

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

TEMA:

“ESTUDIO DEL EFECTO DE TERMOFLUENCIA SOBRE EL HIERRO FUNDIDO GRIS PERLÍTICO COMO MATERIAL ALTERNATIVO Y SU INCIDENCIA EN LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL EN ESPEJOS DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES PARA PAN”

Trabajo de Titulación

Previo a la obtención del Grado Académico de Magíster en Diseño
Mecánico

Autor: Ingeniero Jorge Isaías Caicedo Reyes.

Director: Ingeniero Mario Edmundo Pastor Rodas, Máster.

Ambato – Ecuador

2014

Al Consejo de Posgrado de la Universidad Técnica de Ambato

El tribunal de Defensa del trabajo de titulación presidido por el Ingeniero Victor Hugo Paredes Sandoval Magíster, Presidente del Tribunal e integrado por los señores: Ingeniera Martha Esperanza Sevilla Abarca Magíster, Ingeniero Pablo Raúl Valle Velasco Magíster, Ingeniero Juan Francisco Correa Jácome Magíster, Miembros del Tribunal de Defensa, designados por el Consejo de Posgrado de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar la defensa oral del trabajo de titulación con el tema: “ESTUDIO DEL EFECTO DE TERMOFLUENCIA SOBRE EL HIERRO FUNDIDO GRIS PERLÍTICO COMO MATERIAL ALTERNATIVO Y SU INCIDENCIA EN LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL EN ESPEJOS DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES PARA PAN”, elaborado y presentado por el señor Ingeniero Jorge Isaías Caicedo Reyes, para optar por el Grado Académico de Magíster en Diseño Mecánico.

Una vez escuchada la defensa oral el Tribunal aprueba y remite el trabajo de titulación para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Victor Hugo Paredes Sandoval, Mg.
Presidente del Tribunal de Defensa

Ing. Martha Esperanza Sevilla Abarca, Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. Pablo Raúl Valle Velasco, Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. Juan Francisco Correa Jácome, M.Sc
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el trabajo de titulación con el tema “ESTUDIO DEL EFECTO DE TERMOFLUENCIA SOBRE EL HIERRO FUNDIDO GRIS PERLÍTICO COMO MATERIAL ALTERNATIVO Y SU INCIDENCIA EN LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL EN ESPEJOS DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES PARA PAN”, le corresponde exclusivamente a: Ingeniero Jorge Isaías Caicedo Reyes, Autor bajo la Dirección de Ingeniero Mario Edmundo Pastor Rodas Máster, Director del Trabajo de titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes

Autor

Ing. Mario Edmundo Pastor Rodas, M.Sc.

Director

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este trabajo de titulación como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los Derechos de mi trabajo de titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes
c.c. 160036499-4

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a Dios, a mis padres y a mis hermanas.

A Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome la fortaleza para continuar.

A mi padre Jorge y a mi madre Zoila, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora he alcanzado. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanas y familia en general.

A mis hermanas Jheimy y Diana ellas representan gran esfuerzo y tesón en momentos de decline y cansancio.

A mis compañeros y docentes por brindarme su amistad y su ayuda incondicional permitiéndome compartir junto a ellos gratos momentos en esta nueva experiencia estudiantil de mi vida.

Finalmente a Estefanía Barrionuevo, por ser una persona muy especial en mi vida, sólo me queda darle las gracias infinitas.

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, a sus Autoridades, cuerpo Docente y de Servicio por ser los gestores de esta Maestría.

A la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por su apoyo brindado con las instalaciones y equipos de los talleres y laboratorios del área de Materiales.

A mi tutor de esta Investigación, Ingeniero Mario Edmundo Pastor Rodas Máster por su don de gente e incuestionable conocimiento así como su indudable decisión de brindarme su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

PÁGINAS PRELIMINARES

| | |
|--|--------|
| Portada | i |
| Al Consejo de Posgrado de la Universidad Técnica de Ambato | ii |
| Autoría de la Investigación | iii |
| Derechos del Autor | iv |
| Dedicatoria | v |
| Agradecimiento | vi |
| Índice general de contenidos | vii |
| Índice de anexos | xiv |
| Índice de figuras | xv |
| Índice de tablas | xxiv |
| Resumen Ejecutivo | xxvii |
| Executive Summary | xxviii |
| Introducción | 1 |

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

| | | |
|---------|----------------------------|---|
| 1.1 | Tema de Investigación | 2 |
| 1.2 | Planteamiento del problema | 2 |
| 1.2.1 | Contextualización | 2 |
| 1.2.2 | Análisis Crítico | 6 |
| 1.2.3 | Prognosis | 6 |
| 1.2.4 | Formulación del Problema | 8 |
| 1.2.5 | Preguntas Directrices | 8 |
| 1.2.6 | Delimitación del problema | 9 |
| 1.2.6.1 | Delimitación temporal | 9 |
| 1.2.6.2 | Delimitación espacial | 9 |
| 1.2.6.3 | Delimitación de contenido | 9 |
| 1.3 | Justificación | 9 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.4 | Objetivos general y específicos de la investigación | 10 |
| 1.4.1 | Objetivo general | 10 |
| 1.4.2 | Objetivos específicos | 11 |

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

| | | |
|----------|---|----|
| 2.1 | Antecedentes investigativos | 12 |
| 2.1.1 | Antecedentes | 12 |
| 2.1.2 | Fundamento teórico | 13 |
| 2.1.2.1 | Introducción | 13 |
| 2.1.2.2 | Hierro Fundido Gris | 13 |
| 2.1.2.3 | Mecanismos de degradación de materiales metálicos a elevadas temperaturas | 15 |
| 2.1.2.4 | El Fenómeno de la termofluencia | 15 |
| 2.1.2.5 | La Curva de Termofluencia | 16 |
| 2.1.2.6 | Mecanismos de Deformación en Termofluencia | 18 |
| 2.1.2.7 | Fractura en Termofluencia | 22 |
| 2.1.2.8 | Procesos involucrados en la falla por Termofluencia | 23 |
| 2.1.2.9 | Relación entre la Temperatura, la Carga y la velocidad de Deformación | 25 |
| 2.1.2.10 | Efectos de la Exposición de los metales a temperaturas elevadas | 26 |
| 2.1.2.11 | Predicción de Vida en Termofluencia | 27 |
| 2.1.2.12 | Superplasticidad | 29 |
| 2.1.2.13 | Materiales para uso a Alta Temperatura | 30 |
| 2.1.2.14 | El Ensayo de Termofluencia | 32 |
| 2.2 | Fundamentación filosófica | 34 |
| 2.3 | Fundamentación legal | 35 |
| 2.4 | Categorías fundamentales | 36 |
| 2.5 | Hipótesis | 37 |
| 2.6 | Señalamiento de variables | 37 |

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 2.6.1 | Variable independiente | |
| 2.6.2 | Variable dependiente | 37 |
| 2.6.3 | Término de relación | 37 |

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1 | Enfoque | 38 |
| 3.2 | Modalidad básica de la investigación | 38 |
| 3.2.1 | De campo | 38 |
| 3.2.2 | Bibliográfico | 39 |
| 3.2.3 | Experimental | 39 |
| 3.2.4 | Aplicada | 39 |
| 3.3 | Nivel o tipo de investigación | 40 |
| 3.3.1 | Exploratoria | 40 |
| 3.3.2 | Descriptivo | 40 |
| 3.3.3 | Asociación de variables | 40 |
| 3.3.4 | Explicativo | 41 |
| 3.4 | Población y muestra | 41 |
| 3.4.1 | Población | 41 |
| 3.4.2 | Muestra | 41 |
| 3.5 | Operacionalización de las variables | 42 |
| 3.5.1 | Variable independiente | 42 |
| 3.5.2 | Variable dependiente | 43 |
| 3.6 | Recolección de la información | 44 |
| 3.7 | Procesamiento y análisis | 44 |
| 3.7.1 | Plan de procesamiento | 44 |
| 3.7.1.1 | Caracterización | 44 |
| 3.7.1.2 | Ensayos para estudiar la Degradación por Termofluencia | 45 |
| 3.7.2 | Plan de análisis e interpretación de resultados | 45 |

