



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

“Construcción de un Modelo Experimental para Simular el  
Comportamiento por Fluencia Lenta del Acero Inoxidable AISI 304  
sometido a Corrosión bajo Esfuerzos“

### **EXAMEN COMPLEXIVO**

Previa a la obtención del Título de:

### **INGENIEROS MECÁNICOS**

Presentado por:

José Luis Mesa Bejarano  
Ronald Francisco Toala Guanulema

GUAYAQUIL-ECUADOR

2015

## **AGRADECIMIENTO**

A la Ing. Luz Bejarano por la ayuda brindada y por permitirnos usar las instalaciones de PROMEL para la elaboración del proyecto. A LEMAT, por los servicios prestados en el proceso investigativo. A todos los que colaboraron directa e indirectamente en la realización de este trabajo.

Al Ing. Julián Peña, Director de Tesis, por su valiosa guía a lo largo de este trayecto.

***José Luis Mesa Bejarano***

***Ronald Francisco Toala Guanulema***

## **DEDICATORIA**

A Dios, por las bendiciones recibidas. A nuestra familia por el apoyo y confianza brindada en todo momento de nuestras vidas. A los amigos, por su lealtad y presencia en el transcurso de nuestra carrera.

***José Luis Mesa Bejarano***

***Ronald Francisco Toala Guanulema***

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

Ing. Jorge Duque R.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR DEL TFG

---

Msc. Víctor Palacios C.  
VOCAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad del contenido desarrollado en el presente Trabajo Final de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

José Luis Mesa Bejarano

---

Ronald Francisco Toala Guanulema

## RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la susceptibilidad del acero inoxidable AISI 304 a sufrir Corrosión Bajo Esfuerzos (SCC), mediante el ensayo a fluencia lenta regido por la norma ASTM G129, se diseñó y construyó un banco experimental que permita simular las condiciones propicias para que este tipo de corrosión ocurra.

Se realizaron tres ensayos: la probeta se la sometió al efecto de tensión pura sin aplicarle el medio corrosivo y a temperatura ambiente, la muestra se la expuso a Cloruro de Sodio al 3.5% a 90°C y el último se lo realizó estando en contacto la probeta con el medio corrosivo a temperatura ambiente, los cuales simulan las condiciones de operación encontradas en tanques usados en la industria cervecera con el objetivo de analizar el comportamiento de este material bajo los parámetros de trabajo seleccionados.

Para el diseño del banco de pruebas se tomó en cuenta la velocidad de deformación solicitada por la norma, además del uso de materiales y equipos encontrados en el mercado nacional con el objetivo de facilitar la construcción de la máquina en un taller local.

Se procedió a censar los valores de fuerza, deformación y tiempo de la probeta ensayada, lo cual permitió encontrar gráficas de esfuerzo deformación para analizar la variación de las propiedades mecánicas, tiempo y elongación de las probetas utilizadas en los ensayos.

Se complementaron los resultados obtenidos por el ensayo, haciendo macrografías y metalografías de la zona fracturada permitiendo comprobar la injerencia que tuvo el medio corrosivo y la temperatura en la morfología del material.

El acero inoxidable AISI 304 presentó disminución de sus propiedades mecánicas sobre todo cuando estuvo expuesto a un medio corrosivo salino a 90°C pero sin poder llegar a confirmar que la fractura se debió a la presencia de Corrosión Bajo Esfuerzos.

## ÍNDICE GENERAL

|                        | Pág. |
|------------------------|------|
| RESUMEN.....           | ii   |
| ÍNDICE GENERAL.....    | iv   |
| ABREVIATURAS.....      | viii |
| SIMBOLOGÍA.....        | x    |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xi   |
| ÍNDICE DE TABLAS.....  | xvii |
| ÍNDICE DE PLANOS.....  | xix  |
| INTRODUCCIÓN.....      | 1    |

### CAPÍTULO 1

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. CORROSIÓN PRODUCIDA POR LA INTERACCIÓN DEL MEDIO</b>          |          |
| <b>AMBIENTE.....</b>  | <b>4</b> |
| 1.1. Características de la Corrosión Bajo Esfuerzos .....           | 6        |
| 1.1.1. Mecanismo de Ocurrencia.....                                 | 7        |
| 1.1.2. Iniciación de la Fractura.....                               | 8        |
| 1.1.3. Propagación de la Fractura.....                              | 10       |
| 1.1.4. Acciones Preventivas para evitar este tipo de corrosión..... | 13       |
| 1.2. Corrosión producida por fatiga en metales.....                 | 15       |
| 1.2.1. Daños ocasionados y nivel de ocurrencia.....                 | 15       |
| 1.2.2. Diferencias con Corrosión Bajo Esfuerzos.....                | 16       |
| 1.3. Incidencia de corrosión por hidrogeno.....                     | 17       |
| 1.3.1. Requisitos principales para la fractura.....                 | 18       |

|   |    |
|---|----|
| 1.3.2. Comparación con Corrosión Bajo Esfuerzos.....  | 19 |
| 1.4. Daños típicos asociados a los materiales en servicio atacados por<br>corrosión bajo esfuerzos..... | 21 |
| 1.5. Problemas de corrosión en la industria cervecera.....  | 26 |
| 1.5.1. Aceros inoxidables.....  | 29 |
| 1.5.2. Otras aleaciones.....  | 33 |
| 1.6. Ensayos para evaluar la corrosión influenciada por el medio.....                                   | 34 |
| 1.6.1. Por deformación constante.....   | 35 |
| 1.6.2. A carga constante.....   | 37 |
| 1.6.3. Corrosión por fatiga.....  | 39 |
| 1.6.4. A velocidad por deformación lenta.....   | 40 |

## **CAPÍTULO 2**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2. DISEÑO DEL BANCO EXPERIMENTAL PARA SIMULAR<br/>CORROSIÓN BAJO ESFUERZOS.....</b>                            | <b>44</b> |
| 2.1. Infraestructura del banco experimental para el ensayo de corrosión<br>a velocidad por deformación lenta..... | 44        |
| 2.1.1. Aspectos ingenieriles.....   | 45        |
| 2.1.2. Elementos mecánicos.....   | 47        |
| 2.1.3. Elementos electrónicos.....  | 84        |
| 2.2. Identificación del medio corrosivo para simular ambientes<br>agresivos.....                                  | 85        |
| 2.3. Selección de probetas a emplear para el ensayo de corrosión<br>bajo esfuerzo.....                            | 87        |
| 2.3.1. Probetas con muesca.....   | 89        |
| 2.3.2. Probetas sin muesca.....   | 89        |
| 2.4. Parámetros a considerar en el diseño.....  | 90        |
| 2.5. Análisis mecánico.....   | 92        |
| 2.5.1. Fuerza de ruptura de la probeta.....   | 92        |

|  |     |
|--|-----|
| 2.5.2. Tornillo de potencia.....                                     | 93  |
| 2.5.3. Reducción de velocidad.....                                   | 97  |
| 2.5.4. Transmisión por banda y cadena.....                           | 98  |
| 2.5.5. Cajas reductoras de velocidad y selección de rodamientos..... | 103 |
| 2.5.6. Potencia requerida del motor.....                             | 151 |
| 2.5.7. Sujeción de la probeta y cámara de ensayo.....                | 151 |
| 2.5.8. Soporte estructural del modelo experimental.....              | 154 |
| 2.6. Selección de elementos electrónicos del banco de prueba.....    | 162 |
| 2.6.1. Motor eléctrico.....  | 162 |
| 2.6.2. Celda de carga.....   | 163 |
| 2.6.3. Termocupla.....   | 166 |
| 2.6.4. Tarjeta de adquisición de datos.....                          | 168 |
| 2.7. Detalle de los elementos del prototipo diseñado.....            | 170 |

### **CAPÍTULO 3**

|  |            |
|--|------------|
| <b>3. CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA DE ENSAYO.....</b> | <b>174</b> |
| 3.1. Ensamble del sistema mecánico.....                              | 174        |
| 3.1.1. Motor eléctrico-polea.....                                    | 176        |
| 3.1.2. Cajas reductoras de velocidad.....                            | 178        |
| 3.1.3. Catarinas y cadena.....                                       | 182        |
| 3.1.4. Tornillo de potencia y mordaza.....                           | 183        |
| 3.2. Acople de la estructura del banco de prueba.....                | 189        |
| 3.2.1. Cámara experimental.....                                      | 191        |
| 3.3. Conexión del sistema electrónico.....                           | 193        |
| 3.4. Protocolo de calibración y pruebas.....                         | 201        |
| 3.5. Costo-beneficio de la implementación del modelo.....            | 212        |

## **CAPÍTULO 4**

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. SIMULACIÓN DEL MECANISMO DE CORROSIÓN BAJO ESFUERZO A DEFORMACIÓN LENTA.....</b> | <b>216</b> |
| 4.1. Descripción del ensayo.....   | 216        |
| 4.2. Material a ensayar.....   | 220        |
| 4.2.1. Justificación del tipo de material a ensayar.....                               | 220        |
| 4.2.2. Caracterización del acero inoxidable AISI 304.....                              | 222        |
| 4.3. Preparación de las probetas.....  | 230        |
| 4.3.1. Procedimiento para el maquinado de las probetas.....                            | 230        |
| 4.3.2. Dimensionamiento de la muesca en la probeta.....                                | 231        |
| 4.4. Condiciones ambientales de ensayo para el medio corrosivo.....                    | 232        |
| 4.5. Procedimiento del ensayo.....   | 234        |
| 4.6. Recopilación de resultados.....   | 239        |
| 4.7. Procesamiento de datos.....   | 269        |

## **CAPÍTULO 5**

|   |            |
|---|------------|
| <b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....</b> | <b>277</b> |
| 5.1. Curva esfuerzo–deformación.....            | 277        |
| 5.2. Fractura del material ensayado.....        | 285        |
| 5.3. Pruebas metalográficas.....                | 296        |
| 5.4. Susceptibilidad del acero inoxidable.....  | 309        |

## **CAPÍTULO 6**

|  |     |
|--|-----|
| 6. Conclusiones y recomendaciones..... | 312 |
|--|-----|

## **APÉNDICES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## ABREVIATURAS

|            |  |
|------------|--|
| EIC        | Corrosión producida por interacción del medio ambiente |
| SCC        | Corrosión Bajo Esfuerzos                               |
| CFC        | Corrosión por Fatiga                                   |
| HIC        | Corrosión inducida por hidrógeno                       |
| LEFM       | Mecánica de Fractura Lineal Elástica                   |
| K          | Factor de intensidad del esfuerzo en la grieta         |
| $K_{ISCC}$ | Límite inferior de la intensidad de esfuerzo           |
| $K_{IC}$   | Límite superior de la intensidad de esfuerzo           |
| BCC        | Estructura Cúbica centrada en el cuerpo                |
| FCC        | Estructura Cúbica centrada en las caras                |
| ASTM       | American Society for Testing and Materials             |
| ASM        | American Society for Metals                            |
| AISI       | American Iron and Steel Institute                      |
| $S_{ut}$   | Resistencia Última a la Tracción                       |
| $S_y$      | Resistencia a la fluencia                              |
| $V_w$      | Velocidad tangencial del Sinfín                        |
| $V_g$      | Velocidad tangencial de la Corona                      |
| $W_{tg}$   | Fuerza Tangencial sobre la Corona                      |
| $W_{tw}$   | Fuerza Tangencial sobre el Sinfín                      |
| $W_{ag}$   | Fuerza Axial sobre la Corona                           |

|          |  |
|----------|--|
| $W_{aw}$ | Fuerza Axial sobre el Sinfín                                       |
| $W_{rg}$ | Fuerza Radial sobre la Corona                                      |
| $W_{rw}$ | Fuerza Radial sobre el Sinfín                                      |
| $P_0$    | Potencia de Salida   |
| $P_i$    | Potencia de Entrada  |
| $P_L$    | Potencia de Pérdidas   |
| UPN      | Perfil con sección transversal en forma de “U”                     |
| RTTF     | Razón del tiempo de la fractura                                    |
| RE       | Razón de deformación plástica                                      |
| RRA      | Razón de reducción del área  |
| $P_m$    | Carga máxima   |
| $P_f$    | Fuerza de Fractura   |
| $E_e$    | Elongación plástica en el ambiente de prueba                       |
| $E_c$    | Elongación plástica en el ambiente de control                      |
| HRC      | Hardness Rockwell C  |
| $T_f$    | Tiempo de fractura   |
| $\Delta$ | Deformación  |
| LC       | Longitud Calibrada   |
| $TTF_e$  | Tiempo hasta la fractura en el ambiente de prueba                  |
| $TTF_c$  | Tiempo hasta la fractura en el ambiente de control                 |
| $RA_e$   | Reducción de área después de la fractura en el ambiente de prueba  |
| $RA_c$   | Reducción de área después de la fractura en el ambiente de control |

## SIMBOLOGÍA

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Na              | Sodio                   |
| Fe              | Hierro                  |
| Cu              | Cobre                   |
| Si              | Silicio                 |
| PO <sub>4</sub> | Fosfato                 |
| m <sup>2</sup>  | Metros al cuadrado      |
| N               | Newton                  |
| Kg              | Kilogramo               |
| $\frac{m}{s^2}$ | Aceleración             |
| $\frac{m}{s^2}$ | Frecuencia angular      |
| $\sigma$        | Esfuerzo                |
| ppm             | Partes por millón       |
| %               | Porcentaje              |
| g               | Gramos                  |
| mg              | Miligramos              |
| h               | Altura                  |
| r               | Radio                   |
| W               | Velocidad angular       |
| $\Omega$        | Ohmio                   |
| Rpm             | Revoluciones por Minuto |
| cm              | Centímetro              |
| mm              | Milímetro               |
| MPa             | Mega pascales           |
| Lbs             | Libras                  |
| $\emptyset$     | Diámetro                |
| mv              | Mili voltios            |
| mA              | Miliamperios            |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   | Pág. |
|---|------|
| Figura 1.1. Triángulo de las Condiciones de Esfuerzos.....  | 7    |
| Figura 1.2. (a) Fractura Frágil, (b) Fractura Dúctil.....   | 9    |
| Figura 1.3. Fractura de tipo (a) Intergranular y (b) Transgranular.....                             | 11   |
| Figura 1.4. Efecto del Factor K, en la Grieta de SCC (3).....                                       | 12   |
| Figura 1.5. Fractura Intergranular en un Codo de Acero ASTM A53.....                                | 23   |
| Figura 1.6. SCC en Tanque de Acero Inoxidable AISI 304.....   | 29   |
| Figura 1.7. Formación de picaduras en Ac. Inox.....   | 30   |
| Figura 1.8. Configuraciones Recomendadas para Ensayos de<br>Deformación Constante.....              | 35   |
| Figura 1.9. Marco de Carga para Ensayo de SCC.....  | 38   |
| Figura 1.10. Máquina de Ensayo para Corrosión por Fatiga.....                                       | 39   |
| Figura 1.11. Máquina de Ensayo para Velocidad de Deformación Lenta....                              | 41   |
| Figura 2.1. Dibujo Esquemático del Mecanismo del Banco de Pruebas...                                | 55   |
| Figura 2.2. Fuerzas en Gusano y en un Mecanismo de Tornillo Sinfín.....                             | 62   |
| Figura 2.3. Factores de Superficie para Varios Acabados de Acero.....                               | 74   |
| Figura 2.4. Curvas de Sensibilidad a la muesca para aceros.....                                     | 76   |
| Figura 2.5. Dimensiones de Probetas para Ensayos.....   | 88   |
| Figura 2.6. Diagrama de cuerpo libre en 3 dimensiones para eje de<br>corona 1.....                  | 120  |
| Figura 2.7. Diagrama de Cuerpo Libre en Plano Z-X para Eje de<br>Corona 1.....                      | 120  |
| Figura 2.8. Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje<br>de la Corona 1 plano Z-X..... | 121  |
| Figura 2.9. Diagrama de cuerpo libre en plano Y-X para eje de la<br>corona 1 .....                  | 122  |
| Figura 2.10. Diagrama de fuerza cortante y momento flector para eje<br>de la corona 1 plano YX..... | 123  |
| Figura 2.11. Ciclo Invertido para el Eje de la Corona de la Primera Caja<br>Reductora.....          | 125  |
| Figura 2.12. Esfuerzo Torsor para el Eje de la Corona de la Primera Caja<br>Reductora.....          | 126  |
| Figura 2.13. Diagrama de Cuerpo Libre en 3 Dimensiones para Eje de<br>Corona 2.....                 | 131  |
| Figura 2.14. Diagrama de Cuerpo Libre en Plano Z-X para Eje de la<br>Corona 2.....                  | 131  |
| Figura 2.15. Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje                                 |      |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
|              | de la Corona 2 plano ZX.....  | 132 |
| Figura 2.16. | Diagrama de Cuerpo Libre en Plano XY para Eje de la Corona 2.....                   | 133 |
| Figura 2.17. | Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje de la Corona 2 plano XY..... | 134 |
| Figura 2.18  | Ciclo Invertido para el Eje del Eje de la Corona de la Segunda Caja Reductora.....  | 136 |
| Figura 2.19  | Esfuerzo Torsor para el Eje de la Corona de la Segunda Caja Reductora .....         | 137 |
| Figura 2.20  | Diagrama de Cuerpo Libre en 3 Dimensiones para Eje de Corona 3.....                 | 142 |
| Figura 2.21  | Diagrama de Cuerpo Libre en Plano ZX para Eje de la Corona 3.....                   | 143 |
| Figura 2.22  | Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje de la Corona 3 Plano ZX..... | 144 |
| Figura 2.23  | Diagrama de Cuerpo Libre en Plano XY para Eje de la Corona 3.....                   | 144 |
| Figura 2.24  | Diagrama de fuerza cortante y momento flector para eje de la corona 3 plano XY..... | 145 |
| Figura 2.25  | Ciclo Invertido para el Eje del Eje de la Corona de la Tercera Caja Reductora.....  | 148 |
| Figura 2.26  | Esfuerzo Torsor para el Eje de la Corona de la Tercera Caja Reductora.....          | 148 |
| Figura 2.27  | Mordaza inferior del banco de pruebas.....  | 152 |
| Figura 2.28  | Cámara de ensayo para las probetas.....   | 153 |
| Figura 2.29  | Volumen Contenido en la Cámara de Ensayo.....                                       | 153 |
| Figura 2.30  | Deformación del soporte estructural.....  | 155 |
| Figura 2.31  | Factor de Seguridad en la Estructura.....   | 156 |
| Figura 2.32  | Diagrama de Cuerpo Libre de un Perno Sometido a Esfuerzo Cortante.....              | 158 |
| Figura 2.33  | Relé térmico Siemens de 7 a 10 amp.....   | 163 |
| Figura 2.34  | Configuración Interna de la Celda de Carga.....                                     | 164 |
| Figura 2.35  | Celda de carga tipo S de 2 toneladas.....   | 166 |
| Figura 2.36  | Resistencia Eléctrica de Inmersión.....   | 167 |
| Figura 2.37  | Termostato Analógico con Bulbo.....   | 167 |
| Figura 2.38  | Tarjeta de adquisición de datos ARDUINO MEGA 2560.....                              | 168 |
| Figura 2.39  | Sensor ultrasónico Hyde Park SC9561 – 4C0.....                                      | 169 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura 2.40  | Esquema Final del Banco de Pruebas para Ensayos de Corrosión Bajo Deformación Lenta ..... | 173 |
| Figura 3.1.  | Modelado de Mesa del Banco de Pruebas.....  | 175 |
| Figura 3.2.  | Distribución de las Cajas Reductoras Sobre la Mesa de Apoyo.....                          | 176 |
| Figura 3.3.  | Instalación de Banda sobre las Poleas.....  | 178 |
| Figura 3.4.  | Limpieza de las cajas reductoras.....   | 179 |
| Figura 3.5.  | Conexión de las Cajas Reductoras por Medio de una Trasmisión por Cadena.....              | 180 |
| Figura 3.6.  | Placa de Apoyo de la Tercera Caja Reductora.....  | 181 |
| Figura 3.7.  | Conexión de las cajas reductoras a través de transmisiones por cadena.....                | 182 |
| Figura 3.8.  | Eje de Apoyo del Piñón que Mueve el Tornillo de Potencia...                               | 184 |
| Figura 3.9.  | Instalación de las Chumaceras en el Soporte de Acero ASTM A36.....                        | 185 |
| Figura 3.10. | Eje Guía para el Tornillo de Potencia.....  | 186 |
| Figura 3.11. | Desplazamiento del Tornillo de Potencia sobre el Eje Guía..                               | 187 |
| Figura 3.12. | Sujeción de la Celda de Carga.....  | 189 |
| Figura 3.13. | Marco de Cargas del Banco de Prueba .....   | 190 |
| Figura 3.14. | Cámara Experimental.....  | 192 |
| Figura 3.15. | Circuito de la fuente con 3 salidas de voltaje DC.....                                    | 194 |
| Figura 3.16. | Acondicionamiento de la señal de la celda de carga .....                                  | 197 |
| Figura 3.17. | Acondicionamiento del sensor de distancia.....  | 198 |
| Figura 3.18. | Instalación del panel de control en la estructura.....                                    | 199 |
| Figura 3.19. | Conexiones dentro del panel de control .....  | 201 |
| Figura 3.20. | Identificación del Puerto Serial.....   | 202 |
| Figura 3.21. | Ruta para comandos del programa Arduino.....  | 203 |
| Figura 3.22. | Conexión de la tarjeta Arduino.....   | 203 |
| Figura 3.23. | Código para la calibración de la celda de carga.....                                      | 204 |
| Figura 3.24. | Curva de Calibración de la Celda de Carga .....   | 207 |
| Figura 3.25. | Código para calibrar el sensor ultrasónico .....  | 209 |
| Figura 3.26. | Curva de Calibración del Sensor Ultrasónico .....   | 211 |
| Figura 3.27. | Máquina Elaborada en China para el Ensayo a Velocidad de Deformación Lenta .....          | 215 |
| Figura 4.1.  | Curva Esfuerzo vs Deformación del Acero Inoxidable AISI 304 (probeta sin muesca).....     | 224 |
| Figura 4.2.  | Curva Esfuerzo vs Deformación del Acero Inoxidable AISI 304 (probeta con muesca).....     | 225 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura 4.3.  | Microestructura Sección Transversal (200X).....   | 229 |
| Figura 4.4   | Microestructura Sección Transversal (500X).....   | 229 |
| Figura 4.5.  | Dimensiones de la Probeta Calibrada.....  | 231 |
| Figura 4.6.  | Dimensiones de la Probeta Calibrada con muesca.....                                     | 232 |
| Figura 4.7.  | Marcación de la longitud calibrada.....   | 235 |
| Figura 4.8.  | Banco experimental antes de realizar la sujeción de la probeta .....                    | 235 |
| Figura 4.9.  | Proceso de ensamblaje de la parte superior de la probeta con la celda de carga.....     | 236 |
| Figura 4.10. | Proceso de ensamblaje del tornillo de potencia con la parte inferior de la probeta..... | 237 |
| Figura 4.11. | Código para la Adquisición de Datos.....  | 241 |
| Figura 4.12. | Fuerza vs. Datos para ensayos 1-2-3 .....   | 245 |
| Figura 4.13. | Deformación vs. Datos para ensayos 1-2-3.....   | 245 |
| Figura 4.14. | Fuerza vs. Tiempo para ensayos 1-2-3.....   | 246 |
| Figura 4.15. | Deformación vs. Tiempo para ensayos 1-2-3.....  | 246 |
| Figura 4.16. | Fuerza vs. Deformación para ensayos 1-2-2.....  | 247 |
| Figura 4.17. | Fuerza vs. Datos para ensayos 4-5-6.....  | 248 |
| Figura 4.18. | Deformación vs. Datos para ensayos 4-5-6.....   | 249 |
| Figura 4.19. | Fuerza vs. Tiempo para ensayos 4-5-6.....   | 249 |
| Figura 4.20. | Deformación vs. Tiempo para ensayos 4-5-6.....  | 250 |
| Figura 4.21. | Fuerza vs. Deformación para ensayos 4-5-6.....  | 250 |
| Figura 4.22. | Fuerza vs. Datos para ensayos 7-8-9.....  | 252 |
| Figura 4.23. | Deformación vs. Datos para ensayos 7-8-9.....   | 252 |
| Figura 4.24. | Fuerza vs. Tiempo para ensayos 7-8-9 .....  | 253 |
| Figura 4.25. | Deformación vs. Tiempo para ensayos 7-8-9.....  | 253 |
| Figura 4.26. | Fuerza vs. Deformación para ensayos 7-8-9 .....   | 254 |
| Figura 4.27. | Fuerza vs. Datos para ensayos 10-11-12 .....  | 255 |
| Figura 4.28. | Deformación vs. Datos para ensayos 10-11-12.....  | 256 |
| Figura 4.29. | Fuerza vs. Tiempo para ensayos 10-11-12.....  | 256 |
| Figura 4.30. | Deformación vs. Tiempo para ensayos 10-11-12.....                                       | 257 |
| Figura 4.31. | Fuerza vs. Deformación para ensayos 10-11-12.....                                       | 257 |
| Figura 4.32. | Fuerza vs. Datos para ensayos 13-14-15 .....  | 259 |
| Figura 4.33. | Deformación vs. Datos para ensayos 13-14-15.....  | 259 |
| Figura 4.34. | Fuerza vs. Tiempo para ensayos 13-14-15.....  | 260 |
| Figura 4.35. | Deformación vs. Tiempo para ensayos 13-14-15.....                                       | 260 |
| Figura 4.36. | Fuerza vs. Deformación para ensayos 13-14-15.....                                       | 261 |
| Figura 4.37. | Fuerza vs. Datos para ensayos 16-17-18.....   | 262 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.38. Deformación vs. Datos para ensayos 16-17-18.....                               | 263 |
| Figura 4.39. Fuerza vs. Tiempo para ensayos 16-17-18.....                                   | 263 |
| Figura 4.40. Deformación vs. Tiempo para ensayos 16-17-18.....                              | 264 |
| Figura 4.41. Fuerza vs. Deformación para ensayos 16-17-18.....                              | 264 |
| Figura 5.1. Gráfica Esfuerzo-Deformación de Probeta en Medio y<br>Temperatura Ambiente..... | 278 |
| Figura 5.2. Visualización de la macrografía de las muestras ensayadas                       | 285 |
| Figura 5.3. Elongación de la probeta 1 (b) Macrografía de la fractura<br>32x.....           | 286 |
| Figura 5.4. Elongación de la probeta 4 (b) Macrografía de la fractura<br>32x.....           | 287 |
| Figura 5.5. Elongación de la probeta 7 (b) Macrografía de la fractura<br>32x.....           | 289 |
| Figura 5.6. Elongación de la probeta 10 (b) Macrografía de la fractura<br>32x.....          | 290 |
| Figura 5.7. Elongación de la probeta 13 (b) Macrografía de la fractura<br>32x.....          | 292 |
| Figura 5.8. Elongación de la probeta 16 (b) Macrografía de la fractura<br>32x.....          | 293 |
| Figura 5.9. Análisis metalográfico de las probetas.....                                     | 297 |
| Figura 5.10. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(200x).....          | 298 |
| Figura 5.11. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(500x).....          | 298 |
| Figura 5.12. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(200x).....          | 300 |
| Figura 5.13. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(500x).....          | 300 |
| Figura 5.14. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(200x).....          | 301 |
| Figura 5.15. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(500x).....          | 302 |
| Figura 5.16. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(200x).....          | 303 |
| Figura 5.17. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(500x).....          | 303 |
| Figura 5.18. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(200x).....          | 305 |
| Figura 5.19. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(500x).....          | 305 |
| Figura 5.20. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(200x).....          | 306 |
| Figura 5.21. Microestructura de la sección transversal en el centro<br>(500x)               | 307 |

Figura 5.22. Condiciones para que se produzca Corrosión Bajo Tensión 310

## ÍNDICE DE TABLAS

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Tabla 1   | Combinaciones Conocidas de Aleación-Medio que Producen Corrosión Bajo Esfuerzos.....          | 24  |
| Tabla 2   | Propiedades Mecánicas del Acero Inox. 304.....  | 48  |
| Tabla 3   | Especificaciones y Resistencias de la SAE para Pernos.....                                    | 78  |
| Tabla 4   | Propiedades Mecánicas del Acero AISI 1018.....  | 79  |
| Tabla 5   | Resultados Obtenidos de la Segunda Transmisión por Cadena.....                                | 101 |
| Tabla 6   | Resultados Obtenidos de la Segunda Caja Reductora.....  | 109 |
| Tabla 7   | Resultados Obtenidos de la Tercera Caja Reductora.....  | 110 |
| Tabla 8   | Resultados Obtenidos de la Fuerza Axial, Tangencial y Eficiencia de la Segunda Reducción..... | 115 |
| Tabla 9   | Resultados Obtenidos de la Fuerza Axial, Tangencial y Eficiencia de la Primera Reducción..... | 116 |
| Tabla 10  | Resultados Obtenidos del Eje de la Segunda Caja Reductora.....                                | 129 |
| Tabla 11  | Resultados Obtenidos del Eje de la Tercera Caja Reductora.....                                | 140 |
| Tabla 12. | Datos Obtenidos en la Calibración de la Celda de Carga.....                                   | 206 |
| Tabla 13. | Datos Obtenidos en la Calibración del Sensor Ultrasónico.....                                 | 211 |
| Tabla 14  | Costo para la Construcción del Banco de Prueba.....   | 213 |
| Tabla 15. | Resultado Ensayo de Tracción.....   | 224 |
| Tabla 16. | Resultado Ensayo de Tracción.....   | 225 |
| Tabla 17. | Resultado del Ensayo de Dureza.....   | 226 |
| Tabla 18. | Resultado del Análisis Químico.....   | 227 |
| Tabla 19. | Cantidad de Ensayos a Realizar.....   | 239 |
| Tabla. 20 | Ensayo de la Probeta sin Muesca Sometido a Temperatura Ambiente y sin Medio Corrosivo.....    | 244 |
| Tabla. 21 | Ensayo de la Probeta con Muesca Sometido a Temperatura Ambiente y sin Medio Corrosivo.....    | 248 |
| Tabla. 22 | Ensayo de la Probeta sin Muesca Sometido a Temperatura y con Medio Corrosivo.....             | 251 |
| Tabla. 23 | Ensayo de la Probeta con Muesca Sometido a Temperatura y con Medio Corrosivo.....             | 255 |
| Tabla. 24 | Ensayo de la Probeta sin Muesca Sometido a un Medio Corrosivo y sin Temperatura.....          | 258 |
| Tabla. 25 | Ensayo de la Probeta con Muesca Sometido a un Medio   |     |

|   |     |
|---|-----|
| Corrosivo y sin Temperatura.....  | 262 |
| Tabla. 26 Promedio de Resultados de los Ensayos.....  | 265 |
| Tabla. 27 Registro de Ensayos.....  | 269 |
| Tabla. 28 Resultados de Experimentos Base 1 – 2 – 3 Probetas sin<br>Muesca, a Medio y Temperatura Ambiente.....           | 270 |
| Tabla. 29 Resultados de Experimentos 7 – 8 – 9 Probetas sin Muesca,<br>con Medio Corrosivo y Temperatura 90°C.....        | 271 |
| Tabla. 30 Resultados de Experimentos 13 – 14 – 15 Probetas sin Muesca,<br>con Medio Corrosivo y Temperatura Ambiente..... | 271 |
| Tabla. 31 Resultados de Experimentos Base 4 – 5 – 6 Probetas con<br>Muesca, a Medio y Temperatura Ambiente.....           | 273 |
| Tabla. 32 Resultados de Experimentos 10 – 11 – 12 Probetas con<br>Muesca, Medio Corrosivo y Temperatura 90°C.....         | 273 |
| Tabla. 33 Resultados de Experimentos 4 – 5 – 6 Probetas con<br>Muesca, Medio Corrosivo y Temperatura Ambiente.....        | 274 |
| Tabla. 34 Propiedades Mecánicas de Probetas sin Muesca en Medio y<br>Temperatura Ambiente.....                            | 279 |
| Tabla. 35 Propiedades Mecánicas de Probetas con Muesca en Medio y<br>Temperatura Ambiente.....                            | 280 |
| Tabla. 36 Propiedades Mecánicas de Probetas sin Muesca en Medio<br>Corrosivo y A 90°C.....                                | 280 |
| Tabla. 37 Propiedades Mecánicas de Probetas con Muesca En Medio<br>Corrosivo y a 90°C.....                                | 280 |
| Tabla. 38 Propiedades Mecánicas De Probetas sin Muesca En Medio<br>Corrosivo Y Temperatura Ambiente.....                  | 281 |
| Tabla. 39 Propiedades Mecánicas De Probetas con Muesca En Medio<br>Corrosivo Y Temperatura Ambiente.....                  | 281 |
| Tabla. 40 Resultados De Propiedades Mecánicas En Diferentes Medios  | 282 |
| Tabla. 41 Resultados de las macrográficas de las probetas<br>ensayadas.....   | 295 |

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Vista Isométrica del banco de prueba

Plano 2. Vistas del banco de prueba

Plano 3. Eje-Corona de reductor 1

Plano 4. Eje-Corona de reductor 2

Plano 5. Eje-Corona de reductor 3

Plano 6. Sinfín de reductor 1

Plano 7. Sinfín de reductor 2

Plano 8. Sinfín de reductor 3

Plano 9. Cámara de Ensayos

Plano 10. Probetas

Plano 11. Elementos del banco de prueba

Plano 12. Estructura

# INTRODUCCIÓN

El desarrollo del siguiente proyecto abarca principalmente lo siguiente:

En el Capítulo 1 se describe los fundamentos teóricos de la corrosión influenciada por el medio, se describe las condiciones necesarias para que exista Corrosión Bajo Esfuerzos, se realiza una descripción de los casos típicos en los que pueda ocurrir, se analiza el mecanismo de fractura de este tipo de corrosión y se ejecuta una comparación con otros tipos de corrosión. También se mencionan las normas que se usarán en el desarrollo del presente proyecto y por último se mencionan algunos ensayos que también pueden evaluar la corrosión influenciada por el medio.

En el Capítulo 2 se hace una caracterización de las propiedades del material a ensayar, se establecen los parámetros de diseño del banco, y se realizan los cálculos matemáticos que definen las dimensiones finales de los elementos del mismo, para asegurar que el banco de prueba no presente ningún tipo de falla. Se realiza una selección de los equipos que se implementarán y se muestra un diseño más detallado de la presentación final del equipo.

En el Capítulo 3, se realiza una descripción del proceso constructivo del banco de pruebas, se detalla la conexión de los elementos electrónicos del sistema de control del equipo, se menciona sobre el acople de la cámara experimental en la estructura y se procede a realizar la calibración para la puesta a punto. También se hace un detalle del costo final de construcción, para compararlo con un banco de prueba del exterior.

El Capítulo 4 presenta el procedimiento para realizar el ensayo, muestra las dimensiones de la probeta que deberá ser usada y la implementación de los medios de ensayo. Muestra también los resultados censados por el sistema de control y las gráficas encontradas a partir de estos. Además se realizan los cálculos respectivos mencionados por norma que rige este tipo de ensayo.

En el Capítulo 5 se analizaron los resultados obtenidos después del ensayo, se encuentran las propiedades mecánicas del material, se hacen análisis metalográficos y macroscópicos de la zona de fractura y con base a esto se menciona si el acero inoxidable falló bajo la influencia de SCC.

El Capítulo 6 recoge las conclusiones obtenidas a partir del análisis de resultados del ensayo, además se presentan recomendaciones a seguir tanto

para mejorar la funcionabilidad del equipo y realizar un buen procedimiento experimental que permita encontrar información confiable.

# CAPÍTULO 1

## 1. CORROSIÓN PRODUCIDA POR LA INTERACCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

La corrosión se produce como un deterioro de las propiedades del metal debido a la interacción con el medio que lo rodea. La corrosión genera un daño enorme en el ámbito económico de un país. Por este tipo de falla se ha establecido pérdidas alrededor de millones de toneladas de metales. Es importante controlar la corrosión en las industrias, debido a que cualquier presencia de óxido puede contaminar el producto fabricado. Además si se presenta algún inicio de fractura, en algún tanque de gas, podría ocasionar algún accidente severo

Por medio del estudio de la corrosión se puede predecir el comportamiento a largo plazo del metal, basándose en ensayos relativamente cortos.

Un tipo de corrosión que se produce y que afecta a la industria, es la corrosión producida por interacción del medio ambiente (EIC), el cual es

un tema muy importante referido a la vida de diferentes metales en las instalaciones de las industrias, ya que el daño económico que pueda causar este tipo de corrosión podría ser elevado. Este tipo de corrosión (EIC), se la define como un término general para la fractura en metales y es el resultado de la acción combinada de un esfuerzo de tensión, un material susceptible y un medio ambiente agresivo. Estos factores son esenciales ya que ayudan a establecer cómo favorecen la actividad corrosiva y a su vez se los puede controlar para evitar daños en cualquier estructura. Los esfuerzos que causan EIC son a menudo debajo del límite elástico y además un aspecto importante es que la velocidad de corrosión es usualmente muy baja. Dentro de esta forma de corrosión (EIC) se encuentra: corrosión bajo esfuerzos (SCC), corrosión por fatiga (CFC) y corrosión inducida por hidrógeno (HIC).

Este capítulo empieza dando una definición de SCC y detallando como se inicia y se propaga la fractura, posteriormente se procederá a dar medidas preventivas para evitar estas formas de corrosión.

CFC se la definirá de la misma manera y se hará una comparación. HIC tendrá el mismo análisis y cada una de estas formas de corrosión se la comparará con SCC. Además se estudiará como la corrosión ataca a la industria cervecera y se hablará sobre los diferentes ensayos que se

pueden hacer para simular la corrosión producida por la interacción del medio ambiente.

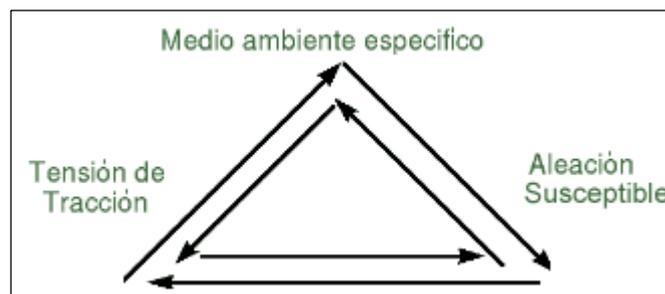
### **1.1. Características de la Corrosión Bajo Esfuerzos**

Se conoce como Corrosión Bajo Esfuerzos (SCC) a la generación de una fractura por efecto de la combinación entre un ambiente corrosivo y un esfuerzo aplicado (1). Generalmente este tipo de corrosión puede llegar a producir fallas súbitas en materiales que normalmente son considerados dúctiles bajo condiciones de cargas normales. La SCC es considerada como un tipo de falla catastrófica debido a que la superficie del metal puede mostrarse sano y brillante mientras que el interior se encuentra lleno de fracturas microscópicas.

SCC ocurre bajo la acción de ambientes químicos específicos por lo que ciertos metales, aunque hayan sido expuestos a condiciones mínimas de medios corrosivos, pueden ser rápidamente corroídos. Cabe mencionar que la presencia de temperatura hará que la corrosión se acelere y por este motivo, la SCC es comúnmente encontrado en tuberías de transporte de crudos, álabes de turbinas, recipientes a presión lo cual, debe ser un aspecto importante a considerar al momento de diseñar este tipo de sistemas.

### 1.1.1. Mecanismos de ocurrencia

Los requisitos para que exista SCC como se ilustran en la figura 1.1, se han definido como la combinación de tres factores: estar rodeado de un medio corrosivo, tener presencia de esfuerzos y un material susceptible. El ambiente corrosivo puede provenir de las diferentes condiciones de servicio en las que trabaja el material (ambientes salinos, ácidos, cloruros, etc.) mientras que los esfuerzos como ya se dijo anteriormente, pueden estar directamente aplicados sin embargo, los casos más comunes resultan de los esfuerzos residuales debido a las soldaduras, deformación en frío, mecanizados o procesos de manufactura de la pieza.



**Figura 1.1. Triángulo de las Condiciones de Esfuerzos**

La temperatura es otro factor importante a considerar debido a que ha sido demostrado que tiene una influencia directa en la formación de SCC. Por lo general, altas temperaturas conjunto a tipos

específicos de medio, pueden llegar a hacer que un metal falle aunque éste pueda operar sin complicaciones cuando se encuentra trabajando a uno de estos dos factores por separado.

### **1.1.2. Iniciación de la Fractura**

Es estudio de las distintas formas en las que un material puede fracasar, se ha convertido en un factor de mucha importancia. El análisis del comportamiento que tienen los materiales sometidos a diferentes condiciones de trabajo ha tenido el desarrollo de diferentes estudios. El tipo de falla que cualquier material puede presentar está relacionada con el origen del mismo. Una de las dificultades primordiales es la falla producida por una fractura.

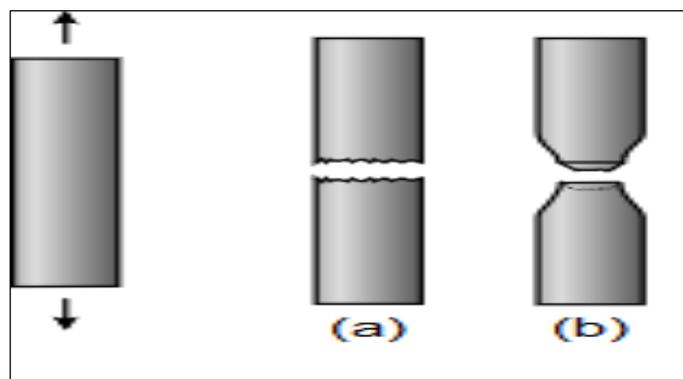
Se puede definir a una fractura como la separación de un sólido bajo la acción de una carga externa. El tipo de fractura que sufren los materiales se las puede dividir en dos grupos:

- a) Fractura frágil
- b) Fractura dúctil

En algunas ocasiones se pueden presentar ambas fracturas en el mismo material, pero por lo general son totalmente frágiles o totalmente dúctiles.

Una **fractura dúctil** ocurre cuando un material sufre una deformación plástica excesiva por lo que se obtendrá una elongación considerable y a su vez una formación de cuello de botella en el área fracturada, lo que origina una reducción en su área transversal. Además en este tipo de fractura la carga máxima no será la de rotura, esto se debe a que el material se deforma plásticamente hasta alcanzar su carga máxima, para luego ceder hasta su carga de fractura.

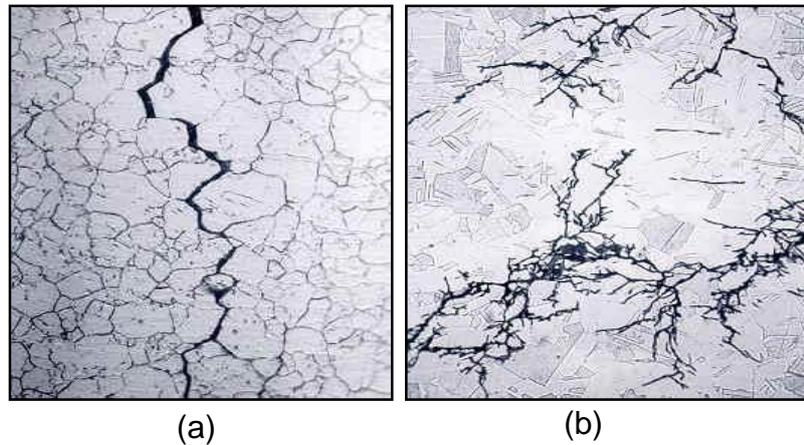
Cuando se origina una fractura con una deformación que no es apreciable se denomina **fractura frágil**, la cual se presenta a temperaturas muy bajas por el motivo de que no se presenta ningún tipo de movimiento atómico cuando están a estas temperaturas, por lo que se evita una deformación plástica y a su vez debe existir un esfuerzo muy elevado. Estos tipos de fractura se muestran en la figura 1.2.



**Figura 1.2. (a) Fractura Frágil, (b) Fractura Dúctil**

### 1.1.3. Propagación de la Fractura.

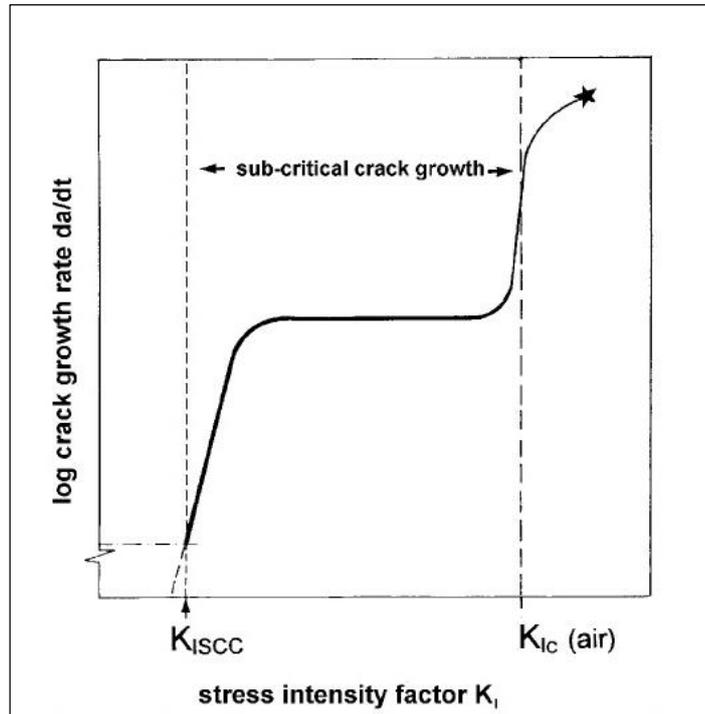
La microestructura de un metal que sufrió SCC demuestra que las grietas son siempre normales a la dirección del esfuerzo principal y también que esta falla puede tener una morfología intergranular y transgranular (2) aunque estas últimas se presentan en menor cantidad. En las primeras tipos de fallas, la grieta puede seguir a lo largo de los bordes de grano como se muestra en la figura 1.3 (a). Las fallas intergranulares indican una zona no homogénea en los bordes de grano producida por generación de sulfuros o fósforos además da mayor confianza de que la corrosión ha sido influenciada por los esfuerzos ya que, los metales que fallan de esta forma, son los que frecuentemente presentan poca evidencia de corrosión intergranular cuando no existe presencia de esfuerzos. Una falla transgranular es la que no se guía por los bordes de granos y más bien, atraviesa éstos dando como resultado, su característica forma de rayo como se muestra en la figura 1.3 (b).



**Figura 1.3. Fractura de tipo (a) Intergranular y (b) Transgranular**

Se supone que las fallas producidas por SCC son del tipo frágiles y por tanto, se usa la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (LEFM) la cual, establece una relación entre la velocidad de la propagación de la grieta y el factor de intensidad del esfuerzo en la grieta ( $K$ ). Este factor indica el estado de esfuerzos en los alrededores de la punta de la grieta y la fuerza mecánica que está controlando la iniciación y extensión de la abertura.

Estudios posteriores (3) han comprobado que existen relaciones únicas entre los factores  $K$  y la velocidad de propagación de la grieta para cada combinación de material-medio. Un diagrama típico es mostrado en la figura 1.4.



**Figura 1.4. Efecto del Factor K, en la Grieta de SCC**

De este gráfico se puede notar tres áreas claramente definidas las cuales indicarán el comportamiento y la dependencia de la velocidad de rotura en el metal sometido a SCC. En la parte axial se tiene los factores de intensidad K, donde el valor mínimo se lo define como umbral de Corrosión Bajo Esfuerzos  $K_{ISCC}$  el cual indica el nivel de esfuerzos en la primera fractura que puede ser medible. Una vez pasado este factor, se nota una dependencia directa de la velocidad de formación de grieta con el factor K. A continuación se nota que la velocidad de deformación pierde la relación directa con la variable K, en esta región, los procesos

electroquímicos producidos por la corrosión del metal son los únicos que rigen la formación de la grieta y la forma de la curva. Después la gráfica muestra una segunda dependencia de la formación de la grieta hasta llegar a un valor límite  $K_{Ic}$  que es la intensidad de los esfuerzos que sintiera la probeta si estuviera sometido a condiciones normales como el aire. Una vez pasado este punto, la ruptura netamente mecánica domina el comportamiento de la gráfica.

#### **1.1.4. Acciones preventivas para evitar este tipo de corrosión**

Habiendo ya conocido los casos probables donde se puede presentar la SCC y las consecuencias que puede generar, es preciso conocer métodos que ayuden a prevenir sufrir este tipo de corrosión. Una de las principales formas de prevenir SCC es el correcto control de posibles esfuerzos residuales que se tenga en estos metales. Es inevitable tener este tipo de esfuerzos y en algunos casos, las cargas dejadas por el proceso de manufactura del material son suficientes para la producción de SCC. Es conveniente realizar un correcto alivio de esfuerzos por medio de tratamientos térmicos como el recocido, el cual es ideal para aceros al carbono pero no son lo suficientemente buenos para el caso de aceros inoxidable austeníticos. En el caso de tener estructuras

muy grandes, realizar tratamientos térmicos en las áreas cercanas a los cordones de soldadura o en otras áreas críticas representaría una buena ayuda. Ha sido comprobado que las pruebas hidrostáticas también aportan con algo en la reducción de esfuerzos residuales, así como los procesos de tratamiento superficial como los granallados y arenados. La uniformidad de estos tratamientos es importante ya que una aplicación no homogénea puede empeorar la situación.

Otro método de prevención es la correcta selección del material. En el proceso de diseño, se debe tener en cuenta al tipo de ambiente en que va a estar sometido el metal y por tanto, es conveniente no escoger materiales que han sido comprobados a sufrir SCC en determinado medio. Los aceros inoxidable en ambientes ricos en cloruro forman una combinación que muy probablemente resultará en formación de SCC, el diseñador necesitará determinar si es correcta la selección de acero inoxidable o si es el caso, usar otro material con mayor resistencia a la corrosión en este tipo de ambientes. Otra alternativa de prevención puede ser el control del medio corrosivo, esta es una opción poca veces usada ya que la necesidad de la presencia de un medio corrosivo específico es debida al tipo de trabajo que se está realizando.

## **1.2. Corrosión Producida por Fatiga en Metales**

La fatiga mecánica en materiales es producida cuando existe la aplicación de tensiones cíclicas sobre un material. Estas tensiones generan esfuerzos de tracción y compresión sobre el elemento lo cual, después de llegar a cierto número de ciclos, generan grietas que luego producirán fallas.

La corrosión por fatiga ocurre cuando además de la aplicación de tensiones cíclicas también existe la presencia de un medio corrosivo sobre el material, lo que genera un efecto conjunto que generalmente termina en la reducción de la cantidad de ciclos de tensión necesarios para que se produzca la fractura de la probeta.

### **1.2.1. Daños ocasionados y nivel de ocurrencia**

La regularidad de la aplicación de esfuerzos es importante ya que, a una baja frecuencia el metal tiene mayor tiempo de exposición al medio corrosivo mientras que las altas, se disminuye el efecto de la corrosión.

La corrosión producida por el medio influye en la disminución de la resistencia a la fatiga del acero debido a que, los pequeños agujeros producidos por la corrosión se portan como concentradores de esfuerzos además, ha sido comprobado que las

grietas se originan a partir de estas hendiduras. Este tipo de falla es transgranular y no muestran las ramificaciones típicas encontradas en las fisuras que progresan a través de los bordes de grano del material.

Casos típicos de la corrosión por fatiga se da en las tuberías de vapor de las calderas. El material de estas tuberías es acero al carbono y es común encontrar residuos de corrosión en las grietas que se van formando al paso de los años de servicio. Otro caso común de corrosión por fatiga se da en las tuberías enterradas que transportan gas natural, las cuales sufren esfuerzos fluctuantes en las zonas cercanas a las estaciones de compresión.

### **1.2.2. Diferencias con corrosión bajo esfuerzos**

A pesar de que la corrosión bajo esfuerzos y la corrosión por fatiga coinciden en ciertos aspectos tales como: la producción de una rotura frágil en materiales comúnmente dúctiles, fracturas perpendiculares a la dirección del esfuerzo principal y la necesidad de la aplicación de fuerzas tensoras para que exista este fenómeno; sin embargo las diferencias encontradas entre estos tipos de corrosión son muy concretas: la corrosión por fatiga no necesita

esfuerzos mínimos o agentes corrosivos específicos caso contrario de lo que ocurre en la Corrosión Bajo Esfuerzos.

Otra diferencia se la puede encontrar examinando las grietas de estos dos tipos de corrosión. La Corrosión Bajo Esfuerzos generalmente fallará más rápido que la corrosión por fatiga además, se encontrará una cantidad menor o casi nula de residuos de corrosión en las fracturas.

### **1.3. Incidencia de Corrosión por Hidrógeno**

La corrosión por inducción de hidrógeno (HIC) es la cual, se produce una fractura mecánica debido a la penetración y difusión de átomos de hidrógeno en la estructura cristalina de las aleaciones metálicas.

Debido a la necesidad de la presencia de hidrógenos para que este fenómeno ocurra, es común encontrar este tipo de corrosión en la industria petrolera. El ácido sulfhídrico es común encontrar en el proceso de extracción del crudo, y es su presencia la que causa numerosos casos de corrosión en diferentes puntos operativos de esta. Este tipo de problemas son los principales motivos por los cuales se ha desarrollado normas y ensayos para la comprobación de la resistencia de materiales a este medio como.

Es común encontrar este tipo de corrosión en tuberías de transporte de crudo y en los techos de tanques de almacenamiento de combustible. También existe en otro tipo de industrias donde está presente el hidrógeno como en el caso de la nuclear. Este tipo de corrosión es reversible y es recomendado el uso de la temperatura en zonas afectadas por HIC para la remoción de átomos de hidrógeno de la estructura del material.

### **1.3.1. Requisitos Principales para la Fractura**

El principal requisito es la presencia de átomos de hidrógeno. Estos átomos pueden provenir del desprendimiento de las moléculas de agua y de soluciones ácidas. También pueden provenir de diferentes procesos de manufactura o aplicaciones, los procesos de protección catódica, decapados y galvánicos también generan este tipo de corrosión.

La fractura se produce cuando un átomo de hidrogeno es inducido dentro de la estructura cristalina del metal en especial, los de morfología BCC (Estructura cúbica centrada en el Cuerpo) como lo son las diferentes aleaciones de hierro. Los aceros del tipo FCC (Estructura cúbica centrada en las Caras) como los inoxidables y aleaciones de cobre, aluminio y níquel son menos propensos a

sufrir HIC debido a su alta ductilidad y la poca capacidad de difusión de átomos de hidrógeno.

Cuando estos átomos se combinan en los pequeños vacíos de la matriz del metal, comienzan a formar moléculas de hidrógeno que producen presiones desde la cavidad en la que se encuentran. Estas presiones pueden llegar a niveles tan altos a tal punto que desgastan la ductilidad y resistencia a la tracción del metal y provocan su fractura.

Las fracturas producidas por HIC pueden ser del tipo intergranular y transgranular y regularmente constan de puntas finas y ramificaciones. Se han propuesto diferentes mecanismos de falla como la presión de hidrógeno que se describió anteriormente. Otros mecanismos propuestos son la adsorción de hidrógenos en la superficie, descohesión de lazos moleculares y un mejoramiento de fluencia plástica.

### **1.3.2. Comparación con Corrosión Bajo Esfuerzos**

Al comparar los dos tipos de corrosión se nota que en ambos casos, producen una fractura frágil de un material dúctil bajo la acción de un medio corrosivo y la aplicación de fuerzas. Una

diferencia es que la polarización catódica aumenta la HIC mientras que en la SCC la disminuye o prácticamente la inhibe.

Revisando la morfología de las fracturas, se dará cuenta que en general son bastantes similares sin embargo, sí se puede describir algunas diferencias como la fragilidad de las grietas de HIC. Además estos tipos de grietas son mucho más veloces que las de SCC y también presentan más ramificaciones. Otra comparación es la de que las fracturas de HIC son mayormente transgranulares que intergranulares como era en el caso de las SCC.

Se puede encontrar diferencias al comparar también los métodos de activación necesarios para que las corrosiones aparezcan. La presencia de SCC es dependiente del tipo de ambiente en la que se encuentre, siendo más proclive para ciertos medios y menos para otros. En el caso de HIC es suficiente que el medio contenga átomos de hidrógeno para que ocurra. Esta corrosión también ha sido vista en metales de mayor pureza algo que no es frecuente en la Corrosión Bajo Esfuerzos, debido a que estos no se presentan en metales puros.

El efecto de la temperatura también es una característica comparable. Los mecanismos de fallas por HIC son encontrados a

temperatura ambiente, mientras que los de SCC toman control de la velocidad de formación de la grieta a mayores temperaturas. Esto quiere decir que a temperatura ambiente la HIC va a estar presente mientras que, a temperaturas más altas, el tipo de corrosión anterior dejará de actuar y la fractura solo se dará por efecto de la SCC.

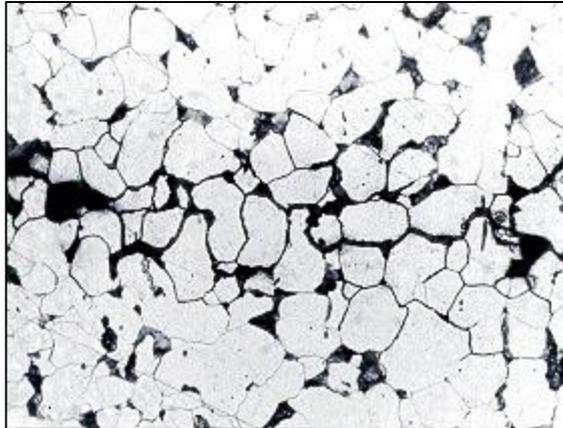
#### **1.4. Daños Típicos Asociados a los Materiales en Servicio Atacados por Corrosión Bajo Esfuerzos**

Históricamente (4) los primeros casos de SCC fueron vistos en cartuchos de latón los cuales habían sido conformados en frío. Estos latones operaban en ambientes amoniacaes acuosas y aparecían con mayor frecuencia en las épocas con mayor humedad del año por tal razón, a este tipo de corrosión se la conocía como corrosión estacional.

Tomando en cuenta los requisitos necesarios para producir la SCC, se la podría encontrar en la mayoría de aplicaciones a nivel industrial. Combinaciones conocidas como las de cloruros-aceros inoxidables austeníticos, cáusticos-aceros al carbono y amoniaco-aleaciones de cobre son proclives a desarrollar este tipo de corrosión. Siendo la industria petrolera rica en ambientes químicos

agresivos, la SCC es una de las principales forma de falla de los equipos de planta, pudiendo a llegar hasta el 25% de los casos encontrados (5). Esto y el desconocimiento de las medidas a implementar necesarias para combatir este tipo de corrosión en materiales en servicio resultan en una combinación peligrosa para esta industria.

Como muestra (6) de una falla típica de SCC se propone la falla de un codo tubería de 8" en acero ASTM A53 grado B. Este codo trabajaba con soda caustica en un planta de refinamiento de gas y tanto él como el equipo con el que funcionaba no habían sido aliviados de esfuerzos. La falla se supuso que se debía a la soldadura ya que, mostraba grietas transversales en la zona afectada por el calor. Al realizar un estudio de las fallas se pudo notar que estas grietas se dividían en ramificaciones las cuales se propagaban intergranularmente a través del metal como se muestran en la figura 1.5. El análisis químico demostró que éste era un acero de bajo carbono (0.11%C) y además, encontró altos niveles de oxígeno y sodio. Esto indicaba que los huecos hechos por la fisura fueron rellenadas por productos de corrosión y la presencia del sodio confirmaba el efecto de los residuos de la soda caustica en la formación de SCC.



**Figura 1.5. Fractura Intergranular en un Codo de Acero ASTM A53**

Otro tipo de industria sensible a SCC es la de generación de energía. Muchos casos de fallas en los álabes de turbinas han sido atribuidos a este tipo de corrosión. Las grietas producidas se encuentran en varias partes del mecanismo como en las bases, cubiertas y soportes de la turbina. Debido a que el vapor que golpea a los álabes muchas veces suele contener impurezas que pueden ser derivadas ya sea del condensador, caldera o de una incorrecta desmineralización del agua, se solidifican en soluciones acuosas las que generan un ambiente agresivo generalmente formado por Na, Fe, Cu, Si,  $PO_4$ , entre otros que conjunto a esfuerzos producidos por el propio funcionamiento de la turbina, genera la formación de corrosión por picaduras y SCC.

En fin, la corrosión bajo esfuerzos se puede presentar en diferentes casos donde se cumplan las condiciones anteriormente expuestas, numerosos estudios se han realizado para identificar casos típicos de SCC y algunos de estos se los menciona en la tabla 1 la cual, es construida a partir de datos expuestos por ASM Metal Handbook (7).

**TABLA 1**  
**COMBINACIONES CONOCIDAS DE ALEACIÓN-MEDIO QUE**  
**PRODUCEN CORROSIÓN BAJO ESFUERZOS**

| <b>Aleación</b>                        | <b>Medio</b>  | <b>Temperatura</b>          |
|--|---|-----------------------------|
| Acero<br>Inoxidable<br>Austeníticos    | Soluciones calientes de ácido clorhídrico como<br>MgCl <sub>2</sub> y BaCl <sub>2</sub> NaCl <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O <sub>2</sub><br>Agua de mar<br>Soluciones causticas concentradas<br>Vapor condensado de aguas de cloruros                | 60°C – 200 °C<br><br>>120°C |
| Aceros<br>Inoxidables<br>Ferríticos    | H <sub>2</sub> S, NH <sub>4</sub> Cl, NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> , hipocloritos. (Resistente a la mayoría de medios si están libres níquel pero podrían fallar por otros modos de corrosión en el mismo ambiente)                                |                             |
| Aceros<br>Inoxidables<br>Dúplex        | Susceptible a los mismos medios que los aceros inoxidables austeníticos pero más resistentes. (Inmune a SCC intergranular en ácidos tetra iónicos. Además tienen mayor resistencia a otras formas de corrosión que los aceros inoxidables ferríticos) |                             |
| Aceros<br>Inoxidables<br>Martensíticos | Soluciones Cáusticas NaOH. (Resistentes a SCC en cloruros calientes. Susceptibles a corrosión por Hidrógeno)  |                             |

## Continuación de Tabla 1

| Aleación                                 | Medio   | Temperatura   |
|--|---|---|
| Aceros al Carbono                        | Soluciones Cáusticas NaOH.<br>Soluciones NaOH – NaSiO <sub>2</sub><br>Soluciones cálcicas, amónicas y de nitrato de sodio.<br>Ácidos mezclados (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – HNO <sub>3</sub> )<br>Soluciones HCN, soluciones acidificadas H <sub>2</sub> S<br>Agua Marina<br>Soluciones CO/CO <sub>2</sub> | >50°C<br>>255°C<br>Ebullición<br><br>Calientes<br><br>Todas |
| Aleaciones de Níquel-Cr-Fe 600, 800, 690 | Soluciones de cloruros a altas temperaturas, factores agraviantes: pH < 4, especies oxidadas tal como oxígeno disuelto, H <sub>2</sub> S, Azufre libre<br>Soluciones alcalinas cáusticas  | >205°C<br><br>315°C   |
| Aleaciones Ni-Cu Monel 400               | Soluciones acidas fluorhídricas<br>Ácidos Hidrofluóricos<br>Ácidos Hidrofluosilícicos<br>Susceptibles cuando están trabajados en frío.  |   |
| Aleaciones de Níquel 200, 201            | Soluciones Cáusticas alcalinas  | 290°C   |
| Aleaciones de Cobre-Zinc > 15% Zn        | Vapores de amonía en agua<br>Aminas en agua<br>Nitritos en agua<br>Agua, Vapor de agua<br>Soluciones de nitritos<br>Algunas soluciones con sulfatos   |   |
| Aleaciones de aluminio                   | Aire con vapor de agua<br>Agua potable<br>Agua del mar<br>Soluciones NaCl<br>Soluciones NaCl – H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  |   |
| Aleaciones de titanio                    | Ácido nítrico fumante rojo<br>Sales calientes, fundidas<br>N <sub>2</sub> O <sub>4</sub><br>Metanol   | >260°C<br>30 – 75°C   |

### **1.5. Problemas de Corrosión en la Industria Cervecera**

Las cervecerías son otra de las industrias donde la SCC es una de las grandes causas de fallas y fracturas en los equipos que componen su proceso de producción.

Debido a que el producto es de tipo alimenticio, ésta industria depende mucho del uso de aceros inoxidable austeníticos en los diferentes puntos de producción de la cerveza como por ejemplo: tanques de almacenamiento, tanques de presión, filtros, mallas, silos, etc. Existen también el uso de otros materiales como aceros al carbono y aleaciones los cuales, cumplen los requisitos antes mencionados para la existencia de Corrosión Bajo Tensión por tanto, ésta se puede presentar en varios puntos y puede llegar a causar fallas críticas y paros por mantenimiento no programados las que se traducen en incumplimiento de metas de producción, compra de repuestos y perjuicios económicos.

Hay muchos ejemplos reales de SCC que se producen en fábricas de cerveza, entre estos (8): la superficie interior o exterior de tanques y tuberías de agua caliente. Una fábrica de cerveza experimentó una falla de SCC en un tanque de agua caliente diseñado con acero inoxidable 304 después de solo 2.5 años de servicio. El agua contenía 300 ppm de cloruro y operaba a 175 °F

(79°C). Además se ha presenciado fallas en las ollas de maceración, la incidencia de este tipo de falla es más común en las cervecerías más grandes donde se utiliza el equipo de manera casi continua. La fuente de cloruro en estos fracasos es generalmente el aislamiento, que se humedece por una fuga en la superficie de la olla de maceración.

En los tanques y tuberías que contienen complementos líquidos como el almidón de maíz hidrolizado con frecuencia contienen cloruro y normalmente se almacenan en caliente para permitir el bombeo.

Por desgracia, la primera señal de SCC puede ser el fracaso del tanque o tubería completa. Si se detecta las grietas o pequeñas fugas, será tentador reparar estas manifestaciones aparentemente menor mediante soldadura. Pero resolver el problema de esta manera será perjudicial, ya que se aumentará la cantidad de grietas en el material afectado por SCC.

Una vez que este tipo de corrosión está presente en el metal no existe un método para revertir el proceso. La mejor manera de resolver los problemas causados por SCC es reemplazar la totalidad o parte de los equipos afectados. Si se conoce la causa de la falla, entonces las condiciones que conducen a la corrosión

deben ser eliminadas o se deberá utilizar un material más resistente a la SCC.

Como se mencionó anteriormente, el aislamiento destinado a las aplicaciones en caliente debe estar libre de cloruro. Se debe asegurar que el agua no esté en contacto con el aislamiento. Por lo general un tanque de agua caliente se encuentra en un área que se limpia con una manguera, se deberá colocar una cubierta exterior totalmente soldada para mantener el agua lejos del aislamiento. Desafortunadamente, muchas camisas exteriores están remachadas en lugar de soldarse y los remaches no realizan la función de impedir el contacto con el agua.

Si el contacto corrosivo no se puede quitar, se tendrá que aceptar el hecho de que algunos tanques deberán ser reemplazados después de una vida útil limitada. Cuando se realizan estas sustituciones, el jefe encargado del área tendrá la oportunidad de seleccionar un acero más resistente como por ejemplo: el acero inoxidable 316, el acero dúplex 2205, el acero inoxidable ferrítico AISI 444 o el acero austenítico tipo AL-6XN. Estos materiales se los mencionará en la sección 1.5.2.

### 1.5.1. Aceros inoxidable

Como se mencionó anteriormente, los aceros inoxidable son muy usados en este tipo de industria y conjunto a agentes corrosivos que se encuentran comúnmente en cervecerías como los cloruros, sodio y oxígeno hacen muy probable que se presente la Corrosión Bajo Esfuerzos. En la figura 1.6 se muestra un ataque de corrosión a un tanque de acero inoxidable AISI 304 usado para almacenamiento de agua caliente, en él se puede notar ataques corrosivos típicos como lo son fracturas, picaduras, y resultados de depósitos de corrosión.

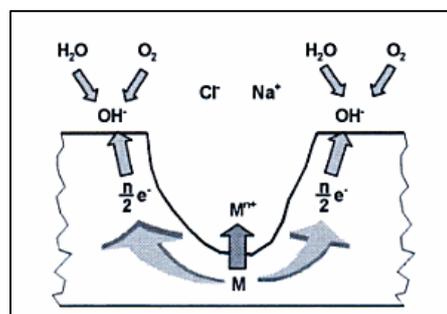


**Figura 1.6. SCC en Tanque de Acero Inoxidable AISI 304**

Los cloruros pueden provenir vía sales que son introducidas a lo largo del proceso, sin embargo la fuente más común es la de los aislamientos térmicos que se encuentran recubriendo a los tanques de maceración y de fermentación. Cuando estos materiales entran en contacto con el agua, los cloruros suelen disolverse y

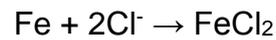
depositarse en la superficie metálica de los tanques los cuales producen zonas donde existe una alta concentración de un ambiente corrosivo y que da paso, a la formación de picaduras, corrosión bajo tensión y corrosión por influencia de hidrógeno.

La formación de picaduras se origina por un ataque de las moléculas de cloro a la capa protectora de óxido de cromo que rodea a la superficie del metal. Estas moléculas generan puntos donde el metal se encuentra desprotegido lo cual permite el paso de ciertos aniones que reaccionan con el metal permitiendo la formación de cloruros convirtiéndose ésta en una zona anódica. La migración de electrones provenientes de la picadura hacia la superficie del metal hace que se vuelva una zona catódica la cual, no se corroe (9). En la superficie del metal, parte de los iones metálicos reaccionan dando a formar hidróxidos e iones de hidrógeno como se muestra en la figura 1.7.



**Figura 1.7. Formación de picaduras en Ac. Inox.**

Las reacciones químicas que indican la formación de los productos de corrosión cuando se producen picaduras se presentan a continuación:



La corrosión producida por efecto de la soda cáustica, se origina cuando existe aglomeración de hidróxido de sodio en el metal ya sea por el almacenamiento de ésta sustancia, residuos de operaciones de limpieza de interior de los tanques o depósitos en válvulas, empaques u otros elementos que se encuentran en contacto.

Las industrias Cerveceras utilizan habitualmente pocos tipos de aceros inoxidable. La aleación de acero más común es el AISI 304 y contiene al menos 18% de cromo, 8% de níquel y no más de 0,08% de carbono, 2% de manganeso, 1% de silicio, 0,045% de fósforo y 0,03% de azufre. El Níquel promueve la estabilidad de la austenita, ayuda a la formación de película pasiva y aumenta la tenacidad, ductilidad y facilidad de soldadura.

Otro tipo de material que se usa es el acero inoxidable AISI 316 contiene al menos 16% de cromo, 10% de níquel y 2% de molibdeno y no más de 0,08% de carbono, 2% de manganeso, 1% de silicio, 0,045% de fosfato y 0,03% de azufre. La diferencia más notable entre 304 y 316 es el molibdeno. El acero inoxidable AISI 316 es aleado con molibdeno para mejorar la resistencia a la corrosión bajo esfuerzos, aunque el AISI 304 es el que más se utiliza por la facilidad de encontrarlo en el mercado y por el bajo costo comparado con los demás.

Casi todos los aceros austeníticos están disponibles en los llamados "grados L". Los grados L, por ejemplo 304L y 316L, contienen no más de 0,03% de carbono. El contenido de carbono del acero inoxidable efectúa un fenómeno conocido como "sensibilización". En ciertas temperaturas altas, carburos ricos en cromo se forman en aceros inoxidables que contienen carbono. Esta sensibilización agota el contenido de cromo del acero que rodea por lo que es susceptible a ciertos tipos de corrosión. Este fenómeno puede ocurrir durante la producción de acero, soldadura o en los aceros utilizados para servicio de alta temperatura. Cuando es causada por la soldadura, se conoce como "decaimiento de soldadura" y el área alrededor de la soldadura se conoce como la

"zona afectada por el calor." Aceros bajos en carbono impiden efectivamente la sensibilización. Aleaciones regulares afectadas por la sensibilización pueden ser recocidas para disolver el carburo para después enfriarla rápidamente.

### **1.5.2. Otras aleaciones**

Existen aleaciones de acero inoxidable que son resistentes a la corrosión bajo esfuerzos. Como se mencionó anteriormente estos son:

El acero Dúplex 2205 es una aleación con una excelente resistencia a SCC. Estos aceros contienen 22% de Cr, 3% de Mb y 0.17% de nitrógeno, entre otros. El contenido de cromo, níquel y molibdeno le confiere una gran resistencia a la corrosión uniforme, por picadura y grietas en ambientes con alta concentración de cloruros. Es muy superior al acero inoxidable 316. Estos aceros combinan una resistencia mecánica elevada con una buena resistencia a la corrosión.

La aleación AL-6XN es una aleación de acero inoxidable súper austenítica baja en carbono, de alta pureza. Este material fue diseñado para ser un material resistente al agua de mar y a una amplia variedad de entornos muy corrosivos. La alta dureza y

resistencia a la corrosión hace de este material una mejor elección respecto al Dúplex y una alternativa más rentable a las aleaciones de Níquel, en aquellas aplicaciones donde su excelente conformabilidad, soldabilidad, dureza y resistencia a la corrosión son importantes. El alto nivel de Níquel y Molibdeno le proporcionan alta resistencia a la rotura por corrosión en entornos clorados. El Cobre ha sido intencionalmente rebajado a un nivel residual para mejorar el comportamiento en agua de mar.

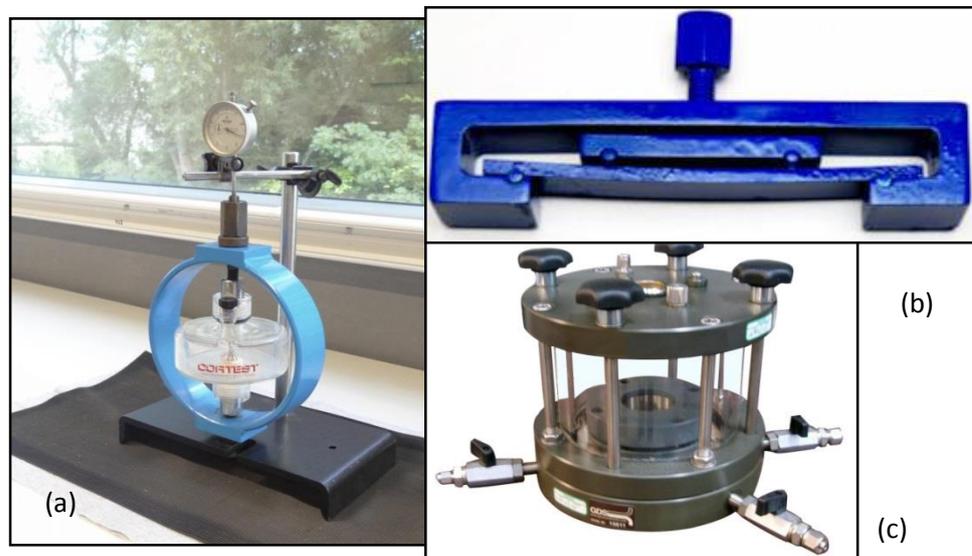
El acero inoxidable ferrítico AISI 444 tiene una excelente resistencia a SCC como la mayoría de los ferríticos y contiene 1.75% de molibdeno para mejorar la resistencia a la corrosión por picaduras.

#### **1.6. Ensayos para Evaluar la Corrosión Influenciada por el Medio.**

Para nombrar los ensayos empleados en la evaluación de las diferentes formas de corrosión se debe recapitular los tipos de carga que existen en cada una de las formas de corrosión antes mencionadas por ejemplo, para la Corrosión Bajo Tensión y Corrosión por Inducción de Hidrogeno, la carga va a ser del tipo constante mientras que para la Corrosión por Fatiga, los esfuerzos sobre el material deben ser del tipo fluctuantes.

### 1.6.1. Por deformación constante

Los ensayos de este tipo son usados regularmente para analizar SCC debido a que proveen información sobre el tiempo necesario para fracturarse un espécimen sometido a una deformación constante usando las configuraciones mostradas en la figura 1.8.



**Figura 1.8. Configuraciones Recomendadas para Ensayos de Deformación Constante**

Para una configuración tipo U, se deformará una barra de acero plásticamente por un mandril y a su vez, es mantenido en esa posición por la constricción de un tornillo que atraviesa a la barra por sus extremos. Este tipo de configuración resulta en una forma útil de caracterizar la resistencia de un material bajo acción de un ambiente específico aunque cuenta con ciertas limitaciones

experimentales ya que, la distribución de esfuerzos en la probeta es desconocida. Además es imposible replicar la condición de esfuerzos entre especímenes y peor aún, los esfuerzos que se encuentran en condiciones de operación. Este tipo de ensayo se encuentra regulado bajo la norma ASTM G50.

Otro tipo de configuración es la del tipo C como se muestra en la figura 1.6. (a). Este es un ensayo versátil, económico y proporciona una información cuantitativa de la sensibilidad a la SCC de diferentes materiales además de ser muy útil cuando se quiere caracterizar esfuerzos transversales en un espécimen. Este ensayo consta de un perfil circular o rectangular de acuerdo a la aplicación que se quiera replicar, y una aplicación de esfuerzos en sus extremos mediante la acción de apretar un tornillo. Para una aplicación más precisa de fuerzas, es conveniente tener este tornillo graduado. La medición de la deformación se la realizará por medio de unos extensómetros que variarán su resistencia. Este tipo de ensayos están regulados bajo la norma ASTM G38.

La configuración mostrada en la figura 1.6. (b) muestra una viga deformada en la cual, va a ser posible calcular los esfuerzos en las fibras exteriores de ésta. La información proporcionada por esta configuración es la del tiempo hasta la aparición de grietas en la

viga doblada y sumergida en un ambiente específico. Este tiempo es el que indica la resistencia a la Corrosión Bajo Tensión con las condiciones usadas. Este ensayo se encuentra regulado por la norma ASTM G39.

Por último se encuentra la configuración que indica la figura 1.6. (c). Esta es una configuración la cual dará una información mucho más precisa que las anteriores. Consiste en un marco de cargas en la cual se aplicarán esfuerzos axiales a una probeta calibrada, este ensayo también permite la elección del tipo y el nivel de esfuerzo que se puede aplicar en la prueba.

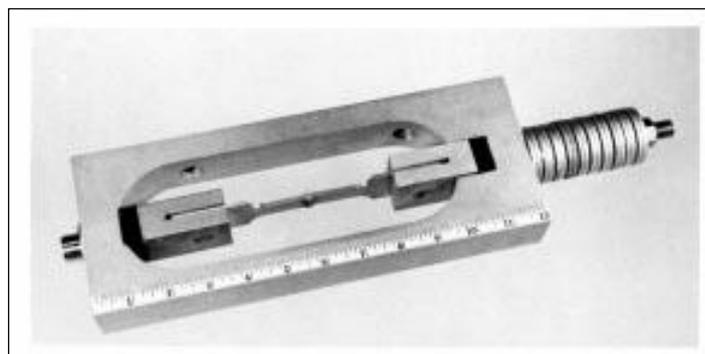
En este tipo de ensayo existen diferentes formas en los que se ejercerán cargas sin embargo, la norma menciona exactamente a 3 tipos: carga constante, deformación constante y esfuerzo continuamente creciente. Es responsabilidad del ensayista de escoger la carga y el tipo de probeta que mejor modele la aplicación deseada. Este tipo de configuración se rige por la norma ASTM G49.

