.462  | 0.419                                       | 14                  | 0.509  | 0.480                                       |
| 1                     | 1.0000                      | 8                   | 0.606  | 0.551                                       | 12                  | 0.663  | 0.625                                       |
| 1 1/4                 | 1.2500                      | 7                   | 0.969  | 0.890                                       | 12                  | 1.073  | 1.024                                       |
| 1 1/2                 | 1.5000                      | 6                   | 1.405  | 1.294                                       | 12                  | 1.581  | 1.521                                       |

Tabla A-2 Procedimiento sugerido para determinar la rigidez del sujetador <sup>(4)</sup>

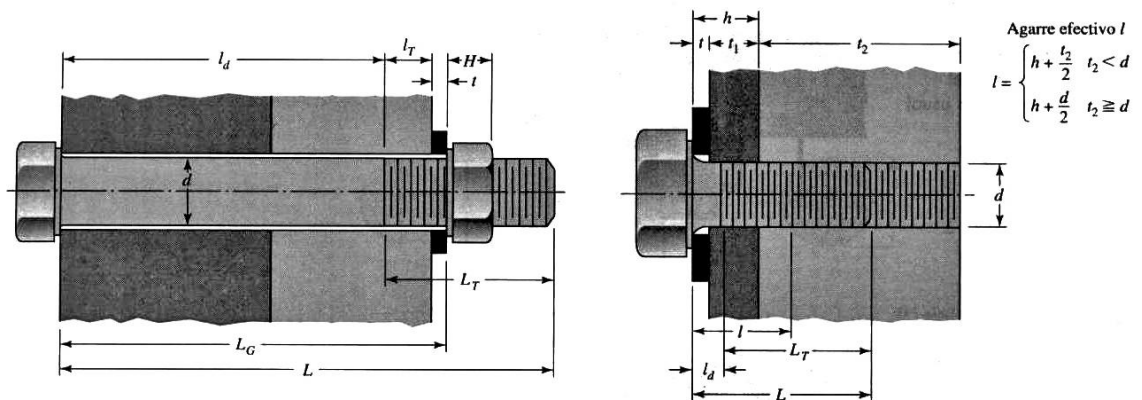


Tabla A-2 continuación

Dado el diámetro del sujetador  $d$  y el paso  $p$  o el número de hilos

Agarre es espesor  $L_G$

Agarre efectivo =  $\begin{cases} h+t_2/2, & t_2 < d \\ h+d/2, & t_2 > d \end{cases}$

Espesor de la arandela de la tabla E-32 o E-33  
 Longitud roscada  $L_T$   
 Serie en pulgadas:

$$L_T = \begin{cases} 2D + \frac{1}{4} \text{ pulg}, & L \leq 6 \text{ pulg} \\ 2D + \frac{1}{2} \text{ pulg}, & L > 6 \text{ pulg} \end{cases}$$

Serie métrica:

$$L_T = \begin{cases} 2D + 6 \text{ mm}, & L < 125, D \leq 48 \text{ mm} \\ 2D + 12 \text{ mm}, & 125 < L < 200 \text{ mm} \\ 2D + 25 \text{ mm}, & L > 200 \text{ mm} \end{cases}$$

Longitud del sujetador:  $L > L_G + H$

Longitud del sujetador:  $L > h + 1.5d$

Longitud de la parte útil sin rosca:  $l_d = L - L_T$   
 Longitud de la parte roscada:  $l_T = L_G - l_d$

Redondee usando la tabla E-17\*

Longitud de la parte útil sin rosca:  $l_d = L - L_T$   
 Longitud de la parte útil roscada:  $l_T = l - l_d$

Área de la parte sin rosca:  
 $A_d = \pi d^2 / 4$   
 Área de la parte roscada:  
 $A_T = A_u$  tabla 8-1 o 8-2  
 Rigidez del sujetador:  
 $k_b = \frac{A_d A_T E}{A_d l_T + A_T l_d}$

Tabla A-3 Parámetros de la rigidez de varios materiales de elementos <sup>(4)</sup>

| Material empleado | Relación de poisson | GPa de elasticidad | Módulo Mpsi | A        | B        |
|-------------------|---------------------|--------------------|-------------|----------|----------|
| Acero             | 0.291               | 207                | 30.0        | 0.787 15 | 0.628 73 |
| Aluminio          | 0.334               | 71                 | 10.3        | 0.796 70 | 0.638 16 |
| Cobre             | 0.326               | 119                | 17.3        | 0.795 68 | 0.635 53 |
| Fundición gris    | 0.211               | 100                | 14.5        | 0.778 71 | 0.616 16 |
| Expresión general |                     |                    |             | 0.789 52 | 0.629 14 |

Tabla A-4 Efectos de la temperatura de operación en la resistencia a tensión de acero <sup>(4)</sup>

| Temperatura, C | $S_T/S_{RT}$ | Temperatura, F | $S_T/S_{RT}$ |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 20             | 1.000        | 70             | 1.000        |
| 50             | 1.010        | 100            | 1.008        |
| 100            | 1.020        | 200            | 1.020        |
| 150            | 1.025        | 300            | 1.024        |
| 200            | 1.020        | 400            | 1.018        |
| 250            | 1.000        | 500            | 0.995        |
| 300            | 0.975        | 600            | 0.963        |
| 350            | 0.943        | 700            | 0.927        |
| 400            | 0.900        | 800            | 0.872        |
| 450            | 0.843        | 900            | 0.797        |
| 500            | 0.768        | 1 000          | 0.698        |
| 550            | 0.672        | 1 100          | 0.567        |
| 600            | 0.549        |                |              |