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

| | | |
|---------|---|----|
| 4.1 | Proceso de análisis de resultados | 47 |
| 4.2 | Diseño y construcción del equipo para los ensayo de termofluencia | 51 |
| 4.2.1 | Diseño y construcción. equipo de tensión (tracción de los especímenes) | 51 |
| 4.2.1.1 | Diseño del equipo de tensión | 51 |
| 4.2.1.2 | Catálogo del equipo de tensión | 53 |
| 4.2.1.3 | Construcción del equipo de tensión | 54 |
| 4.2.2 | Diseño y construcción del horno de resistencias eléctricas | 56 |
| 4.2.2.1 | Diseño del horno de resistencias eléctricas | 56 |
| 4.2.2.2 | Catálogo del sistema de calentamiento y control de temperatura | 57 |
| 4.2.2.3 | Construcción y montaje del horno eléctrico | 58 |
| 4.3 | Especímenes para los ensayos de termofluencia | 59 |
| 4.3.1 | Dimensiones de los especímenes | 59 |
| 4.3.2 | Extracción de los especímenes para termofluencia | 62 |
| 4.4 | Determinación de las temperaturas y tensión para los ensayos de termofluencia | 64 |
| 4.4.1 | Ensayos de esfuerzo-deformación a temperatura ambiente del acero ASTM A36 | 65 |
| 4.4.2 | Ensayos de Esfuerzo-Deformación a temperatura ambiente de la fundición gris | 66 |
| 4.4.3 | Ensayos de esfuerzo-deformación en el acero ASTM A36 a elevadas temperaturas | 68 |
| 4.4.4 | Ensayos de esfuerzo-deformación en la fundición gris a elevada temperaturas | 71 |
| 4.5 | Presentación de resultados | 76 |
| 4.6 | Obtención de datos de los ensayos | 79 |
| 4.6.1 | Ensayos de termofluencia en el acero ASTM A36 | 79 |

| | |
|--|-----|
| 4.6.2 Ensayos metalográficos. Especímenes sometidos a termofluencia. Acero ASTM A36 | 86 |
| 4.6.3 Ensayos de microdureza. Especímenes sometidos a termofluencia. Acero ASTM A36 | 92 |
| 4.6.4 Oxidación térmica y estudio de degradación de la microestructura en el acero ASTM A36 | 96 |
| 4.6.4.1 Ensayos metalográficos. Oxidación térmica, acero ASTM A36 | 99 |
| 4.6.4.2 Ensayos de Dureza Brinell en los cupones sometidos a Oxidación térmica. Acero ASTM A36 | 101 |
| 4.6.4 Ensayos de termofluencia en la fundición gris | 103 |
| 4.6.5 Ensayos metalográficos. Especímenes sometidos a termofluencia. Fundición gris | 110 |
| 4.6.5.1 Caracterización del grafito | 111 |
| 4.6.5.2 Morfología del grafito posterior a los ensayos de termofluencia | 112 |
| 4.6.5.3 Metalografía fundición gris | 114 |
| 4.6.6 Ensayos de microdureza. Especímenes sometidos a termofluencia. Fundición gris | 116 |
| 4.6.7 Oxidación térmica y estudio de degradación de la microestructura en la fundición gris | 119 |
| 4.6.7.1 Caracterización del grafito. Oxidación Térmica | 122 |
| 4.6.7.2 Ensayos Metalográficos. Oxidación térmica fundición gris | 124 |
| 4.6.7.3 Ensayos de Dureza. Oxidación térmica fundición gris | 126 |
| 4.6.8 Análisis comparativo de datos y obtención de resultados | 127 |
| 4.6.8.1 Análisis metalográfico de los ensayos de termofluencia | 128 |
| 4.6.8.2 Análisis metalográfico de los ensayos de Oxidación Térmica | 129 |
| 4.6.8.3 Curvas de Deformación vs Tiempo obtenidas de los ensayos de termofluencia (acero ASTM A36) | 130 |
| 4.6.8.4 Curvas de Deformación vs Tiempo obtenidas de los ensayos de termofluencia (Fundición gris perlítica) | 131 |

| | |
|---|-----|
| 4.6.8.5 Otros aspectos a considerar en los ensayos de Termofluencia efectuados con el acero ASTM A36 | 133 |
| 4.6.8.6 Otros aspectos a considerar en los ensayos de Termofluencia efectuados en la Fundición gris perlítica laminar | 134 |
| 4.6.8.7 Ensayos de Esfuerzo vs Deformación. Acero ASTM A36 | 136 |
| 4.6.8.7 Ensayos de Esfuerzo vs Deformación. Fundición gris | 137 |
| 4.6.8.9 Microdureza a varias distancias a partir de la fractura. Acero ASTM A36 | 139 |
| 4.6.8.10 Microdureza a varias distancias a partir de la fractura. Fundición gris perlítica | 139 |
| 4.6.8.11 Pérdida de Peso vs Temperatura. Oxidación térmica. Acero ASTM A36 | 140 |
| 4.6.8.12 Pérdida de Peso vs Temperatura. Oxidación térmica. Acero ASTM A36 | 140 |
| 4.6.8.13 Ensayos de Dureza-Oxidación térmica. Acero ASTM A36. | 141 |
| 4.6.8.13 Ensayos de Dureza-Oxidación térmica. Fundición gris | 142 |

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|---------------------|-----|
| 5.1 Conclusiones | 143 |
| 5.2 Recomendaciones | 145 |

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

ESTUDIO PARA LA FABRICACIÓN DE ESPEJOS PARA LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS MAGNUM HPT 1005-INOX POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LA FUNDICIÓN

| | |
|----------------------------------|-----|
| 6.1 Datos informativos | 146 |
| 6.2 Antecedentes de la propuesta | 147 |
| 6.3 Justificación | 149 |
| 6.4 Objetivos | 150 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 6.4.1 | Objetivo general | 150 |
| 6.4.2 | Objetivos específicos | 150 |
| 6.5 | Análisis de factibilidad | 150 |
| 6.5.1 | Análisis tecnológico | 151 |
| 6.6 | Fundamentación | 151 |
| 6.7 | Etapas requeridas para la técnica de la fundición | 152 |
| 6.7.1 | Diseño del espejo | 153 |
| 6.7.2 | Dimensiones y configuración del espejo | 153 |
| 6.7.3 | Construcción del modelo | 154 |
| 6.7.3.1 | La Variación de volumen en la solidificación | 154 |
| 6.7.4 | Dimensionamiento del modelo | 156 |
| 6.7.5 | Diseño del sistema de alimentación | 158 |
| 6.7.5.1 | Partes de un Sistema de Alimentación | 160 |
| 6.7.5.2 | Relación de secciones en un sistema de alimentación | 162 |
| 6.7.5.3 | Métodos para abordar el dimensionamiento del sistema de alimentación | 162 |
| 6.7.6 | Cálculo de la carga del horno de inducción para obtener el espejo por medio de la técnica de la fundición | 176 |
| 6.7.7 | Preparación de la materia prima | 179 |
| 6.7.8 | Preparación de la mezcla para moldear | 180 |
| 6.7.9 | Fabricación del molde con modelo | 182 |
| 6.7.10 | Fundición de la carga en el horno | 187 |
| 6.7.11 | Calentamiento de la cuchara de colado | 188 |
| 6.7.12 | Calentamiento de molde | 189 |
| 6.7.13 | Colado del metal | 190 |
| 6.7.14 | Desmoldeo de las cajas | 192 |
| 6.7.15 | Limpieza y acabado | 193 |
| 6.8 | Seguridad para los trabajadores en las fundiciones | 193 |
| 6.8.1 | Medidas preventivas de higiene y seguridad | 194 |
| 6.9 | Metodología | 195 |
| 6.10 | Valoración económica por espejo obtenido | 195 |
| 6.10.1 | Valoración económica por espejo de fundición gris perlítica | 195 |

| | |
|---|-----|
| 6.10.2 Valoración económica por espejo de acero ASTM A36 | 196 |
| 6.10.2.1 Costos de materia prima | 196 |
| 6.11 Comparación de costos entre espejos fabricados con fundición gris y con acero ASTM A36 | 198 |
| 6.12 Administración | 198 |
| 6.13 Previsión de la evaluación | 202 |
| Bibliografía | 202 |
| Anexos | 204 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | | |
|---------|--|-----|
| Anexo 1 | Planos del Equipo de Tensión | 206 |
| Anexo 2 | Planos del sistema de calentamiento | 217 |
| Anexo 3 | Registro del material ASTM A36 IPAC | 224 |
| Anexo 4 | Registro del material Fundición gris | 227 |
| Anexo 5 | Metalografías a varias distancias a partir de la fractura ASTM A36 | 229 |
| Anexo 6 | Metalografías a varias distancias a partir de la fractura Fundición gris. | 234 |
| Anexo 7 | Plano del espejo actualmente empleado ASTM A36 | 247 |
| Anexo 8 | Plano del espejo propuesto Fundición gris | 249 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Curva ideal de Termofluencia | 16 |
| Figura.2.2 Efecto del incremento de la Temperatura o la Carga en la forma de la curva de Termofluencia | 17 |
| Figura.2.3 Ascenso de Vacancias | 18 |
| Figura.2.4 Movimiento de Ascenso y Deslizamiento | 19 |
| Figura.2.5 Flujo Difusivo. Los átomos fluyen en dirección contraria produciendo un alargamiento en la pieza | 20 |
| Figura.2.6 Velocidad de Termofluencia vs Tamaño de grano. A) Aleación 77Cu-22 Zn-1 Sn; La TE es aproximadamente 250°C. B) Aleación 59Cu-40Zn-1Sn; La TE es aproximadamente 175°C. Arriba de la temperatura equicohesiva, los metales de grano grueso son ms resistentes que los metales de grano fino. Lo opuesto es cierto a bajas temperaturas. | 21 |
| Figura 2.7 Resistencia de los Límites de Grano vs Temperatura. A bajas temperaturas los límites de grano son más resistentes que el cristal debido a su alta concentración de defectos, pero a altas temperaturas la relación se invierte | 22 |
| Figura 2.8 Fractura Intergranular | 23 |
| Figura 2.9 Formación de cavidades tipo W | 24 |
| Figura 2.10 Formación de cavidades tipo R | 24 |
| Figura 2.11 Métodos para Predicción de Vida en Termofluencia | 28 |
| Figura 2.12 Curva de superplasticidad | 29 |
| Figura 2.13 Resistencia a la Termofluencia dependiendo la forma del grano | 31 |
| Figura 2.14 Mecanismo para el Ensayo de Termofluencia | 32 |
| Figura 2.15 Esfuerzo Aplicado vs Tiempo de Ruptura | 33 |
| Figura 2.16 Equipo para ensayo de fluencia a elevada temperatura | 33 |
| Figura 2.17 Esquema de la extracción de la probeta de tensión plana con sección reducida | 34 |
| Figura 2.18 Esquema y dimensiones de la probeta utilizada para los | 34 |