### **1.6.2. A carga constate**

Los ensayos a carga constante son los que mejor replican las condiciones de carga en las que se encuentran operando. La forma

más sencilla de aplicación de carga se la puede hacer conectando un peso calibrado a un extremo de la probeta el cual generará un fuerza axial sobre ésta, el cuidado que hay que tener en que la carga sea correctamente aplicada al centro de la probeta para evitar fuerzas excéntricas y pandeo sobre la probeta.

La aplicación de un peso muerto en extremo hace que las máquinas de ensayos se vuelvan muy grandes y la aplicación de cargas calibradas no lo vuelven muy prácticas en ensayos de laboratorio, debido a estas inconveniencias se han desarrollado sistemas como los mostrados en la figura 1.9, la carga constante la aplica un resorte con un anillo. La tensión se va aumentando al apretar la tuerca del tornillo y se la va determinando mediante la medición del diámetro de resorte. También se pueden usar prensas hidráulicas para la aplicación de carga constante en las probetas.



**Figura 1.9. Marco de Carga para Ensayo de SCC**

### 1.6.3. Corrosión por fatiga

Los ensayos para comprobar este tipo de corrosión consisten en someter a tensión axial una probeta cilíndrica mientras se le aplican esfuerzos alternantes por medio de rotación de la probeta por acción de un motor. Para tener una mejor simulación de condiciones de trabajo normales, se puede realizar este ensayo sumergiendo la probeta en un ambiente corrosivo a elección. Un ejemplo de máquina de ensayo se encuentra en el laboratorio de la facultad como lo muestra la figura 1.10.



**Figura 1.10. Máquina de Ensayo para Corrosión por Fatiga**

El resultado de este ensayo será una curva de intensidad de esfuerzos cíclicos vs el número de ciclos hasta la rotura. Una gráfica común es la del tipo sinusoidal donde los puntos máximos

de la curva serán los valores de compresión y tensión máximos en los que estará sometida la probeta.

#### **1.6.4. A Velocidad de Deformación Lenta**

Este tipo de ensayo es usado para comprobar la vulnerabilidad de un material a ser corroído por SCC. Si bien para que exista esa corrosión es necesario que haya una aplicación constante de carga, se ha realizado una modificación a este principio haciendo que la velocidad de deformación sea muy lenta (aproximadamente 2,16 cm/día) y mediante la acción del medio corrosivo, hace que la probeta sufra efectos de SCC y produzca falla por este tipo de corrosión.

La máquina de ensayos consiste en un motor que ejercerá una fuerza axial sobre una probeta, una celda de carga que medirá la anterior fuerza y una cámara de ambiente donde se encontrará sumergida la muestra. Se deberán censar los valores marcados por la celda de carga y la deformación que va mostrando la probeta y también, el tiempo hasta la ruptura de la misma. Un esquema de la misma se encuentra en la figura 1.11.



**Figura 1.11. Máquina de Ensayo para Velocidad de Deformación Lenta**

La principal ventaja de este tipo de ensayo, es la velocidad en la que se pueden tener resultados de una prueba para SCC. Si bien los ensayos a carga constante mencionados anteriormente simulan con mayor realismo las condiciones de esfuerzos a las que están

sometidos los materiales, éstos tienen la posibilidad de demostrar o no resultados, aparte de que el tiempo hasta ver los mismos puede llegar a ser bastante extenso comparándose, con el de deformación lenta que puede durar un período máximo de hasta dos días. Otra de las ventajas es que este ensayo es versátil, si se realiza una buena elección del medio corrosivo, se podrá obtener información valiosa del comportamiento del material bajo esas circunstancias y ayudará en la toma de decisión de un material cuando encuentre en el proceso de diseño. Este ensayo se encuentra regulado bajo la norma ASTM G149.

Habiendo ya definido la Corrosión Bajo Esfuerzos, las causas que la ocasionan y las consecuencias que contrae ese tipo de corrosión, se tienen ya las bases teóricas del objetivo de la tesis, que es el de construir un banco de pruebas para observar el comportamiento de un material específico cuando está sometido a SCC. En el capítulo 2 se utilizarán las bases descritas anteriormente para, proceder a realizar un diseño del marco de pruebas respetando las normas discutidas, definiendo el tipo de material y el porqué de su selección además, aplicando conocimientos de mecánica adquiridos a lo largo de la carrera para la construcción y puesta a punto del banco de pruebas. Se definirá

el diseño final del mismo y se analizará las características necesarias que debe respetar para poder simular SCC en un ambiente de laboratorio.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. DISEÑO DEL BANCO EXPERIMENTAL PARA SIMULAR CORROSIÓN BAJO ESFUERZOS**

### **2.1. Infraestructura del Banco Experimental para el Ensayo de Corrosión a Velocidad por Deformación Lenta**

En este capítulo se procederá a establecer los parámetros que guiarán durante el proceso de construcción de la máquina de ensayos. Para conseguir este objetivo, se categorizará las diferentes variables encontradas y se realizará el cálculo respectivo usando las ecuaciones necesarias para hallar datos numéricos que servirán como base para la construcción del elemento.

La estructura del banco estará claramente dividida en dos secciones: mecánica y electrónica. Para la primera parte los valores de esfuerzo, deformaciones, resistencia, etc., serán

tomados en cuenta. Esto será tratado más a fondo en las secciones subsiguientes.

La parte electrónica de la máquina será la responsable de la adquisición de la información obtenida debido al resultado del ensayo y por tanto, su diseño deberá ser de tal forma que entregue valores precisos para poder estimar la vida de la probeta con mayor precisión. Así mismo, una descripción más detallada del diseño de esta sección será tratada en el desarrollo de este capítulo.

Habiendo identificado los procesos que formarán parte del banco de prueba, se decidió dividir los elementos y condiciones en tres secciones: aspectos ingenieriles, elementos mecánicos y elementos electrónicos. Una descripción más detallada se muestra a continuación.

### **2.1.1. Aspectos Ingenieriles**

Para la construcción de este banco de experimental se pondrá a prueba todos los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Mecánica. Se deberá tomar en cuenta la fuerza necesaria para romper la probeta, la cual se la calculará en la sección 2.5.

Es importante que se logre la velocidad mencionada en la norma ASTM G-129, para lo cual se escogerán las reducciones más adecuadas. Se escogerá un tornillo de potencia que soporte la fuerza que se le aplique y que se acondicione a las dimensiones y necesidades del banco de prueba. Se determinará el factor de seguridad de las barras de sujeción de la probeta y a su vez del pasador que las une. Es importante que el pasador soporte la fuerza máxima que se le aplique a la probeta.

Se deberá realizar el análisis correspondiente de la estructura ya que se deberá evitar que se flexione por acción de la fuerza aplicada, para lo cual se escogerá una viga adecuada.

El tamaño de la probeta dependerá de la norma ASTM E-8, de las dimensiones del banco de prueba y a su vez de la capacidad máxima que tenga la celda de carga, ya que una probeta con mayor dimensión necesitará una mayor fuerza para llegar a la resistencia última de tracción y por lo tanto se necesitará una mayor capacidad en la celda de carga.

El banco de prueba constará de un panel de control, en el cuál se instalarán equipos electrónicos de protección para el motor y a su vez se realizará la respectiva conexión para energizar los

diferentes sensores y elementos que contenga el modelo experimental.

### **2.1.2. Elementos Mecánicos**

En esta sección se procederá a establecer valores concretos mediante el empleo de fórmulas, tablas en caso de ser necesario, de todos los elementos mecánicos que estarán presentes en la máquina.

#### **Fuerza de Ruptura de Probeta**

Se procederá a calcular la fuerza necesaria que deberá ejercer el banco experimental para producir la fractura de la probeta. Esta fuerza será de tal magnitud que pueda superar la resistencia última a la tracción ( $S_{ut}$ ) de la misma. La resistencia  $S_{ut}$  es una propiedad física del material, en este caso acero inoxidable AISI 304, la cual indica el valor del esfuerzo máximo que puede resistir el material antes de producirse la ruptura. Este valor será encontrado por la tabla 2, tomado de las características del proveedor mostradas en el apéndice 1.

**TABLA 2**  
**PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOX. 304**

| Resistencia a la fluencia $S_y$ | Resistencia ultima $S_{ut}$ | Módulo de elasticidad | Elongación  |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|
| 310 MPa                         | 620 MPa                     | 200 GPa               | 30% en 50mm |

Debido a que la probeta estará sometida a un esfuerzo netamente axial, la fuerza se calculará mediante el uso de la ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde  $\sigma$  es el valor del esfuerzo de trabajo,  $A$  es el área transversal de la sección reducida de la probeta y  $F$ , es la fuerza necesaria para que la probeta falle.

El valor de  $F$  despejado de la ecuación 2.1, es la fuerza perpendicular sometida a la sección circular de la probeta y será el valor base desde donde partirá este diseño. Para poder superar la resistencia que presentará el material, se escogerá un motor para transmitir la fuerza que se necesitará durante la realización del ensayo.

### **Tornillo de Potencia**

La probeta deberá ser tensada mediante la acción del desplazamiento lineal de un tornillo de potencia y por tal motivo, el tornillo seleccionado deberá ser capaz de resistir los valores de esfuerzos sometidos a éste.

El esfuerzo axial (10) que soportará el tornillo viene definido por:

$$\sigma = \frac{F}{A_t} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde  $F$ , es el valor calculado de la fuerza de ruptura de la probeta,  $A_t$  es el área de la sección transversal del tornillo la cual será dada por:

$$A_t = \frac{\pi d_r^2}{4} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde  $d_r$  es el valor del diámetro de raíz del tornillo que a su vez corresponde a:

$$d_r = d - p \quad \text{Ec. 2.4}$$

Los valores de  $d$  y  $p$ , representan el diámetro exterior del tornillo y el paso respectivamente.

Como el tornillo de potencia tendrá una cuerda cuadrada, el diámetro de paso se lo obtendrá de la siguiente ecuación:

$$d_p = d - \frac{p}{2} \quad \text{Ec. 2.5}$$

El diámetro del collarín se lo obtendrá de la siguiente manera:

$$d_c = \frac{D + d}{2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

En el cual D es el diámetro externo del collarín y d es el diámetro del tornillo.

La distancia que avanzará el tornillo con respecto a una vuelta de la tuerca se la define como avance y se la calculará por medio:

$$\text{Avance (L)} = \# \text{ entradas} * \text{paso} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Cuando una tuerca se aprieta sobre un tornillo, o tal vez cuando se transmite un torque por medio de la tuerca de un tornillo de potencia, se desarrolla un esfuerzo de torsión en el tornillo.

El esfuerzo de torsión al que estará sujeto el tornillo se lo calcula usando:

$$\tau = \frac{T_d * r}{J} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Se reemplazará el momento polar de inercia (J) de la sección transversal del tornillo en la ecuación 2.8

$$\tau = \frac{T_d * r}{\frac{\pi * d_r^4}{32}}$$

Simplificando la ecuación anterior, se obtendrá:

$$\tau = \frac{16 T_d}{\pi * d_r^3} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Para esto, primero se deberá calcular el torque que se necesitará para hacer que la probeta se tense. Este torque se originará por el giro que realiza la tuerca que en este caso será un piñón, para subir o bajar la carga. El mayor esfuerzo lo realizará el tornillo cuando esté bajando, ya que en ese movimiento se tensará la probeta. Se procederá a encontrar el valor del torque de bajada  $T_d$  mediante la ecuación:

$$t_d = \left( \frac{F * d_p}{2} \right) * \left( \frac{u * \pi * d_p - L}{\pi * d_p + u * L} \right) + \left( \frac{u_c * F * d_c}{2} \right) \quad Ec. 2.10$$

En donde  $d_p$  representa al diámetro primitivo del tornillo,  $u$  es el coeficiente de fricción entre el tornillo y la tuerca,  $L$  es el avance del tornillo y  $d_c$  es el diámetro del collarín.

Una vez obtenido el valor del torque de bajada y reemplazando  $J$  que representa al momento polar de inercia de la sección circular en la ecuación 2.8, se conocerá el valor del esfuerzo de torsión.

Después de haber encontrado los valores de los esfuerzos, se procederá a calcular el respectivo coeficiente de seguridad. Este coeficiente es un valor numérico que representa la capacidad que tiene el tornillo de trabajar bajo estas cargas por sobre sus

requerimientos. Este valor deberá ser mayor que 1 para demostrar que este elemento no fallará, y esta denotado por:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde  $S_y$  es la resistencia a la fluencia del material y  $\sigma'$  es el esfuerzo efectivo de Von Mises, el cual permite tratar casos de esfuerzos combinados. Este esfuerzo de trabajo resulta de los esfuerzos combinados de tensión y cortante, está dado por la fórmula

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Otra característica que se deberá conocer del tornillo de potencia es la eficiencia, la cual estará definida por la relación entre el trabajo consumido y el trabajo entregado por éste. La eficiencia del tornillo viene dada por:

$$e = \frac{1 - u \tan \lambda}{1 + u \cot \lambda} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde  $\lambda$  es el ángulo de avance del tornillo que a su vez, es obtenido por:

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi * d_p} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Una vez encontrado todos los valores, se los reemplaza en la ecuación 2.13 para poder encontrar la eficiencia del tornillo de potencia

### Velocidad de deformación

El ensayo tratará de simular aceleradamente un material sometido a una carga, la norma ASTM G 129 establece que la velocidad de deformación de la probeta deberá estar entre un rango de  $2.54 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$  y  $2.54 \times 10^{-9} \frac{m}{s}$  siendo esto una velocidad lineal, se necesitará calcular la velocidad a la que necesitará girar el tornillo de potencia. Para esto se hace una relación que estará dada por:

$$v = \frac{x}{t} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde  $v$  es la velocidad lineal,  $x$  es el avance del tornillo y  $t$  es el tiempo.

La velocidad angular estará definida por la siguiente fórmula:

$$w = \frac{\theta}{t} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde  $w$  es la velocidad angular,  $\theta$  es la revolución dada y  $t$  es el tiempo.

Se realizará una relación entre la ecuación 2.15 y 2.16 para determinar la relación angular del tornillo de potencia basada en la velocidad lineal que indica la norma ASTM G 129.

$$\frac{w}{v} = \frac{\theta}{x}$$

Entonces despejando  $w$ ,

$$w = v * \frac{\theta}{x} \quad \text{Ec 2.17}$$

Debido a que la velocidad angular será muy baja y además que, ningún motor comercial trabaja a esas velocidades, se ha decidido el empleo de cajas reductoras de tipo sinfín-corona.

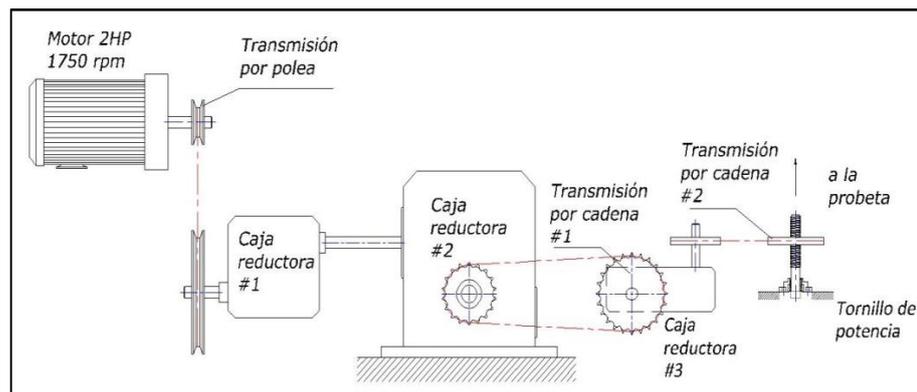
### **Cajas reductoras Sinfín-Corona**

La reducción sinfín-corona es una de las formas más utilizadas para reducir velocidades. El sistema consta de un tornillo sinfín en contacto de una corona la cual es generalmente de bronce, que hará la reducción de los rpm que entran al primero. Este tipo de reducción tiene la ventaja de que puede llegar a relaciones de velocidad mucho mayores que las del tipo piñón-engrane, otra ventaja es su capacidad de auto bloquearse esto quiere decir, que el engranaje no tendrá la capacidad de retroceder, es decir que si se le aplica torque al engrane, éste no moverá al tornillo sinfín.

Tomando en cuenta que la velocidad de los motores encontrados en el mercado trabajan a velocidades de 1750 rpm, entonces, los reductores de sinfín-corona no tienen una relación lo suficientemente grande que permitan hacer la reducción en una sola etapa y por tanto, es necesario hacerlo en más de una. Se tomará la decisión de que la reducción de velocidad se hará por medio de 3 reductores con relaciones de 1:15, 1:50 y 1:60

respectivamente para poder alcanzar una velocidad cercana a la que la norma indica.

Para poder llegar al valor exacto de la velocidad requerida se usarán además, 2 reducciones de transmisión de cadena, las cuales estarán conectadas entre las etapas 2 y 3 de las cajas reductoras. Un esquema de las reducciones empleadas en el banco de prueba se presenta en la figura 2.1



**Figura 2.1. Dibujo Esquemático del Mecanismo del Banco de Pruebas**

Habiendo definido todas las reducciones que se van a emplear se deberá calcular la potencia necesaria que cada etapa tendrá que transmitir para lograr alcanzar la fuerza de ruptura de la probeta. Debido a que se obtuvo el valor del torque que tendrá el tornillo de

potencia y la velocidad angular a la que deberá girar este, se puede obtener ya el valor de la potencia mediante la fórmula:

$$\text{Potencia Requerida} = T * w \quad \text{Ec. 2.18}$$

El siguiente paso en el proceso de diseño es la del cálculo de las cajas reductoras (11). La primera reducción constará de un tornillo sinfín de 2 entradas, la velocidad que llegará a esta caja es la del motor dividido para la reducción de la polea (3:1), con estos datos se podrá ya diseñar los elementos de la misma. Se comenzará definiendo las dimensiones de estos elementos, para esto el primer paso será de encontrar el número de dientes ( $N_g$ ) de la corona. Esto se logrará con la siguiente ecuación:

$$N_g = m * i_w \quad \text{Ec. 2.19}$$

Donde  $i_w$  es el número de entradas del tornillo y  $m$  es la relación de reducción.

Se podrá encontrar la relación de reducción a través de la ecuación:

$$m = \frac{W_{entrada}}{W_{salida}} \quad \text{Ec. 2.20}$$

El diámetro de paso es el diámetro en el cual se dará el contacto entre los dientes de la corona con los del tornillo, este es el punto donde se aplicarán las fuerzas que transmiten la potencia del

motor. Para encontrar la dimensión del diámetro de la corona ( $D_g$ ) y diámetro del tornillo ( $D_w$ ) para el tornillo se usarán las ecuaciones:

$$D_w = \frac{C^{0.875}}{2.2} \quad \text{Ec. 2.21}$$

$$D_g = (2 * C) - D_w \quad \text{Ec. 2.22}$$

Donde  $C$  es la distancia entre centros de la corona y tornillo.

El paso  $p$  y el avance  $L$  del tornillo respectivamente está dado por:

$$p = \frac{\pi D_g}{N_g} \quad \text{Ec. 2.23}$$

$$L = i_w * p \quad \text{Ec. 2.24}$$

El ángulo de avance  $\lambda$  es, según Mott, el ángulo entre la tangente hacia la cuerda del gusano y la línea perpendicular al eje del mismo. Para este sinfín este valor está definido por:

$$\lambda = \text{artg} \frac{L}{\pi * D_w} \quad \text{Ec. 2.25}$$

La distancia perpendicular entre dos cuerdas consecutivas en el tornillo sinfín es conocida como paso normal  $p_n$  y está definido por:

$$p_n = p * \cos \lambda \quad \text{Ec. 2.26}$$

Debido a que el diseño es un proceso iterativo, será necesario repetir y refinar los cálculos hasta que se pueda llegar a dimensiones que se muestren en concordancia a las normas que

regulan el diseño de engranes, en este caso se han basado en las recomendaciones propuestas por AGMA<sup>1</sup>.

Es necesario conocer la distancia entre centros, por lo que se obtendrá este valor de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{D_w + D_g}{2} \quad \text{Ec. 2.27}$$

Es necesario realizar la distancia entre centros obtenida por medio de la relación:

$$\frac{C^{0.875}}{3} \leq D_w \leq \frac{C^{0.875}}{1.7} \quad \text{Ec. 2.28}$$

A continuación se procederá a realizar los cálculos necesarios para definir la geometría del diente, para esto se procederá a usar las proporciones recomendadas por AGMA como se muestra en la tabla del apéndice 2.

Se determinará el diámetro exterior del sinfín ( $D_{ow}$ ) por medio de la siguiente ecuación:

$$D_{ow} = D_w + 2a \quad \text{Ec. 2.29}$$

La última característica que falta definir acerca del gusano es la longitud de la rosca  $L_w$ , para lograr este objetivo la AGMA plantea la ecuación:

$$L_w = \left(4.5 + \frac{N_g}{50}\right) * p \quad \text{Ec. 2.30}$$

---

<sup>1</sup> American Gear Manufacturers Association

Donde  $N_g$  corresponde al número de dientes de la rueda y  $p$  al paso del gusano.

Para que exista un acople perfecto de la rueda y el gusano, se procederá a diseñar la geometría de la primera de acuerdo a las especificaciones de la norma. Comenzando con el ancho de cara  $F$  y el ancho efectivo  $F_e$  que estarán definidos por:

$$F_e = \sqrt{D_{ow}^2 - D_w^2} \quad \text{Ec. 2.31}$$

$$F = 1.05 * F_e \quad \text{Ec. 2.32}$$

El diámetro de la garganta de la corona  $D_t$  será calculado por:

$$D_t = D_g + 2a \quad \text{Ec. 2.33}$$

Finalmente, definirá el valor del diámetro exterior de la corona mediante el empleo de la ecuación:

$$D_{og} = D_t + (D_w - 2a) - \sqrt{(D_w - 2a)^2 - (0.8 \cdot F)^2} \quad \text{Ec. 2.34}$$

Se ha definido completamente todas las dimensiones necesarias tanto para el cálculo y construcción de las reducciones sinfín-corona, estas ecuaciones serán válidas para las otras dos cajas que se planean incluir en la reducción de velocidad del banco de pruebas. El siguiente paso consistirá en encontrar las velocidades de operación de la reducción. Para esto se necesitará definir la

velocidad tangencial  $v_w$  y  $v_g$  para el gusano y la rueda respectivamente.

$$v_w = \frac{\pi * D_w * rpm_w}{12} \quad Ec. 2.35$$

$$v_g = \frac{\pi * D_g * rpm_g}{12} \quad Ec. 2.36$$

La velocidad friccional se la encontrará mediante:

$$v_s = \frac{v_g}{\text{sen } \lambda} \quad Ec 2.37$$

Se encontrará el factor de fricción por medio:

$$f = \frac{0.32}{v_s^{0.36}} \quad Ec. 2.38$$

Usualmente el tornillo sinfín impulsa a la corona, pero si la corona puede impulsar al tornillo sinfín la transmisión será reversible en caso contrario se dice que la transmisión es irreversible y se determinará por medio de la siguiente ecuación:

$$\tan \lambda \cdot \cos \theta < f \quad Ec. 2.39$$

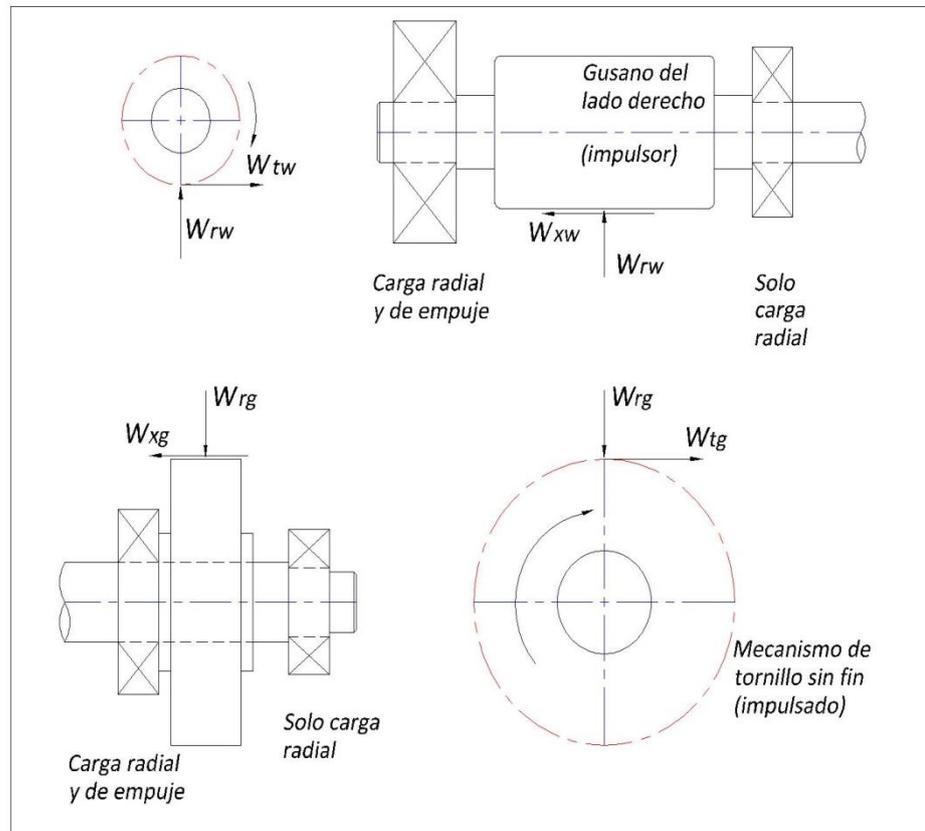
### **Potencia Transmitida en la Caja Reductora**

Se procederá a realizar el análisis de la potencia transmitida en cada una de las etapas de reducción que se van a emplear en la

máquina de ensayos, el proceso del cálculo será siguiendo el orden establecido en la figura 2.1 comenzando en la probeta y terminando en el motor.

Comenzando con la transmisión por cadena-catarina, la eficiencia de esta relación será del 90% es decir, se perderá un 10% de la potencia útil generada por el motor para lograr el rompimiento de la probeta. Esto es un dato importante debido a que ayudará a tomar en cuenta todas las pérdidas que se podrá encontrar y permitirá realizar una elección correcta del motor.

Para analizar la potencia transmitida por las reducciones sinfín-cadena es necesario primero, realizar un estudio de las fuerzas implicadas en este conjunto y para esto resultará útil realizar un diagrama de cuerpo libre como el mostrado en la figura 2.2.



**Figura 2.2 Fuerzas en Gusano y en un Mecanismo de Tornillo**

### Sinfín

**Fuente:** Diseño de Elementos de Máquina, Mott

Debido al cuerpo libre se puede encontrar las siguientes relaciones:

$$W_{tg} = W_{aw}$$

$$W_{ag} = W_{tw}$$

$$W_{rg} = W_{rw}$$

Se comenzará encontrando el valor en lb.pulg del torque ejercido sobre el engrane  $T_g$  despejando la siguiente ecuación:

$$P_0 = \frac{T_g n_g}{63000} \quad \text{Ec. 2.40}$$

Donde  $P_0$  representa la potencia de salida de la caja reductora en HP,  $n_g$  es el número de dientes del engrane.

La fuerza tangencial en el diámetro de paso del engrane  $W_{tg}$ , está dada por:

$$W_{tg} = \frac{2 * T_g}{D_g} \quad \text{Ec. 2.41}$$

La fuerza tangencial en el diámetro de paso del sinfín  $W_{tw}$ , está dada por:

$$W_{tw} = \frac{2 * T_w}{d} \quad \text{Ec. 2.42}$$

En donde  $T_w$  es el torque del sinfín y  $d$  es el diámetro de paso.

La fuerza  $W_{ag}$  y  $W_{rg}$  en la corona que representan a las fuerzas axiales y radiales respectivamente, se la obtiene utilizando los componentes de la fuerza tangencial en el mecanismo de tornillo y la fuerza de fricción entre los dientes de la misma. Estas fuerzas están dadas por las ecuaciones:

$$w_{ag} = w_{tg} \left( \frac{(\cos\theta * \text{sen}\lambda) + (u * \cos\lambda)}{(\cos\theta * \cos\lambda) - (u * \text{sen}\lambda)} \right) \quad \text{Ec. 2.43}$$

$$W_{rg} = \frac{W_{tg} * \text{sen}\phi}{\cos\phi \cos\lambda - u \text{sen}\lambda} \quad \text{Ec. 2.44}$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de presión normal,  $\lambda$  es el ángulo de desplazamiento y  $u$  es el coeficiente de fricción entre la rueda y tornillo.

La fricción jugará un papel importante en la operación del conjunto sinfín-corona debido a la existencia de un contacto por deslizamiento entre los dientes del engrane y la cuerda del tornillo. Este coeficiente va a depender del tipo de material utilizado, lubricante, acabado superficial y velocidad de desplazamiento. Esta velocidad de deslizamiento  $V_s$  está dada por:

$$v_s = \frac{v_g}{\text{sen}\lambda} \quad \text{Ec. 2.45}$$

La AGMA estima un coeficiente de fricción para un acero endurecido, mínimo 58 HRC, un poco lijado, pulido o rolado que opera en un tornillo sinfín de bronce. La elección de las fórmulas propuestas por AGMA es escogida en función de la velocidad de deslizamiento  $V_s$ :

Baja velocidad  $V_s < 10$  pies/min

$$u = 0.124 e^{-0.07*v_s^{0.645}} \quad Ec. 2.46$$

Alta velocidad  $V_s > 10$  pies/min

$$u = 0.103 e^{-0.110*v_s^{0.450}} \quad Ec. 2.47$$

La fuerza de fricción  $W_f$  es aquella que actúa paralela a los dientes del engrane y las cuerdas del tornillo, está dada por:

$$W_f = \frac{u \cdot W_{tg}}{\cos\lambda \cos\phi} \quad Ec. 2.48$$

La eficiencia mecánica es la relación entre la energía que se entrega sobre la que se recibe. Esta eficiencia en los sistemas de sinfín-corona dependerá de diversos factores entre los cuales destacan el ángulo de desplazamiento  $\lambda$ , cuanto mayor sea este ángulo mayor será la eficiencia estableciendo un límite de  $45^\circ$ . Otro factor importante en la variación de la eficiencia es el número de entradas con las que cuenta el tornillo, esto se concluye fácilmente debido a la relación entre el ángulo de desplazamiento y el número de entradas y por tanto para obtener altas eficiencias es recomendable usar gusanos de cuerdas múltiples. Al usar gusanos con más de una entrada es necesario tener un mayor número de dientes en la corona, por tanto aumenta el tamaño de esta última, es conveniente hacer una elección correcta entre tener eficiencias

altas o contar con dimensiones más grandes. Esto quedará a criterio del diseñador.

Para poder encontrar las eficiencias de estos sistemas se definirá las potencias de entrada y salida. La potencia en este tipo de reducciones está definida por

$$P_i = P_o + P_L \quad \text{Ec. 2.49}$$

Donde  $P_i$  es la potencia de entrada al sistema,  $P_o$  es la potencia de salida de la corona, y  $P_L$  es la pérdida de potencia debido a la fricción. Esta última potencia está dado por:

$$P_L = \frac{v_s \cdot w_f}{330000} \quad \text{Ec. 2.50}$$

Por último la eficiencia se calculará por la relación entre las potencias antes mencionadas:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times (100\%) \quad \text{Ec. 2.51}$$

### **Potencia del motor**

Para encontrar la potencia mínima que deberá generar el motor, se necesitará utilizar todas las eficiencias mecánicas que se han encontrado en las etapas de reducción, es decir, la de las 3 cajas de reducción, los 2 acoplamientos cadena-catarina y la relación correa banda y de esta forma, se podrá cubrir toda perdida de

potencia al pasar de un sistema a otro. Entonces el cálculo de la potencia necesaria estará dado por:

$$Potencia\ motor = \frac{Pot.\ requerida}{\eta_{cad2} \eta_{caja3} \eta_{cad1} \eta_{caja2} \eta_{caja1} \eta_{polea} \eta_{motor}} \quad Ec. 2.52$$

### Transmisión Cadena-Catarina

Para la selección del sistema de transmisión cadena-atarina se deberán tener en cuenta ciertas variables como lo son: la reducción de velocidad, la potencia a transmitir y el paso.

Para encontrar la relación de velocidad  $m$  de la cadena se usará la fórmula:

$$m = \frac{w_e}{w_s} \quad Ec. 2.53$$

Donde  $w_e$  es la velocidad angular de entrada y  $w_s$  es la velocidad de salida.

Se encontrará la potencia de diseño de la cadena. Esta potencia de diseño resultará de la multiplicación de la potencia que requerirá transmitir la cadena por unos factores de servicio tabulados mostrados en la tabla del apéndice 3. Estos factores son encontrados de datos empíricos que han sido recogidos de las diferentes condiciones de servicio en las que las transmisiones de

cadena se pueden desenvolver. Entonces, la potencia de diseño estará dada por

$$\text{Potencia de diseño} = fs \times \text{Pot.} \quad \text{Ec. 2.54}$$

El número de dientes del engrane estará dado por:

$$N_2 = N_1 \times m \quad \text{Ec. 2.55}$$

Los diámetros de paso  $D$  de las catarinas estarán dados por la fórmula:

$$D = \frac{p}{\text{sen}\left(\frac{180}{N}\right)} \quad \text{Ec. 2.56}$$

Donde  $p$  es el paso de la cadena y  $N$  es el número de dientes de la catarina respectiva.

La longitud de la cadena deberá ser un múltiplo completo del paso y es recomendable que éste múltiplo sea par. La distancia entre centros deberá ser ajustable para dar fuga a tolerancias y condiciones de desgaste. La longitud  $C$  neta de la cadena será dada por la ecuación:

$$L = 2C + \frac{N_2 + N_1}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 C} \quad \text{Ec. 2.57}$$

Donde  $N_1$  y  $N_2$  son los números de dientes de los engranes y  $C$  es la distancia central teórica entre los ejes de los engranes. Es

recomendable que esta distancia se encuentre en 30 a 50 veces el paso de la cadena, su valor exacto está dado por:

$$C = \frac{1}{4} \left[ L - \frac{N_2 + N_1}{2} + \sqrt{\left( L - \frac{N_2 + N_1}{2} \right)^2 - \frac{8(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2}} \right] \quad Ec. 2.58$$

### **Transmisión por Banda**

Para la selección de las bandas que se usarán para transmitir potencia desde el motor hasta la primera caja reductora se usarán los pasos recomendados en el manual del fabricante Martins. En este manual, se necesitará como información de entrada la potencia del motor, las rpm de tanto la unidad impulsora como la de la impulsada, la distancia entre centro de los ejes, diámetro de los ejes y el promedio diario de las horas de operación.

Primero se procederá a elegir el tipo de operación a la que estará sujeta la banda y de acuerdo a esto, se escogerá del apéndice 4 en la tabla 4.1, el factor de servicio que más se acomoda a estas necesidades. Este factor de servicio se lo multiplicará por la potencia que se va a transmitir para poder obtener el valor de la potencia de diseño.

Para obtener la sección transversal de la banda se usará la tabla 4.2 del apéndice 4, luego también, con la ayuda de la tabla 4.3 del

mismo apéndice se podrá obtener la dimensión mínima del diámetro de la polea menor.

Ya contando con las relaciones de velocidad y el diámetro mínimo de la polea se podrá escoger de la tabla 4.4 de selección de banda en el apéndice 4, el conjunto de poleas que mejor se acomodan a esta operación.

En esta tabla se encontrará también el factor de corrección por longitud y arco. Este factor ayudará a encontrar el número de bandas que se necesitará utilizar. El número de bandas estará dada por:

$$\# \text{ de bandas} = \frac{\text{Potencia de diseño}}{\text{Potencia corregida por banda}} \quad \text{Ec. 2.59}$$

La potencia corregida por banda resulta de:

$$\text{Pot. corg. banda} = \text{Pot. por banda} \times \text{Fac. de correccion por long.} \quad \text{Ec. 2.60}$$

### **Diseño del eje que soporta la corona.**

En esta sección se realizará una descripción del proceso de diseño del eje que soportará las coronas. Se calculará la potencia real que llega al eje de salida del motor y además se tomará en cuenta la pérdida que se generará por la transmisión de banda, para lo cual se considerarán las eficiencias de cada uno.

Se calculará el Torque que se genera en la polea más lenta, para el cual se usará el valor de la potencia hallado.

$$P = \tau * w \qquad \text{Ec. 2.61}$$

Se encontrará la fuerza tangencial, axial y radial que se generará en la corona para posteriormente encontrar la potencia de salida y la pérdida de potencia por fricción. Además se hallará la eficiencia que se generará

Estos ejes son elementos que estarán sometidos a combinaciones de esfuerzos y tendrán un efecto que deberá ser tomado en cuenta ya que, podría llegar a producir flexiones que ocasionarían un funcionamiento incorrecto de las transmisiones lo cual, haría que la potencia necesaria para poner en marcha el dispositivo resulte mayor de la calculada y en el peor de los casos, pueda llegar a producirse una fractura que dañaría elementos importantes como lo son las cajas reductoras.

Se comenzará identificando los tipos de esfuerzos que están actuando sobre estos elementos y se realizará un análisis a fatiga para comprobar que son capaces de resistir las condiciones operativas en las cuales trabajarán. El objetivo de este proceso es el de encontrar un factor de seguridad que sea aceptable y garantice que el sistema no fallará.

Primero se realizará un diagrama de cuerpo libre en el cual, se podrá identificar todas las fuerzas que actúan sobre el eje. Por conocimientos teóricos, se sabrá que debido al tornillo sinfín se ejercerán fuerzas en dos planos del tipo tangencial y radial por tanto, en el análisis estático, se deberán hallar los esfuerzos ejercidos en estas dos direcciones.

El diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores de cada eje mostrará las zonas críticas en las que se podrán presentar fallas y éstas deberán ser analizadas.

Se producirá un esfuerzo flexor ( $\sigma$ ) debido al momento que se generará y un esfuerzo de torsión ( $\tau$ ), el cual se produce por el torque de la corona originado por la fuerza tangencial de la misma. Estos esfuerzos serán calculados por las ecuaciones

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad \text{Ec. 2.62}$$

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad \text{Ec. 2.63}$$

Por las condiciones de operación, será necesario analizar el eje bajo condiciones de fatiga. El eje estará sometido a un esfuerzo combinado reversible. Será combinado por que tendrá un esfuerzo de flexión y torsor. Será reversible ya que se tendrá un eje giratorio cargado a flexión y además ya que en una posición determinada un

elemento en la parte inferior del eje tendrá un esfuerzo de tensión, mientras que uno en la parte superior tendrá un esfuerzo de compresión, de igual magnitud, todo estos criterios hará que se use el criterio de Goodman (10) para la fatiga.

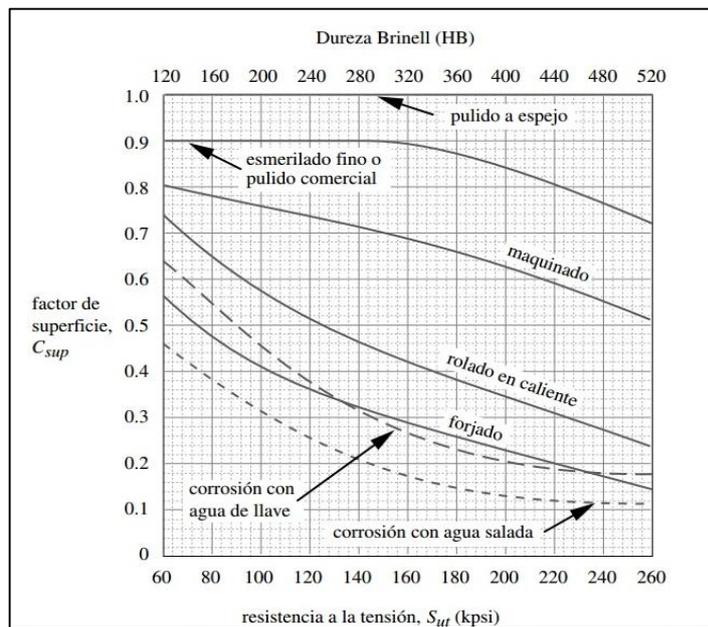
Antes de poder aplicar el criterio de Goodman para encontrar el factor de seguridad del eje a fatiga, primero se deberá definir la resistencia a la fatiga teórica  $S_e$ . Debido a que los valores son obtenidos de pruebas a fatiga en ambientes controlados como laboratorios, es necesario modificar para justificar las diferencias físicas entre las probetas usadas y la parte real que se diseña. Estas modificaciones son conocidas como factores de reducción de la resistencia que, se multiplicarán por el estimado teórico para obtener una resistencia de fatiga corregida a una aplicación específica.

Los datos teóricos se obtienen por pruebas de flexión giratoria entonces, es necesario aplicar un factor de reducción para cargas axiales  $C_{carga}$ , los cuales estarán aplicados según la tabla 5.1 del apéndice 5.

Las muestras de prueba utilizados en la obtención de datos teóricos son pequeñas y por tanto será necesario aplicar un factor de tamaño  $C_{tamaño}$ , ya que a mayores dimensiones, los materiales

fallarán cuando se aplican menores esfuerzos. Para esto se propone la tabla 5.2 del apéndice 5.

Las muestras giratorias son pulidas a espejo para evitar imperfecciones en la superficie que puedan actuar como concentradores de esfuerzo y por lo general, no es práctico tener ese acabado en piezas de ejes normales debido al tiempo y costo de fabricación. Entonces, será necesario también incluir un modificador  $C_{sup}$  que tome en cuenta esta diferencia. Shigley (12) recomienda usar la figura 2.3 para encontrar los coeficientes.



**Figura 2.3 Factores de Superficie para Varios Acabados de Acero**

Fuente: Diseño de Máquinas, Norton

Las pruebas a fatiga se realizan generalmente a temperatura ambiente. La dureza a la fractura disminuye a bajas temperaturas y la resistencia a la fluencia disminuye continuamente con temperaturas por arriba de la temperatura ambiente por lo que puede causar, falla por fluencia antes que falla por fatiga. Se han propuesto fórmulas de aproximación para considerar la reducción del límite de resistencia a la fatiga a altas temperaturas, el factor de temperatura  $C_{temp}$  se sugiere que se use de acuerdo a la tabla 5.3 del apéndice 5.

Debido a que los datos reportados de las pruebas teóricas son valores medios, existe gran dispersión estadística en múltiples pruebas del mismo material bajo las mismas condiciones. La tabla 5.4 del apéndice 5 muestra los valores de confiabilidad  $C_{conf}$  de una desviación estándar del 8%.

El límite de resistencia a la fatiga sin corregir ( $S_e'$ ) se la obtiene de la ecuación 2.64

$$S_e' = 0.5 S_{ut} \quad Ec. 2.64$$

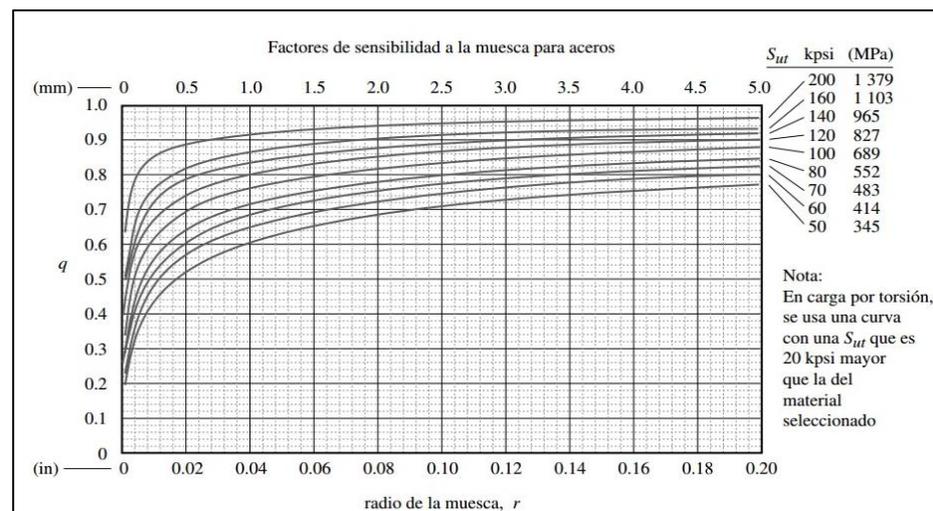
Una vez hallado todos los factores de corrección anteriores, se podrá utilizar el valor corregido de resistencia teórica a la fatiga  $S_e$ , mediante la ecuación

$$S_e = S_e' C_{carga} C_{tamaño} C_{conf} C_{sup} C_{temp} \quad Ec. 2.65$$

Los ejes de la corona contarán con cambios de sección y chaveteros que actuarán como concentradores de esfuerzo en el eje originando posibles fallas en este elemento. En general, cuando los materiales son más frágiles, tendrá mayor sensibilidad a la muesca y ocurrirá lo contrario cuando estos metales sean más dúctiles. Esta sensibilidad también depende al radio de la muesca por ejemplo, conforme los radios de la muesca se aproximan a 0, disminuye ésta sensibilidad de los materiales y también se aproximará a cero. El factor de concentración de esfuerzo por fatiga está relacionado con la sensibilidad a la muesca  $q$  y el concentrador de esfuerzos teóricos  $K_t$  por la ecuación:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad \text{Ec. 2.66}$$

Donde el valor de  $q$ , se lo puede encontrar por medio de la figura 2.4



**Figura 2.4. Curvas de Sensibilidad a la muesca para aceros**

El valor del concentrador de esfuerzo teórico  $k_t$  se lo determinará en el punto donde se encuentra el momento máximo, por lo que si el punto máximo cae en el chavetero se lo determinará por la tabla 5.5 en el apéndice 5.

Si el punto del momento máximo cae en un cambio de sección se lo determinará por la tabla 5.6 ubicada en el apéndice 5.

Después de haber tomado en cuenta todos los modificadores que estarán presentes en el análisis a fatiga del material, se procederá a definir el valor del coeficiente de seguridad aplicando el criterio de Goodman el cual indica:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} + \left( \frac{\sigma'_a}{S_e} * K_f \right) \quad \text{Ec. 2.67}$$

Donde  $S_{ut}$  representa al esfuerzo último del material,  $S_e$  al valor de resistencia teórica a la fatiga,  $K_f$  es el factor de concentración de esfuerzos por fatiga y los valores del esfuerzo medio y alternativo,  $\sigma_m$  y  $\sigma_a$  respectivamente, se lo obtienen de las fórmulas:

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3(\tau_m^2)} \quad \text{Ec. 2.68}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3(\tau_a^2)} \quad \text{Ec. 2.69}$$

Por último se reemplazará en la ecuación 2.67 para obtener el factor de seguridad del eje que soportará la corona

### Elemento de Fijación

Las conexiones entre el tornillo de potencia y los ejes, estarán sujetas por pasadores en el cual actuará un esfuerzo cortante. Este esfuerzo se deberá a la transmisión de la fuerza que se empleará para fracturar la probeta por lo que se realizará un análisis que prediga si fallarán o no, durante el funcionamiento del banco de prueba.

Los pasadores que se usarán en los sujetadores del banco son de acero transmisión grado 8 según la norma SAE. Estos pasadores serán utilizados por la facilidad de encontrar en el mercado local, la resistencia de los mismos serán los sugeridos por la norma como se muestra en la tabla 3

**TABLA 3**  
**ESPECIFICACIONES Y RESISTENCIAS DE LA SAE PARA**  
**PERNOS (10)**

| Número de grado de la SAE | Intervalo del tamaño del diám. ext. (in) | Resistencia de prueba mínima (kpsi) | Resistencia a la fluencia mínima (kpsi) | Resistencia a la tensión mínima (kpsi) | Material                        |
|---------------------------|--|-------------------------------------|---|--|---------------------------------|
| 1                         | 0.25–1.5                                 | 33                                  | 36                                      | 60                                     | bajo o medio carbono            |
| 2                         | 0.25–0.75                                | 55                                  | 57                                      | 74                                     | bajo o medio carbono            |
| 2                         | 0.875–1.5                                | 33                                  | 36                                      | 60                                     | bajo o medio carbono            |
| 4                         | 0.25–1.5                                 | 65                                  | 100                                     | 115                                    | medio carbono, forjado en frío  |
| 5                         | 0.25–1.0                                 | 85                                  | 92                                      | 120                                    | medio carbono, Q&T*             |
| 5                         | 1.125–1.5                                | 74                                  | 81                                      | 105                                    | medio carbono, Q&T              |
| 5.2                       | 0.25–1.0                                 | 85                                  | 92                                      | 120                                    | martensita al bajo carbono, Q&T |
| 7                         | 0.25–1.5                                 | 105                                 | 115                                     | 133                                    | aleación al medio carbono, Q&T  |
| 8                         | 0.25–1.5                                 | 120                                 | 130                                     | 150                                    | aleación al medio carbono, Q&T  |
| 8.2                       | 0.25–1.0                                 | 120                                 | 130                                     | 150                                    | martensita al bajo carbono, Q&T |

\* Templado y revenido

Estos pasadores tendrán esfuerzos netamente cortantes, por lo que será necesario aplicar la ecuación:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad \text{Ec. 2.70}$$

Donde  $V$  representa a la fuerza cortante que actúa sobre el pasador y  $A$  al área transversal donde se están aplicando estas fuerzas.

Entonces, el factor de seguridad de los pasadores será:

$$n = \frac{S_{ys}}{\tau} \quad \text{Ec. 2.71}$$

En donde el valor de  $S_{ys}$  se lo calculará de la siguiente manera:

$$S_{ys} = 0.577 * S_y \quad \text{Ec. 2.72}$$

Para la barra que une el tornillo con el eje que soporta la probeta se utilizará acero de transmisión AISI 1018 el cuál, es un acero de medio carbono con buena maquinabilidad y de alta tenacidad lo que lo hace ideal para componentes mecánicos y fabricación de ejes. Las propiedades mecánicas de este acero son:

**TABLA 4**

**PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 1018**

| Resistencia a la fluencia $S_y$ | Resistencia ultima $S_{ut}$ | Módulo de elasticidad | Elongación  |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|
| 370 MPa                         | 620 MPa                     | 205 GPa               | 30% en 50mm |

La barra que conecta la celda de carga y la probeta será de acero inoxidable AISI 304 debido a que esta barra, entrará a la cámara ya que será roscada en un extremo y actuará como sujetador de la probeta por tanto, estará en contacto con el medio corrosivo y podría oxidarse. Las propiedades mecánicas de este acero fueron dadas en la tabla 2.

Las barras estarán sometidas a fuerzas netamente axiales de tensión y por tanto, será necesario diseñarlas a este tipo de esfuerzo. Éste será calculado usando la ecuación 2.1. Para el cálculo del factor de seguridad se usará la ecuación:

$$n = \frac{S_y}{\sigma} \quad \text{Ec. 2.73}$$

Donde el  $S_y$  representará la resistencia a la fluencia del material y  $\sigma$  será el esfuerzo de trabajo al cual estará sometido el acero.

### **Vida de Rodamiento**

Los rodamientos servirán para reducir la fricción entre el eje y los elementos conectados que necesitarán ser impulsados además, facilitarán el desplazamiento y también sirven de apoyo al eje. Los rodamientos estarán presentes en todos los ejes que se utilizarán en el banco de prueba como son los de las coronas, sinfines, tornillo de potencia, entre otros.

Será necesario hacer una selección correcta de los rodamientos para evitar cambios y mantenimientos no programados sobre todo en las cajas reductoras, también realizar una buena selección ayudarán en la vida útil del conjunto.

Para este caso se usarán rodamientos de dos tipos: de bolas y de rodillos cónicos. El rodamiento de bolas es uno de los rodamientos más usados en la industria, este consta de esferas metálicas enjauladas y es principalmente usado cuando existe la presencia de solamente cargas radiales en el eje. Este tipo de rodamientos se usarán sobre todo en los ejes que llevarán las coronas.

El rodamiento de rodillos utiliza pistas de rodillos rectos, cónicos o contorneados según sea el caso. Este tipo de cojinetes podrán soportar cargas estáticas y dinámicas mayores que los de bolas. Rodamientos cónicos de rodillos serán utilizados en los ejes que soportarán los sinfines debido a la presencia de considerables fuerzas axiales que serán asumidos por este cojinete.

Para seleccionar los rodamientos primero se calcularán las fuerzas radiales y axiales que se ejercerán sobre los apoyos, luego conjunto con las dimensiones del eje, se hará la selección del rodamiento que corresponde y se procederá a realizar el cálculo de

la vida útil que estos rodamientos tendrán. Para esto, se utilizará la ecuación recomendada por el fabricante (13) que es la siguiente:

$$L_{10} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad \text{Ec. 2.74}$$

Donde  $n$  representa a la cantidad en rpm de ciclos que va a girar el eje,  $C$  es la capacidad de carga propia de cada rodamiento,  $P$  es la carga dinámica equivalente y  $p$  es un valor de 3 para rodamientos de bolas y 10/3 para los de rodillos. Esta carga dinámica equivalente ( $P$ ) para rodillos cónicos se la calculará por:

$$P = F_r \quad \text{cuando } F_a/F_r \leq e \quad \text{Ec. 2.75}$$

$$P = 0.4F_r + YF_a \quad \text{cuando } F_a/F_r > e \quad \text{Ec. 2.76}$$

Donde los valores de  $F_r$  y  $F_a$  representan a las cargas radiales y axiales soportadas por el rodamiento respectivamente,  $e$  es un factor de cálculo propio del rodamiento que se encontrará en las tablas del fabricante.

La carga estática equivalente ( $P_0$ ) para rodillos cónicos se la calculará por:

$$P_0 = 0.5F_r + Y_0F_a \quad \text{Ec. 2.77}$$

La carga dinámica equivalente ( $P$ ) para rodamientos rígidos de bola se la calculará por:

$$P = XF_r + YF_a \quad \text{Ec. 2.78}$$

Para conocer los factores X y Y de la ecuación 2.78 se utilizará la tabla 6.1 del apéndice 6.

La carga estática equivalente (P) para rodamientos rígidos de bola se la calculará por:

$$P = 0.6F_r + 0.5F_a \quad \text{Ec. 2.79}$$

Los rodamientos tal como los ejes, serán necesarios ser analizados tanto para condiciones estáticas y condiciones dinámicas. Para condiciones estáticas se necesitará encontrar el factor de seguridad  $S_0$  dada por la fórmula:

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad \text{Ec. 2.80}$$

Donde  $C_0$  es la capacidad de carga básica específica para cada rodamiento y  $P_0$  es la carga estática equivalente soportada por el mismo.

Los cálculos de los elementos mecánicos representan quizás una de las partes más importantes del diseño del banco de pruebas debido a que estos elementos serán los encargados directos de la transmisión de la fuerza que se ejercerá para romper la probeta y además, son los que deberán cumplir las especificaciones de velocidad impuestas por la norma para este tipo de ensayos.

### **2.1.3. Elementos electrónicos**

El banco de prueba constará de una celda de carga tipo S con una capacidad máxima de 1 tonelada. Este sensor permitirá conocer la fuerza que se le irá aplicando a la probeta hasta llegar a la rotura. Además constará de un sensor ultrasónico, el cual se lo utilizará para relacionar la deformación que va sufriendo la probeta, ya que el sensor ultrasónico se lo fijará por medio de un brazo a la placa que soporta la cámara experimental. Se definirá un punto de referencia para el sensor, el cual será la plancha que soporta toda la estructura y a medida que la probeta se vaya estirando, el sensor se desplazará igual que el material a ser analizado.

Será necesario aplicarle una temperatura al medio corrosivo por lo que se utilizará una resistencia eléctrica, la cual estará conectada en serio con un termostato para regular la temperatura que generará la resistencia.

Se realizará un panel de control que constará de un breaker trifásico para protección del motor y otro breaker de 2 polos para protección de la botonera de marcha y paro del motor y a su vez de los sensores electrónicos que se alimentarán del panel de control.

## **2.2. Identificación del medio corrosivo para simular ambientes agresivos**

Los equipos de acero inoxidable que se encuentran en la industria cervecera como tanques, tuberías, etc., en su mayoría estarán expuestos a ambientes corrosivos los cuales, serán uno de los aspectos más importantes para que SCC ocurra.

Para lograr una mejor selección del ambiente que se va a utilizar en el experimento se procedió a realizar una visita a una planta cervecera de gran penetración en el mercado nacional. En esta visita se recopiló información sobre las fallas típicas por corrosión que han sufrido y la frecuencia del apareamiento de estas fallas. Se pudo conocer que las principales fallas se presentaban en tuberías hechas con acero inoxidable y se mostraban como fracturas de forma súbita en las zonas cercanas de las soldaduras. Las tuberías mayormente afectadas son las que por las cuales circula el mosto y otros elementos para la fabricación de la cerveza con la particularidad de que éstos se encontraban a temperaturas dispares, desde temperatura ambiente hasta 90°C y además se encontraba sujeto a vibraciones producidas por el paso del líquido. Este problema era recurrente en una tubería que se encuentra a la

salida del molino de malta la cual, presentó este tipo de fallas a los dos años de su instalación.

También existía el caso de un tanque de mezcla hecho en acero inoxidable el cual trabajaba a una temperatura de 144°C, en este tanque contaba una camisa donde habían sido soldados unos anillos de distribución de calor los cuales habían sido atacados continuamente por corrosión y mostraba fisuras con gran frecuencia, así mismo, en las zonas cercanas al cordón de soldadura.

Los materiales usados para la limpieza del interior de las tuberías consistían en una solución que contenía soda caustica hasta 80°C. Seguido de este proceso se realizaba una limpieza ácida con el objetivo de neutralizar la soda que había sido usada en el primer proceso y el de eliminar algún residuo orgánico o químico, esta limpieza se la realizaba en condiciones normales lo cual genera cambios de temperatura del material que producirían esfuerzos térmicos que serán impregnados en el material y se sospechaba que tienen bastante influencia en las fallas presentadas en los equipos.

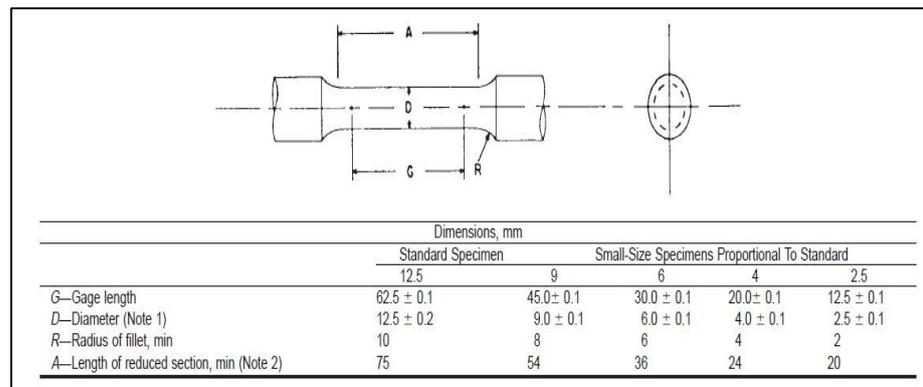
Tratando de escoger un ambiente que sea fácil de recrear en el experimento se ha escogido una solución salina que se encuentre a una temperatura de al menos 90°C con la finalidad de tener un medio alto en cloruros y temperaturas típicas usadas en diferentes etapas de la producción de la cerveza. Esta solución se mantendrá encerrada herméticamente en la cámara sin que haya la posibilidad de existir derrames o alguna influencia externa que pueda modificar el experimento.

### **2.3 Selección de probetas a emplear para el ensayo de corrosión bajo esfuerzo**

Este tipo de ensayo se basará de acuerdo a lo mencionado en la norma ASTM G129, la cual indica que las probetas a ensayar serán conforme a las dimensiones descritas en la norma ASTM E8 haciendo las excepciones necesarias debido al tipo de cámara que se utilizará en el banco de prueba.

La norma ASTM E8 indicará las dimensiones y geometría de las probetas de acuerdo al tipo de ensayo a realizar. Se escogerá la de tipo cilíndrica ya que será la más acorde a la práctica que se realizará. Un punto importante para la selección de la probeta será la capacidad máxima de la celda de carga, ya que si se escoge una

probeta con grandes dimensiones se necesitará una mayor fuerza para que la probeta llegue a la fractura y a su vez se necesitará una celda de carga de mayor capacidad. Otro punto determinante en la selección de las dimensiones normadas de la probeta será la cámara de ensayo que se usará en el banco de pruebas y por tanto, la probeta escogida constará de un diámetro de 4mm, la cual es una dimensión proporcional a la estándar pero de menor tamaño como lo indica la norma en la figura 2.5. Además la probeta es simétrica tanto en sentido longitudinal y transversal y serán maquinadas mediante el proceso de torneado.



**Figura 2.5. Dimensiones de Probetas para Ensayos**

**Fuente:** ASTM E8

Queriendo hacer un contraste entre el efecto de concentradores de esfuerzos en materiales sometidos a SCC, se decidió ensayar dos

tipos de probetas, una pulida y otra con muescas. Estas probetas son caracterizadas más a fondo en las siguientes secciones.

### **2.3.1. Probetas con Muesca**

Las probetas con muesca contarán con un concentrador de esfuerzos en la forma de una reducción de área en la garganta ubicados en el centro de las mismas. Esta muesca tendrá el objetivo de promover una falla más rápida del material simulando zonas afectadas por el calor o soldaduras. Las probetas con muesca suscitan a la corrosión por picadura mediante la aceleración del agrietamiento por hidrógeno del material, también servirán para producir un estimado del factor de intensidad para corrosión inducida por el ambiente.

Las probetas con muesca serán de las mismas dimensiones que las descritas en la norma ASTM E8.

### **2.3.2. Probetas sin Muesca**

Estas son las probetas cilíndricas de sección reducida como las mostradas en la figura 2.5. Los extremos de la probeta serán roscadas para tener una mayor sujeción a las agarraderas del banco de pruebas, estas probetas deberán ser pulidas a espejo para evitar imperfecciones en la superficie.

Además las probetas deberán ser maquinadas a tal punto que el centro de la probeta (zona vulnerable a la ruptura) no presenten imperfecciones en la superficie o ralladuras del propio proceso de torneado, esto es debido a que estas imperfecciones podrán actuar como concentradores de esfuerzos y generarán un material no uniforme que podrá dar origen a resultados no reales, para lo cual se aplicará un proceso de pulido con una lija número 80 y posteriormente se utilizará una lija número 100, teniendo en cuenta las dimensiones mencionadas en la figura 2.5.

#### **2.4. Parámetros a considerar en el diseño.**

Los principales parámetros que regirán en el diseño de los demás componentes serán la fuerza necesaria para la fractura de la probeta y la velocidad a la que se realiza el ensayo la cual es indicada por la norma ASTM G129.

El material elegido para ensayar se trata de acero inoxidable AISI 304 el cual deberá ser fracturado y para poder llegar a la falla de la probeta se necesitará alcanzar la fuerza de ruptura mediante el método descrito en la sección 2.2. El valor calculado de esta fuerza será el parámetro que guiará en la selección del motor que accionará todo el mecanismo y a su vez, la velocidad normada en

estos ensayos, obligará a definir el número de etapas de reducción que va a tener el banco de pruebas y el consecuente diseño de cada reducción y transmisión que se necesitará emplear.

Las dimensiones de la probeta serán también otro factor que va a incidir de manera directa en el diseño, una probeta estándar que es de mayores dimensiones que la que se ha escogido, necesitará una mayor fuerza de ruptura para que falle lo que ocasionará que la potencia del motor sea más grande, los engranes más resistentes y en sí, todas las conexiones deberán ser capaces de soportar los esfuerzos que se originarán. Inclusive esto modificará el valor del rango y precisión de los elementos electrónicos que se usarán para medir las fuerzas y desplazamientos.

Estas dimensiones también incidirán en el tamaño de la cámara y el volumen del medio escogido. Esta cámara deberá ser capaz de encerrar un volumen que cubra al menos 30 mL/cm<sup>2</sup> según indica la norma.

El medio en que se realizarán los ensayos hará que la selección del material del que será la cámara se tal que, no se oxide con éste y además, sea capaz de resistir las presiones del medio encerrado. Está cámara también deberá resistir la temperatura a la que estará sometido sin mostrar, grandes dilataciones que propicien fugas.

## 2.5. Análisis mecánico

### 2.5.1. Fuerza de ruptura de la probeta

Se determinará por medio de la tabla 2 el valor de la resistencia a la fluencia ( $S_y$ ) y la resistencia última a la tracción ( $S_{ut}$ ) del acero inoxidable 304:

$$S_y = 45000 \text{ PSI} = 310 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 90000 \text{ PSI} = 620 \text{ MPa}$$

La probeta estará sometida a un esfuerzo axial de tensión, por lo que se calculará mediante:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Debido a que el valor de la fuerza se desconoce, se procederá a despejar la ecuación 2.1.

$$F = \sigma * A$$

El valor del esfuerzo del material se igualará a la resistencia última a la tracción y se hallará el área de la sección reducida de la probeta, la cual está definida por:

$$A = \pi r^2$$

$$A = 1.256 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Se reemplazará los valores obtenidos anteriormente:

$$F = \left( 620 * 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) * (1.256 * 10^{-5} \text{ m}^2)$$

$$F = 7787.2 \text{ N}$$

$$F = 794.07 \text{ Kg}_f$$

Esta fuerza obtenida es la necesaria para que la probeta llegue a la fractura.

### 2.5.2. Tornillo de potencia

Para desarrollar el cálculo de esta sección, se tuvieron los siguientes datos conocidos:

*Paso de la cuerda* = 5 hilos por pulgada = 5.08 mm

*Diámetro del tornillo* = 18 mm

El diámetro de paso de la cuerda se lo obtendrá por:

$$d_p = d - \frac{p}{2} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$d_p = 15.46 \text{ mm}$$

Se determinará el diámetro del collarín:

$$d_c = \frac{D + d}{2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$d_c = 59 \text{ mm}$$

El diámetro de la raíz del tornillo será:

$$d_r = d - p \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$d_r = 12.92 \text{ mm}$$

El avance del tornillo se definirá por la ecuación:

$$\text{Avance (L)} = \# \text{ entradas} * \text{paso} \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$\text{Avance (L)} = 5.08 \text{ mm}$$

El torque para bajar la carga se la obtendrá con la siguiente expresión:

$$t_d = \left( \frac{F * d_p}{2} \right) * \left( \frac{u * \pi * d_p - L}{\pi * d_p + u * L} \right) + \left( \frac{u_c * F * d_c}{2} \right) \quad \text{Ec. 2.10}$$

Se asumirá un valor de 0.15 para el coeficiente de fricción, para obtener el torque para bajar la carga:

$$t_d = \left( \frac{7787.2 \text{ N} * 15.46 \text{ mm}}{2} \right) * \left( \frac{0.15 * \pi * 15.46 \text{ mm} - 5.08}{\pi * 15.46 \text{ mm} + 0.15 * 5.08} \right) + \left( \frac{0.15 * 7787.2 \text{ N} * 34 \text{ mm}}{2} \right)$$

$$t_d = 22.54 \text{ KN} * m$$

### **Esfuerzos en el tornillo**

El esfuerzo axial en el tornillo se lo determinará con:

$$\sigma = \frac{F}{A_t} \quad \text{Ec. 2.2}$$

El valor del diámetro a considerar en el área, será el diámetro de raíz.

$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi d_r^2}{4}}$$

$$\sigma = 59.39 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

El esfuerzo de torsión en el tornillo de Potencia se encontrará mediante:

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$\tau = \frac{16 * T}{\pi * d_r^3}$$

$$\tau = 53.22 \frac{N}{mm^2}$$

Se hallará el factor de seguridad del tornillo de potencia, usando la teoría de Von Mises

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \text{Ec. 2.11}$$

A partir del esfuerzo admisible de Von Mises se logrará obtener el valor deseado.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$\sigma' = 109.65 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

El valor de la resistencia a la fluencia del acero A36 será de:

$$S_y = 250 \text{ MPa}$$

Se reemplazará los valores obtenidos en la ecuación 2.11:

$$n = \frac{250 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{109.65 * 10^6 \frac{N}{m^2}}$$

$$n = 2.3$$

La eficiencia del tornillo se la obtendrá mediante la ecuación:

$$e = \frac{1 - u \tan \lambda}{1 + u \cot \lambda} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Como no se tiene el valor del ángulo de avance, se lo calculará por medio:

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi * d_p} \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$\lambda = 5.97^\circ$$

Una vez obtenido todas las incógnitas en la fórmula de la eficiencia, se hallará su respectivo valor:

$$e = \frac{1 - (0.15 * \tan 5.97)}{1 + (0.15 * \cot 5.97)} = 0.40 = 40\%$$

### **Velocidad de Deformación**

Se calculará la velocidad a la cual girará el tornillo de potencia. Para lo cual se determinará una relación que estará dada por la velocidad lineal del tornillo de potencia y la velocidad angular del piñón respectivamente:

$$v = \frac{x}{t} \quad \text{Ec. 2.15}$$

$$w = \frac{\theta}{t} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Entonces despejando  $w$ ,

$$w = v * \frac{\theta}{x} \quad \text{Ec 2.17}$$

$$w = 2.5 * 10^{-7} \frac{m}{s} * \frac{1 \text{ rev}}{5.08 \text{ mm}} * \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} * \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ min}}$$

$$w = 0.0029 \text{ rpm}$$

### **Potencia Requerida para el tornillo de potencia (PR):**

Se procederá a calcular la potencia requerida para hacer girar el tornillo de potencia.

$$\text{Potencia Requerida} = T * w \quad \text{Ec. 2.18}$$

$$PR = 0.00684 \text{ Watts} * \frac{0.0013 \text{ HP}}{1 \text{ watt}}$$

$$PR = 0.0000088 \text{ HP}$$

### **2.5.3. Reducción de velocidad**

Una vez que se ha determinado la velocidad angular a la que deberá girar el tornillo de potencia. Se definirá las distintas reducciones de velocidad que se requerirán. Se obtendrá un motor de 2 HP a 1725 rpm, seguido de una transmisión de banda con una relación de reducción de 3:1, por lo que se obtendrá 575 rpm. Se encontró una doble caja reductora sinfín-corona, la cual la primera reducción será de 15:1 y la segunda de 50:1. El eje de salida en la segunda reducción girará a 0.766 rpm. Como aún no se logra la

velocidad angular requerida se colocará una transmisión cadena-catarina con una relación de reducción de 2:1, en la que se obtendrá 0.383 rpm.

Se instalará otra caja reductora sinfín-corona con una relación de reducción de 60:1, consiguiéndose una velocidad de 0.0064 rpm. La velocidad obtenida es cercana al valor requerido, pero para tener una mayor exactitud y estar en el rango de la norma se decidirá colocar una transmisión por cadena-catarina con una relación de reducción de 2.4:1, se conseguirá al final de todas estas reducciones 0.0026 rpm, la cual se encuentra en el rango dado por la norma ASTM G-129.

#### **2.5.4. Transmisión por Banda y Cadena**

##### **Selección de Primera Transmisión por cadena**

Se escogerá una relación de reducción de velocidad de 2:1, para lo cual se calculará la velocidad angular de salida de la siguiente manera:

$$m = \frac{w_e}{w_s} \quad \text{Ec. 2.53}$$

$$w_s = 0.383 \text{ rpm}$$

Se especificará un factor de servicio (10) y se calculará la potencia de diseño. A partir de la tabla del apéndice 3, para un tipo de carga ligera y un motor eléctrico se tendrá un factor de servicio de 1. Además la tercera caja reductora necesita 0.0000277 HP.

$$\text{Potencia de diseño} = (1) * (0.0000277 \text{ HP}) \quad \text{Ec. 2.54}$$

$$\text{Potencia de diseño} = 0.0000277 \text{ HP}$$

Se escogerá una rueda dentada de 12 dientes, por lo que se deberá encontrar los dientes de la segunda rueda dentada.

$$N_2 = N_1 * \text{relación} \quad \text{Ec. 2.55}$$

$$N_2 = 24 \text{ dientes}$$

Se procederá a calcular los diámetros de paso de las ruedas dentadas y se escogerá una cadena de 0.5 pulgadas de paso:

$$D_1 = \frac{p}{\text{sen}\left(\frac{180}{N_1}\right)} \quad \text{Ec. 2.56}$$

$$D_1 = 1.93 \text{ pulgadas}$$

$$D_2 = \frac{p}{\text{sen}\left(\frac{180}{N_1}\right)}$$

$$D_2 = 3.83 \text{ pulgadas}$$

Se utilizará la siguiente expresión para calcular la longitud de cadena que se necesita en pasos.

$$L = 2C + \frac{N_2 + N_1}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 C} \quad \text{Ec. 2.57}$$

$$L = 98.1823 \text{ pasos}$$

Se deberá especificar un número entero de pasos para la longitud de la cadena y se calculará la distancia central máxima.

$$C = \frac{1}{4} \left[ L - \frac{N_2 + N_1}{2} + \sqrt{\left( L - \frac{N_2 + N_1}{2} \right)^2 - \frac{8(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2}} \right] \quad \text{Ec. 2.58}$$

$$C = 39.95 \text{ pasos} = 39.95 * 0.5 \text{ pulg.} = 19.975 \text{ pulgadas}$$

$$\text{Distancia central máxima (C)} = 19.975 \text{ pulgadas}$$

*Paso* = cadena número 40, paso de 1/2 pulgada

*Distancia central máxima (C)* = 19.975 pulgadas

*Ruedas dentadas* = Tramo único, número 40, paso de 1/2 pulgada

*Pequeña* = 12 dientes, D = 1.93 pulgadas

*Grande* = 24 dientes, D = 3.83 pulgadas

### **Selección de Segunda Transmisión por cadena**

Se escogerá una relación de reducción de velocidad de 2.4:1, con una cadena paso 40

Como se realizarán los mismos cálculos pero con diferentes parámetros que la primera transmisión por cadena, se obtendrá una tabla con los resultados obtenidos.

**TABLA 5**  
**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SEGUNDA**  
**TRANSMISIÓN POR CADENA**

|                |               |       |                |
|----------------|---------------|-------|----------------|
| $w_s$          | 0.0026 rpm    | $D_2$ | 3.83 pulgadas  |
| Pot. de diseño | 0.0000088 HP  | $L$   | 97.124 pasos   |
| $N_2$          | 24 dientes    | $C$   | 19.96 pulgadas |
| $D_1$          | 1.61 pulgadas |       |                |

**Selección de transmisión por banda:**

Se especificará un factor de servicio y se calculará la potencia de diseño. A partir de la tabla 4.1 del apéndice 4 (14), para un motor eléctrico con un servicio normal y un motor eléctrico se tendrá un factor de servicio de 1.2

*Diseño de caballos de fuerza:*

$$\text{Diseño HP} = \text{Requisito de HP} * \text{Factor de servicio} \quad \text{Ec. 2.54}$$

$$\text{Diseño HP} = 2 * 1.2 = 2.4 \text{ HP}$$

Se determinará la sección transversal de la banda por medio de la tabla 4.1 en el apéndice 4, se localizará en la tabla la potencia de diseño y se buscará las RPM del eje más rápido. El punto donde

las líneas se intersectarán será la sección de la banda recomendada.

*Sección transversal por tabla = A*

Se encontrará el diámetro mínimo de la polea por medio de la tabla 4.3 apéndice 4, se encontrará la intersección de la potencia de diseño y la velocidad del motor, para obtener el diámetro mínimo recomendado.

*Diámetro mínimo de polea = 2.5 pulgadas*

**Selección de transmisión:**

*Rpm de la unidad motriz = 1725 rpm*

*Rpm de la unidad impulsada= 575 rpm*

Se observará las tablas de la selección de transmisión para localizar la sección de banda aplicable. Con los RPM de la unidad motriz y de la unidad impulsada se determinará los HP por banda y la combinación de polea que se requiere:

*Rpm de la unidad motriz = 1725 rpm*

*Rpm de la unidad impulsada= 575 rpm*

*HP por banda = 2.15 HP*

**Combinación de polea:**

Diámetro pequeño = 3 pulgadas

Diámetro grande = 9 pulgadas

Se calculará la potencia corregida se multiplicará la potencia por banda con el factor de corrección, el cual se lo encontrará en la tabla 4.4 de la sección de transmisión.

$$HP \text{ corregido} = 2.15 * \text{factor de de corrección} \quad \text{Ec. 2.60}$$

$$HP \text{ corregido} = 2.15$$

Se encontrará el número de bandas requeridas relacionando la potencia de diseño para la potencia corregida.

$$\# \text{ bandas} = \frac{\text{Potencia de diseño}}{\text{Potencia corregida por banda}} \quad \text{Ec. 2.59}$$

$$\# \text{ bandas} = 1.11 \approx 1 \text{ Banda}$$

### **2.5.5. Cajas reductoras de velocidad y selección de rodamientos**

#### **Diseño de 1 caja**

Se diseñará el tornillo sinfín y la corona que estarán en la primera caja reductora. Para lo cual se tomarán como condiciones de diseño los siguientes datos:

*Velocidad de entrada* = 575 rpm

$i_w$  = 2 entradas

*Relación de reducción (m)= 15:1*

Se encontrará la velocidad angular que se obtendrá a la salida de la caja reductora, por medio de:

$$m = \frac{W_{entrada}}{W_{salida}} \quad \text{Ec. 2.20}$$

$$W_{salida} = 38.333 \text{ rpm}$$

Se procederá a calcular el número de dientes de la corona, utilizando como dato el número de entradas del tornillo sinfín y la relación de reducción:

$$N_g = m * i_w \quad \text{Ec. 2.19}$$

$$N_g = 30 \text{ dientes}$$

Se asumirá una distancia entre centros de 2 pulgadas para realizar el cálculo y obtener un diámetro adecuado del tornillo sinfín, para posteriormente comparar si la suposición fue la correcta.