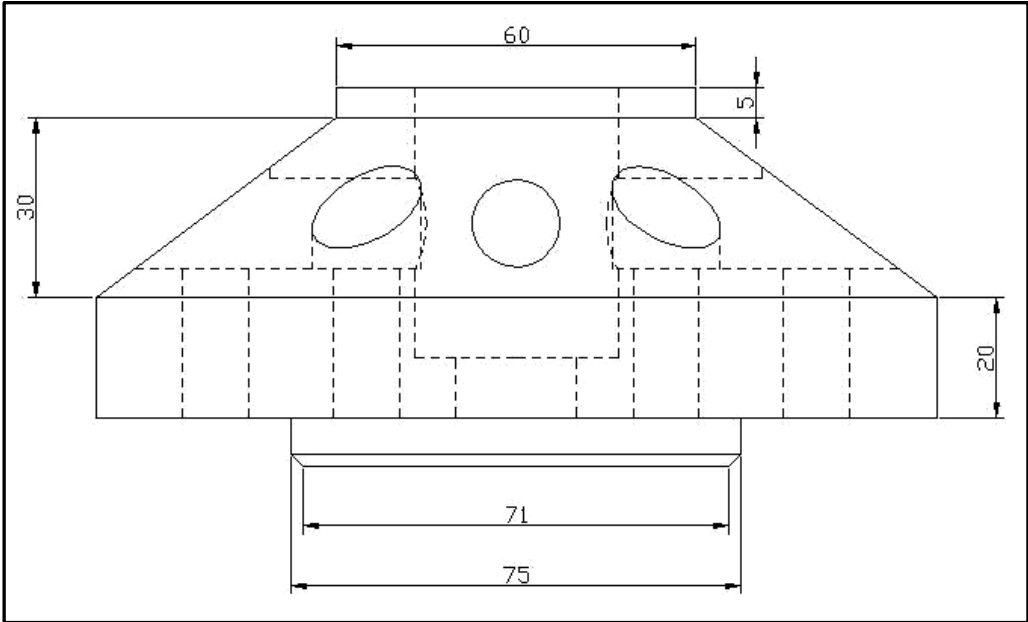
## *Referencias bibliográficas*

- [1] ASM International, (2000), ASM Handbook, “Mechanical Testing” Vol. 8, USA.
- [2] ASM International, (1997), ASM Specialty Handbook “Heat Resistant Materials”, USA.
- [3] DAVIS JOSEPH R., (1976), Metal Engineering Quarterly, ASM Source-book on Stainless Steels, ASM, USA.
- [4] SHIGLEY J. E., (2002), MISCHKE C. R., Diseño en Ingeniería Mecánica, McGRAW-Hill, 6<sup>ta</sup> Edición, México.
- [5] MILANI RODOLFO, (1985), Diseño para Nuestra Realidad, USB Equinoccio, Caracas.
- [6] BARAJAS O. M., (2003), El Proceso de Diseño en Proyectos de Ingeniería, McGraw-Hill, Bogotá.
- [8] AVALLONE E. A., BAUMEISTER THEODORE, (1995), Marks.-Manual del Ingeniero Mecánico, McGraw-Hill, 9<sup>na</sup> Edición, México.
- [9] GROOVER MIKELL P., (1997), Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas, Prentice Hall Hispanoamérica, 2<sup>da</sup> Edición, México.
- [10] ASTM International, (2003), ASTM E8-03 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, USA.
- [11] ASM International, (1997), ASM Handbook “Materials Selection and Design” Vol. 20, USA.
- [12] HIBBELER R. C., (1997), Mecánica de Materiales, Pretince Hall, 3<sup>ra</sup> Edición, México.
- [13] SHIGLEY J. E. y MISCHKE C. R., (2002), Diseño en Ingeniería Mecánica, McGRAW-Hill, 5<sup>ta</sup> Edición, México.
- [14] <http://www.matweb.com/>
- [15] <http://www.ferrum-ca.com/>
- [16] Langdon T., Merchant H. y Morris J., (1990), Hot deformation of aluminum alloys, Non-Ferrous Metals Committee, Michigan.
- [17] Bieler T., Lalli L. y Macewen S., (1998), Hot Deformation of Aluminum Alloys II, Non-Ferrous Metals Committee, Illinois.