| | |
|--|----|
| ensayos de tracción ASTM E8 | |
| Figura.4.1 Diagrama de flujo para secuencia de ensayos y recolección de datos | 50 |
| Figura.4.2. Mallado de la estructura del equipo de tensión en el programa ANSYS | 52 |
| Figura 4.3 Catálogo del Equipo de Tensión | 53 |
| Figura 4.4 Calibración de la gata hidráulica en la Máquina Universal Tinus Olsen Capacidad 100000 Kg | 54 |
| Figura.4.5 Gráfica Presión vs Fuerza. Calibración del manómetro acoplado a la gata hidráulica | 56 |
| Figura 4.6 Catálogo del sistema de calentamiento y control de temperatura | 57 |
| Figura.4.7 Equipo de termofluencia que se empleará en las experimentaciones totalmente ensamblado | 58 |
| Figura.4.8 Esquema del espécimen plano de sección reducida para los ensayos | 59 |
| Figura.4.9 Dimensiones calculadas para los especímenes | 60 |
| Figura.4.10 Dimensiones calculadas para los especímenes con la ayuda del Nomograma | 61 |
| Figura.4.11 Disposición de las probetas para su extracción de la lámina.A36 | 62 |
| Figura.4.12 Disposición de las probetas para su extracción de la plancha fundida | 63 |
| Figura.4.13 Mecanizado de especímenes (fundición gris) | 63 |
| Figura.4.14 Gráfica Esfuerzo vs Deformación. Temperatura ambiente. A36 (Suministro) | 66 |
| Figura.4.15 Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Temperatura ambiente. Fundición gris | 67 |
| Figura 4.16 Gráfica Esfuerzo vs Deformación a elevadas temperaturas. Acero ASTM A36 | 69 |
| Figura.4.17 Gráfica Esfuerzo Máximo vs Temperatura de Ensayo. ASTM A36. | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura.4.18 Deformación presentada en el Esfuerzo Máximo vs Temperatura de Ensayo. ASTM A36. | 70 |
| Figura 4.19 Gráfica Esfuerzo vs Deformación a elevadas temperaturas. Fundición Gris | 72 |
| Figura 4.20 Gráfica Esfuerzo Máximo vs Temperatura de Ensayo. Fundición Gris | 73 |
| Figura 4.21 Deformación vs Temperatura de Ensayo. Fundición Gris | 73 |
| Figura.4.22 Esquema de la carga constante aplicada en los ensayos de termofluencia | 74 |
| Figura 4.23 Máquina de termofluencia durante la realización del ensayo a 500°C, carga aplicada al espécimen de 2448 Kgf. Acero ASTM A36. | 80 |
| Figura 4. 24 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T500°C | 81 |
| Figura 4.25 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T550°C | 81 |
| Figura 4.26 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T600°C | 82 |
| Figura 4.27 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T650°C | 82 |
| Figura 4.28 Espécimen de acero A36 fracturado luego del ensayo de termofluencia a 550°C. Formación del cuello de botella (copa y cono)-Reducción de la sección | 83 |
| Figura 4.29 Espécimen de acero A36 fracturado luego del ensayo de termofluencia a 600°C. Formación del cuello de botella (copa y cono)-Mayor reducción de la sección con respecto al ensayo a 550°C | 84 |
| Figura 4.30 Espécimen de acero A36 fracturado luego del ensayo de termofluencia a 650°C. Formación del cuello de botella (copa y cono)-Mayor reducción de la sección con respecto al ensayo a 600°C | 84 |
| Figura 4. 31 Gráfica Temperatura de Ensayo vs Duración del ensayo. Termofluencia ASTM A36 | 85 |
| Figura 4.32 Gráfica Temperatura de Ensayo vs % Reducción de Área. Ensayo de Termofluencia ASTM A36. | 85 |
| Figura 4.33 Gráfica Temperatura de Ensayo vs % Alargamiento. | 86 |

| | |
|---|-----|
| Ensayo de Termofluencia. ASTM A36 | |
| Figura 4.34 Medición de la longitud de 30 granos. Distancia 2mm de la fractura. A36 T 500 .Promedio 13,889 μm . | 88 |
| Figura 4.35 Medición del ancho de 30 granos. Distancia 2mm de la fractura. A36 T 500 .Promedio 8,179 μm . | 88 |
| Figura 4.36 Distancia 100 μm de la fractura. Fotomicrografía a 400X. El espécimen no llegó a fracturarse, no se observa formación de cavidades. Acero A36. Atacada con Nital 4. T 500°C | 90 |
| Figura 4.37 Distancia 100 μm de la fractura. Fotomicrografía a 400X. Se observan cavidades esféricas. Acero A36. Atacada con Nital 4. T 550°C. | 90 |
| Figura.4.38 Distancia 100 μm de la fractura. Fotomicrografía a 400X. Se observan cavidades alargadas en la deirección de la carga aplicada. Acero A36. Atacada con Nital 4. T 600°C. | 91 |
| Figura 4.39 Distancia 100 μm de la fractura. Fotomicrografía a 400X. Se observan cavidades mucho mas grandes alargadas en la dirección de la carga aplicada. Acero A36. Atacada con Nital 4.T650°C | 92 |
| Figura 4.40 Microdurómetro. Obtención de Microdureza. Termofluencia ASTM A36. | 93 |
| Figura 4.41 Gráfica de Microdureza vs Distancia a partir de la fractura. Especímenes sometidos a termofluencia. ASTM A36. | 95 |
| Figura 4.42 Gráfica de los registros de pérdida de peso en los ensayos de Oxidación Térmica. ASTM A36. | 98 |
| Figura 4.43 Metalografía. Oxidación térmica A36 T500°C. se observa la presencia de ferrita y perlita laminar, atacado con nital 4, 400X. | 99 |
| Figura 4.44 Metalografía. Oxidación térmica A36 T550°C. se observa la descomposición de la perlita laminar, atacado con nital 4, 400X. | 99 |
| Figura 4.45 Metalografía. Oxidación térmica A36 T600°C. se observa perlita en los bordes de los granos, atacado con nital 4, | 100 |