Se analizará la geometría reemplazando el valor asumido en la siguiente ecuación para obtener un valor tentativo del diámetro de paso del tornillo de potencia.

$$D_w = \frac{C^{0.875}}{2.2} \quad \text{Ec. 2.21}$$

$$D_w = 0.833 \text{ pulgadas}$$

Con los datos obtenidos se procederá a encontrar el valor del diámetro de paso de la corona.

$$D_g = (2 * C) - D_w \quad \text{Ec. 2.22}$$

$$D_g = 3.167 \text{ pulgadas}$$

El paso axial del sin fin se lo hallará de la siguiente forma:

$$p = \frac{\pi * D_g}{N_g} \quad \text{Ec. 2.23}$$

$$p = 0.331 \text{ pulgadas}$$

El avance del tornillo de potencia se lo definirá por:

$$L = i_w * p \quad \text{Ec. 2.24}$$

$$L = 0.662 \text{ pulgadas}$$

Se obtiene el ángulo de avance a través de la siguiente ecuación, la cual debe ser hasta  $12^\circ$  por lo que se tiene dos entradas en el tornillo sin fin.

$$\lambda = \text{artg} \frac{L}{\pi * D_w} \quad \text{Ec. 2.25}$$

$$\lambda = 12^\circ$$

Se definirá el paso normal del tornillo sin fin:

$$p_n = p * \cos \lambda \quad \text{Ec. 2.26}$$

$$p_n = 0.3237 \text{ pulgadas}$$

Según AGMA, el valor calculado se deberá acercar, al paso normal estándar más frecuente:

$$p_n = 0.30 \text{ pulgadas} \rightarrow \text{estandar}$$

Se recalculará todas las operaciones anteriores con el nuevo valor del paso normal:

$$p = \frac{p_n}{\cos \lambda}$$

$$p = 0.306 \text{ pulgadas}$$

$$L = i_w * p$$

$$L = 0.612 \text{ pulgadas}$$

$$D_w = \frac{L}{\pi * Tg\lambda}$$

$$D_w = 0.916 \text{ pulgadas}$$

$$D_g = \frac{p * N_g}{\pi}$$

$$D_g = 2.922 \text{ pulgadas}$$

La distancia entre centros se la podrá obtener de la siguiente manera:

$$C = \frac{D_w + D_g}{2} \quad \text{Ec. 2.27}$$

$$C = 1.92 \text{ pulgadas}$$

Se realizará la comprobación de la distancia entre centros por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{C^{0.875}}{3} \leq D_w \leq \frac{C^{0.875}}{1.7} \quad \text{Ec. 2.28}$$

$$0.589 \leq 0.916 \leq 1.040$$

Como resultado de este análisis se concluye que se diseñará con  $\lambda = 12^\circ$  y se escogerá un ángulo de presión ( $\Theta$ ) de  $20^\circ$

Se diseñará la proporción de los dientes por medio del apéndice 2:

$$a = 0.3183 * p$$

$$a = 0.097 \text{ pulgadas}$$

$$d = 0.3683 * p$$

$$d = 0.112 \text{ pulgadas}$$

$$h = a + d$$

$$h = 0.21 \text{ pulgadas}$$

El diámetro exterior del tornillo sin fin se lo determinará por el uso de la siguiente ecuación:

$$D_{ow} = D_w + 2a \quad \text{Ec. 2.29}$$

$$D_{ow} = 1.11 \text{ pulgadas}$$

La longitud del tornillo sin fin se logrará determinar por:

$$L_w = \left(4.5 + \frac{N_g}{50}\right) * p \quad \text{Ec. 2.30}$$

$$L_w = 1.5606 \text{ pulgadas}$$

El ancho efectivo de la corona se la obtendrá a través:

$$F_e = \sqrt{D_{ow}^2 - D_w^2} \quad \text{Ec. 2.31}$$

$$F_e = 0.627 \text{ pulgadas}$$

El ancho real de la corona se la definirá a partir de:

$$F = 1.05 * F_e \quad \text{Ec. 2.32}$$

$$F = 0.658 \text{ pulgadas}$$

Para determinar el diámetro de la garganta de la corona se usará:

$$D_t = D_g + 2a \quad \text{Ec. 2.33}$$

$$D_t = 3.116 \text{ pulgadas}$$

El diámetro exterior de la corona se lo encontrará con la siguiente fórmula:

$$D_{og} = D_t + (D_w - 2a) - \sqrt{(D_w - 2a)^2 - (0.8 * F)^2} \quad \text{Ec. 2.34}$$

$$D_{og} = 3.34 \text{ pulgadas}$$

Se procederá a definir las velocidades de operación del tornillo sinfín y de la corona respectivamente usando las siguientes ecuaciones:

$$v_w = \frac{\pi * D_w * rpm_w}{12} \quad \text{Ec. 2.35}$$

$$v_w = 137.88 \frac{ft}{min}$$

$$v_g = \frac{\pi * D_g * rpm_g}{12} \quad \text{Ec. 2.36}$$

$$v_g = 29.323 \frac{ft}{min}$$

La velocidad friccional se la calculará por medio:

$$v_s = \frac{v_g}{\text{sen } \lambda} \quad \text{Ec. 2.37}$$

$$v_s = 141.035 \frac{ft}{min}$$

El factor de fricción se obtendrá por:

$$f = \frac{0.32}{v_s^{0.36}} \quad \text{Ec. 2.38}$$

$$f = 0.053$$

Para conocer si la transmisión es irreversible se usará la siguiente expresión:

$$\tan \lambda * \cos \theta < f \quad \text{Ec. 2.39}$$

$$0.199 < 0.053$$

Se concluye que la transmisión es reversible.

### Diseño de caja 2

Se diseñará el tornillo sinfín y la corona que estarán en la segunda caja reductora. Para lo cual se tomarán como condiciones de diseño los siguientes datos:

*Velocidad de entrada* = 38.333 rpm

$i_w = 1$  entrada

*Relación de reducción (m)* = 50:1

Como se realizarán los mismos cálculos que la primera caja reductora, se obtendrá una tabla con los resultados obtenidos.

**TABLA 6**  
**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SEGUNDA CAJA**  
**REDUCTORA**

|              |                |          |                         |
|--------------|----------------|----------|-------------------------|
| $w_{salida}$ | 0.766 rpm      | h        | 0.205 pulgadas          |
| $N_g$        | 50 dientes     | $D_{ow}$ | 1.374 pulgadas          |
| $D_w$        | 1.184 pulgadas | $L_w$    | 1.655 pulgadas          |
| $D_g$        | 4.79 pulgadas  | $F_e$    | 0.697 pulgadas          |
| $p$          | 0.301 pulgadas | F        | 0.731 pulgadas          |
| $L$          | 0.302 pulgadas | $D_t$    | 4.98 pulgadas           |
| $\lambda$    | 4.626°         | $D_{og}$ | 5.17 pulgadas           |
| $\Theta$     | 20°            | $V_w$    | 11.882 $\frac{ft}{min}$ |
| $p_n$        | 0.30 pulgadas  | $v_g$    | 0.96 $\frac{ft}{min}$   |
| C            | 2.987 pulgadas | $v_s$    | 11.90 $\frac{ft}{min}$  |
| a            | 0.095 pulgadas | f        | 0.094                   |
| d            | 0.11 pulgadas  |          |                         |

Una vez obtenido todos estos resultados se concluye que la transmisión es irreversible.

### Diseño de caja 3

Se diseñará el tornillo sinfín y la corona que estarán en la tercera caja reductora. Para lo cual se tomarán como condiciones de diseño los siguientes datos:

*Velocidad de entrada* = 0.383 rpm

$i_w = 1$  entrada

*Relación de reducción (m)* = 60:1

Como se realizarán los mismos cálculos que la primera caja reductora, se obtendrá una tabla con los resultados obtenidos.

**TABLA 7**  
**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA TERCERA CAJA**  
**REDUCTORA**

|              |               |          |                      |
|--------------|---------------|----------|----------------------|
| $w_{salida}$ | 0.0064 rpm    | h        | 0.137 pulgadas       |
| $N_g$        | 60 dientes    | $D_{ow}$ | 1.128 pulgadas       |
| $D_w$        | 1 pulgada     | $L_w$    | 1.14 pulgadas        |
| $D_g$        | 3.82 pulgadas | $F_e$    | 0.521 pulgadas       |
| p            | 0.2 pulgadas  | F        | 0.547 pulgadas       |
| L            | 0.2 pulgadas  | $D_t$    | 3.948 pulgadas       |
| $\lambda$    | 3.64°         | $D_{og}$ | 4.065 pulgadas       |
| $\Theta$     | 20°           | $V_w$    | 0.1 $\frac{ft}{min}$ |

|       |                |       |                        |
|-------|----------------|-------|------------------------|
| $p_n$ | 0.20 pulgadas  | $v_g$ | $0.006 \frac{ft}{min}$ |
| C     | 2.41 pulgadas  | $v_s$ | $0.094 \frac{ft}{min}$ |
| a     | 0.064 pulgadas | f     | 0.248                  |
| d     | 0.073 pulgadas |       |                        |

Una vez obtenido todos estos resultados se concluye que la transmisión es irreversible.

### **Eficiencia de las cajas reductoras**

Para determinar la potencia del motor se necesitará encontrar las eficiencias de las cajas reductoras, para lo cual se dividirá la potencia requerida que se necesita para mover el tornillo para la eficiencia de la cadena (90%).

### **Por la transmisión de cadena:**

$$\frac{\text{Potencia requerida}}{90\%} = \frac{0.0000088 \text{ HP}}{90\%} = 0.0000097 \text{ HP}$$

$$P_0 = 0.0000097 \text{ HP}$$

El resultado obtenido será la potencia de salida de la tercera caja reductora. La cual se la reemplazará en la siguiente fórmula para obtener el torque de la corona.

$$P_0 = \frac{T_g n_g}{63000} \quad \text{Ec. 2.40}$$

$$T_g = \frac{P_0 * 63000}{n_g}$$

$$T_g = 95.484 \text{ lb} * \text{pulg.}$$

Se hallará la fuerza tangencial que se genera en la corona, reemplazando los valores ya obtenidos previamente.

$$w_{tg} = \frac{2 * T_g}{D_g} \quad \text{Ec. 2.41}$$

$$w_{tg} = 49.991 \text{ lb}$$

Se obtendrá la velocidad de línea de paso para poderla reemplazar posteriormente.

$$v_s = \frac{v_g}{\text{sen } \lambda} \quad \text{Ec. 2.45}$$

$$v_s = 0.094 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

El resultado obtenido se utilizará para hallar el coeficiente de fricción, usando la siguiente ecuación:

$$u = 0.124 * e^{-0.07 * v_s^{0.645}} \quad \text{Ec. 2.46}$$

$$u = 0.122$$

Se calculará la fuerza axial que actúa en la corona, por medio de la siguiente fórmula:

$$w_{ag} = w_{tg} \left( \frac{(\cos \theta * \text{sen} \lambda) + (u * \cos \lambda)}{(\cos \theta * \cos \lambda) - (u * \text{sen} \lambda)} \right) \quad \text{Ec. 2.43}$$

$$w_{ag} = 9.6965 \text{ lb}$$

En base a que la fuerza axial de la corona es igual a la fuerza tangencial del sinfín, se podrá encontrar el torque del sinfín.

$$w_{ag} = w_{tw} = \frac{2 * T_w}{d} \quad \text{Ec. 2.42}$$

$$9.6965 = \frac{2 * T_w}{1}$$

$$T_w = 4.848 \text{ lb} * \text{pulg.}$$

Se hallará la fuerza de fricción que actúa paralela a la cara de las cuerdas del sinfín y los dientes del engrane.

$$w_f = \frac{u * w_{tg}}{\cos\lambda * \cos\theta} \quad \text{Ec. 2.48}$$

$$w_f = 6.503 \text{ lb}$$

La pérdida de potencia debida a la fricción se la podrá determinar usando la siguiente ecuación:

$$P_L = \frac{v_s w_f}{330000} \quad \text{Ec. 2.50}$$

$$P_L = 0.000018 \text{ HP}$$

Para determinar la potencia de entrada de la última caja reductora, se sumará la potencia de salida y la perdida de potencia debido a la fricción.

$$P_i = P_o + P_L \quad \text{Ec. 2.49}$$

$$P_i = 0.0000277 \text{ HP}$$

Se calculará la eficiencia dela tercera caja reductora.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} * (100\%) \quad \text{Ec. 2.51}$$

$$\eta = 35.01\%$$

Se obtuvo una eficiencia baja por lo que hay mayor pérdida de potencia debido a la fricción por la velocidad bien baja que se obtiene.

### **Fuerza axial, tangencial y Eficiencia de la 2da caja**

Se calculará la potencia de salida de la segunda caja reductora, para la cual se deberá considerar la eficiencia de la cadena.

#### **Por la transmisión de cadena:**

$$\frac{\text{Potencia entrada}}{90\%} = \frac{0.0000277 \text{ HP}}{90\%} = 0.00003 \text{ HP}$$

$$P_0 = 0.00003 \text{ HP}$$

El resultado obtenido será la potencia de salida de la segunda caja reductora. La cual se la reemplazará en la siguiente fórmula para obtener el torque de la corona.

Como se realizarán los mismos cálculos que la tercera caja reductora, se obtendrá una tabla con los resultados obtenidos.

**TABLA 8**  
**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA FUERZA AXIAL,**  
**TANGENCIAL Y EFICIENCIA DE LA SEGUNDA REDUCCIÓN**

|          |                        |        |                 |
|----------|------------------------|--------|-----------------|
| $T_g$    | 2.467 lb * pulg        | $T_w$  | 0.105 lb * pulg |
| $w_{tg}$ | 1.03 lb                | $w_f$  | 0.0934 lb       |
| $v_s$    | $11.90 \frac{ft}{min}$ | $P_L$  | 0.0000336 HP    |
| $u$      | 0.085                  | $P_i$  | 0.0000636 HP    |
| $w_{ag}$ | 0.1778 lb              | $\eta$ | 47.16%          |

Se obtuvo una eficiencia más alta que el anterior debido a que no toda la potencia que ingresa a la caja reductora se pierde debido a la fricción. Además el torque del sin fin y de la corona van disminuyendo debido a que la velocidad va aumentando.

### **Fuerza axial, tangencial y Eficiencia de la 1 Caja**

El torque del sinfín de la segunda caja será igual al torque de la corona de la primera caja, debido a que están conectados por un matrimonio.

$$T_w \text{ de la caja \#2} = T_g \text{ de la caja \#1}$$

$$T_g = 0.105 \text{ lb * pulg.}$$

**TABLA 9**  
**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA FUERZA AXIAL,**  
**TANGENCIAL Y EFICIENCIA DE LA PRIMERA REDUCCIÓN**

|          |                          |        |                  |
|----------|--------------------------|--------|------------------|
| $P_0$    | 0.000063 HP              | $T_w$  | 0.0087 lb * pulg |
| $w_{tg}$ | 0.071 lb                 | $w_f$  | 0.0037 lb        |
| $v_s$    | $141.035 \frac{ft}{min}$ | $P_L$  | 0.0000158 HP     |
| $u$      | 0.049                    | $P_i$  | 0.0000788 HP     |
| $w_{ag}$ | 0.019 lb                 | $\eta$ | 79.94%           |

Se obtuvo una eficiencia alta debido a que no hay tanta pérdida de potencia por fricción. Debido a que la velocidad que se obtiene a la salida del eje no es lenta, el valor del torque disminuye con respecto a las otras cajas reductoras.

#### **Diseño de eje de 1era caja:**

Se realizará el cálculo para encontrar el factor de seguridad del eje de la corona usando el motor de 2 Hp que se utilizará en el banco de prueba, para lo cual se encontrará primero la potencia que llega al eje de entrada de la primera caja reductora, para lo cual se considerará la potencia real que llega al eje de salida del motor y además se tomará en cuenta la pérdida que se generará por la transmisión de banda, para lo cual se considerarán las eficiencias de cada uno.

$$P = 2 \text{ HP} * (0.786) * (0.95)$$

$$P = 1.49 \text{ HP}$$

Se calculará el Torque que se genera en la polea más lenta, para el cual se usará el valor de la potencia hallado.

$$P = \tau * w \quad \text{Ec. 2.61}$$

$$\tau = \frac{P}{w}$$

$$\tau = 163.31 \text{ lb} * \text{pulgadas}$$

Se hallará la fuerza tangencial que se generará en el sinfín, considerando que el torque de la polea más lenta será el mismo que se encontrará en el Tornillo Sinfín

$$W_{tw} = \frac{2 * T_w}{D_w} \quad \text{Ec. 2.42}$$

$$w_{tw} = 294.25 \text{ lb}$$

La fuerza tangencial del sinfín será la misma fuerza axial que se generará en la corona. Se usará la siguiente ecuación para determinar la fuerza tangencial de la corona

$$w_{tw} = w_{ag}$$

$$w_{ag} = w_{tg} \left( \frac{(\cos\theta * \text{sen}\lambda) + (u * \cos\lambda)}{(\cos\theta * \cos\lambda) - (u * \text{sen}\lambda)} \right) \quad \text{Ec. 2.43}$$

$$w_{tg} = \frac{w_{ag}}{\frac{(\cos\theta * \text{sen}\lambda) + (u * \cos\lambda)}{(\cos\theta * \cos\lambda) - (u * \text{sen}\lambda)}}$$

$$w_{tg} = 637.48 \text{ lb}$$

Se procederá a encontrar el torque que se genera en la corona.

$$w_{tg} = \frac{2 * T_g}{d} \quad \text{Ec. 2.41}$$

$$T_g = \frac{w_{tg} * d_g}{2}$$

$$T_g = 931.35 \text{ lb} * \text{pulg.}$$

Se hallará la fuerza de fricción que actúa paralela a la cara de las cuerdas del sinfín y los dientes del engrane.

$$w_f = \frac{u * w_{tg}}{\cos\lambda * \cos\theta} \quad \text{Ec. 2.48}$$

$$w_f = 90.55 \text{ lb}$$

La pérdida de potencia debida a la fricción se la podrá determinar usando la siguiente ecuación:

$$P_L = \frac{v_s w_f}{330000} \quad \text{Ec. 2.50}$$

$$P_L = 0.31 \text{ HP}$$

Para determinar la potencia de entrada de la primera caja reductora, se sumará la potencia de salida y la perdida de potencia debido a la fricción. Se hallará primero la potencia de salida.

$$P_0 = \frac{T_g * n_g}{63000} \quad \text{Ec. 2.40}$$

$$P_0 = 1.18 \text{ HP}$$

$$P_i = P_0 + P_L \quad \text{Ec. 2.49}$$

$$P_i = 1.49 \text{ HP}$$

$$\eta = \frac{P_0}{P_i} * (100\%) \quad \text{Ec. 2.51}$$

$$\eta = 79.19\%$$

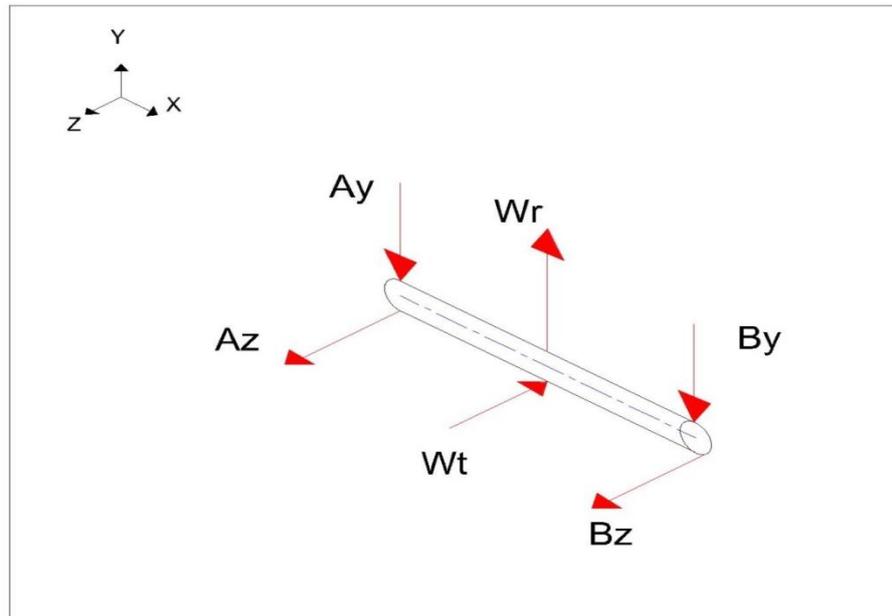
Se obtuvo una eficiencia alta debido a que no hay tanta pérdida de potencia por fricción. Debido a que la velocidad que se obtiene a la salida del eje no es lenta, el valor del torque deberá aumentar en cada caja reductora, ya que la velocidad irá decreciendo.

Se determinará la fuerza radial de la corona por medio de la siguiente ecuación:

$$W_{rg} = \frac{(w_{tg} * \text{sen } \theta)}{(\cos \theta * \cos \lambda) - (\mu * \text{sen } \lambda)} \quad \text{Ec. 2.44}$$

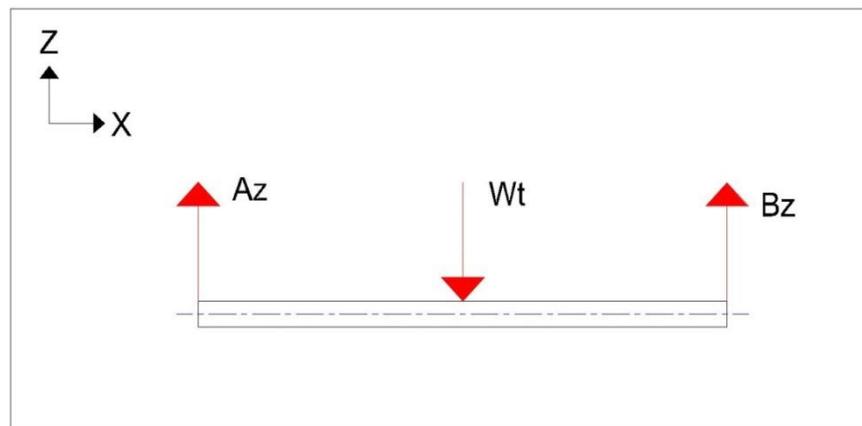
$$W_{rg} = 1066.97 \text{ N}$$

Se realizará un diagrama de cuerpo libre de todas las fuerzas que están siendo aplicadas en el eje de la corona. Las reacciones ( $A_y, A_z, B_y, B_z$ ) son producidas por los rodamientos. La corona que se acopla al eje producirá una fuerza radial ( $W_r$ ) y otra fuerza tangencial ( $W_t$ ).



**Figura 2.6. Diagrama de cuerpo libre en 3 dimensiones para eje de corona 1**

Se procederá a separar las fuerzas en el plano z-x, para encontrar los respectivos valores de estas incógnitas.



**Figura 2.7. Diagrama de Cuerpo Libre en Plano Z-X para Eje de Corona 1**

$$EM_a = 0$$

$$-W_t(32) + B_z(57) = 0$$

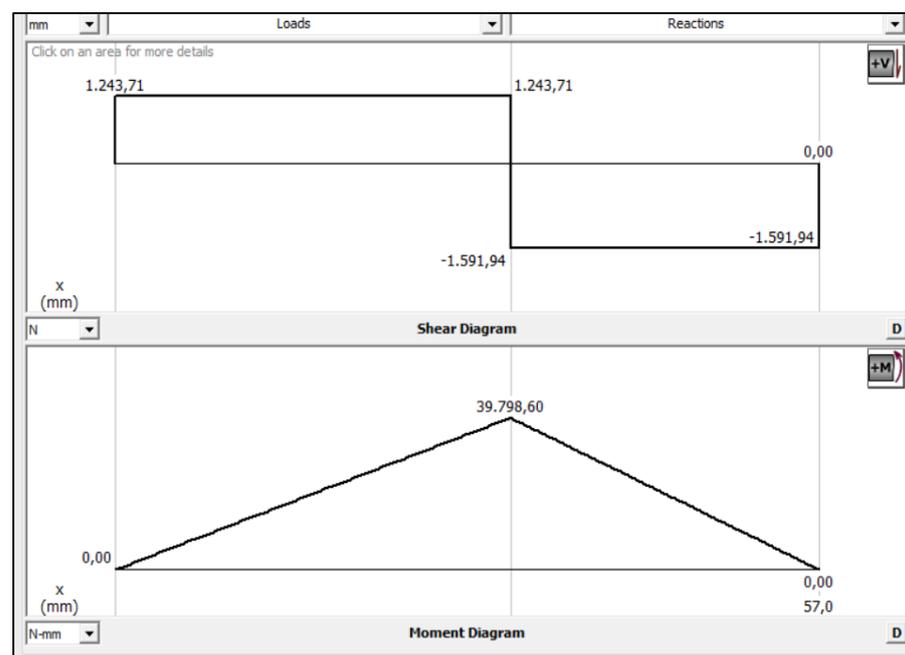
$$B_z = 1591.94 \text{ N}$$

$$Ef_y = 0$$

$$A_z - W_t + B_z = 0$$

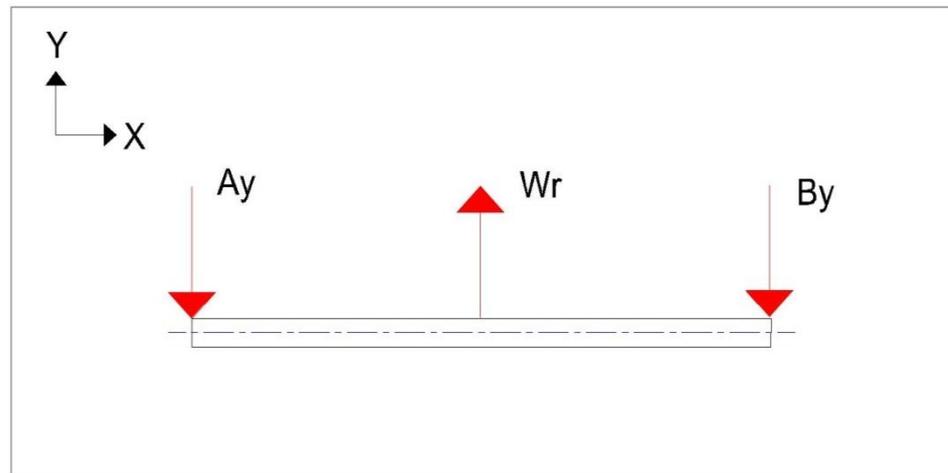
$$A_z = 1243.71 \text{ N}$$

Una vez encontradas las respectivas fuerzas aplicadas en la dirección correspondiente, la figura 2.8 presenta el diagrama de Fuerza Cortante y el de Momento flector mediante el programa MDSolid.



**Figura 2.8. Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje de la Corona 1 plano Z-X**

Se calcularán las fuerzas que están inmersas en el plano Y-X como se muestra en la figura 2.9:



**Figura 2.9. Diagrama de cuerpo libre en plano Y-X para eje de la corona 1**

$$EM_a = 0$$

$$W_r(32) - B_y(57) = 0$$

$$B_y = 599 \text{ N}$$

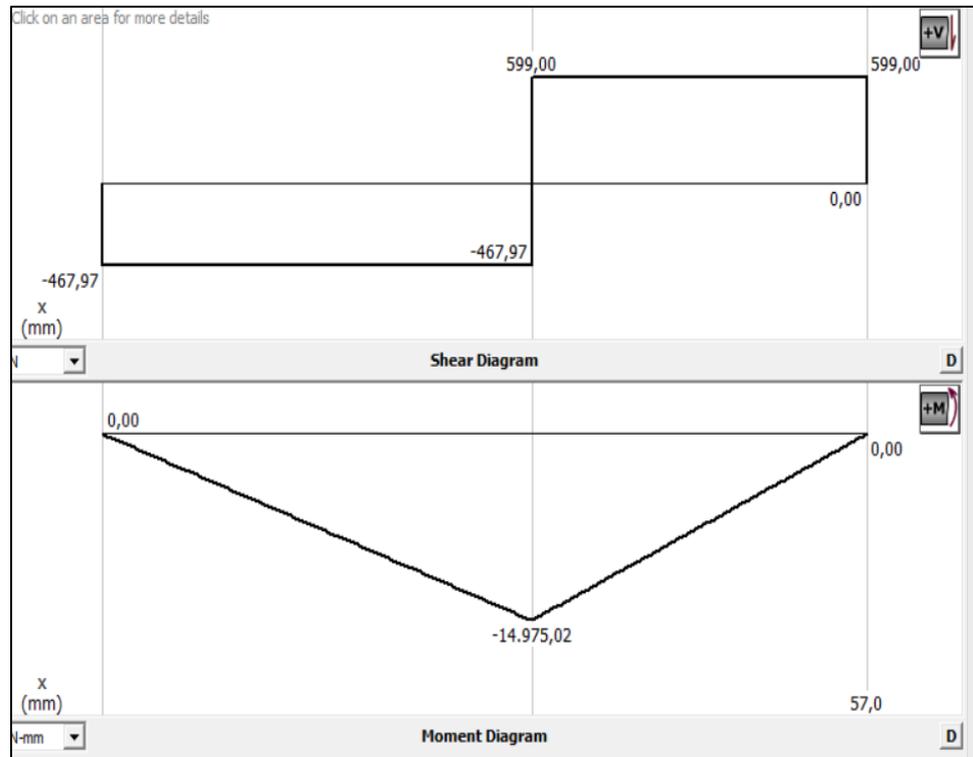
$$Ef_y = 0$$

$$-A_y + W_r - B_y = 0$$

$$A_y = 467.97 \text{ N}$$

Una vez encontradas las respectivas fuerzas aplicadas en la dirección correspondiente, se realizará el diagrama de Fuerza

Cortante y el de Momento flector mediante el programa MDSolid presentado en la figura 2.10.



**Figura 2.10. Diagrama de fuerza cortante y momento flector para eje de la corona 1 plano YX**

Se procederá a encontrar el momento máximo, de la siguiente manera:

$$M = \sqrt{39798.60^2 + 14975.02^2}$$

$$M = 42.42 \text{ Nm}$$

El eje de la corona estará sometido a un esfuerzo de flexión y a su vez a un esfuerzo torsor, Se calculará el esfuerzo de flexión que se produce en el eje por medio:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad \text{Ec. 2.62}$$

$$\sigma = 3.14 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$t_g = 931.35 \text{ lb} * \text{pulg} = 105.22 \text{ Nm}$$

El esfuerzo torsor se produce por el torque de la corona originado por la fuerza tangencial de la misma, la cual estará excéntrica al eje y se la calculará mediante:

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad \text{Ec. 2.63}$$

$$\tau = 7.77 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Se comprobará el factor de seguridad del eje diseñado a fatiga. El eje estará sometido a un esfuerzo combinado reversible. Será combinado por que tendrá un esfuerzo de flexión y torsor. Será reversible ya que se tendrá un eje giratorio cargado a flexión y además ya que en una posición determinada un elemento en la parte inferior del eje tendrá un esfuerzo de tensión, mientras que uno en la parte superior tendrá un esfuerzo de compresión, de igual magnitud. Como el eje estará girando tendrá una inversión

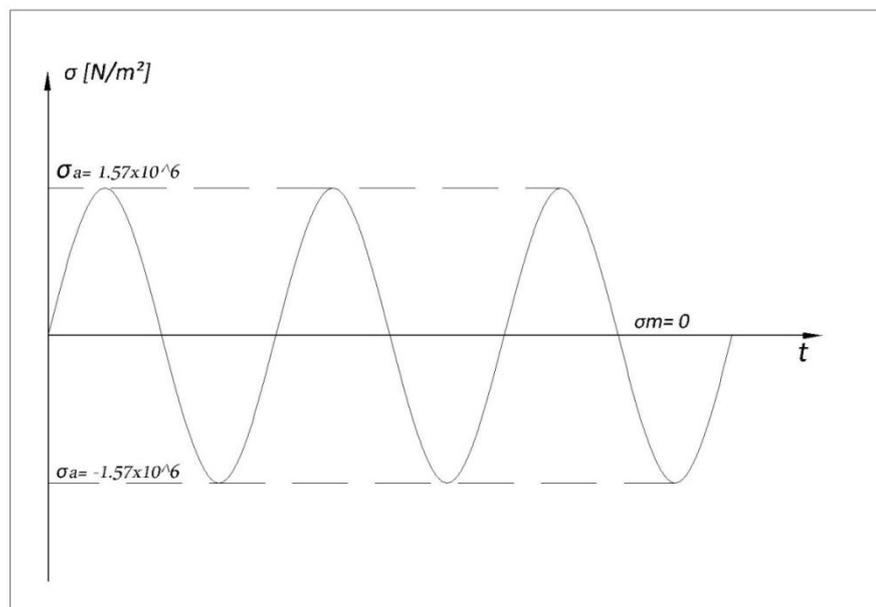
completa de esfuerzos, tal como se muestra en la figura 2.11. El esfuerzo torsor no tendrá esta variación, se representará como una línea recta ya que la corona ejercerá un torque constante sobre el eje debido a que no existe una fuerza fluctuante, tal como se muestra en la figura 2.12.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} + \left( \frac{\sigma'_a}{S_e} * K_f \right) \quad \text{Ec. 2.67}$$

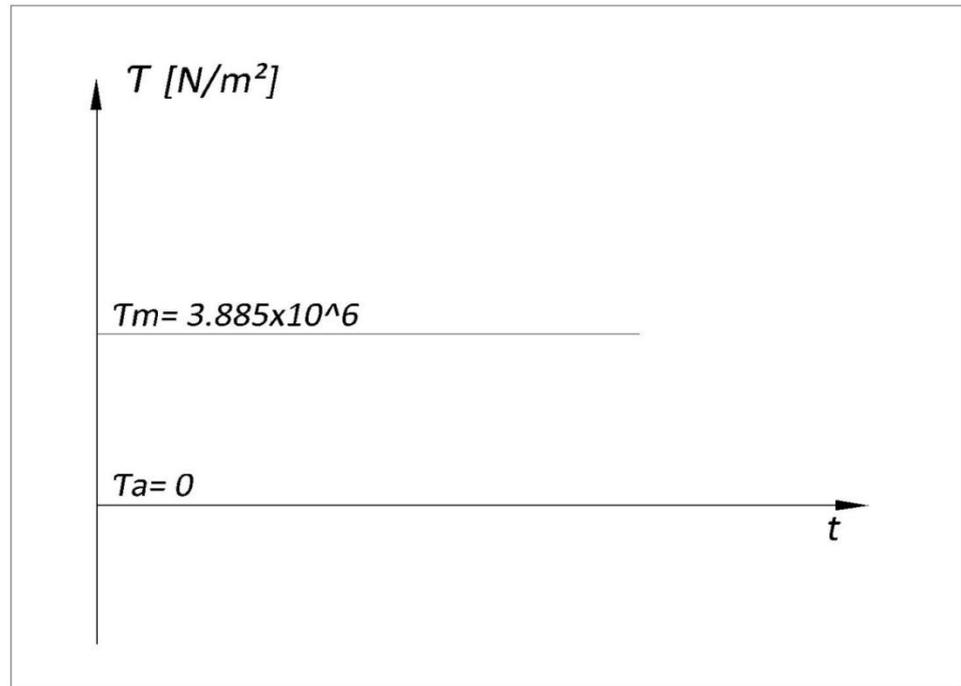
El esfuerzo alternativo y medio se lo calculará usando la siguiente expresión:

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3(\tau_m^2)} \quad \text{Ec. 2.68}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3(\tau_a^2)} \quad \text{Ec. 2.69}$$



**Figura 2.11 Ciclo Invertido para el Eje de la Corona de la Primera Caja Reductora**



**Figura 2.12 Esfuerzo Torsor para el Eje de la Corona de la Primera Caja Reductora**

$$\sigma_a = 1.57 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_m = 0$$

$$\tau_a = 0$$

$$\tau_m = 3.885 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Entonces,

$$\sigma'_m = 6.72 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma'_a = 1.57 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} + \left( \frac{\sigma'_a}{S_e} * K_f \right)$$

El límite de resistencia a la fatiga sin corregir ( $S_e'$ ) se la obtiene de la ecuación (2.64).

$$S_e' = 0.5 S_{ut} \quad \text{Ec. 2.64}$$

$$S_e' = 490 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga corregido ( $S_e$ ) se requiere que se determinen varios factores  $C_c$ , se obtendrá a partir de la tabla 5.1.  $C_t$ , se encontrará de la tabla 5.3,  $C_R$ , se seleccionará de la tabla 5.4 para un nivel de confiabilidad de 99%. El factor de tamaño  $C_{TA}$  se obtendrá a partir de la ecuación mostrada en la tabla 5.2. Todas estas tablas descritas se encuentran incluidas al final del trabajo en el apéndice 5.

$$C_c = 1$$

$$C_t = 1$$

$$C_R = 0.814 \rightarrow 99\%$$

$$C_s = 0.71$$

$$C_{TA} = 1.70$$

$$S_e = S_e' C_c C_t C_R C_S C_{TA}$$

$$S_e = 481 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

La sensibilidad de la muesca se la obtendrá a partir de la tabla 5.5 del apéndice 5. El radio del chavetero del eje será de 6 mm

$$r = 6 \rightarrow q = 0.92$$

El factor de concentración ( $k_t$ ) se calculará en el punto donde se obtuvo el momento máximo, usando la tabla 5.6 en el apéndice 5:

$$k_t = 1.6$$

El factor de concentración de esfuerzo por fatiga se lo obtendrá de la siguiente ecuación:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad \text{Ec. 2.66}$$

$$k_f = 1.552$$

$$\frac{1}{n} = \frac{6.72 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{980 * 10^6 \frac{N}{m^2}} + \left( \frac{1.57 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{481 * 10^6 \frac{N}{m^2}} * 1.54 \right)$$

$$n = 84$$

Se obtuvo un factor de seguridad adecuado para el diseño del eje de la corona para la primera caja reductora

### Diseño de eje de 2da caja:

El torque de la corona de la primera caja será igual al torque del sinfín de la segunda caja. Como los cálculos serán los mismos realizados en la primera caja reductora pero con diferentes parámetros, se hará una tabla con resultados.

**TABLA 10**  
**RESULTADOS OBTENIDOS DEL EJE DE LA SEGUNDA**  
**CAJA REDUCTORA**

|          |                   |          |           |
|----------|-------------------|----------|-----------|
| $w_{tw}$ | 1355.67 lb        | $P_0$    | 0.555 HP  |
| $w_{tg}$ | 1543.72 lb        | $P_i$    | 1.18 HP   |
| $T_g$    | 2255.37 lb * pulg | $\eta$   | 47.03%    |
| $w_f$    | 140.09 lb         | $W_{rg}$ | 2525.97 N |
| $P_L$    | 0.624 HP          |          |           |

Se tendrá una relación de velocidad de 2:1 en la transmisión por cadena, por lo que se procederá a calcular la fuerza total del piñón de la siguiente manera:

$$\text{Relación} \rightarrow 2:1$$

$$T_1 = 2T_2$$

$$T_1 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$2T_2 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$T_2 r = \text{Torque}$$

$$T_2 = \frac{\text{Torque}}{r}$$

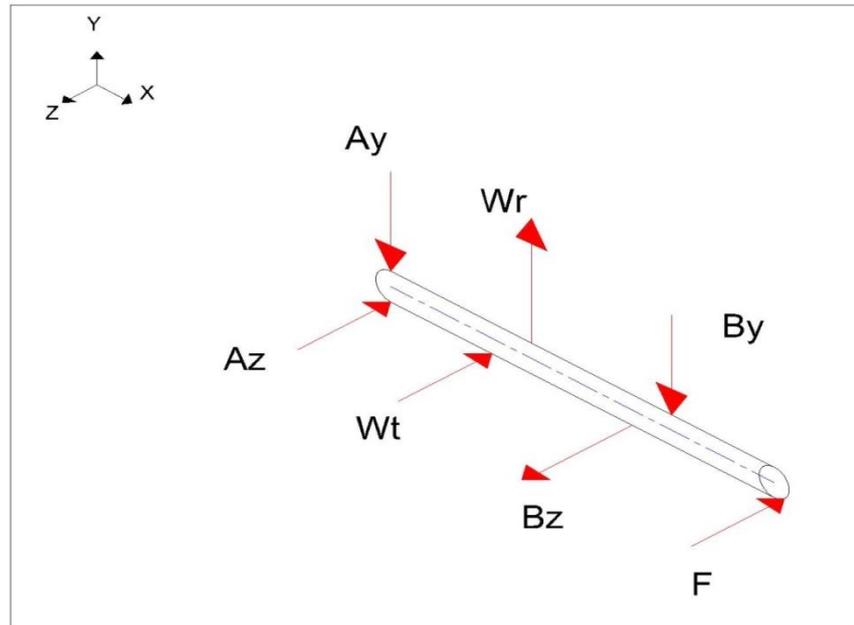
$$T_2 = 1105.57 \text{ lb}_f$$

$$T_1 = 2211.14 \text{ lb}_f$$

$$F = T_2 + T_1$$

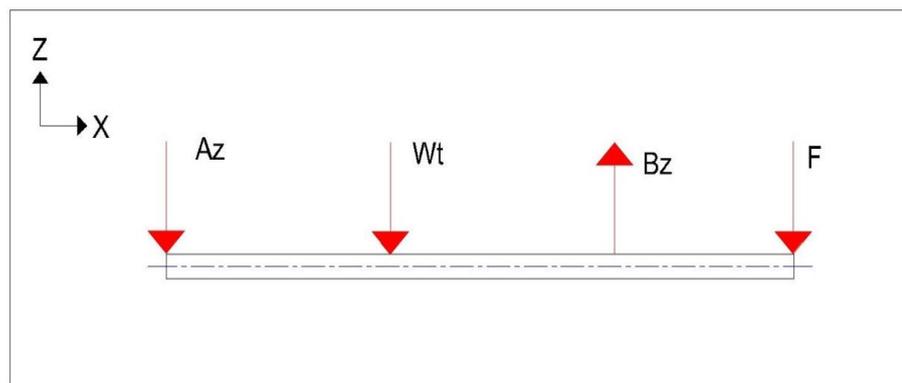
$$F = 14753.46 \text{ N}$$

Se realizará un diagrama de cuerpo libre de todas las fuerzas que están siendo aplicadas en el eje de la corona como el mostrado en la figura 2.13. Las reacciones ( $A_y, A_z, B_y, B_z$ ) son producidas por los rodamientos. La corona que se acopla al eje producirá una fuerza radial ( $W_r$ ) y otra fuerza tangencial ( $W_t$ ). Además se colocará la fuerza que se genera en piñón más rápido



**Figura 2.13. Diagrama de Cuerpo Libre en 3 Dimensiones para Eje de Corona 2**

Se procederá a separar las fuerzas en el plano z-x, para encontrar los respectivos valores de estas incógnitas para esto, se representará en el diagrama de cuerpo libre de la figura 2.14.



**Figura 2.14. Diagrama de Cuerpo Libre en Plano Z-X para Eje de la Corona 2**

$$EM_a = 0$$

$$-W_t(41) + B_z(125.5) - F(187.35) = 0$$

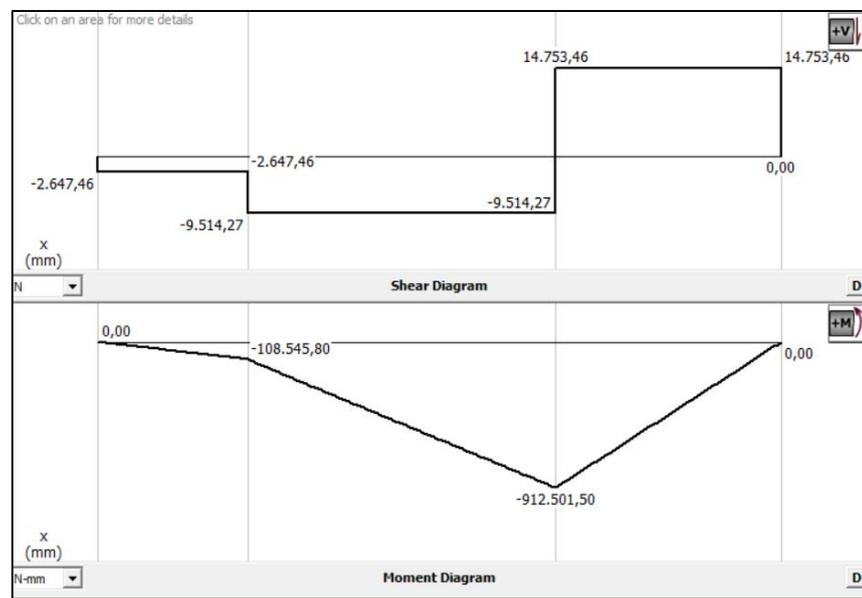
$$B_z = 24267.72 \text{ N}$$

$$Ef_y = 0$$

$$-A_z - W_t + B_z - F = 0$$

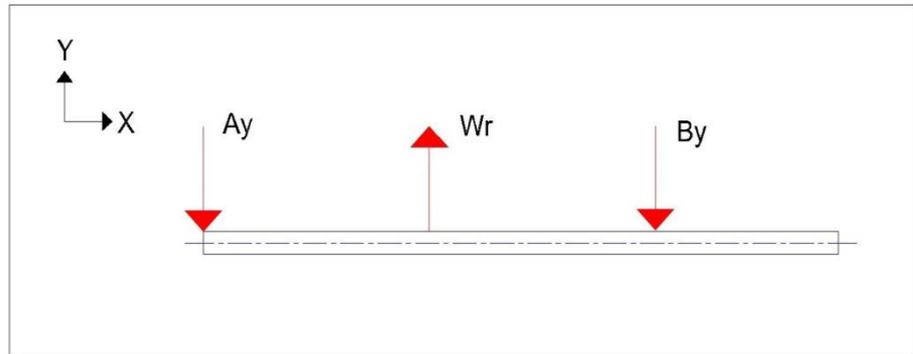
$$A_z = 2647.45 \text{ N}$$

Una vez encontradas las respectivas fuerzas aplicadas en la dirección correspondiente, se realizará el diagrama de Fuerza Cortante y el de Momento flector mediante el uso del programa MDSolid como se muestra en la figura 2.15.



**Figura 2.15. Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje de la Corona 2 plano ZX**

Se calcularán las fuerzas que están inmersas en el plano XY como se muestra en la figura 2.16



**Figura 2.16. Diagrama de Cuerpo Libre en Plano XY para Eje de la Corona 2**

$$EM_a = 0$$

$$W_r(41) - B_y(125.5) = 0$$

$$2525.97(41) - B_y(125.5) = 0$$

$$B_y = 825.21 \text{ N}$$

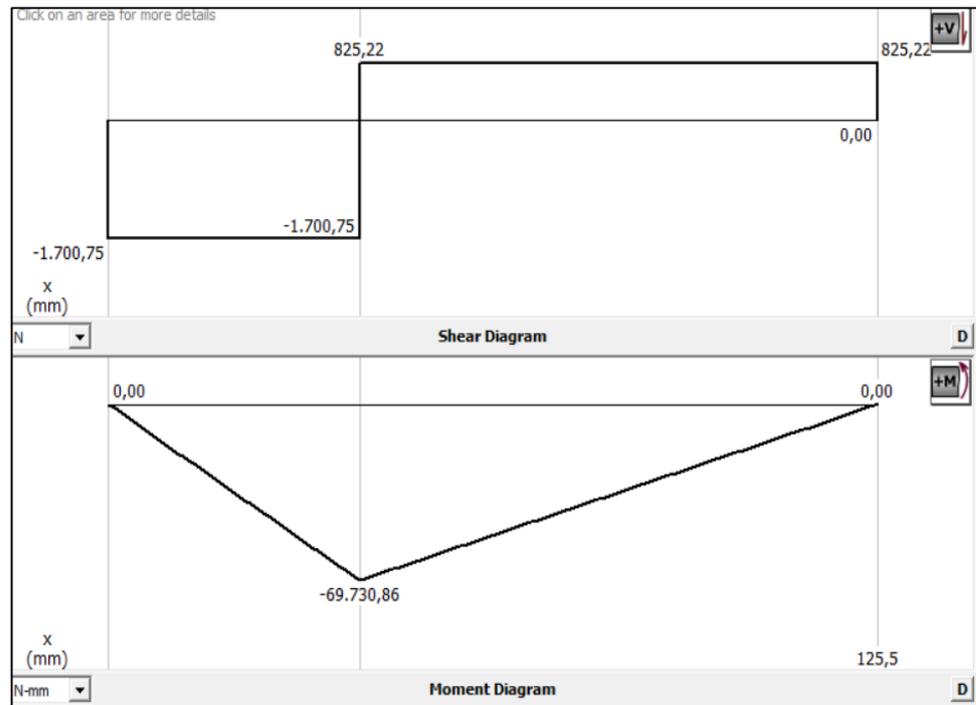
$$Ef_y = 0$$

$$-A_y + W_r - B_y = 0$$

$$A_y = 1700.76 \text{ N}$$

Una vez encontradas las respectivas fuerzas aplicadas en la dirección correspondiente, se realizará el diagrama de fuerza

cortante y el de Momento flector mediante el uso del programa MDSolid mostrado en la figura 2.17.



**Figura 2.17. Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje de la Corona 2 plano XY**

Se calculará el momento máximo de cada plano para determinar cuál es el punto más crítico del eje.

$$M_1 = \sqrt{108545.80^2 + 69730.86^2}$$

$$M_1 = 129.01 \text{ Nm}$$

$$M_2 = \sqrt{912501.50^2}$$

$$M_2 = 912.50 \text{ Nm}$$

El eje de la corona estará sometido a un esfuerzo de flexión y a su vez a un esfuerzo torsor, Se calculará el esfuerzo de flexión que se produce en el eje por medio:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad \text{Ec. 2.62}$$

$$\sigma = 13.32 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

El esfuerzo torsor se produce por el torque de la corona originado por la fuerza tangencial de la misma, la cual estará excéntrica al eje y se la calculará mediante:

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad \text{Ec. 2.63}$$

$$\tau = 13.16 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Se comprobará el factor de seguridad del eje diseñado a fatiga. El eje estará sometido a un esfuerzo combinado reversible. Será combinado por que tendrá un esfuerzo de flexión y torsor. Será reversible ya que se tendrá un eje giratorio cargado a flexión y además ya que en una posición determinada un elemento en la parte inferior del eje tendrá un esfuerzo de tensión, mientras que uno en la parte superior tendrá un esfuerzo de compresión, de igual magnitud. Como el eje estará girando tendrá una inversión completa de esfuerzos, tal como se muestra en la figura 2.18. El

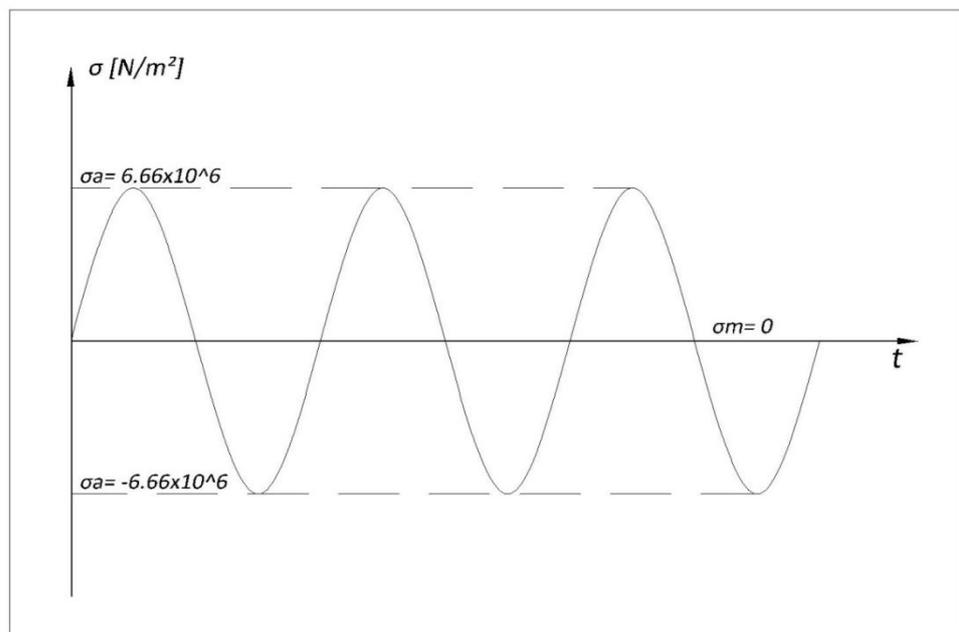
esfuerzo torsor no tendrá esta variación, se representará como una línea recta ya que la corona ejercerá un torque constante sobre el eje debido a que no existe una fuerza fluctuante, tal como se muestra en la figura 2.19.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} + \left( \frac{\sigma'_a}{S_e} * K_f \right) \quad \text{Ec. 2.67}$$

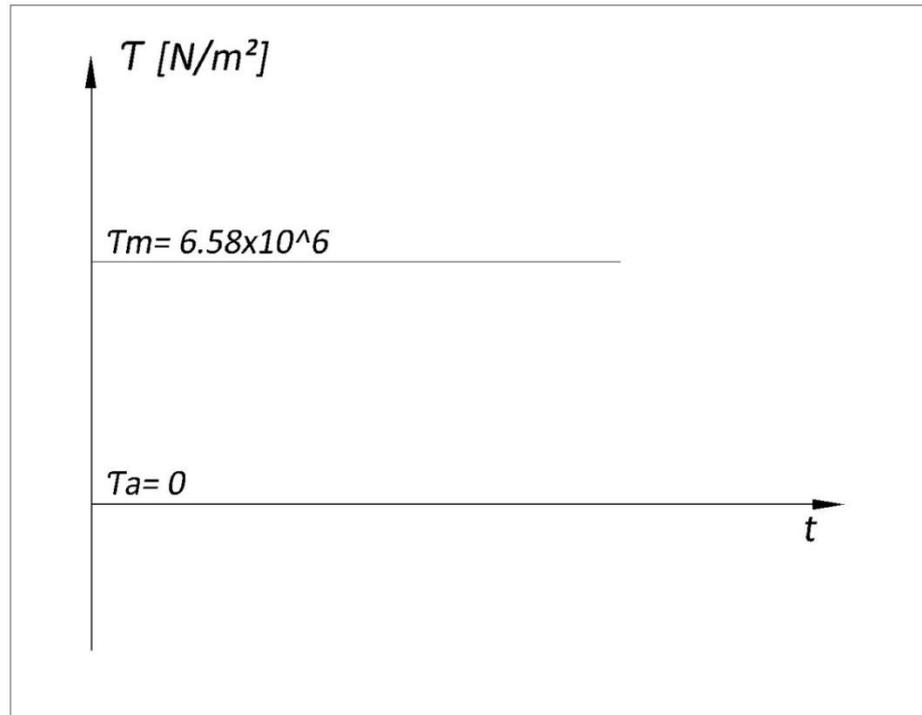
El esfuerzo alternativo y medio se lo calculará usando la siguiente expresión:

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3(\tau_m^2)} \quad \text{Ec. 2.68}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3(\tau_a^2)} \quad \text{Ec. 2.69}$$



**Figura 2.18 Ciclo Invertido para el Eje del Eje de la Corona de la Segunda Caja Reductora**



**Figura 2.19 Esfuerzo Torsor para el Eje de la Corona de la Segunda Caja Reductora**

$$\sigma_a = 6.66 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_m = 0$$

$$\tau_a = 0$$

$$\tau_m = 6.58 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Entonces,

$$\sigma'_m = 11.39 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma'_a = 6.66 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

El límite de resistencia a la fatiga sin corregir ( $S_e'$ ) se la obtiene de la ecuación:

$$S_e' = 0.5 S_{ut} \quad \text{Ec. 2.64}$$

$$S_e' = 490 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga corregido ( $S_e$ ) se requiere que se determinen varios factores.  $C_c$  se obtendrá a partir de la tabla 5.1.  $C_t$  se encontrará por la tabla 5.3.  $C_R$  se seleccionará de la tabla 5.4 para un nivel de confiabilidad de 99%. El factor de tamaño  $C_{TA}$  se obtendrá a partir de la ecuación mostrada en la tabla 5.2 que están incluidas en el apéndice 5.

$$C_c = 1$$

$$C_t = 1$$

$$C_R = 0.814 \rightarrow 99\%$$

$$C_s = 0.71$$

$$C_{TA} = 0.813$$

$$S_e = S_e' C_c C_t C_R C_s C_{TA}$$

$$S_e = 230 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

La sensibilidad de la muesca se la obtendrá a partir de la tabla 5.5 del apéndice 5. El radio del cambio de sección del eje será de 6

mm. Se escogió este radio por que se obtuvo en este punto el momento máximo

$$r = 6 \rightarrow q = 0.92$$

El factor de concentración ( $k_t$ ) se calculará en el punto donde se obtuvo el momento máximo, por lo que se usará la tabla 5.6 del apéndice 5.

$$\frac{D}{d} = 1.24 \rightarrow k_t = 1.52$$

El factor de concentración de esfuerzo por fatiga se lo obtendrá de la siguiente ecuación:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad \text{Ec. 2.66}$$

$$k_f = 1.48$$

$$\frac{1}{n} = \frac{11.39 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{980 * 10^6 \frac{N}{m^2}} + \left( \frac{6.66 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{230 * 10^6 \frac{N}{m^2}} * 1.48 \right)$$

$$n = 18.4$$

Se obtuvo un factor de seguridad adecuado para el diseño del eje de la corona para la primera caja reductora

### **Diseño de eje de 3era caja:**

Se calculará la potencia que recibe el eje de entrada de la tercera caja reductora para el cual se tomará en cuenta la pérdida de potencia por la transmisión de cadena

$$P = 0.555 \text{ HP} * (0.90)$$

$$P = 0.49 \text{ HP}$$

Se calculará el Torque que se genera en el piñón más lento, para el cual se usará el valor de la potencia hallado.

$$P = \tau * w \quad \text{Ec. 2.61}$$

$$\tau = \frac{P}{w}$$

$$\tau = 31562.3 \text{ lb} * \text{pulgadas}$$

Se hallará la fuerza tangencial que se generará en el sinfín, considerando que el torque del piñón más lento será el mismo que se encontrará en el Tornillo Sinfín. Como los cálculos serán los mismos realizados en la primera caja reductora pero con diferentes parámetros, se hará una tabla con resultados.

**TABLA 11**  
**RESULTADOS OBTENIDOS DEL EJE DE LA TERCERA CAJA**  
**REDUCTORA**

|          |                     |          |           |
|----------|---------------------|----------|-----------|
| $w_{tw}$ | 3998.88 $lb_f$      | $P_0$    | 0.17 HP   |
| $w_{tg}$ | 4132.76 $lb_f$      | $P_i$    | 0.49 HP   |
| $T_g$    | 7893.57 $lb * pulg$ | $\eta$   | 35.86%    |
| $w_f$    | 230.50 $lb$         | $W_{rg}$ | 6747.88 N |
| $P_L$    | 0.32 HP             |          |           |

Se tendrá una relación de velocidad de 2.4:1 en la transmisión por cadena, por lo que se procederá a calcular la fuerza total del piñón de la siguiente manera:

$$\text{Relación} \rightarrow 2.4:1$$

$$T_1 = 2T_2$$

$$T_1 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$2T_2 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$T_2 r = \text{Torque}$$

$$T_2 = \frac{\text{Torque}}{r}$$

$$T_2 = 8531.77 \text{ lb}_f$$

$$T_1 = 17063.54 \text{ lb}_f$$

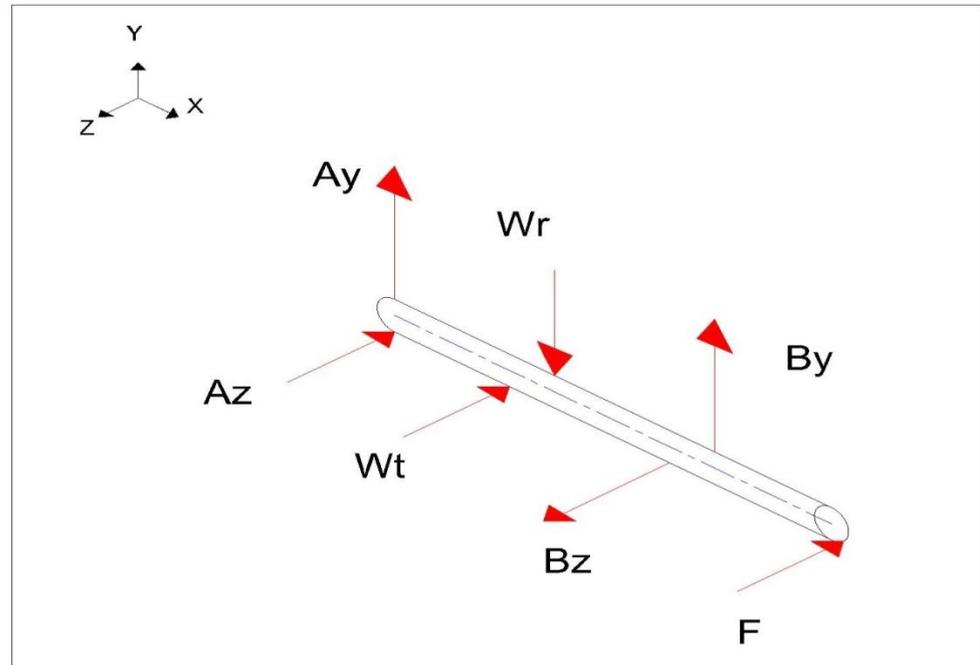
$$F = T_2 + T_1$$

$$F = 25595.31 \text{ lb}_f$$

$$F = 113643.17 \text{ N}$$

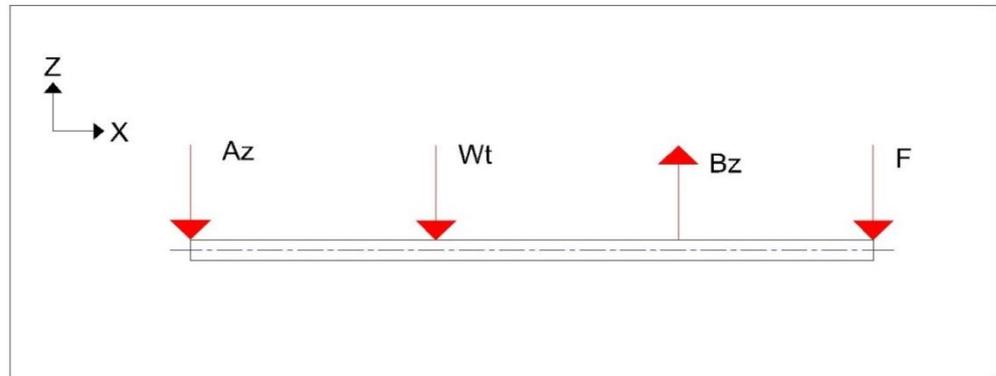
Se realizará un diagrama de cuerpo libre de todas las fuerzas que están siendo aplicadas en el eje de la corona. Las reacciones ( $A_y, A_z, B_y, B_z$ ) son producidas por los rodamientos. La corona que se acopla al eje producirá una fuerza radial ( $W_r$ ) y otra fuerza

tangencial ( $W_t$ ). Además se colocará la fuerza que genera el piñón más rápido.



**Figura 2.20 Diagrama de Cuerpo Libre en 3 Dimensiones para Eje de Corona 3**

Se procederá a separar las fuerzas en el plano z-x como se muestra en la figura 2.21, para encontrar los respectivos valores de estas incógnitas.



**Figura 2.21 Diagrama de Cuerpo Libre en Plano ZX para Eje de la Corona 3**

$$EM_a = 0$$

$$-W_t(41.15) + B_z(103.4) - F(145.4) = 0$$

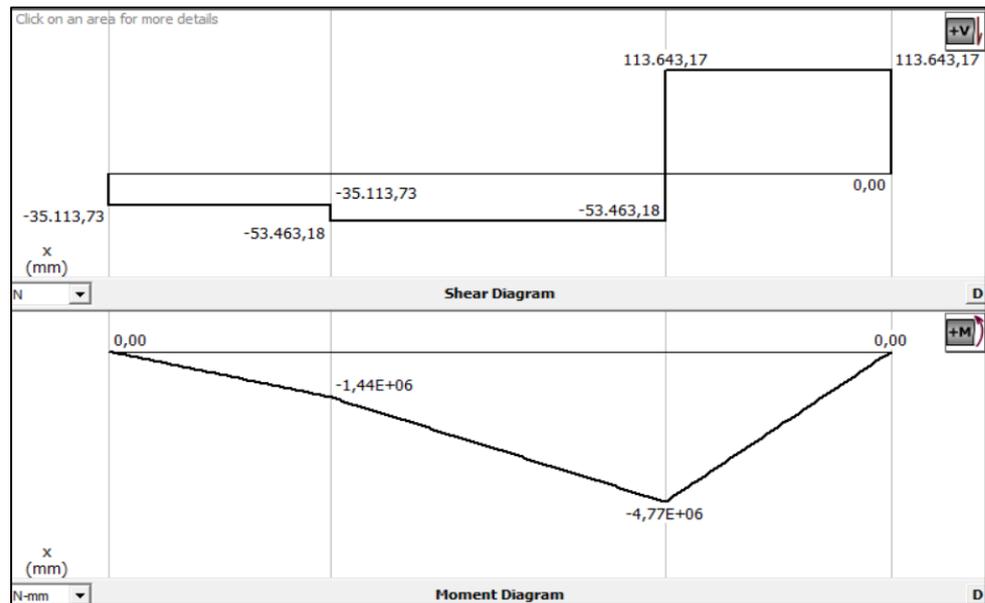
$$B_z = 167106.35 \text{ N}$$

$$Ef_y = 0$$

$$-A_z - W_t + B_z - F = 0$$

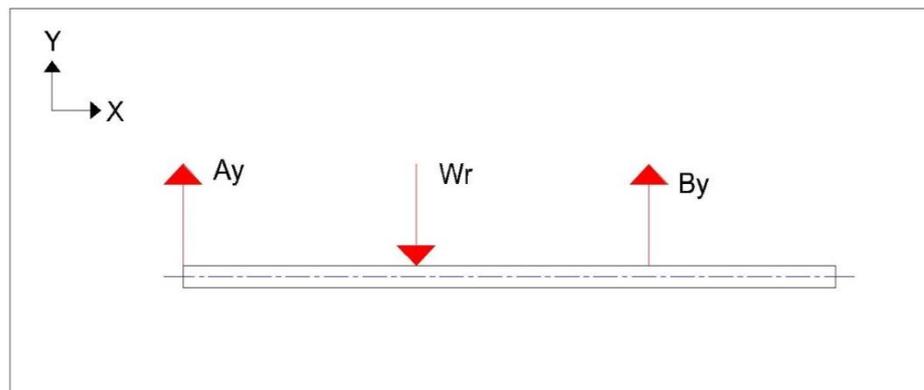
$$A_z = 35113.73 \text{ N}$$

Una vez encontradas las respectivas fuerzas aplicadas en la dirección correspondiente, se realizará el diagrama de Fuerza Cortante y el de Momento flector mediante el uso del programa MDSolid, como se muestra en la figura 2.22:



**Figura 2.22 Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector para Eje de la Corona 3 Plano ZX**

Se calcularán las fuerzas que están inmersas en el plano y-x de la siguiente forma:



**Figura 2.23 Diagrama de Cuerpo Libre en Plano XY para Eje de la Corona 3**

$$EM_a = 0$$

$$W_r(41.15) - B_y(103.4) = 0$$

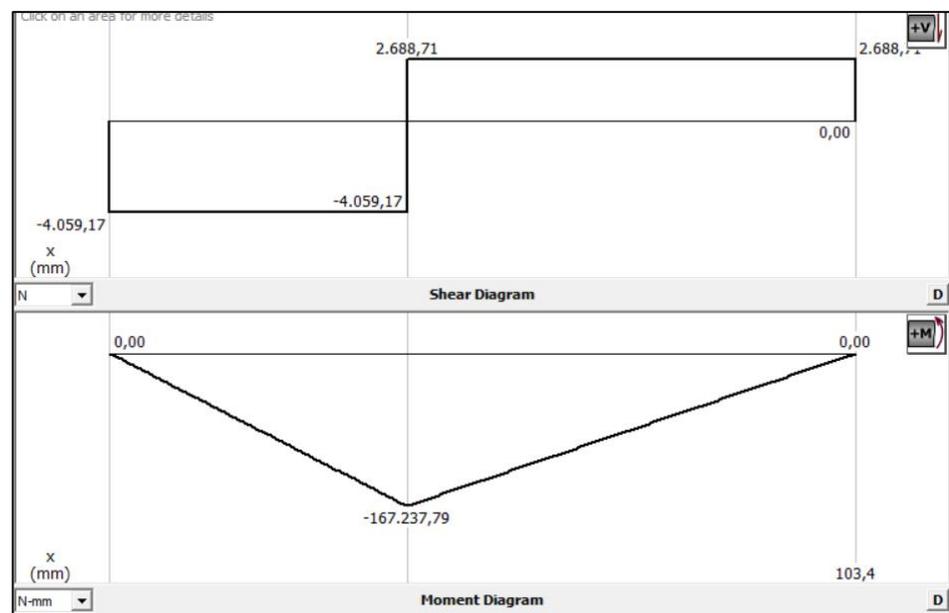
$$B_y = 2685.4 \text{ N}$$

$$Ef_y = 0$$

$$-A_y + W_r - B_y = 0$$

$$A_y = 4062.48 \text{ N}$$

Una vez encontradas las respectivas fuerzas aplicadas en la dirección correspondiente, se realizará el diagrama de Fuerza Cortante y el de Momento flector mediante el uso del programa MDSolid, como el que se muestra en la figura 2.24.



**Figura 2.24 Diagrama de fuerza cortante y momento flector para eje de la corona 3 plano XY**

Se calculará el momento máximo de cada plano para determinar cuál es el punto más crítico del eje.

$$M_1 = \sqrt{1444929.99^2 + 167237.79^2}$$

$$M_1 = 1454.56 \text{ Nm}$$

$$M_2 = \sqrt{4773011.07^2}$$

$$M_2 = 4773.01 \text{ Nm}$$

El eje de la corona estará sometido a un esfuerzo de flexión y a su vez a un esfuerzo torsor, Se calculará el esfuerzo de flexión que se produce en el eje por medio:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad \text{Ec. 2.62}$$

$$\sigma = 370 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

El esfuerzo torsor se produce por el torque de la corona originado por la fuerza tangencial de la misma, la cual estará excéntrica al eje y se la calculará mediante:

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad \text{Ec 2.63}$$

$$\tau = 69.29 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Se comprobará el factor de seguridad del eje diseñado a fatiga. El eje estará sometido a un esfuerzo combinado reversible. Será

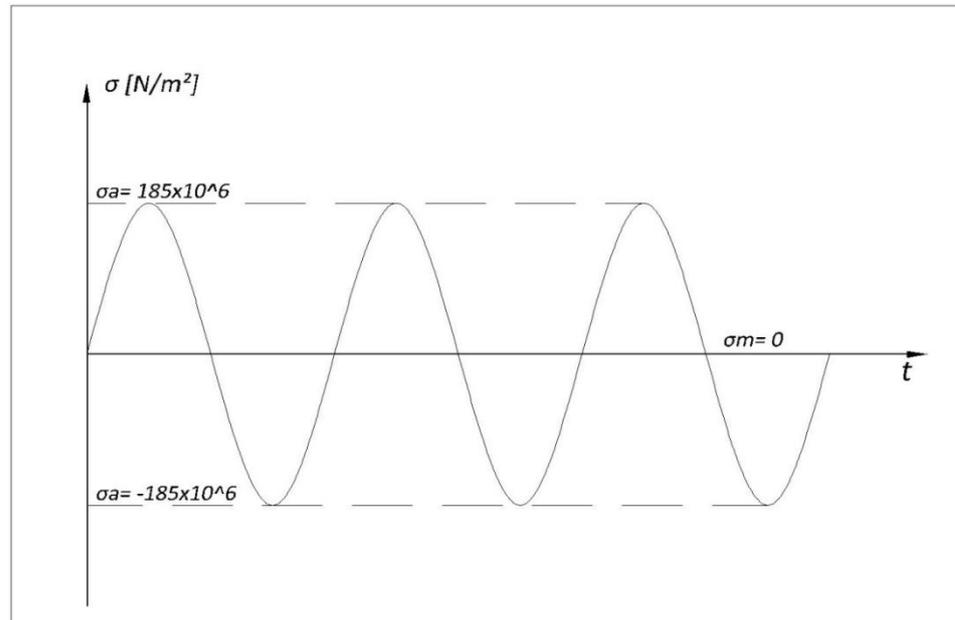
combinado por que tendrá un esfuerzo de flexión y torsor. Será reversible ya que se tendrá un eje giratorio cargado a flexión y además ya que en una posición determinada un elemento en la parte inferior del eje tendrá un esfuerzo de tensión, mientras que uno en la parte superior tendrá un esfuerzo de compresión, de igual magnitud. Como el eje estará girando tendrá una inversión completa de esfuerzos, tal como se muestra en la figura 2.25. El esfuerzo torsor no tendrá esta variación, se representará como una línea recta ya que la corona ejercerá un torque constante sobre el eje debido a que no existe una fuerza fluctuante, tal como se muestra en la figura 2.26.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} + \left( \frac{\sigma'_a}{S_e} * K_f \right) \quad \text{Ec. 2.67}$$

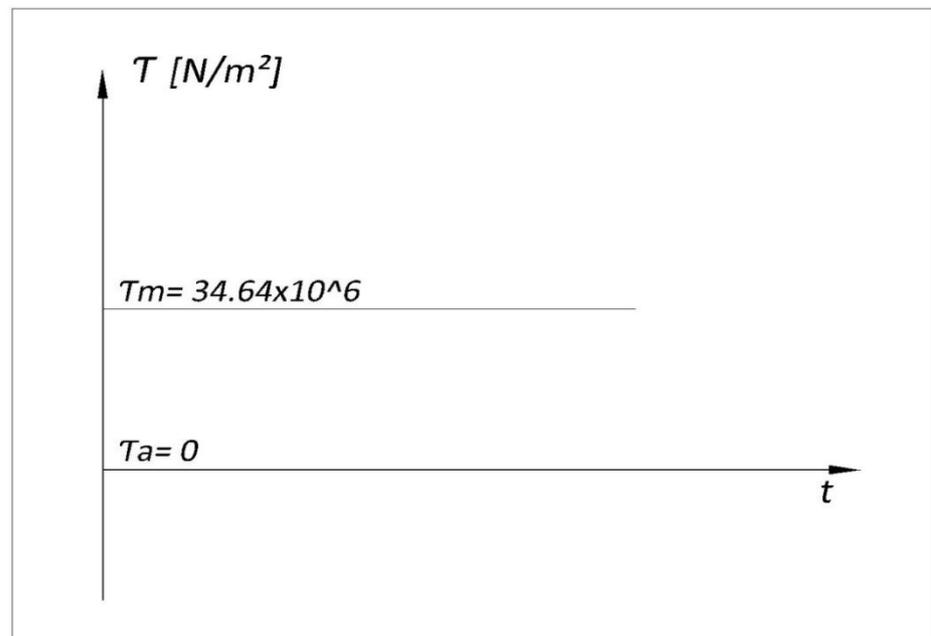
El esfuerzo alternativo y medio se lo calculará usando la siguiente expresión:

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3(\tau_m^2)} \quad \text{Ec. 2.68}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3(\tau_a^2)} \quad \text{Ec. 2.69}$$



**Figura 2.25 Ciclo Invertido para el Eje del Eje de la Corona de la Tercera Caja Reductora**



**Figura 2.26 Esfuerzo Torsor para el Eje de la Corona de la Tercera Caja Reductora**

$$\sigma_a = 185 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_m = 0$$

$$\tau_a = 0$$

$$\tau_m = 34.645 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Entonces,

$$\sigma'_m = 60 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma'_a = 113 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

El límite de resistencia a la fatiga sin corregir ( $S_e'$ ) se la obtiene de la ecuación 2.64.

$$S_e' = 0.5 S_{ut} \quad \text{Ec. 2.64}$$

$$S_e' = 490 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga corregido ( $S_e$ ) se requiere que se determinen varios factores.  $C_c$  se obtendrá a partir de la tabla 5.1.  $C_t$  se encontrará en la tabla 5.3.  $C_R$  se seleccionará de la tabla 5.4 para un nivel de confiabilidad de 99%. El factor de tamaño  $C_{TA}$  se obtendrá a partir de la ecuación mostrada en la tabla 5.2. Ubicadas en el final de la tesis en el apéndice 5.

$$C_c = 1$$

$$C_t = 1$$

$$C_R = 0.814 \rightarrow 99\%$$

$$C_s = 0.71$$

$$C_{TA} = 0.86$$

$$S_e = S_e' C_c C_t C_R C_s C_{TA}$$

$$S_e = 246 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

La sensibilidad de la muesca se la obtendrá a partir de la tabla 5.5 del apéndice 5. El radio del cambio de sección del eje será de 3mm. Se escogió este radio por que se obtuvo en este punto el momento máximo

$$r = 3 \rightarrow q = 0.91$$

El factor de concentración ( $k_t$ ) se calculará en el punto donde se obtuvo el momento máximo, por lo que se usará la tabla 5.6 del apéndice 5.

$$\frac{D}{d} = 1.2 \rightarrow k_t = 1.60$$

El factor de concentración por fatiga se lo obtendrá de la siguiente ecuación:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad \text{Ec. 2.66}$$

$$k_f = 1.546$$

$$\frac{1}{n} = \frac{60 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{980 * 10^6 \frac{N}{m^2}} + \left( \frac{113 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{246 * 10^6 \frac{N}{m^2}} * 1.546 \right)$$

$$n = 1.3$$

Se obtuvo un factor de seguridad aceptable para el tercer eje de la corona.

### **2.5.6. Potencia Requerida del Motor**

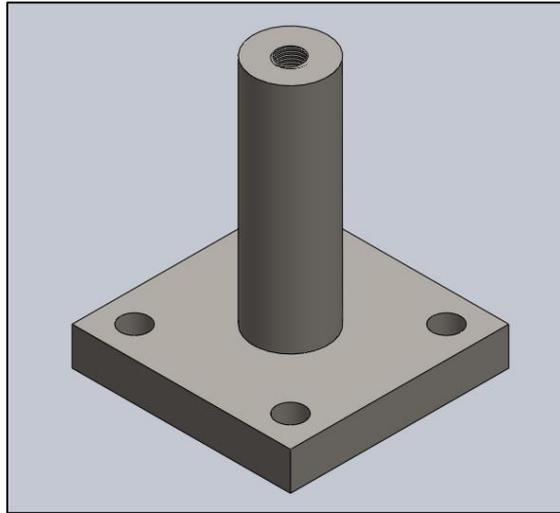
Para determinar la potencia que debe tener el motor se tomará en cuenta la potencia requerida por el tornillo con respecto a todas las eficiencias mecánicas que se han encontrado.

$$Pot. motor = \frac{0.0000088}{(0.78)(0.95)(0.79)(0.47)(0.90)(0.35)(0.90)} \quad Ec. 2.52$$

$$Potencia motor = 0.00011 HP$$

### **2.5.7. Sujeción de la probeta y cámara de ensayo**

La sujeción de la probeta se la realizará de acuerdo a la norma ASTM E-8. Los extremos de la probeta constarán de una rosca la cual servirá para tener una mayor sujeción con los ejes que la contengan. La parte superior de la probeta estará sujeta al eje que contiene la celda de carga y la parte inferior de la probeta estará sujeta a un eje, el cual estará fijo a una placa cuadrada, como se muestra en la figura 2.27.



**Figura 2.27 Mordaza inferior del banco de pruebas.**

La cámara de ensayo contendrá a la probeta, el medio corrosivo y a su vez a la resistencia eléctrica. Según la norma ASTM G-129, las dimensiones de la cámara estarán relacionadas con el volumen y el área superficial expuesto al medio corrosivo de la probeta la cual no debe ser menos de  $30 \frac{ml}{cm^2}$ . Se utilizará una válvula de flujo con dos visores como cámara de ensayo mostrada en la figura 2.28; por medio del programa SolidWorks 2013 se obtendrá el volumen de la cámara experimental y del área superficial de la probeta en contacto con el medio corrosivo expuesta en la figura 2.29.



**Figura 2.28** Cámara de ensayo para las probetas

Dando como resultados respectivamente:

$$V = 864.43 \text{ cm}^3 = 864.43 \text{ ml}$$

$$A = 491.73 \text{ mm}^2 = 4.9173 \text{ cm}^2$$

**Propiedades físicas**

camara.SLDPRT

Reemplazar las propiedades de masa... Recalcular

Incluir sólidos/componentes ocultos

Crear operación de centro de masa

Mostrar masa de cordón de soldadura

Informar de valores de coordenadas relativos a: --predeterminado--

**Propiedades de masa de cámara**

Configuración: Predeterminado --

Sistema de coordenadas: --predeterminado--

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 935.65 gramos

Volumen = 935654.55 milímetros cúbicos

Área de superficie = 59505.51 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

X = 0.00  
Y = -0.00  
Z = -0.00

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos \* milímetro cuadrado)

Medido desde el centro de masa.