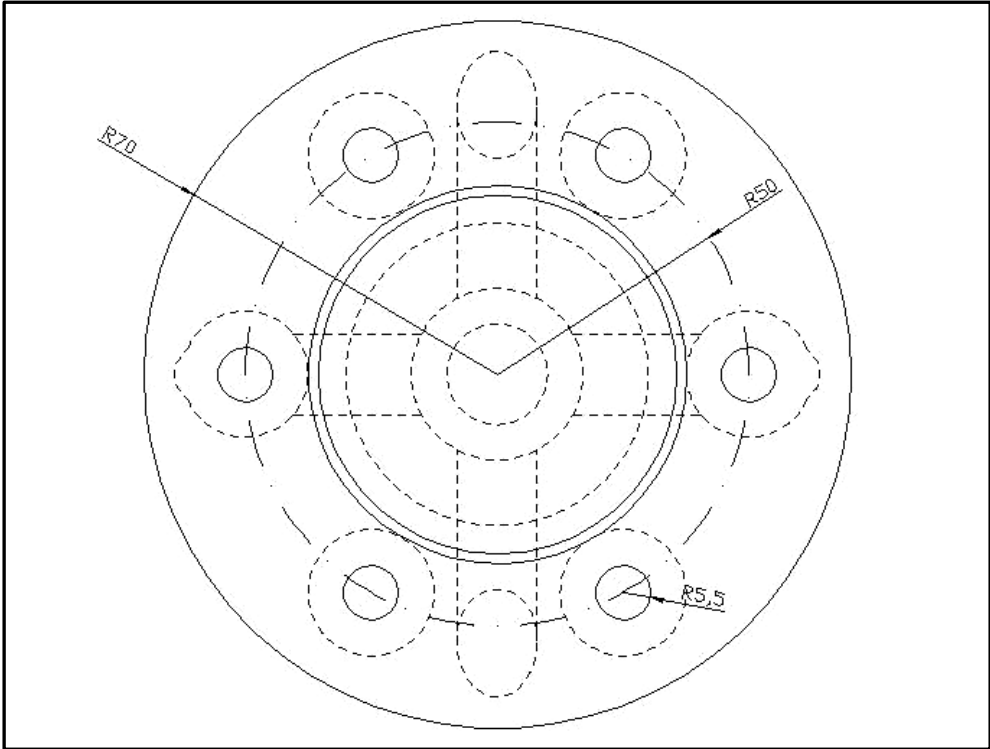


## *Anexos*

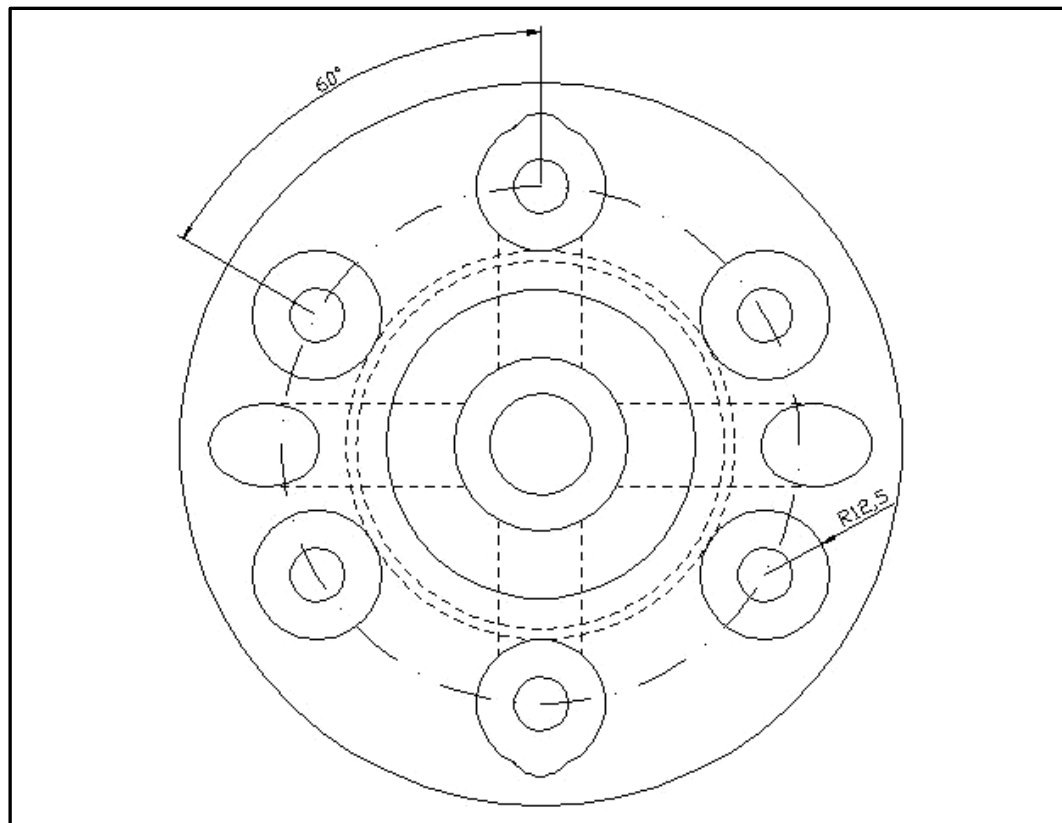
*Pieza superior de la base del extensor*



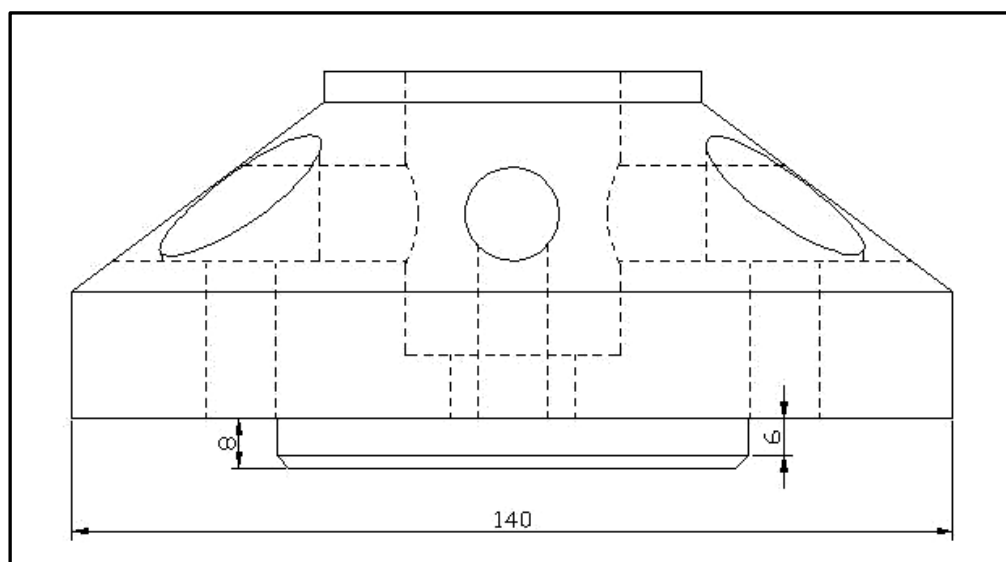
Anexo 1 Vista frontal, medidas en milímetros