| | |
|---|-----|
| 400X. | |
| Figura 4.46 Metalografía. Oxidación térmica A36 T650°C. Se observa la perlita globular en los límites de grano, atacado con nital 4, 400X | 100 |
| Figura 4.47 Gráfica de datos de los ensayos de dureza. Oxidación térmica 500°C. ASTM A 36 | 102 |
| Figura 4.48 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T500°C | 104 |
| Figura4.49 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T550°C | 105 |
| Figura 4.50 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T600°C. | 105 |
| Figura 4.51 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T 650°C | 106 |
| Figura 4.52 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 500°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura | 107 |
| Figura 4.53 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 550°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura | 107 |
| Figura 4.54 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 600°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura | 108 |
| Figura 4 55 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 650°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura | 108 |
| Figura 4. 56 Gráfica Temperatura de ensayo vs Duración del ensayo. Termofluencia Fundición gris | 109 |
| Figura 4.57 Gráfica Temperatura de ensayo vs % Reducción de Área. Termofluencia Fundición gris | 109 |
| Figura 4.58 Gráfica Temperatura de ensayo vs % Alargamiento. Termofluencia Fundición gris | 110 |
| Figura 4.59 Caracterización del grafito en estado de suministro, 100X. | 111 |
| Figura 4.60 Carcterización del grafito. Termofluencia 500°C.100X | 112 |
| Figura 4.61 Carcterización del grafito. Termofluencia 550°C.100X | 112 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figura 4.62 | Carcterización del grafito. Termofluencia 600°C.100X | 113 |
| Figura 4.63 | Carcterización del grafito. Termofluencia 650°C.100X | 113 |
| Figura 4.64 | Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 500°C.400X | 114 |
| Figura 4.65 | Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 550°C. 400X | 114 |
| Figura 4.66 | Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 600°C. 400X | 115 |
| Figura 4.67 | Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 650°C. 100X | 115 |
| Figura 4.68 | Gráfica de Microdureza vs Distancia a partir de la fractura. Especímenes sometidos a termofluencia. Fundición gris | 118 |
| Figura .4.69 | Cupones para el ensayo de oxidación térmica | 119 |
| | Cupones sometidos a oxidación térmica. Fundición gris | |
| Figura 4.70 | Cupones extraídos de la mufla luego del ensayo de Oxidación Térmica. Fundición gris | 119 |
| Figura 4.71 | Gráfica de los registros de pérdida de peso obtenidos en los ensayos de Oxidación Térmica. Fundición gris | 122 |
| Figura.4.72 | Metalografía. Oxidación Térmica. Fundición Gris T500°C. Sin ataque. 100X | 123 |
| Figura 4.73 | Metalografía.Oxidación Térmica. Fundición Gris T550°C. Sin ataque. 100X | 123 |
| Figura 4.74 | Metalografía.Oxidación Térmica. Fundición Gris T600°C. Sin ataque. 100X | 123 |
| Figura 4.75 | Metalografía.Oxidación Térmica. Fundición Gris T650°C. Sin ataque. 100X | 124 |
| Figura 4.76 | Oxidación Térmica. Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x T500°C. Comienzan aparecer lagunas de cementita | 124 |
| Figura.4.77 | Oxidación Térmica. Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x T550°C Las lagunas de cementita se intensifican | 125 |
| Figura 4.78 | Oxidación Térmica.Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x T600°C La matriz es casi totalmente ferrítica | 125 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.79 Oxidación Térmica. Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x T650°C. Matriz totalmente ferrítica | 126 |
| Figura 4.80 Gráfica de los datos de los ensayos de dureza. Oxidación Térmica. Fundición gris | 127 |
| Figura 4.81 Recopilación de las fotomicrografías. Ensayos de termofluencia. Acero ASTM A36-Fundición gris perlítica | 128 |
| Figura 4.82 Recopilación de las fotomicrografías. Ensayos de Oxidación térmica. Acero ASTM A36-Fundición gris perlítica | 129 |
| Figura 4.83 Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Acero ASTM A36 | 130 |
| Figura 4.84 Ampliación. Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Acero ASTM A36 | 131 |
| Figura 4.85 Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Fundición gris | 131 |
| Figura 4.86 Ampliación. Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Fundición gris | 132 |
| Figura 6.1 Hornos Magnum HPT 1005G fabricado por INOX | 146 |
| Figura 6.2 Diagrama de flujo de las etapas para la fundición del Espejo | 153 |
| Figura 6.3 Dimensiones y configuración del espejo para la cámara de combustión de los hornos Magnum HPT 1005 fabricado por INOX | 154 |
| Figura 6.4 Contracción del metal durante su solidificación y enfriamiento | 155 |
| Figura 6.5 Dimensiones del modelo de madera. Medidas en mm | 157 |
| Figura 6.6 Modelo de madera para la obtención del espejo | 158 |
| Figura 6.7 Partes de un sistema de alimentación a) con tasa de colada, b) con embudo de colada | 160 |
| Figura 6.8 Relación continua de las secciones del sistema de alimentación presurizado | 162 |
| Figura 6.9 Punto 1 y 2 en el sistema de alimentación para aplicar la Ecuación de Bernoulli | 165 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.10 Para el cálculo de la altura de presión del metal durante el llenado, (a) colada a sifón, (b) colada por el plano de separación del molde | 166 |
| Figura 6.11 Velocidades de colado | 172 |
| Figura 6.12 Relación de secciones del sistema de alimentación | 173 |
| Figura 6.13 Corrección de la relación de secciones del sistema de alimentación | 175 |
| Figura 6.14 Esquema de la configuración del sistema de alimentación y espejo a fundir | 176 |
| Figura 6.15 Materia prima para la fundición (Chatarra). Desechos de fundición gris | 179 |
| Figura 6.16 Máquina para realizar la mezcla de la arena | 182 |
| Figura 6.17 Construcción del molde. a) Colocación del molde en la caja. Ponemos la arena de contacto b) Completamos con arena la caja c) Compactación de la arena d) Extracción de exceso. Alisado de arena | 183 |
| Figura 6.17 e) Volteo de la caja inferior. f) Retoque de configuración de la arena. g) Colocación de la caja superior h) Aspergeo de sílice en la arena. Caja inferior. i) Soplado del exceso de sílice ubicado en el área del molde de madera j) Ubicación del bebedero, canales de distribución y alimentación. Colocación de arena | 184 |
| Figura 6.17 k) Llenamos la caja superior de arena l) Compactación de la arena. Caja superior m) Extracción del bebedero n) Retirar el exceso de arena. Alisado de la arena caja superior o) Separar la caja superior p) Moldeamos los rebosaderos o registros de colado. Caja inferior | 185 |
| Figura 6.17 q) Moldeamos los rebosaderos o registros de colado. Caja superior. r) Extracción del talón de caída. Retoque de arena. s) Extracción del modelo de madera. t) Retoque de la arena en la configuración del espejo. u) Aspergeo de sílice en la arena. Caja superior e inferior. v) Calentamiento de las cajas | 186 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.18 Carga y fusión de la chatarra | 187 |
| Figura 6.19 Extracción de la escoria. Homogenización de la colada | 187 |
| Figura 6.20 a) Calentamiento de la cuchara de colado. b) Vertido de colada desde el horno de fundición a la cuchara de colado | 188 |
| Figura 6.21 Ampliación del diagrama de equilibrio Fe-C, en la zona de interés | 189 |
| Figura 6.22 Calentamiento de las caras de la caja que tomaran contacto con la colada | 190 |
| Figura 6.23 Colado de los moldes de arena. Retención de escoria | 192 |
| Figura 6.24 Desmoldeo de las cajas. 24 horas de haber realizado el colado | 192 |
| Figura 6.25 Obtención del espejo de fundición gris perlítica | 193 |
| Figura 6.26 a) Corte con CNC de plasma. Seteo de coordenadas. b) Corte con CNC de plasma. Seteo de coordenadas. c) Corte concluido. d) Limpieza de rebabas. Espejo listo para ser instalado | 197 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Energías de activación para Termofluencia | 20 |
| Tabla 2.2 Valores de la constante C para algunas aleaciones | 28 |
| Tabla 4.1. Registro de la calibración del manómetro instalado en la gata hidráulica | 55 |
| Tabla 4.2 Cálculo de las dimensiones del espécimen según la Figura 4.8 | 60 |
| Tabla 4.3 Dimensiones en mm del espécimen para los ensayos según Figura 4.8 | 60 |
| Tabla 4.4 Resultados de los ensayos de tracción. Acero ASTM A36 | 65 |
| Tabla 4.5 Resultado de los ensayos de tensión fundición gris | 67 |
| Tabla 4.6 Registro de datos del ensayo de Esfuerzo-Deformación a la temperatura de 500°C. ASTM A36. | 68 |
| Tabla 4.7 Esfuerzo Máximo y Deformación de los especímenes a las temperaturas de interés. ASTM A36. | 69 |
| Tabla 4.8 Registro de datos del ensayo de Esfuerzo-Deformación a la temperatura de 500°C. Fundición gris | 71 |
| Tabla 4.9 Esfuerzo Máximo y Deformación de los especímenes a las temperaturas de interés. fundición gris | 72 |
| Tabla 4.10 Resumen esfuerzos máximos del acero A36 y de la fundición | 75 |
| Tabla 4.11 Ensayos de termofluencia a realizarse en el acero ASTM A36. | 77 |
| Tabla 4.12 Ensayos de termofluencia a realizarse en la fundición gris perlítica | 78 |
| Tabla 4.13 Identificación ensayo # 1. ASTM A36 | 79 |
| Tabla 4.14 Registro de datos obtenidos de los ensayos de termofluencia efectuados a varias temperaturas en el acero ASTM A36. | 80 |
| Tabla 4.15 Identificación ensayo # 13. ASTM A36. | 86 |
| Tabla 4.16 Relación longitud/ancho de grano vs Ensayo de | 89 |

| | |
|---|-----|
| termofluencia. Distancia 2mm a partir de la fractura | |
| Tabla 4.17 Identificación ensayo # 25. ASTM A36. | 92 |
| Tabla 4.18 Resumen de los datos de los ensayos de microdureza. ASTM A36 | 94 |
| Tabla 4.19 Identificación ensayo # 25. ASTM A36 | 96 |
| Tabla 4.20 Registro de la pérdida de peso en los ensayos de oxidación térmica. ASTM A36. | 97 |
| Tabla 4.21 Resultados. Ensayos de dureza Brinell. Oxidación térmica. ASTM A 36 | 102 |
| Tabla 4.22 Identificación ensayo # 49. Fundición gris | 103 |
| Tabla 4.23 Registro de datos obtenidos de los ensayos de termofluencia. Efectuados a varias temperaturas en la fundición gris | 104 |
| Tabla 4.24 Identificación ensayo # 49. Fundición gris | 110 |
| Tabla 4.25 Identificación ensayo # 49. Fundición gris | 116 |
| Tabla 4.26 Registro de los datos obtenidos en los ensayos de microdureza. Termofluencia fundición gris | 117 |
| Tabla 4.27 Registro de la pérdida de peso en los ensayos de oxidación térmica. Fundición gris | 121 |
| Tabla 4.28 Resultados Ensayos de dureza Brinell. Oxidación térmica. Fundición gris | 126 |
| Tabla 4.29 Deformaciones instantáneas en los ensayos de termofluencia a las temperaturas de interés | 132 |
| Tabla 6.1 Características del horno Magnum HPT 1005G-INOX | 147 |
| Tabla 6.2 Contracción lineal de algunas fundiciones | 156 |
| Tabla 6.3 Dimensiones del modelo de madera | 156 |
| Tabla 6.4 Propiedades físicas del hierro líquido | 167 |
| Tabla 6.5 Cálculo de carga para la obtención de espejos de fundición gris | 178 |
| Tabla 6.6 Propiedades de la arena utilizada para la elaboración de los moldes | 181 |
| Tabla 6.7 Costos comparativos. Espejo fabricado a partir de fundición gris y fabricado con acero A36 | 198 |

Tabla6.8 Valores económicos requeridos durante el desarrollo de esta investigación 199

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

Tema: “ESTUDIO DEL EFECTO DE TERMOFLUENCIA SOBRE EL HIERRO FUNDIDO GRIS PERLÍTICO COMO MATERIAL ALTERNATIVO Y SU INCIDENCIA EN LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL EN ESPEJOS DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES PARA PAN”

Autor: Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes

Director: Ing. Mario Edmundo Pastor Rodas, M.Sc.