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Ix = (0.00, 1.00, 0.00) | Px = 1042519.38 |
| Iy = (0.00, 0.00, 1.00) | Py = 1917352.70 |
| Iz = (1.00, 0.00, 0.00) | Pz = 2231729.73 |

Momentos de inercia: (gramos \* milímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de salida.

|                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|
| Lxx = 2231729.73 | Lxy = 0.01       | Lxz = -0.01      |
| Lyx = 0.01       | Lyx = 1042519.38 | Lyz = -0.00      |
| Lzx = -0.01      | Lzy = -0.00      | Lzz = 1917352.70 |

Momentos de inercia: (gramos \* milímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

|                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|
| Ixx = 2231729.73 | Ixy = 0.01       | Ixz = -0.01      |
| Iyx = 0.01       | Iyy = 1042519.38 | Iyz = 0.00       |
| Izx = -0.01      | Izy = -0.00      | Izz = 1917352.70 |

Ayuda Imprimir... Copiar al portapapeles

**Figura 2.29** Volumen Contenido en la Cámara de Ensayo

Se comprobará si satisface lo propuesto por la norma por medio de la siguiente relación:

$$\frac{V}{A} = \frac{864.43 \text{ ml}}{4.9173 \text{ cm}^2}$$

$$\frac{V}{A} = 175.79 \frac{\text{ml}}{\text{cm}^2}$$

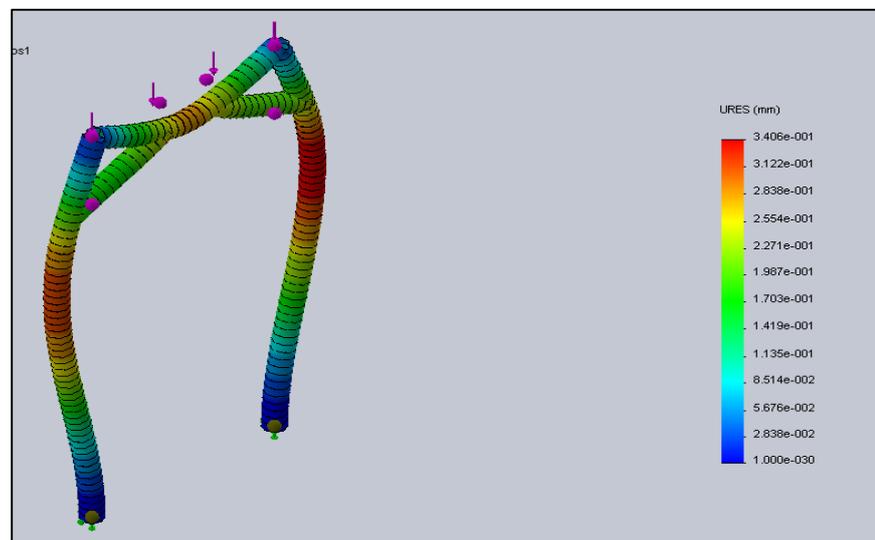
El valor obtenido cumple con lo mencionado en la norma ASTM G-129

#### **2.5.8. Soporte estructural del modelo experimental**

El análisis del soporte experimental se lo realizó mediante el uso del programa SolidWorks 2013. Se hizo un modelo de la estructura usando las medidas con las que será construida y a continuación se procedió a hacer un análisis estático de la armadura con el objetivo de conocer las deformaciones y el comportamiento de la misma cuando se encuentre operando. Para construir este marco de cargas se utilizará un perfil UPN 100 con las características descritas en el apéndice 7.

Conociendo que la fuerza máxima que podrá soportar la estructura será la de ruptura de la probeta, se procedió a realizar una simulación usando ésta carga la cual estará aplicada en el centro

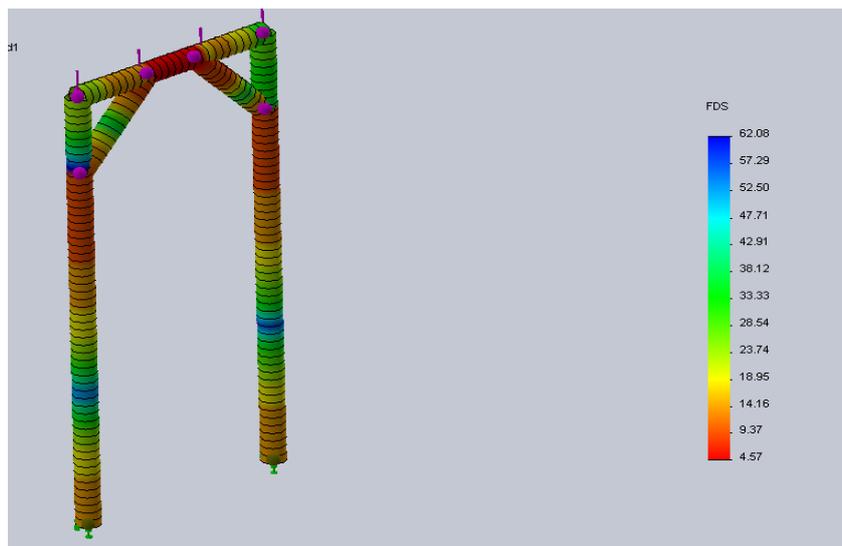
de la viga horizontal. Debido a las restricciones del software de simulación, se aplicó una carga equivalente a la fuerza concentrada que va a ejercer la probeta, se realizaron las restricciones de movimiento respectivas y se procedió a ejecutar la simulación. Los resultados de ésta simulación se presentan en las figuras 2.30 y 2.31.



**Figura 2.30 Deformación del soporte estructural**

La figura 2.30 muestra las deformaciones que ocurrirán en la estructura cuando esté actuando la máxima carga, se puede notar que las zonas donde se presentará mayor deformación son alrededor del centro de la viga horizontal y la de las columnas. Debido a conocimientos teóricos se concluye que está correcta la simulación ya que las mayores deformaciones están donde se

presentan los mayores momentos flectores, en la viga horizontal es notorio que la probeta ejercerá una flexión hacia abajo y por tanto deformará al perfil y así mismo, las estructuras que hacen de columna serán pandeadas por el efecto de fuerzas de reacción. Según la simulación se concluye que la máxima deformación a la que estará sometida la viga es de  $3.406 \times 10^{-1}$  mm, lo cual es una deformación mínima que puede ser despreciada y afectará muy poco a la medición del sensor de distancia de la máquina.



**Figura 2.31 Factor de Seguridad en la Estructura**

La figura 2.31 muestra los factores de seguridad presentes en la estructura, las zonas críticas son las mismas donde se presentarán deformaciones vistas en la figura 2.30. Las zonas críticas serán donde estará el menor valor de factor de seguridad que según la

gráfica se nota que es 4.6 lo cual es un valor aceptable de diseño. Ya con los datos de la simulación en SolidWorks se puede concluir que la estructura no se deformará y aguantará las condiciones de operación del experimento.

A continuación se calculará el factor de seguridad del pasador y de los ejes que conforman la sujeción de la probeta en el banco de prueba.

### **Factor de seguridad del pasador**

Se calculará el factor de seguridad del pasador que uno los diferentes ejes del banco de prueba. De la tabla 2 se obtendrá la resistencia a la fluencia del acero de transmisión de grado 8.

$$S_y = 130 \text{ KPsi} = 895 * 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Se determinará la resistencia a la fluencia de corte por medio de la siguiente ecuación:

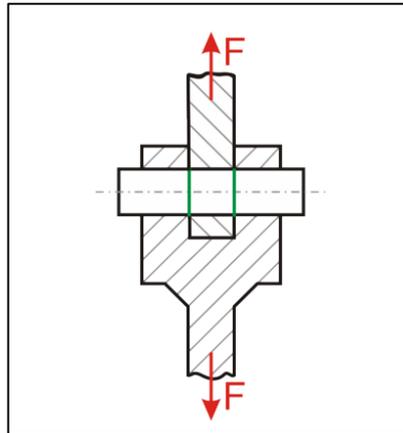
$$S_{ys} = 0.577 * S_y \quad \text{Ec. 2.72}$$

$$S_{ys} = 516 * 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

La fuerza máxima que soporta la celda de carga será de 2000 Kg<sub>f</sub>, por lo que se la escogerá como valor crítico.

$$F = 2000 \text{ Kg}_f = 19613.3 \text{ N}$$

Para que un pasador esté sometido a esfuerzos cortantes será necesario que las fuerzas sobre él, estén actuando como el diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 2.32



**Figura 2.32 Diagrama de Cuerpo Libre de un Perno Sometido a Esfuerzo Cortante**

El esfuerzo cortante puro al cual está sometido el pasador será:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad \text{Ec. 2.70}$$

$$\tau = \frac{\frac{F}{2} 9806.65}{\frac{\pi * \phi^2}{4}}$$

Se escogerá un diámetro de perno que haya en el mercado.

$$\phi = 6.35 \text{ mm}$$

$$\tau = 309.6 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$n = \frac{S_{ys}}{\tau} \quad \text{Ec. 2.71}$$

$$n = 1.82$$

Se obtuvo un factor de seguridad aceptable para el pasador, lo que indica que el pasador no se romperá

### **Factor de seguridad de la barra que se acopla con el tornillo de Potencia.**

Se determinará el factor de seguridad de la barra que uno los diferentes ejes del banco de prueba. De la tabla 3 se obtendrá la resistencia a la fluencia del acero de transmisión AISI 1018. Se considerará la fuerza máxima que soportará la celda de carga.

$$\text{Aisi 1018} \rightarrow S_y = 370 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$F = 2000 Kg_f = 19613.3 \text{ N}$$

El factor de seguridad se lo obtendrá por medio:

$$n = \frac{S_y}{\sigma} \quad \text{Ec. 2.73}$$

El eje estará sometido a un esfuerzo axial de tensión por lo que se lo hallará por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 2.1}$$

El diámetro del eje será de 22mm, por lo que al reemplazar en la fórmula se obtendrá:

$$\sigma = 51.59 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Se reemplazará los valores hallados en la ecuación del factor de seguridad.

$$n = \frac{370 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{51.59 * 10^6 \frac{N}{m^2}}$$

$$n = 7.17$$

El factor de seguridad es aceptable por lo que se concluye que la barra no fallará con la fuerza que se está aplicando.

#### **Factor de seguridad de la barra en acero inoxidable AISI 304**

Se calculará el factor de seguridad de la barra de acero inoxidable AISI 304. De la tabla 1 se obtendrá la resistencia a la fluencia de este acero. Se considerará la fuerza máxima que soportará la celda de carga.

$$\text{AISI 304} \rightarrow S_y = 310 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$F = 2000 Kg_f = 19613.3 \text{ N}$$

El factor de seguridad se lo obtendrá por medio de la ecuación 2.73:

El eje estará sometido a un esfuerzo axial de tensión por lo que se lo hallará por la siguiente ecuación 2.1. El diámetro del eje será de 20mm, por lo que al reemplazar en la fórmula se obtendrá:

$$\sigma = 62.43 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Se reemplazará los valores hallados en la ecuación del factor de seguridad.

$$n = \frac{310 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{62.43 * 10^6 \frac{N}{m^2}}$$

$$n = 4.96$$

El factor de seguridad es aceptable por lo que se concluye que la barra no fallará con la fuerza que se está aplicando.

### **Factor de seguridad del perno que sujeta la celda de carga**

De la tabla 2 se obtendrá la resistencia a la fluencia del acero de transmisión de grado 8.

La fuerza máxima que soporta la celda de carga será de 2000 Kg<sub>f</sub>, por lo que se la escogerá como valor crítico.

$$S_y = 130 \text{ KPsi} = 895 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$F = 2000 \text{ Kg}_f = 19613.3 \text{ N}$$

El factor de seguridad se lo obtendrá a través de la ecuación 2.73.

El perno se someterá a un esfuerzo axial de tensión por lo que se aplicará la ecuación 2.1. El diámetro del perno será de 20mm, por lo que al reemplazar en la fórmula se obtendrá:

$$\sigma = 62.43 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Se reemplazará los datos obtenidos en la fórmula del factor de seguridad.

$$n = \frac{895 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{62.43 * 10^6 \frac{N}{m^2}}$$

$$n = 14.33$$

El factor de seguridad es aceptable por lo que se concluye que el perno no fallará con la fuerza que se está aplicando.

## **2.6. Selección de elementos electrónicos del banco de prueba**

### **2.6.1. Motor eléctrico**

Una vez obtenido el cálculo del valor de potencia del motor que se necesitará para lograr la fractura de la probeta se obtendrá un dato concreto que ayudará en la correcta selección del mismo. El motor elegido es de marca Lincoln con una potencia de 2 HP y 1725 rpm. La ficha técnica del mismo se encuentra en el apéndice 8.

La potencia escogida es sobre dimensionada con el objetivo de cubrir todo tipo de pérdidas que se podrían originar por diferentes factores como: cambios en las dimensiones de la probeta, falta de lubricación de los elementos mecánicos, desalineaciones entre ejes y matrimonios, entre otras.

El motor eléctrico adquirido consume 6 amperios a plena carga y como es habitual estará protegido por medio de un relé térmico mostrado en la figura 2.33. Este elemento electrónico tendrá la

función de accionarse cuando detecte un incremento en el consumo de corriente o no pase corriente por alguna fase, logrando proteger así al circuito y al motor. El relé térmico tiene un rango de calibración de 7 a 10 amperios, el cual está por encima del valor consumido a plena carga. Al arrancar el motor eléctrico se producirá una sobrecarga por lo que también estará protegido por el relé térmico. El relé térmico adquirido se lo regulará a 7 amperios.



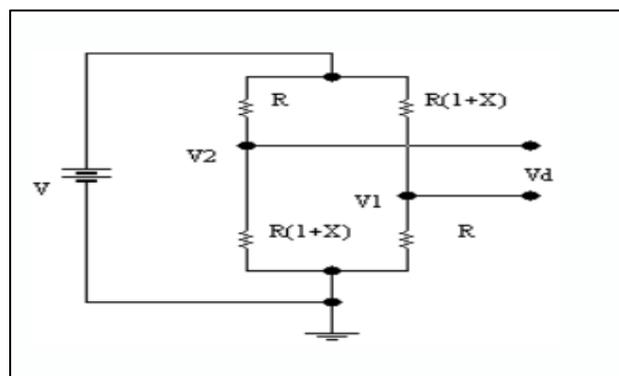
**Figura 2.33 Relé térmico Siemens de 7 a 10 Amp.**

### **2.6.2. Celda de carga**

La celda de carga tipo S es un transductor que tendrá la función de convertir una fuerza a una señal eléctrica. Este tipo de sensor consiste de un metal que sufre una deformación a medida que se le va aplicando una fuerza. Este metal soportará un rango de fuerza (que va desde cero hasta la capacidad máxima) ya sea a compresión, tensión o en algunos casos ambos esfuerzos. Esta

deformación se originará en la zona elástica, esto es lo que limita la capacidad de una celda de carga. En el momento en que la fuerza llegue a la zona plástica del material, sufrirá una deformación permanente y no regresará a su estado original.

Este sensor tendrá un rango de 0 a 2 toneladas, el cual abarcará la máxima fuerza que tendrá en la probeta según los cálculos antes realizados. Una celda de carga se compone de una, dos y cuatro galgas extensiométricas. La diferencia entre estas es que a medida que se aumentan las galgas se tendrá una mayor sensibilidad del puente Wheatstone, se obtendrá una mayor señal de salida y se tendrá una mayor capacidad de compensación del efecto de temperatura. Se adquirirá un transductor de dos galgas porque son más económicas que las de cuatro. La configuración interna de la celda de carga escogida se muestra en la figura 2.34



**Figura 2.34 Configuración Interna de la Celda de Carga**

Estas galgas están fabricadas en un metal que al flexionarse modifican su resistencia, además están conectadas en una configuración que se conoce como puente de Wheatstone, que a su vez al alimentarse con un voltaje entregan una señal de voltaje proporcional a la fuerza aplicada. Por lo general la señal de salida es de unos pocos milis voltios, este voltaje es proporcional al voltaje de alimentación y a la máxima capacidad de carga del transductor.

Esta celda de carga tendrá una capacidad máxima de voltaje de  $2\text{mV/V}$ . Esto significa si se la alimenta con  $12\text{ Vdc}$  la señal que se va a tener a la máxima capacidad de la celda de carga será de  $24\text{mv}$ . Es decir que si se aplica el  $50\%$  de la capacidad de la celda de carga se tendrá  $12\text{ mv}$ . Para el caso más ideal, la señal será lineal.

Además este voltaje que se obtendrá se requerirá amplificarlo a través de un amplificador de instrumentación para su respectivo uso. Luego se conectará a una tarjeta de adquisición de datos para que a través de un algoritmo se logre calcular la fuerza aplicada a la celda de carga. La celda de carga adquirida se la mostrará en la figura 2.35.



**Figura 2.35 Celda de carga tipo S de 2 toneladas.**

La ficha técnica de la celda de carga se la mostrará en el Apéndice

9

### **2.6.3. Termocupla**

Tratando de simular con mayor precisión las condiciones de operación en las cuales el acero elegido para este estudio estará sometido, se ha escogido una resistencia que calentará el medio hasta acercarse a las temperaturas de operación en las que en este caso, serán arriba de los 70°C. Esta resistencia será del tipo por inmersión con un recubrimiento inoxidable para la corrosión como se observa en la figura 2.36. Se instalará en la tapa superior de la cámara experimental a través de una cabeza roscada de 3/4 de pulgada.



**Figura 2.36 Resistencia Eléctrica de Inmersión.**

La resistencia eléctrica se conectará en serie con el termostato a su vez a las borneras en donde se alimentará a 110V. Esta resistencia generará una potencia de 250 W. Por medio del termostato, el cual se lo muestra en la figura 2.37, se puede regular la temperatura que generará la resistencia en un rango de 0°C hasta 150°C. El termostato constará de un bulbo, el cual será el sensor dentro de la cámara experimental.



**Figura 2.37 Termostato Analógico con Bulbo**

#### 2.6.4. Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos usada en el experimento será Arduino Mega 2560 tal como se muestra en la figura 2.38, esta tarjeta será la encargada de recopilar toda la información generada por los sensores de distancia y fuerza, estas señales serán convertidas de tipo analógico a digital usando un código escrito en Matlab gracias al cual también se podrá obtener curvas que relacionen las señales de entrada con el tiempo transcurrido. También se podrá obtener en una hoja de cálculo los valores censados los que podrán ser procesados en la computadora.

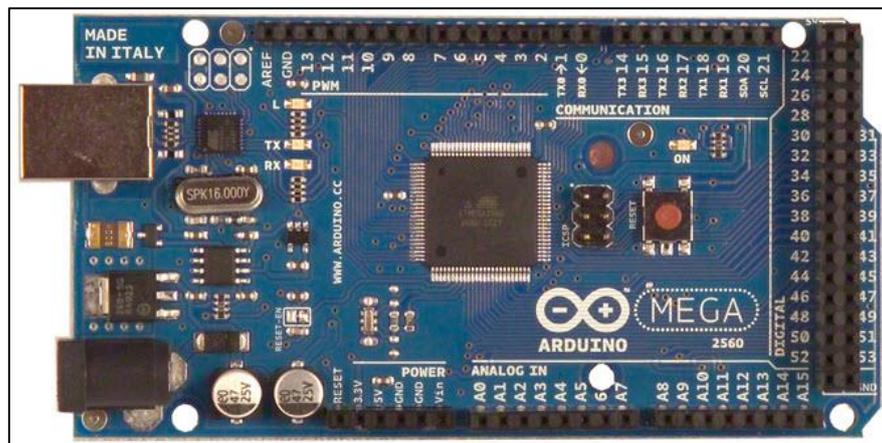


Figura 2.38 Tarjeta de adquisición de datos ARDUINO MEGA 2560

La tarjeta contará con 16 entradas analógicas y 54 pines de salidas, voltaje de funcionamiento 5V, voltaje de entrada recomendado de 7

a 12 V y corriente de salida de 40 a 50 mA. La ficha técnica de la misma se encontrará en el apéndice 10.

### **Sensor Ultrasónico**

El sensor Ultrasónico tiene la función de trabajar como un medidor de distancia, este sensor tiene un transmisor que emite un pulso de ultrasonido, el cual es de forma cónica. Este pulso rebotará sobre un objeto colocado a una distancia determinada y la reflexión la detectará un receptor de ultrasonidos. Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso y la percepción del eco se podrá determinar la distancia a la que se encuentra el objeto, el cual produjo la reflexión de la onda sonora. El sensor ultrasónico que se utilizará será el que me muestra en la figura 2.39.



**Figura 2.39 Sensor ultrasónico Hyde Park SC9561 – 4C0**

El Rango de operación del sensor es ajustable entre 119.4-2006.6mm. Se decidió por este sensor ya que tiene una resolución de 0.08mm. Además se tendrá una salida analógica de 0 mA-20 mA. La hoja técnica del sensor se la encontrará en el apéndice 11.

## **2.7. Detalle de los elementos del prototipo diseñado**

A lo largo de este capítulo se ha realizado una descripción individual de todos los elementos que serán necesarios utilizar para la creación del banco de pruebas abarcando tanto lo mecánico como lo electrónico. En esta sección se hará una representación del trabajo en conjunto de cada elemento, con el objetivo final de realizar el rompimiento de la probeta.

En la parte mecánica del banco de pruebas, se usará en su totalidad perfiles y planchas de acero estructural ASTM A36 debido a facilidad de encontrarlo en el mercado y la robustez mecánica que será suficiente para la construcción del proyecto. Las cajas reductoras están incluidas entre los elementos primordiales del esquema debido a que la norma es muy clara con respecto a la velocidad a la que se deberá efectuar el ensayo y su selección tanto de las cajas como la de poleas y cadenas está respaldada por cálculos matemáticos usando conocimientos de mecánica adquiridos durante el transcurso de esta carrera.

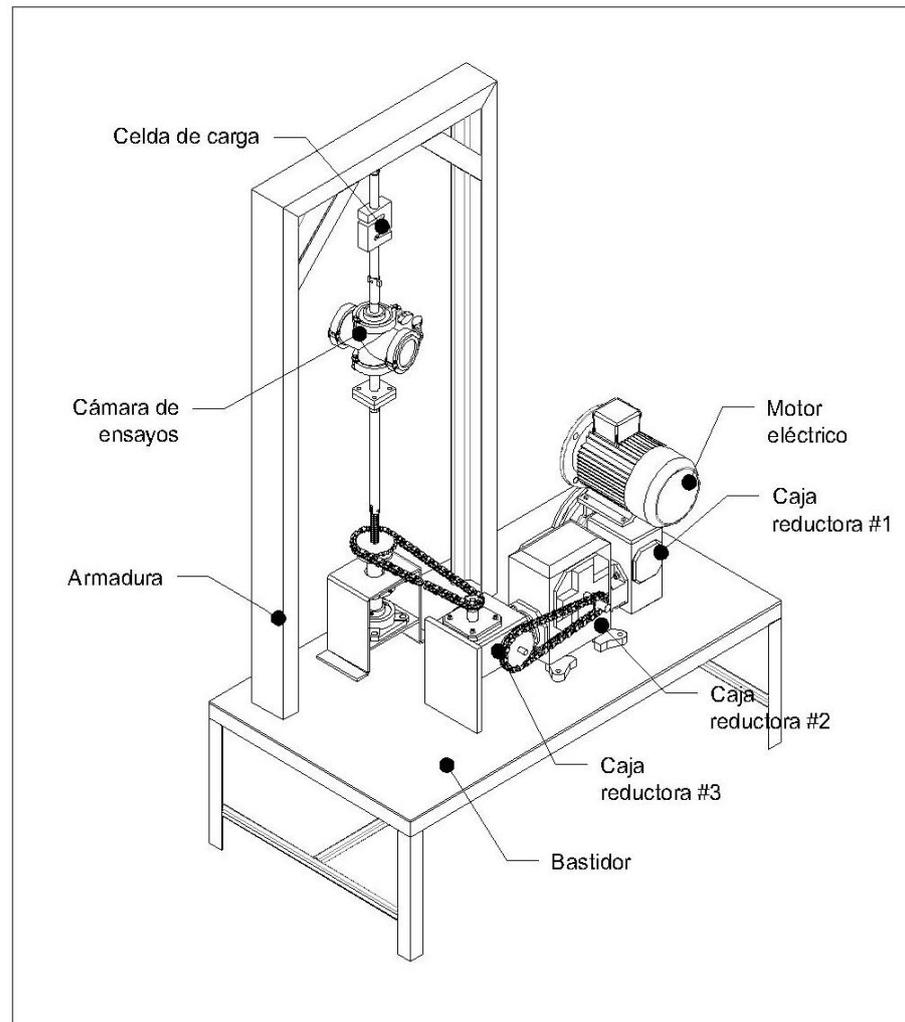
La estructura en perfil UPN 100 es la que soportará toda la carga que generará el rompimiento de la probeta y la necesidad de que ésta sea capaz de aguantar éstas fuerzas sin deformarse, es algo fundamental para tener una mayor precisión del equipo. Los conectores y sujetadores mecánicos han sido escogidos con el requerimiento de que sean capaces de soportar al equipo en funcionamiento. El diseño de la forma de este banco de prueba está basado en equipos comerciales y han sido adaptados a tal manera de que los elementos que lo constituyen y su construcción sea posible ser realizada en talleres nacionales con materiales asequibles en el mercado nacional.

El motor eléctrico escogido estará conectado con las cajas reductoras por la cual la potencia generada será transmitida a través de ellas hasta llegar a un piñón, en el cual su manzana se ha maquinado una rosca con la finalidad de que se desplace horizontalmente un tornillo de potencia que será la conexión entre el sistema mecánico y los elementos que estirarán la probeta.

Los ejes y pasadores tendrán la función de transmitir toda esta potencia generada por los motores y cajas y transformarla en una fuerza que sea capaz de romper la probeta a lo largo de la sección transversal de ésta.

Los instrumentos electrónicos seleccionados para el diseño de este banco de pruebas tendrán el objetivo de censar las variables que son requeridas por la norma: fuerza y deformación. La celda de carga será conectada a un eje el cual estará en tensión y deformará la galgas extensiométricas de la celda produciendo una variación de voltaje que será transmitido como señal a la tarjeta de adquisición.

La deformación que sufrirá la probeta al ser estirada será censada directamente por un el desplazamiento del sensor ultrasónico que estará sujeto a la mordaza inferior del equipo. Así mismo, este sensor producirá una señal analógica que será transmitida a la tarjeta de adquisición la cual, hará la conexión entre el equipo de pruebas y el ordenador el que a su vez, será alimentado por información ya procesada por la tarjeta, transformado en datos digitales que puedan ser recogidas en una hoja de cálculo y gráficas que servirán de base para el estudio del material en las condiciones que se han decidido investigar su comportamiento. En la figura 2.40 se ha realizado un esquema final del banco de pruebas señalando los principales componentes que constarán, y teniendo ya un modelo objetivo de la apariencia final del equipo.



**Figura 2.40 Esquema Final del Banco de Pruebas para Ensayos de Corrosión Bajo Deformación Lenta**

# CAPÍTULO 3

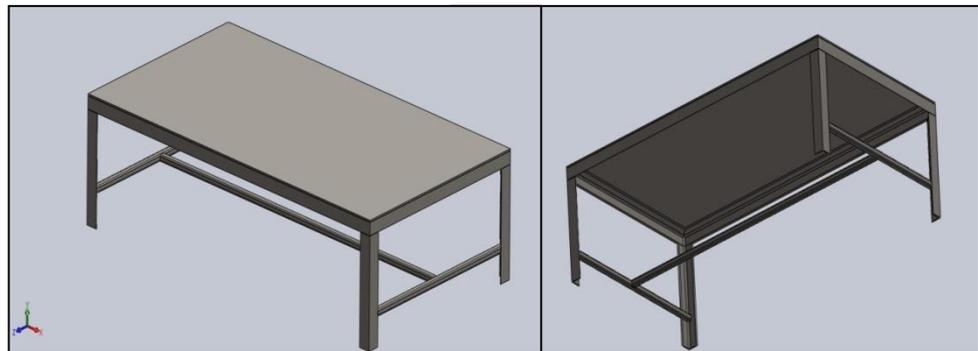
## 3. CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA DE ENSAYO

### 3.1. Ensamble del Sistema Mecánico

Para la implementación del banco de prueba se comenzará con la construcción de la parte mecánica, la cual servirá de base y guía para el resto de componentes. El bastidor de la máquina será una mesa, la cual tendrá una plancha en acero ASTM A36 con un espesor de 6mm, la base tendrá un marco en perfil L de acero estructural de 40x40x4mm, estos perfiles también serán usados como patas para el soporte de la mesa y los refuerzos entre éstas.

Este bastidor deberá ser lo suficientemente rígido para soportar el peso de la estructura, motor, cajas y los demás elementos que conforman el banco de prueba, además se cuidará que la superficie sea completamente plana para evitar vibraciones producidas por la puesta en marcha del motor, para lo cual se utilizará un medidor de

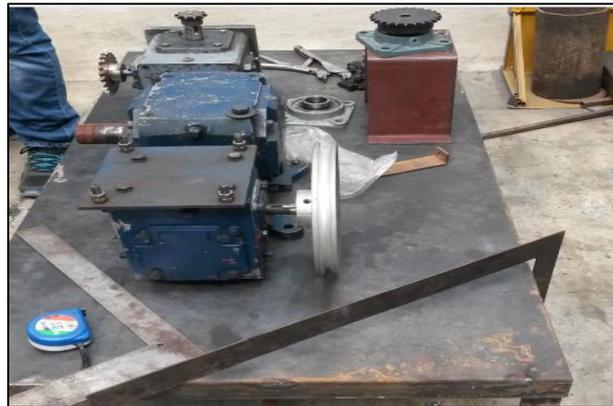
nivel para confirmar que la construcción se la realizó correctamente. Debido al peso que soportará la mesa, se soldarán refuerzos transversales a dimensiones proporcionales usando el perfil L antes mencionado, para reforzar la plancha que hace de base y evitar pandeos, tal como se muestra en la figura 3.1.



**Figura 3.1. Modelado de Mesa del Banco de Pruebas**

Se distribuirá la localización del motor y de las cajas reductoras con ayuda de una escuadra y un flexómetro, sobre la superficie de la plancha para soldar el marco de cargas o estructura que sujetará a la probeta y a todos los elementos que realizarán la sujeción de la misma, como se muestra en la figura 3.2. Esta distribución debe ser la adecuada para que el banco de prueba tenga una buena estética. En el capítulo 2 se realizó el estudio de la estructura para cerciorarse de que la viga seleccionada será la correcta. En todas las juntas del banco experimental se usarán soldadura tipo MIG con

un alambre número 9. El plano 12 muestra la mesa y la estructura con las dimensiones finales del modelo.



**Figura 3.2. Distribución de las Cajas Reductoras Sobre la Mesa de Apoyo**

### **3.1.1. Motor eléctrico-polea**

Antes del ensamblaje se deberá realizar un mantenimiento previo para comprobar el correcto funcionamiento del motor, para lo cual se lo conectó y se comprobó que el motor estaba calentando, se lo desconectará para realizar una limpieza de las partes internas y externas del motor, se desarmará la carcasa para extraer el rotor, se lavará las tapas y la carcasa del motor con gasolina, el embobinado y el rotor se lavará con vitene, el cual es un líquido para sacar la grasa de las bobinas. Se dejará secar 2 horas para luego aplicarle aire a presión con ayuda de un compresor para

remover lo que quede del vitene. Se pintará con barniz el bobinado del motor para proteger el embobinado y mejorar el aislamiento. Se colocará el bobinado del motor en una cámara hermética, la cual tendrá un foco para irradiar calor y de esta manera se logrará que el barniz se seque más rápido. Una vez terminado este proceso se armarán todas las partes del motor, pero previamente se cambiarán los dos rodamientos de las tapas y se lo conectará para determinar si está trabajando correctamente. Para asegurarse que el motor no presente algún otro problema durante su funcionamiento, se hará un balanceo al eje del rotor para evitar roces con las tapas del motor, evitar vibraciones y a su vez prevenir un aumento en su temperatura de operación. Se tomarán lecturas del amperaje de operación para comprobar si existe algún sobrecalentamiento anormal o sonidos extraños.

El motor eléctrico estará ubicado encima de la primera caja reductora y este a su vez, será asegurado mediante 4 pernos M9x75 mm que también tendrán la función de modificar la posición del motor con respecto a la caja. El eje de salida del motor es de  $\varnothing = 5/8''$  en el cual, se acoplará una polea de aluminio de  $\varnothing = 3''$  la que será asegurada al eje mediante dos prisioneros de  $\varnothing = 6.35$  mm y una chaveta rectangular de 5x5x35mm. La polea impulsada

de  $\varnothing = 9''$  estará conectada al eje de entrada de la primera caja y asegurada mediante dos prisioneros de  $\varnothing = 6.35$  mm y una chaveta rectangular de 5x5x35 mm. Después de esto se colocará la banda de transmisión que será tensada cambiando la posición del motor asegurando los pernos antes mencionados, tal como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3. Instalación de Banda sobre las Poleas**

### **3.1.2. Cajas Reductoras de Velocidad**

Las cajas reductoras serán, así como el motor, sometidos a un mantenimiento previo a la instalación en el banco de pruebas. Se comenzará por desarmarlos para darles una lavada superficial con el fin de remover suciedad o grasas que se encuentren en la carcasa de las cajas como se muestra en la figura 3.4. Luego se procederá a examinar los tornillos sinfín y las coronas de las

mismas, para encontrar roturas de dientes o cualquier tipo de fallos sobre estos.



**Figura 3.4. Limpieza de las cajas reductoras**

En el mantenimiento también se revisarán los ejes para comprobar si existen alguna fractura que pueda ocasionar un sobre esfuerzo de estos, además se hará una revisión a los rodamientos de los ejes para comprobar si están correctamente lubricados, se cambiarán los empaques de las tapas para evitar alguna fuga de aceite y finalmente se hará un cambio de aceite de la caja para lograr una mejor lubricación en el contacto sinfín-corona de los reductores.

La primera y segunda caja forma un conjunto el cual, será asegurado a la mesa base mediante pernos. Como se menciona en la sección anterior, sobre la primera caja irá el motor y en su eje de entrada, se colocará la polea de  $\Phi = 9''$  asegurada mediante un

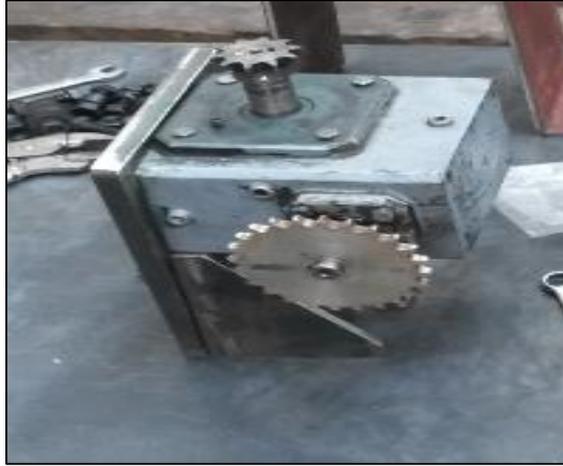
prisionero y chaveta, la unión con la segunda caja se la realizará mediante un matrimonio entre los ejes de salida y entrada de la primera y segunda caja respectivamente. Al eje de salida de la segunda caja se le instalará una catarina de 12 dientes la cual servirá, de conexión con la tercera caja reductora, como se muestra en la figura 3.5.



**Figura 3.5. Conexión de las Cajas Reductoras por Medio de una Trasmisión por Cadena**

La tercera caja se encontrará conectada a la segunda por una transmisión de cadena la cual hará la función de una etapa de reducción más. El eje de entrada de la tercera caja constará con una catarina de 24 dientes. Debido a las dimensiones de la tercera caja reductora se colocará una plancha en posición vertical sobre la mesa, la cual estará soldada a la misma y reforzada por dos

cartelas. La tercera caja será sujeta a la plancha mediante pernos, los cuales quedarán perdidos dentro de la carcasa de la caja reductora, la cual se la apreciará en la figura 3.6.



**Figura 3.6. Placa de Apoyo de la Tercera Caja Reductora**

En la instalación de las primeras dos cajas se deberá tener cuidado de que los ejes se encuentren lo mejor alineado posible para que el matrimonio tenga una mejor transmisión de potencia, reducir vibraciones, etc. Entre la segunda caja y la tercera será necesario que los ejes sobre los que van las catarinas, se encuentren a la misma altura y alineados, para evitar que la cadena se encuentre muy tensada en un lado y que exista una mejor transmisión de movimiento.

### 3.1.3. Catarinas y cadena

Se utilizarán dos reducciones de cadena en el banco de prueba, la primera será la que conecta la segunda y tercera caja y la segunda se usará para unir la salida de la tercera caja con el tornillo de potencia que tendrá la función de desplazarse verticalmente para tensionar la probeta. Estas transmisiones se las podrá observar en la figura 3.7. El objetivo de esta unión es la de además de evitar el uso de un matrimonio, el de funcionar como una reducción de velocidad que ayudará a llegar al valor objetivo propuesto por la norma.



**Figura 3.7. Conexión de las cajas reductoras a través de transmisiones por cadena**

Las cadenas usadas son número 40 según el cálculo hecho en el capítulo anterior, estas cadenas serán engrasadas y puestas sobre las catarinas. Se deberá tener una longitud lo suficiente para que

las cadenas no se cuelguen en un lado ni tampoco estén tan tensadas. En el capítulo anterior se calculó la distancia central máxima para la primera y segunda cadena.

#### **3.1.4. Tornillo de potencia y mordaza**

El tornillo de potencia será el encargado de transformar el movimiento rotacional entregado por los motores y cajas en movimiento lineal el cual está regulado bajo la norma ASTM G129. Este tornillo de potencia tendrá una longitud de 180mm y dimensiones previamente descritas en el capítulo 2, su ubicación en el banco dependerá del punto en donde se quiere centrar la probeta sobre el marco de carga.

El tornillo tendrá que quedar completamente perpendicular con respecto a la mesa base para obtener la recta sobre la cual trabajarán las fuerzas que van a actuar en la probeta. Es necesario que no exista desviación alguna del tornillo ya que esto puede proporcionar una mala transmisión de fuerzas y además, generar cargas excéntricas que producirán pandeos sobre los elementos de tensión de la probeta y, podrían afectar al correcto desarrollo del experimento dando lugar a resultados erróneos de la fuerza aplicada en el ensayo.

El movimiento de este tornillo será inducido por una transmisión cadena-catarina que hará una reducción más a la velocidad de salida de la segunda caja. El piñón que se acoplará al tornillo de potencia será de 24 dientes y tendrá una rosca interna para que el tornillo se desplace verticalmente. Se realizará la sujeción de este piñón a un disco macizo por medio de pernos para tener un mejor agarre y evitar que la soldadura pueda romperse por la fuerza que se generará sobre este piñón. Se soldará un eje para que haga la función de bastidor, tal como se muestra en la figura 3.8.



**Figura 3.8. Eje de Apoyo del Piñón que Mueve el Tornillo de Potencia**

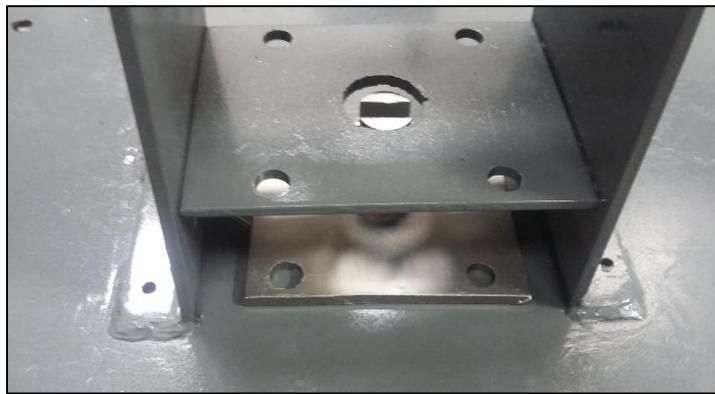
Este eje estará sujetado por dos chumaceras de pared de 4 agujeros de  $\varnothing=35\text{mm}$ , los cuales serán colocadas sobre un soporte de acero ( $e=6\text{mm}$ ) que estará sujetado a la mesa base por medio de pernos, como se muestra en la figura 3.9. La altura del soporte

ha sido determinada tomando en cuenta el máximo estiramiento que va a tener la probeta el cual será de alrededor de 2cm, y el de la posición del engrane que esta sobre el eje de salida de la tercera caja. Además se colocará un grillete al eje que soportará el piñón, para evitar que el piñón trate de subir por medio del tornillo de potencia.



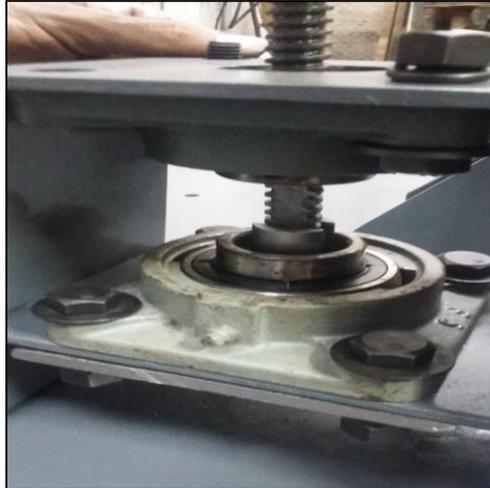
**Figura 3.9. Instalación de las Chumaceras en el Soporte de Acero ASTM A36**

En la punta del tornillo de potencia se le hará una cara plana y se construirá una placa cuadrada con un eje en el centro de la misma, la cual irá sujeta con pernos a una placa del soporte. De igual forma se desbastará con la ayuda de un buril al eje para que tenga un canal como se ve en la figura 3.10,



**Figura 3.10. Eje Guía para el Tornillo de Potencia**

El cual el tornillo de potencia se desplazará verticalmente dentro del canal para evitar algún esfuerzo de torsión sobre la probeta, como se muestra en la figura 3.11. Se ha decidido dejar una profundidad en el canal del eje de 5 cm, para que el tornillo de potencia tenga ese recorrido para evitar cualquier imprevisto cuando se rompa la probeta y el tornillo de potencia continúe desplazándose sin tener algún tope que lo interrumpa y fuerce al motor.



**Figura 3.11. Desplazamiento del Tornillo de Potencia sobre el Eje Guía**

El tornillo de potencia estará conectado en la parte superior a una barra de acero AISI 1018 de dimensiones descritas anteriormente. Los extremos donde el tornillo y la barra estarán conectados serán maquinados hasta tener un acople, en el cual se colocará un pasador que servirá de conector. Esta barra tendrá la función de transmitir la fuerza de tensión ejercida por el tornillo de potencia a una placa de apoyo que estará fijada a la mordaza inferior de la probeta. Tanto esta placa de apoyo y la mordaza serán de acero inoxidable AISI 304 debido a que parte de ésta, entrará en contacto con el medio corrosivo que se usarán en el ensayo.

Las mordazas serán ejes de  $\varnothing=20\text{mm}$ , las cuales serán maquinadas con una rosca en el extremo de donde será

conectada la probeta. En la parte inferior de la mordaza estará soldada una placa de apoyo que servirá para sostener la cámara y evitar que se caiga cuando el ensayo se está produciendo. El eje que tendrá la rosca para sujetar a la probeta se deslizará a través de un retenedor colocado en la tapa de la cámara experimental. Todo este sistema será desmontable con la finalidad de tener una mayor facilidad para colocar y retirar las probetas cuando se realicen los ensayos.

La parte superior de la sujeción de la probeta consistirá básicamente de dos elementos que estarán conectados a un sujetador fijo que estará en el marco de carga. Para implementar este sujetador se hizo una perforación justo en la mitad de la viga horizontal de la estructura, por el orificio se pasará un sujetador que consiste en un eje de  $\varnothing = 22\text{mm}$ , el cual en un extremo estará soldado a una placa de apoyo que se fijará en la parte superior del marco. La parte inferior del sujetador será maquinado para formar un acople donde será unido por un pasador con el conector que sostiene a la celda de carga, como se muestra en la figura 3.12. Para la fijación del sujetador se deberá tomar en cuenta la perpendicularidad con respecto al marco y la concetricidad con respecto al tornillo de potencia en la parte inferior de la máquina.



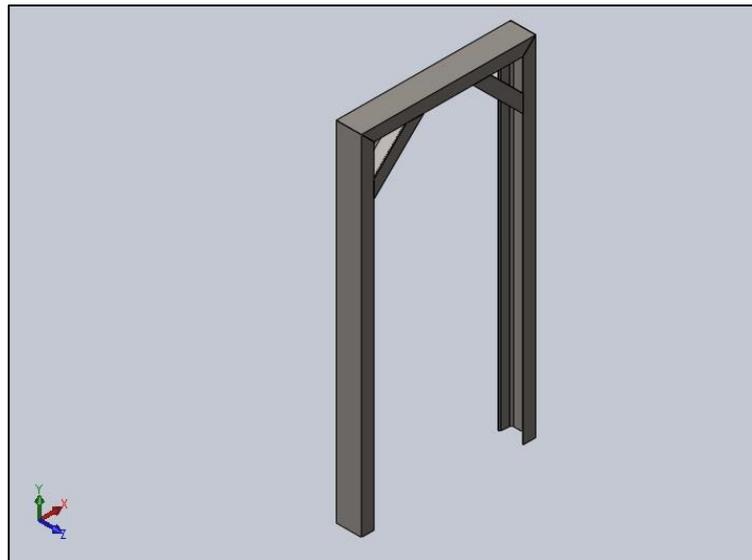
**Figura 3.12. Sujeción de la Celda de Carga**

La celda de carga será sujeta al marco por dos conectores que serán fabricados a partir de pernos de acero grado 8 los cuales a su vez, estarán roscados a los extremos de la celda. La mordaza superior de la probeta estará conectada por un acople de pasador con el sujetador de la celda, esta mordaza será fabricada en acero inoxidable por el contacto que va a mantener con el medio corrosivo, sobre la mordaza se soldará la cubierta superior de la cámara para sujetarla al eje y evitar su desplazamiento cuando se estire la probeta.

### **3.2. Acople de la estructura del banco de prueba**

La estructura del marco será en perfil UPN 100 y tendrá la forma mostrada en la figura 3.13, este marco consistirá en dos tramos verticales conectados por una viga horizontal del mismo perfil y

entre estos, se soldarán dos apoyos que ayudarán a que ésta viga no se flexe cuando esté sometido a las fuerzas que ocurren mientras se hace el ensayo. La estructura será soldada perpendicularmente sobre la mesa y se reforzará con dos cartelas en plancha de 6mm en la parte inferior con las dimensiones mostradas en el plano 12, estas cartelas harán que los perfiles que hacen de columnas no se pandeen cuando el banco de pruebas esté trabajando.



**Figura 3.13. Marco de Cargas del Banco de Prueba**

La posición de este marco dependerá del punto centro del tornillo de potencia ya que, este es el punto donde se aplicarán las cargas que debe soportar la estructura. El perfil será elegido por tener una

mejor inercia (206 cm<sup>4</sup>) en comparación con un canal C de las mismas dimensiones además de que este tipo de perfil es usado regularmente, en situaciones donde las estructuras son propicias a flexarse. Los datos de inercia y las dimensiones del perfil serán los proporcionados por el proveedor y la ficha técnica del mismo se encuentra en el apéndice 7.

### **3.2.1. Cámara experimental**

Como cámara de ensayo se acoplará un sensor de flujo en T, como se muestra en la figura 3.14, la cual tendrá un visor de cristal por lo que se podrá observar el comportamiento de la probeta a lo largo de la prueba. Esta cámara constará de varias piezas y empaques que serán necesarios colocarlos para que no exista ningún tipo de fugas del medio corrosivo y de esta forma la prueba se realizará de la manera más uniforme posible. En la tapa superior de la cámara se harán 3 perforaciones para introducir la mordaza de la probeta, la resistencia eléctrica y el bulbo, ya que estos tres elementos deberán estar en contacto directo con el medio corrosivo de la cámara experimental. El orificio que servirá para introducir la mordaza será de un diámetro de 20 mm, el de la resistencia será de 3/4" y el del bulbo de 5.5mm con el cuidado de hacer esta última lo más cercano posible a la caja de control debido a la poca longitud

de la conexión que deberá ir al termostato. Estos orificios deberán ser del tamaño adecuado para que pase cada uno de los elementos sin que exista fuga alguna por la cual pueda escapar el medio corrosivo que estará contenido en la cámara y para esto se usarán empaques para que el ajuste sea más preciso. El plano 9 detalla todos los componentes que conforman a la cámara y muestra la configuración de los mismos para realizar un buen sellado.

La tapa superior será soldada al eje para que sirva de soporte a la cámara y también facilitará el acople de la misma a la máquina. La tapa inferior de la cámara será perforada para que pueda pasar el eje de la mordaza y se usará un retenedor para evitar fugas del medio. La instalación de la cámara se la realizará cuando se haya acoplado todos los visores y cuando la probeta esté asegurada a las mordazas.



**Figura 3.14. Cámara Experimental**

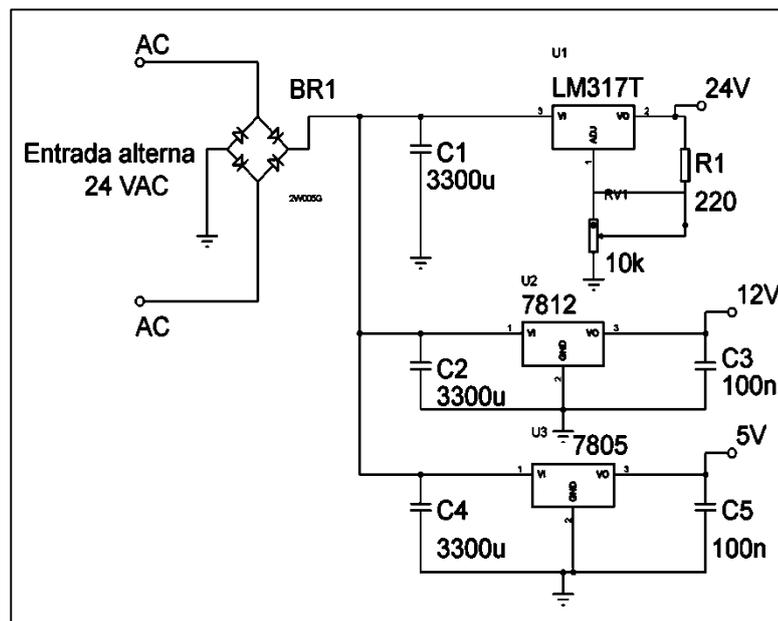
La instalación de la cámara corresponde a la última instancia de la parte mecánica de la máquina y por tanto, será necesario hacer una revisión de todas las conexiones para comprobar si están correctamente ajustados, no haya piezas flojas, las conexiones por bandas y cadenas están correctamente tensadas y en fin, hacer un chequeo completo antes de poner a prueba la máquina.

### **3.3. Conexión del Sistema Electrónico**

#### Fuente con 3 salidas de voltaje

Para realizar la conexión de la celda de carga, del sensor ultrasónico y de la tarjeta de adquisición de datos se necesita una alimentación con un voltaje DC. Se usó una fuente con 3 salidas de voltaje, la cual convertía el voltaje alterno a directo. Se utilizó un transformador de 120 VAC a 24 VAC para alimentar la fuente conectada a la entrada de la misma. El puente rectificador consta de 4 diodos rectificadores, utilizados para rectificar la corriente. En el punto BR1 se tendrá un voltaje rectificado pero no regulado, es decir que en ese terminal ya se tiene un voltaje directo pero no constante. Se utilizaron 3 capacitores para reducir la caída de la señal obtenida para tratar de hacerla constante. El regulador toma esta señal para regular por completo la señal. Como en el mercado no se encontraba un regulador de 24 V, se utilizó un regulador

variable de voltaje positivo (LM317T), el cual regulaba entre 1 a 30 voltios. Se lo ajustó por medio del potenciómetro a 24 voltios, ya que ese es el voltaje que se necesita para alimentar el sensor ultrasónico. Los otros reguladores usados fueron el 7812 y 7805, en donde el 78 significa que provee un voltaje positivo y el 12 es el valor de voltaje regulado. Lo mismo ocurre para el 7805. Se usaron capacitores conectados a la salida del regulador para disminuir el ruido y obtener más estabilidad en la salida DC. En la figura 3.15 se ilustra la fuente con los 3 voltajes de salida.



**Figura 3.15. Circuito de la fuente con 3 salidas de voltaje DC**

### Conexión de la celda de carga

La celda de carga constaba de 4 cables para realizar su conexión. El de color blanco iba a ser la salida positiva del sensor, el color verde será la salida negativa del sensor, el cable de color rojo será la alimentación positiva del sensor y el cable negro será la tierra. Se utilizó un circuito de acondicionamiento de la señal de la celda de carga, mostrado en la figura 3.16, el cual constaba de un amplificador de instrumentación (AD620). Se empleó este circuito ya que la señal de salida máxima de este sensor es de 20 mili voltios cuando está en su carga máxima según la ficha técnica, la cual es muy baja y no permitirá hacer una buena adquisición de datos. La tarjeta Arduino tiene una resolución de 10 bits, es decir tiene 1024 niveles y por cada 5 mili voltios reconoce un nivel, es decir que cuando esté operando a su carga máxima la tarjeta se ubicará en el 4 nivel. Esto genera que la resolución de la curva obtenida sea mala. Al usar el AD620 no se necesitaba de otros circuitos para amplificar la señal, es decir que el integrado realizaba esta función con el menor ruido posible basados en los datos de especificación del amplificador de instrumentación. Para obtener la ganancia se realizó la relación entre el voltaje máximo que soporta la tarjeta y el voltaje máximo que provee la celda de carga cuando

se le aplica la máxima carga, esta relación se la muestra en la ecuación 3.1.

$$G = \frac{\text{Voltaje de salida del amplificador}}{\text{Voltaje de entrada del amplificador}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$G = \frac{5 \text{ v}}{20 \text{ mv}}$$

$$G = 250$$

La ganancia de la celda de carga descrita por la ficha técnica se la muestra en la ecuación 3.2.

$$G = \frac{49.9 \text{ K}\Omega}{R - 1} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Se utilizará la ecuación 3.2, para conocer el valor de ajuste de la resistencia usando la ganancia calculada anteriormente.

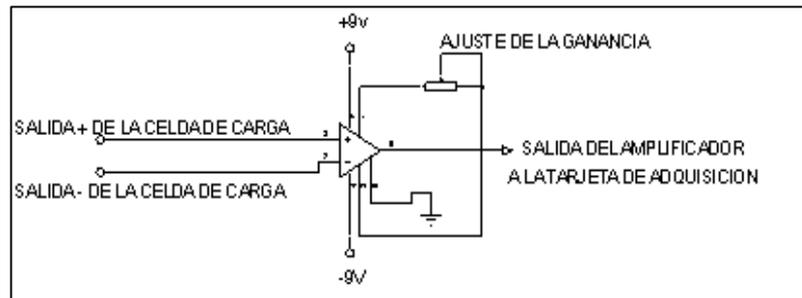
$$250 = \frac{49.9 \text{ K}\Omega}{R - 1}$$

$$R = \frac{49900 \Omega}{250} + 1$$

$$R = 200.6 \Omega$$

Con el multímetro se ajustará el potenciómetro para obtener el valor de la resistencia calculada. Además el amplificador de

instrumentación constará de una fuente dual de 9 voltios, ya que así lo requiere el amplificador. Una vez obtenido todas las variables definidas, se conectará el pin 6 a la tarjeta de datos.

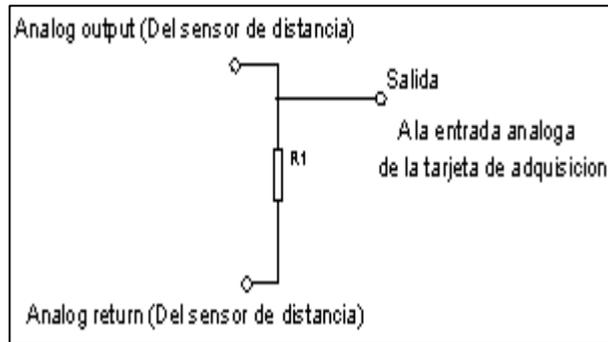


**Figura 3.16. Acondicionamiento de la señal de la celda de carga**

### Conexión del sensor ultrasónico

En la figura 3.17, se ilustra cómo se realizó el acondicionamiento de la señal que provee el sensor de distancia, el cual constaba de 4 cables, 2 eran de la alimentación (el cable color naranja es el de la alimentación y el cable blanco con naranja es el de tierra) y los otros de la señal análoga (el cable blanco con celeste es el de la salida análoga y el cable celeste es el de la señal de retorno) por la cual se realiza la adquisición. La corriente que sale por el pin de la salida análoga debe regresar por el pin de retorno. La corriente máxima que circula es de 20 mA y como el voltaje máximo que

soporta la tarjeta es de 5 voltios se deberá usar una resistencia de 250 ohmios. Se realizó esta conexión ya que la tarjeta solo censa voltaje.



**Figura 3.17. Acondicionamiento del sensor de distancia**

### Panel de control

Todas las conexiones de los sensores y componentes electrónicos que se usarán, estarán ubicadas dentro de un panel de control, que será colocado en la parte izquierda del marco como se muestra en la figura 3.18.



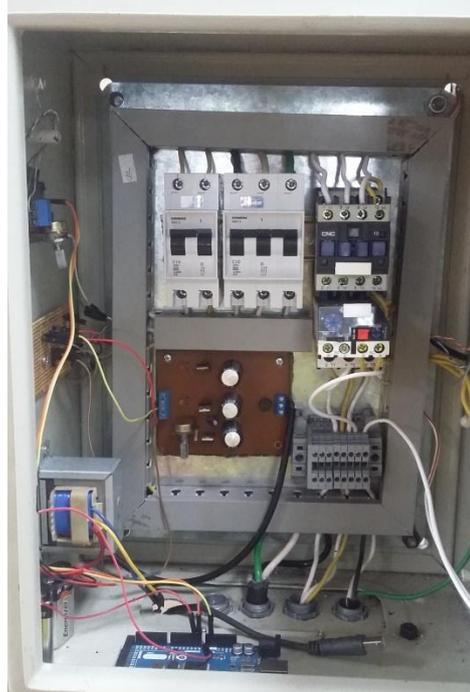
**Figura 3.18. Instalación del panel de control en la estructura**

Los cables que salen del motor y se dirigen a la caja serán pasados a través de canaletas que estarán acopladas a la estructura con el fin de evitar enredamientos y desorden de los cables además de, impedir que toque alguna parte movable del banco y ocurra algún imprevisto.

Como el motor que se utilizará es uno trifásico se deberá hacer su respectiva conexión. Al panel le llegan tres fases de los siguientes colores: verde blanco y negro, los cuales representan la conexión trifásica y se conectarán al breaker trifásico. Este breaker controlará al contactor y al relé térmico y a su vez alimentará al breaker de 2 polos. Del relé térmico salen 3 cables de color: blanco, amarillo y blanco para alimentar al motor eléctrico. En el

caso de que se desee invertir el sentido de giro del motor, se deberá invertir dos de los tres cables que salen del relé térmico. El breaker de 2 polos controlará al pulsador de marcha y paro del motor.

Además se deberá tener una alimentación a 110 voltios, la cual llegará al panel de control con los siguientes colores: blanco, negro y verde. El neutro será el cable color blanco, la fase será de color negro y la tierra será de color verde, la cual estará conectada a la placa lateral para protección del panel. Estos cables llegarán a las borneras para alimentar a la resistencia eléctrica, la cual estará conectada en serie con el termostato para que regule la temperatura. Se instalará una fuente con tres salidas de voltaje para alimentar al sensor ultrasónico con 24 voltios, la celda de carga con 12 voltios y la tarjeta de adquisición de datos con 5 voltios. Esta fuente constará con su respectivo transformador, el cual se lo alimentará de la conexión de 110 voltios que le llega a las borneras. Todas estas conexiones se la muestran en la figura 3.19.

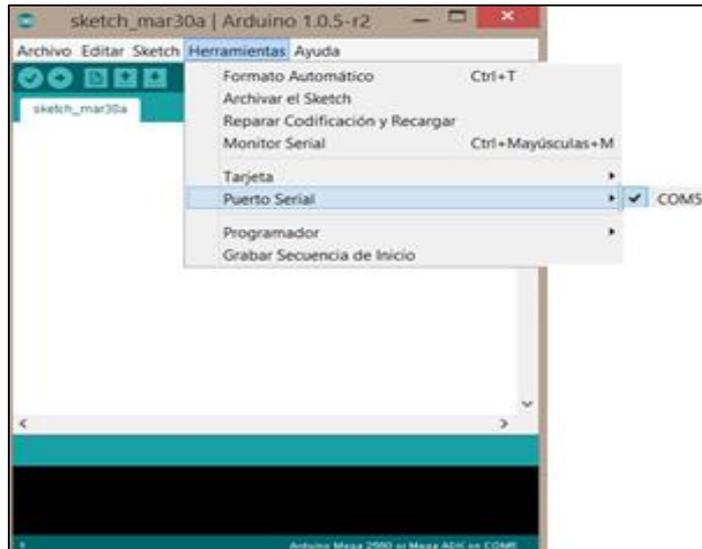


**Figura 3.19. Conexiones dentro del panel de control**

### **3.4. Protocolo de calibración y pruebas**

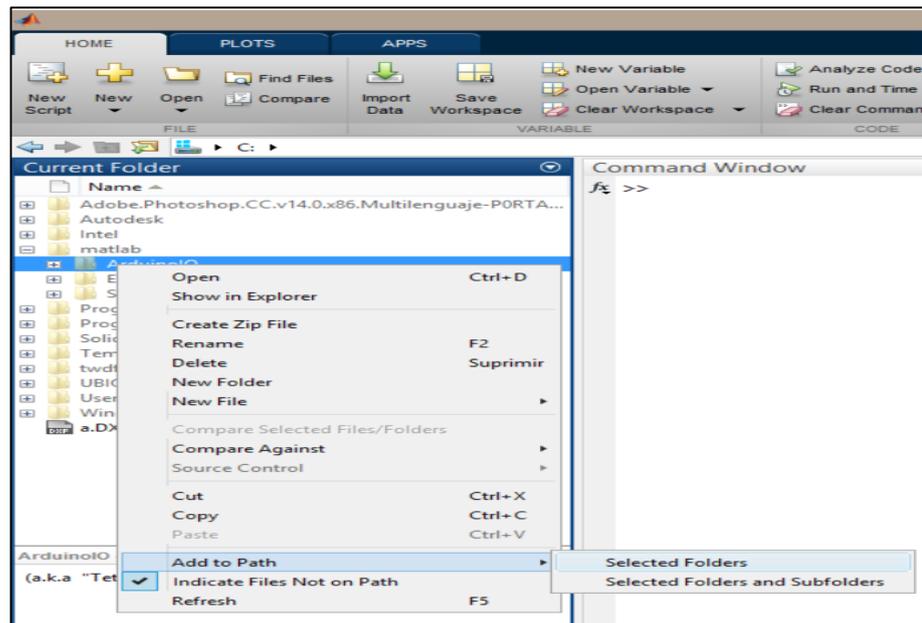
Para realizar la calibración de los sensores se realiza la conexión del programa Matlab con la tarjeta de adquisición de datos. Se descargó de internet el software Arduino (15). Una vez descargado e instalado el programa, se conecta la tarjeta al puerto USB de la laptop. Para identificar el puerto al que está conectada la tarjeta se selecciona dentro del software Arduino la opción de Herramientas y

luego se busca el puerto serial, tal como se ilustra en la figura 3.20. El nombre del puerto se lo utiliza para hacer el enlace en el programa Matlab con la tarjeta.



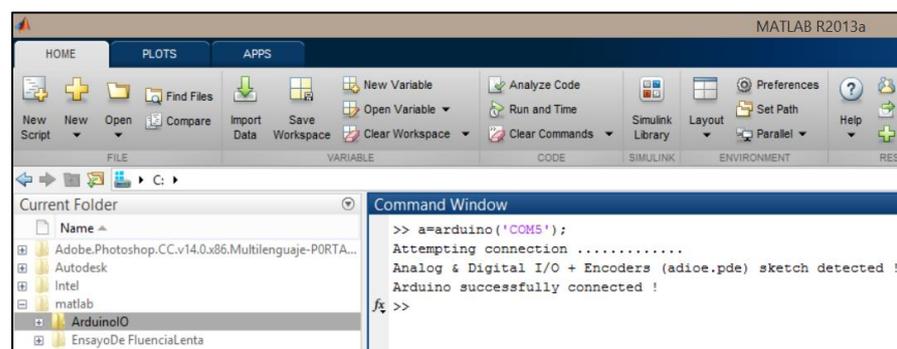
**Figura 3.20. Identificación del Puerto Serial**

Dentro del programa de Matlab se busca la ruta, para acceder a todos los comandos que vienen en el paquete de soporte de Arduino. Para realizar esta selección se siguieron los pasos mostrados en la figura 3.21.



**Figura 3.21. Ruta para comandos del programa Arduino**

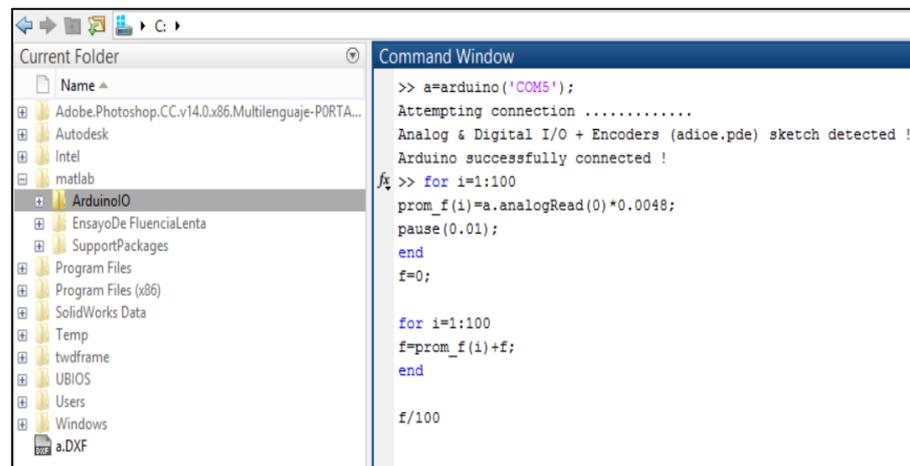
Para realizar la conexión del programa Matlab con la tarjeta de datos, se debe escribir el código mostrado en la figura 3.22, es importante conocer que el número del COM variará si se utiliza otra tarjeta de datos o si se la conecta en otro puerto USB diferente.



**Figura 3.22. Conexión de la tarjeta Arduino**

### **Código para calibrar la celda de carga**

Una vez enlazada la tarjeta de datos con el programa Matlab se escribió el código mostrado en la figura 3.23, el cual se utilizó para calibrar la celda de carga. El programa consiste en realizar un ciclo con el comando FOR, el cual tomaba 100 datos. Los datos censados se almacenan en el vector PROM\_F(i). Cada 10 milisegundos tomaba un dato. Luego se procede a sumar todos los datos capturados para sacar el promedio que corresponde al peso censado en ese momento.



```
>> a=arduino('COM5');
Attempting connection .....
Analog & Digital I/O + Encoders (adiao.pde) sketch detected !
Arduino successfully connected !
>> for i=1:100
    prom_f(i)=a.analogRead(0)*0.0048;
    pause(0.01);
end
f=0;

for i=1:100
    f=prom_f(i)+f;
end

f/100
```

**Figura 3.23. Código para la calibración de la celda de carga**

### **Calibración de la celda de carga**

Los sensores adquiridos que se calibraron fueron el sensor ultrasónico y la celda de carga.

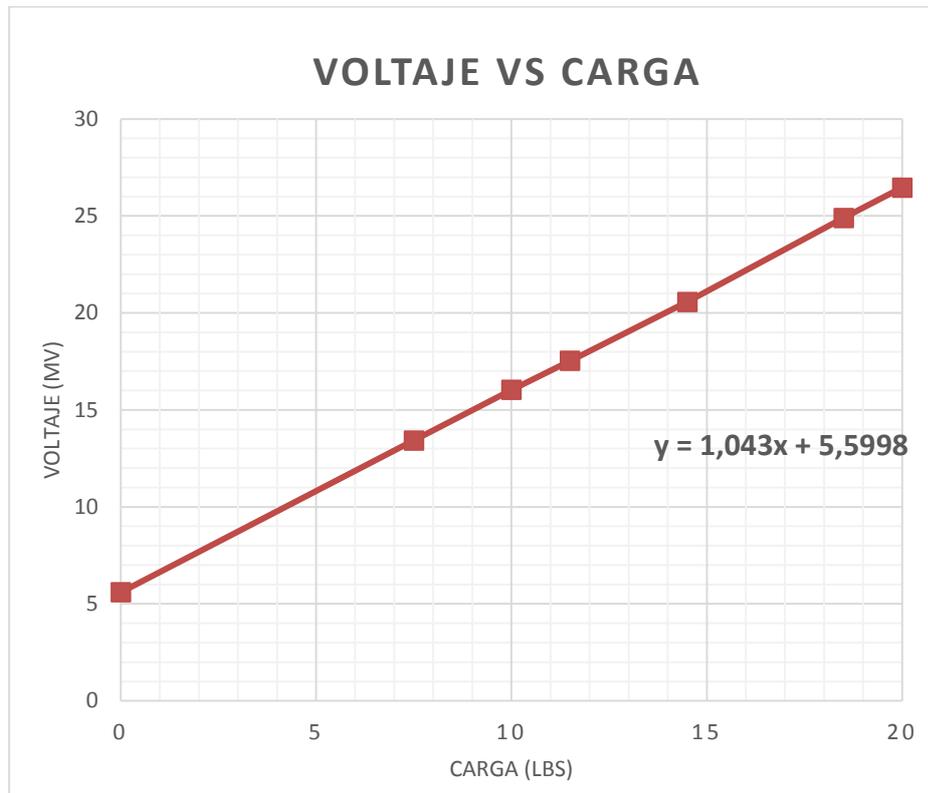
Para obtener el valor de la fuerza que se le aplicaba a la celda de carga se utilizó una tarjeta de adquisición de datos llamada Arduino. La cual censaba la señal eléctrica que arrojaba la celda de carga. Esta señal será del orden de unos pocos mili voltios por lo que se utilizó un amplificador de instrumentación antes de utilizar la tarjeta Arduino.

Para calibrar la celda de carga se utilizó la norma ASTM E-8, la cual establece el uso de pesos conocidos y además anuncia que la gráfica obtenida debe tener una tendencia lineal. En la calibración se la utilizaron pesos de 0, 7.50, 10, 11.44, 14.35 ,18.50 y 20 lbs. Cada uno de estos pesos fue censado con la tarjeta Arduino para obtener su respectivo voltaje como se ilustra en la tabla 32.

**TABLA 12**  
**DATOS OBTENIDOS EN LA CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE**  
**CARGA**

| Carga (lbs) | Voltaje (mv) |
|-------------|--------------|
| 0           | 5,60         |
| 7,50        | 13,422       |
| 10          | 16,03        |
| 11,50       | 17,531       |
| 14,50       | 20,567       |
| 18,50       | 24,895       |
| 20          | 26,46        |

La gráfica ilustrada en la figura 3.24 se la obtuvo de la tabla mostrada anteriormente:



**Figura 3.24. Curva de Calibración de la Celda de Carga**

En la figura se puede ver que la pendiente de la gráfica es  $1.043 \frac{mv}{Lbs}$  y además por medio de la ecuación 3.3 se obtiene la curva de calibración de la celda de carga:

$$V = 1.043(F) + 5.60 \quad Ec. 3.3$$

Se despejó el valor de la carga de la ecuación 3.3 para obtener la carga aplicada por medio del voltaje censado por la tarjeta Arduino.

$$F = \frac{(V - 5.60)}{1.043}$$

Esta ecuación se utilizará para censar la fuerza que estará siendo aplicada a la celda de carga cuando empiece el ensayo. Siempre se originará una precarga en este sensor debido al peso del tornillo que sale de la misma y a los ejes que hacen de sujeción de la probeta. La norma ASTM E8 establece que la precarga que se origina no deberá ser anulada matemáticamente, esta precarga no deberá exceder del 10% del límite de fluencia. Para tener una referencia más clara, el cálculo de este valor se lo realizó por medio de la ecuación 2.1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$31 \text{ MPa} = \frac{F}{\pi * 2^2}$$

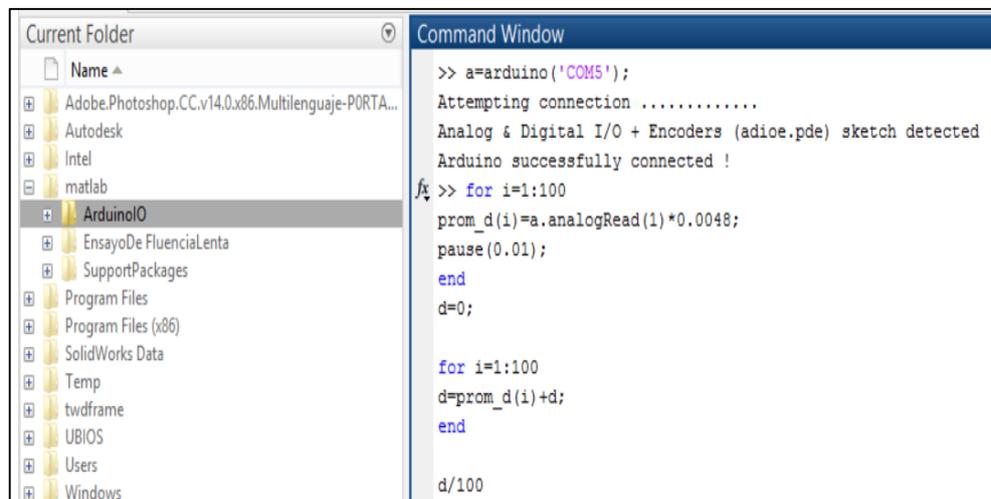
$$31 \text{ MPa} = \frac{F}{1.256 * 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$F = 87.53 \text{ lb}_f$$

Se obtiene una fuerza máxima para la precarga de 87.53 lbf, la cual deberá ser el valor máximo que se cense la celda de carga por la precarga que existirá antes de comenzar el ensayo.

### **Código para calibrar el sensor ultrasónico**

Una vez enlazada la tarjeta de datos con el programa Matlab se escribió el código mostrado en la figura 3.25, el cual se utilizó para calibrar el sensor ultrasónico. El programa consiste en realizar un ciclo con el comando FOR, el cual tomaba 100 datos. Los datos censados se almacenan en el vector prom\_d(i). Cada 10 milisegundos tomaba un dato. Luego se procede a sumar todos los datos capturados para sacar el promedio que corresponde al peso censado en ese momento.



```

Current Folder
Name ▲
Adobe.Photoshop.CC.v14.0.x86.Multilinguaje-PORTA...
Autodesk
Intel
matlab
ArduinoO
  EnsayoDe FluenciaLenta
  SupportPackages
Program Files
Program Files (x86)
SolidWorks Data
Temp
twdfame
UBIOS
Users
Windows

Command Window
>> a=arduino('COM5');
Attempting connection .....
Analog & Digital I/O + Encoders (adiao.pde) sketch detected !
Arduino successfully connected !
>> for i=1:100
    prom_d(i)=a.analogRead(1)*0.0048;
    pause(0.01);
end
d=0;

for i=1:100
d=prom_d(i)+d;
end
d/100

```

**Figura 3.25. Código para calibrar el sensor ultrasónico**

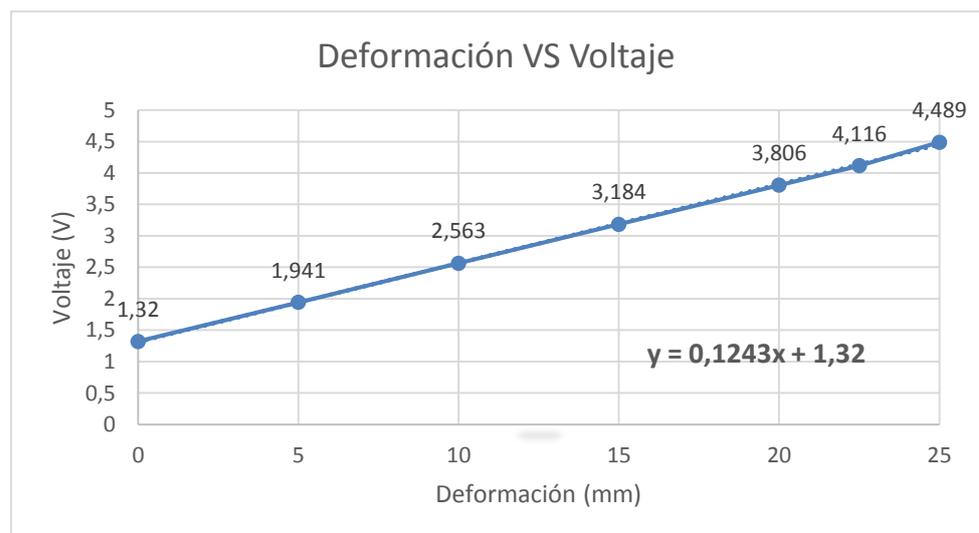
### **Calibración del sensor ultrasónico**

La curva de calibración del sensor ultrasónico deberá tener una tendencia lineal. El sensor tendrá un rango de 11.94 a 200.66 cm, para configurar el sensor de distancia se debe mantener presionado el botón de seteo hasta que la luz parpadee verde, se deja de presionar el botón lo cual indica que está listo para tomar el límite máximo. Se coloca frente a un objeto a una distancia conocida y se presiona el botón de seteo, se encenderá una luz de color naranja que significa que se ha definido el límite máximo. Posteriormente se coloca el sensor a una distancia menor a la primera para setear el límite mínimo, se presiona el botón de seteo y se encenderá una luz color verde que indicará que se ha definido el límite mínimo. El sensor de distancia arroja una señal eléctrica en voltios la cual será censada por la tarjeta Arduino. Un factor importante es que este sensor deberá ser calibrado con cada ensayo ya que no siempre empezará en el mismo nivel de referencia que el ensayo anterior y por tal motivo va a variar la ecuación de la curva de calibración. El sensor ultrasónico para el primer ensayo está seteo bajo los siguientes datos:

**TABLA 13**  
**DATOS OBTENIDOS EN LA CALIBRACIÓN DEL SENSOR**  
**ULTRASÓNICO**

| Deformación (mm) | Voltaje (V) |
|------------------|-------------|
| 0                | 1,32        |
| 5                | 1,941       |
| 10               | 2,563       |
| 15               | 3,184       |
| 20               | 3,806       |
| 22,5             | 4,116       |
| 25               | 4.489       |

La gráfica ilustrada en la figura 3.26 se la obtuvo de la tabla mostrada anteriormente.



**Figura 3.26. Curva de Calibración del Sensor Ultrasónico**

En la figura se puede ver que la pendiente de la gráfica es 0.1243  $\frac{v}{mm}$  y además por medio de la ecuación 3.4 se obtendrá la curva de calibración del sensor de distancia:

$$V = 0.1243(D) + 1.32 \quad \text{Ec. 3.4}$$

Se despejó el valor de la deformación de la ecuación 3.4 para obtener su respectivo valor, el cual es censado por la tarjeta Arduino:

$$D = \frac{(V - 1.32)}{0.1243}$$

Esta ecuación se utilizará para censar la deformación que se le aplicará a la probeta cuando empiece el ensayo.