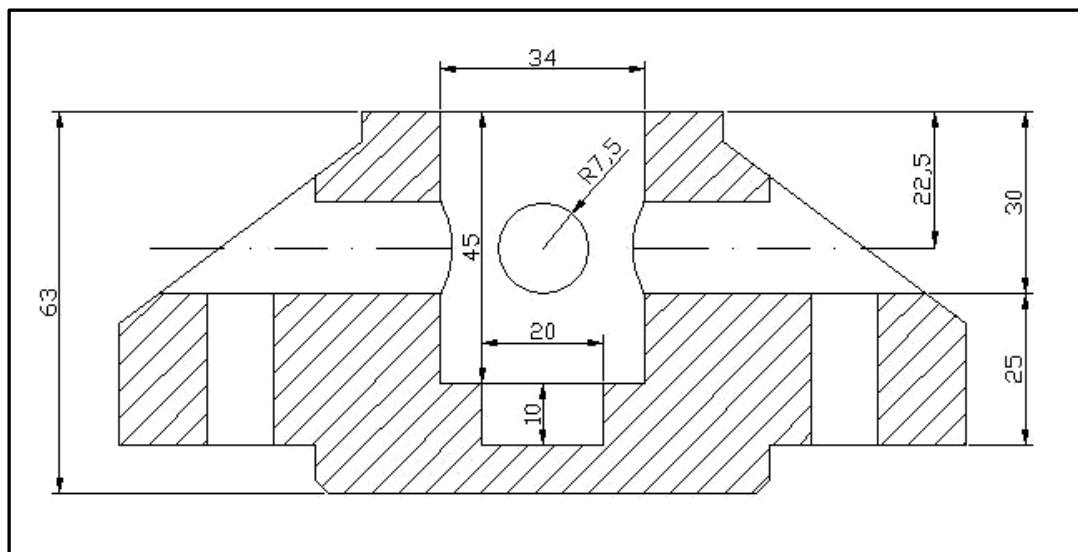
Anexo 2 Vista inferior, medidas en milímetros