Fecha: Septiembre 19 del 2013.

RESUMEN EJECUTIVO

Existe un problema latente a nivel de nuestras industrias dedicadas a la fabricación de hornos de tipo industrial para pan, puesto que los espejos de la cámara de combustión tienden a fallar en tiempos muy cortos, evidenciando que son vulnerables a degradarse a nivel microestructural por el fenómeno denominado termofluencia. En este trabajo se incursiona en el estudio de termofluencia de dos materiales, uno de ellos es el acero ASTM A36 que es el material actualmente utilizado en la empresa, y por otro lado, la fundición gris, que es el material propuesto para de acuerdo a los resultados que se obtenga producto de las experimentaciones y caracterización microestructural y análisis de dureza determinar si es o no factible emplearlo como material alternativo. Los resultados muestra que el acero ASTM A36 se deforma considerablemente presentando agrietamiento frente al fenómeno de termofluencia así como también mayor tendencia a oxidarse térmicamente por la tanto mayor degradación microestructural con respecto a la fundición gris a temperaturas que bordean los 500°C.

Descriptor: Acero A36, caracterización, degradación, espejos, falla, fundición gris, microestructural, problema, termofluencia, vulnerables.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

**Tema: “ESTUDIO DEL EFECTO DE TERMOFLUENCIA SOBRE EL
HIERRO FUNDIDO GRIS PERLÍTICO COMO MATERIAL
ALTERNATIVO Y SU INCIDENCIA EN LA DEGRADACIÓN
MICROESTRUCTURAL EN ESPEJOS DE LA CÁMARA DE
COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES PARA PAN”**

Autor: Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes

Director: Ing. Mario Edmundo Pastor Rodas, M.Sc.

Fecha: Septiembre 19 del 2013.

EXECUTIVE SUMMARY

There is a latent problem in the Ecuadorian industries that manufacture industrial bakery ovens, as the mirrors of the combustion chamber tend to fail in a short time. This makes clear that these elements are vulnerable to degrade at microstructural level due to a phenomenon called thermofluence. This work aims to address the thermofluence study of two materials: the ASTM A36 steel, which is the material currently used by enterprises, and the grey cast iron, which is the proposed material, so that, according to the results obtained from experiments, microstructural characterization and analysis of hardness, we could determine whether or not it is feasible to use it as an alternative material. The results show that the ASTM A36 steel deforms considerably, presenting cracking in response to the phenomenon of thermofluence. It also shows a greater tendency to rust thermally due to the greater microstructural degradation with respect to grey cast iron at temperatures around 500 degrees Celsius.

Key words: Steel A36, characterization, degradation, mirrors, fails, grey cast iron, microstructural, problem, creep, vulnerable.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tiene como fin dar una alternativa de solución al problema que presentan los espejos de las cámaras de combustión en los hornos industriales para pan. Se ha evidenciado que estos presentan una degradación a nivel microestructural, lo que conlleva a un deterioro de sus propiedades hasta llegar a la falla del material en tiempos cortos en referencia a la vida útil del equipo. El material empleado actualmente en la fabricación de los espejos en la Fabrica INOX es ASTM A36, se propone reemplazarlo por la fundición gris perlítica laminar. Para fundamentar aquello se requiere hacer una serie de ensayos que permitan comparar el comportamiento de los dos materiales (empleado-propuesto) frente al fenómeno (termofluencia) que van a ser expuestos en la cámara de combustión de los hornos. Debido a la falta de disponibilidad del equipo necesario para los ensayos en primera instancia se procede al diseño y construcción del equipo que nos permita realizar los ensayos de termofluencia.

Luego se procede a realizar ensayos metalográficos y de microdureza a varias distancias de interés a partir de la fractura en las probetas extraídas de los especímenes sometidos a termofluencia. Los resultados encontrados orientan la necesidad de preparar cupones para exponerlos a oxidación térmica definiendo parámetros que permitan determinar comparativamente el comportamiento de estos dos materiales. Concientes de que para el diseño y construcción de equipos y elementos mecánicos que trabajan a elevadas temperaturas y esfuerzos es un reto y una necesidad conocer la resistencia y propiedades de los materiales a emplear, se aportan curvas de Esfuerzo vs Deformación de los dos materiales frente al fenómeno de termofluencia. Los resultados recopilados permiten determinar el comportamiento de los dos materiales ensayados frente al fenómeno de termofluencia. Finalmente determinada la mejor opción se propone la construcción de los espejos con el material que presento mejor comportamiento frente al fenómeno de termofluencia.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 TEMA

“ESTUDIO DEL EFECTO DE TERMOFLUENCIA SOBRE EL HIERRO FUNDIDO GRIS PERLÍTICO COMO MATERIAL ALTERNATIVO Y SU INCIDENCIA EN LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL EN ESPEJOS DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS INDUSTRIALES PARA PAN ”

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 CONTEXTUALIZACIÓN

Las exposiciones durante largos tiempos de trabajo a temperaturas y tensiones elevadas, dan paso a cambios en la estructura de un material, produciendo la generación y crecimiento de defectos internos y consecuente deterioro o degradación de las propiedades funcionales del mismo. Estos cambios en las propiedades de los materiales metálicos, los cuales controlan la vida de los componentes industriales son causados principalmente por los siguientes procesos microestructurales: precipitación y transformación de carburos, descomposición de las áreas de perlita, segregación de especies químicas, cambios en la morfología de los carburos y cambios en la composición química de la (matriz). Tales variaciones estructurales son producto de diversos mecanismos de daño entre los cuales se encuentra la termofluencia (creep) [1].

La termofluencia es la deformación plástica de un material bajo una carga constante. La deformación transcurre a través del tiempo y se presenta aun a esfuerzos menores que el esfuerzo de cedencia. Después de un periodo de tiempo, la termofluencia culmina en la fractura del material.

Actualmente se sabe que la termofluencia es causada por procesos difusivos que son térmicamente activados, es decir, que se activan por calor; aunque, al ser estrictos, la termofluencia ocurre a cualquier temperatura pero a altas temperaturas (aproximadamente 0,5 del punto de fusión), se manifiesta de manera significativa, por lo que la termofluencia es considerada un fenómeno de alta temperatura y por transcurrir a través del tiempo, es considerada un proceso dinámico y como factor limitante en el diseño, es importante considerar la temperatura máxima de operación del material [1].

Muchos equipos, instalaciones y componentes mecánicos, están sometidos al fenómeno de termofluencia, algunos de estos son: hornos, intercambiadores de calor, turbinas, calderas, reactores, etc, los cuales forman parte de grandes e importantes industrias del sector alimenticio, químico, agrícola, hospitalario, energético e incluso turístico. Todos estos equipos son generalmente grandes y costosos y su falla por lo general arroja pérdidas económicas importantes, de ahí que la degradación del material a elevadas temperaturas es objeto de extensos estudios científicos y es muy importante a nivel industrial [2].

En el mundo de los ingenieros y científicos afines a la ciencia de los materiales, ya sean productores o usuarios de este tipo de equipos que trabajan a elevadas tensiones y temperatura, es un reto la necesidad de evaluar la integridad de los materiales que componen dichos equipos.

El tiempo de vida útil diseñado para los principales componentes de estos equipos está generalmente entre 20-30 años en condiciones estándares

de operación. Diversas fuentes consideran que es posible en la práctica continuar la operación de forma segura y económica hasta unos 50-60 años, aplicando un sistemático análisis de la integridad estructural del material mediante adecuados planes de mantenimiento [3-4].

La Fundición Gris Perlítica actualmente se emplea para la fabricación de un sin número de piezas, desplazando incluso al acero que era utilizado tradicionalmente en la fabricación de algunas piezas. Las piezas de fundición al ser más fáciles de fabricar son más baratas que las de acero. El resultado, son fundiciones de buena resistencia a la corrosión por gases calientes y sulfurosos, buena resistencia mecánica a temperaturas mayores a las que producen ablandamiento o termofluencia rápida en los aceros y de una amplia aplicación a nivel industrial [5].