### **3.5. Costo-beneficio de la implementación del modelo**

Se describirá en la tabla 34 el precio de los materiales que serán adquiridos para la construcción del banco de prueba. Se realizará un análisis del costo utilizando equipos y materiales nuevos.

TABLA 14

## COSTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBA

| Descripción  | Cantidad  | Costo Unitario | Costo Total |
|--|-----------|----------------|-------------|
| Motor Trifásico de 2HP/1725 rpm                          | 1         | \$ 245.00      | \$ 245.00   |
| Doble Caja reductora con reducción de velocidad de 750:1 | 1         | \$905.00       | \$905.00    |
| Caja reductora con reducción de velocidad de 60:1        | 1         | \$ 477.00      | \$ 477.00   |
| Polea de 1 canal tipo A de 3"                            | 1         | \$ 2.24        | \$ 2.24     |
| Polea de 1 canal tipo A de 9"                            | 1         | \$ 7.49        | \$ 7.49     |
| Banda A35  | 1         | \$ 3.90        | \$ 3.90     |
| Piñón 40B24  | 2         | \$ 36.94       | \$ 73.88    |
| Piñón 40B12  | 1         | \$ 18.61       | \$ 18.61    |
| Piñón 40B10  | 1         | \$ 13.08       | \$ 13.08    |
| Galón de aceite SAE-40                                   | 1         | \$ 8.93        | \$ 8.93     |
| Medio eslabón para cadena, número 40                     | 1         | \$ 1.34        | \$ 1.34     |
| Celda de carga tipo s de 2 toneladas                     | 1         | \$ 200.00      | \$ 200.00   |
| Riel Din Acero 35mmx1m                                   | 1         | \$ 2.63        | \$ 2.63     |
| Canaleta Ranurada 25x25mm                                | 1         | \$ 3.31        | \$ 3.31     |
| Contactador CSC-9A/220V                                  | 1         | \$ 7.16        | \$ 7.16     |
| Relé Térmico CSC 7-10A                                   | 1         | \$ 7.61        | \$ 7.61     |
| Pulsador CSC- verde-rojo                                 | 1         | \$ 4.50        | \$ 4.50     |
| Breaker de 3 polos 10A-240V SIEMENS                      | 1         | \$ 19.73       | \$ 19.73    |
| Breaker de 2 polos 10A-240V SIEMENS                      | 1         | \$ 11.81       | \$ 11.81    |
| Tornillo 6x1/2"  | 24        | \$ 0.03        | \$ 0.72     |
| Sensor Ultrasónico                                       | 1         | \$ 440.00      | \$ 440.00   |
| Resistencia por inmersión 150Watts/110V                  | 1         | \$ 40.00       | \$ 40.00    |
| Termostato analógico                                     | 1         | \$ 25.00       | \$ 25.00    |
| Cable Flexible Número 14                                 | 20 metros | \$ 0.420       | \$ 8.40     |
| Pintura anticorrosiva gris                               | 2 litros  | \$ 4.80        | \$ 9.60     |
| Pintura Laca sintética azul                              | 1 litro   | \$ 5.26        | \$ 5.26     |

|  |            |           |            |
|--|------------|-----------|------------|
| Breaker trifásico 3x20A                        | 1          | \$ 17.52  | \$ 17.52   |
| Caja para breaker trifásico                    | 1          | \$ 7.63   | \$ 7.63    |
| Tomacorriente 50A 125-250V                     | 1          | \$ 16.25  | \$ 16.25   |
| Cable concéntrico 3x10                         | 1.5 metros | \$ 5.62   | \$ 8.43    |
| Mano de obra                                   |            | \$ 900.00 | \$ 900.00  |
| Chumacera de 4 agujeros con agujero de 35 mm   | 2          | \$ 45.00  | \$ 90.00   |
| Rodamiento de bolas 6003                       | 2          | \$ 4.85   | \$ 9.70    |
| Visor de flujo en T                            | 1          | \$ 300.00 | \$ 300.00  |
| Viga UPN100                                    | 1          | \$ 65.47  | \$ 65.47   |
| Cadena paso 40                                 | 6 mts      | \$64.85   | \$64.85    |
| Eje de Acero inoxidable 304 de 22 x 600 mm     | 1          | \$ 35.78  | \$ 35.78   |
| Eje de Acero de transmisión 1018 de 22x1000 mm | 1          | \$ 29.76  | \$ 29.76   |
| Transformador de 120/12 v                      | 1          | \$8.40    | \$8.40     |
| Fuente de poder DC de 5v,12v,24v               | 1          | \$5.25    | \$5.25     |
| Tablero de Control 40x30x20 cm                 | 1          | \$80.00   | \$80.00    |
| Pernos M20x110mm grado 8                       | 2          | \$3.80    | \$7.60     |
| Pernos M6x40mm grado 8                         | 4          | \$0.80    | \$3.20     |
| Pernos M12x60 mm                               | 8          | \$0.22    | \$1.76     |
| Costo Total                                    |            |           | \$ 4193.80 |

La construcción de este banco experimental será de aproximadamente \$4193.80.

En el mercado se encontró que el banco de prueba está en un precio que oscila entre \$6000 a \$16000 y son elaboradas en China como se ilustra en la figura 3.27. A medida que incrementa el precio

la máquina tendrá mayores dimensiones y la celda de carga tendrá una mayor capacidad por lo que se podrán escoger probetas normalizadas de mayor tamaño. El banco experimental con una capacidad de 1 tonelada oscila en un precio entre \$ 6000- \$ 7000 sin considerar el precio de entrega de la misma (16).



**Figura 3.27. Máquina Elaborada en China para el Ensayo a Velocidad de Deformación Lenta**

# **CAPÍTULO 4**

## **4. SIMULACIÓN DEL MECANISMO DE CORROSIÓN BAJO ESFUERZO A DEFORMACIÓN LENTA**

### **4.1. Descripción del ensayo**

El ensayo de corrosión bajo esfuerzo a deformación lenta es una evaluación comparativa y por lo menos se la debe realizar en dos ambientes: El primero deberá estar sometido a condiciones normales de trabajo (sin un medio corrosivo aplicado). El otro ambiente debe ser uno, en el cual la resistencia a la fractura producida por el medio ambiente deberá ser analizada (17).

La prueba de laboratorio para determinar la susceptibilidad de la corrosión bajo esfuerzo de un material puede proporcionar datos que pueden incrementar el nivel de confianza y a su vez permitir la elección adecuada de los materiales estructurales.

En este tipo de ensayo, la probeta se someterá continuamente a un esfuerzo de tensión hasta que se logre la fractura. La ventaja principal de este tipo de ensayo es que permite la evaluación de las variables metalúrgicas tales como: composición de la aleación, microestructura y parámetros ambientales, en una duración relativamente corta.

El banco de prueba tendrá una capacidad máxima de carga de 2 toneladas con una extensión lineal de  $2.5 \times 10^{-7}$  m/s.

Esta unidad consistirá de un motor eléctrico, cajas reductoras de velocidad, tornillo de potencia, cámara experimental, celda de carga, sensor ultrasónico, soporte estructural. La celda de carga es la que censará la fuerza que se le aplique a la probeta y el sensor ultrasónico medirá la deformación de la misma. Por medio de una tarjeta de adquisición de datos se obtendrán los datos que arrojan los sensores y por medio de la codificación en Matlab se logrará procesar estos datos para obtener los valores deseados. Se obtendrán gráficos de fuerza vs tiempo, Deformación vs tiempo. Estas gráficas se las procesará para obtener la gráfica de esfuerzo vs deformación.

Como se explicó en capítulos anteriores para que ocurra la corrosión bajo esfuerzos deberán estar presentes tres factores:

material susceptible, tensión aplicada o residual, medio corrosivo. Si se aplica la tensión a una velocidad muy rápida, mientras la muestra de ensayo está expuesta al medio corrosivo, se obtendrá datos erróneos, es decir que se obtendrán datos de una deformación mecánica producida sin un entorno. Por otro lado, si la velocidad de deformación es demasiado lento, se obtendrá un fracaso en el ensayo atribuido al daño corrosivo debido a la interacción del medio ambiente con el material.

Las pruebas del ensayo de corrosión bajo esfuerzo a deformación lenta se lleva a cabo a velocidades que oscilan entre  $2.54 \times 10^{-6}$  a  $2.54 \times 10^{-9}$  m/s. Sobre la base de este trabajo experimental, se determinó que una velocidad de deformación de  $2.5 \times 10^{-7}$  m/s proporcionará contribuciones eficaces para este tipo de ensayo.

La susceptibilidad del acero inoxidable AISI 304 se evaluará mediante el uso de probetas lisas y con muesca en tres tipos de ambientes: uno de control a temperatura ambiente y sin medio corrosivo, el otro sometido a ambiente corrosivo y a temperatura ambiente y el último, a un ambiente corrosivo y con temperatura. Se midieron las dimensiones (longitud y diámetro calibrado) de las muestras antes y después de la prueba. Durante este ensayo, la probeta se someterá a un cambio de esfuerzo continuo, por lo que las tendencias de craqueo del material de ensayo se caracterizaron

por los parámetros: Razón del Tiempo de la fractura (RTTF) y ductilidad, tales como la razón de deformación plástica (RE) y la razón de reducción del área (RRA). Además, la carga máxima ( $P_m$ ), Fuerza de fractura ( $P_f$ ), esfuerzo máximo ( $\sigma_m$ ), esfuerzo de rotura ( $\sigma_f$ ). Los valores de  $P_m$  y  $P_f$  se obtuvieron a partir de los gráficos obtenidos y los valores de RE, RRA,  $\sigma_m$  y  $\sigma_f$  se calcularon a partir de las siguientes ecuaciones:

$$RE = \frac{E_e}{E_c} \quad Ec. 4.1$$

$$RRA = \frac{RA_e}{RA_c} \quad Ec. 4.2$$

$$RTTF = \frac{TTF_e}{TTC_c} \quad Ec. 4.3$$

$$\sigma_f = \frac{P_f}{A_f} \quad Ec. 4.4$$

$$\sigma_m = \frac{P_m}{A_m} \quad Ec. 4.5$$

Dónde:

$E_e$  = Elongación plástica en el ambiente de prueba

$E_c$  = Elongación plástica en el ambiente de control

$RA_e$  = Reducción de área después de la fractura en el ambiente de prueba

$RA_c$  = Reducción de área después de la fractura en el ambiente de control

$TTF_e$  = Tiempo hasta la fractura en el ambiente de prueba

$TTF_c$  = Tiempo hasta la fractura en el ambiente de control

$A_0$  = Área inicial de la sección transversal de la longitud calibrada

$A_f$  = Área final de la sección transversal de la longitud calibrada

## **4.2. Material a ensayar**

### **4.2.1. Justificación del tipo de material a ensayar**

La investigación se basa en el problema que presentan las industrias cerveceras en sus instalaciones, estas utilizan acero inoxidable para evitar cualquier problema de corrosión. Los aceros inoxidables son aleaciones de Hierro (Fe) y cromo (Cr) que contienen un mínimo de 10.50% de Cr. Estos aceros tienen una película pasiva muy fina de un espesor de alrededor de 30 a 50 angstrom, siendo el angstrom la diezmillonésima parte de un milímetro. Los aceros inoxidables forman y conservan películas

pasivas en una gran variedad de medios, lo que justifica la elevada resistencia a la corrosión de estos materiales. La adición de otros elementos permite formar un amplio conjunto de materiales. En los aceros inoxidable se destacan: el cromo, presente por su importante papel para la resistencia a la corrosión y el níquel, que contribuye a la mejoría de las propiedades mecánicas. Existen varios tipos de aceros inoxidable como: los austeníticos (serie 300) que contienen entre 16% a 25% de Cr, 7% a 37% de Ni, 0.03% a 0.08% de C, los austeníticos (serie 200) que contiene entre 1% a 4% de Ni, los ferríticos que contienen entre 12% a 20% de Cr, un contenido menor del 0.12% de C y los martensíticos (serie 400) que contienen 0.15% a 1.2% de C, 11.5% a 18% de Cr. La mayoría de las industrias Cerveceras utilizan el acero inoxidable 304, ya que es el más popular debido al precio y es el más accesible que se puede encontrar en el mercado. Este tipo de acero se lo conoce como austeníticos y contiene 18% Cr y 8%Ni. Los inoxidable austeníticos se pueden utilizar en bajísimas temperaturas (condición criogénica), temperatura ambiente y a altas temperaturas (hasta 1150°C). La corrosión bajo esfuerzos ataca a los aceros inoxidable austeníticos, principalmente a los que contienen entre 8% - 10% de Níquel. Un aumento en el

porcentaje de Níquel puede disminuir el riesgo de este tipo de corrosión (18)

Debido a este tipo de problema que se encuentra en la industria cervecera se ha decidido simular las condiciones a las que trabaja el acero inoxidable 304 para presenciar este tipo de daño.

#### **4.2.2. Caracterización del acero inoxidable AISI 304**

Este tipo de acero comúnmente se lo llama “todo propósito”. Tiene propiedades adecuadas para un gran número de aplicaciones. Se recomienda para construcciones ligeras soldadas en las que el recocido no es posible.

El acero inoxidable fue adquirido de una casa comercial, las propiedades indicadas en la hoja técnica del proveedor son las que se muestran en el apéndice 8.

#### **Caracterización de las muestras de acero previo al ensayo**

Debido a que los resultados del ensayo de fluencia lenta del acero inoxidable 304 sometido a corrosión bajo esfuerzos son estadísticos, analizar la composición del material de las probetas es un factor primordial, por lo que es fundamental que las probetas

contengan las características especificadas por el fabricante o por la norma.

El estudio realizado no tendrá validez si es que el material tiene en su composición química alguna alteración o alguna impureza, algún defecto interno debido a la manufactura del material o tal vez alguna falla superficial debido a un mal maquinado del material.

Para evitar este tipo de datos erróneos debido a las razones mencionadas anteriormente se realizaron ensayos para caracterizar el acero inoxidable 304, con el objetivo de establecer que el acero cumple con las especificaciones de acuerdo a los estándares o al fabricante.

Los ensayos que se realizan para caracterizar un material son: Ensayo de tracción, Análisis químico, Ensayo de dureza y Metalografía.

### **Ensayo de Tracción**

Para la realización de este tipo de ensayo se deben obtener probetas con dimensiones de acuerdo a la norma ASTM E-8.

El equipo que se usó es el siguiente:

Descripción: Máquina de ensayo universal

Marca: Shimadzu

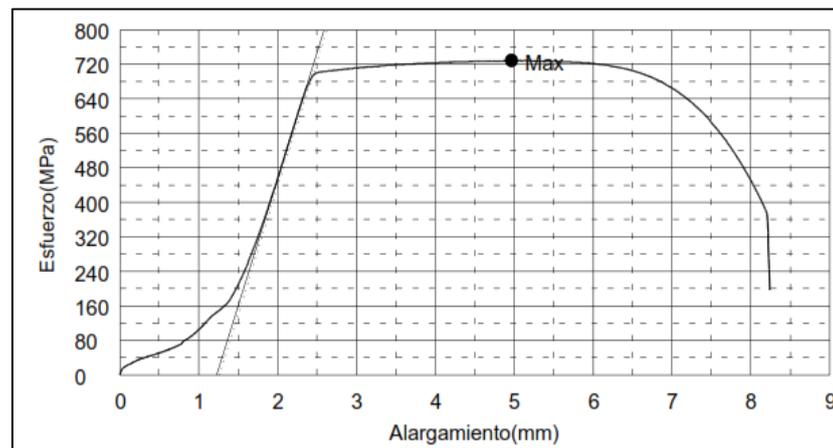
Modelo: UH-600kNI

Serie: 10313751

Los resultados obtenidos para la probeta sin muesca se mostrarán en la tabla 15.

**TABLA 15**  
**RESULTADO ENSAYO DE TRACCIÓN**

| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Esfuerzo Máximo (MPa) | Carga de Fluencia (KN) | Carga Máxima (KN) | Elongación % |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|--------------|
| 691.83                     | 729.62                | 8.47                   | 8.94              | 61.56        |

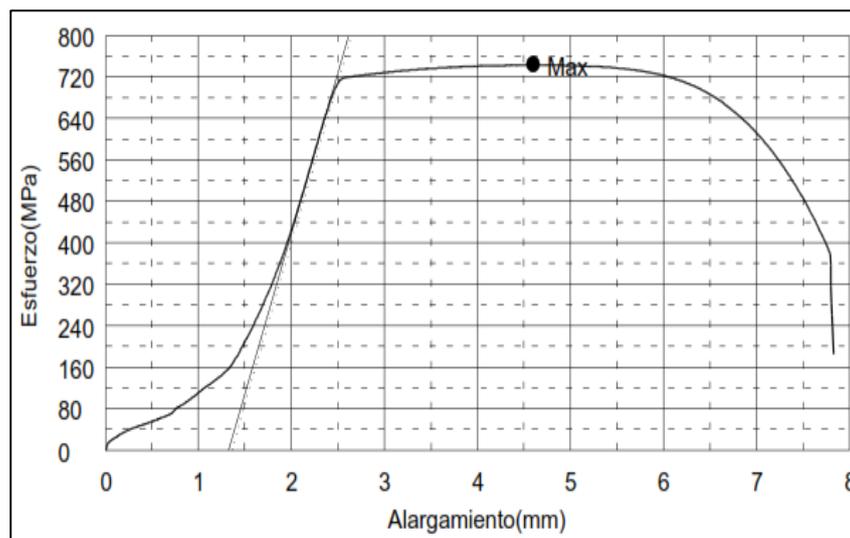


**Figura 4.1. Curva Esfuerzo vs Deformación del Acero  
Inoxidable AISI 304 (probeta sin muesca)**

Los resultados obtenidos para la probeta con muesca se mostrarán en la tabla 16.

**TABLA 16**  
**RESULTADO ENSAYO DE TRACCIÓN**

| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Esfuerzo Máximo (MPa) | Carga de Fluencia (KN) | Carga Máxima (KN) | Elongación % |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|--------------|
| 708.78                     | 744.33                | 8.59                   | 9.02              | 66.87        |



**Figura 4.2. Curva Esfuerzo vs Deformación del Acero  
Inoxidable AISI 304 (probeta con muesca)**

En el apéndice 12, se muestra el resultado completo del ensayo.

Comparando los resultados obtenidos con los valores de resistencia del Acero Inoxidable 304 de la norma ASTM A-276 mostrada en el apéndice 1, se obtuvieron datos aceptables en este tipo de ensayo.

### **Ensayo de Dureza**

El resultado obtenido en el ensayo de Dureza se mostrará en la tabla 17.

**TABLA 17**  
**RESULTADO DEL ENSAYO DE DUREZA**

|              |      |
|--------------|------|
| Dureza (HRC) | 15,9 |
|--------------|------|

El equipo que se utilizó para el ensayo es el siguiente:

Descripción: Medidor de Dureza

Modelo: LR-300TDL

Marca: LECO

Serie: FRT50372

La dureza establecida para este acero es de 183HB (10HRC) y como se puede observar excede un poco a la establecida.

### **Análisis Químico**

Este ensayo tiene como objetivo determinar los elementos químicos que conforman el material a ensayar y además servirá para establecer si el material cumple con las descripciones en cuanto su composición química de acuerdo a la norma.

El equipo que se utilizó para el ensayo es el siguiente:

Descripción: Analizador Químico

Modelo: LECO

Marca: GDS 500

Serie: 3216

Los resultados obtenidos se mostrarán en la tabla 18.

**TABLA 18**  
**RESULTADO DEL ANÁLISIS QUÍMICO**

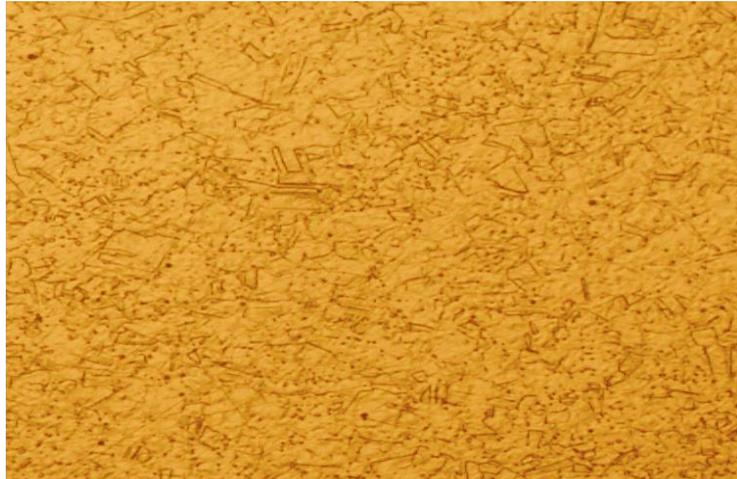
| <b>Elemento</b> | <b>Lectura (%)</b> |
|-----------------|--------------------|
| C               | 0,045              |
| Cr              | 18,4               |
| Mn              | 1,63               |
| Ni              | 8,16               |
| S               | 0,016              |
| <i>P</i>        | <i>0,035</i>       |
| <i>Si</i>       | <i>0,439</i>       |

El ensayo comprobó de que efectivamente se trata de un acero inoxidable AISI 304. La composición química normalizada de este acero se encuentra en el apéndice 13.

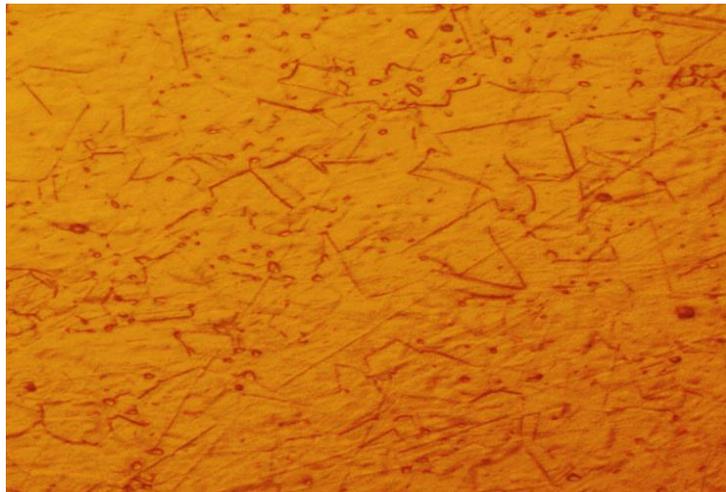
### **Metalografía**

Este ensayo se llevó a cabo para determinar si el material contiene una microestructura que concuerde con su designación, además para comprobar que no existan irregularidades como: inclusiones, granos deformados por algún proceso de conformado, o por último que no se le haya aplicado al material algún tratamiento térmico que afecte en la toma de resultados.

En las figuras 4.3 y 4.4 se presentan metalografías del material a ensayar adquirido, atacado con un pulido electrolítico en una solución de 10 gramos de ácido oxálico disueltos en 100 ml de agua destilada.



**Figura 4.3. Microestructura Sección Transversal (200X)**



**Figura 4.4 Microestructura Sección Transversal (500X)**

Se utilizó el ATLAS OF MICROSTRUCTURE ASM HANDBOOK para confirmar que las imágenes mostradas anteriormente corresponden al Acero Inoxidable AISI 304.

### **4.3. Preparación de las probetas**

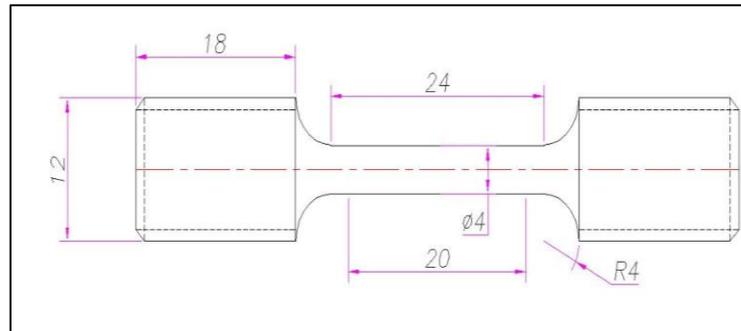
#### **4.3.1. Procedimiento para el maquinado de las probetas**

Se consiguió de un proveedor local una varilla de diámetro 3/8" para maquinaarla hasta conseguir las dimensiones requeridas por la norma ASTM E8. Las dimensiones de la probeta se muestran en la figura 4.5, la cual consta con un diámetro de 4 mm en su parte central y será elaborada a través del proceso de torneado. Un factor importante es que donde se encuentra la menor área transversal debe tener una superficie pulida, para que la probeta no presente imperfecciones en la superficie o ralladuras del propio proceso de torneado, esto se realiza para que necesariamente falle en esa parte y los resultados puedan tener validez.

Las dimensiones de la probeta usada en el ensayo de fluencia lenta del acero inoxidable 304 sometido a corrosión bajo esfuerzos se encuentran en el plano 10.

Para el proceso de torneado de la probeta se desbastó hasta llegar a 0.025mm del diámetro final de los extremos, para posteriormente realizar la rosca, la cual tiene un paso de 1.25 mm. Se desbastó la parte central de la probeta con los radios tal como se muestra en la figura 4.5. Para dejar una superficie pulida se utilizará una lija número 220, luego una lija número 400, posteriormente se utilizará

una lija 600, para concluir con la lija número 1000, teniendo en cuenta las dimensiones antes mencionadas.

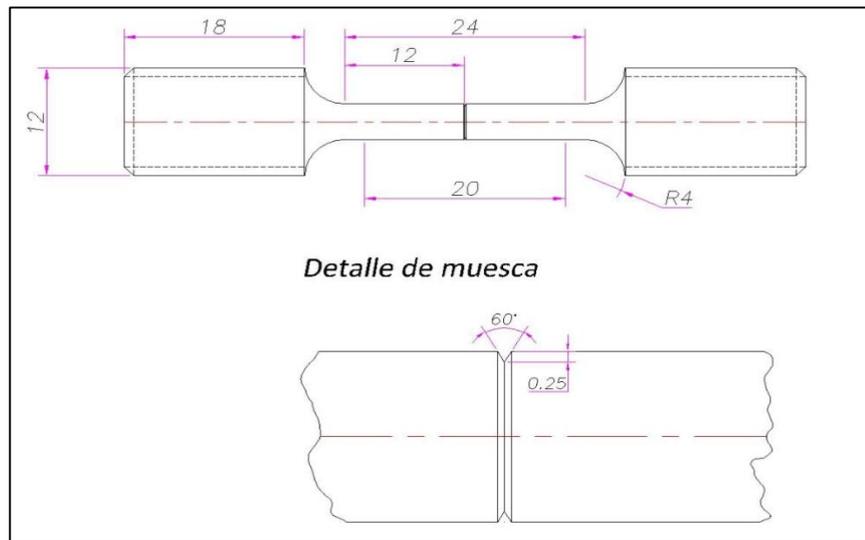


**Figura 4.5. Dimensiones de la Probeta Calibrada**

#### 4.3.2. Dimensionamiento de la muesca en la probeta

Las dimensiones de la probeta con muesca usada en el ensayo de fluencia lenta del acero inoxidable 304 sometido a corrosión bajo esfuerzos se encuentran en el plano 10.

Las probetas que tendrán la muesca serán maquinadas de la misma forma que las mencionadas anteriormente. Esta muesca tendrá el objetivo de promover una falla más rápida del material simulando zonas afectadas por el calor o soldaduras. Las dimensiones de las probetas con muesca serán tomadas de la norma ASTM E8 y se las ilustran en la figura 4.6.



**Figura 4.6. Dimensiones de la Probeta Calibrada con muesca**

#### **4.4. Condiciones ambientales de ensayo para el medio corrosivo**

Se realizó una visita a una planta de producción cervecera local con la finalidad de realizar una simulación de las características de trabajo en las que opera el acero AISI 304 en la cual se pudo observar, que existen diversas temperaturas y ambientes en la que pueden operar y por tanto, se ha decidido que las condiciones más críticas de operación de las tuberías y tanques son las que se realizan a temperaturas elevadas (entre 80 y 90°C) y con ambientes corrosivos altos en cloruros.

Teniendo en cuenta también que la norma obliga a crear un ambiente controlado el cual, servirá como estándar comparativo, se

decidió que el primer ambiente de simulación de SCC será uno a temperatura ambiente a condiciones normales, sin la presencia de un medio corrosivo alguno que afecte a la probeta. Este medio operará a una temperatura de aproximadamente 22°C con la cámara de ensayo vacía.

Para la elección del medio que simulará las condiciones de trabajo se basó en estudios realizados sobre la selección de metales según el comportamiento bajo SCC, y se conoció que una solución al 3.5% de NaCl simula correctamente un ambiente corrosivo alto en cloruros (19). Esta es una solución usada también en otro tipo de ensayos y puede generar conclusiones acertadas sobre el comportamiento del metal, en el caso de la temperatura, se ha escogido una de 90°C que es un valor crítico y afecta altamente en la velocidad de corrosión de un metal según lo explicado en la teoría.

Se ha escogido una tercera simulación la cual, es uno medio entre los dos ambientes antes mencionados. Este medio será una combinación y constará de la solución al 3.5% de NaCl, pero con temperatura ambiente. El objetivo de esto es, tener una comparación entre estos tres tipos de ambientes y comprobar cuanto influye la temperatura en la aceleración de la corrosión,

también ayudará a conocer si existe alguna variación en el tipo de fractura o algún cambio en las propiedades mecánicas del material.

#### **4.5. Procedimiento del ensayo**

Para el ensayo de deformación lenta se basó en los procedimientos descritos por la norma ASTM G129, la cual indica que el primer paso será la medición de los especímenes que se usarán en el ensayo, estas probetas deben cumplir con los requerimientos de la norma ASTM E08. También se comprobó que las mediciones del diámetro de la muesca de la probeta y el chaflán de la muesca este de acuerdo a lo especificado por la misma norma.

Para empezar con el ensayo se deberá tomar 3 medidas del diámetro de la probeta y se escogerá el menor valor según la norma ASTM E8, las cuales deben estar en el rango de tolerancia permitido por la misma norma. Además se deberá hacer una marca en la sección reducida del material a ensayar, la cual estará definida como la longitud calibrada para determinar la elongación al final del ensayo, como se muestra en la figura 4.7.



**Figura 4.7. Marcación de la longitud Calibrada**

En la figura 4.8 se muestra el banco de pruebas antes de realizar la sujeción de los ejes con la probeta.



**Figura 4.8. Banco experimental antes de realizar la sujeción de la probeta**

Se deberá acoplar el eje que soporta la tapa superior de la cámara experimental con el perno de agarre de la celda de carga para luego roscar la probeta a este eje, posteriormente se colocará la cámara de ensayo con el respectivo seguro de la misma. Finalmente se introducirá el eje por la tapa inferior de la cámara experimental para roscar el extremo libre de la probeta. Estos procesos se muestran en la figura 4.9.



**Figura 4.9. Proceso de ensamblaje de la parte superior de la probeta con la celda de carga**

Para concluir se acoplará el eje que une el tornillo de potencia con la cámara experimental. Debido a que el perno de sujeción no puede unir estos dos ejes, se deberá desmontar la guarda de la cadena para girar el piñón y permitir que el tornillo de potencia suba para realizar la sujeción. Este último proceso de montaje de la probeta en el banco de prueba se la ilustra en la figura 4.10.



**Figura 4.10. Proceso de ensamblaje del tornillo de potencia con la parte inferior de la probeta**

En el caso de los ensayos que necesiten estar bajo un medio corrosivo se realizará primero un buen sellado de la cámara experimental con el fin de que no exista fuga alguna que afecte al medio encerrado. Para esto se comenzará verificando las abrazaderas de los visores de la cámara experimental que estén correctamente instaladas y apretadas. Una vez cumplido esto se procede con la preparación del medio salino que se va a utilizar en el ensayo el cual será, una solución al 3.5% de NaCl.

La preparación de esta solución se la realizará usando un vaso de precipitación graduado y se lo llenará con agua hasta llegar al volumen contenido por la cámara (864,43 mL) y mezclar en éste, cloruro de sodio al 3.5% del peso del solvente que en nuestro caso sería el agua. La medida de sal necesaria se la obtendrá mediante el uso de una balanza electrónica y una vez agregada, se la deberá mezclar para tener una mezcla homogénea que será el medio corrosivo del experimento. Finalmente se verterá el medio dentro de la cámara con la ayuda de un embudo para evitar derrames y se lo sellará roscando la resistencia.

Una vez realizado la instalación se debe comprobar el valor de la precarga que está censando la celda de carga. Si está en el rango permitido se procede a calibrar el sensor de distancia tal como se explicó en el capítulo 3.4. Se enciende el motor por medio de la

botonera colocada en el panel de control y con la ayuda de la tarjeta Arduino y una vez enlazada con el programa Matlab se procede a realizar la adquisición de los datos. El ensayo finaliza una vez que la probeta ha llegado a la fractura. Una vez descrito el procedimiento se realizará una descripción de la cantidad de probetas a ensayar, mostradas en la tabla 19.

**TABLA 19**  
**CANTIDAD DE ENSAYOS A REALIZAR**

| Descripción                                       | Probetas sin muesca | Probetas con muesca |
|---|---------------------|---------------------|
| Ensayo a temperatura ambiente sin medio corrosivo | 3                   | 3                   |
| Ensayo a 90°C con medio corrosivo                 | 3                   | 3                   |
| Ensayo con medio corrosivo a temperatura ambiente | 3                   | 3                   |

#### **4.6. Recopilación de Resultados**

Para realizar la toma de datos del sensor de distancia se debe enlazar la tarjeta de datos con el programa Matlab como se explicó en el cap.3.4. El código usado para realizar la toma de datos se

ilustra en la figura 4.11. El código comienza entrando a un ciclo “FOR”, el cual iba a censar 15000 datos. Enseguida entra a otro ciclo FOR de 25 datos para la deformación. Los datos censados en este ciclo se van a almacenar en el vector “prom\_d(j)”. Se utilizó la ecuación 3.4 para realizar la toma de datos. Luego calculaba el promedio de los datos censados. Como en el sensor de distancia se configura primero el límite máximo y luego el mínimo, al empezar a realizar la toma de datos censará el máximo valor hasta llegar al menor, obteniendo una gráfica descendente con respecto al tiempo. Se realizó la resta del valor obtenido con el límite máximo para generar que la gráfica sea ascendente. Luego procede a entrar al ciclo FOR de 25 datos para la celda de carga.

Los datos censados en este ciclo se van a almacenar en el vector “prom\_f(j)”. Se utilizó la ecuación 3.3 para realizar la toma de datos. Luego se realizaba la suma de todos los datos censados para finalmente realizar el promedio de todos estos datos. Al terminar de hacer esto se realizaba una pausa de 5 segundos y se volvía a realizar la adquisición de datos.

```

Command Window
>> a=arduino('COM5');
Attempting connection .....
Analog & Digital I/O + Encoders (adiao.pde) sketch detected !
Arduino successfully connected !
fx >>
for i=1:15000

for j=1:25
prom_d(j)=(a.analogRead(1)*0.0048)-1.32)/0.1243;
end
d=0;
for j=1:25
d=prom_d(j)+d;
end
distancia_4exp(i)=(25.5-(d/25));

for j=1:25
prom_f(j)=(a.analogRead(0)*0.0048)-0.0056)/0.001043;
end
f=0;
for j=1:25
f=prom_f(j)+f;
end
fuerza_4exp(i)=f/25;

pause(5);

end

```

**Figura 4.11. Código para la Adquisición de Datos**

Una vez realizado el código para empezar a capturar los datos de los dos sensores, se pondrá en marcha cada prueba en el banco experimental. Los resultados obtenidos se los mostrarán por medio de tablas y gráficas en cada ensayo. En las tablas se recopilará los datos más importantes de las gráficas como el tiempo de fractura ( $T_f$ ), la fuerza máxima que soportará la probeta ( $P_m$ ), la fuerza a la que se produce la fractura ( $P_f$ ) y la elongación o deformación de la

probeta ( $\Delta$ ). Además esta tabla muestra los 3 valores de los diámetros medidos como D1, D2 y D3 respectivamente y también mostrará la longitud calibrada (LC).

### **Probeta sin muesca a temperatura ambiente y sin un medio corrosivo**

El primer ensayo que se realizó fue el de someter la probeta sin muesca a un esfuerzo de tensión a una temperatura ambiente y sin un medio corrosivo. Con este tipo de condiciones de operación se realizaron 3 ensayos para obtener en cada una la gráfica de Fuerza vs Cantidad de datos, Deformación vs Cantidad de Datos y Fuerza vs Deformación.

La tarjeta Arduino censaba a la vez un dato de fuerza y de deformación cada 5 segundos. Se lo configuró de esta manera para tener una mayor toma de datos para obtener una mejor gráfica. Además se configuró para que a los 5 segundos haga un promedio de 25 datos emitidos por la celda de carga, lo cual iba a durar 20 milisegundos para obtener la fuerza en su respectivo tiempo. De igual manera iba a ocurrir para obtener el valor de la deformación a medida que transcurría el tiempo. La cantidad de datos obtenidos en las gráficas se las puede transformar a tiempo,

para generar una gráfica con una mejor interpretación. Se realizó la siguiente conversión del tiempo a horas, debido a que el este ensayo tiene una duración de aproximadamente 10 horas.

1 dato → 5 segundos

Número de dato → Tiempo (segundos)

Se realiza una regla de tres para obtener el tiempo con respecto al número de datos:

$$\text{Tiempo (segundos)} = \frac{5 \text{ segundos} \times \text{Número de dato}}{1 \text{ dato}}$$

Al terminar esta relación habrá que convertir los segundos a horas para tener una mejor apreciación de la duración de la toma de datos. Esta conversión se la realizará en las demás gráficas.

La tabla 20 muestra una recopilación de datos importantes de las 3 probetas ensayadas bajo las mismas condiciones de operación.

Las figuras 4.12, 4.13, muestran las gráficas del comportamiento de la fuerza vs la cantidad de datos y de la deformación vs la cantidad de datos de los 3 ensayos de las probetas sin muesca sometidas a temperatura ambiente y sin medio corrosivo. Estas gráficas se las transformaron a tiempo obteniendo las gráficas de las figuras 4.14 y 4.15 Además se obtuvo una gráfica para presentar como se comporta la fuerza con respecto a la deformación tal como se muestra en la figura 4.16.

**TABLA 20**

**ENSAYO DE LA PROBETA SIN MUESCA SOMETIDO A  
TEMPERATURA AMBIENTE Y SIN MEDIO CORROSIVO**

|                 |      |      |      |    | Resultados         |                      |                      |        |
|-----------------|------|------|------|----|--------------------|----------------------|----------------------|--------|
| # de Ensayo     | D1   | D2   | D3   | LC | T <sub>f</sub> (h) | P <sub>m</sub> (lbs) | P <sub>f</sub> (lbs) | Δ (mm) |
| 1               | 4.01 | 3.97 | 3.98 | 20 | 10.97              | 2160.73              | 1700.72              | 9.579  |
| 2               | 3.96 | 3.99 | 4.01 | 20 | 9.70               | 2071.47              | 1437.71              | 9.975  |
| 3               | 3.97 | 4    | 4.01 | 20 | 10.69              | 2067.97              | 1577.38              | 9.169  |
| <b>Promedio</b> |      |      |      |    | 10.45              | 2099.72              | 1571.94              | 9.57   |

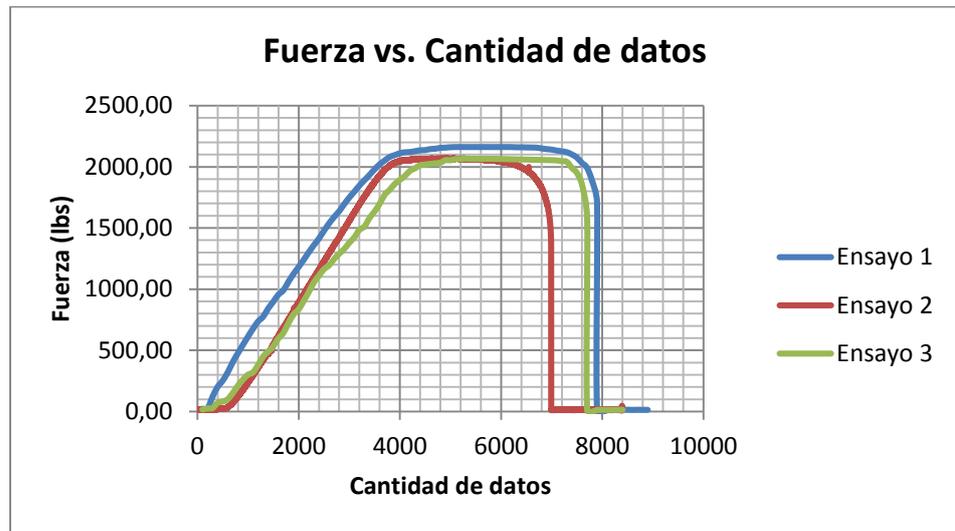


Figura 4.12. Fuerza vs. Datos para ensayos 1-2-3

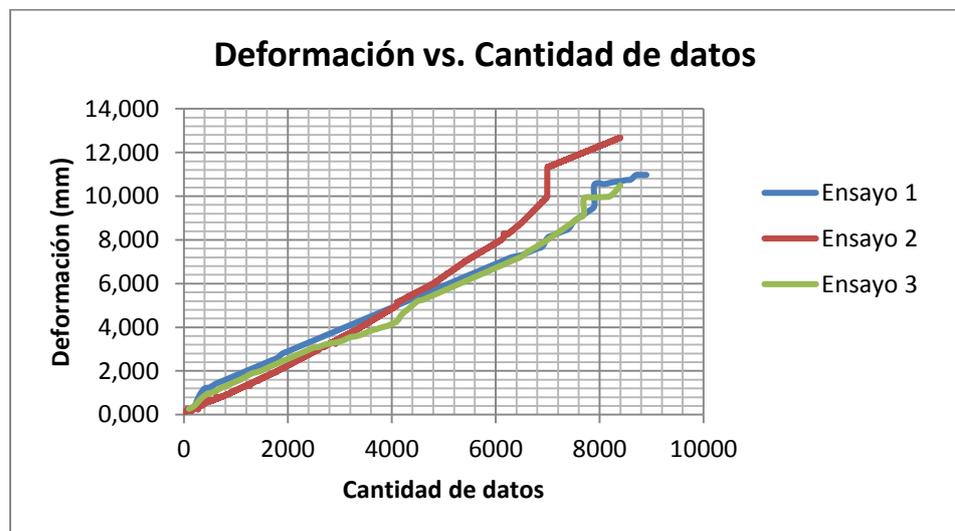


Figura 4.13. Deformación vs. Datos para ensayos 1-2-3

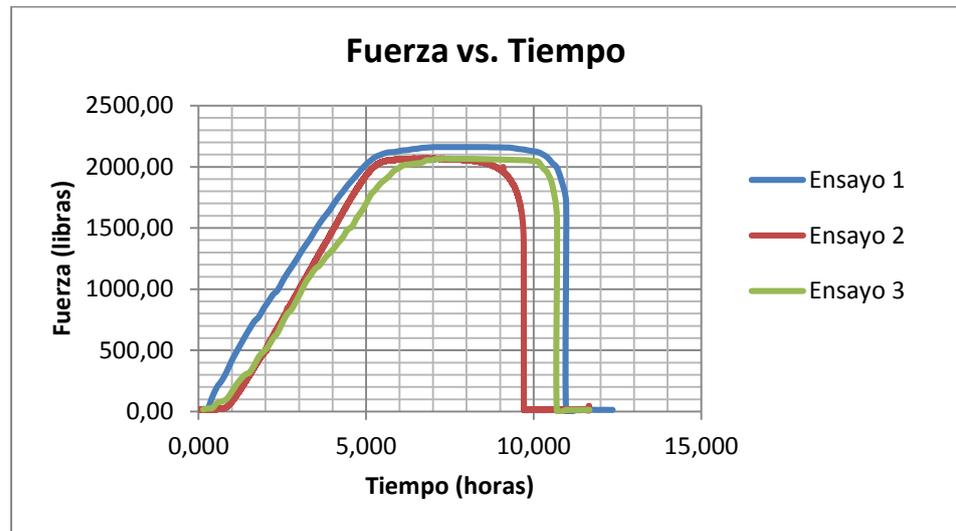


Figura 4.14. Fuerza vs. Tiempo para ensayos 1-2-3

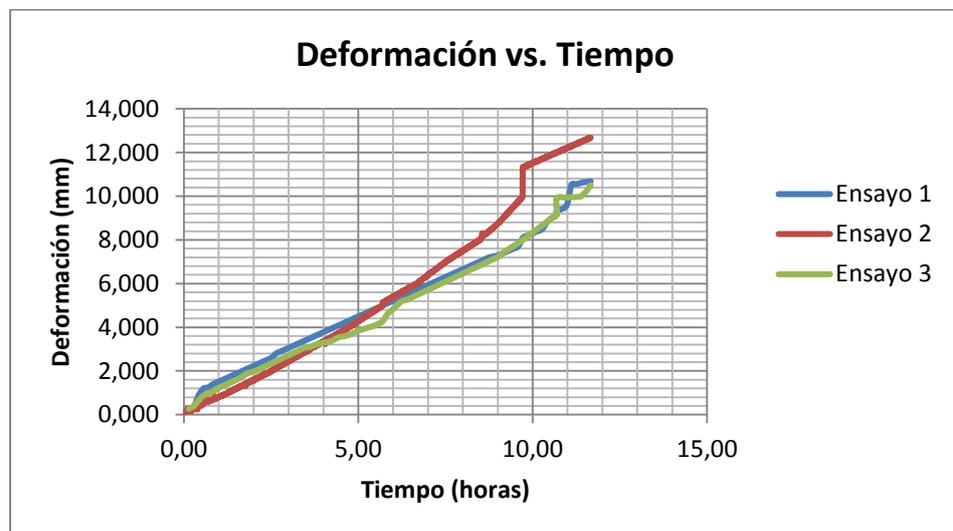


Figura 4.15. Deformación vs. Tiempo para ensayos 1-2-3



**Figura 4.16. Fuerza vs. Deformación para ensayos 1-2-3**

### **Probeta con muesca a temperatura ambiente y sin un medio corrosivo**

Se elaboró una recopilación de datos importantes de las 3 probetas ensayadas bajo las mismas condiciones de operación, tal como se muestra en la tabla 21.

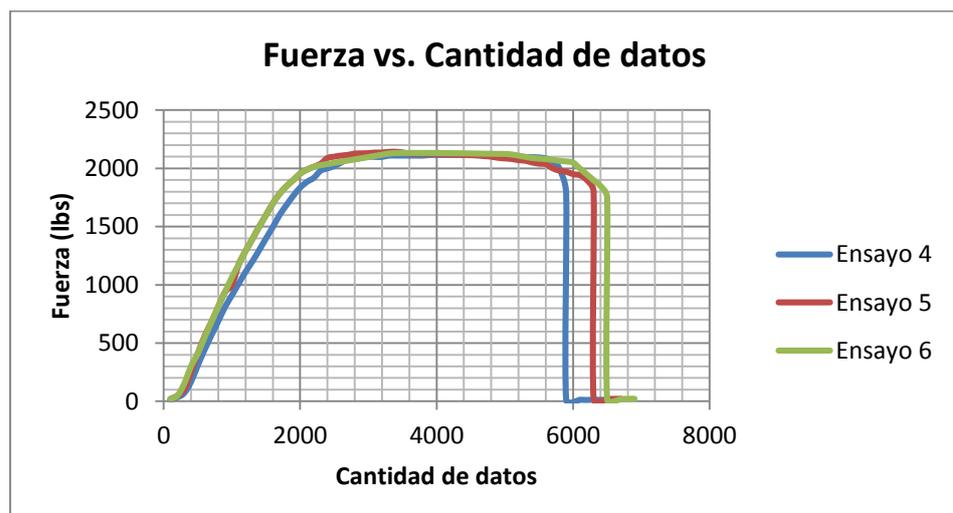
Las figuras 4.17, 4.18 muestran las gráficas del comportamiento de la fuerza vs Cantidad de datos y de la deformación vs Cantidad de datos de los 3 ensayos de las probetas con muesca sometidas a temperatura ambiente y sin medio corrosivo. Estas gráficas se las transformaron a tiempo obteniendo las gráficas de las figuras 4.19 y 4.20. Además se obtuvo una gráfica para presentar como se

comporta la fuerza con respecto a la deformación tal como se muestra en la figura 4.21.

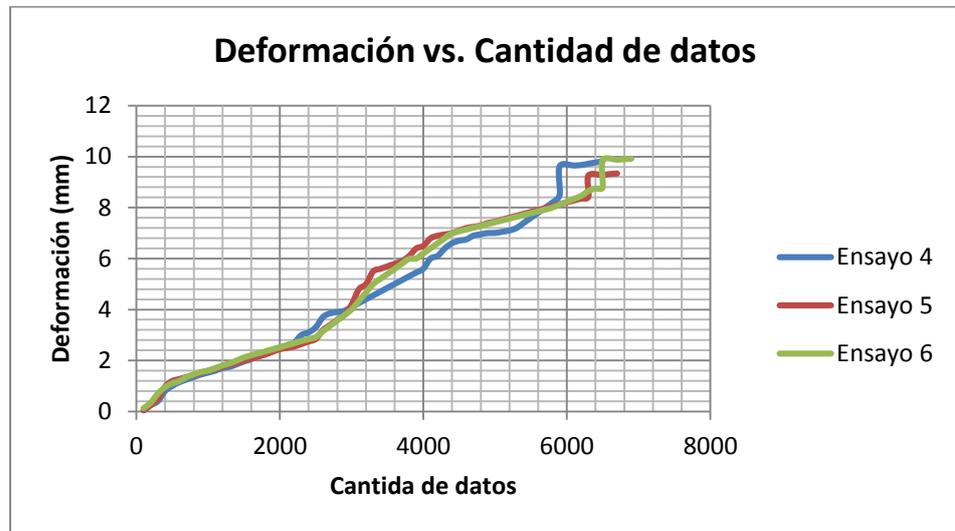
**TABLA 21**

**ENSAYO DE LA PROBETA CON MUESCA SOMETIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y SIN MEDIO CORROSIVO**

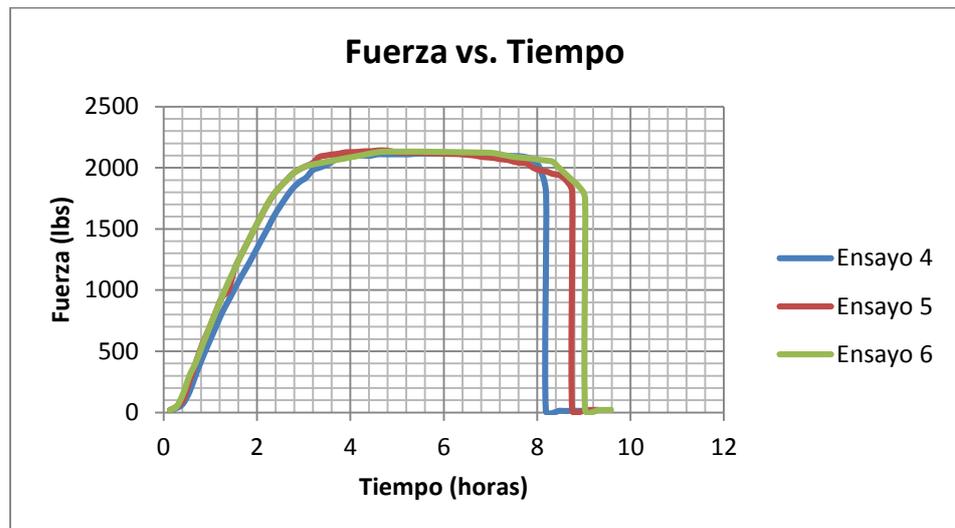
| # de Ensayo     | D1   | D2   | D3   | LC | Resultados         |                      |                      |        |
|-----------------|------|------|------|----|--------------------|----------------------|----------------------|--------|
|                 |      |      |      |    | T <sub>f</sub> (h) | P <sub>m</sub> (lbs) | P <sub>f</sub> (lbs) | Δ (mm) |
| 4               | 3.96 | 3.97 | 3.99 | 20 | 8.19               | 2115.91              | 1784.48              | 8.52   |
| 5               | 3.98 | 3.95 | 3.99 | 20 | 8.75               | 2142.86              | 1798.38              | 8.43   |
| 6               | 3.98 | 4.01 | 4    | 20 | 9.02               | 2133.88              | 1748.92              | 8.8    |
| <b>Promedio</b> |      |      |      |    | 8.65               | 2130.88              | 1777.26              | 8.58   |



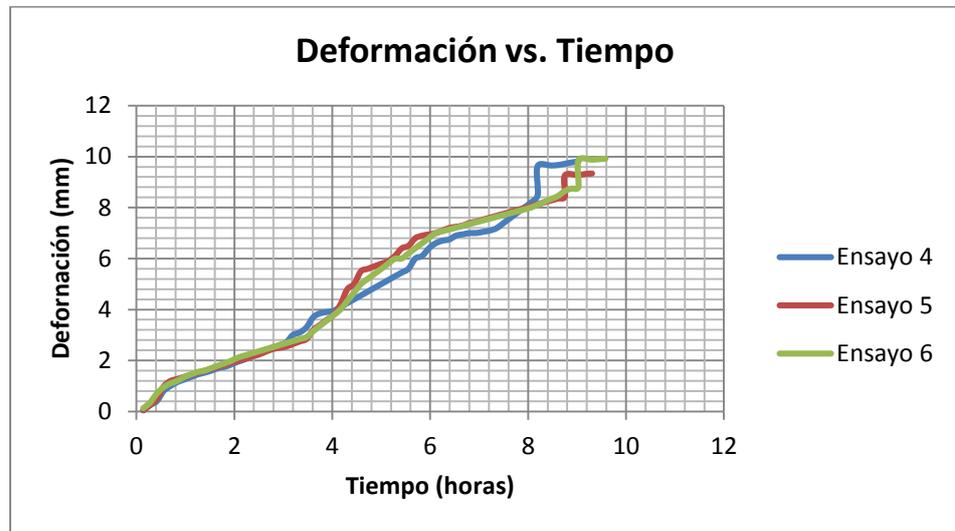
**Figura 4.17. Fuerza vs. Datos para ensayos 4-5-6**



**Figura 4.18. Deformación vs. Datos para ensayos 4-5-6**



**Figura 4.19. Fuerza vs. Tiempo para ensayos 4-5-6**



**Figura 4.20. Deformación vs. Tiempo para ensayos 4-5-6**



**Figura 4.21. Fuerza vs. Deformación para ensayos 4-5-6**

### **Probeta sin muesca a 90 grados Celsius y con medio corrosivo**

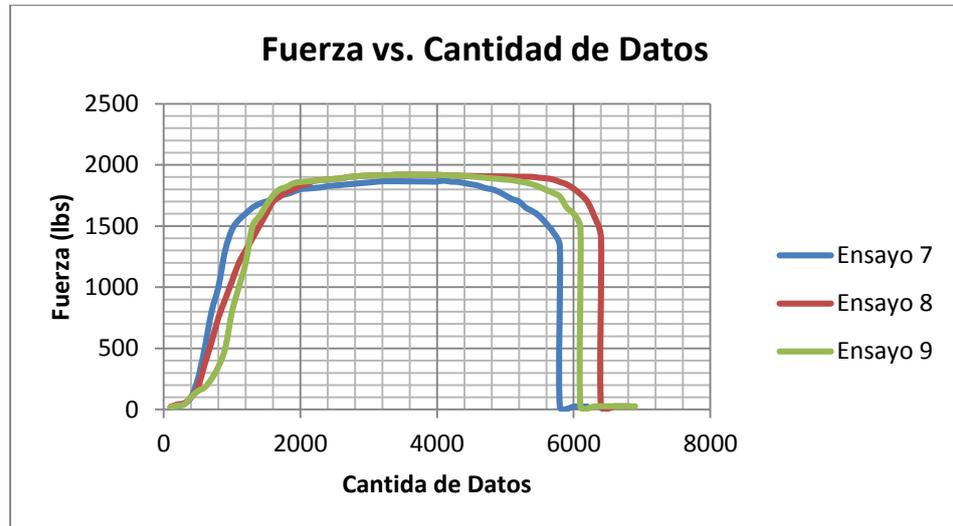
Se llevó a cabo una recopilación de datos importantes de las 3 probetas ensayadas bajo las mismas condiciones de operación, tal como se ilustra en la tabla 22

Las figuras 4.22 y 4.23 muestran las gráficas del comportamiento de la fuerza y de la deformación de los 3 ensayos de las probetas sin muesca sometidas a 90 grados Celsius y con medio corrosivo. Estas gráficas se las transformaron a tiempo obteniendo las gráficas de las figuras 4.24 y 4.25. Además se obtuvo una gráfica para presentar como se comporta la fuerza con respecto a la deformación tal como se muestra en la figura 4.26.

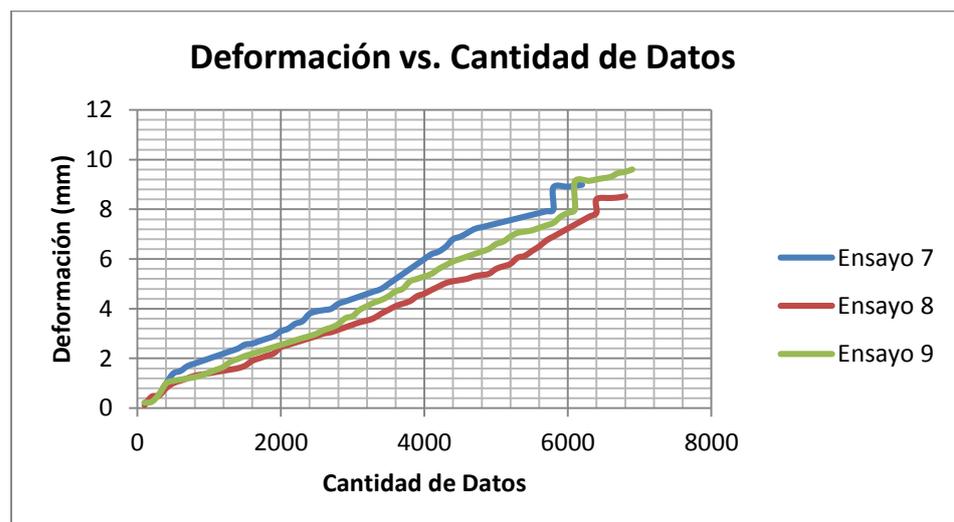
**TABLA 22**

#### **ENSAYO DE LA PROBETA SIN MUESCA SOMETIDO A TEMPERATURA Y CON MEDIO CORROSIVO**

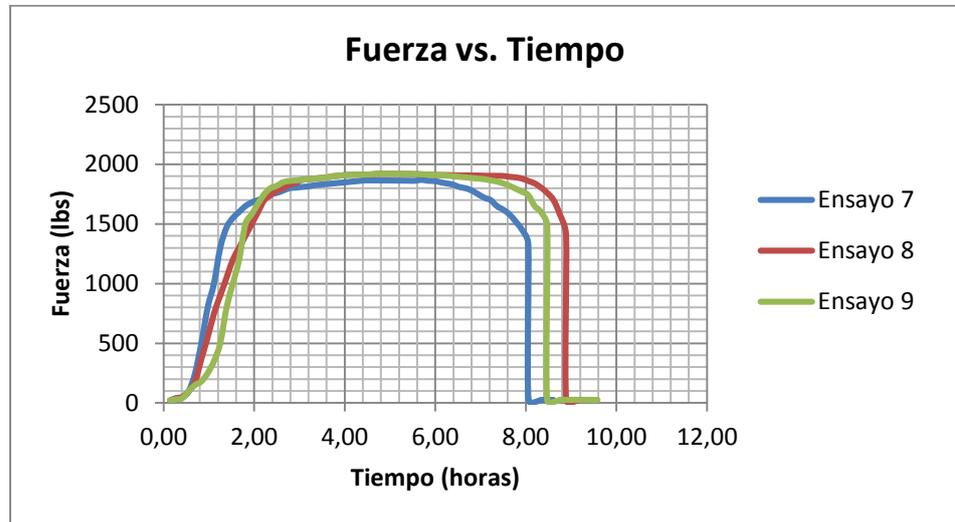
| # de Ensayo     | D1   | D2   | D3   | LC | Resultados         |                      |                      |        |
|-----------------|------|------|------|----|--------------------|----------------------|----------------------|--------|
|                 |      |      |      |    | T <sub>f</sub> (h) | P <sub>m</sub> (lbs) | P <sub>f</sub> (lbs) | Δ (mm) |
| 7               | 3.96 | 3.97 | 3.94 | 20 | 8.06               | 1866.59              | 1332.72              | 8      |
| 8               | 4.01 | 3.99 | 3.98 | 20 | 8.89               | 1919.54              | 1401.68              | 7.86   |
| 9               | 3.98 | 4    | 4.01 | 20 | 8.47               | 1912.98              | 1482.54              | 8.02   |
| <b>Promedio</b> |      |      |      |    | 8.47               | 1899.7               | 1405.64              | 7.96   |



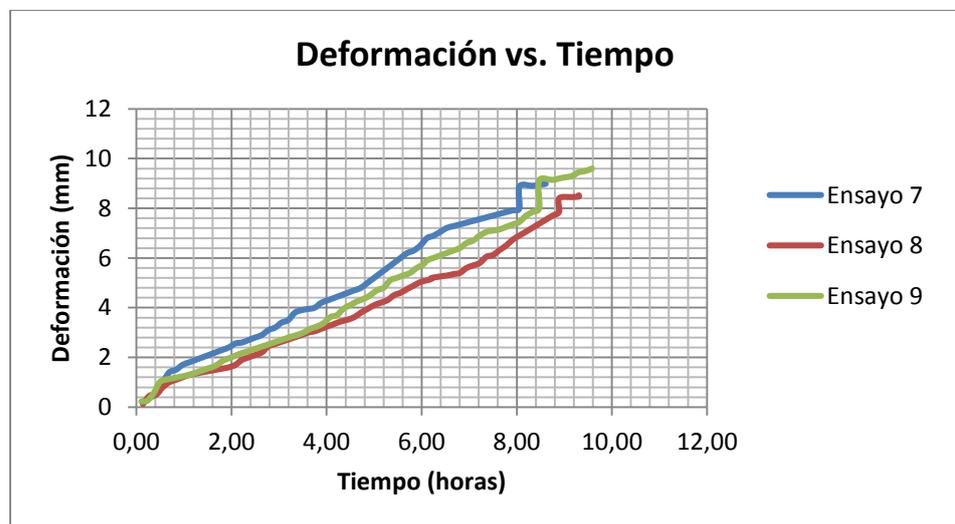
**Figura 4.22. Fuerza vs. Datos para ensayos 7-8-9**



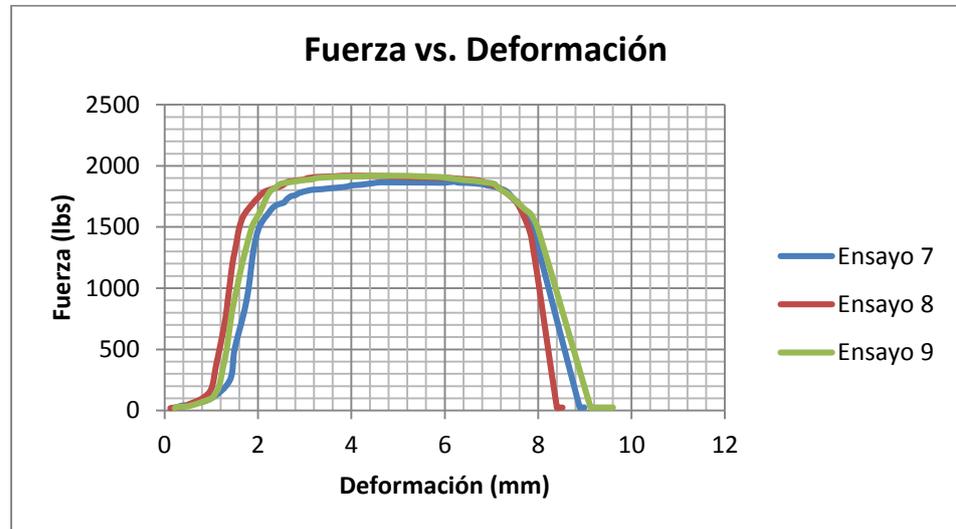
**Figura 4.23. Deformación vs. Datos para ensayos 7-8-9**



**Figura 4.24. Fuerza vs. Tiempo para ensayos 7-8-9**



**Figura 4.25. Deformación vs. Tiempo para ensayos 7-8-9**



**Figura 4.26. Fuerza vs. Deformación para ensayos 7-8-9**

**Probeta con muesca a 90 grados Celsius y con medio corrosivo**

Se ejecutó una recopilación de datos importantes de las 3 probetas ensayadas bajo las mismas condiciones de operación, tal como se ilustra en la tabla 23

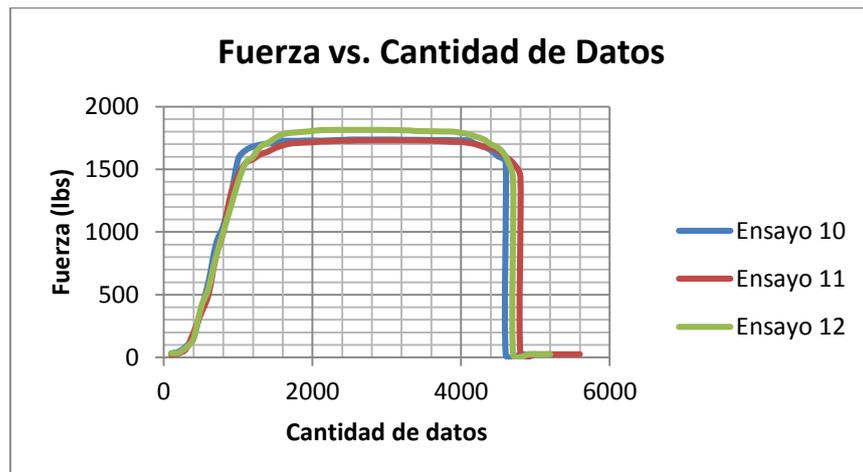
Las figuras 4.27 y 4.28 muestran las gráficas del comportamiento de la fuerza y de la deformación de los 3 ensayos de las probetas con muesca sometidas a 90 grados Celsius y con medio corrosivo.

Estas gráficas se las transformaron a tiempo obteniendo las gráficas de las figuras 4.29 y 4.30. Además se obtuvo una gráfica para presentar como se comporta la fuerza con respecto a la deformación tal como se muestra en la figura 4.31.

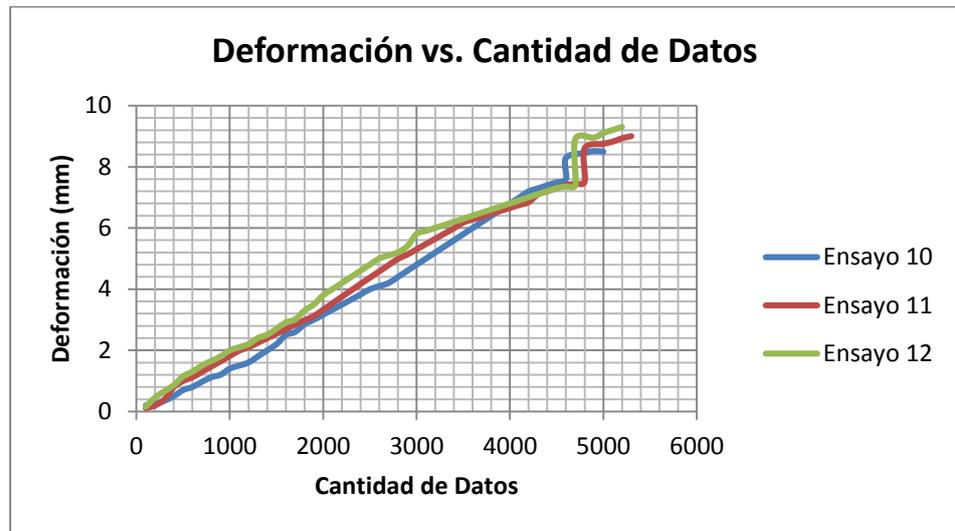
**TABLA 23**

**ENSAYO DE LA PROBETA CON MUESCA SOMETIDO A  
TEMPERATURA Y CON MEDIO CORROSIVO**

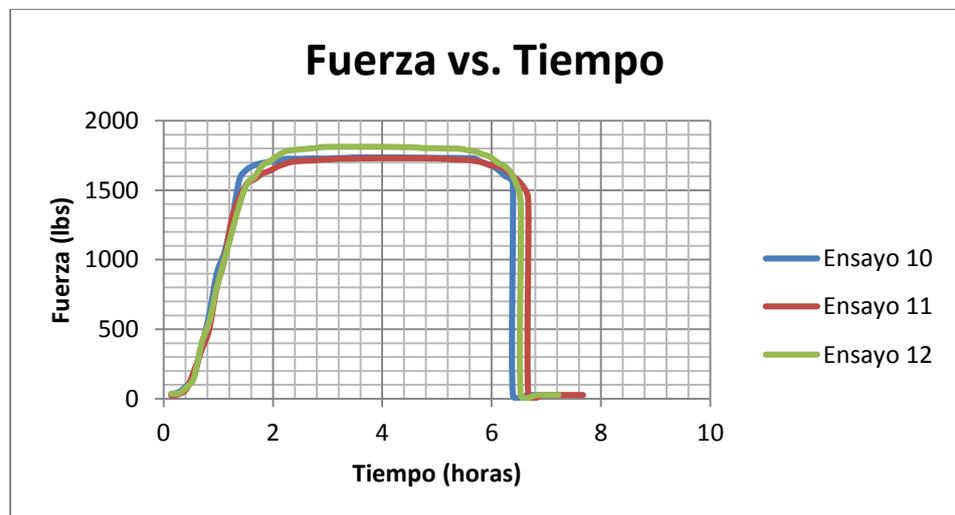
| # de Ensayo     | D1   | D2   | D3   | LC | Resultados         |                      |                      |        |
|-----------------|------|------|------|----|--------------------|----------------------|----------------------|--------|
|                 |      |      |      |    | T <sub>f</sub> (h) | P <sub>m</sub> (lbs) | P <sub>f</sub> (lbs) | Δ (mm) |
| 10              | 3.95 | 3.98 | 3.96 | 20 | 6.38               | 1736                 | 1551.86              | 7.45   |
| 11              | 4.01 | 3.97 | 3.99 | 20 | 6.67               | 1730.29              | 1436.74              | 7.51   |
| 12              | 3.99 | 3.97 | 3.96 | 20 | 6.52               | 1814.74              | 1412.14              | 7.40   |
| <b>Promedio</b> |      |      |      |    | 6.52               | 1760.34              | 1466.91              | 7.45   |



**Figura 4.27. Fuerza vs. Datos para ensayos 10-11-12**



**Figura 4.28. Deformación vs. Datos para ensayos 10-11-12**



**Figura 4.29. Fuerza vs. Tiempo para ensayos 10-11-12**



Figura 4.30. Deformación vs. Tiempo para ensayos 10-11-12

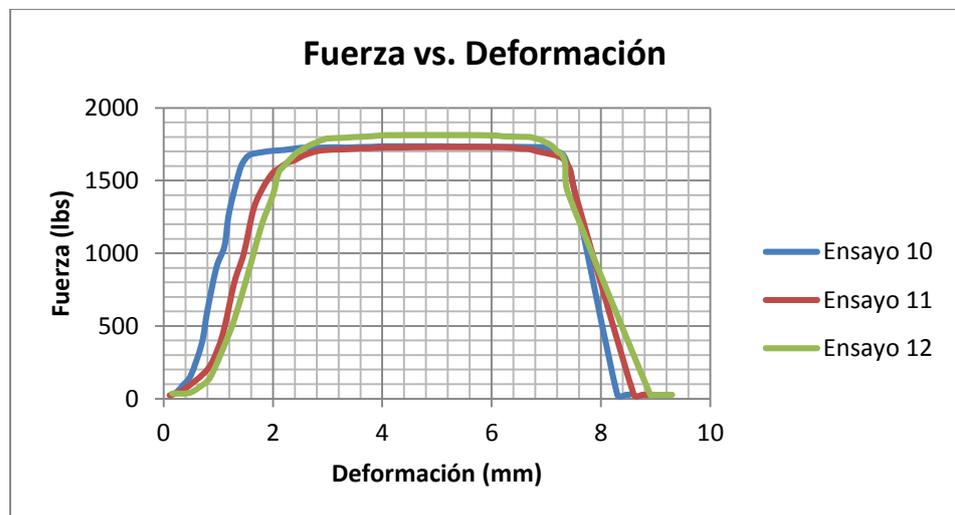


Figura 4.31. Fuerza vs. Deformación para ensayos 10-11-12

### **Probeta sin muesca sometida a un medio corrosivo sin temperatura**

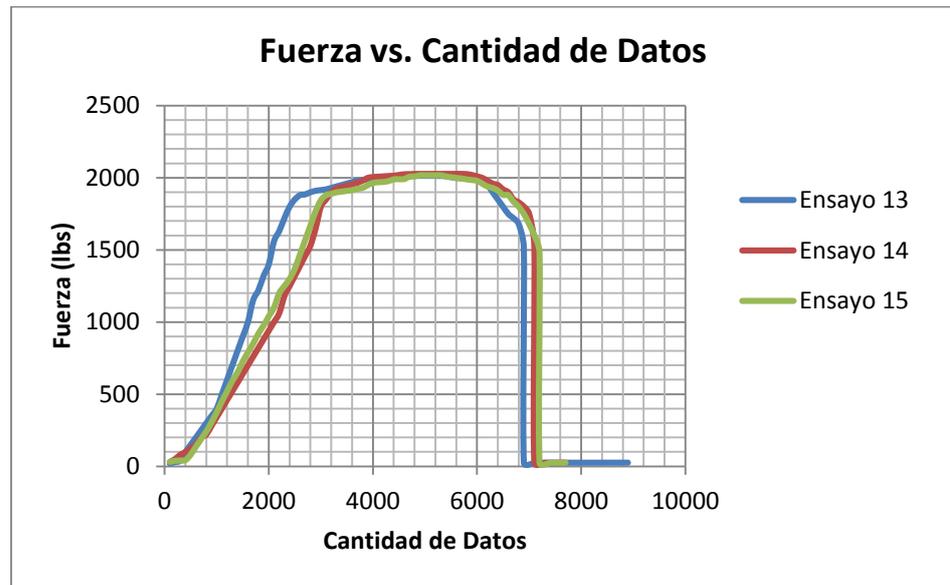
Se realizó una recopilación de datos importantes de las 3 probetas ensayadas bajo las mismas condiciones de operación, tal como se ilustra en la tabla 24

Las figuras 4.32 y 4.33 muestran las gráficas del comportamiento de la fuerza y de la deformación de los 3 ensayos de las probetas sin muesca sometidas a un medio corrosivo sin temperatura. Estas gráficas se las transformaron a tiempo obteniendo las gráficas de las figuras 4.34 y 4.35. Además se obtuvo una gráfica para presentar como se comporta la fuerza con respecto a la deformación tal como se muestra en la figura 4.36

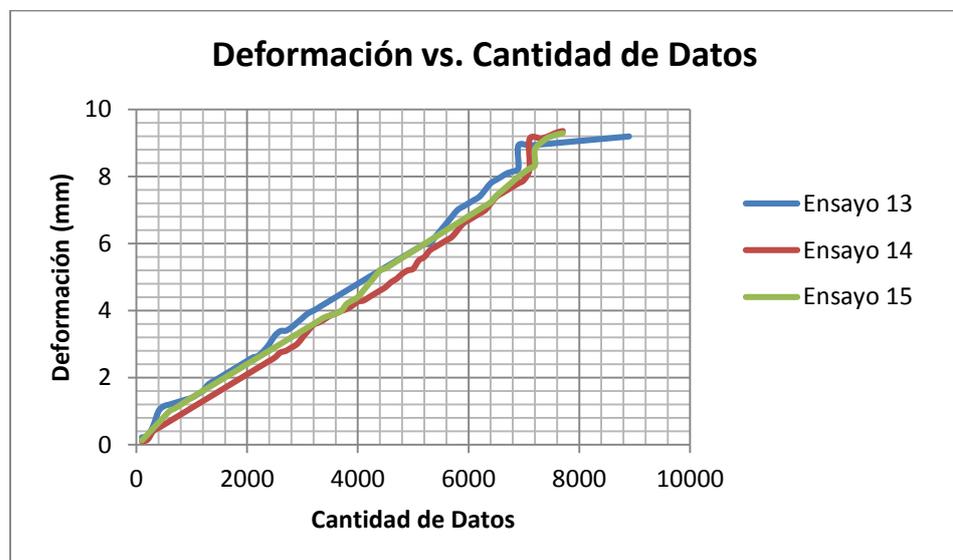
**TABLA 24**

#### **ENSAYO DE LA PROBETA SIN MUESCA SOMETIDO A UN MEDIO CORROSIVO Y SIN TEMPERATURA**

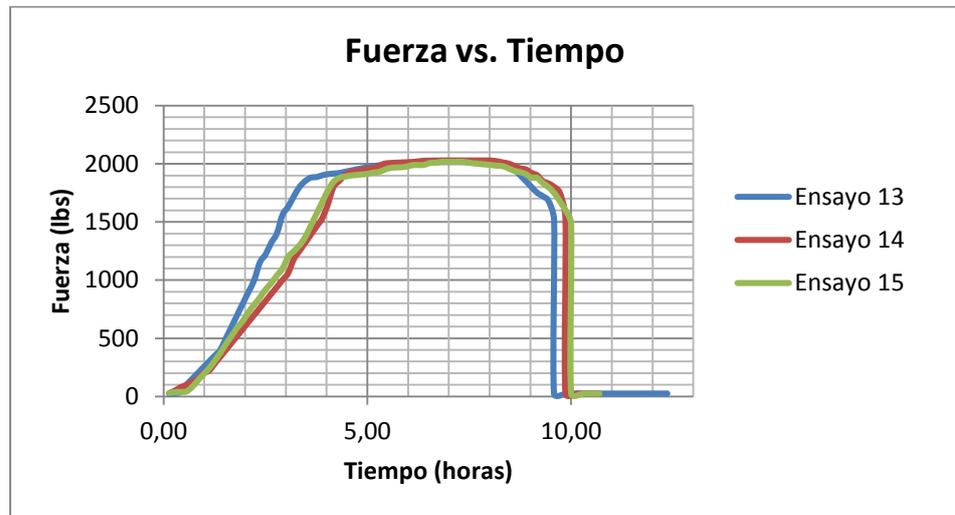
| # de Ensayo     | D1   | D2   | D3   | LC | Resultados         |                      |                      |        |
|-----------------|------|------|------|----|--------------------|----------------------|----------------------|--------|
|                 |      |      |      |    | T <sub>f</sub> (h) | P <sub>m</sub> (lbs) | P <sub>f</sub> (lbs) | Δ (mm) |
| 13              | 3.98 | 3.96 | 3.94 | 20 | 9.58               | 2014.29              | 1510.12              | 8.24   |
| 14              | 3.99 | 3.98 | 3.97 | 20 | 9.86               | 2027.51              | 1523.85              | 8.23   |
| 15              | 3.95 | 3.93 | 3.96 | 20 | 10.2               | 2018.94              | 1482.17              | 8.34   |
| <b>Promedio</b> |      |      |      |    | 9.88               | 2020.94              | 1505.38              | 8.27   |



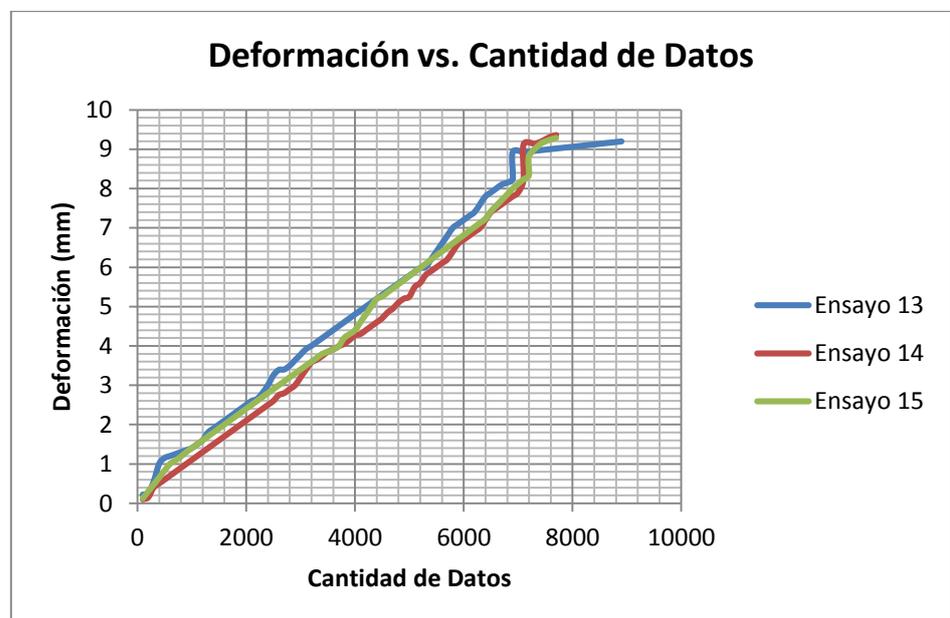
**Figura 4.32. Fuerza vs. Datos para ensayos 13-14-15**



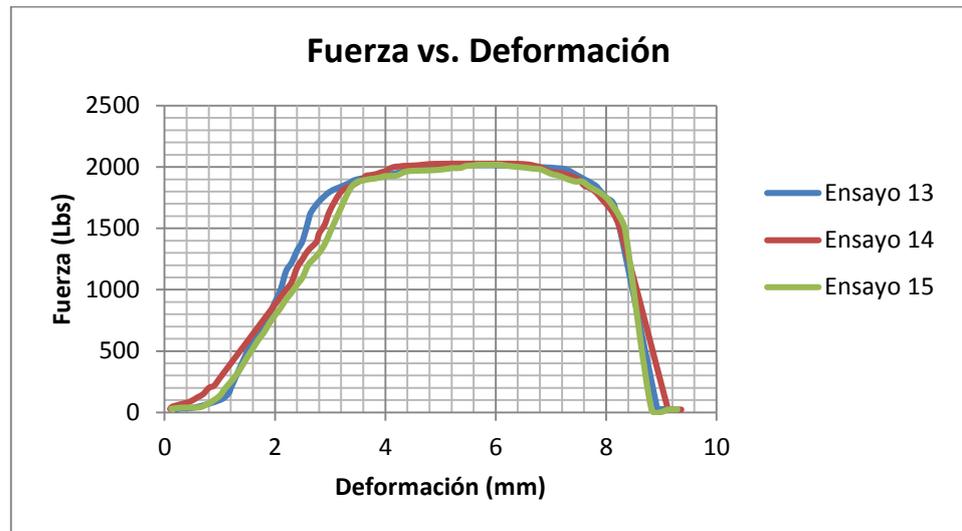
**Figura 4.33. Deformación vs. Datos para ensayos 13-14-15**



**Figura 4.34. Fuerza vs. Tiempo para ensayos 13-14-15**



**Figura 4.35. Deformación vs. Tiempo para ensayos 13-14-15**



**Figura 4.36. Fuerza vs. Deformación para ensayos 13-14-15**

### **Probeta con muesca sometida a un medio corrosivo sin temperatura**

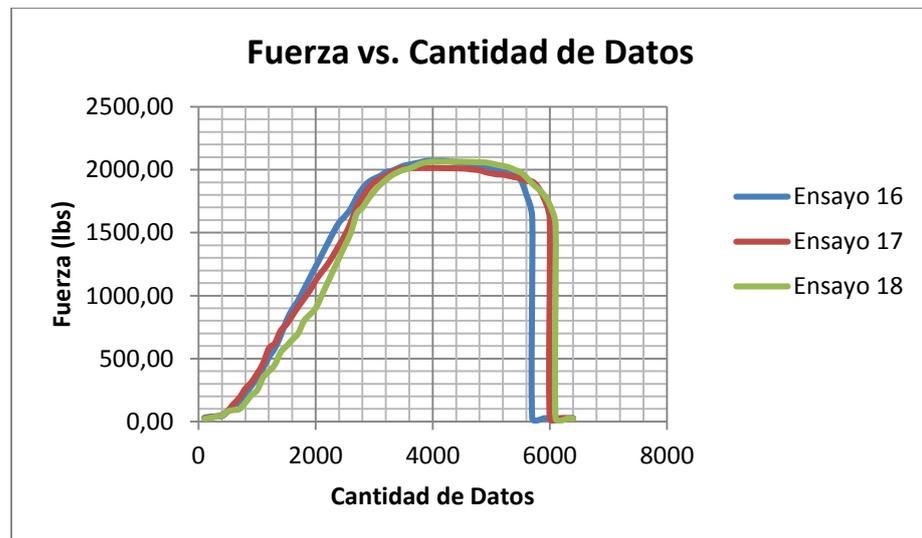
Se hizo una recopilación de datos importantes de las 3 probetas ensayadas bajo las mismas condiciones de operación, tal como se ilustra en la tabla 25.