Anexo 3 Vista superior, medidas en milímetros

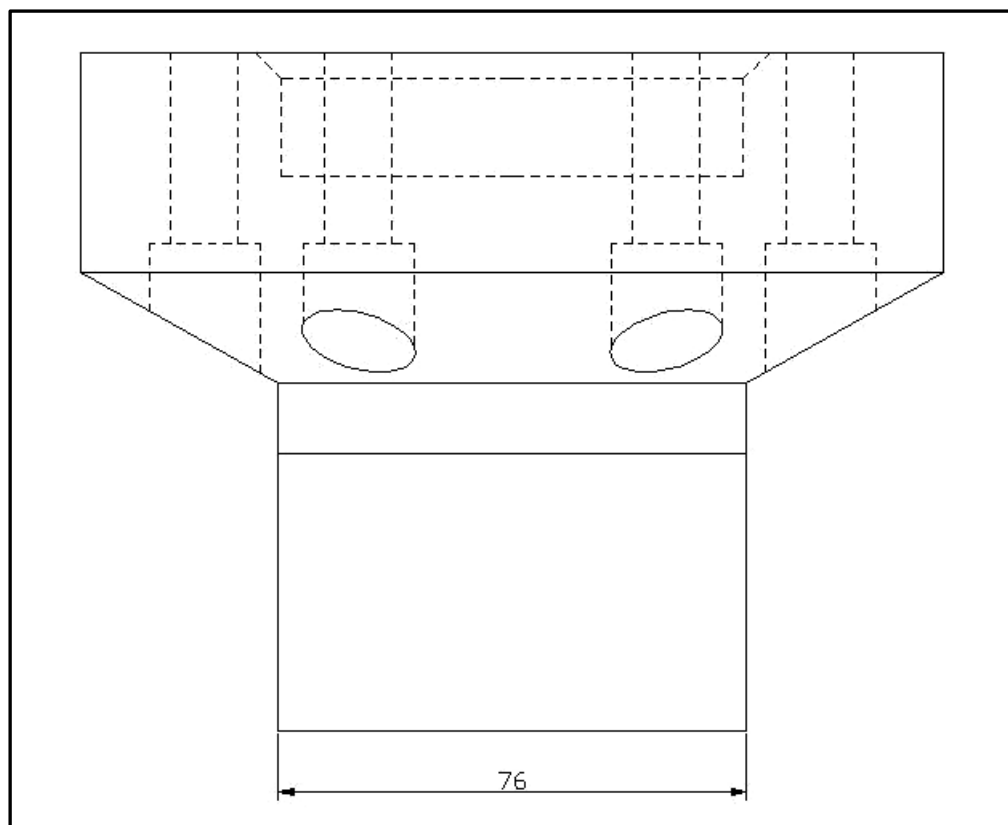


Anexo 4 Vista lateral, medidas en milímetros

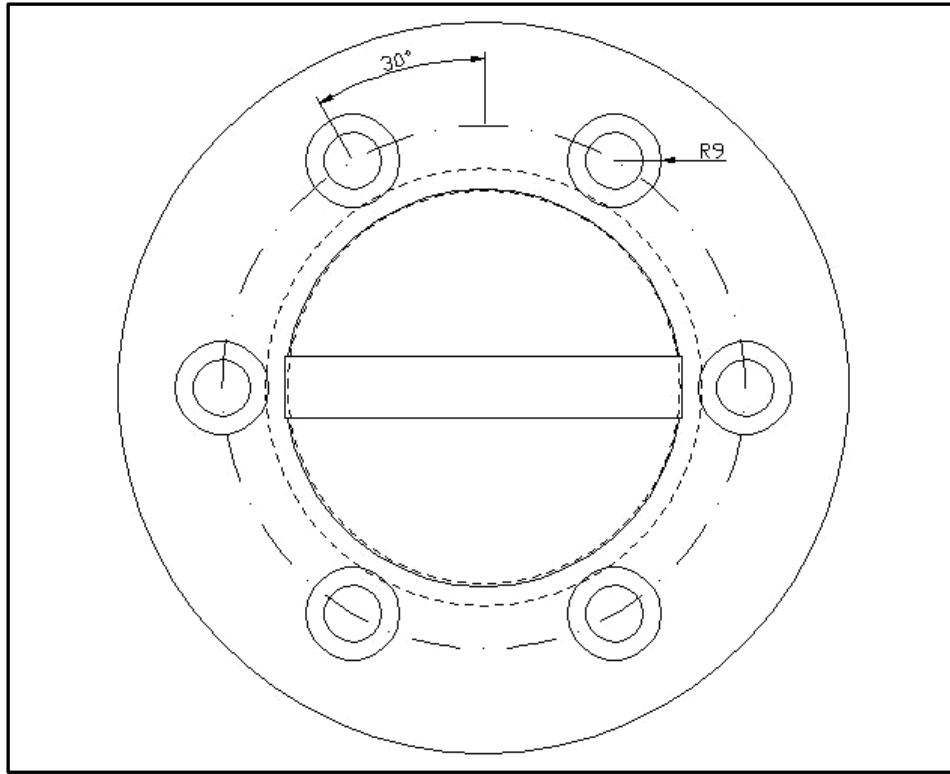


Anexo 5 Corte lateral, medidas en milímetros

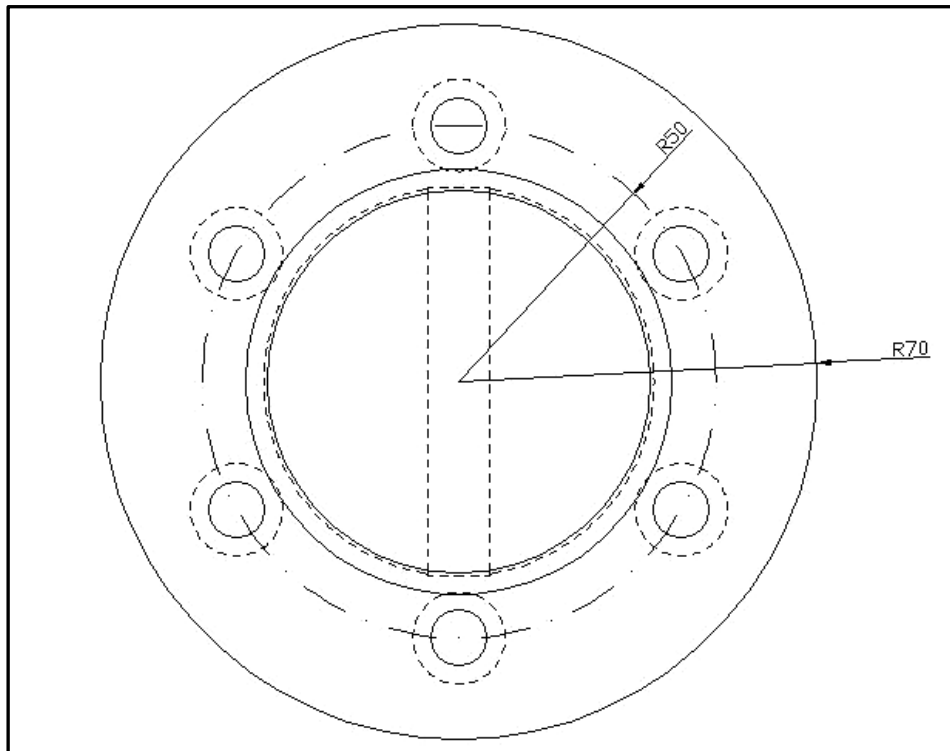
*Pieza Inferior de la base del extensor*



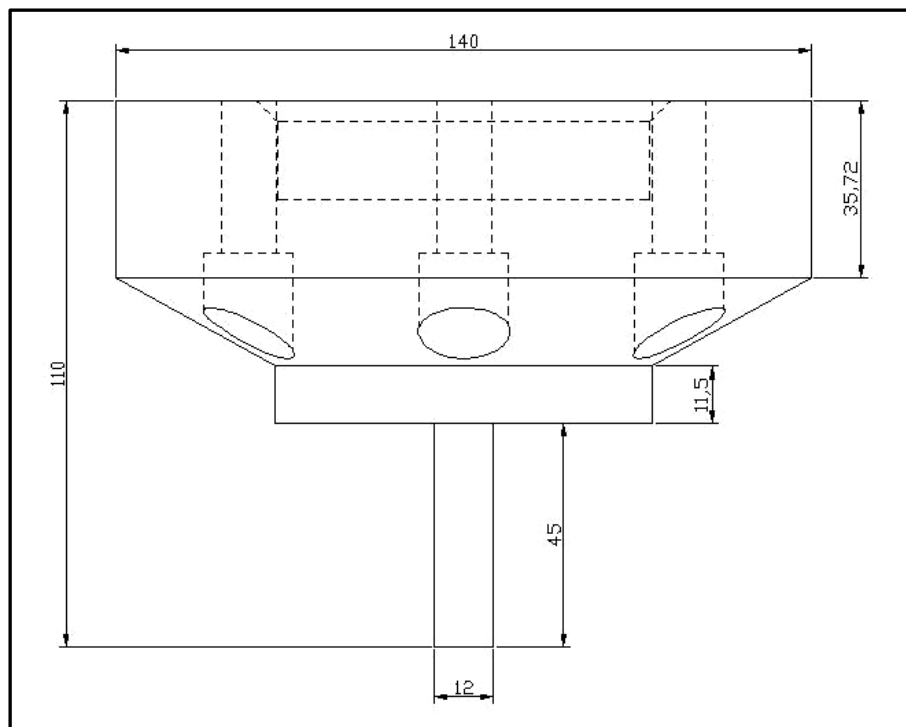
Anexo 6 Vista frontal, medidas en milímetros