Simultáneamente, bajo condiciones de temperatura el material va a sufrir transformaciones en su microestructura, las cuales pueden ser anticipadas mediante un conocimiento previo del (diagrama TTT). Las características de estos cambios dependen esencialmente de la composición química del material, y las condiciones de operación (temperatura y tensión) a las que está sometido. En nuestro caso, el estudio del efecto de la termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico, nos va a permitir evaluar la degradación microestructural producida en las fases presentes, la presencia de daño a nivel microestructural y su incidencia sobre la dureza [6].

En el Ecuador no se ha realizado una contundente investigación al respecto, pero hay que ser muy conscientes de que en las industrias nacionales dedicadas a la elaboración del pan, se encuentran operando hornos industriales de fabricación nacional cuyos espejos de la cámara de combustión (atmosférica) elaborados en acero ASTM A36 fallan en tiempos relativamente cortos de operación, por ello se requiere de un estudio concienzudo de la degradación que se produce en determinadas

condiciones de operación, para proponer un material alternativo y así mejorar la calidad y confiabilidad del equipo sin que adoptar esta nueva alternativa afecte su costo final, permitiéndole ser competitivo en el mercado nacional e internacional, en tal virtud se puede mencionar que los fabricantes de estos equipos industriales (hornos) se han despreocupado por completo sobre este tema, es por ello que la investigación planteada se fundamenta en la búsqueda de una solución a un problema específico latente en una actividad económica que va en crecimiento, buscando un nivel de calidad que le permita mantenerse a la par con las grandes industrias internacionales.

Recopilando información tenemos que a nivel industrial, el sector metalmeccánico ha sido uno de los pilares económicos del país que más se ha desarrollado; sin embargo, competitivamente este sector como muchos otros sectores industriales, se están viendo seriamente afectados por la Gestión que hacen de su Conocimiento, sus Activos Intelectuales y su Propiedad Intelectual, continuando con la investigación podemos mencionar que no hay información disponible sobre trabajos similares realizados en universidades nacionales y de las universidades latinoamericanas poco se conoce, un ejemplo es el trabajo realizado por Morales [7].

Finalmente, recordemos que desde tiempos muy remotos el hombre ha trabajado los metales, desarrollando materiales y herramientas, que han marcado el progreso de los pueblos. En la actualidad, la industria metalmeccánica afronta el desafío de adecuarse a las exigencias del mundo globalizado. Por ello se anhela que la Universidad Técnica de Ambato por intermedio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica con su programa de Maestría en Diseño Mecánico desarrolle algunas investigaciones sobre la degradación de los metales por termofluencia “fenómeno Creep” mediante proyectos y tesis de grado.

1.2.2 ANÁLISIS CRÍTICO

En nuestro país, a nivel de industrias y de universidades no se ha realizado un estudio del efecto del fenómeno de la termofluencia sobre materiales ferrosos tales como: Acero ASTM A36 y el Hierro Fundido Gris Perlítico a fin de determinar su degradación microestructural, en gran parte esta triste realidad se debe por no disponer del equipo requerido ni la infraestructura necesaria para este tipo de ensayos, y por otro lado debido a que analizar este tipo de degradación resulta más complejo que otro tipo de fenómeno. Lo que implica que incluso en las escuelas de nivel superior el conocimiento sobre el tema sea muy superficial, siendo este totalmente teórico.

Es un hecho que la degradación microestructural a elevada temperatura se suscita a nivel de todas las industrias que operan sus equipos bajo estas condiciones, específicamente en los espejos de la cámara de combustión de los hornos industriales para la elaboración del pan se manifiesta este fenómeno y por ello debe ser producto de varios temas de estudios e investigación, esto a su vez conducirá a la necesidad de un conocimiento e investigación de los diversos mecanismos de degradación que pueden estar presentes en un componente sujeto a elevadas temperaturas y cargas de operación.

Como la tendencia en las industrias actuales debido a la demanda e innovación de nuevos productos es alargar los horarios de trabajo y aumentar la presión y temperatura de servicio en estos equipos, la situación se hace cada vez más crítica, y la necesidad de este estudio se torna urgente.

1.2.3 PROGNOSIS

Dentro de las modernas industrias alimenticias nacionales dedicadas a la

elaboración del pan, encontramos en su mayoría equipos (hornos) fabricados en el Ecuador los mismos que juegan un papel muy importante en el proceso de producción. Al hablar específicamente sobre los espejos de la cámara de combustión (atmosférica) de estos hornos en particular encontramos que actualmente son construidos con acero ASTM A36 material sometido al fenómeno de termofluencia (creep), frente a este mecanismo de degradación el material empleado se ha visto afectado a tal punto de colapsar y muchas de las ocasiones en muy corto tiempo de operación ocasionando la paralización del equipo y con ello la de todo el proceso de producción.

Para los ingenieros y científicos afines al área de materiales es un reto y una necesidad evaluar la integridad de los materiales que componen los equipos sometidos a termofluencia para con ello establecer parámetros fundamentados de diseño, operación y mantenimiento basados en el comportamiento y las características del material frente al fenómeno para evitar las fallas y la paralización de los equipos que muchas de las veces son catastróficas desde el punto de vista de la integridad humana encargada de la operación y mantenimiento del equipo así como también desde el punto de vista económico.

De igual forma se manifiesta que de conformidad a información emitida por el Banco Central del Ecuador refiriéndose a la industria en general, esta presenta un diagnóstico desalentador y pobre en cuanto se refiere a investigación de nuevos planes y alternativas de innovación, lo cual genera una gran preocupación teniendo en cuenta la importancia económica y social que representa este sector productivo en el país.

Por todo lo mencionado, es importante dar una alternativa de solución a este sector productivo ya que si se deja relegada esta investigación sobre el fenómeno de termofluencia que afecta a los espejos de la cámara de combustión de los hornos, las industrias dedicadas a la elaboración del

pan seguirán siendo víctimas de este fenómeno y como la demanda actual en estas industrias requiere más bien de mayores temperaturas y esfuerzos de operación en sus procesos la necesidad de este estudio se torna urgente, tomando en cuenta además, que la nueva alternativa no debe encarecer el equipo para que sea competitivo en el mercado nacional e internacional en precio, calidad y confiabilidad.

1.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Se podrá utilizar como material alternativo el hierro fundido gris perlítico en la fabricación de espejos para la cámara de combustión de hornos industriales para pan por sus características microestructurales frente al fenómeno de termofluencia?

1.2.5 PREGUNTAS DIRECTRICES

¿Cómo se puede analizar la degradación microestructural a elevada temperatura del hierro fundido gris perlítico para determinar sus condiciones de operación?

¿Pueden determinarse parámetros que influyen en la degradación microestructural del hierro fundido gris perlítico para determinar el efecto y relación con el fenómeno de termofluencia?

¿Se podrá mejorar las condiciones de operación y los criterios de los planes de mantenimiento de los hornos industriales para elaborar pan con la implementación del estudio de la secuencia de las transformaciones microestructurales y de las fases presentes en el material?

¿Será importante conocer la secuencia con que ocurren las transformaciones del metal para establecer una relación entre estas y la magnitud del daño del componente?

¿Será la caracterización y los ensayos de dureza quienes permitan determinar la degradación microestructural del hierro fundido gris perlítico en los diferentes estadios de análisis?

1.2.6 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.6.1 Delimitación temporal

La realización del presente estudio: efecto de termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico para determinar su degradación microestructural esta previsto realizarse desde octubre del 2012 hasta septiembre del 2013.

1.2.6.2 Delimitación espacial

La investigación necesaria para el estudio del efecto de la termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico para determinar la degradación microestructural se realizará en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato ubicada en la ciudad de Ambato Campus Huachi Chico.

1.2.6.3 Delimitación de contenido

El estudio del efecto de la termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico se centrará en el análisis de la degradación microestructural que sufre el material. Las materias que están relacionadas con nuestro tema de investigación son las siguientes: Diseño Mecánico de Equipos, Materiales para Ingeniería y Diagnóstico Industrial.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este trabajo de investigación se ve justificado por varios

aspectos: uno de ellos es, disponer de gran información sobre el efecto de la termofluencia en la degradación microestructural del hierro fundido gris perlítico, se dispondrá de un análisis microestructural del material frente a este fenómeno, además de gráficas que relacionen la dureza, los porcentajes de Perlita laminar, globular y de ser posible el porcentaje de microcavidades que se presenten en el material a una determinada tensión y bajo la aplicación de una temperatura elevada en varios períodos de tiempo.

Otro aspecto fundamental es la innovación que tendrá el estudio refiriéndonos al equipo que será necesario construir para realizar los ensayos, ya que si bien es cierto a nivel mundial existen estos equipos para realizar este tipo de ensayos pero, lamentablemente las Escuelas de educación superior en nuestro país no cuentan con este equipo, el mismo que al avanzar en el desarrollo de este trabajo investigativo lo construiremos.

Con esta investigación se desarrollará la investigación científica y tecnológica como un aporte a la solución de uno de los problemas de las industrias alimenticias dedicadas a la elaboración del pan que hacen uso de hornos cuya cámara de combustión (atmosférica o de tiro forzado) opera a elevadas temperaturas con el fin de contribuir a la operación segura y confiable para impulsar el desarrollo sustentable del país.