Las figuras 4.37 y 4.38 muestran las gráficas del comportamiento de la fuerza y de la deformación de los 3 ensayos de las probetas con muesca sometidas a un medio corrosivo sin temperatura. Estas gráficas se las transformaron a tiempo obteniendo las gráficas de las figuras 4.39 y 4.40. Además se obtuvo una gráfica para

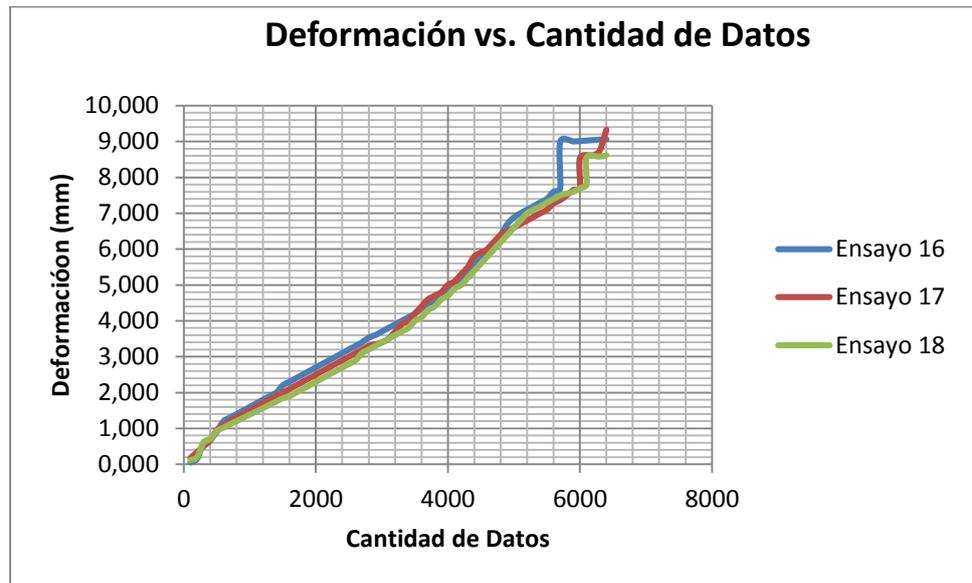
presentar como se comporta la fuerza con respecto a la deformación tal como se muestra en la figura 4.41.

**TABLA 25**  
**ENSAYO DE LA PROBETA CON MUESCA SOMETIDO A UN**  
**MEDIO CORROSIVO Y SIN TEMPERATURA**

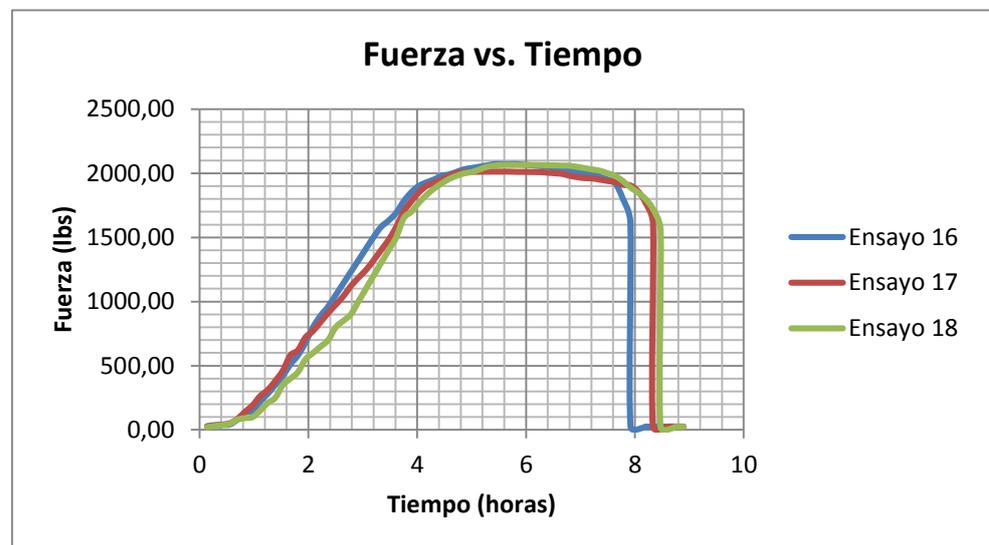
| # de Ensayo     | D1   | D2   | D3   | LC | Resultados         |                      |                      |        |
|-----------------|------|------|------|----|--------------------|----------------------|----------------------|--------|
|                 |      |      |      |    | T <sub>f</sub> (h) | P <sub>m</sub> (lbs) | P <sub>f</sub> (lbs) | Δ (mm) |
| 16              | 3.98 | 3.96 | 3.94 | 20 | 7.91               | 2070.25              | 1613.30              | 7.69   |
| 17              | 3.99 | 3.98 | 3.97 | 20 | 8.33               | 2013.12              | 1605.36              | 7.72   |
| 18              | 3.95 | 3.93 | 3.96 | 20 | 8.47               | 2065                 | 1554.23              | 7.81   |
| <b>Promedio</b> |      |      |      |    | 8.24               | 2049.46              | 1590.96              | 7.74   |



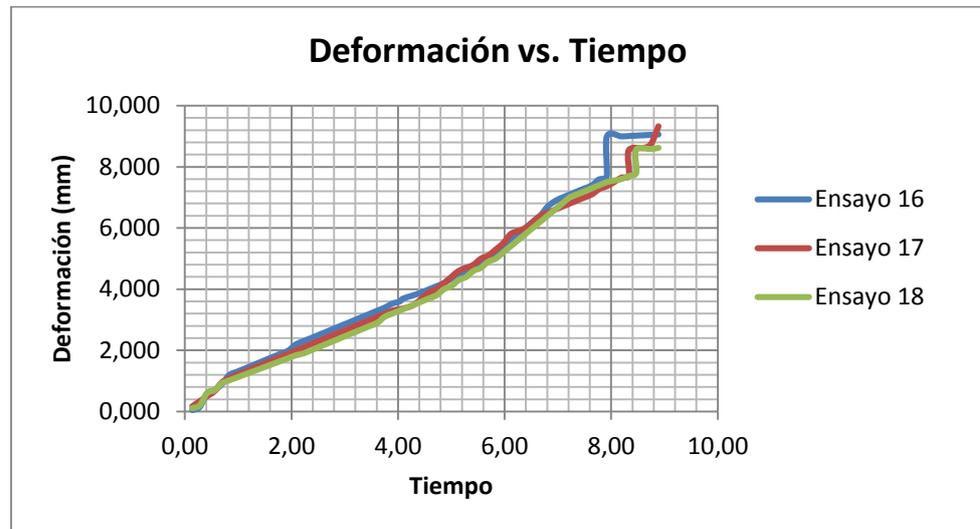
**Figura 4.37. Fuerza vs. Datos para ensayos 16-17-18**



**Figura 4.38. Deformación vs. Datos para ensayos 16-17-18**



**Figura 4.39. Fuerza vs. Tiempo para ensayos 16-17-18**



**Figura 4.40. Deformación vs. Tiempo para ensayos 16-17-18**



**Figura 4.41. Fuerza vs. Deformación para ensayos 16-17-18**

En la tabla 26 se ilustra el resultado de los promedios obtenidos en cada uno de los ensayos.

**TABLA 26**  
**PROMEDIO DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**

| Ensayo  | Resultados |          |          |               |
|---|------------|----------|----------|---------------|
|   | Tf (h)     | Pm (lbs) | Pf (lbs) | $\Delta$ (mm) |
| Probeta sin muesca sometido a temperatura ambiente y sin medio corrosivo  | 10.45      | 2099.72  | 1571.94  | 9.57          |
| Probeta con muesca sometido a temperatura ambiente y sin medio corrosivo  | 8.65       | 2130.88  | 1777.26  | 8.58          |
| Probeta sin muesca sometido a un medio corrosivo y a temperatura ambiente | 9.88       | 2020.24  | 1505.38  | 8.27          |
| Probeta con muesca sometido a un medio corrosivo y a temperatura ambiente | 8.24       | 2049.46  | 1590.96  | 7.74          |
| Probeta sin muesca sometido a un medio corrosivo y a 90 °C                | 8.47       | 1899.7   | 1405.64  | 7.96          |
| Probeta con muesca sometido a un medio corrosivo y a 90 °C                | 6.52       | 1760.34  | 1466.91  | 7.45          |

Al finalizar todas las pruebas y realizar un promedio de los datos en cada ensayo se puede observar que el mayor tiempo a la fractura y la mayor elongación se obtuvo en el ensayo de la probeta sin muesca sometido a temperatura ambiente y sin medio corrosivo. Esto se origina debido a que la superficie de la probeta en esta prueba no presenta ninguna inconformidad, por lo tanto se elongará hasta el máximo límite y esto generará que la muestra no

necesite tanta fuerza para llegar a la fractura. Al compararlo con los resultados del ensayo de la probeta con muesca sometida a los mismos parámetros, se puede apreciar que el tiempo a la fractura disminuye, la fuerza de rotura es mayor y se obtiene una menor deformación. Esto ocurre a razón de que la muesca origina un concentrador de esfuerzos y la misma entalladura de la probeta generará una resistencia a la deformación. En base a que la elongación disminuye, la muestra necesitará una mayor fuerza para llegar a la rotura. Con respecto a la fuerza máxima se puede apreciar que se consiguió fuerzas similares y esto se presenta ya que no se están modificando las propiedades del material.

Al comprobar los resultados del ensayo de la probeta sin muesca sometida a un medio corrosivo y a temperatura ambiente con el primer ensayo de la probeta sin muesca sometida a temperatura ambiente y sin un medio corrosivo se puede establecer que todas las variables analizadas disminuyeron en el ensayo donde se utilizó el medio corrosivo. Esto ocurrió debido a que la solución de cloruro de Sodio mejora las propiedades conductoras del electrolito facilitando una reacción electroquímica más intensa. Además el ion de cloruro aumenta el proceso de corrosión por varios mecanismos: aumenta la conductividad del electrolito y realiza la

rotura de la película pasivante, lo cual afectará a las propiedades mecánicas del material.

A diferencia de los resultados del ensayo de la probeta sin muesca sometido a un medio corrosivo y a 90 °C, se puede comentar que todos los valores obtenidos son menores que los dos ensayos mencionados anteriormente, debido a la acción mutua del medio corrosivo y de la temperatura. Al combinar el efecto de la temperatura con el medio corrosivo se producirá un aumento en la velocidad de la reacción de oxidación. Cuando estos aceros se someten a temperaturas entre 450 y 850 °C en los contornos de granos se aprecia la precipitación de carburos de cromo llamado sensibilización y luego al estar en contacto con un medio corrosivo se forma la corrosión bajo tensión.

En el ensayo de la probeta con muesca sometida a cloruro de sodio y sin temperatura se obtuvieron valores inferiores que en la prueba del mismo tipo de probeta sin aplicarle temperatura ni el medio corrosivo. A su vez al comparar los resultados de los dos ensayos mencionados anteriormente con el ensayo de la probeta con muesca sometida a todos los parámetros se pudo observar

que los resultados son inferiores. Este ensayo fue el de menor duración debido a que la misma muesca de la probeta no permite una elongación normal, también este tiempo de fractura se vio afectado por el medio corrosivo a 90 °C, ya que la temperatura va a influir en la velocidad de corrosión.

En el capítulo 5 se mostrará la metalografía de todas las probetas ensayadas, con el fin de comprobar si los parámetros considerados en todas las pruebas generaron algún cambio en la microestructura del Acero Inoxidable AISI 304. Para lo cual se deberá realizar la correcta preparación de las probetas para observarlas en el microscopio.

Para llevar a cabo la ejecución de todos los ensayos en el menor tiempo posible se dejó el banco experimental trabajando de día y de noche, tal como se muestra en la tabla 27.

**TABLA 27**  
**REGISTRO DE ENSAYOS**

| Número de Ensayo | Inicio     |       | Final      |       |
|------------------|------------|-------|------------|-------|
|                  | Fecha      | Hora  | Fecha      | Hora  |
| 1                | 18/02/2015 | 14:15 | 18/02/2015 | 01:13 |
| 2                | 19/02/2015 | 9:25  | 19/02/2015 | 19:07 |
| 3                | 19/02/2015 | 20:40 | 20/02/2015 | 7:22  |
| 4                | 20/02/2015 | 9:45  | 20/02/2015 | 17:57 |
| 5                | 23/02/2015 | 7:48  | 23/02/2015 | 16:33 |
| 6                | 24/02/2015 | 8:17  | 24/02/2015 | 17:18 |
| 7                | 25/02/2015 | 8:06  | 25/02/2015 | 16:09 |
| 8                | 25/02/2015 | 22:10 | 26/02/2015 | 7:03  |
| 9                | 26/02/2015 | 9:15  | 26/02/2015 | 17:43 |
| 10               | 27/02/2015 | 8:10  | 27/02/2015 | 14:33 |
| 11               | 27/02/2015 | 15:02 | 27/02/2015 | 21:42 |
| 12               | 28/02/2015 | 7:45  | 28/02/2015 | 14:16 |
| 13               | 2/03/2015  | 7:12  | 2/03/2015  | 16:47 |
| 14               | 2/03/2015  | 21:25 | 3/03/2015  | 7:17  |
| 15               | 3/03/2015  | 9:12  | 3/03/2015  | 21:32 |
| 16               | 4/03/2015  | 8:38  | 4/03/2015  | 15:33 |
| 17               | 4/03/2015  | 22:30 | 5/03/2015  | 7:03  |
| 18               | 5/03/2015  | 7:42  | 5/03/12    | 16:10 |

#### 4.7. Procesamiento de datos

Siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM G129 la cual se utilizó para efectuar el ensayo, se debe reportar los valores de deformación, elongación y tiempo hasta la ruptura para poder encontrar la relación entre el ambiente de control y ambiente del

ensayo tal como se lo mencionó en la sección 4.1. Como sistema de control se escogió a los ensayos a temperatura ambiente y sin medio corrosivo, por lo que las relaciones calculadas se las hará utilizando como base este tipo de medio. Se ha realizado un promedio entre los tres ensayos base y se ha comparado con cada una de las probetas ensayadas y también con un valor promedio. Para las 3 primeras tablas de resultados se usarán las probetas sin muesca en los medios descritos anteriormente, los resultados del medio base son los mostrados en la tabla 28. Las tablas 29 y 30 muestran las relaciones encontrados para cada uno de los resultados encontrados.

**TABLA 28**  
**RESULTADOS DE EXPERIMENTOS BASE 1 – 2 – 3**  
**PROBETAS SIN MUESCA, A MEDIO Y TEMPERATURA**  
**AMBIENTE**

|                  | D1  | D2  | D3  | Mínimo | Elongación | Área (mm <sup>2</sup> ) | Tiempo (h) |
|------------------|-----|-----|-----|--------|------------|-------------------------|------------|
| <b>Probeta 1</b> | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.6    | 29.73      | 2.01                    | 10.97      |
| <b>Probeta 2</b> | 2   | 2.2 | 2.6 | 2      | 29.64      | 3.14                    | 9.708      |
| <b>Probeta 3</b> | 1.8 | 1.8 | 2.1 | 1.8    | 30.52      | 2.54                    | 10.69      |
| <b>Promedio</b>  |     |     |     | 1.80   | 29.96      | 2.57                    | 10.46      |

**TABLA 29**  
**RESULTADOS DE EXPERIMENTOS 7 – 8 – 9**  
**PROBETAS SIN MUESCA, CON MEDIO CORROSIVO Y**  
**TEMPERATURA 90°C**

|                  | D1  | D2  | D3  | Área (mm <sup>2</sup> ) | RRA  | Elongación | RE   | Tiempo (h) | RTTF |
|------------------|-----|-----|-----|-------------------------|------|------------|------|------------|------|
| <b>Probeta 7</b> | 1.7 | 1.8 | 1.8 | 2.27                    | 0.88 | 28.37      | 0.95 | 8.06       | 0.77 |
| <b>Probeta 8</b> | 1.5 | 1.7 | 1.8 | 1.77                    | 0.69 | 28.24      | 0.94 | 8.89       | 0.85 |
| <b>Probeta 9</b> | 1.7 | 1.6 | 1.7 | 2.01                    | 0.78 | 27.45      | 0.92 | 8.47       | 0.81 |
| <b>Promedio</b>  | 1.6 |     |     | 2.02                    | 0.79 | 28.02      | 0.94 | 8.47       | 0.81 |

**TABLA 30**  
**RESULTADOS DE EXPERIMENTOS 13 – 14 – 15**  
**PROBETAS SIN MUESCA, CON MEDIO CORROSIVO Y**  
**TEMPERATURA AMBIENTE**

|                   | D1  | D2  | D3  | Área (mm <sup>2</sup> ) | RRA  | Elongación | RE   | Tiempo (h) | RTTF |
|-------------------|-----|-----|-----|-------------------------|------|------------|------|------------|------|
| <b>Probeta 13</b> | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.27                    | 0.88 | 29.33      | 0.98 | 9.85       | 0.92 |
| <b>Probeta 14</b> | 1.7 | 1.6 | 1.7 | 2.01                    | 0.78 | 28,64      | 0.96 | 9.86       | 0.94 |
| <b>Probeta 15</b> | 1.6 | 1.7 | 1.5 | 1.77                    | 0.69 | 28.29      | 0.94 | 10.2       | 0.98 |
| <b>Promedio</b>   | 1.6 |     |     | 2.02                    | 0.79 | 28,76      | 0.96 | 9.88       | 0.94 |

De la tabla 28 se usará como medida comparativa los valores promedios de área, elongación y tiempo para encontrar las relaciones en las tablas 29 y 30. Según la tabla 29 se puede notar que los valores de RRA, RE Y RTTF son menores a 1 esto quiere decir, que en el valor promedio del ambiente de control hubo una

reducción de área, elongación y tiempo de ruptura mayores que las probetas con medio y temperatura lo que demuestra una clara influencia de estas variables en la fractura del material ensayado. Comparando los valores promedio de RRA, RE Y RTTF se observa que el tiempo de ruptura se redujo a un 81% del tiempo de control lo cual a su vez genera una menor elongación que trae como consecuencia, una menor reducción de área del cuello de la probeta sin embargo, los valores de RRA y RTTF no son parecidos, lo que podría demostrar que el medio y temperatura inciden de forma distinta de modo que haga que el material ceda más rápido haciendo que se fracture sin haber sufrido tanta reducción de área.

En el caso de la tabla 30, se observa que los valores promedio de RRA y RE son parecidos a los ratios encontrados en las probetas ensayadas con medio y temperatura, la diferencia recae en el tiempo hasta la fractura (94% del tiempo en ambiente de control) lo cual permite afirmar que, si bien el medio tiene una influencia sobre la aceleración de la falla del material no es tanta como la influencia que tiene la temperatura sobre el metal.

Se presentan los resultados del medio base mostrados en la tabla 31. Las tablas 32 Y 33 muestran las relaciones encontrados para cada uno de los resultados encontrados.

**TABLA 31**  
**RESULTADOS DE EXPERIMENTOS BASE 4 – 5 – 6**  
**PROBETAS CON MUESCA, A MEDIO Y TEMPERATURA**  
**AMBIENTE**

|                  | D1   | D2  | D3   | Mínimo | Elongación | Área (mm <sup>2</sup> ) | Tiempo (h) |
|------------------|------|-----|------|--------|------------|-------------------------|------------|
| <b>Probeta 4</b> | 2    | 1.9 | 1.95 | 1.9    | 29.33      | 2.84                    | 8.19       |
| <b>Probeta 5</b> | 2.1  | 2   | 2.1  | 2      | 29.33      | 3.14                    | 8.75       |
| <b>Probeta 6</b> | 2.64 | 2.5 | 2.7  | 2.5    | 29.19      | 4.91                    | 9.02       |
| <b>Promedio</b>  |      |     |      | 2.13   | 29.28      | 3.63                    | 8.65       |

**TABLA 32**  
**RESULTADOS DE EXPERIMENTOS 10 – 11 – 12**  
**PROBETAS CON MUESCA, MEDIO CORROSIVO Y**  
**TEMPERATURA 90°C**

|                   | D1  | D2  | D3  | Área (mm <sup>2</sup> ) | RRA  | Elongación | RE   | Tiempo (h) | RTTF |
|-------------------|-----|-----|-----|-------------------------|------|------------|------|------------|------|
| <b>Probeta 10</b> | 2.4 | 2.3 | 2.3 | 4.15                    | 1.15 | 28.03      | 0.96 | 6.38       | 0.74 |
| <b>Probeta 11</b> | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 4.15                    | 1.15 | 27.93      | 0.95 | 6.67       | 0.77 |
| <b>Probeta 12</b> | 2.4 | 2.4 | 2.3 | 4.15                    | 1.15 | 27.78      | 0.95 | 6.52       | 0.75 |
| <b>Promedio</b>   | 2.3 |     |     | 4.15                    | 1.15 | 27.91      | 0.95 | 6.52       | 0.75 |

**TABLA 33**  
**RESULTADOS DE EXPERIMENTOS 16 – 17 – 18**  
**PROBETAS CON MUESCA, MEDIO CORROSIVO Y**  
**TEMPERATURA AMBIENTE**

|                   | D1   | D2  | D3  | Área (mm <sup>2</sup> ) | RRA  | Elongación | RE   | Tiempo (h) | RTTF |
|-------------------|------|-----|-----|-------------------------|------|------------|------|------------|------|
| <b>Probeta 16</b> | 2.6  | 2.6 | 2.4 | 4.52                    | 1.25 | 29.38      | 1    | 7.91       | 0.91 |
| <b>Probeta 17</b> | 1.7  | 1.6 | 1.5 | 1.77                    | 0.49 | 28.1       | 0.96 | 8.33       | 0.96 |
| <b>Probeta 18</b> | 1.6  | 1.6 | 1.8 | 2.01                    | 0.55 | 29.943     | 1.02 | 8.47       | 0.98 |
| <b>Promedio</b>   | 1.83 |     |     | 2.77                    | 0.76 | 29.14      | 1    | 8.24       | 0.95 |

Para el caso de las probetas con muesca se utilizará también como ensayo de control los que fueron realizados en temperatura ambiente y sin medio corrosivo y las comparaciones con los otros ensayos, se lo hará con los valores promedio de la tabla 31.

El valor RRA promedio mostrado en la tabla 32 indica un valor mayor a 1 lo que significa que la reducción de área fue menor que la encontrada en el sistema de control y a su vez, revisando el valor de RE obtenemos que la elongación no varió tanto de la que ocurrió en el ambiente de control. El tiempo a la fractura se redujo según lo que indica el ratio RTTF a un 75% del tiempo necesario a que falle la probeta en el primer sistema, de estos datos se puede concluir que el medio y temperatura afectaron a la falla del material y teniendo una variación mayor en el tiempo.

En la tabla 33 los valores promedios de RRA, RE y RTTF no difieren mucho de los valores de la tabla 32, es así que el valor promedio RE da 1 lo que significa que la elongación promedio de la probeta resulta ser igual a la de los ensayos sin medio y a temperatura ambiente. El valor de 0.95 de RTTF muestra que si bien hubo una reducción del tiempo del ensayo, éste no cambia mucho con respecto a los ensayos de comparación que es algo parecido a lo que ocurrió con las probetas sin muesca. El valor del ratio de reducción de área 0,76 indica que la reducción final promedio del cuello de la probeta resulto ser de mayor diámetro que la de los valores promedio del ensayo de control. Algo que se puede resaltar es, en los ensayos de las probetas sin muesca presentaron una mayor elongación y una mayor reducción de área transversal que los ensayos hechos a probetas con muesca, el tiempo hasta la fractura de los ensayos en cambio resulta ser mucho menor en el caso de las probetas con muesca que las otras, la temperatura ha sido en ambos casos, un factor que afecta directamente a la duración del ensayo. Con estos datos obtenidos se podrá conocer en que afecta la modificación de ciertas variables en los ensayos sobre todo analizando las deformaciones y tiempos que no son los requeridos por la norma ASTM G129, para poder seguir describiendo más características que distinguen estos

grupos de ensayos será necesario, hacer un análisis más profundo usando otro tipo de revisiones como metalografías y macrografías que permitirá ver si éstas variables han tenido influencia alguna en la microestructura del material, un análisis usando estos ensayos se lo dará a continuación en el capítulo 5.

# CAPÍTULO 5

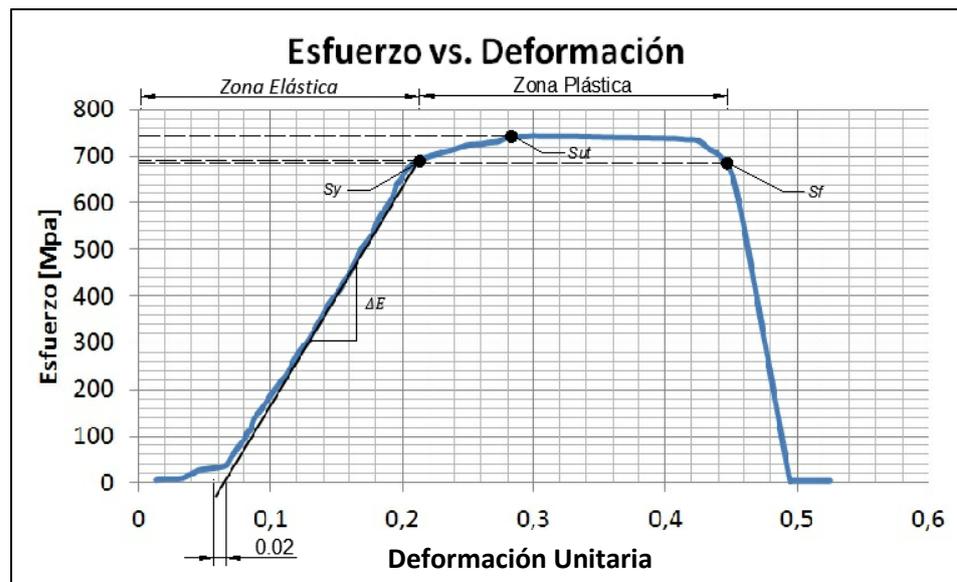
## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

### 5.1. Curva esfuerzo–deformación

En esta sección se realizan análisis de las gráficas esfuerzo-deformación que se obtuvieron de los ensayos realizados con el objetivo de encontrar las propiedades mecánicas del material y comprobar que han sido afectadas debido a la modificación de las variables de temperatura y medio corrosivo. Se utiliza ésta grafica debido a que de ella se encontrarán los valores de  $S_y$  y  $S_{ut}$  los cuales son propiedades características del material y pueden ser comparables con los valores mínimos que establece la norma.

La figura 5.1, muestra la gráfica esfuerzo-deformación unitaria específicamente de la probeta 3, por la forma de la gráfica se nota que se trata de un material dúctil debido a la gran deformación

unitaria que presenta el material hasta el rompimiento. En la Zona Elástica de la gráfica existe tendencia a una relación proporcional la cual según la teoría, está regida por la Ley de Hooke. El esfuerzo necesario para que el material sea deformado plásticamente es denotado Esfuerzo de Fluencia  $S_y$ , el cual indica también el final de la zona elástica. Este esfuerzo de fluencia será encontrado de la gráfica al encontrar el punto que intersecta la curva cuando se traza una línea paralela a la zona elástica pero, con un desplazamiento del 2% en el eje de Deformación Unitaria.



**Figura 5.1. Gráfica Esfuerzo-Deformación de Probeta en Medio y Temperatura Ambiente**

Otro valor que será encontrado de la curva será el de esfuerzo último o también denominado esfuerzo máximo  $S_{ut}$ , el cual indica el máximo valor de esfuerzo que puede soportar el material antes de que inicie la estricción y finalice en la fractura del material. Un punto interesante en conocer es el del esfuerzo de ruptura  $S_f$ , el cual puede ayudar a profundizar un poco más acerca del comportamiento que tuvo la probeta antes de fracturarse.

Las tablas 34, 35, 36, 37, 38 y 39 muestran los valores de  $S_y$ ,  $S_{ut}$  y  $S_f$  encontrados de las gráficas esfuerzo deformación de cada uno de los 18 ensayos realizados.

**TABLA 34**  
**PROPIEDADES MECANICAS DE PROBETAS SIN MUESCA EN**  
**MEDIO Y TEMPERATURA AMBIENTE**

| Condición                 | Propiedades Mecánicas | Probetas sin muesca |        |        | Promedio |
|---------------------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|----------|
|                           |                       | 1                   | 2      | 3      |          |
| Medio y Temp.<br>Ambiente | $S_y$ [MPa]           | 695,00              | 702,00 | 688,00 | 695,00   |
|                           | $S_{ut}$ [MPa]        | 776,95              | 748,49 | 743,60 | 756,35   |
|                           | $S_f$ [MPa]           | 611,55              | 502,51 | 567,20 | 560,42   |

**TABLA 35**  
**PROPIEDADES MECANICAS DE PROBETAS CON MUESCA EN**  
**MEDIO Y TEMPERATURA AMBIENTE**

| Condición                 | Propiedades Mecánicas | Probetas con muesca |        |        | Promedio |
|---------------------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|----------|
|                           |                       | 4                   | 5      | 6      |          |
| Medio y Temp.<br>Ambiente | $S_y$ [MPa]           | 702,00              | 692,00 | 718,00 | 704,00   |
|                           | $S_{ut}$ [MPa]        | 764,55              | 777,76 | 762,67 | 768,33   |
|                           | $S_f$ [MPa]           | 644,98              | 653,58 | 625,72 | 641,43   |

**TABLA 36**  
**PROPIEDADES MECANICAS DE PROBETAS SIN MUESCA EN**  
**MEDIO CORROSIVO Y A 90°C**

| Condición           | Propiedades Mecánicas | Probetas sin muesca |        |        | Promedio |
|---------------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|----------|
|                     |                       | 7                   | 8      | 9      |          |
| ClNa y Temp<br>90°C | $S_y$ [MPa]           | 661,00              | 658,00 | 636,00 | 651,67   |
|                     | $S_{ut}$ [MPa]        | 682,34              | 686,51 | 686,51 | 685,12   |
|                     | $S_f$ [MPa]           | 485,30              | 500,58 | 529,18 | 505,02   |

**TABLA 37**  
**PROPIEDADES MECANICAS DE PROBETAS CON MUESCA EN**  
**MEDIO CORROSIVO Y A 90°C**

| Condición           | Propiedades Mecánicas | Probetas con muesca |        |        | Promedio |
|---------------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|----------|
|                     |                       | 10                  | 11     | 12     |          |
| ClNa y Temp<br>90°C | $S_y$ [MPa]           | 553,00              | 542,00 | 561,00 | 552,00   |
|                     | $S_{ut}$ [MPa]        | 630,35              | 622,07 | 655,46 | 635,96   |
|                     | $S_f$ [MPa]           | 563,17              | 516,36 | 510,20 | 529,91   |

**TABLA 38**  
**PROPIEDADES MECANICAS DE PROBETAS SIN MUESCA EN**  
**MEDIO CORROSIVO Y TEMPERATURA AMBIENTE**

| Condición                | Propiedades Mecánicas | Probetas sin muesca |        |        | Promedio |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|----------|
|                          |                       | 13                  | 14     | 15     |          |
| CINa y Temp.<br>Ambiente | $S_y$ [MPa]           | 652,00              | 665,00 | 676,00 | 664,33   |
|                          | $S_{ut}$ [MPa]        | 734,89              | 729,05 | 729,76 | 731,23   |
|                          | $S_f$ [MPa]           | 551,03              | 560,58 | 535,21 | 548,94   |

**TABLA 39**  
**PROPIEDADES MECANICAS DE PROBETAS CON MUESCA EN**  
**MEDIO CORROSIVO Y TEMPERATURA AMBIENTE**

| Condición                   | Propiedades Mecánicas | Probetas con muesca |        |        | Promedio |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|----------|
|                             |                       | 16                  | 17     | 18     |          |
| CINa y<br>Temp.<br>Ambiente | $S_y$ [MPa]           | 678,00              | 646,00 | 680,00 | 668,00   |
|                             | $S_{ut}$ [MPa]        | 740,14              | 719,76 | 749,81 | 736,57   |
|                             | $S_f$ [MPa]           | 576,74              | 544,56 | 564,26 | 561,85   |

Debido a que se realizaron tres ensayos para cada condición propuesta, los valores de  $S_y$  y  $S_{ut}$  serán el valor promedio de las tres gráficas encontradas, se puede concluir que cumplen con los valores mínimos admitidos para un acero inoxidable mostrados en la tabla 2 en el capítulo 2. Con el objetivo de comparar la variación de las propiedades mecánicas por la injerencia de medio y temperatura, se presenta la tabla 40 con los resultados

presentados en los cuadros anteriores y es comparado con valores encontrados en un laboratorio certificado usando probetas fabricadas del mismo material y mismas dimensiones que las utilizadas para hacer los ensayos de este trabajo.

**TABLA 40**  
**RESULTADOS DE PROPIEDADES MECANICAS EN**  
**DIFERENTES MEDIOS**

| Condición                 | Probeta sin muesca |                   | Probeta con muesca |                   | Laboratorio |                |
|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------|----------------|
|                           | $S_y$<br>[MPa]     | $S_{ut}$<br>[MPa] | $S_y$<br>[MPa]     | $S_{ut}$<br>[MPa] | $S_y$ [MPa] | $S_{ut}$ [MPa] |
| Medio y temp.<br>Ambiente | 695,00             | 756,35            | 704,00             | 768,33            | 691,83      | 729,62         |
| CINa y temp. 90°C         | 651,67             | 685,12            | 552,00             | 635,96            |             |                |
| CINa y temp.<br>Ambiente  | 664,33             | 731,23            | 668,00             | 736,57            |             |                |

Los valores obtenidos para los casos de probetas sin y con muesca muestran valores de  $S_y$  y  $S_{ut}$  similares y con un error de hasta el 5% con respecto a los encontrados en laboratorio. Cuando se coloca el medio corrosivo y temperatura, se observa una caída en el valor del esfuerzo de fluencia para los dos tipos de probetas, una reducción del 6,23% para las probetas sin muesca y del 21,59% para las probetas con muesca, lo que demuestra que estos

factores sí modifican esta propiedad volviendo al material menos dúctil y haciendo que llegue a deformarse plásticamente usando un menor esfuerzo que el normalmente usado. A su vez, cuando se analiza el esfuerzo máximo  $S_{ut}$  en las probetas sin muesca se observa que disminuye en un 9,41% y para las probetas con muesca lo hace en un 17,23% volviendo a presentar mayor influencia de estos medios en las probetas que tienen la entalla. Este comportamiento se presenta al observar la gráfica, ya que muestra que ésta tiene menor altura y menor longitud lo que indica que existe un menor esfuerzo máximo y una menor deformación unitaria lo que explica la reducción del tiempo de ensayo ya que se necesitó alcanzar menores valores de esfuerzo para romper la probeta.

Al revisar los ensayos realizados con medio corrosivo y a temperatura ambiente, existe también una disminución de los valores de  $S_y$  y  $S_{ut}$ . El esfuerzo de fluencia para las probetas sin muesca se ha reducido en un 4,41% y para las con muesca lo ha hecho en un 5,11% volviendo a mostrar la tendencia de que éstas últimas son las que más han sido afectadas cuando se cambian estos parámetros. Los valores del esfuerzo máximo se han reducido en un 3,32% en las probetas sin muesca y 4,13% para las probetas con muesca. Una vez más las probetas con muesca se

reducen en mayor cantidad que las que no la tienen, los valores de esfuerzo han sido menores y las probetas volvieron a tener una disminución en el tiempo necesario para que fallen.

Se puede afirmar que las probetas con muesca han sido las más afectadas cuando existe la modificación de las variables: medio corrosivo y temperatura de ensayo presentando una mayor disminución cuando, se trabaja con la temperatura de 90°C. Estas variables afectan a la probeta haciendo que fallen cuando existe una menor tensión aplicada a la misma lo que se traduciría a una reducción de la vida útil de materiales que trabajen en este medio. La temperatura presenta una mayor incidencia ya que los valores de  $S_y$  y  $S_{ut}$  resultaron ser los menores en todos los casos cuando se trabaja a alta temperatura que a temperatura ambiente inclusive cuando se tiene un medio corrosivo presente. Se ha observado como las propiedades mecánicas han sido modificadas lo que puede indicar la presencia de SSC en los ensayos realizados sin embargo, será necesario realizar un análisis más profundo con la finalidad de comprobar el comportamiento de la fractura del material, si existió algún cambio en la microestructura del acero lo que podría finalmente, llevar a una conclusión de la presencia o no de SCC.

## 5.2. Fractura del material ensayado

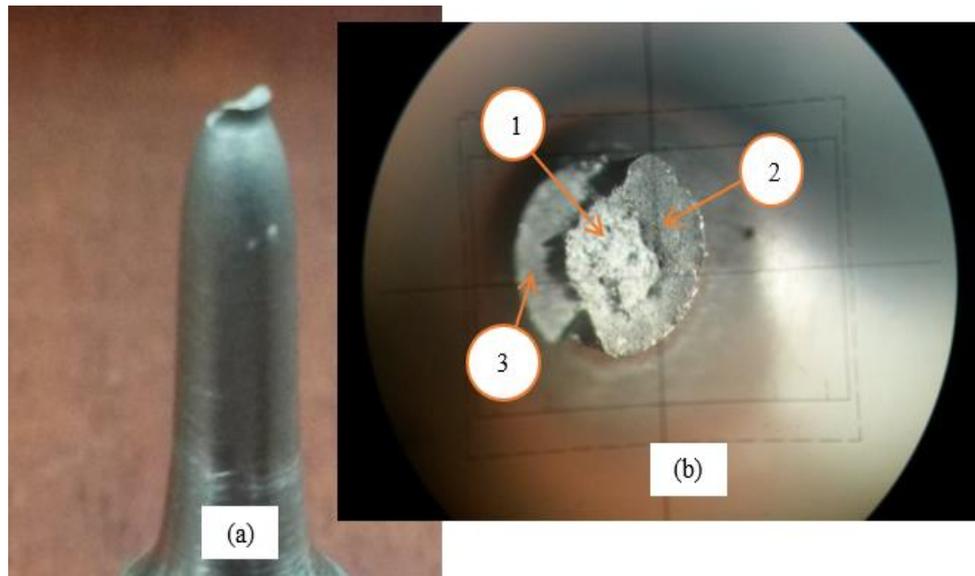
En esta sección se realizará un análisis del tipo de fractura ocurrida en las probetas ensayadas con la finalidad de encontrar las semejanzas y diferencias entre éstas. Además se hará una comparación para poder observar el tipo de falla que se presenta bajo la acción del medio y temperatura. En la figura 5.2 se muestra la ejecución de este tipo de ensayo.



**Figura 5.2. Visualización de la macrografía de las muestras ensayadas**

Se realizó la selección de una sola probeta del grupo de 3 de cada ensayo debido a que los tipos de fracturas, tiempos y elongaciones son similares y una sola puede representar a toda la muestra. En la

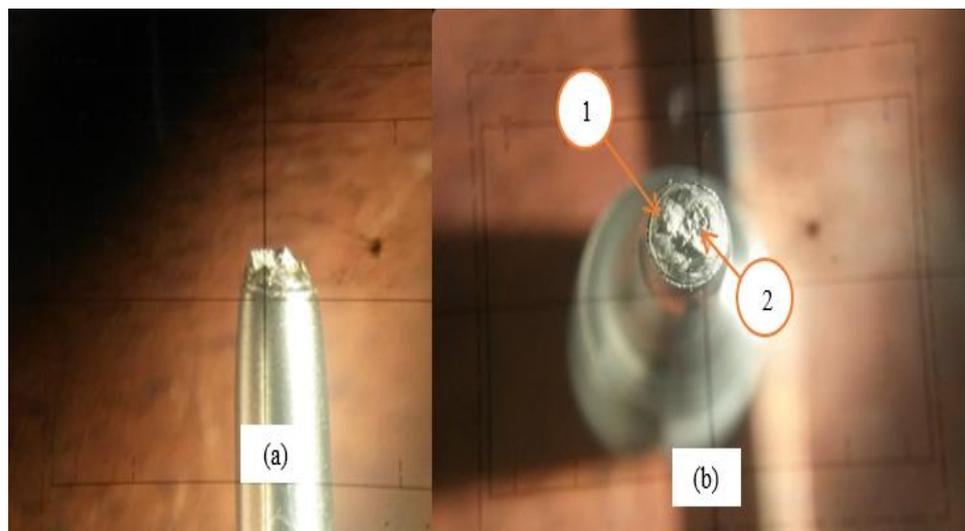
figura 5.3 se observa en (a) la deformación que sufrió después de la ruptura la probeta 1 y en (b) una macrografía a un acercamiento de 32x en la zona de la fractura de la probeta.



**Figura 5.3. (a) Elongación de la probeta 1 (b) Macrografía de la fractura 32x**

La figura 5.3. (a) muestra la deformación de la probeta la misma que fue alrededor de 9,6mm más de su longitud inicial, por la forma final de la probeta es posible decir que se trata de una fractura de un material dúctil debido a que consta del típico copa-cono, produciendo el corte a aproximadamente  $45^\circ$  del eje de tracción, al hacer una medición del diámetro del cuello final se conoce que se redujo al 16,24% del área inicial antes de la prueba. Al revisar la figura 5.3. (b) es observable las 3 zonas que normalmente aparecen en este tipo de fracturas: zona fibrosa, zona radial y zona

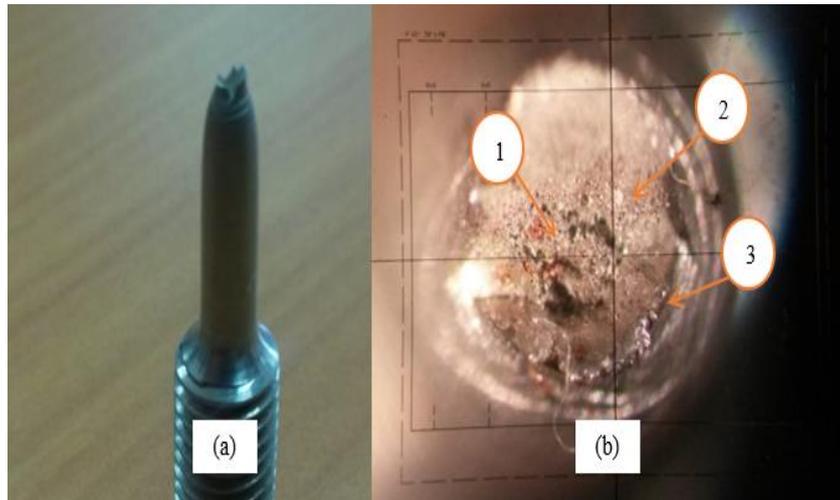
de cizallamiento. La zona fibrosa (1) tiene una apariencia plana y porosa, estos poros, pueden representar a los primeros huecos que se forman a medida que se va tensando el material y por lo regular, es por donde comienza a fracturarse la probeta. La zona radial (2) de la fractura se nota más claramente rodeando la parte derecha de la zona fibrosa y se extiende hasta llegar a la zona de cizalla (3) la cual se nota que hubo dos labios a diferentes alturas siendo el del lado izquierdo a menor profundidad que el derecho. Estos labios de cizalla se producen debido al estiramiento de la probeta y representan la última zona donde se transmite la fractura hasta que se rompe en dos partes la probeta ensayada. La figura 5.4 muestra una macrografía de la probeta con muesca sometido a temperatura ambiente y sin ningún medio corrosivo.



**Figura 5.4. (a) Elongación de la probeta 4 (b) Macrografía de la fractura 32x**

Esta probeta no mostró una deformación tan grande como las que presentaron las probetas sin muesca, la sección transversal se redujo al 23,02% de la medida original antes del ensayo la cual es una menor reducción que la de las probetas sin muesca ensayadas bajo las mismas condiciones. En la figura 5.4. (a) se aprecia que la fractura tiene un parecido a la forma de una falla de un material frágil ya que no muestra tan definido la copa y el cono como se observa en la probeta descrita anteriormente. En la parte (b) de la misma figura, se aprecia la fractura a un acercamiento de 32x, en ella es notable la ausencia de la zona de cizallamiento debido a que la muesca actúa como un concentrador de esfuerzos y hace que la grieta inicie donde finaliza la muesca. Se observa también una reducción de la zona fibrosa (1) en comparación con la macrografía anterior y en el centro de la probeta (2), es observable una zona áspera llena de picos y valles donde la fractura se propaga rápidamente.

La figura 5.5 representa una probeta sin muesca ensayada con la presencia de un medio corrosivo y con temperatura a 90°C.

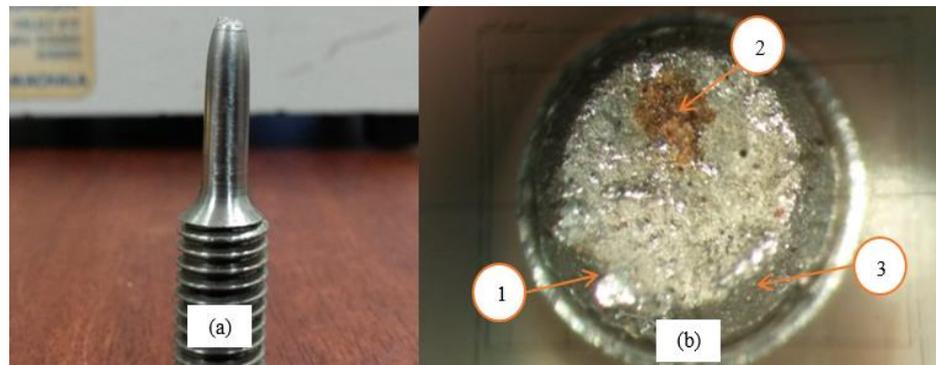


**Figura 5.5. (a) Elongación de la probeta 7 (b) Macrografía de la fractura 32x**

La figura 5.5. (a) muestra una probeta con una deformación similar a la probeta 1, sin embargo la elongación de esta probeta resultó ser un poco menor (8 mm). Se volvió a presentar el cuello con la copa y cono que muestra una fractura de un material dúctil y también se obtuvo una reducción al 18,61% del área original. Según la imagen (b), la zona de cizalladura (3) reapareció, se aprecia una mayor presencia de los labios de rompimiento indicando que en la parte final del ensayo, la probeta tuvo un desgarramiento más uniforme que en el caso de la probeta 1. La zona fibrosa (1) de la fractura se muestra en el centro, lleno de porosidades y con un menor tamaño en comparación con la que apareció en la primera probeta, entre estos poros también han aparecido unos puntos rojos los cuales indican que muy

probablemente exista corrosión debido a que, transcurrió cierto tiempo desde la finalización del ensayo hasta la toma de fotos de la macrografía. La zona radial (2) toma una mayor área de la superficie de la probeta y se extiende hasta encontrarse a los bordes de la fractura, cabe notar que esta zona es mayor que la encontrada en la primera probeta.

La figura 5.6 muestra la deformación sufrida y una macrografía de una probeta con muesca que ha sido ensayada bajo la presencia de un medio corrosivo y a una temperatura de 90°C.

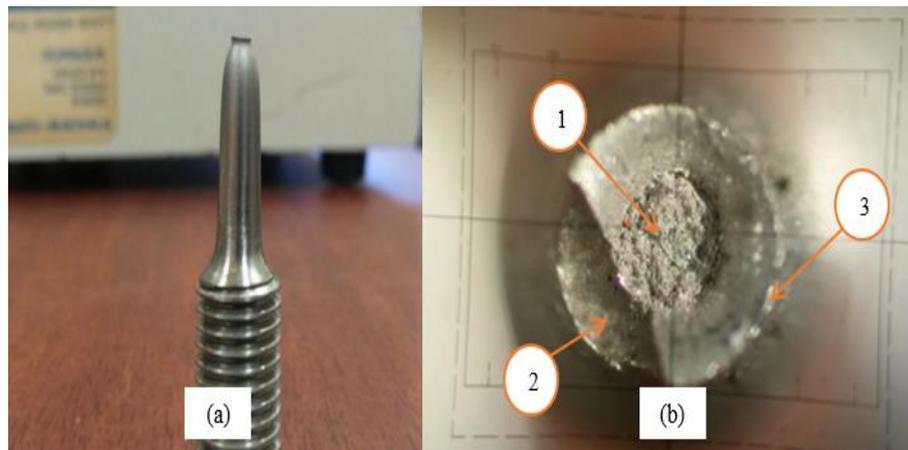


**Figura 5.6. (a) Elongación de la probeta 10 (b) Macrografía de la fractura 32x**

La deformación final mostrada en (a) es de aproximadamente 8,03 mm y una reducción de área del 33,9% lo que indica que tuvo una menor deformación y reducción de área transversal que la probeta 4 ensayada en el ambiente de control y la fractura vuelve a

comenzar donde está ubicada la muesca. Al revisar la macrografía de (b), se nota que la fractura presenta en su mayoría una superficie plana y no tan porosa como lo mostro la probeta 4 ensayada en el ambiente de control. Otra vez se observa que la zona de cizallamiento ha desaparecido debido a que la falla comienza desde la finalización de la muesca como parece que sucede en (1), las zonas más claras son pequeños picos que presenta la fractura y los puntos negros que aparecen podrían resultar ser impurezas del metal o huecos que se produjeron cuando se fracturo la probeta. En esta probeta vuelve a aparecer una zona anaranjada (2) lo cual puede representar a un área corroída tal como se mostró en la macrografía anterior, la zona fibrosa (3) se muestra como un anillo que recorre el contorno de la región plana donde ocurre la fractura rápida.

La figura 5.7 muestra la deformación y la macrografía de una probeta sin muesca ensayada bajo presencia de un medio corrosivo y a temperatura ambiente.

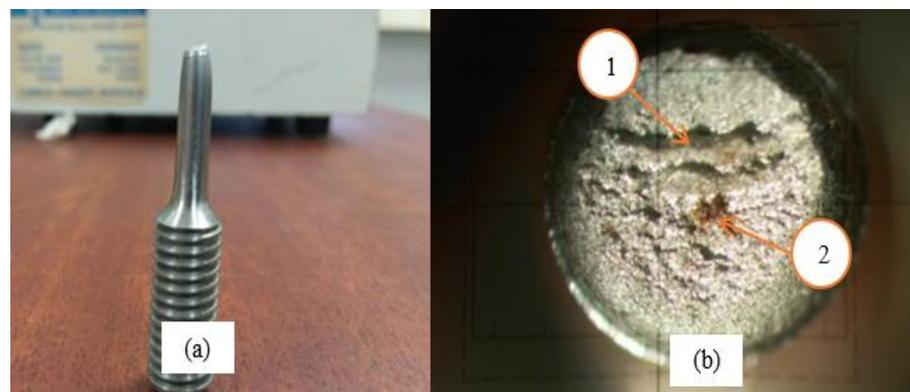


**Figura 5.7. (a) Elongación de la probeta 13 (b) Macrografía de la fractura 32x**

En (a) se muestra que la deformación sufrida por la probeta después del ensayo es de 9,33mm, la reducción de área fue a un 18,61% del valor antes del ensayo, la deformación producida se encuentra en un valor medio entre la probeta con el ensayo de control y la ensayada con medio corrosivo y temperatura lo que indica que sí hubo una reducción de la deformación total por efecto del medio corrosivo pero no varía tanto. La reducción de área fue aproximadamente la misma a la probeta 7, con la diferencia en que el ensayo tardó más tiempo, debido a la ausencia de la muesca, la fractura volvió a formar la copa-cono y al observar la parte (b) de la figura mencionada, se aprecia que la zona fibrosa (1) es similar a la de la probeta 1 ya que muestra picos, valles y pequeñas imperfecciones que se producen cuando se va fracturando el

material. En esta zona se vuelve a encontrar pero en menor cantidad, puntos rojizos que demostrarían la presencia de herrumbre. Tanto la zona radial (2) y la de cizallamiento (3) resultan ser muy parecidas a los de la probeta 1 por lo que es práctico comentar que en sí, la presencia de solamente de un medio corrosivo afecta poco en la morfología de la fractura.

La figura 5.8 muestra la deformación total y una macrografía de una probeta con muesca sometida a medio corrosivo y temperatura ambiente.



**Figura 5.8. (a) Elongación de la probeta 16 (b) Macrografía de la fractura 32x**

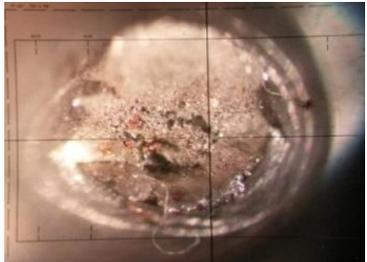
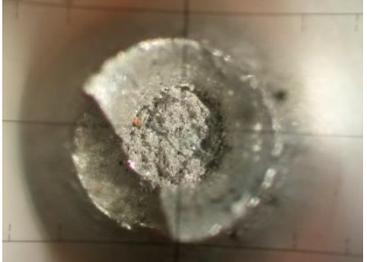
La figura 5.8 (a) muestra la deformación final de la probeta la cual resultó de 9.38 mm, la reducción de área fue de un 37,1%. Estos

valores indican que la deformación y reducción del área fueron menores que los mostrados en la probeta 4 ensayada con el medio de control. Al revisar la macrografía (b) se encuentra una fractura nuevamente porosa y no tan plana como la que ocurrió en la figura 5.6, consta también de dos marcas (1) que indican la transmisión de una grieta transversal que inicia y termina en el final de la muesca. Otra vez existe la presencia de herrumbre (2) de una posible oxidación de la zona fracturada debido a la exposición al medio.

La presencia de un medio corrosivo y temperatura ha afectado a la morfología de la fractura, debido a que cuando han estado presentes, las zonas radiales se han reducido en el caso de las probetas sin muesca y se han vuelto más planas en las probetas con muesca. El tamaño del área final también ha sido afectado por el medio ya que, las probetas ensayadas en el medio de control tendían a tener mayores diámetros que las que habían sido atacadas con medio y temperatura. Al comparar las probetas ensayadas con medio corrosivo a temperatura ambiente es notable que la morfología de la zona fracturada es casi similar, lo cual indica que el medio no afecta tanto a la transmisión de la fractura como lo hace con la presencia de temperatura.

La tabla 41 ilustra todas las macrografías descritas anteriormente con el objetivo de, facilitar una comparación visual de las fracturas que se han obtenido al variar el medio y temperatura de ensayo.

**TABLA 41**  
**RESULTADOS DE LAS MACROGRAFÍAS DE LAS PROBETAS**  
**ENSAYADAS**

|   | <u>Probetas sin muesca</u>   | <u>Probetas con muesca</u>  |
|---|--|---|
| Sin medio corrosivo y Temperatur a Ambiente | <br>Probeta 1   | <br>Probeta 4   |
| Con medio corrosivo y Temperatur a 90°C     | <br>Probeta 7  | <br>Probeta 10 |
| Con medio corrosivo y Temperatur a Ambiente | <br>Probeta 13 | <br>Probeta 16 |

### 5.3. Pruebas Metalográficas

Para realizar la metalografía de las probetas ensayadas se escogió una de las tres muestras sometidas a las mismas condiciones.

El Procedimiento que se realiza en un ensayo metalográfico incluye la preparación de la probeta, ataque químico, observación microscópica. Por las pequeñas dimensiones y forma de la probeta, no permite pulirla directamente, es necesario realizar la preparación de la muestra realizando un montaje en frío. Se usó una resina (epoxi) con un catalizador para endurecerla y colocar la muestra.

Se empieza con una lija de agua de grano 220, seguido de la de 400,600, para terminar con la de 1000.

El siguiente proceso es realizar un pulido para proporcionarle a la superficie del material una apariencia tipo espejo.

Se realizó un ataque electroquímico utilizando la máquina de pulido electrolítico. Este proceso consiste en hacer circular una corriente continua, que varía desde una fracción de amperio a varios amperios de intensidad a través de un electrolito. Se usó el ATLAS OF MICROSTRUCTURE ASM HANDBOOK para obtener el correcto reactivo que revela los límites de grano del acero a

ensayar, para el cual se lo preparó utilizando 10 gramos de ácido oxálico diluidos en 100 ml de agua destilada.

La superficie pulida de la probeta es el ánodo, la bandeja que contiene el electrolito es el cátodo. Un factor importante es el tiempo de ataque, el cual para este tipo de reactivo se lo dejó 15 segundos.

Una vez terminado este proceso se analizará la microestructura en el microscopio de todas las probetas a las que se le realizó la preparación superficial, tal como se muestra en la figura 5.9.



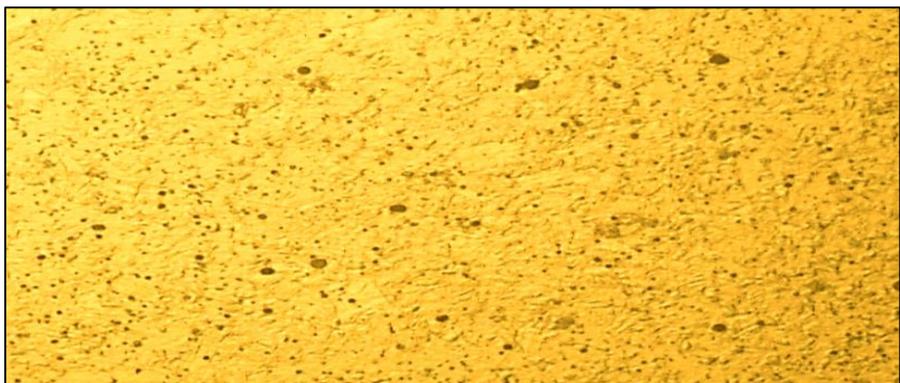
**Figura 5.9. Análisis metalográfico de las probetas**

**Metalografía de la Probeta sin muesca sin medio corrosivo y  
sin temperatura**

En las figuras 5.10 y 5.11 se muestran las diferentes metalografías obtenidas, se realizó un enfoque en el centro de la probeta para observar el comportamiento de los granos del metal. Se utilizarán diferentes valores de aumentos para tener una mejor apreciación de la microestructura.



**Figura 5.10. Microestructura de la sección transversal en el centro (200x)**



**Figura 5.11. Microestructura de la sección transversal en el centro (500x)**

En la figura 5.10 no se puede apreciar los granos del metal, aunque en el centro de la imagen se observa un color blanquinoso. Además se distingue que en las zonas vecinas al centro hacia afuera se torna de un color más oscuro, esto puede ocurrir ya que la probeta fue tensada hasta llegar a su punto de fractura. Debido a esto se iba a formar una estricción generando que los bordes de grano que están más alejados del centro de la probeta se deformen mucho más. La figura 5.11 ilustra un mayor acercamiento, en la cual se reveló una ligera apariencia de los granos. Los puntos negros mostrados en las imágenes anteriores pueden ser inclusiones no metálicas, formadas por impurezas en la elaboración del material o por el ataque del reactivo. En las metalografías mencionadas anteriormente no se logró visualizar alguna fisura intergranular, transgranular, tampoco se presenció una tendencia de agrietamiento en forma de ramificación.

**Metalografía de la Probeta con muesca sin medio corrosivo y sin temperatura**

En las figuras 5.12 y 5.13 se muestran las diferentes metalografías obtenidas, se enfocará el centro de la probeta para determinar la variación que puede ocurrir con los granos del metal.

Para obtener una mejor visibilidad en la microestructura del metal se utilizaron diferentes aumentos.



**Figura 5.12. Microestructura de la sección transversal en el centro (200x)**



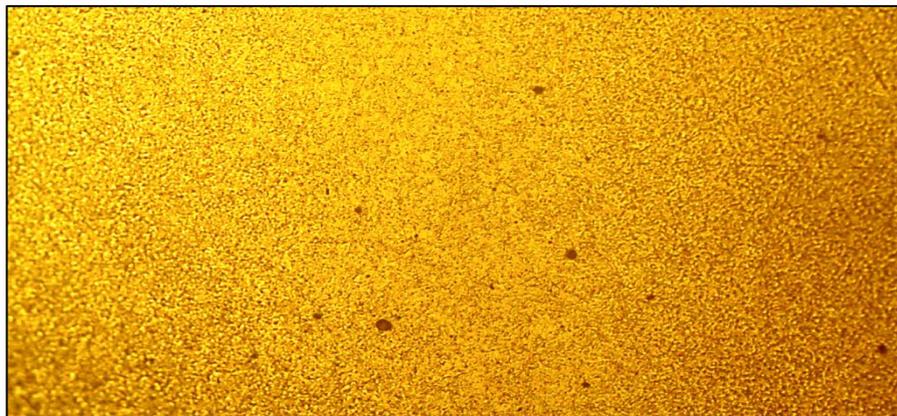
**Figura 5.13. Microestructura de la sección transversal en el centro (500x)**

Se puede visualizar en el centro de la figura 5.12 los granos del material, sin embargo en las partes más alejadas del centro no se logró lo mismo. Esto ocurre debido a la tensión que se le aplica a la probeta, originando que se deformen los granos del material. En la figura 5.13 se muestra un aumento de los granos obtenidos en el centro de la superficie preparada. En las metalografías realizadas en este ensayo no se logró visualizar alguna fractura transgranular o intergranular.

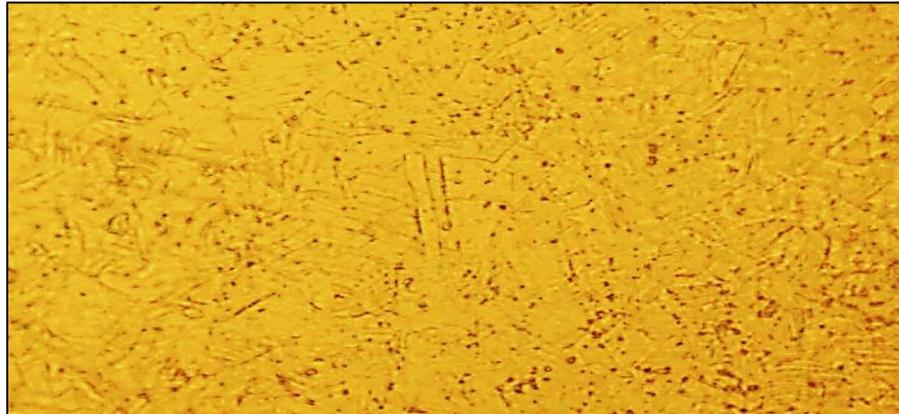
#### **Metalografía de la Probeta sin muesca con medio corrosivo a**

**90 °C**

En las figuras 5.14 y 5.15 se muestran varias metalografías, en las cuales se enfocará el centro de la probeta. Para lograr una mejor visibilidad en la microestructura del metal se utilizaron diferentes aumentos.



**Figura 5.14. Microestructura de la sección transversal en el centro (200x)**



**Figura 5.15. Microestructura de la sección transversal en el centro (500x)**

En la figura 5.14 se puede visualizar que en el centro hay un color blanquinoso y que en las proximidades del borde de la probeta se generaba un color más oscuro. Lo mismo ocurrió en el ensayo de la probeta sin muesca sometida a temperatura ambiente y sin medio corrosivo. En la figura 5.15 se ilustra un mayor acercamiento obteniendo una mayor claridad de los bordes de grano. Los puntos negros que se muestran en las imágenes anteriores pueden ser inclusiones no metálicas formadas por impurezas en la elaboración del material o por el ataque del reactivo. En las metalografías mencionadas anteriormente no se logró visualizar alguna fisura como la intergranular o transgranular, debido a las condiciones del ensayo.

**Metalografía de la Probeta con muesca con medio corrosivo a**

**90 °C**

Las diferentes metalografías obtenidas se las ilustra en las figuras 5.16 y 5.17, fue necesario realizar un acercamiento del centro de la probeta. Se utilizaron diferentes valores de aumentos para tener una mejor apreciación de la microestructura.



**Figura 5.16. Microestructura de la sección transversal en el centro (200x)**



**Figura 5.17. Microestructura de la sección transversal en el centro (500x)**

En la figura 5.16 se puede observar los granos del material, sin embargo en la proximidad del borde de la probeta los granos están más deformados. El principal motivo por lo que ocurre esta variación de los bordes de grano es debido a la tensión que se le aplicaba a la probeta, lo cual origina una estricción en la misma. Al ser tensada la muestra, los bordes de grano que están cercanos al borde van a deformarse más que los del centro. En la figura 5.17 se muestra un aumento de los granos obtenidos en el centro de la superficie preparada. No se visualizó ninguna fractura transgranular o intergranular debido a que las condiciones del ensayo no eran las más perjudiciales.

**Metalografía de la Probeta sin muesca con medio corrosivo a temperatura ambiente**

En las figuras 5.18 y 5.19 se ilustran las metalografías de las probetas preparadas. Se tomó la metalografía del centro de la probeta para analizar el comportamiento de los bordes de grano.



**Figura 5.18 Microestructura de la sección transversal en el centro (200x)**



**Figura 5.19. Microestructura de la sección transversal en el centro (500x)**

Al colocar la probeta en el microscopio, no se pudo apreciar los granos del metal con el aumento de 200x, aunque se puede observar que en el centro de la imagen hay mayor espacio sin deformar, el cual se presentaba como un color blanquinoso, además en las proximidades del borde de la muestra hay una alta

distorsión generando mayor deformación en los bordes de grano, como se muestra en la figura 5.18. Además se reveló una ligera apariencia de los granos en la figura 5.19. En las metalografías mencionadas anteriormente en este tipo de ensayo, no se logró visualizar alguna fisura como la intergranular o transgranular, ya que los parámetros a los que se sometió el ensayo no eran los más dañinos.

**Metalografía de la Probeta con muesca con medio corrosivo a temperatura ambiente**

Las metalografías obtenidas de este tipo de ensayo se las muestran en las figuras 5.20 y 5.21, se debe capturar algún cambio que esté presente en el grano del material, para lo cual se utilizaron varios aumentos del lente del microscopio para tener una mejor visualización.



**Figura 5.20. Microestructura de la sección transversal en el centro (200x)**



**Figura 5.21. Microestructura de la sección transversal en el centro (500x)**

La figura 5.20 muestra la metalografía de este tipo de ensayo con un aumento de 200X. Se capturó esta imagen ya que en el centro se aprecia un color blanquinoso con algunos granos que se han revelado. En la proximidad del borde de la probeta, los granos no se aprecian ya que estos han sido deformados por el proceso de tensión. No se presenta una imagen de los granos en otra posición ya que no se revelaron debido a la deformación producida. Se realizó un acercamiento de 500X ilustrada en la figura 5.21, en la cual se puede observar con mayor claridad los granos formados. Se revisó toda la superficie del metal y no se encontró ninguna fractura o fisura.

### **Tendencia de las gráficas obtenidas**

Se pudo observar que las probetas ensayadas con muesca revelaban mejor los granos en el centro de la misma, la fuerza de fractura era mayor en este tipo de probeta, generando que la deformación sea menor. Al formarse la estricción, los granos del material próximos al borde de la muestra se deformaban mucho más que los del centro. Ocurría lo contrario con las probetas sin muesca, no se logró una apreciación muy buena de los granos del material, ya que este tipo de probeta se deformaba mucho más que las mencionadas anteriormente por lo que iba a tener una mayor estricción generando que los bordes de grano del centro de la probeta se vean afectados.

La intensidad de las tensiones es muy importante y a veces incluso más, que la influencia del medio corrosivo. Si los efectos combinados de la fuerza de tensión y el medio corrosivo son suficientes, se desarrollaran fracturas que pueden seguir trayectorias tanto transgranulares, como intergranulares, perpendicularmente a la fuerza aplicada. Se han presentado casos de agrietamientos que tienen una tendencia en forma de rama. En general, cuando el medio corrosivo es el factor más importante, se genera una fractura intergranular y cuando la fuerza de tensión es

el componente más significativo, se genera una fractura transgranular.

Al observar por toda la superficie del material no se identificó ninguna fractura en los ensayos realizados.

#### 5.4. Susceptibilidad del acero inoxidable

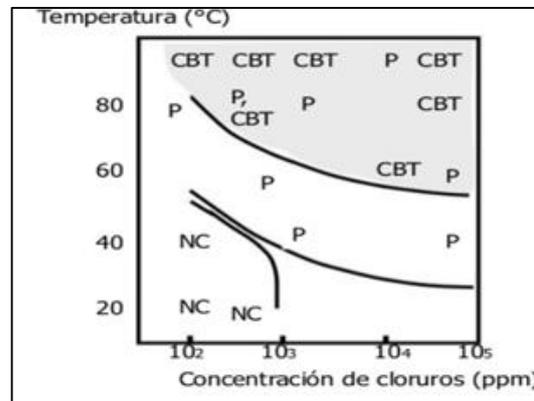
Una vez realizado el análisis de las gráficas de Esfuerzo-Deformación Unitaria, macrografías y metalografías de las probetas ensayadas es posible comprobar la susceptibilidad del acero inoxidable AISI 304 a fallar por Corrosión Bajo Tensión.

La teoría predice la existencia de este tipo de falla cuando se cumple una concentración similar a la usada en los ensayos, ya que según la relación entre el peso del soluto (NaCl) y el solvente (agua destilada) se obtiene:

$$\frac{30.24 \text{ g}}{864 \text{ ml}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} = 35000 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$35000 \frac{\text{mg}}{\text{l}} = 35000 \text{ ppm} = 35 * 10^3 \text{ ppm}$$

Al combinar la condición anterior con la temperatura utilizada en el ensayo de 90 °C, se aprecia la susceptibilidad del acero inoxidable austenítico, tal como se ilustra en la figura 5.22.



**Figura 5.22. Condiciones para que se produzca Corrosión Bajo Tensión (20)**

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos muestran una posible presencia de este tipo de corrosión debido a que ha existido una disminución de las propiedades mecánicas del material, sin embargo al hacer un análisis más exhaustivo, en especial revisando la microestructura del material demuestra que estas variaciones no modificaron la morfología del acero y no presentó una falla intergranular o transgranular, características de este tipo de corrosión. Bajo las condiciones propuestas por los ensayos realizados, la rotura de las probetas se debió mayormente a la tensión aplicada a las mismas, esto quiere decir, que fue una fractura mecánica. Cabe mencionar que no se resta importancia a la presencia de temperatura y medio corrosivo en la aceleración de

la falla en este tipo de acero, debido a que existe una variación del tiempo a la fractura, el cual es un factor importante en el proceso de diseño, en especial en las aplicaciones de tanques que trabajan en estos ambientes y son construidos en este material.

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. El experimento permitió simular las condiciones de medio corrosivo y temperatura presentes en tanques de acero inoxidable AISI 304 encontradas en la industria cervecera.
2. Al recrear las condiciones de trabajo de los tanques y tuberías de acero inoxidable en el ensayo, hubo una disminución en el tiempo necesario para que falle el material lo cual provocaría que éstos tengan una reducción en su vida de operación.
3. El Cloruro de sodio a 90°C provocó un aumento en la velocidad de oxidación generando la disminución de las propiedades mecánicas en las probetas con muesca del 21.59% para el esfuerzo de fluencia y 17.23% para el esfuerzo último a la tracción, a diferencia del 6.23% y 9.41% en las probetas sin muesca respectivamente.

4. El medio corrosivo a temperatura ambiente presentó una reducción del 5.11% para el esfuerzo de fluencia y del 4.13% para el esfuerzo último a la tracción con respecto al ensayo base de las probetas con muesca, al contrario del 4.41% y 3.32% para el  $S_Y$  y  $S_{ut}$  respectivamente en el ensayo de las probetas sin muesca, demostrando que la temperatura tiene mayor influencia que el medio en la velocidad de corrosión.
5. La muesca se comportó como un concentrador de esfuerzos reduciendo 10.34% la elongación promedio de probetas sin entalladuras con respecto al ensayo de control.
6. Se visualizó en las macrografías que las probetas sin muesca se fracturaban de forma dúctil presentando copa y cono, a diferencia de las muestras con muesca que se fracturaban de forma frágil, mostrando una menor reducción del área.
7. En las metalografías de las probetas con muesca se visualizaron granos en el centro de la zona de fractura, a diferencia de la periferia de la muestra que se observó granos totalmente deformados.
8. No se observó en la morfología del material ensayado algún tipo de fractura, lo cual no permite aseverar la presencia de corrosión bajo esfuerzos.

9. La velocidad lineal utilizada en el banco experimental para realizar ensayos sometidos a deformación lenta en aceros expuestos a Corrosión Bajo Esfuerzos se adapta a la establecida por la norma ASTM G129.
10. El factor de seguridad del soporte estructural fue de 4.6, lo cual asegura la integridad de la máquina y la confiabilidad de los resultados ya que admite un pandeo máximo de 0.34 mm de las columnas verticales.
11. El sistema de adquisición de datos permitió censar cada 5 segundos valores de fuerza y deformación presentadas por la probeta permitiendo realizar un seguimiento en tiempo real del comportamiento de estas variables en el transcurso del ensayo.

### **Recomendaciones**

1. Se puede profundizar el estudio de la fractura producida por Corrosión Bajo Esfuerzos como se detalla a continuación:
  - a. Utilizando una concentración saturada de NaCl, con el fin de obtener un medio más agresivo.
  - b. Calentando el material hasta su temperatura de sensibilización para luego someterlo al ensayo de SCC.
  - c. Realizando una observación de la morfología de la muestra en el microscopio electrónico de barrido (SEM)

- d. Usando valores menores del rango de velocidad propuestos por la norma ASTM G129.
2. Para evitar este tipo de corrosión se deberá eliminar los esfuerzos residuales que se generen en la fabricación de los equipos, ya que el medio corrosivo y la temperatura son factores que van a estar siempre presentes debido al proceso de elaboración.
  3. Para conseguir valores más reales se podrá emplear una tarjeta de adquisición de datos con una mejor resolución a la usada en los ensayos.
  4. Con el fin de obtener una medida directa de la deformación de la probeta será necesario utilizar un extensómetro de buena precisión debido a vibraciones externas que afectaron en la toma de datos del sensor ultrasónico.
  5. Otro acero muy utilizado en la industria es el ASTM A36, el cual se puede experimentar con Soda Cáustica como medio corrosivo a una temperatura mayor a 50°C para obtener su comportamiento frente a este tipo de corrosión y podría ser empleado en el equipo experimental para simular SCC.
  6. Debido a la duración de los ensayos y para la facilidad del operador, debería implementarse un sistema de control automático de apagado del equipo al finalizar el ensayo.