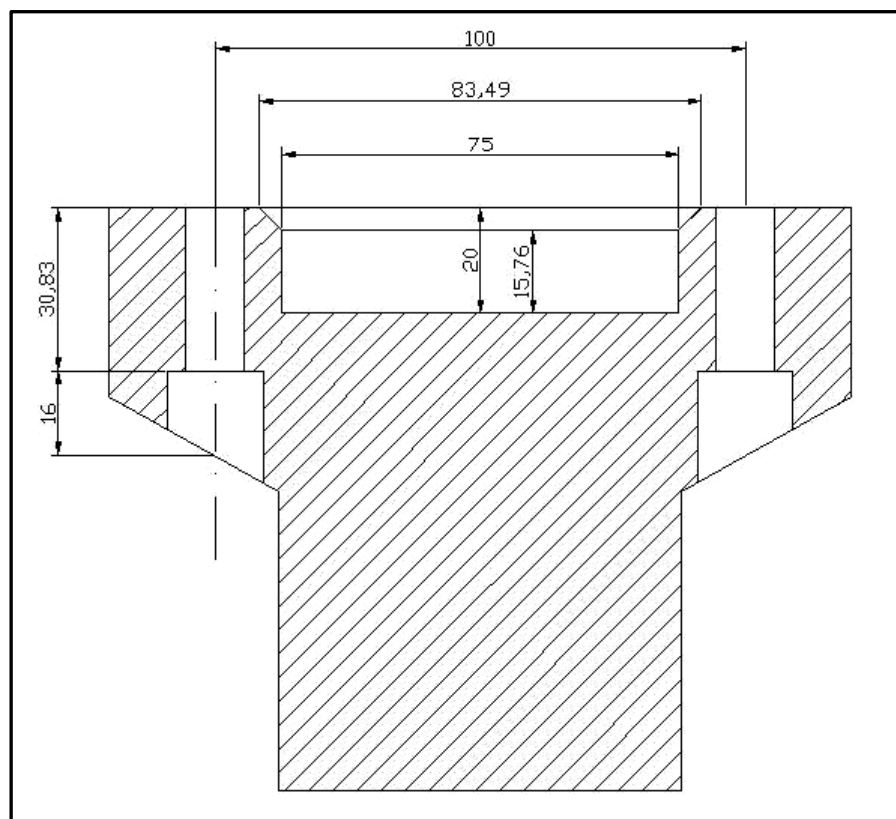
Anexo 7 Vista inferior, medidas en milímetros



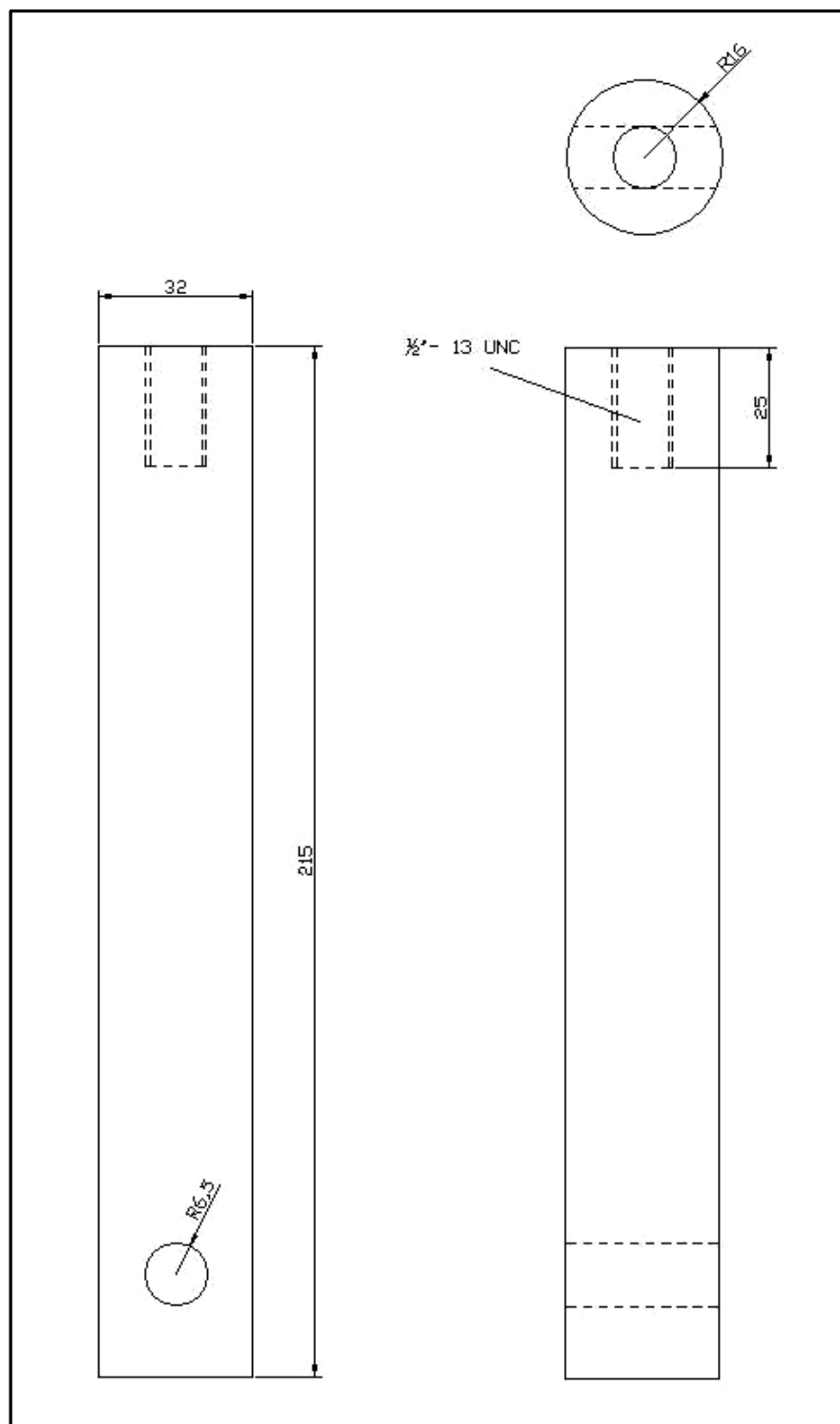
Anexo 8 Vista superior, medidas en milímetros