1.4 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico para estimar la posibilidad de utilizarlo como un material alternativo en la producción de espejos para la cámara de combustión de hornos industriales para pan.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el proceso de degradación microestructural a elevada temperatura del hierro fundido gris perlítico para encontrar las apropiadas condiciones de operación.
- Analizar los parámetros que influyen en la degradación microestructural del hierro fundido gris perlítico para determinar el efecto y relación con el fenómeno de termofluencia.
- Evaluar las mejores condiciones de operación del espejo de los hornos industriales para pan y criterios de planes de mantenimiento con la implementación de información de la secuencia de las transformaciones microestructurales y de las fases presentes en el hierro fundido gris perlítico en los distintos estadios de análisis.
- Establecer la secuencia con que ocurren las transformaciones del hierro fundido gris perlítico para determinar una relación entre estas y la magnitud del daño del material.
- Determinar la degradación microestructural del hierro fundido gris perlítico por medio de la caracterización y ensayos de dureza en cada uno de los estadios de degradación analizados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1.1 ANTECEDENTES

Existen muy pocos trabajos relacionados al estudio de la termofluencia para determinar la degradación microestructural de materiales metálicos, entre ellos mencionamos los más importantes:

Toft y Marsden estudiaron las transformaciones producidas en aceros ferríticos sometidos a creep y encontraron una evolución en la esferoidización de los carburos. Estos autores atribuyeron el daño estructural a este fenómeno [8].

Neubauer y Wedel analizaron la evolución de las microcavidades, en aceros sometidos a creep y encontraron que estos defectos se agrupan para luego orientarse en una determinada dirección y finalmente colapsar, conduciendo a la fractura del material [9].

Dobrzanski y Hernas analizaron la evolución de la microestructura y las transformaciones de fase en aceros del tipo 1Cr-0.5Mo expuestos a elevadas temperaturas y largos tiempos, en servicio. Estos autores pudieron determinar una relación entre la vida residual del material (resistencia al creep) y la evolución de la composición de los diferentes carburos [10].

2.1.2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.2.1 Introducción

Es necesario para la investigación tener claro varios conceptos y descripciones que se presenta a continuación:

2.1.2.2 Hierro Fundido Gris

Se denomina así a las fundiciones que solidifican y enfrían según el diagrama hierro-grafito. Una fundición sigue este diagrama en condiciones de enfriamiento lento. En la práctica se le añade elementos grafitizantes como el Si, Al, Ni, Cu. Estos elementos actúan de la siguiente manera:

- 1.- Diluyendo las agrupaciones atómicas de Fe-C impidiendo su solidificación conjunta.
- 2.- Afinidad, el Fe tiene más afinidad por estos elementos que por el C y este solidifica en forma de grafito.

El hierro fundido gris es uno de los materiales ferrosos más empleados en la construcción mecánica (95% de la producción actual es fundición gris) y su nombre se debe a la apariencia de su superficie al romperse. Esta aleación ferrosa contiene en general más del 2% de carbono y más del 1% de silicio. Una característica distintiva del hierro gris es que el carbono se encuentra en general como grafito, adoptando formas irregulares descritas como "hojuelas". Este grafito es el que da la coloración gris a las superficies de ruptura de las piezas elaboradas con este material.

Las propiedades físicas y en particular las mecánicas varían dentro de amplios intervalos respondiendo a factores como la composición química, rapidez de enfriamiento después del vaciado, tamaño y espesor de las

piezas, práctica de vaciado, tratamiento térmico y parámetros microestructurales como la naturaleza de la matriz y la forma y tamaño de las hojuelas de grafito.

- Un enfriamiento rápido:
 - Cementita + Perlita (fundición blanca)
- Un enfriamiento moderadamente rápido:
 - Grafito + Cementita + Perlita (fundición atruchada)
- Un enfriamiento moderado:
 - Grafito + Perlita (fundición gris perlítica)
- Enfriamiento moderadamente lento:
 - Grafito + Ferrita + Perlita (Fundición gris)
- Enfriamiento lento:
 - Grafito + Ferrita (Fundición gris Ferrítica)

La Fundición gris es una aleación común en la ingeniería debido a su relativo bajo costo y buena maquinabilidad, lo que es resultado de las bandas de grafito que lubrican el corte y la viruta. También tiene buena resistencia al desgaste, debido a que las "hojuelas" de grafito sirven de autolubricante.

La fundición gris posee una rotura frágil, es decir, no es dúctil, por lo que no presenta deformaciones permanentes importantes antes de llevarla a su tensión de rotura: no es tenaz. Al tener una alta tensión de rotura, pero baja ductilidad, casi toda su curva de tensión alargamiento presente muchas zonas en donde las tensiones son proporcionales a las deformaciones: tiene mucha resiliencia, es decir, capacidad de absorber trabajo en el periodo elástico o de deformaciones no permanentes. El silicio promueve una buena resistencia a la corrosión e incrementa la fluidez de la colada de fundición, la fundición gris es considerada, generalmente, fácil de soldar [5].

2.1.2.3 Mecanismos de degradación de materiales metálicos a elevadas temperaturas

Para seleccionar el material a usar en el diseño es importante conocer las características y resistencia del mismo, pero disponer de un estudio de degradación microestructural es también de mucha importancia principalmente si será usado en condiciones rigurosas de temperatura y tensión. Para ello es necesario conocer los mecanismos de degradación a los cuales es sometido el material en su operación, uno de ellos es el de termofluencia [2].

Para entender el fenómeno de la termofluencia así como la naturaleza de su ensayo y poder determinar su efecto en la degradación microestructural del hierro fundido gris perlítico, es necesario conocer este mecanismo de degradación desde su concepto.

2.1.2.4 El Fenómeno de la Termofluencia

La necesidad de caracterizar materiales metálicos que trabajen durante largos periodos de tiempo a temperaturas elevadas debido a sus múltiples aplicaciones ingenieriles tal como los son: generadores de vapor, hornos industriales, turbinas de gas y de vapor para la generación de energía eléctrica, equipo de procesos químicos, motores de combustión interna y los modernos procesos de producción, han conducido a los científicos y tecnólogos a realizar exhaustivos estudios para la obtención y análisis de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos en tales condiciones.

Un metal bajo carga constante puede sufrir una deformación plástica progresiva dependiente del tiempo que se puede presentar aún a cargas menores que el límite elástico, a esto se le conoce como fluencia lenta.

La fluencia es muy importante en proyectos de ingeniería que operan a elevadas temperaturas, también llamada como Termofluencia, es causada por procesos difusivos que son activados por calor y aunque la termofluencia ocurre a cualquier temperatura, es considerada como un fenómeno de alta temperatura por presentarse aquí de manera significativa. Es un proceso dinámico por transcurrir a través del tiempo y como factor limitante en el diseño, es la temperatura máxima de operación de operación de un metal [1].

2.1.2.5 La Curva de Termofluencia

Para la obtención de la curva característica de termofluencia se experimenta con una muestra de tensión sometida a una carga constante suficiente para generar una deformación de termofluencia generalizada a una temperatura por encima de la mitad de la temperatura absoluta de fusión de un metal. Con ello se obtiene un cambio en la longitud de la muestra, frente a incrementos de tiempo, generando así la curva de termofluencia, como lo podemos ver en la siguiente Figura 2.1:

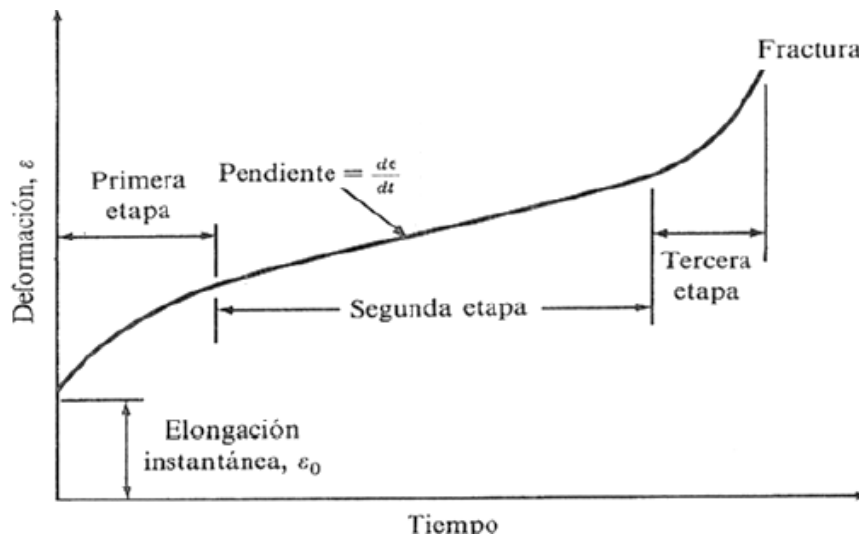


Figura 2.1 Curva Ideal de Termofluencia [10].

Fuente: Ciencia e Ingeniería de los Materiales Autor: Donald R. Askeland., Tercera Edición, Editorial Thomson, pág. 157.