7. Será necesario hacer una buena medición de la longitud calibrada para obtener una buena referencia de la elongación sufrida de la probeta cuando finalice el ensayo
8. Se deberá tener cuidado de no dejar trabajando el equipo una vez fracturada la probeta ya que el tornillo de potencia llegará a su final de carrera ocasionando un sobreesfuerzo del motor.
9. Cuando se realicen las prácticas se deberá usar las dimensiones de la probeta para la cual fue diseñada la máquina con el fin de no sobre esforzar el soporte estructural y mantenerse en el rango de operación de la celda de carga.
10. Al realizar el montaje de la probeta en los ejes de sujeción, no se deberá enroscar totalmente la muestra ya que dificulta la remoción de la misma por la tensión aplicada durante el ensayo.

# APÉNDICES

## APÉNDICE 1

### CARACTERÍSTICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI

#### 304

IVAN BOHMAN C.A. maneja las siguientes calidades de acero inoxidable:

#### COMPOSICIÓN QUÍMICA

| AISI  | % C    | % Si   | % Mn   | % P Max. | % S     | % Cr      | % Ni      | % Mo    |
|-------|--------|--------|--------|----------|---------|-----------|-----------|---------|
| 304   | ≤ 0.08 | ≤ 1.00 | ≤ 2.00 | ≤ 0.045  | ≤ 0.015 | 18.0-20.0 | 8.0-10.5  | --      |
| 316 L | ≤ 0.03 | ≤ 1.00 | ≤ 2.00 | ≤ 0.045  | ≤ 0.015 | 16.0-18.0 | 10.0-14.0 | 2.0-3.0 |
| 430   | ≤ 0.08 | ≤ 1.00 | ≤ 1.00 | ≤ 0.040  | ≤ 0.015 | 16.0-18.0 | --        | --      |

#### EQUIVALENCIAS Y PROPIEDADES

| AISI  | Resistencia a la tracción (Kg/mm <sup>2</sup> ) | Resistencia a la cedencia mín. (Kg/mm <sup>2</sup> ) | Elongación % | Dureza HB (max) | W. Nr  | AF NOR        | European Designation | SS   |
|-------|---|--|--------------|-----------------|--------|---------------|----------------------|------|
| 304   | 54-75   | 23   | 40-50        | 190             | 1.4301 | Z7C N18-09    | X5CrNi18-10          | 2332 |
| 316 L | 53-68   | 24   | 40-50        | 200             | 1.4404 | Z3CND17-11-02 | X2CrNiMo17-12-2      | 2343 |
| 430   | 45-60   | 26   | 20           | 180             | 1.4016 | Z8C17         | X6Cr 17              | 2320 |

## APÉNDICE 2

### PROPORCIONES DE LOS DIENTES SEGÚN AGMA

| Símbolo                           | Ángulo de avance $\lambda$ |            |            |            |
|-----------------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|
|                                   | hasta 30°                  | 30°≤35°    | 35°≤40°    | 40°≤45°    |
| Adéndum $a$                       | 0,3183 $p$                 | 0,2865 $p$ | 0,2546 $p$ | 0,228 $p$  |
| Dedéndum $d$                      | 0,3638 $p$                 | 0,3314 $p$ | 0,2947 $p$ | 0,2578 $p$ |
| Altura del diente $h = a + d$     | 0,6868 $p$                 | 0,6179 $p$ | 0,5493 $p$ | 0,4806 $p$ |
| Ángulo de presión normal $\Phi_n$ | 20°                        | 25°        | 25°        | 30°        |

## APÉNDICE 3

# FACTORES DE SERVICIO PARA IMPULSORES DE CADENA

**Fuente:** Diseño de elementos de máquina, Mott

| Tipo de carga  | Tipo de impulsor    |                           |  |
|--|---------------------|---------------------------|--|
|  | Impulsor hidráulico | Motor eléctrico o turbina | Motor de combustión integral con impulsor mecánico |
| Ligera (agitadores, ventiladores, transportadores que se someten a la acción uniforme de cargas ligeras)         | 1.0                 | 1.0                       | 1.2  |
| Choque moderado (herramientas mecánicas, grúas, transportadores pesados, mezcladoras y molidoras de alimentos)   | 1.2                 | 1.3                       | 1.4  |
| Choque pesado (prensas de punzón, molinos de martillo, transportadores recíprocos, impulsor de molino giratorio) | 1.4                 | 1.5                       | 1.7  |

# APÉNDICE 4

## TABLAS DE SELECCIÓN DE POLEA DEL CATALOGO MARTINS

Tabla 4.1

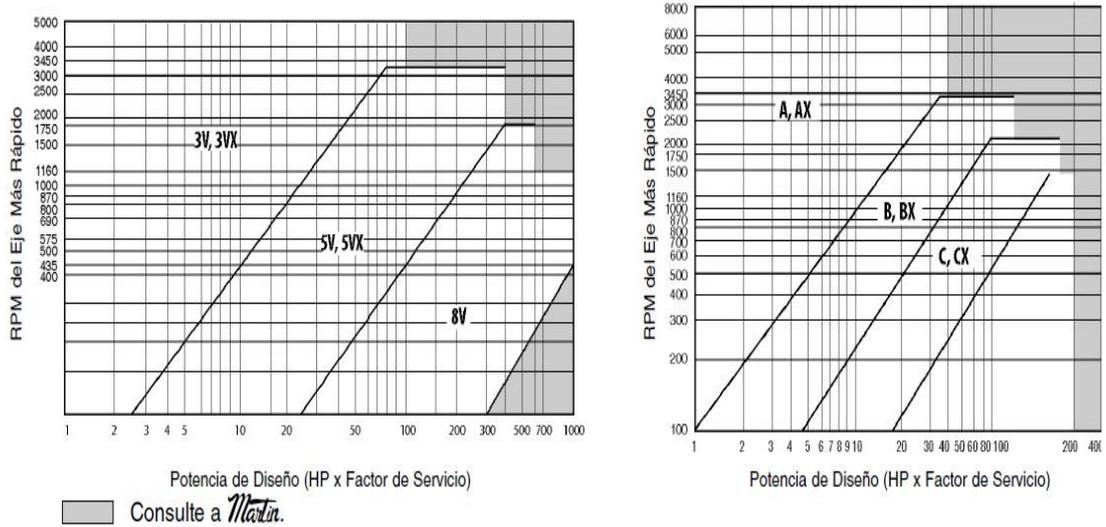
### Selección de factor de servicio

| TABLA 1 — FACTORES DE SERVICIO   |  |  |  |                 |   |                       |                 |                   |
|--|--|--|--|-----------------|---|-----------------------|-----------------|-------------------|
| <b>EL FACTOR DE SERVICIO CORRECTO ES DETERMINADO POR:</b><br>1. El grado y frecuencia de las cargas pico.<br>2. El número de horas de operación al año, divididas en un promedio de horas al día de servicio continuo.<br>3. La categoría adecuada de servicio, (intermitente, normal o continuo). Seleccione aquella que más se aproxime a las condiciones de su aplicación.  |  | <b>SERVICIO INTERMITENTE — DE 1.0 A 1.5</b><br>a. Trabajo Ligero — No más de 6 horas al día.<br>b. No debe exceder la carga promedio.<br><b>SERVICIO NORMAL — DE 1.1 A 1.6</b><br>a. Servicio diario de 6 a 16 horas al día.<br>b. Donde las cargas de arranque o pico no excedan el 200% de la carga total.<br><b>SERVICIO CONTINUO — DE 1.2 A 1.8</b><br>a. Donde la carga de arranque o pico sea mayor en un 200% a la carga total o donde las cargas de arranque o pico y las sobrecargas ocurran frecuentemente.<br>b. Servicio continuo 16 a 24 horas. |  |                 |   |                       |                 |                   |
| FACTORES DE SERVICIOS TÍPICOS  |  |  |  |                 |   |                       |                 |                   |
| TIPOS DE MÁQUINAS DE TRANSMISIÓN   |  |  | TIPOS DE UNIDADES MOTRICES   |                 |   |                       |                 |                   |
| Los tipos de máquinas impulsadas aquí listadas son solo una muestra representativa. Seleccione el equipo que se aproxime más a su aplicación.<br><b>SI SE UTILIZAN RUEDAS LOCAS, AÑADA LO SIGUIENTE AL FACTOR DE SERVICIO:</b><br>Rueda Loca en el lado suelto (adentro) Ninguno<br>Rueda Loca en el lado suelto (afuera) 0.1<br>Rueda Loca en el lado apretado (adentro) 0.1<br>Rueda Loca en el lado apretado (afuera) 0.2 |  |  | <b>MOTORES ELÉCTRICOS</b><br>AC Torque Normal<br>Jaula de Aro<br>y Síncrono<br>AC Fase Dividida<br>DC Devanado en Derivación<br><b>Motores de Combustión Interna</b> |                 | <b>MOTORES ELÉCTRICOS</b><br>AC Alto Torque<br>AC HI-Fase Dividida<br>AC Repulsión-Inducción<br>AC Monofásico<br>Devanado en Serie<br>AC Anillo de Deslizamiento<br>DC Devanado Compuesto |                       |                 |                   |
|  |  |  | SERVICIO INTERMITENTE  | SERVICIO NORMAL | SERVICIO CONTINUO   | SERVICIO INTERMITENTE | SERVICIO NORMAL | SERVICIO CONTINUO |
| Agitadores para Líquidos<br>Sopladores y Aspiradores<br>Bombas centrifugas y Compresoras<br>Ventiladores hasta 10 HP<br>Transportadores de Trabajo Ligero  |  |  | 1.0  | 1.1             | 1.2   | 1.1                   | 1.2             | 1.3               |
| Transportadores de Banda para arena, grano, etc.<br>Amasadores<br>Ventiladores de más de 10 HP<br>Generadores<br>Ejes de Línea<br>Máquinas de Lavandería<br>Máquinas-Herramientas<br>Taladros, Prensas, Cortadores<br>Máquinas de Imprenta<br>Bombas Rotatorias de Desplazamiento Positivo<br>Cribas Gritatorias y Vibratorias   |  |  | 1.1  | 1.2             | 1.3   | 1.2                   | 1.3             | 1.4               |
| Máquinas para Ladritos<br>Elevadores de Cangilones<br>Excitadores<br>Compresores de Pistones<br>Transportadores (Plastras, Helicoidales, Tabillas)<br>Molinos de Martillos<br>Hidropulper<br>Bombas de Pistones<br>Sopladores de Desplazamiento Positivo<br>Pulverizadores<br>Máquinas para Madera y Sierras<br>Maquinaria Textil  |  |  | 1.2  | 1.3             | 1.4   | 1.4                   | 1.5             | 1.6               |
| Quebradoras (Discos-Mordaza-Rodillos)<br>Molinos (Bolas, Rodillos)<br>Grúas<br>Calandras de hule — Extrusoras — Molinos  |  |  | 1.3  | 1.4             | 1.5   | 1.5                   | 1.6             | 1.6               |
| Equipo con Ahogador  |  |  | 2.0  | 2.0             | 2.0   | 2.0                   | 2.0             | 2.0               |

PARA UNA BUENA SELECCIÓN DE LA TRANSMISIÓN, UTILICE EL FACTOR DE SERVICIO CONTINUO.

**Tabla 4.2**

**Grafica para selección de perfil de bandas**



**TABLA 4.3**

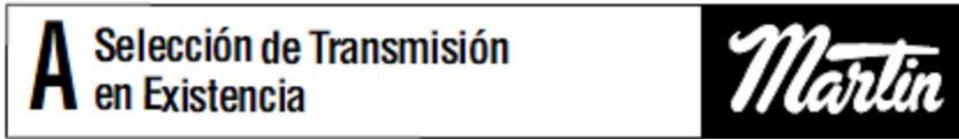
**DIAMETRO MINIMO RECOMENDADO PARA MOTOR ELECTRICO**

| POTENCIA DEL MOTOR HP | RPM DEL MOTOR |       |       |       |       |       |
|-----------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | 575           | 695   | 870   | 1160  | 1750  | 3450  |
| .50                   | 2.50          | 2.50  | 2.50  | —     | —     | —     |
| .75                   | 3.00          | 2.50  | 2.50  | 2.50  | —     | —     |
| 1.00                  | 3.00          | 3.00  | 2.50  | 2.50  | 2.25  | —     |
| 1.50                  | 3.00          | 3.00  | 3.00  | 2.50  | 2.50  | 2.25  |
| 2.00                  | 3.75          | 3.00  | 3.00  | 2.50  | 2.50  | 2.50  |
| 3.00                  | 4.50          | 3.75  | 3.00  | 3.00  | 2.50  | 2.50  |
| 5.00                  | 4.50          | 4.50  | 3.75  | 3.00  | 3.00  | 2.50  |
| 7.50                  | 4.25          | 4.50  | 4.50  | 3.75  | 3.00  | 3.00  |
| 10.00                 | 6.00          | 5.25  | 4.50  | 4.50  | 3.75  | 3.00  |
| 15.00                 | 6.75          | 6.00  | 5.25  | 4.50  | 4.50  | 3.75  |
| 20.00                 | 8.25          | 6.75  | 6.00  | 5.25  | 4.50  | 4.50  |
| 25.00                 | 9.00          | 8.25  | 6.75  | 6.00  | 4.50  | 4.50* |
| * 30.00               | 10.00         | 9.00  | 6.75  | 6.75  | 5.25  | —     |
| 40.00                 | 10.00         | 10.00 | 8.25  | 6.75  | 6.00  | —     |
| 50.00                 | 11.00         | 10.00 | 9.00  | 8.25  | 6.75  | —     |
| 60.00                 | 12.00         | 11.00 | 10.00 | 9.00  | 7.50  | —     |
| 75.00                 | 14.00         | 13.00 | 10.00 | 10.00 | 9.00  | —     |
| 100.00                | 18.00         | 15.00 | 13.00 | 13.00 | 10.00 | —     |
| 125.00                | 20.00         | 18.00 | 15.00 | 13.00 | 11.00 | —     |
| 150.00                | 22.00         | 20.00 | 18.00 | 13.00 | —     | —     |
| 200.00                | 22.00         | 22.00 | 22.00 | —     | —     | —     |
| 250.00                | 22.00         | 22.00 | —     | —     | —     | —     |
| 300.00                | 27.00         | 27.00 | —     | —     | —     | —     |

Motor seleccionado

TABLA 4.4

SELECCIÓN DE BANDAS DE TRANSMISIÓN EXISTENTES



| Velocidad de<br>Velocidad                | Combinación de Poleas |                 | Velocidades Impulsoras y IP por Banda |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      |                      | Distancia Nominal entre Centros y Factor de Corrección por Longitud y Arco |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|--|-----------------------|-----------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
|  | Módulo<br>D.P.        | Impuls.<br>D.P. | 20:1 RPM<br>Módulo                    |                      |                      | 1:10 RPM<br>Módulo |                      |                      | 1:50 RPM<br>Módulo |                      |                      | Designación de Largo de Banda AXE  |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|  |                       |                 | Impuls.<br>RPM                        | IP por<br>Banda<br>A | IP por<br>Banda<br>B | Impuls.<br>RPM     | IP por<br>Banda<br>A | IP por<br>Banda<br>B | Impuls.<br>RPM     | IP por<br>Banda<br>A | IP por<br>Banda<br>B | 20   | 21   | 25   | 28   | 42   | 45   | 51   |      |  |  |
| 2.44                                     | 6.4                   | 15.0            | 1436                                  | 11.57                | 13.16                | 718                | 7.92                 | 8.41                 | 475                | 5.76                 | 6.04                 | —  | —    | —    | —    | 9.4  | 11.4 | 13.5 | 16.0 |  |  |
| 2.50                                     | 3.6                   | 9.0             | 1400                                  | 5.01                 | 5.92                 | 700                | 3.24                 | 3.63                 | 464                | 2.37                 | 2.63                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.50                                     | 4.8                   | 12.0            | 1400                                  | 8.26                 | 9.38                 | 700                | 5.33                 | 5.75                 | 464                | 3.87                 | 4.13                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 12.4 |  |  |
| 2.50                                     | 6.0                   | 15.0            | 1400                                  | 10.86                | 12.31                | 700                | 7.29                 | 7.76                 | 464                | 5.30                 | 5.57                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.52                                     | 4.2                   | 10.6            | 1367                                  | 6.71                 | 7.71                 | 693                | 4.30                 | 4.71                 | 460                | 3.13                 | 3.38                 | —  | —    | —    | —    | —    | 9.5  | 11.6 | 14.2 |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.0  | 0.77 | 0.81 | 0.84 | 0.86 |      |      |  |  |
| 2.52                                     | 6.2                   | 15.6            | 1391                                  | 11.23                | 12.75                | 696                | 7.61                 | 8.09                 | 461                | 5.53                 | 5.81                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.53                                     | 3.0                   | 7.6             | 1362                                  | 3.18                 | 4.03                 | 691                | 2.14                 | 2.53                 | 458                | 1.60                 | 1.85                 | —  | —    | 7.5  | 9.5  | 11.1 | 13.1 | 15.2 | 17.7 |  |  |
| 2.54                                     | 5.2                   | 13.2            | 1370                                  | 9.20                 | 10.42                | 689                | 6.00                 | 6.43                 | 457                | 4.35                 | 4.61                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.56                                     | 3.2                   | 8.2             | 1366                                  | 3.61                 | 4.67                 | 683                | 2.51                 | 2.90                 | 453                | 1.86                 | 2.11                 | —  | —    | —    | 8.8  | 10.4 | 12.4 | 14.5 | 17.0 |  |  |
| 2.57                                     | 7.0                   | 18.0            | 1361                                  | 12.47                | 14.32                | 681                | 8.83                 | 9.35                 | 451                | 6.45                 | 6.74                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.72   | 0.77 | 0.79 | 0.83 | 0.86 | 0.86 |      |      |  |  |
| 2.59                                     | 5.8                   | 15.0            | 1363                                  | 10.46                | 11.66                | 677                | 6.96                 | 7.44                 | 449                | 5.06                 | 5.33                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.60                                     | 6.0                   | 15.6            | 1346                                  | 10.87                | 12.32                | 673                | 7.30                 | 7.76                 | 448                | 5.30                 | 5.57                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.61                                     | 4.6                   | 12.0            | 1342                                  | 7.76                 | 8.64                 | 671                | 4.99                 | 5.41                 | 445                | 3.62                 | 3.88                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 9.9  |  |  |
| 2.64                                     | 5.0                   | 13.2            | 1326                                  | 8.74                 | 9.91                 | 663                | 5.67                 | 6.10                 | 439                | 4.11                 | 4.37                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 11.1 |  |  |
| 2.65                                     | 3.4                   | 9.0             | 1322                                  | 4.42                 | 5.31                 | 661                | 2.86                 | 3.27                 | 438                | 2.12                 | 2.37                 | —  | —    | —    | 7.9  | 9.5  | 11.6 | 13.6 | 16.2 |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.73 | 0.77 | 0.81 | 0.84 | 0.86 |      |      |  |  |
| 2.65                                     | 4.0                   | 10.6            | 1321                                  | 6.17                 | 7.13                 | 660                | 3.95                 | 4.35                 | 438                | 2.86                 | 3.13                 | —  | —    | —    | —    | 9.6  | 11.7 | 14.3 | —    |  |  |
| 2.65                                     | 5.6                   | 15.0            | 1307                                  | 10.06                | 11.40                | 653                | 6.66                 | 7.11                 | 433                | 4.83                 | 5.10                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.69                                     | 5.8                   | 15.6            | 1301                                  | 10.46                | 11.87                | 651                | 6.96                 | 7.44                 | 431                | 5.06                 | 5.33                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.75                                     | 3.0                   | 8.2             | 1280                                  | 3.19                 | 4.03                 | 640                | 2.15                 | 2.53                 | 424                | 1.61                 | 1.85                 | —  | —    | —    | 9.0  | 10.5 | 12.6 | 14.6 | 17.2 |  |  |
| 2.75                                     | 4.4                   | 12.0            | 1283                                  | 7.25                 | 8.26                 | 642                | 4.85                 | 5.06                 | 425                | 3.36                 | 3.63                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 10.1 |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.75 | 0.78 | 0.82 | 0.85 | 0.86 |      |      |  |  |
| 2.73                                     | 6.6                   | 18.0            | 1283                                  | 11.90                | 13.57                | 642                | 8.23                 | 8.73                 | 425                | 5.99                 | 6.28                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.75                                     | 4.8                   | 13.2            | 1273                                  | 8.26                 | 9.38                 | 636                | 5.33                 | 5.75                 | 422                | 3.87                 | 4.13                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 11.2 |  |  |
| 2.78                                     | 5.4                   | 15.0            | 1260                                  | 9.65                 | 10.92                | 630                | 6.33                 | 6.77                 | 418                | 4.59                 | 4.86                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.79                                     | 3.8                   | 10.6            | 1255                                  | 5.60                 | 6.54                 | 627                | 3.60                 | 4.00                 | 416                | 2.63                 | 2.88                 | —  | —    | —    | —    | 9.7  | 11.9 | 14.4 | —    |  |  |
| 2.79                                     | 5.6                   | 15.6            | 1256                                  | 10.06                | 11.40                | 628                | 6.66                 | 7.11                 | 416                | 4.83                 | 5.10                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.78 | 0.82 | 0.86 |      |      |  |  |
| 2.80                                     | 7.0                   | 19.6            | 1250                                  | 12.46                | 14.32                | 625                | 8.84                 | 9.36                 | 414                | 6.45                 | 6.74                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.81                                     | 3.2                   | 9.0             | 1244                                  | 3.81                 | 4.68                 | 622                | 2.52                 | 2.90                 | 412                | 1.87                 | 2.11                 | —  | —    | —    | 8.0  | 9.6  | 11.7 | 13.8 | 16.3 |  |  |
| 2.81                                     | 6.4                   | 18.0            | 1244                                  | 11.58                | 13.17                | 622                | 7.92                 | 8.41                 | 412                | 5.76                 | 6.04                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.86                                     | 4.2                   | 12.0            | 1225                                  | 6.72                 | 7.72                 | 612                | 4.30                 | 4.71                 | 406                | 3.13                 | 3.39                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 10.2 |  |  |
| 2.87                                     | 4.6                   | 13.2            | 1220                                  | 7.77                 | 8.64                 | 610                | 4.99                 | 5.41                 | 404                | 3.62                 | 3.88                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 11.4 |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.73 | 0.77 | 0.81 | 0.84 | 0.86 |      |      |  |  |
| 2.88                                     | 5.2                   | 15.0            | 1213                                  | 9.21                 | 10.42                | 607                | 6.00                 | 6.44                 | 402                | 4.35                 | 4.62                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.89                                     | 5.4                   | 15.6            | 1212                                  | 9.66                 | 10.92                | 606                | 6.33                 | 6.77                 | 402                | 4.59                 | 4.86                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.90                                     | 6.2                   | 18.0            | 1206                                  | 11.24                | 12.75                | 603                | 7.61                 | 8.09                 | 400                | 5.53                 | 5.81                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 2.94                                     | 3.6                   | 10.6            | 1189                                  | 5.02                 | 5.93                 | 594                | 3.24                 | 3.64                 | 394                | 2.36                 | 2.63                 | —  | —    | —    | —    | 9.9  | 12.0 | 14.6 | —    |  |  |
| 2.97                                     | 6.6                   | 19.6            | 1179                                  | 11.90                | 13.57                | 589                | 8.23                 | 8.73                 | 391                | 5.99                 | 6.28                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.77 | 0.82 | 0.86 |      |      |  |  |
| 3.00                                     | 3.0                   | 9.0             | 1167                                  | 3.19                 | 4.03                 | 583                | 2.15                 | 2.53                 | 387                | 1.61                 | 1.86                 | —  | —    | —    | —    | 8.2  | 9.8  | 11.8 | 13.9 |  |  |
| 3.00                                     | 4.0                   | 12.0            | 1167                                  | 6.17                 | 7.14                 | 583                | 3.95                 | 4.36                 | 387                | 2.86                 | 3.14                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 10.3 |  |  |
| 3.00                                     | 4.4                   | 13.2            | 1167                                  | 7.25                 | 8.29                 | 583                | 4.65                 | 5.06                 | 387                | 3.36                 | 3.64                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 11.5 |  |  |
| 3.00                                     | 5.0                   | 15.0            | 1167                                  | 8.75                 | 9.91                 | 583                | 5.67                 | 6.10                 | 387                | 4.11                 | 4.37                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 3.00                                     | 5.2                   | 15.6            | 1167                                  | 9.21                 | 10.42                | 583                | 6.00                 | 6.44                 | 387                | 4.35                 | 4.62                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.73 | 0.77 | 0.81 | 0.84 | 0.86 |      |      |  |  |
| 3.00                                     | 6.0                   | 18.0            | 1167                                  | 10.87                | 12.32                | 583                | 7.30                 | 7.77                 | 387                | 5.30                 | 5.57                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 3.06                                     | 6.4                   | 19.6            | 1143                                  | 11.58                | 13.17                | 571                | 7.93                 | 8.41                 | 379                | 5.76                 | 6.04                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 3.10                                     | 5.8                   | 18.0            | 1128                                  | 10.49                | 11.87                | 564                | 6.98                 | 7.44                 | 374                | 5.07                 | 5.34                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 3.12                                     | 3.4                   | 10.6            | 1123                                  | 4.43                 | 5.31                 | 561                | 2.86                 | 3.27                 | 372                | 2.12                 | 2.37                 | —  | —    | —    | —    | 10.0 | 12.1 | 14.7 | —    |  |  |
| 3.12                                     | 5.0                   | 15.6            | 1122                                  | 8.75                 | 9.91                 | 561                | 5.67                 | 6.10                 | 372                | 4.11                 | 4.37                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.77 | 0.81 | 0.86 |      |      |  |  |
| 3.13                                     | 4.8                   | 15.0            | 1120                                  | 8.27                 | 9.39                 | 560                | 5.34                 | 5.76                 | 371                | 3.87                 | 4.13                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 3.14                                     | 4.2                   | 13.2            | 1114                                  | 6.72                 | 7.72                 | 557                | 4.31                 | 4.71                 | 369                | 3.13                 | 3.39                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 11.6 |  |  |
| 3.16                                     | 3.8                   | 12.0            | 1106                                  | 5.61                 | 6.54                 | 554                | 3.60                 | 4.00                 | 367                | 2.63                 | 2.88                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 10.4 |  |  |
| 3.16                                     | 6.2                   | 19.6            | 1107                                  | 11.24                | 12.76                | 554                | 7.62                 | 8.09                 | 367                | 5.53                 | 5.81                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| 3.21                                     | 5.6                   | 18.0            | 1089                                  | 10.06                | 11.41                | 544                | 6.66                 | 7.11                 | 361                | 4.83                 | 5.10                 | —  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |  |
| FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO |                       |                 |                                       |                      |                      |                    |                      |                      |                    |                      | 0.0                  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.78 | 0.83 |      |      |  |  |

A = BANDO ESTÁNDAR  
 AX = BANDA-Y DENTRO AVANZADA  
 \*SI LA VELOCIDAD DE CORONA EXCEDE A LOS 6500 PIES POR MINUTO, CONSULTE A [www.martin.com](#)

## APÉNDICE 5

### FACTORES DE REDUCCION DE LA RESISTENCIA A FATIGA

**TABLA 5.1**  
**MODIFICADORES DE CARGA**

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| Flexión     | $C_{carga} = 1$   |
| Carga axial | $C_{carga} = 0.7$ |

**TABLA 5.2**  
**MODIFICADORES DE TAMAÑO**

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| Para $d \leq 8\text{mm}$                 | $C_{tamaño} = 1$              |
| Para $8\text{mm} < d \leq 250\text{ mm}$ | $C_{tamaño} = 1.189d^{0.097}$ |
| Para $d > 250\text{mm}$                  | $C_{tamaño} = 0.6$            |

**TABLA 5.3**  
**MODIFICADORES DE TEMPERATURA**

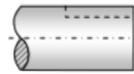
|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| Para $T \leq 450^{\circ}\text{C}$                       | $C_{temp} = 1$                  |
| Para $450^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C}$ | $C_{temp} = 1 - 0.0058 (T-450)$ |

**TABLA 5.4**  
**MODIFICADORES DE CONFIABILIDAD**

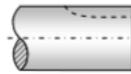
| % de confiabilidad | $C_{conf}$ |
|--------------------|------------|
| 50                 | 1.000      |
| 90                 | 0.897      |
| 95                 | 0.868      |
| 99                 | 0.814      |
| 99.9               | 0.753      |
| 99.99              | 0.702      |
| 99.999             | 0.659      |
| 99.9999            | 0.620      |

**TABLA 5.5**  
**FACTOR DE CONCENTRADOR DE ESFUERZO TEÓRICO PARA**  
**CHAVETERO**

| Clase de chavetero | Recocido, dureza menor que 200 HB |         | Endurecido, dureza mayor que 200 HB |         |
|--------------------|-----------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
|                    | Flexión                           | Torsión | Flexión                             | Torsión |
| Perfil             | 1.6                               | 1.3     | 2.0                                 | 1.6     |
| Patin              | 1.3                               | 1.3     | 1.6                                 | 1.6     |

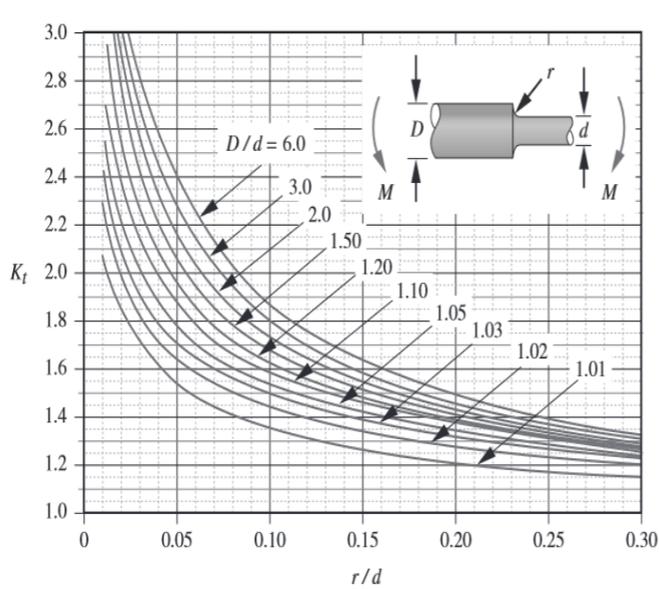


Chavetero de perfil



Chavetero de patin

**TABLA 5.6**  
**FACTOR DE CONCENTRADOR DE ESFUERZO PARA CAMBIO DE**  
**SECCIÓN**



$$K_t \cong A \left( \frac{r}{d} \right)^b$$

donde:

| $D/d$ | $A$      | $b$       |
|-------|----------|-----------|
| 6.00  | 0.878 68 | -0.332 43 |
| 3.00  | 0.893 34 | -0.308 60 |
| 2.00  | 0.908 79 | -0.285 98 |
| 1.50  | 0.938 36 | -0.257 59 |
| 1.20  | 0.970 98 | -0.217 96 |
| 1.10  | 0.951 20 | -0.237 57 |
| 1.07  | 0.975 27 | -0.209 58 |
| 1.05  | 0.981 37 | -0.196 53 |
| 1.03  | 0.980 61 | -0.183 81 |
| 1.02  | 0.960 48 | -0.177 11 |
| 1.01  | 0.919 38 | -0.170 32 |

## APÉNDICE 6

### TABLAS PARA CÁLCULO DE LA VIDA DE RODAMIENTOS

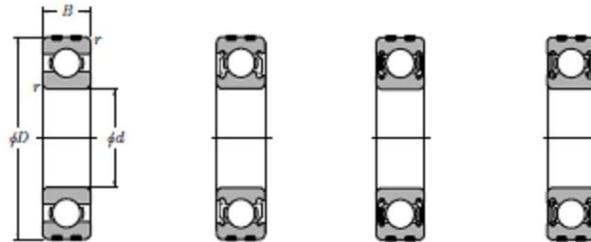
**TABLA 6.1**  
**FACTORES DE CÁLCULO PARA RODAMIENTOS DE BOLAS**

| $\frac{f_0 * F_a}{C_{or}}$ | e    | $F_a/F_r \leq e$ |   | $F_a/F_r > e$ |      |
|----------------------------|------|------------------|---|---------------|------|
|                            |      | X                | Y | X             | Y    |
| 0.172                      | 0.19 | 1                | 0 | 0.56          | 2.30 |
| 0.345                      | 0.22 |                  |   |               | 1.99 |
| 0.689                      | 0.26 |                  |   |               | 1.71 |
| 1.03                       | 0.28 |                  |   |               | 1.55 |
| 1.38                       | 0.30 |                  |   |               | 1.45 |
| 2.07                       | 0.34 |                  |   |               | 1.31 |
| 3.45                       | 0.38 |                  |   |               | 1.15 |
| 5.17                       | 0.42 |                  |   |               | 1.04 |
| 6.89                       | 0.44 |                  |   |               | 1.00 |

**TABLA 6.2**

**CARACTERÍSTICAS DE RODAMIENTOS DE BOLAS**

**Rodamientos con Compensación de Expansión**



Tipo abierto      Tipo con tapas (ZZ)      Tipo con sello no contacto (LLB)      Tipo con sello de contacto (LLU)

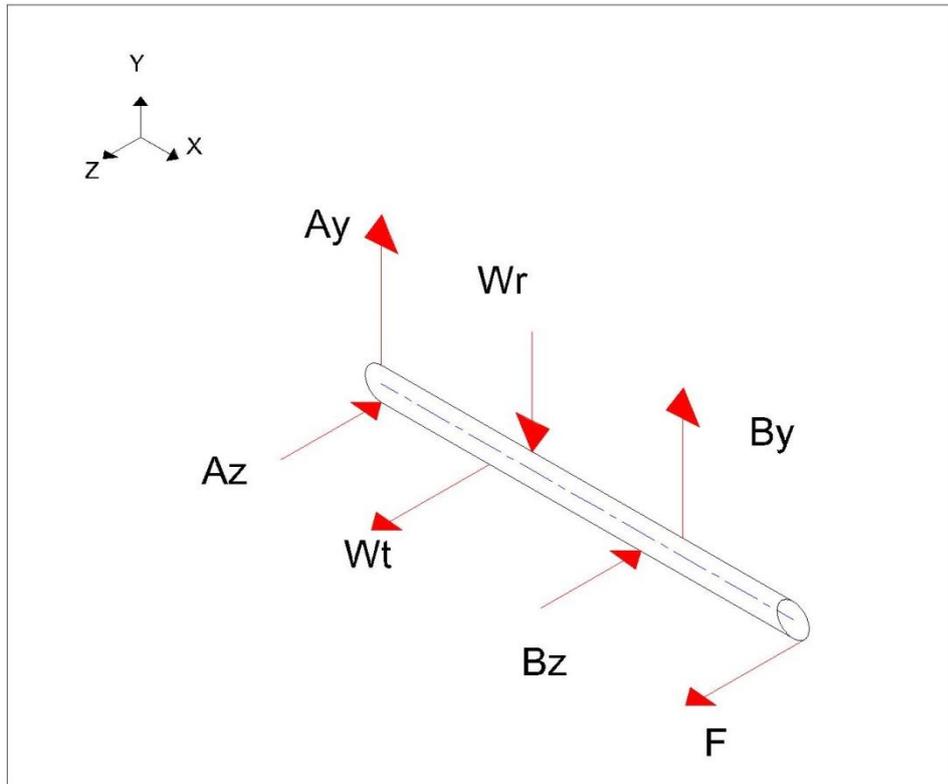
d 10 ~ 50mm

| Dimensiones principales | Capacidades básicas de carga |    |     |                | Carga permisible |          | Factor $f_0$ | Velocidades límites |          | Números de rodamientos |        |              |              |        |                         |                       |                       |     |
|-------------------------|------------------------------|----|-----|----------------|------------------|----------|--------------|---------------------|----------|------------------------|--------|--------------|--------------|--------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----|
|                         | d                            | D  | B   | $r_{ms}^{(2)}$ | $C_r$            | $C_{or}$ |              | $C_r$               | $C_{or}$ | grasa                  | aceite | tipo abierto | tipo abierto | LU,LLU | con <sup>1)</sup> tapas | con sello de contacto | con sello de contacto |     |
| 30                      | 55                           | 13 | 1   | 1              | 13.2             | 8.30     | 1 350        | 845                 | 8.30     | 845                    | 14.8   | 13 000       | 15 000       | 7 700  | EC-6006                 | ZZ                    | LLB                   | LLU |
|                         | 62                           | 16 | 1   | 1              | 19.5             | 11.3     | 1 980        | 1 150               | 9.85     | 1 000                  | 13.8   | 11 000       | 13 000       | 7 300  | EC-6206                 | ZZ                    | LLB                   | LLU |
|                         | 72                           | 19 | 1.1 | 1.1            | 26.7             | 15.0     | 2 720        | 1 530               | 15.0     | 1 530                  | 13.3   | 10 000       | 12 000       | 6 600  | EC-6306                 | ZZ                    | LLB                   | LLU |
| 20                      | 42                           | 12 | 0.6 | 0.6            | 9.40             | 5.05     | 955          | 515                 | 5.05     | 515                    | 13.9   | 18 000       | 21 000       | 11 000 | EC-6004                 | ZZ                    | LLB                   | LLU |
|                         | 47                           | 14 | 1   | 1              | 12.8             | 6.65     | 1 310        | 680                 | 5.05     | 515                    | 13.2   | 16 000       | 18 000       | 10 000 | EC-6204                 | ZZ                    | LLB                   | LLU |
|                         | 52                           | 15 | 1.1 | 1.1            | 15.9             | 7.90     | 1 620        | 805                 | 7.90     | 805                    | 12.4   | 14 000       | 17 000       | 10 000 | EC-6304                 | ZZ                    | LLB                   | LLU |

**CALCULO PARA VIDA INFINITA DE RODAMIENTOS**

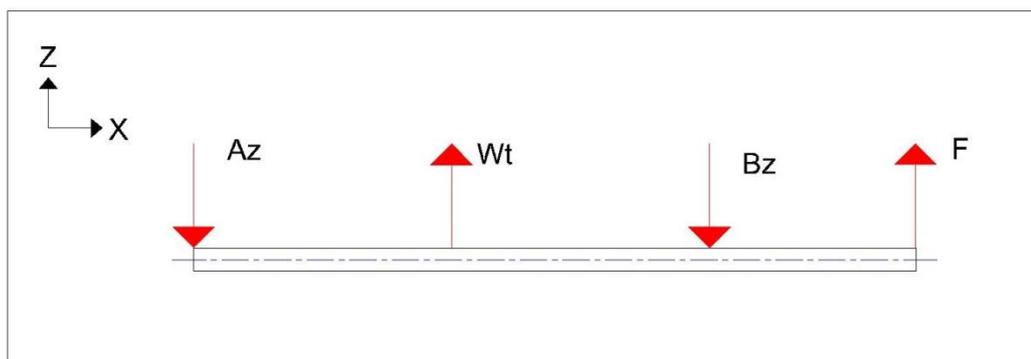
**Vida del rodamiento para el Sinfín**

Se procederá a calcular las reacciones que generan estos rodamientos, para lo cual se realizará un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el sinfín. El punto A constará de un rodamiento rígido de bolas 6306 y el punto B tendrá un rodamiento rígido de bolas 6204.



**Figura 6.1 Diagrama de cuerpo libre del eje del sinfín caja 1**

Se procederá a separar las fuerzas en el plano z-x, para encontrar los respectivos valores de estas incógnitas.



**Figura 6.2 Diagrama de cuerpo libre en ZX del eje del sinfín caja 1**

Se calculará la fuerza que se originará en la polea más lenta. Se tendrá una relación de velocidad de 3:1 en la transmisión por banda, por lo que se procederá a calcular la fuerza total de la banda de la siguiente manera:

$$\text{Relación} \rightarrow 3:1$$

$$T_1 = 3T_2$$

$$T_1 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$3T_2 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$2T_2 r = \text{Torque}$$

$$T_2 = \frac{\text{Torque}}{2r}$$

$$T_2 = 18.14 \text{ lb}_f = 80.56 \text{ N}$$

$$T_1 = 241.68 \text{ N}$$

$$F = T_2 + T_1$$

$$F = 322.24 \text{ N}$$

Se determinará las demás fuerzas realizando una sumatoria de momentos con respecto a un punto y además una sumatoria de todas las fuerzas en una misma dirección.

$$\sum M_a = 0$$

$$W_t(64) - B_z(120.95) - F(171.6) = 0$$

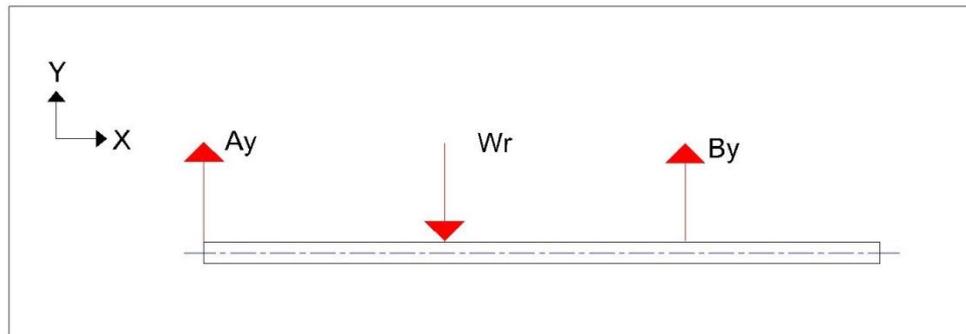
$$B_z = 1148.5 \text{ N}$$

$$\sum f_z = 0$$

$$-A_z + W_t - B_z + F = 0$$

$$A_z = 480.21 \text{ N}$$

Se calcularán las fuerzas que están inmersas en el plano y-x de la siguiente forma:



**Figura 6.3 Diagrama de cuerpo libre en XY del eje del sinfín caja 1**

$$EM_a = 0$$

$$-W_r(64) + B_y(120.95) = 0$$

$$B_y = 564.58 \text{ N}$$

$$E f_y = 0$$

$$A_y - W_r + B_y = 0$$

$$A_y = 502.39 \text{ N}$$

Se hallará la fuerza radial que se generará en el punto A y B de la siguiente manera:

$$A = \sqrt{502.39^2 + 480.2^2}$$

$$A = 694.98 \text{ N}$$

$$B = \sqrt{1148.5^2 + 564.58^2}$$

$$B = 1279.76 \text{ N}$$

La vida del rodamiento se la calculará a través de:

$$L_{10} = \frac{10^6}{60(n)} \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad \text{Ec. 2.74}$$

El sinfín generará una fuerza axial, la cual se la aplicará al rodamiento en el punto B, ya que un rodamiento va a soportar esta fuerza radial. Se escogerá el punto B para mover la fuerza axial debido a que tendrá una mayor fuerza radial y se recomendará realizar el caso más crítico. El valor de C se lo obtendrá a partir de la tabla 6.2. Se procederá a calcular las fuerzas en el punto A .El valor de P se lo hallará de la siguiente manera:

$$P = (X * F_r) + (Y * F_A) \quad \text{Ec. 2.78}$$

$$P = 0.694 \text{ KN}$$

Reemplazando en 2.74

$$L_{10} = 55230 \text{ h}$$

Para determinar el factor de seguridad del rodamiento se utilizará la siguiente ecuación:

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad \text{Ec. 2.80}$$

La capacidad de carga básica estática ( $C_0$ ) se la obtendrá de la tabla 6.2 y la carga estática equivalente ( $P_0$ ) se la obtendrá de la siguiente manera:

$$P_0 = (0.6 * F_r) + (0.5 * F_a) \quad \text{Ec. 2.79}$$

$$P_0 = 0.416 \text{ KN}$$

$$P_0 = F_r = 0.694 \text{ KN}$$

Se escogerá el mayor valor obtenido para reemplazarlo y determinar el factor de seguridad.

$$S_0 = \frac{15 \text{ KN}}{0.694 \text{ KN}}$$

$$S_0 = 21.6$$

El rodamiento trabajará correctamente con las fuerzas aplicadas, ya que para que un rodamiento falle debe salir un valor inferior a 1.

Se hallará la vida del rodamiento del punto B, en el cual ya se considerará la fuerza axial que se produce por el sinfín.

$$L_{10} = \frac{10^6}{60(n)} \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad \text{Ec. 274}$$

La carga dinámica equivalente se la obtendrá por:

$$P = (X * F_r) + (Y * F_a) \quad \text{Ec. 2.78}$$

Por medio de la tabla 6.2 del rodamiento se calculará los valores de la siguiente expresión:

$$\frac{f_0 * F_a}{C_0} = \frac{13.2 * 2.8 \text{ KN}}{6.65 \text{ KN}} = 5.55$$

De la tabla 6.1 del rodamiento se escogerá el factor “e” para determinar los factores desconocidos de la fórmula de carga dinámica equivalente.

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{2.8 \text{ KN}}{1.27 \text{ KN}} = 2.20$$

Como 2.20 es mayor al factor “e” que se encontró. Se escogerá los siguientes valores para reemplazarlos posteriormente. X=0.56, Y=1.04

$$P = (X * F_r) + (Y * F_A)$$

$$P = 3.62 \text{ KN}$$

Se reemplazarán todos los valores obtenidos en la fórmula de vida de rodamiento.

$$L_{10} = 11630 \text{ h}$$

Para determinar el factor de seguridad del rodamiento se utilizará la siguiente ecuación:

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad \text{Ec. 2.80}$$

La capacidad de carga básica estática ( $C_0$ ) se la obtendrá de la tabla 6.2 del rodamiento del apéndice y la carga estática equivalente ( $P_0$ ) se la obtendrá de la siguiente manera:

$$P_0 = (0.6 * F_r) + (0.5 * F_A) \quad \text{Ec. 2.79}$$

$$P_0 = 2.16 \text{ KN}$$

$$P_0 = F_r = 1.27 \text{ KN}$$

Se escogerá el mayor valor obtenido para reemplazarlo y determinar el factor de seguridad.

$$S_0 = \frac{6.65 \text{ KN}}{2.16 \text{ KN}}$$

$$S_0 = 3.07$$

El rodamiento trabajará correctamente con las fuerzas aplicadas, y no tendrá problemas.

### Vida del rodamiento para el Sinfín de la 2 caja

Se procederá a calcular las reacciones que generan estos rodamientos, para lo cual se realizará un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el sinfín. El punto A y B constarán de un rodamiento de rodillos cónicos HM89446

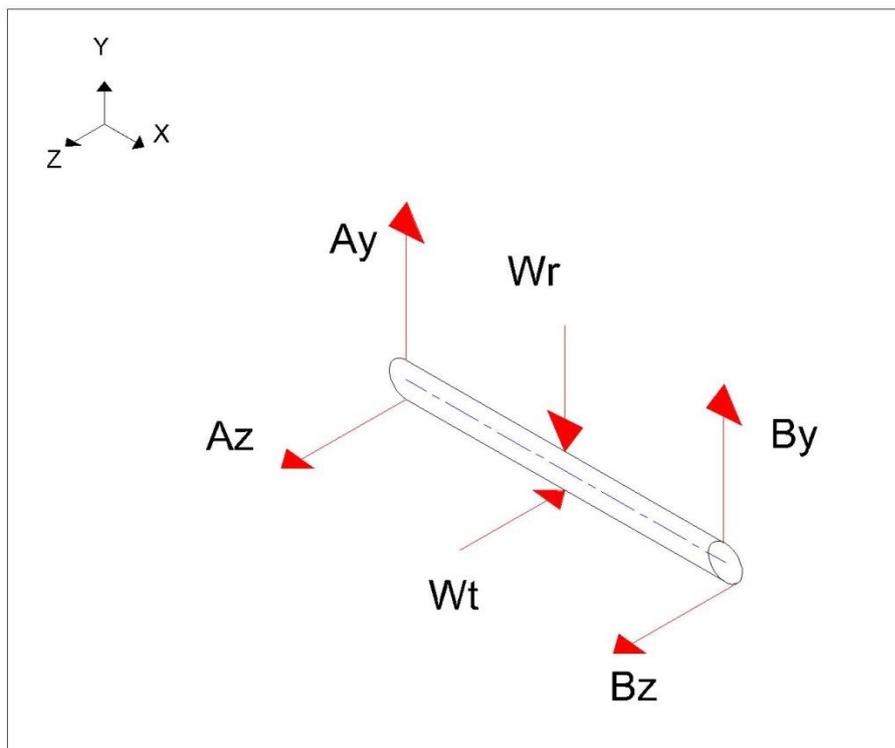
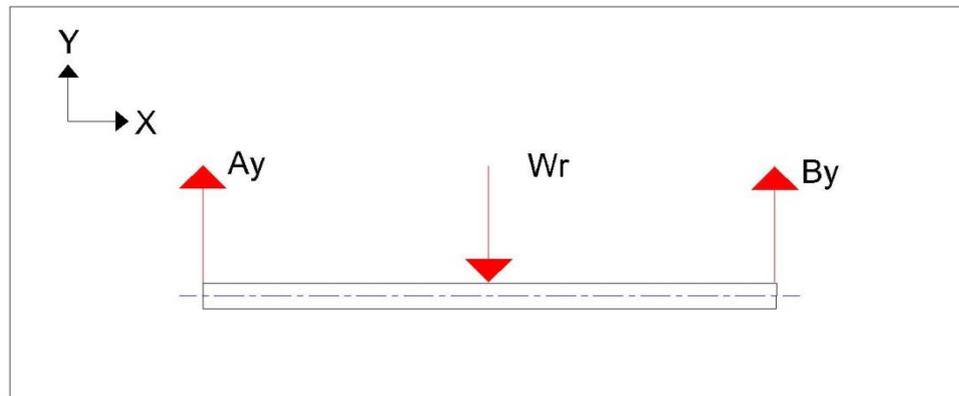


Figura 2.31 Diagrama de cuerpo libre del eje del sinfín caja 1

Se procederá a separar las fuerzas en el plano z-x, para encontrar los respectivos valores de estas incógnitas.



**Figura 2.32 Diagrama de cuerpo libre en XY del eje del sinfín caja 2**

Se determinará las demás fuerzas realizando una sumatoria de momentos con respecto a un punto y además una sumatoria de todas las fuerzas en una misma dirección.

$$EM_a = 0$$

$$-W_r(83.45) + B_y(170.5) = 0$$

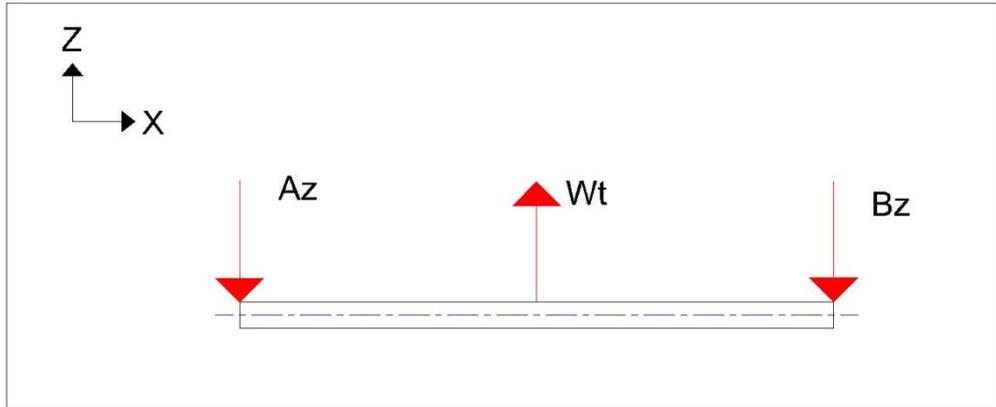
$$B_z = 1236.31 \text{ N}$$

$$Ef_y = 0$$

$$A_y - W_r + B_y = 0$$

$$A_z = 1289.66 \text{ N}$$

Se calcularán las fuerzas que están inmersas en el plano y-x de la siguiente forma:



**Figura 2.33 Diagrama de cuerpo libre en ZX del eje del sinfín caja 2**

$$EM_a = 0$$

$$W_t(83.45) - B_z(170.5) = 0$$

$$B_z = 2946.03 \text{ N}$$

$$Ef_y = 0$$

$$-A_z + W_t - B_z = 0$$

$$A_z = 3073.14 \text{ N}$$

Se hallará la fuerza radial que se generará en el punto A y B de la siguiente manera:

$$A = \sqrt{3073.14^2 + 1289.66^2}$$

$$A = 3332.77 \text{ N}$$

$$B = \sqrt{2946.03^2 + 1236.31^2}$$

$$B = 3194.92 \text{ N}$$

Se realizará una tabla de resultados, aplicando las fórmulas correspondientes antes explicadas:

**TABLA 6.3**

**RESULTADOS PARA EL PUNTO A EN EL SINFÍN DE LA CAJA 2**

|                   |         |          |         |
|-------------------|---------|----------|---------|
| P                 | 8.86 KN | e        | 0.54    |
| $F_r$             | 3.33 KN | $L_{10}$ | 62345 h |
| $F_a$             | 6.85 KN | $P_0$    | 5.77 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 2.05    | $S_0$    | 18.37   |

El rodamiento trabajará correctamente con las fuerzas aplicadas, ya que para que un rodamiento falle debe salir un valor inferior a 1.

Se hallará la vida del rodamiento del punto B, en el que solo actuará la fuerza radial. De igual manera se realizará una tabla de resultados:

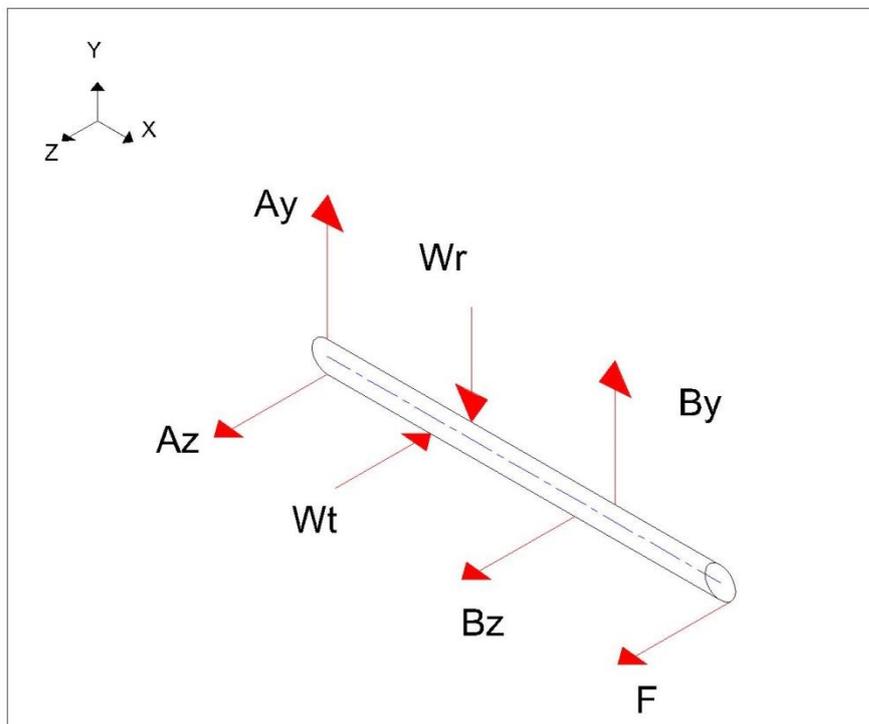
**TABLA 6.4**

**RESULTADOS PARA EL PUNTO B EN EL SINFÍN DE LA CAJA 2**

|                   |         |          |         |
|-------------------|---------|----------|---------|
| P                 | 1.27 KN | e        | 0.54    |
| $F_r$             | 3.19 KN | $L_{10}$ | 56326 h |
| $F_a$             | 0 KN    | $P_0$    | 5.70 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0       | $S_0$    | 13.70   |

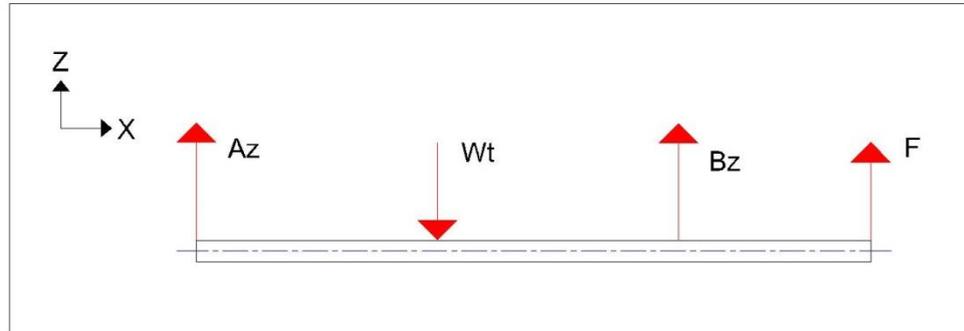
### Vida de Rodamiento de caja 3

Se procederá a calcular las reacciones que generan estos rodamientos, para lo cual se realizará un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el sinfín. El punto A constará de un rodamiento de rodillos cónicos 32304 J2/Q y el punto B tendrá un rodamiento de rodillos cónicos 11590.



**Figura 6.3 Diagrama de cuerpo libre del eje del sinfín caja 3**

Se procederá a separar las fuerzas en el plano z-x, para encontrar los respectivos valores de estas incógnitas.



**Figura 6.4 Diagrama de cuerpo libre en ZX del eje del sinfín caja 3**

Se calculará la fuerza que se originará en el piñón más lento. Se tendrá una relación de velocidad de 2:1 en la transmisión por cadena, por lo que se procederá a calcular la fuerza total de la banda de la siguiente manera:

Relación  $\rightarrow$  2: 1

$$T_1 = 2T_2$$

$$T_1 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$2T_2 r - T_2 r = \text{Torque}$$

$$T_2 r = \text{Torque}$$

$$T_2 = \frac{\text{Torque}}{r}$$

$$T_2 = 2389.16 \text{ lb}_f$$

$$T_1 = 4778.32 \text{ lb}_f$$

$$F = T_2 + T_1$$

$$F = 2389.16 + 4778.32$$

$$F = 14753.46 \text{ N}$$

Se determinará las demás fuerzas realizando una sumatoria de momentos con respecto a un punto y además una sumatoria de todas las fuerzas en una misma dirección.

$$EM_a = 0$$

$$W_t(66.4) - B_z(130.4) + F(164.95) = 0$$

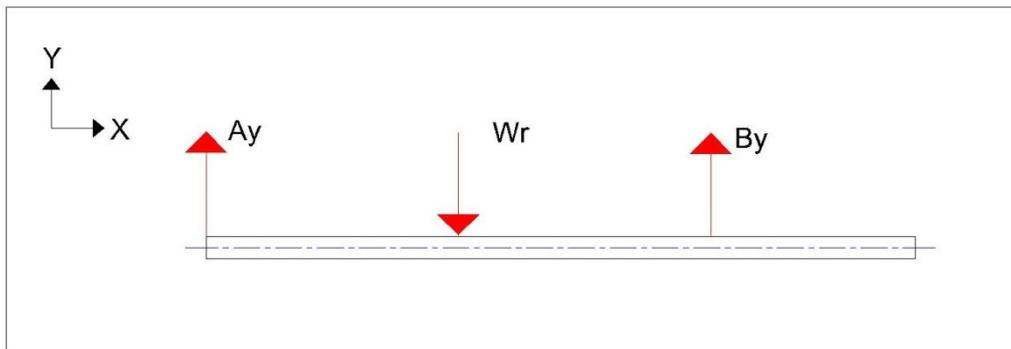
$$B_z = 49296.31 \text{ N}$$

$$Ef_z = 0$$

$$-A_z + W_t - B_z + F = 0$$

$$A_z = 282.32 \text{ N}$$

Se calcularán las fuerzas que están inmersas en el plano y-x de la siguiente forma:



**Figura 6.5 Diagrama de cuerpo libre en YX del eje del sinfín caja 3**

$$EM_a = 0$$

$$-W_r(66.4) + B_y(130.4) = 0$$

$$B_y = 3436 \text{ N}$$

$$E f_y = 0$$

$$A_y - W_r + B_y = 0$$

$$A_y = 3311.88 \text{ N}$$

Se hallará la fuerza radial que se generará en el punto A y B de la siguiente manera:

$$A = \sqrt{3311.88^2 + 282.32^2}$$

$$A = 3323.89 \text{ N}$$

$$B = \sqrt{3436^2 + 4996.31^2}$$

$$B = 4915.91 \text{ N}$$

Se realizará una tabla de resultados, aplicando las fórmulas correspondientes antes explicadas:

**TABLA 6.5**

**RESULTADOS PARA EL PUNTO A EN EL SINFÍN DE LA CAJA 3**

|                   |         |          |         |
|-------------------|---------|----------|---------|
| P                 | 1.32 KN | e        | 0.3     |
| $F_r$             | 3.32 KN | $L_{10}$ | 42635 h |
| $F_a$             | 0 KN    | $P_0$    | 1.66 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0       | $S_0$    | 13.7    |

Se hallará la vida del rodamiento de rodillos cónicos 11590 del punto B, en el que actuará una fuerza radial y otra axial

**TABLA 6.6**

**RESULTADOS PARA EL PUNTO B EN EL SINFÍN DE LA CAJA 3**

|                   |         |          |         |
|-------------------|---------|----------|---------|
| P                 | 3.50 KN | e        | 0.72    |
| $F_r$             | 4.91 KN | $L_{10}$ | 42359 h |
| $F_a$             | 1.83 KN | $P_0$    | 3.27 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0.37    | $S_0$    | 3.58    |

**Vida de Rodamiento de caja 1 del eje de la corona**

Se procederá a calcular la fuerza resultante radial que genera el rodamiento de rodillos cónicos LM67048. Estos cálculos se realizarán con resultados encontrados anteriormente.

Se hallará la fuerza radial que se generará en el punto A y B de la siguiente manera:

$$A = \sqrt{1243.71^2 + 467.97^2}$$

$$A = 1.32 \text{ KN}$$

$$B = \sqrt{1591.94^2 + 599^2}$$

$$B = 1.70 \text{ KN}$$

Se realizará una tabla de resultados, aplicando las fórmulas antes mencionadas:

**TABLA 6.7****RESULTADOS PARA EL PUNTO B EN EL EJE DE LA CAJA 1**

|                   |          |          |         |
|-------------------|----------|----------|---------|
| P                 | 0.528 KN | e        | 0.3     |
| $F_r$             | 1.32 KN  | $L_{10}$ | 85635 h |
| $F_a$             | 0 KN     | $P_0$    | 0.66 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0        | $S_0$    | 31.25   |

Se hallará la vida del rodamiento de rodillos cónicos LM67048 del punto B, en el que actuará una fuerza radial y otra axial, por lo que se realizará una tabla de resultados:

**TABLA 6.8****RESULTADOS PARA EL PUTO B EN EL EJE DE LA CAJA 1**

|                   |         |          |         |
|-------------------|---------|----------|---------|
| P                 | 2.63 KN | e        | 0.4     |
| $F_r$             | 1.70 KN | $L_{10}$ | 82365 h |
| $F_a$             | 1.30 KN | $P_0$    | 1.89 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0.76    | $S_0$    | 21.95   |

**Vida de Rodamiento de caja 2 del eje de la corona**

Se procederá a calcular la fuerza resultante radial que genera el rodamiento de rodillos cónicos 18690. Estos cálculos se realizarán con resultados encontrados anteriormente.

Se hallará la fuerza radial que se generará en el punto A y B de la siguiente manera:

$$A = \sqrt{2647.45^2 + 1700.76^2}$$

$$A = 3.14 \text{ KN}$$

$$B = \sqrt{24267.72^2 + 825.21^2}$$

$$B = 24.28 \text{ KN}$$

Se hará una tabla de resultados, utilizando las fórmulas antes mencionadas:

**TABLA 6.9**

**RESULTADOS PARA EL PUNTO A EN EL EJE DE LA CAJA 2**

|                   |         |          |         |
|-------------------|---------|----------|---------|
| P                 | 1.26 KN | e        | 0.37    |
| $F_r$             | 3.14 KN | $L_{10}$ | 85632 h |
| $F_a$             | 0 KN    | $P_0$    | 1.57 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0       | $S_0$    | 19.74   |

Se hallará la vida del rodamiento de rodillos cónicos 18690 del punto B, en el que actuará una fuerza radial y otra axial, por lo que se hará una tabla de resultados:

**TABLA 6.10**

**RESULTADOS PARA EL PUNTO B EN EL EJE DE LA CAJA 2**

|       |          |          |         |
|-------|----------|----------|---------|
| P     | 19.34 KN | e        | 0.37    |
| $F_r$ | 24.28 KN | $L_{10}$ | 43326 h |

|                   |         |       |          |
|-------------------|---------|-------|----------|
| $F_a$             | 6.02 KN | $P_0$ | 17.55 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0.247   | $S_0$ | 2.55     |

### Vida de Rodamiento de caja 3 del eje de la corona

Se procederá a calcular la fuerza resultante radial que genera el rodamiento de rodillos cónicos 32005 X/Q. Estos cálculos se realizarán con resultados encontrados anteriormente.

Se hallará la fuerza radial que se generará en el punto A y B de la siguiente manera:

$$A = \sqrt{3513.73^2 + 4062.48^2}$$

$$A = 5.37 \text{ KN}$$

$$B = \sqrt{16706.35^2 + 2685.4^2}$$

$$B = 16.92 \text{ KN}$$

Se hará una tabla de resultados:

**TABLA 6.11**

### RESULTADOS PARA EL PUNTO EN EL EJE DE LA CAJA 3

|                   |         |          |         |
|-------------------|---------|----------|---------|
| P                 | 2.14 KN | e        | 0.43    |
| $F_r$             | 3.14 KN | $L_{10}$ | 65236 h |
| $F_a$             | 0 KN    | $P_0$    | 2.68 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 0       | $S_0$    | 6.05    |

Se hallará la vida del rodamiento de rodillos cónicos 32005 X/Q del punto B, en el que actuará una fuerza radial y otra axial. Se hará una tabla de resultados:

**TABLA 6.12**

**RESULTADOS PARA EL PUNTO B EN EL EJE DE LA CAJA 3**

|                   |          |          |          |
|-------------------|----------|----------|----------|
| P                 | 31.62 KN | e        | 0.43     |
| $F_r$             | 16.92 KN | $L_{10}$ | 32659 h  |
| $F_a$             | 17.75 KN | $P_0$    | 22.66 KN |
| $\frac{F_a}{F_r}$ | 1.04     | $S_0$    | 1.43     |

## APÉNDICE 7

### PROPIEDADES DE PERFIL UPN

#### CATALOGO DIPAC

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| <b>Calidad</b>         | ASTM A 36             |
| <b>Otras calidades</b> | Previa Consulta       |
| <b>Largo normal</b>    | 6,00 mts. Y 12,00 mts |
| <b>Otros largos</b>    | Previa Consulta       |
| <b>Acabado</b>         | Natural               |
| <b>Otro acabado</b>    | Previa Consulta       |



| DENOMINACION | DIMENSIONES |         |         |         |         |           | TIPOS          |                |           |           |           |           |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|---------|-----------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|              | h<br>mm     | s<br>mm | g<br>mm | t<br>mm | R<br>mm | R1<br>cm4 | SECCION<br>cm2 | PESOS<br>kg/mt | Ix<br>cm4 | Iy<br>cm4 | Wx<br>cm3 | Wy<br>cm3 |
| UPN 50       | 50          | 38      | 5.00    | 7.00    | 7.00    | 3.50      | 7.12           | 5.59           | 26.40     | 9.12      | 10.60     | 3.75      |
| UPN 65       | 65          | 42      | 5.50    | 7.50    | 7.50    | 4.00      | 9.03           | 7.09           | 57.50     | 14.10     | 17.70     | 5.07      |
| UPN 80       | 80          | 45      | 6.00    | 8.00    | 8.00    | 4.00      | 1.10           | 8.64           | 106.00    | 19.40     | 26.50     | 6.36      |
| UPN 100      | 100         | 50      | 6.00    | 8.50    | 8.50    | 4.50      | 13.50          | 10.60          | 206.00    | 29.30     | 41.20     | 8.49      |
| UPN 120      | 120         | 55      | 7.00    | 9.00    | 9.00    | 4.50      | 17.00          | 13.40          | 364.00    | 43.20     | 60.70     | 11.10     |
| UPN 140      | 140         | 60      | 7.00    | 10.00   | 10.00   | 5.00      | 20.40          | 16.00          | 605.00    | 62.70     | 86.40     | 14.80     |
| UPN 160      | 160         | 65      | 7.50    | 10.50   | 10.50   | 5.50      | 24.00          | 18.80          | 905.00    | 85.30     | 116.00    | 18.30     |
| UPN 180      | 180         | 70      | 8.00    | 11.00   | 11.00   | 5.50      | 28.00          | 22.00          | 1350.00   | 114.00    | 150.00    | 22.40     |
| UPN 200      | 200         | 75      | 8.50    | 11.50   | 11.50   | 6.00      | 32.20          | 25.30          | 1910.00   | 148.00    | 191.00    | 27.00     |
| UPN 220      | 220         | 80      | 9.00    | 12.50   | 12.50   | 6.50      | 37.40          | 29.40          | 2690.00   | 197.00    | 245.00    | 33.60     |
| UPN 240      | 240         | 85      | 9.50    | 13.00   | 13.00   | 6.50      | 42.30          | 33.20          | 3600.00   | 248.00    | 300.00    | 39.60     |
| UPN 260      | 260         | 90      | 10.00   | 14.00   | 14.00   | 7.00      | 48.30          | 37.90          | 4820.00   | 317.00    | 371.00    | 47.70     |
| UPN 300      | 300         | 100     | 10.00   | 16.00   | 16.00   | 8.00      | 58.80          | 46.20          | 8030.00   | 495.00    | 535.00    | 67.80     |



## APÉNDICE 9

### HOJA TECNICA DE CELDA DE CARGA TIPO S



**ELECTRONICA CASIO**  
DISTRIBUIDORES EXCLUSIVOS  
BALANZAS • CILINDROS REGISTRADORES • EQUIPOS DE OFICINAS

**CASIO - CAS - OHAUS - AND - DORAN TOTALCOMP - DETECTO - CHATILLON - TOLEDO**  
TALLERES ELCA - SERVICIO TECNICO ELECTRONICO Y MECANICO - BALANZAS ELECTRONICAS  
REGISTRADORAS - PUNTO DE VENTAS - INDUSTRIAS - SUPERMERCADOS - LABORATORIOS  
BANANERAS - CAMARONERAS - JOYERIAS - BALANZAS COLOSIANES - PESO Y PRECIO  
PLATAFORMAS - EQUIPOS DE OFICINAS Y SUMINISTROS  
**IMPORTADORES MAYORISTAS DE FABRICA**

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Rated Load                     | 50Kg,100Kg,150Kg,200Kg,250Kg,300Kg,<br>500Kg,1000 Kg     |
| Rated Output                   | 2.0000±0.001MV/V   |
| Total Error                    | ±0.02%F.S  |
| Creep(30minutes)               | ±0.02%F.S  |
| Recommended Excitation Voltage | 5V~ 12V(AC or DC)  |
| Maximum Excitation Voltage     | 15V(AC or DC)  |
| Zero Balance                   | ±1%F.S   |
| Input Impedance                | 380±5Ω   |
| Output Impedance               | 350±2Ω   |
| Insulation Impedance           | ≥5000MΩ  |
| Safe Overload                  | 150%F.S  |
| Ultimate Overload              | 200%F.S  |
| Operating Temperature Range    | (-30~+70)°C  |
| Compensated Temperature Range  | (-20~+60)°C  |
| Temperature Effect On Load     | ±0.02%F.S/10°C   |
| Temperature Effect On Zero     | ±0.02%F.S/10°C   |
| Construction                   | Alloy Steel  |
| Protection Class               | IP68&IP67  |
| Citation                       | GB/T7551-2008/OIML R60                                   |
| Mode of Connection             | Input+Red<br>Input-Black<br>Output+Green<br>Output-White |

# APÉNDICE 10

## HOJA TECNICA DE TARJETA DE DATOS ARDUINO

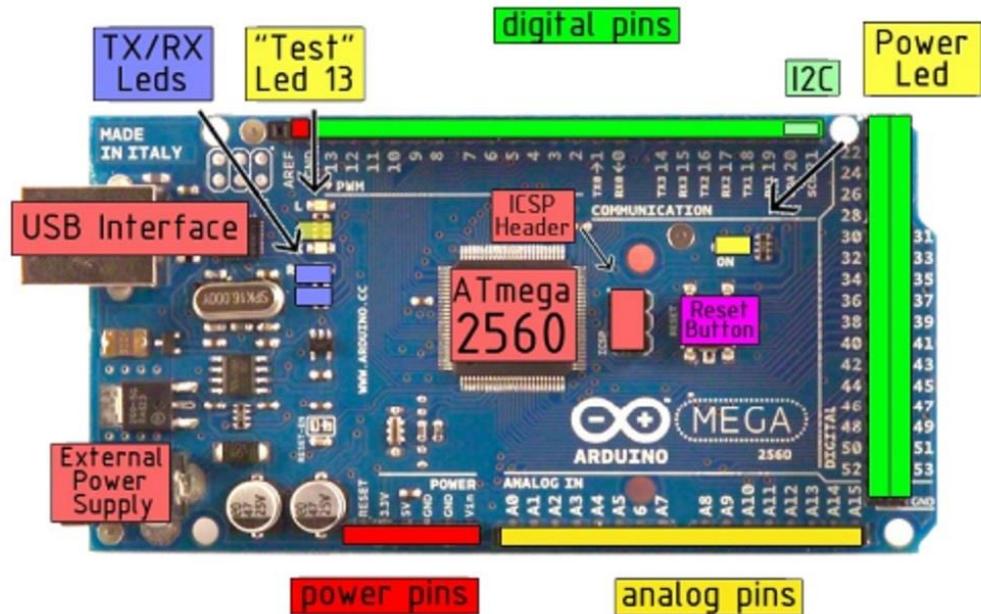
### Technical Specification

EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#) Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

#### Summary

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Microcontroller             | ATmega2560                              |
| Operating Voltage           | 5V                                      |
| Input Voltage (recommended) | 7-12V                                   |
| Input Voltage (limits)      | 6-20V                                   |
| Digital I/O Pins            | 54 (of which 14 provide PWM output)     |
| Analog Input Pins           | 16                                      |
| DC Current per I/O Pin      | 40 mA                                   |
| DC Current for 3.3V Pin     | 50 mA                                   |
| Flash Memory                | 256 KB of which 8 KB used by bootloader |
| SRAM                        | 8 KB                                    |
| EEPROM                      | 4 KB                                    |
| Clock Speed                 | 16 MHz                                  |

#### the board



# APÉNDICE 11

## HOJA TECNICA DE SENSOR ULTRASONICO

**SUPERPROX<sup>®</sup>**  
SC956A-4C0



Ultrasonic Analog Output Sensor  
30 mm, Configurable Unit  
Analog Current Output

### General Specifications

**Power Supply:** +15 to 24 VDC @ 80 mA, excluding load

**Analog Output:** min 0 mA - max 20 mA

**Load Resistance:** 10 to 500  $\Omega$

**Operating Temperature:**  
0°C to 50°C (32°F to 122°F) @ 100% relative humidity

**Sensing:**  
Range: 119.4 to 2,006.6 mm (4.70 to 79.00 inches)

Limit Adjustment Resolution: 0.08 mm (0.003 inch)

Sensor Angle with respect to smooth flat surface: 90° ± 10°

Repeatability: ± 0.86 mm (0.034 inch) from smooth flat surface at constant air temperature

### Sensor Housing Material:

Case: PEI

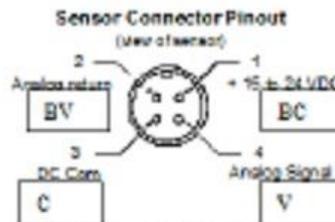
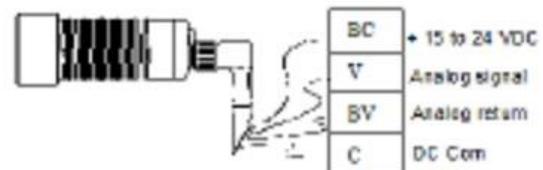
Face: FDA approved silicone rubber

### Sensor Ratings and Approvals

NEMA 4X (Indoor Use Only) 5, 12, 12K, 13, and IP67

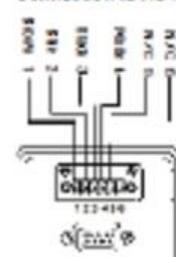
Installation/Overvoltage Category: II

This Product is UL Listed if powered by a Class II Power Supply and protected by a 2.0A Max UL Listed Fuse



The load must be connected between the analog signal and the analog return. Do not connect the analog return to the other grounds or chassis grounds.

Connection to AC411A



# APÉNDICE 12

## RESULTADOS DE ENSAYO DE TRACION

### PROBETA SIN MUESCA

**Procedimiento :** PEE-LEMAT-02  
**Temperatura Máx/Min :** 26.6°C - 26.4°C  
**Equipo Utilizado :** Máquina Universal de Ensayos 600 KN  
**Velocidad de ensayo :** 10 MPa/s  
**Norma de Referencia :** ASTM G129

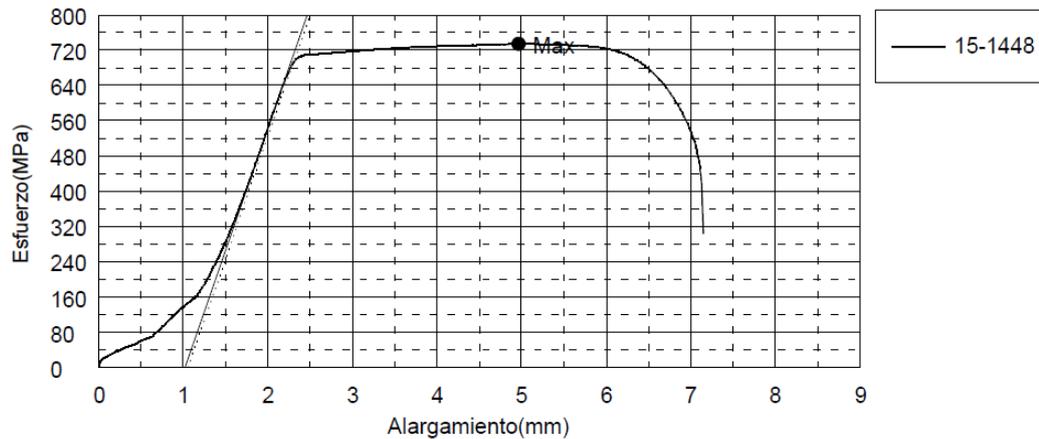
**Norma de Ensayo :** ASTM E8:2013  
**Humedad Máx/Min :** 49.8% - 47.2%  
**Material :** AISI 304  
**Control de velocidad :** Mediante tasa de esfuerzo

Forma: Cilíndrica

|          | Diametro | Longitud calibrada |
|----------|----------|--------------------|
| Unidades | mm       | mm                 |
| 15-1448  | 3.9600   | 16.0000            |

| Nombre    | Esfuerzo de Fluencia | Esfuerzo Máximo | Elongación luego de la Rotura | Carga de Fluencia | Carga Máxima |
|-----------|----------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------|--------------|
| Parametro | 0.2 %                |                 |                               | 0.2 %             |              |
| Unidades  | MPa                  | MPa             | %                             | kN                | kN           |
| 15-1448   | 692.984              | 734.849         | 47.6875                       | 8.53500           | 9.05062      |

| Nombre    | M.Elastico       |
|-----------|------------------|
| Parametro | 628.944, 514.111 |
| Unidades  | MPa              |
| 15-1448   | 8877.99          |



#### Comentarios

Las muestras y la información de las mismas fueron proporcionadas por el cliente.  
El Esfuerzo de fluencia reportado fue calculado con el Método del 0.2% de la longitud calibrada.  
El alargamiento registrado corresponde al desplazamiento de los cabezales de la MUE 600 KN.  
Las dimensiones reportadas corresponden a las dimensiones de la probeta ensayada previo al ensayo de tracción.