Anexo 9 Vista lateral, medidas en milímetros

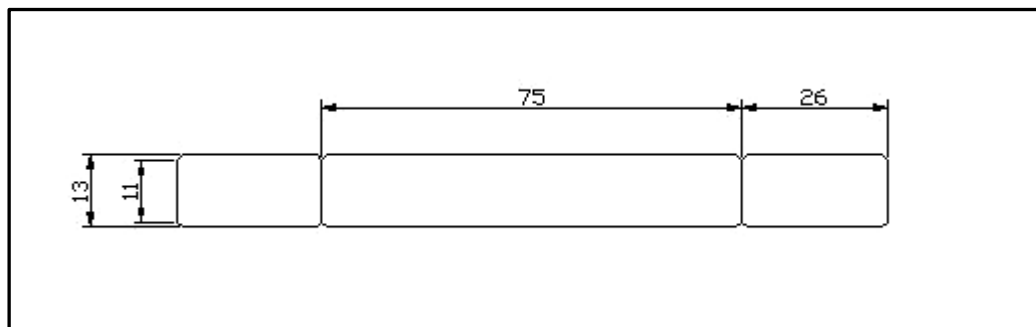


Anexo 10 Corte frontal, medidas en milímetros

*Eje del extensor*

Anexo 11 Vista frontal, superior y lateral, medidas en milímetros

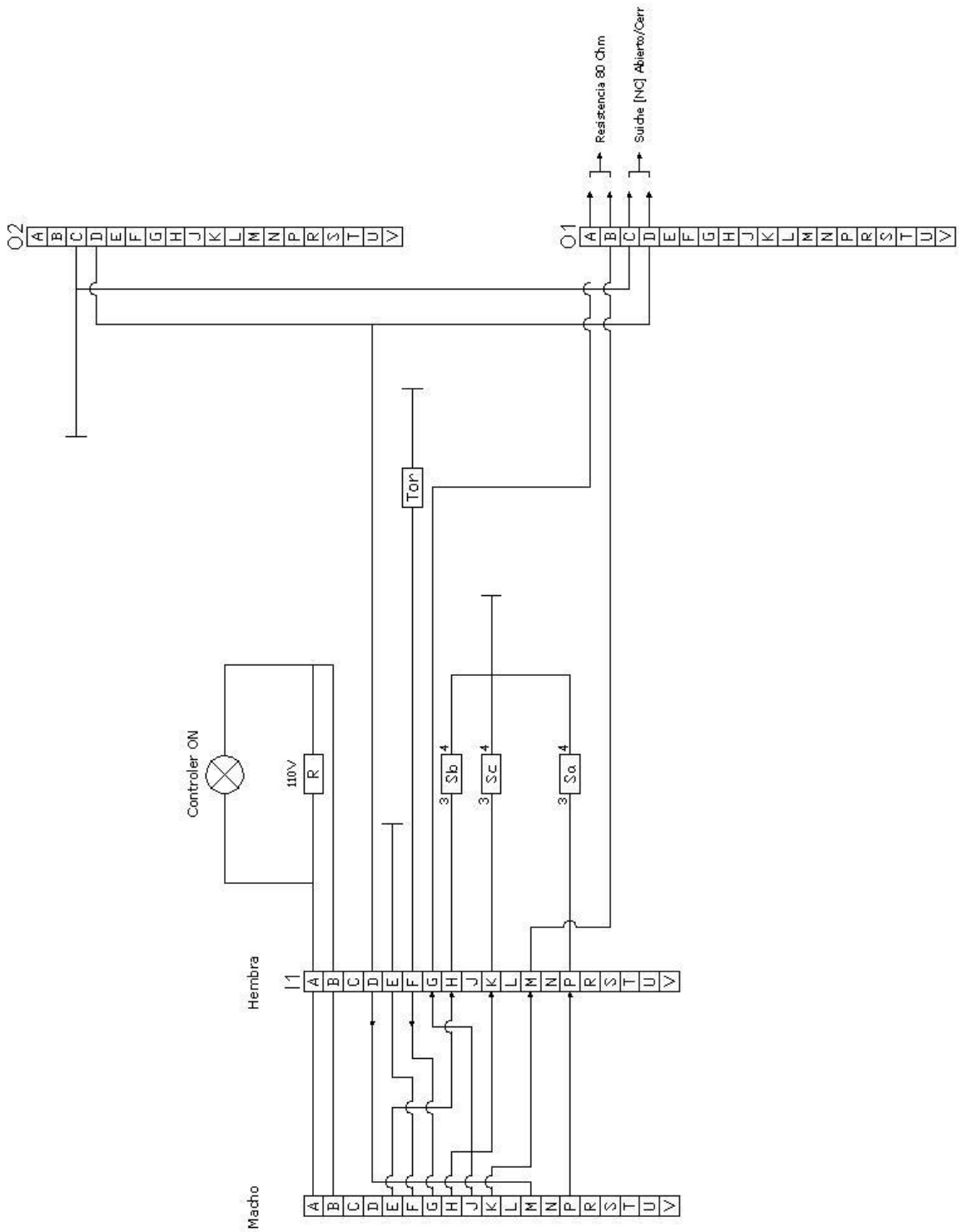
*Pasador*



Anexo 12 Vista frontal, medidas en milímetros



Plano eléctrico de control

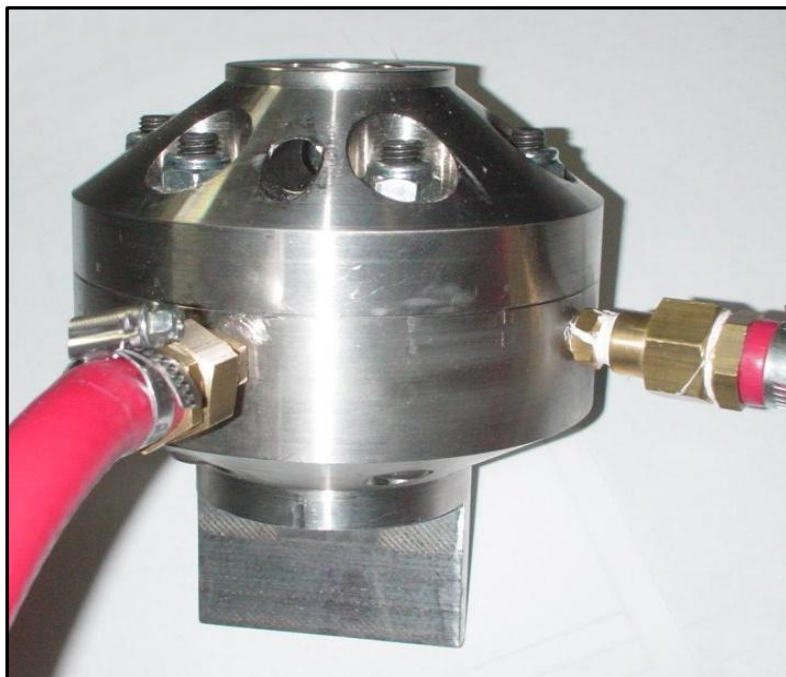


Anexo13 Plano eléctrico de control del horno Instron

*Dispositivo construido*



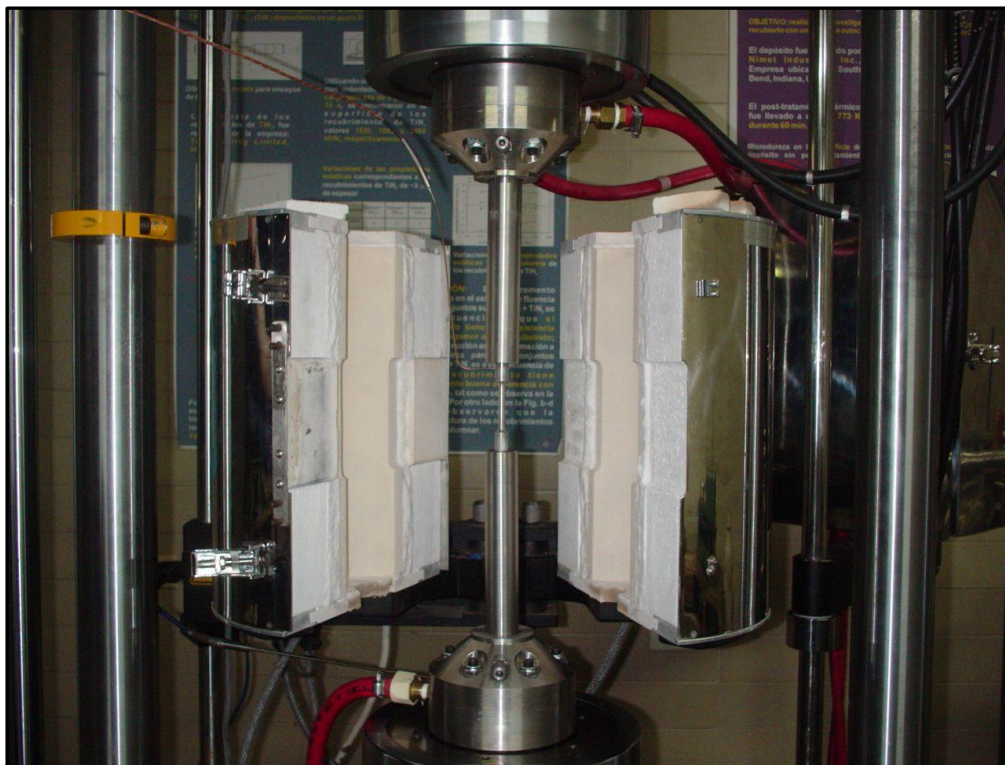
Anexo 14 Eje del extensor y pasador



Anexo 15 Base de refrigeración del extensor



Anexo 16 Base y eje del extensor ensamblados



Anexo 17 Dispositivo para ensayos de tracción uniaxial a temperaturas moderadas



Anexo 18 Termocupla insertada dentro de la probeta





Anexo 19 Ensayo de tracción uniaxial a temperaturas moderadas