PEE0201-01

# PROBETA CON MUESCA

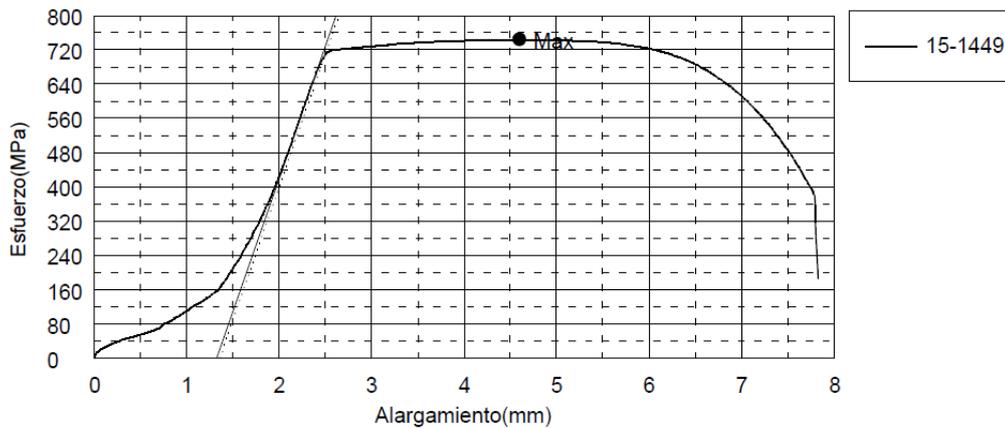
|                              |                                     |                               |                           |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| <b>Procedimiento :</b>       | PEE-LEMAT-02                        | <b>Norma de Ensayo :</b>      | ASTM E8:2013              |
| <b>Temperatura Máx/Min :</b> | 26.6°C - 26.4°C                     | <b>Humedad Máx/Min :</b>      | 49.8% - 47.2%             |
| <b>Equipo Utilizado :</b>    | Máquina Universal de Ensayos 600 KN | <b>Material :</b>             | AISI 304                  |
| <b>Velocidad de ensayo :</b> | 10 MPa/s                            | <b>Control de velocidad :</b> | Mediante tasa de esfuerzo |
| <b>Norma de Referencia :</b> | ASTM G129                           |                               |                           |

Forma: Cilíndrica

|          | Diametro | Longitud calibrada |
|----------|----------|--------------------|
| Unidades | mm       | mm                 |
| 15-1449  | 3.9300   | 16.0000            |

| Nombre    | Esfuerzo de Fluencia | Esfuerzo Máximo | Elongación luego de la Rotura | Carga de Fluencia | Carga Máxima |
|-----------|----------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------|--------------|
| Parametro | 0.2 %                |                 |                               | 0.2 %             |              |
| Unidades  | MPa                  | MPa             | %                             | kN                | kN           |
| 15-1449   | 708.783              | 744.334         | 66.8750                       | 8.59781           | 9.02906      |

| Nombre    | M.Elastico              |
|-----------|-------------------------|
| Parametro | 628.944, 514.111<br>MPa |
| Unidades  | MPa                     |
| 15-1449   | 9973.44                 |



**Comentarios**

Las muestras y la información de las mismas fueron proporcionadas por el cliente.  
 El Esfuerzo de fluencia reportado fue calculado con el Método del 0.2% de la longitud calibrada.  
 El alargamiento registrado corresponde al desplazamiento de los cabezales de la MUE 600 KN.  
 Las dimensiones reportadas corresponden a las dimensiones de la probeta ensayada previo al ensayo de tracción.

PEE0201-01

## APÉNDICE 13

### RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DEL MATERIAL

**Orden de Trabajo** OT-414-15

**Fecha de ensayo** 09/03/2015

**Método** Stainless - ESPOL 22012013

**Material** AISI 304

| OT     | Código de muestra | Elemento  | Lectura      | Incertidumbre LEMAT |
|--------|-------------------|-----------|--------------|---------------------|
| 414-15 | 15-1451           | C         | 0,045        | 0,009               |
|        |                   | Cr        | 18,4         | 0,280               |
|        |                   | Mn        | 1,63         | 0,027               |
|        |                   | Ni        | 8,16         | 0,119               |
|        |                   | S         | 0,016        | 0,003               |
|        |                   | <i>P</i>  | <i>0,035</i> | <i>0,002</i>        |
|        |                   | <i>Si</i> | <i>0,439</i> | <i>0,023</i>        |

# APÉNDICE 14

## EXTRACTO DE LA NORMA ASTM E008



Designation: E 8 – 04

An American National Standard  
American Association of State  
Highway and Transportation Officials Standard  
AASHTO No.: T88

### Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E 8; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

#### 1. Scope\*

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area.

NOTE 1—A complete metric companion to Test Methods E 8 has been developed, therefore, no metric equivalents are shown in these test methods. Committee E28 was granted an exception in 1997 by the Committee on Standards to maintain E8 and E8M as separate companion standards rather than combining standards as recommended by the Form and Style Manual.

NOTE 2—Gage lengths in these test methods are required to be 4D for most round specimens. Test specimens made from powder metallurgy (PM) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the pressing of the material to a specific projected area and density.

NOTE 3—Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A 370 and Test Methods B 557.

NOTE 4—Room temperature shall be considered to be 50 to 100°F unless otherwise specified.

1.2 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

#### 2. Referenced Documents:

##### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

A 356/A 356M Specification for Steel Castings, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel, Heavy-Walled for Steam Turbines

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

B 557 Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E 8M Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]

E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers

E 208 Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels

E 345 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading

#### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—The definitions of terms relating to tension testing appearing in Terminology E 6 shall be considered as applying to the terms used in these test methods of tension testing. Additional terms being defined are as follows:

3.1.1 *discontinuous yielding*—in a uniaxial test, a hesitation or fluctuation of force observed at the onset of plastic deformation, due to localized yielding. (The stress-strain curve need not appear to be discontinuous.)

3.1.2 *lower yield strength, LYS* [ $FL^{-2}$ ]—in a uniaxial test, the minimum stress recorded during discontinuous yielding, ignoring transient effects.

3.1.3 *upper yield strength, UYS* [ $FL^{-2}$ ]—in a uniaxial test, the first stress maximum (stress at first zero slope) associated with discontinuous yielding at or near the onset of plastic deformation.

3.1.4 *yield point elongation, YPE*—in a uniaxial test, the strain (expressed in percent) separating the stress-strain curve's first point of zero slope from the point of transition from discontinuous yielding to uniform strain hardening. If the

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.04 on Uniaxial Testing.

Current edition approved April 1, 2004. Published May 2004. Originally approved in 1924. Last previous edition approved 2003 as E 8 – 03.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

# APÉNDICE 15

## EXTRACTO DE LA NORMA ASTM G129



Designation: G 129 – 00

### Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation G 129; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

#### 1. Scope

1.1 This practice covers procedures for the design, preparation, and use of axially loaded, tension test specimens and fatigue pre-cracked (fracture mechanics) specimens for use in slow strain rate (SSR) tests to investigate the resistance of metallic materials to environmentally assisted cracking (EAC). While some investigators utilize SSR test techniques in combination with cyclic or fatigue loading, no attempt has been made to incorporate such techniques into this practice.

1.2 Slow strain rate testing is applicable to the evaluation of a wide variety of metallic materials in test environments which simulate aqueous, nonaqueous, and gaseous service environments over a wide range of temperatures and pressures that may cause EAC of susceptible materials.

1.3 The primary use of this practice is to furnish accepted procedures for the accelerated testing of the resistance of metallic materials to EAC under various environmental conditions. In many cases, the initiation of EAC is accelerated through the application of a dynamic strain in the gage section or at a notch tip or crack tip, or both, of a specimen. Due to the accelerated nature of this test, the results are not intended to necessarily represent service performance, but rather to provide a basis for screening, for detection of an environmental interaction with a material, and for comparative evaluation of the effects of metallurgical and environmental variables on sensitivity to known environmental cracking problems.

1.4 Further information on SSR test methods is available in ISO 7539 and in the references provided with this practice (1-6).<sup>2</sup>

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are provided for information only.

1.6 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applica-

bility of regulatory limitations prior to use. Furthermore, in some cases, special facilities will be required to isolate these tests from laboratory personnel if high pressures or toxic chemical environments, or both, are utilized in SSR testing.

#### 2. Referenced Documents

##### 2.1 ASTM Standards:

- A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products<sup>3</sup>
  - B 337 Test Methods for Tension Testing of Wrought and Cast Aluminum and Magnesium-Alloy Products<sup>4</sup>
  - D 1193 Specification for Reagent Water<sup>5</sup>
  - E 4 Practices for Load Verification of Testing Machines<sup>6</sup>
  - E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing<sup>6</sup>
  - E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials<sup>6</sup>
  - E 399 Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials<sup>6</sup>
  - E 602 Test Method for Sharp-Notch Tension Testing with Cylindrical Specimens<sup>6</sup>
  - E 616 Terminology Relating to Fracture Testing<sup>6</sup>
  - E 647 Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates<sup>6</sup>
  - E 1681 Test Method for Determining a Threshold Stress Intensity Factor for Environmentally-Assisted Cracking of Metallic Materials<sup>6</sup>
  - G 15 Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing<sup>7</sup>
  - G 49 Practice for Preparation and Use of Direct Tension Stress Corrosion Test Specimens<sup>7</sup>
  - G 111 Guide for Corrosion Tests in High Temperature or High Pressure Environment, or Both<sup>7</sup>
  - G 142 Test Method for Determination of Susceptibility of Metals to Embrittlement in Hydrogen Containing Environments at High Pressure, High Temperature, or Both<sup>7</sup>
- 2.2 ISO Standard:

<sup>1</sup> This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.06 on Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue.

Current edition approved Nov. 10, 2000. Published November 2000. Originally published as G 129 – 95. Last previous edition G 129 – 95.

<sup>2</sup> Holdfast numbers refer to the list of references at the end of this standard.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 02.02.

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.01.

<sup>6</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

<sup>7</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

# APÉNDICE 16

## EXTRACTO DE LA NORMA ASTM A276



Designation: A 276 – 04

### Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation A 276; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

#### 1. Scope\*

1.1 This specification covers hot-finished or cold-finished bars except bars for reforging (Note 1). It includes rounds, squares, and hexagons, and hot-rolled or extruded shapes, such as angles, tees, and channels in the more commonly used types of stainless steels. The free-machining types (Note 2), for general corrosion resistance and high-temperature service, are covered in a separate specification.

Note 1—For bars for reforging, see Specification A 314.

Note 2—For free-machining stainless bars designed especially for optimum machinability, see Specification A 582/A 582M.

Note 3—There are standards covering high nickel, chromium, austenitic corrosion, and heat resisting alloy materials. These standards are under the jurisdiction of ASTM Subcommittee B02.07 and may be found in *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 02.04.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

#### 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:<sup>2</sup>

A 314 Specification for Stainless Steel Billets and Bars for Forging

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

A 484/A 484M Specification for General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings

A 582/A 582M Specification for Free-Machining Stainless Steel Bars

A 751 Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products

E 527 Practice for Numbering Metals and Alloys (UNS)

2.2 *Other Document*:

SAE J1086 Recommended Practice for Numbering Metals and Alloys<sup>3</sup>

#### 3. Ordering Information

3.1 It is the responsibility of the purchaser to specify all requirements that are necessary for material ordered under this specification. Such requirements may include but are not limited to the following:

3.1.1 Quantity (weight or number of pieces),

3.1.2 Name of material: stainless steel,

3.1.3 Form (bars, angles, etc.),

3.1.4 Condition (Section 4.1),

3.1.5 Finish (Section 6 of Specification A 484/A 484M),

3.1.6 Surface preparation of shapes (Section 8 of Specification A 484/A 484M),

3.1.7 Applicable dimensions including size, thickness, width, and length,

1

3.1.8 Cross section (round, square, etc.),

3.1.9 Type or UNS designation (Table 1),

3.1.10 ASTM designation and date of issue, and

3.1.11 Whether bars are to be rolled as bars or cut from strip or plate.

3.1.12 Test for magnetic permeability when specified by customer purchase order when ordering Types 201 and 205.

3.1.13 Special requirements.

Note 4—A typical ordering description is as follows: 5000 lb (2268 kg) Stainless Steel Bars, Annealed and Centerless Ground, 1 $\frac{1}{2}$  in. (38.10 mm) Round, 10 to 12 ft (3.05 to 3.66 m) in length, Type 304, ASTM Specification A 276 dated \_\_\_\_\_. End use: machined valve parts.

#### 4. Manufacture

4.1 *Condition*:

4.1.1 Bars shall be furnished in one of the following conditions listed in the Mechanical Requirements table:

4.1.1.1 *Condition A*—Annealed

4.1.1.2 *Condition H*—Hardened and tempered at a relatively low temperature

<sup>3</sup> Available from Society of Automotive Engineers (SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096-0001.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y**  
**CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN**

**HOJA 1 DE 7**

**FECHA:**

| <b>APÉNDICE 17</b>           |  | <b>CODIGO</b> |
|------------------------------|--|---------------|
| <b>MATERIA</b>               |  |               |
| <b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b> | <b>ENSAYO A VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN LENTA DEL ACERO INOXIDABLE 304 SOMETIDO A CORROSIÓN BAJO ESFUERZOS.</b> |               |

**Resumen:**

**Objetivos:**

- Identificar todos los parámetros involucrados en este tipo de ensayo.
- Conocer la susceptibilidad del material a ensayar a la corrosión bajo esfuerzos.
- Graficar la curva Esfuerzo vs Deformación Unitaria.
- Observar el tipo de fractura presente en el material ensayado, a través de la metalografía y macrografía

**Normas aplicables:**

ASTM G129: Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking.  
ASTM E08: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

**Marco Teórico:**

Se conoce como Corrosión Bajo Esfuerzos (SCC) a la generación de una fractura por efecto de la combinación entre un esfuerzo aplicado o residual, un medio corrosivo y un material susceptible a este tipo de daño. La corrosión bajo esfuerzos usualmente se presenta como fisuras en la superficie del metal lo cual, origina fugas o goteos y a su vez, ocasiona costos de reparación y mantenimiento.

|   |   |                    |
|---|---|--------------------|
|  | <b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</b>                           | <b>HOJA 2 DE 7</b> |
|   | <b>FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y<br/>CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN</b> | <b>FECHA:</b>      |

SCC ocurre bajo la acción de ambientes químicos específicos por lo que ciertos metales, aunque hayan sido expuestos a condiciones mínimas de medios corrosivos, pueden ser rápidamente corroídos. Cabe mencionar que la presencia de temperatura hará que la corrosión se acelere y por este motivo, la SCC es comúnmente encontrado en tuberías de transporte de crudos, álabes de turbinas, recipientes a presión lo cual, debe ser un aspecto importante a considerar al momento de diseñar este tipo de sistemas.

Para realizar el ensayo se utilizará el banco de prueba a velocidad de deformación a lenta, como se ilustra en la figura 1.



**Figura 1: Banco experimental a velocidad deformación lenta para someter un material a corrosión bajo esfuerzos**

#### **Descripción de la máquina**

El ensayo tratará de simular aceleradamente un material sometido a una carga, la norma ASTM G 129 establece que la velocidad de deformación de la probeta deberá estar entre un rango de  $2.54 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$  y  $2.54 \times 10^{-9} \frac{m}{s}$  siendo esta una velocidad lineal, para la cual el banco de prueba cuenta con una velocidad de  $2.54 \times 10^{-7} \frac{m}{s}$ .

#### **Fracturas generadas por Corrosión Bajo Esfuerzos**

La intensidad de las tensiones es muy importante y a veces incluso más, que la influencia del medio corrosivo. Si los efectos combinados de la fuerza de tensión y el medio corrosivo son suficientes, se desarrollaran fracturas que pueden seguir trayectorias tanto transgranulares, como intergranulares, perpendicularmente a la fuerza aplicada. Se han presentado casos de agrietamientos que tienen una tendencia en forma de rama. En

|   |   |                    |
|---|---|--------------------|
|  | <b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</b>                           | <b>HOJA 3 DE 7</b> |
|   | <b>FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y<br/>CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN</b> | <b>FECHA:</b>      |

general, cuando el medio corrosivo es el factor más importante, se genera una fractura intergranular y cuando la fuerza de tensión es el componente más significativo, se genera una fractura transgranular.

### **Calibración del sensor ultrasónico**

Es importante que el sensor de distancia se calibre siempre que se realice un ensayo, ya que el nivel de referencia no será siempre el mismo. La curva de calibración del sensor ultrasónico deberá tener una tendencia lineal como se ilustra en la ecuación 1. El sensor tendrá un rango de 11.94 a 200.66 cm, para configurar el sensor de distancia se debe mantener presionado el botón de seteo hasta que la luz parpadee verde, se deja de presionar el botón lo cual indica que está listo para tomar el límite máximo. Se coloca frente a un objeto a una distancia conocida y se presiona el botón de seteo, se encenderá una luz de color naranja que significa que se ha definido el límite máximo. Posteriormente se coloca el sensor a una distancia menor a la primera para setear el límite mínimo, se presiona el botón de seteo y se encenderá una luz color verde que indicará que se ha definido el límite mínimo. El sensor de distancia arroja una señal eléctrica en voltios la cual será censada por la tarjeta de adquisición de datos.

$$V = m(D) + b \quad \text{Ec. 1}$$

En donde V es el voltaje censado y m será la pendiente obtenida de la gráfica lineal, D es la distancia y b será el desfase de la gráfica hallada. Se despejó el valor de la deformación de la ecuación 4 para obtener su respectivo valor:

$$D = \frac{(V - b)}{m}$$

### **Diagrama Esfuerzo vs Deformación**

Este tipo de gráfica muestra como es el comportamiento del material, permite conocer los esfuerzos a los que fue sometido el material. En la figura 2 se puede observar este tipo de gráfica

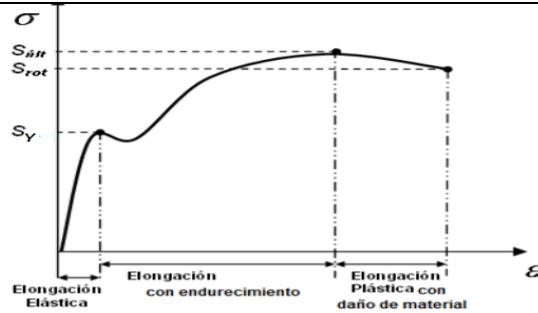


Figura 2: Gráfica de Esfuerzo vs Deformación

En donde:

$S_Y$  = Esfuerzo de fluencia

$S_{ut}$  = Esfuerzo último a la tracción

$S_{rot}$  = Esfuerzo de rotura

El esfuerzo de fluencia es el punto en el cual la gráfica sale de su región plástica y comienza la elástica es decir que ya no recupera su longitud inicial. El esfuerzo último a la tracción es el punto máximo en la gráfica, es el punto en donde se comienza a generar la estricción. El esfuerzo de rotura se conoce como el esfuerzo al cuál la probeta llegó a la fractura.

**Cálculos y fórmulas utilizadas:**

**Fuerza de tensión (F):** Para calcular la fuerza de tensión sobre la probeta se debe considerar el área de la sección reducida de la muestra sobre la cual se ejerciendo la fuerza. Esto se puede representar por la ecuación 2, mostrada a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

F: Fuerza que se está ejerciendo sobre la probeta

A: Área de la sección reducida de la probeta.

|   |   |                    |
|---|---|--------------------|
|  | <b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</b>                           | <b>HOJA 5 DE 7</b> |
|   | <b>FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y<br/>CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN</b> | <b>FECHA:</b>      |

### **Elongación**

Por medio de la elongación se puede determinar la ductilidad del material. Se representa por el porcentaje de elongación como se muestra en la ecuación 3. Antes de realizar el ensayo se realizan marcas en la zona reducida, después de que se logró la fractura se acomodan las dos partes y se mide la longitud entre ambas, para obtener una medida de deformación.

$$\% E = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100\% \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

$L_0$ : Longitud Calibrada de la Probeta (mm).

$L_f$ : Longitud final de la Probeta (mm).

### **Reducción de Área**

El porcentaje de reducción del área es otro signo que demuestra que tan dúctil es el material sometido al ensayo. La ecuación 4 muestra cómo obtener este valor:

$$\% RA = \frac{A_f - A_0}{A_0} * 100\% \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

$A_0$ : Área Inicial de la Probeta (mm).

$L_f$ : Área final de la Probeta (mm)

### **Variables censadas:**

La celda de carga permitirá conocer la fuerza aplicada a la probeta. Al realizar la adquisición de datos se obtendrá un gráfico de Fuerza vs Cantidad de Datos. Para tener una mejor visualización de los datos obtenidos se deberán convertir los datos a tiempo. De igual manera el sensor ultrasónico indicará la deformación a la que está siendo sometida la probeta. Se podrá analizar el comportamiento de la fuerza generando una

|   |  |                    |
|---|--|--------------------|
|  | <b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</b><br><br><b>FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y</b><br><br><b>CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN</b> | <b>HOJA 6 DE 7</b> |
|   |  | <b>FECHA:</b>      |

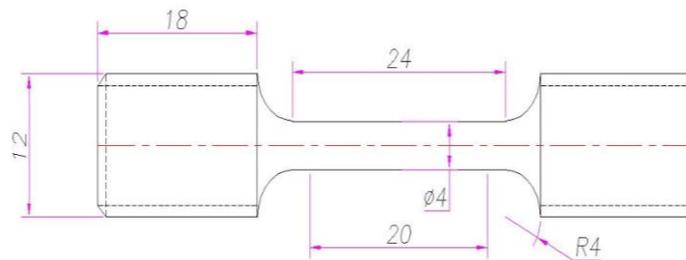
gráfica de fuerza vs deformación. Para obtener la gráfica de esfuerzo vs deformación unitaria se deberá dividir los datos de fuerza obtenidos para el área inicial y con respecto a la deformación unitaria se realizará la razón entre la elongación y la longitud calibrada.

**Equipos y Materiales:**

- Probeta Maquinada
- Lijas 220,400,600,1000
- Cámara experimental
- Microscopio
- Calibrador Vernier
- Cloruro de Sodio
- Agua Destilada
- Playo

**Dimensiones de la Probeta:**

Es importante que las dimensiones de la muestra a ensayar se mantengan las que se muestran en la figura 3, ya que si se escoge otra probeta se necesitará de una mayor por lo que podría llegar a la capacidad máxima de la celda de carga o podría generar algún daño en el soporte estructural.



**Figura 3: Dimensiones de la probeta a ensayar**

**Procedimiento experimental:**

|   |   |                    |
|---|---|--------------------|
|  | <b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL</b>                           | <b>HOJA 7 DE 7</b> |
|   | <b>FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y<br/>CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN</b> | <b>FECHA:</b>      |

A continuación se presenta de manera detalla el procedimiento para llevar a cabo el ensayo a velocidad de deformación lenta de un material sometido a corrosión bajo esfuerzos:

- Verificar que el pasador del eje inferior de la celda de carga con el eje de sujeción de la muestra esté correctamente instalado.
- Colocar la probeta en el eje de sujeción superior del banco de prueba.
- Instalar la cámara corrosiva, asegurándola por medio de las abrazaderas.
- El eje de sujeción inferior que se enrosca con la parte libre de la probeta, se introduce por la parte de abajo de la cámara experimental.
- Realizar el montaje del tornillo de potencia con el eje colocado anteriormente por medio del pasador.
- Una vez preparado el medio corrosivo, introducirlo por la tapa superior de la cámara corrosiva con la ayuda de un embudo.
- La resistencia eléctrica se la debe colocar en el agujero de la tapa superior de la cámara experimental.
- Conectar el sensor ultrasónico por medio de su respectivo conector.
- Realizar la calibración del sensor de distancia.
- Subir el breaker, colocado en la parte posterior del banco de pruebas.
- Conectar el enchufe de 110 voltios, el cual sale del panel de control.
- Regular el termostato a la temperatura deseada.
- Conectar la tarjeta de adquisición de datos a la laptop por medio del cable de datos.
- Por medio de la botonera de color verde, empezar con el ensayo, realizando la adquisición de datos.
- Al finalizar el ensayo, realizar la preparación de las probetas por medio de la resina y las lijas para poder observar la metalografía del material y conocer el tipo de fractura que se ha producido. Para obtener una visión más clara de cómo se produjo la fractura se realizará una macrografía al lado de las probetas que no ha sido lijado.

**Resultados:**

**Conclusiones:**

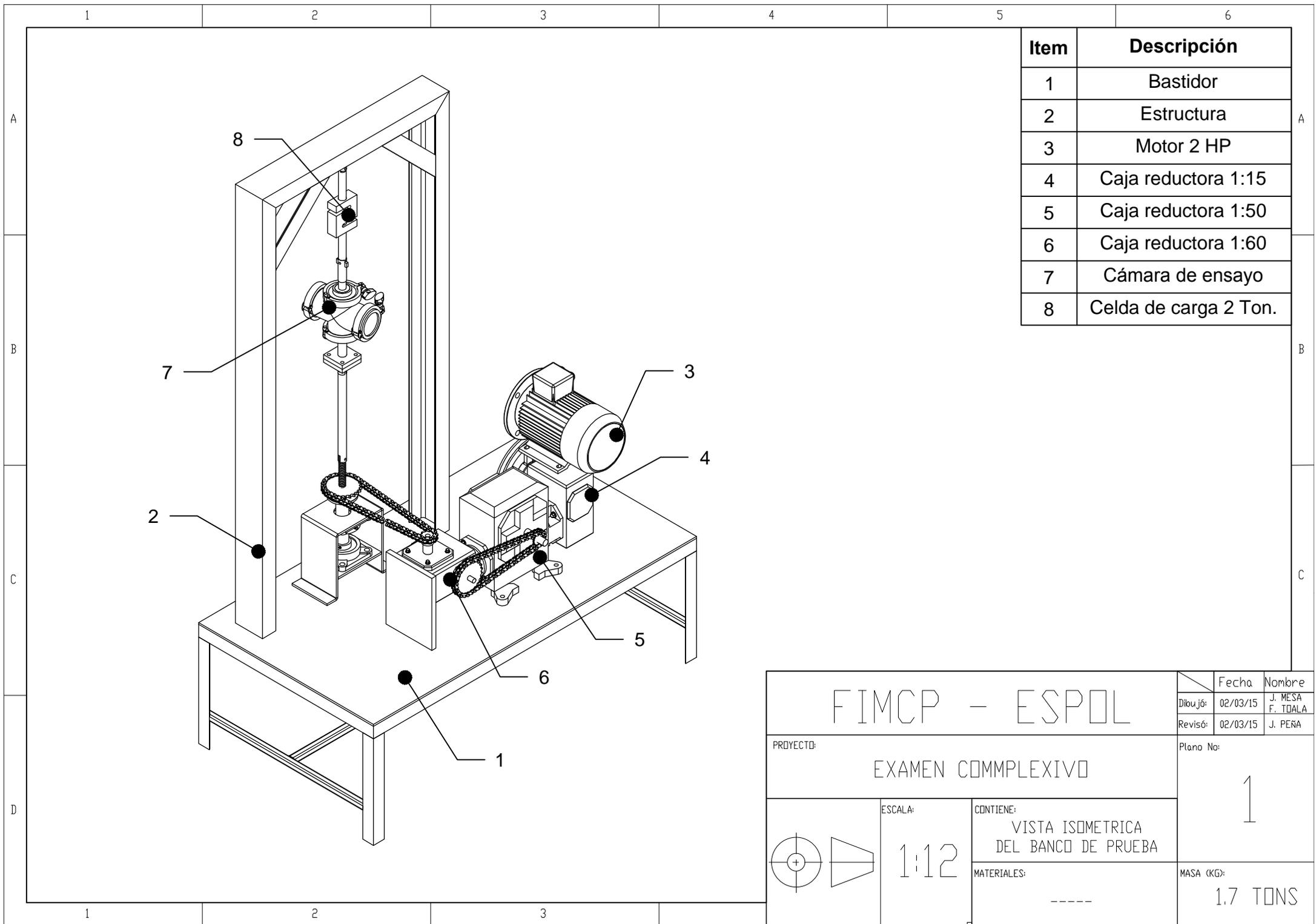
**Observaciones:**

# PLANOS

## BIBLIOGRAFÍA

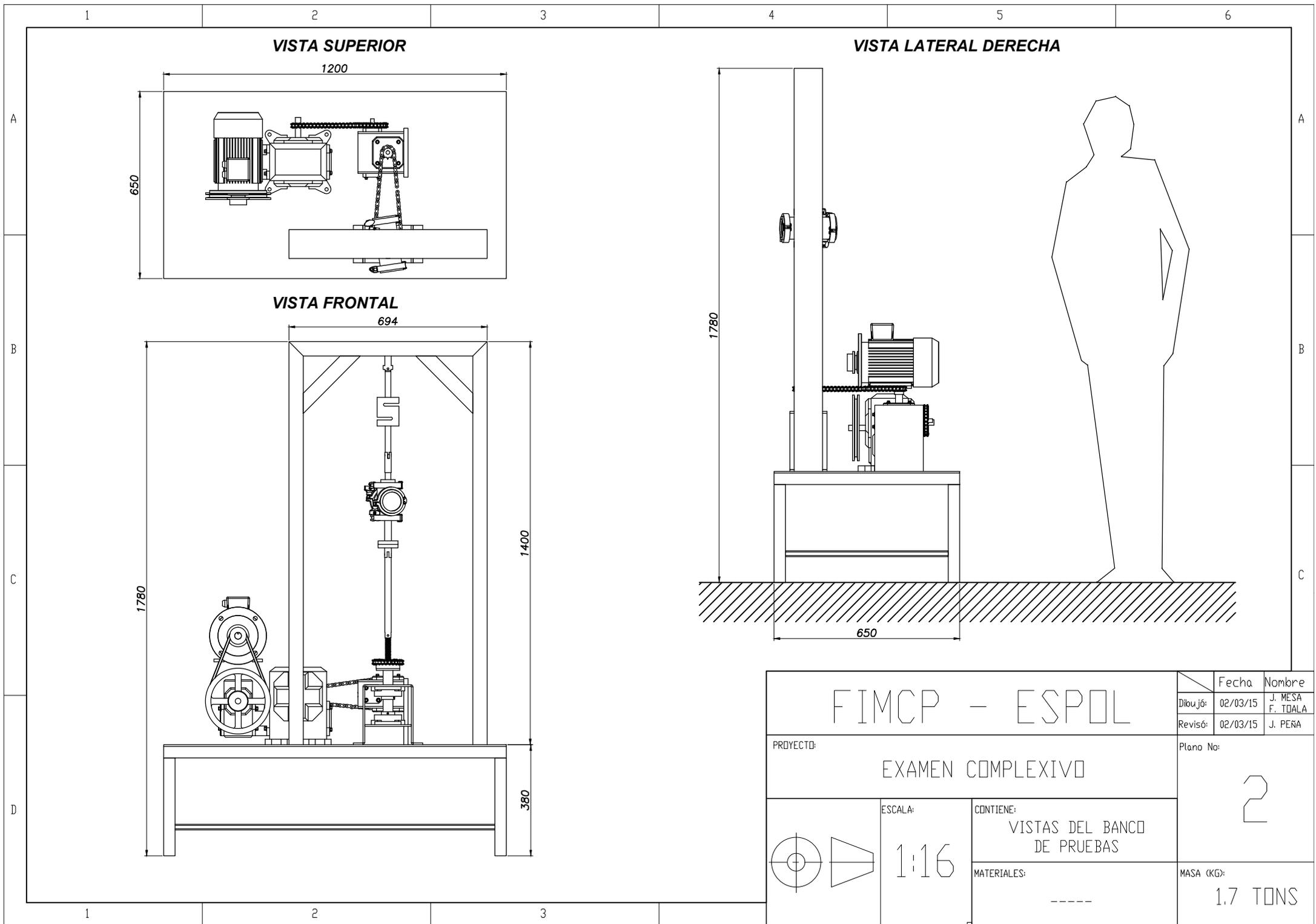
- [1] **Jones, Denny.** *Principles and Prevention of Corrosion.* 1992
- [2] **NACE.** [En línea]  
[http://www.corrosionanalysisnetwork.org/web/can/image-gallery//journal\\_content/56/10183/STRESSCORROSIONCRACKING\(S-CC\)-1/IMAGE-TEMPLATE](http://www.corrosionanalysisnetwork.org/web/can/image-gallery//journal_content/56/10183/STRESSCORROSIONCRACKING(S-CC)-1/IMAGE-TEMPLATE). 2012
- [3]. **W., Dietzel.** *Fracture mechanics approach to stress corrosion cracking.* 2001
- [4]. **ASNE.** *Journal of the American Society for Naval Engineers.* 1913.
- [5]. **NACE.** *NACE Standard TM 0198.* 2004
- [6]. **Graham, Lobley.** *Stress Corrossion Cracking: Case Study in Refinery Equipment.* 2002.
- [7]. **ASM.** *Metals Handbook Vol 1.*
- [8]. **Frantsen, Jan Elkajaer.** *Common Corrosion Problems In The Brewery Sector.* 2008.
- [9]. **Cesareo, Felix.** *Manual Básico de Corrosión para Ingenieros.* 2004
- [10]. **Norton, Robert L.** *Diseño de Maquinaria.* 2005
- [11]. **Mott, Robert L.** *Diseño de Elementos de Maquinaria.* 2007
- [12]. **Shigley.** *Diseño en Ingeniería Mecánica.* 2009
- [13]. **NTN.** *Catálogo de Rodamientos*

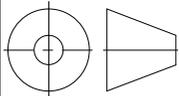
- [14]. **Martins.** *Catálogo de Poleas para Bandas en V Martins.*
- [15]. [En línea] (<http://rduinostar.com/tutoriales/instalacionarduino-windows-7/>). Consultado el 17 de marzo del 2015).
- [16]. [En línea] ([http://www.alibaba.com/product-detail/Slow-Strain-Rate-Test-Machine-for\\_60122719275.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Slow-Strain-Rate-Test-Machine-for_60122719275.html)). Consultado el 12 de enero del 2015).
- [17] **ASTM G129.** *Practice for Slow Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking.* 2004
- [18] **Bilmes, Pablo.** *Aceros Inoxidables.* Universidad Nacional de la Plata.
- [19] **Marshall, George.** *Guidelines for the selection of metallic materials for stress corrosion cracking resistance in sodium chloride environments.* 2005.
- [20] **Guerrero, Manuel.** *Corrosión Bajo Tensión,* 2008

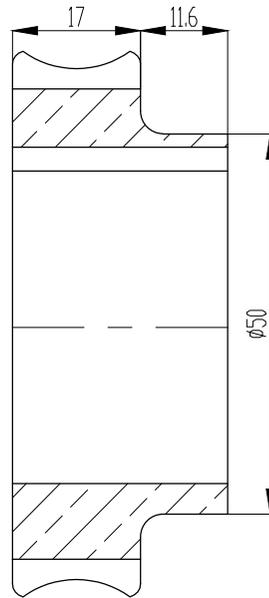
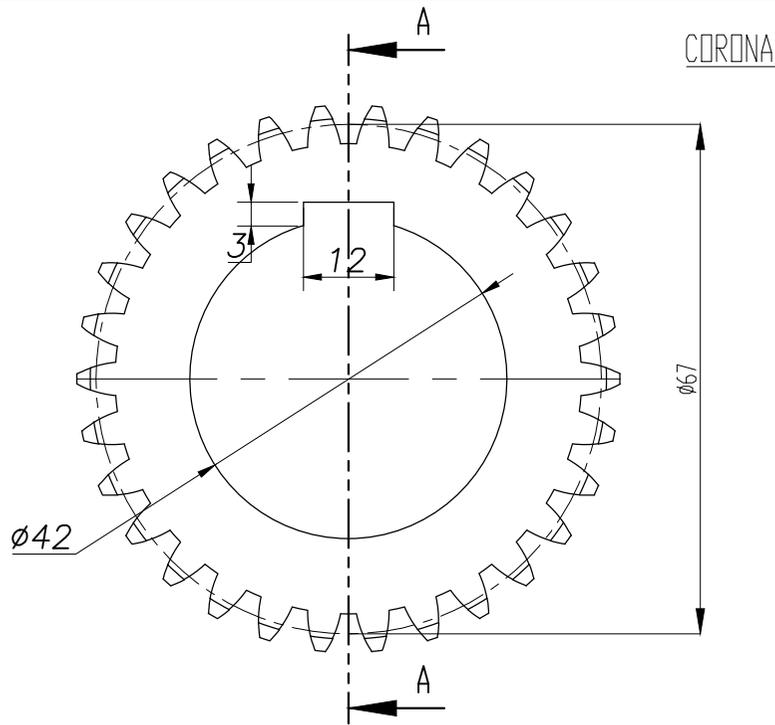


| Item | Descripción           |
|------|-----------------------|
| 1    | Bastidor              |
| 2    | Estructura            |
| 3    | Motor 2 HP            |
| 4    | Caja reductora 1:15   |
| 5    | Caja reductora 1:50   |
| 6    | Caja reductora 1:60   |
| 7    | Cámara de ensayo      |
| 8    | Celda de carga 2 Ton. |

|                        |         |   |                              |
|------------------------|---------|---|------------------------------|
| <h1>FIMCP - ESPOL</h1> |         | Fecha                                   | Nombre                       |
|                        |         | Dibujó:                                 | 02/03/15 J. MESA<br>F. TOALA |
|                        |         | Revisó:                                 | 02/03/15 J. PEÑA             |
| PROYECTO:              |         | Plano No:                               |                              |
| EXAMEN COMPLEXIVO      |         | 1                                       |                              |
|                        | ESCALA: | CONTIENE:                               | MASA (KG):                   |
|                        | 1:12    | VISTA ISOMETRICA<br>DEL BANCO DE PRUEBA |                              |
|                        |         | MATERIALES:                             |                              |
|                        |         | -----                                   |                              |

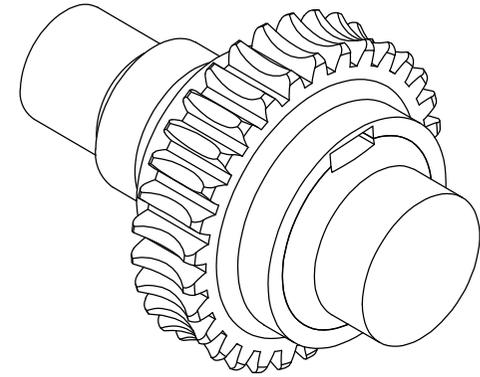


|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| <p style="text-align: center; font-size: 2em;">FIMCP - ESPOL</p>                      |   | Fecha   | Nombre  |
|   |   | Dibujó:   | 02/03/15<br>J. MESA<br>F. TOALA                         |
|   |   | Revisó:   | 02/03/15<br>J. PEÑA                                     |
| PROYECTO:<br><p style="text-align: center; font-size: 1.5em;">EXAMEN COMPLEXIVO</p>   |   | Plano No:<br><p style="text-align: center; font-size: 3em;">2</p>           |   |
|  | ESCALA:<br><p style="font-size: 2em;">1:16</p>          | CONTIENE:<br><p style="text-align: center;">VISTAS DEL BANCO DE PRUEBAS</p> |   |
|   | MATERIALES:<br><p style="text-align: center;">-----</p> |   | MASA (KG):<br><p style="font-size: 1.5em;">1.7 TONS</p> |

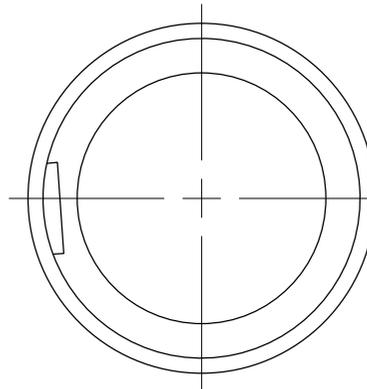
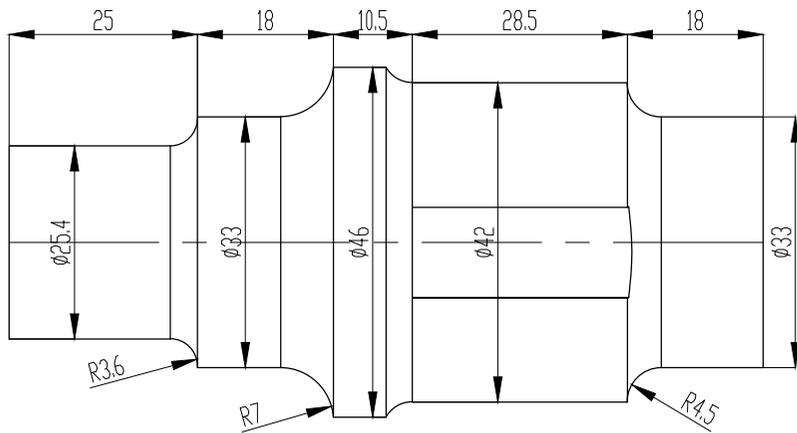


SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1

VISTA ISOMETRICA DEL ENSAMBLAJE



EJE DE LA CORONA



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1

FIMCP - ESPOL

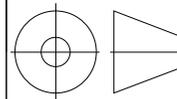
|         | Fecha    | Nombre               |
|---------|----------|----------------------|
| Dibujó: | 02/03/15 | F. TIDALA<br>J. MESA |
| Revisó: | 02/03/15 | J. PERA              |

PROYECTO:

EXAMEN COMPLEXIVO

Plano No:

3



ESCALA:

1:1

CONTIENE:

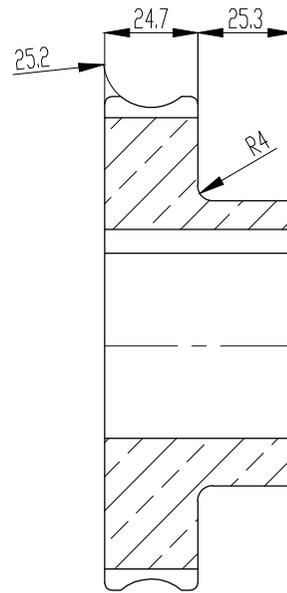
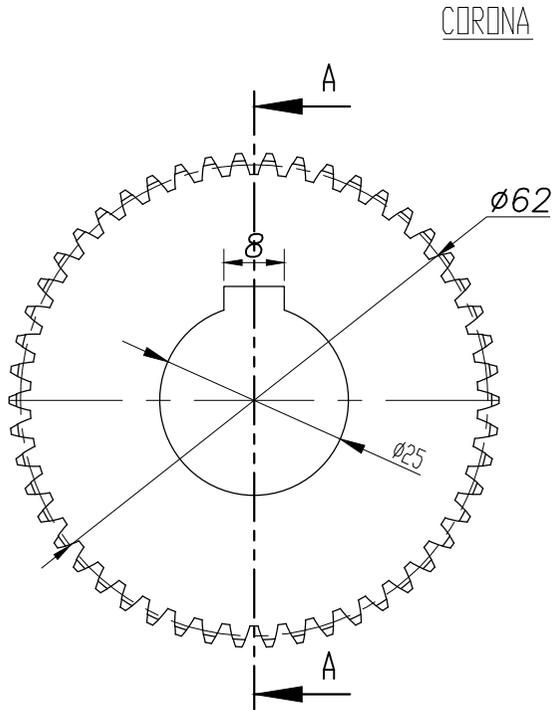
EJE-CORONA DE  
REDUCTOR 1

MATERIALES:

Bronce Fosfórico

MASA (KG):

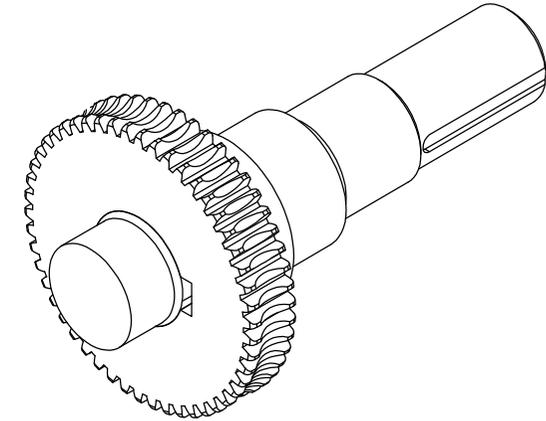
352 GRAMOS



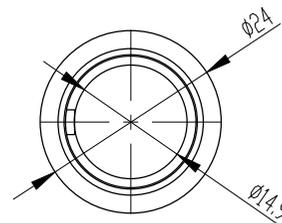
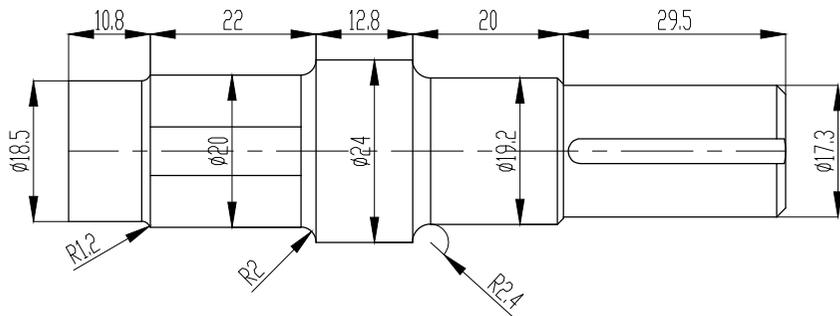
REBARBAR Y  
ROMPER ARISTAS  
VIVAS

SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1

VISTA ISOMETRICA DEL ENSAMBLAJE



EJE DE LA CORONA



FIMCP - ESPOL

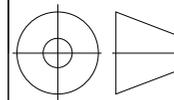
|         | Fecha    | Nombre               |
|---------|----------|----------------------|
| Dibujó: | 02/03/15 | F. TIDALA<br>J. MESA |
| Revisó: | 02/03/15 | J. PERA              |

PROYECTO:

EXAMEN COMPLEXIVO

Plano No:

4



ESCALA:

1:1.5

CONTIENE:

EJE-CORONA DE  
REDUCTOR 2

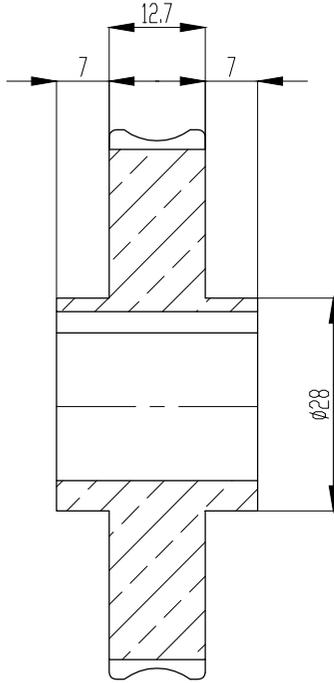
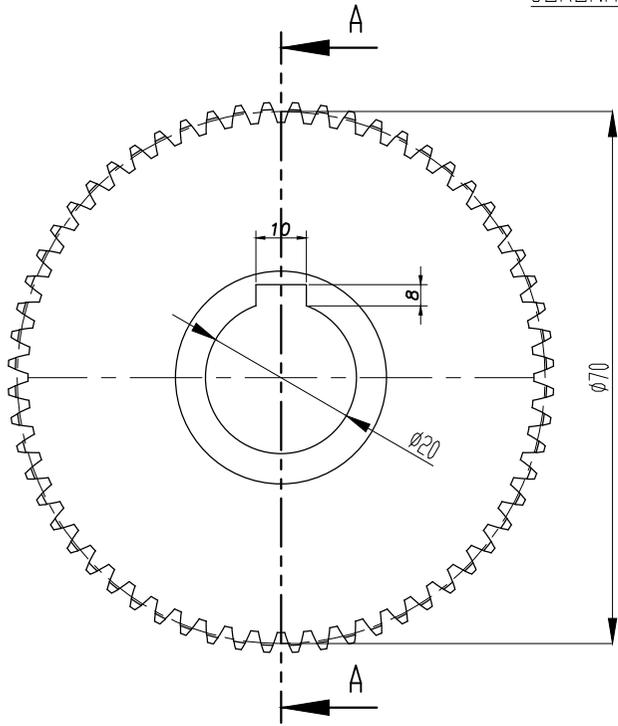
MATERIALES:

Bronce Fosfórico

MASA (KG):

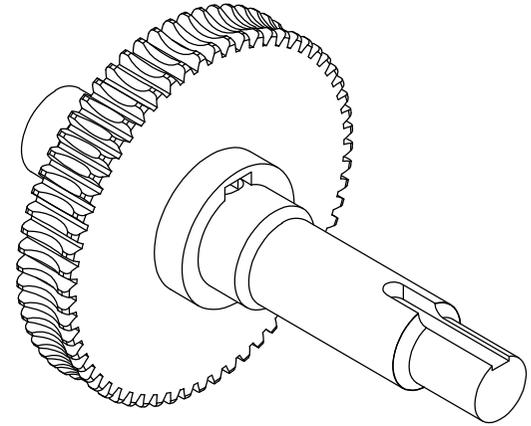
2.68 Kgs

CORONA

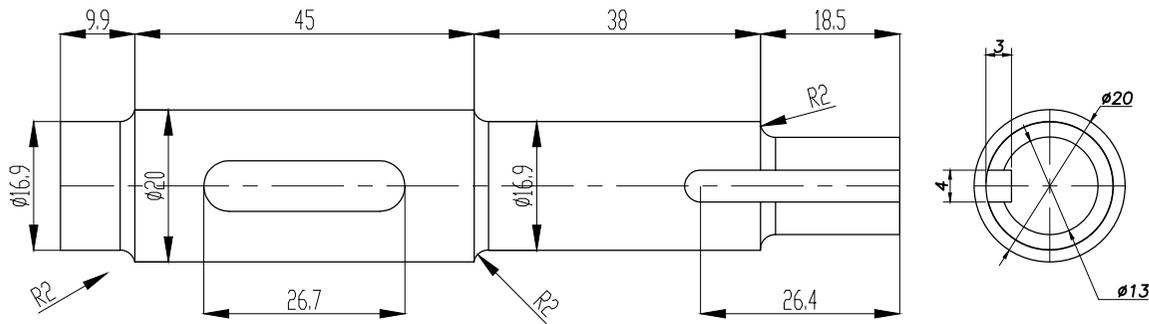


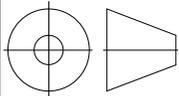
SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1.5

VISTA ISOMETRICA DEL ENSAMBLAJE

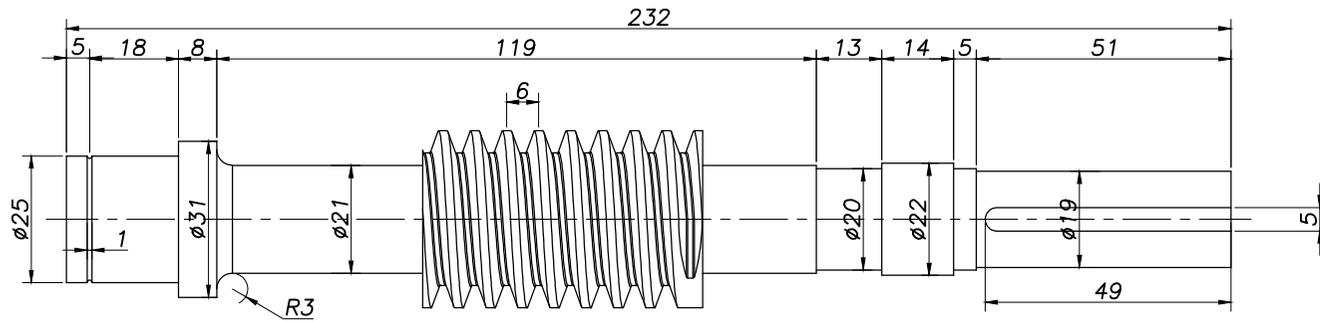


EJE DE LA CORONA

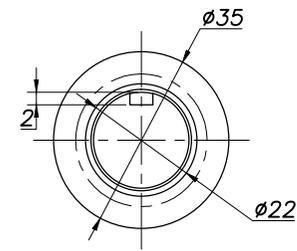


|  |  |   |                    |
|--|--|---|--------------------|
| <p>FIMCP - ESPOL</p>   |  | Fecha   | Nombre             |
|  |  | Dibujó:                                       | F. TALA<br>J. MESA |
| <p>PROYECTO:<br/>EXAMEN COMPLEXIVO</p>   |  | Revisó:                                       | J. PERA            |
|  |  | Plano No:                                     |                    |
|  <p>ESCALA:<br/>1:1.5</p> |  | <p>CONTIENE:<br/>EJE-CORONA DE REDUCTOR 3</p> |                    |
|  |  | <p>MATERIALES:<br/>Bronce Fosfórico</p>       |                    |
|  |  | <p>MASA (KG):<br/>1.42 Kgs</p>                | <p>5</p>           |

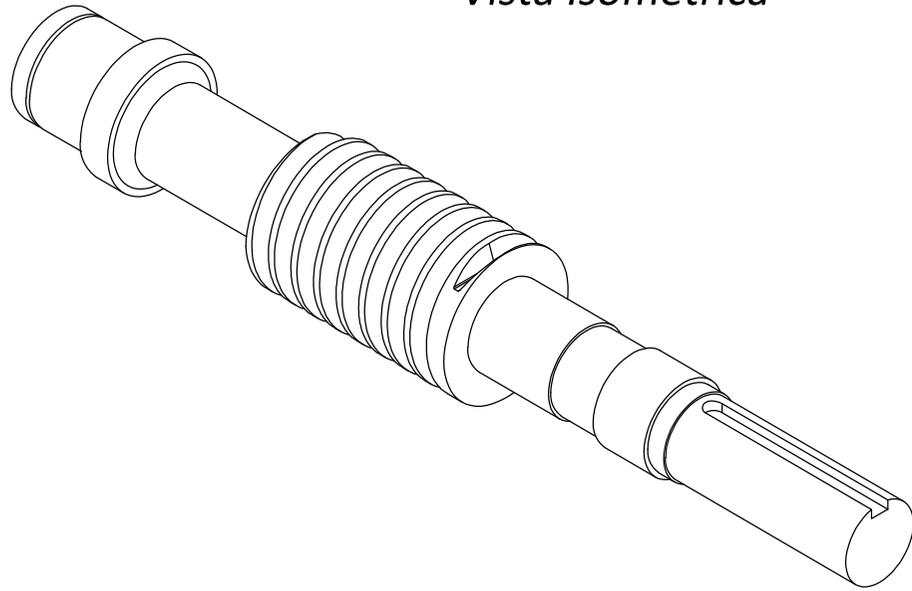
### Vista Frontal

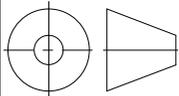


### Vista Lateral



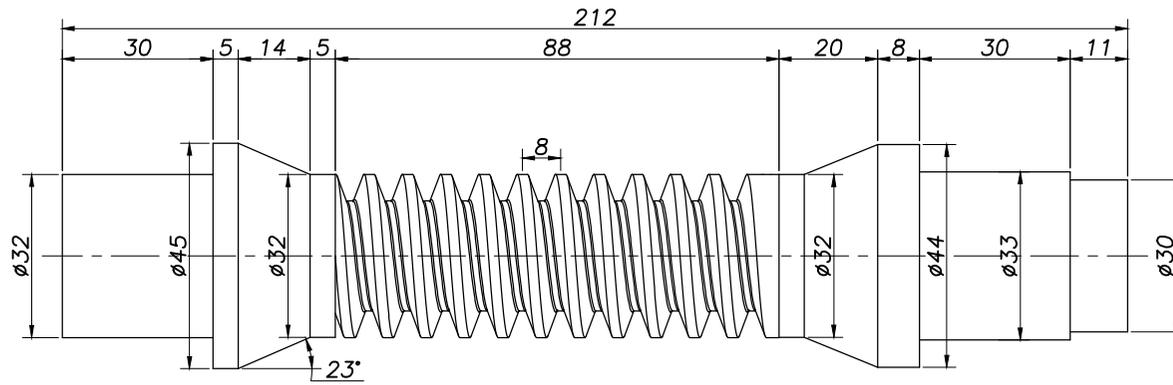
### Vista Isométrica



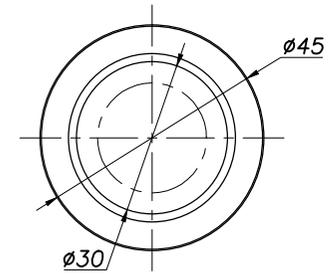
|   |  |           |                                       |
|---|--|-----------|---------------------------------------|
| FIMCP - ESPOL   |  | Fecha     | Nombre                                |
|   |  | Dibujó:   | F. TOLALA<br>J. MESA                  |
| PROYECTO:   |  | Revisó:   | J. PERA                               |
| EXAMEN COMPLEXIVO   |  | Plano No: |                                       |
|  |  | ESCALA:   | CONTIENE:<br>SIN FIN<br>DE REDUCTOR 1 |
|   |  | 1:1.5     |                                       |
|   |  | SAE 8620  | MASA (KG):<br>835 Gr.                 |

6

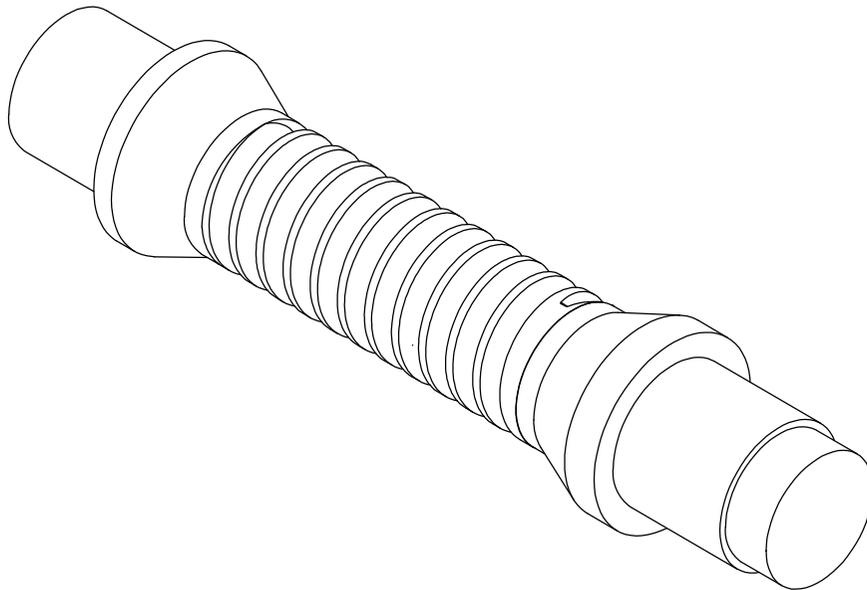
### Vista Frontal

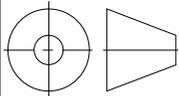


### Vista Lateral

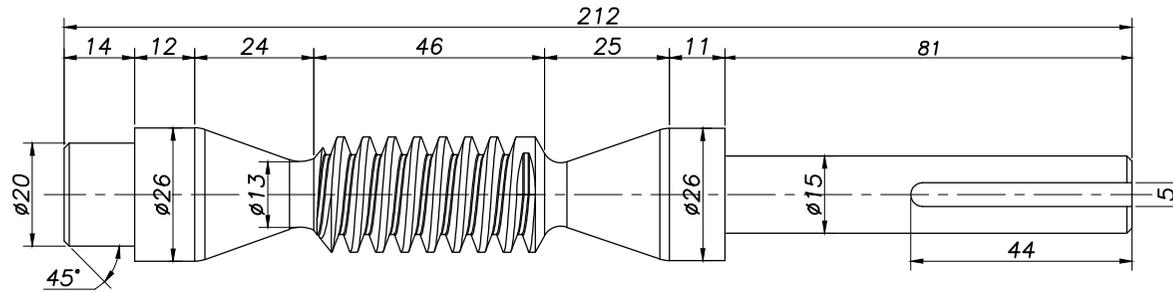


### Vista Isométrica

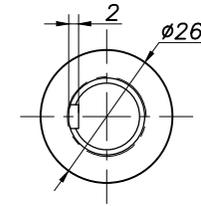


|   |  |                       |                      |
|---|--|-----------------------|----------------------|
| FIMCP - ESPOL   |  | Fecha                 | Nombre               |
|   |  | Dibujó:               | F. TIDALA<br>J. MESA |
| PROYECTO:   |  | Revisó:               | J. PERA              |
| EXAMEN COMPLEXIVO   |  | Plano No:             |                      |
|  |  | ESCALA:               | 7                    |
|   |  | 1:1.5                 |                      |
| CONTIENE:   |  | SIN FIN DE REDUCTOR 2 |                      |
| MATERIALES:   |  | Bronce Fosfórico      | MASA (KG):           |
|   |  |                       | 2.68 Kgs             |

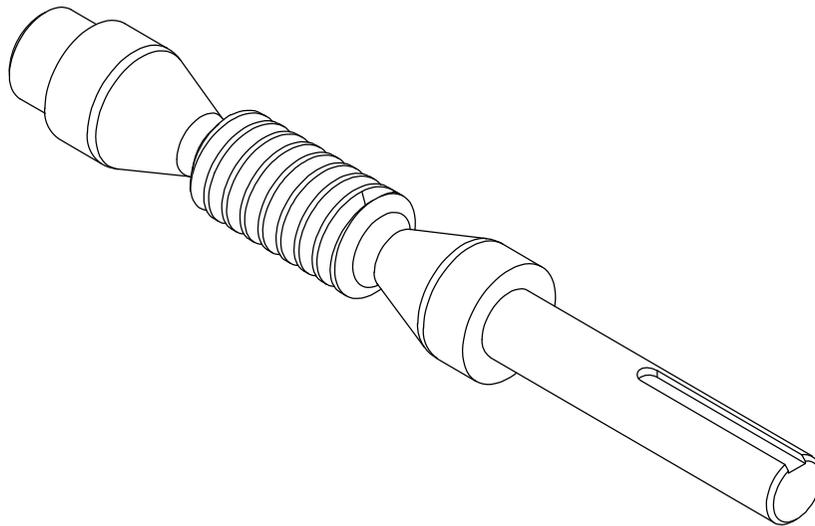
Vista Frontal



Vista Lateral



Vista Isométrica

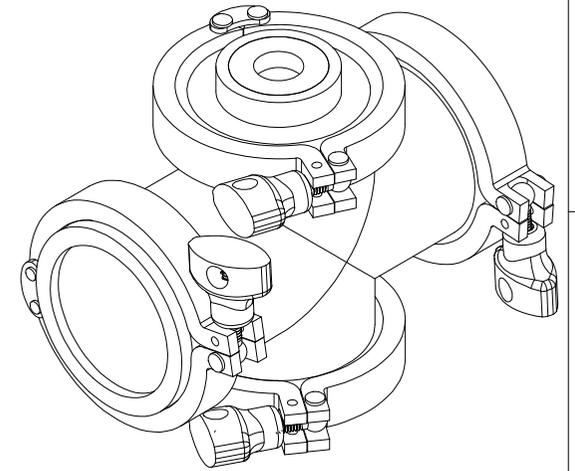
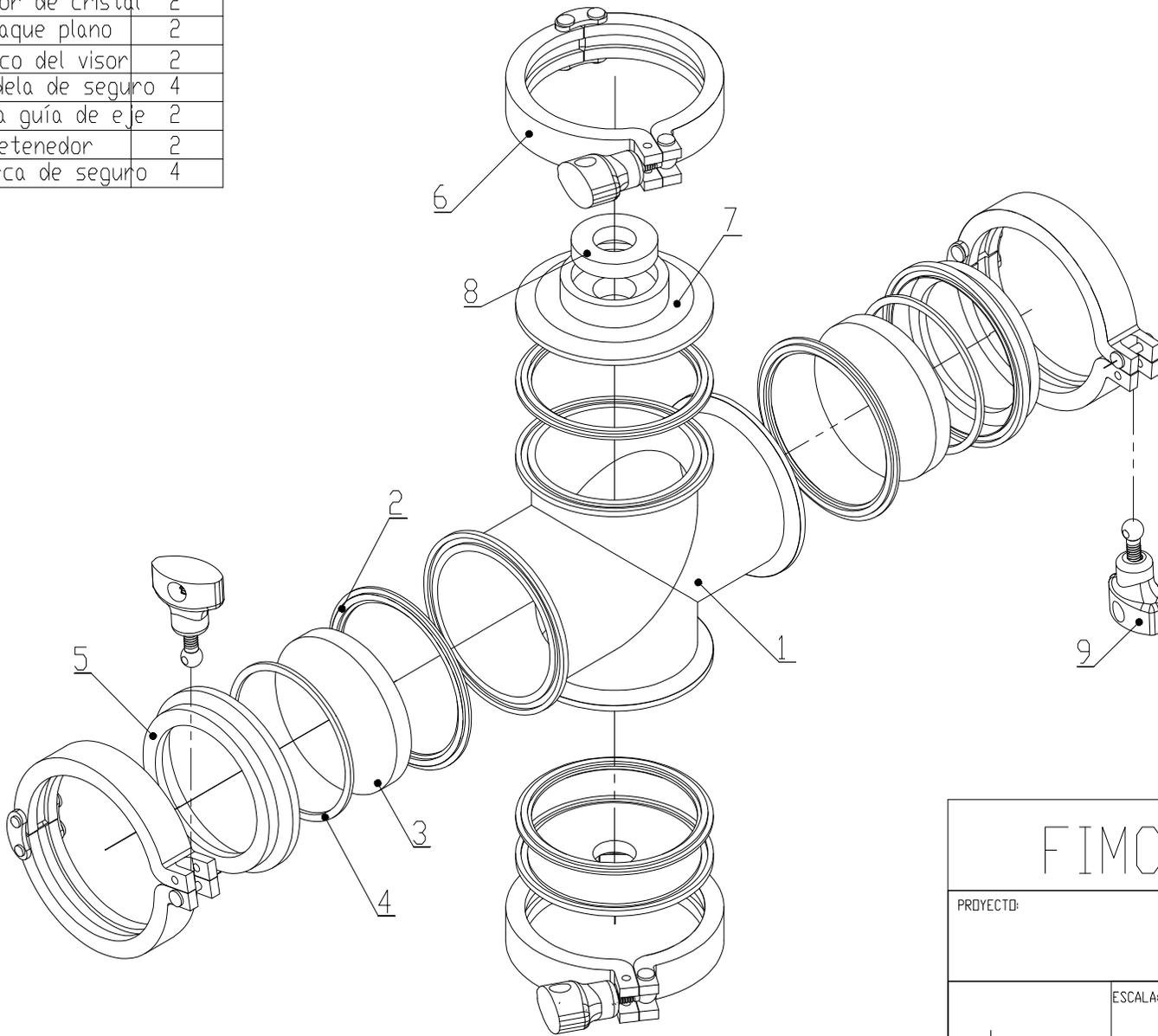


|                   |         |                          |                    |
|-------------------|---------|--------------------------|--------------------|
| FIMCP - ESPOL     |         | Fecha                    | Nombre             |
|                   |         | Dibujó:                  | F. TALA<br>J. MESA |
| PROYECTO:         |         | Revisó:                  | J. PERA            |
| EXAMEN COMPLEXIVO |         | Plano No:                |                    |
|                   | ESCALA: | CONTIENE:                |                    |
|                   | 1:1.5   | SIN FIN<br>DE REDUCTOR 3 |                    |
| MATERIALES:       |         | MASA (KG):               |                    |
| SAE 8620          |         | 466 Grs.                 |                    |

| Item | Descripción         | Cantidad |
|------|---------------------|----------|
| 1    | Cámara              | 1        |
| 2    | Empaque de neopreno | 4        |
| 3    | Visor de cristal    | 2        |
| 4    | Empaque plano       | 2        |
| 5    | Marco del visor     | 2        |
| 6    | Arandela de seguro  | 4        |
| 7    | Tapa guía de eje    | 2        |
| 8    | Retenedor           | 2        |
| 9    | Tuerca de seguro    | 4        |

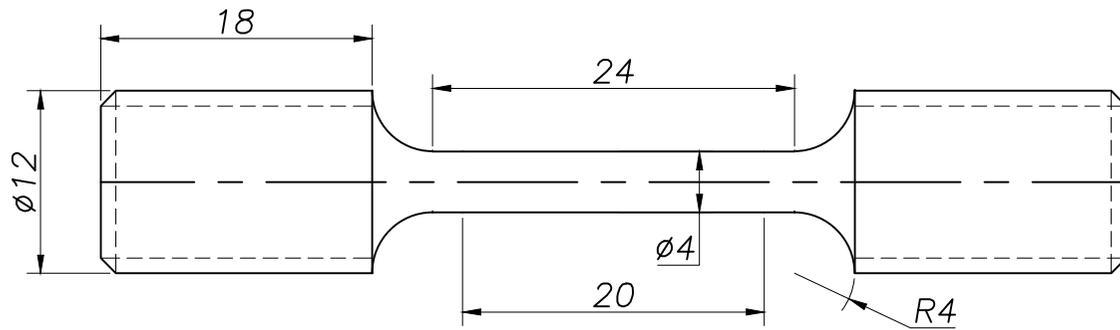
Vista Explosionada

Vista Isométrica

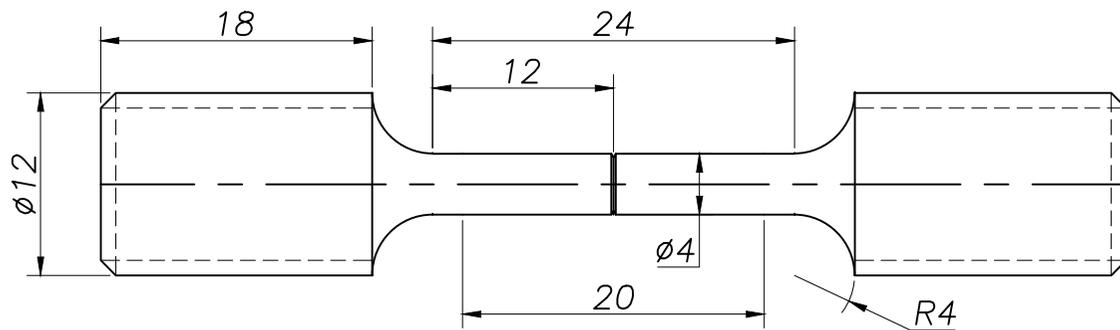


|               |  |                   |                              |
|---------------|--|-------------------|------------------------------|
| FIMCP - ESPOL |  | Fecha             | Nombre                       |
|               |  | Dibujó:           | 02/03/15 J. MESA<br>F. TOALA |
| PROYECTO:     |  | Revisó:           | 02/03/15 J. PEÑA             |
| TESIS         |  | Plano No:         |                              |
|               |  | ESCALA:           | 9                            |
|               |  | 1:3               |                              |
| CONTIENE:     |  | CÁMARA DE ENSAYOS |                              |
| MATERIALES:   |  | AISI 304          |                              |
|               |  | MASA (KG):        | 1.43 Kgs                     |

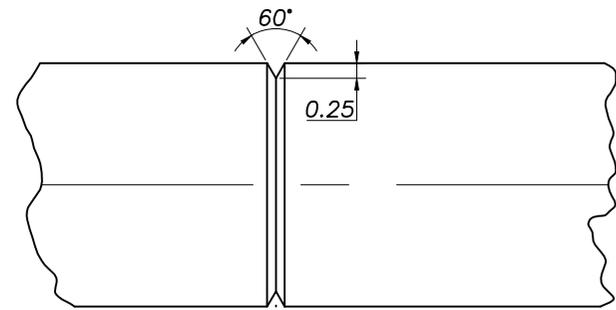
# Probeta calibrada



# Probeta calibrada con muesca

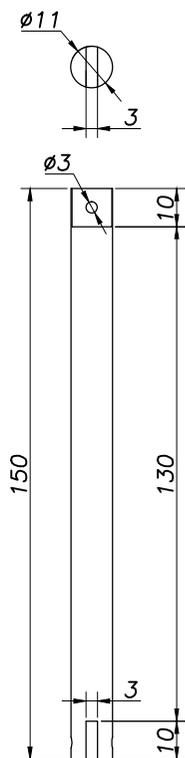


# Detalle de muesca

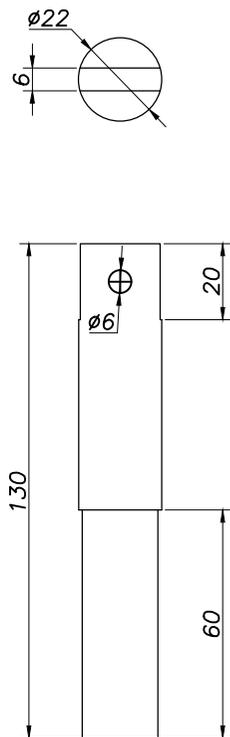


|                   |         |             |                      |
|-------------------|---------|-------------|----------------------|
| FIMCP - ESPOL     |         | Fecha       | Nombre               |
|                   |         | Dibujó:     | F. TIDALA<br>J. MESA |
|                   |         | Revisó:     | J. PERA              |
| PROYECTO:         |         | Plano No:   |                      |
| EXAMEN COMPLEXIVO |         | 10          |                      |
|                   | ESCALA: | CONTIENE:   | MASA (KG):           |
|                   | 2:1     | PROBETAS    |                      |
|                   |         | MATERIALES: | 4.72 Grs.            |
|                   |         | AISI 304    |                      |

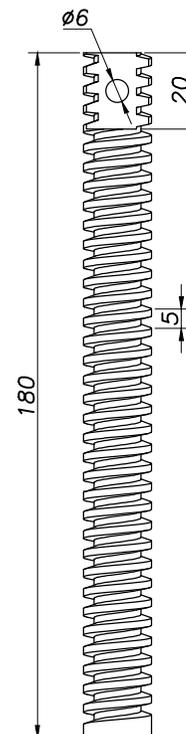
*Eje Inferior  
escala 1:2*



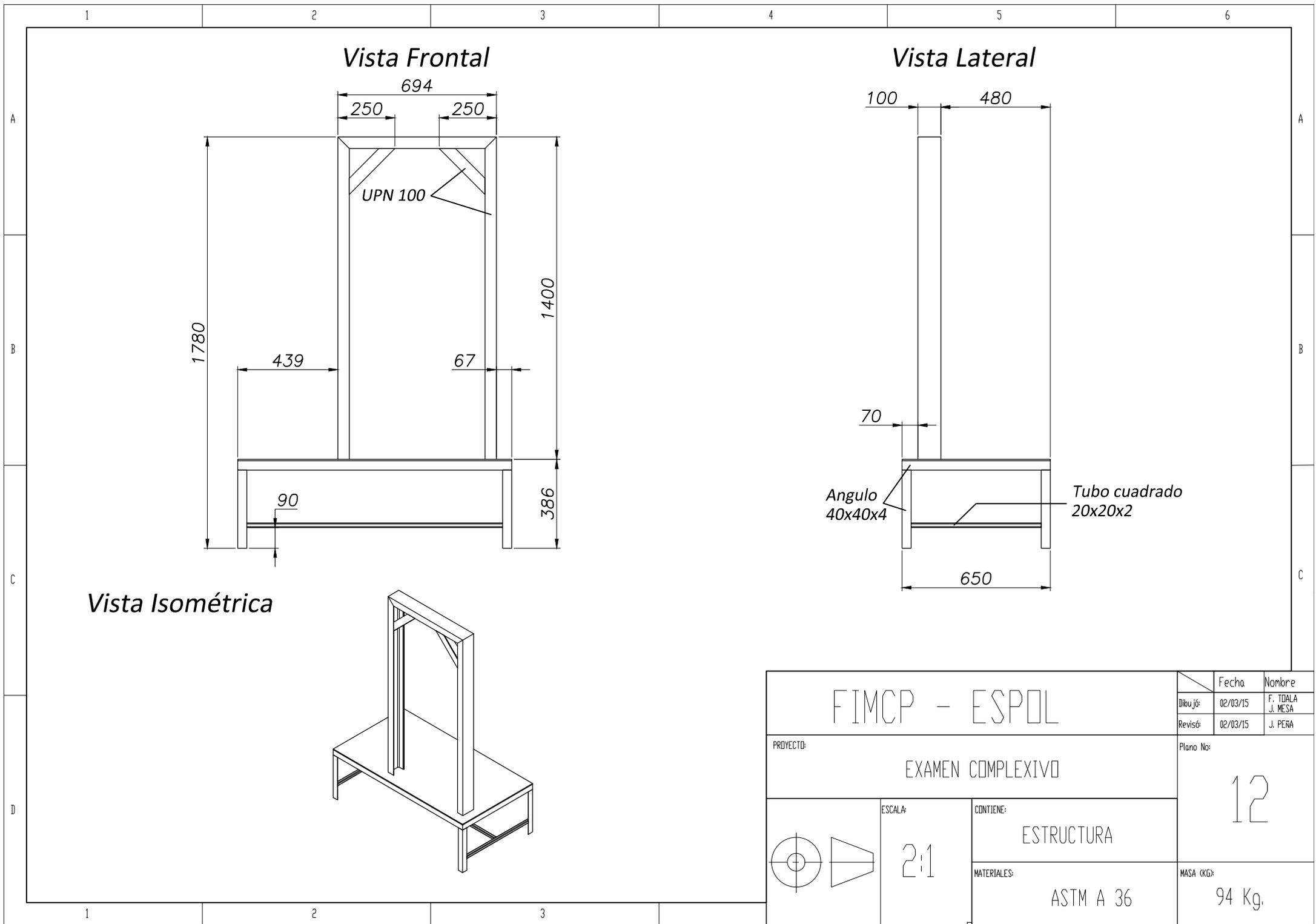
*Eje Superior  
escala 1:2*

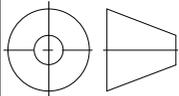


*Tornillo de potencia  
escala 1:2*



|                   |         |                                   |                    |
|-------------------|---------|-----------------------------------|--------------------|
| FIMCP - ESPOL     |         | Fecha                             | Nombre             |
|                   |         | Dibujó:                           | F. TALA<br>J. MESA |
|                   |         | Revisó:                           | J. PERA            |
| PROYECTO:         |         | Plano No:                         |                    |
| EXAMEN COMPLEXIVO |         | 11                                |                    |
|                   | ESCALA: | CONTIENE:                         |                    |
|                   | 1:2     | ELEMENTOS DEL<br>BANCO DE PRUEBAS |                    |
| MATERIALES:       |         | MASA (KG):                        |                    |
| AISI 304          |         | 4.72 Grs.                         |                    |



|   |  |           |                    |
|---|--|-----------|--------------------|
| FIMCP - ESPOL   |  | Fecha     | Nombre             |
|   |  | Dibujó:   | F. TALA<br>J. MESA |
| PROYECTO:   |  | Revisó:   | J. PERA            |
| EXAMEN COMPLEXIVO   |  | Plano No: |                    |
|  |  | ESCALA:   | 12                 |
|   |  | CONTIENE: |                    |
| MATERIALES:   |  | ASTM A 36 | MASA (KG):         |
|   |  |           | 94 Kg.             |