En la curva de termofluencia primero se produce una rápida e instantánea elongación. Luego pasa a la primera etapa donde el metal se endurece por deformación para soportar la carga aplicada y la rapidez de la termofluencia (pendiente de la curva ($d\varepsilon/dt$)) decrece con el tiempo a medida que el endurecimiento por deformación se hace cada vez más elevado. Después tiene lugar una segunda etapa donde la rapidez de la termofluencia se mantiene constante como resultado del equilibrio alcanzado entre los mecanismos de generación de dislocaciones y los mecanismos de aniquilación de dislocaciones. La Termofluencia secundaria o termofluencia de estado estacionario es la etapa más importante ya que en ella ocurre la mayor parte de la deformación a alta temperatura. El mecanismo de deformación en la etapa II se conoce como flujo difusivo. Finalmente, en la tercera etapa se presenta un aumento exponencial en la rapidez de la termofluencia con el tiempo hasta la fractura donde los cambios en la microestructura promueven una mayor deformación con menor endurecimiento por deformación. Se forma así el cuello y en ésta sección de la muestra ocurre un daño en los límites de grano, que consiste en la formación de cavidades, que al crecer e interconectarse provocan la fractura intergranular del material.

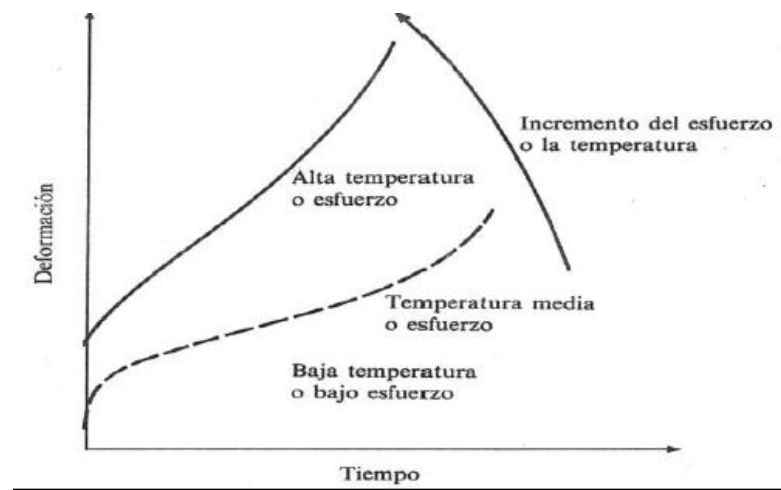


Figura 2.2 Efecto del Incremento de la Temperatura o la Carga en la Forma de la Curva de Termofluencia [10].

Fuente: Ciencia e Ingeniería de los Materiales Autor: Donald R. Askeland., Tercera Edición, Editorial Thomson pág. 158.

La forma de la curva de termofluencia depende de la carga aplicada (tensión) y de la temperatura. Cargas y Temperaturas elevadas aumenta la rapidez de la termofluencia. A temperaturas inferiores a $0.4T_f$ (temperatura de fusión) y cargas bajas los metales presentan fatiga primaria pero prácticamente ninguna fatiga secundaria ya que la temperatura es demasiado baja para la recuperación de la temperatura difusional. Observar la Figura 2.2.

2.1.2.6 Mecanismos de Deformación en Termofluencia

Los mecanismos de deformación en termofluencia dependen de forma principal de la temperatura: Se han reconocido al menos dos mecanismos de deformación predominantes en la termofluencia. A temperaturas relativamente bajas (0.2 a $0.3T_f$) predominan los mecanismos de deslizamiento, pero a temperaturas mayores (0.5 a $0.8T_f$) predominan los mecanismos basados en la difusión y el deslizamiento de los límites de grano. [2].

a) Termofluencia por Dislocaciones

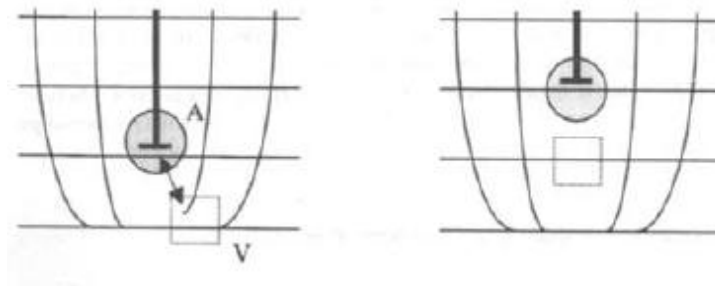


Figura 2.3 Ascenso de Vacancias [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, , pág. 232.

Cuando una dislocación se mueve dentro de un cristal, como el caso de la Figura 2.3, debe vencer la resistencia de la red y pasar los obstáculos que

encuentre en su camino, tales obstáculos frenan o anclan las dislocaciones impidiendo su avance; sin embargo, a alta temperatura la activación térmica ayuda a pasar los obstáculos mediante un proceso de ascenso de dislocaciones. Cuando la vacancia V intercambia su lugar con el átomo A situado en la línea de dislocación de borde ésta “asciende” una posición atómica en la red. Si otra vacancia se vuelve a mover hacia el átomo A, el proceso se repite. De esta manera una dislocación puede moverse de forma indefinida fuera de su plano de deslizamiento.

Cuando la dislocación brinca un obstáculo por ascenso, el deslizamiento puede continuar hasta encontrar otro obstáculo y el proceso se repite; así la deformación por dislocaciones en termofluencia es una combinación de ascenso y deslizamiento. Observar Figura 2.4.

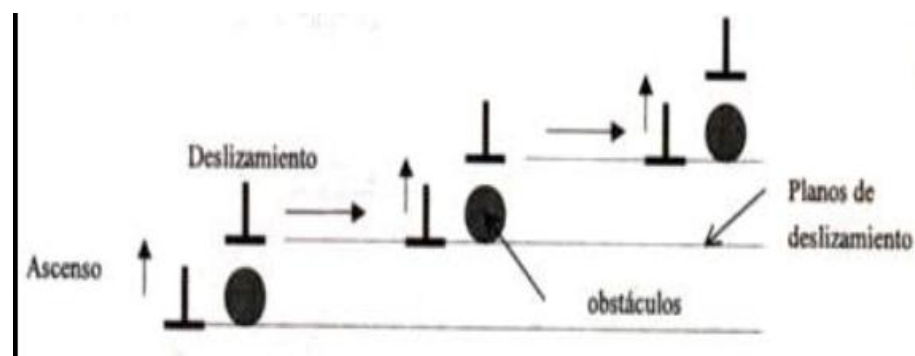


Figura 2.4 Movimiento de Ascenso y Deslizamiento [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág. 233.

La energía de activación para la termofluencia (debida al ascenso de dislocaciones) es igual a la de autodifusión, en otras palabras, la deformación se efectúa por deslizamiento, pero el factor que controla la cantidad de deslizamiento es el ascenso de las dislocaciones sobre los obstáculos. En la siguiente Tabla podemos ver valores de la energía de activación para algunos metales.

Tabla 2.1 Energías de activación para Termofluencia [2].

| Material | ΔH (kJ/mol) |
|-----------------|---------------------------------------|
| Tungsteno | 630 |
| Plomo | 110 |
| Aluminio | 150 |
| Cobre | 205 |
| Fierro alfa | 240 |
| Fierro gama | 280 |
| Níquel | 300 |

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág. 227.

A bajas temperaturas las fronteras de grano producen interferencia al movimiento de las dislocaciones, también son fuentes de átomos y de vacancias las cuales permiten a la dislocación escalar durante la termofluencia. Así, al elevar la temperatura las fronteras de grano favorecen a la termofluencia.

b) Termofluencia por Flujo Difusivo

Nabarro y Herring proponen un método basado en la difusión de vacancias, dentro de los granos de un metal policristalino (Figura 2.5).

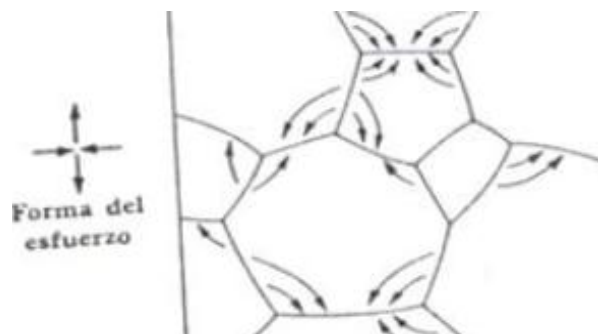


Figura 2.5 Flujo Difusivo. Los átomos Fluyen en Dirección Contraria Produciendo un Alargamiento en la Pieza [11].

Fuente: Principios de Metalurgia Física Autor: Reed-Hill. Tercera Edición, Editorial CECOSA, pág. 745.

La autodifusión en el interior de los granos puede producir flujo plástico si se lleva el material desde los límites de grano sometidos a un esfuerzo de compresión neto a los límites de grano donde hay un esfuerzo de tensión neto.

Se considera a los límites de grano tanto orígenes como colectores para lugares vacantes y la velocidad de deformación de termofluencia deberá ser dependiente del tamaño de grano del metal (Figura 2.6). Además, éste flujo plástico solo debe ser importante a temperaturas elevadas y bajo cargas muy pequeñas.

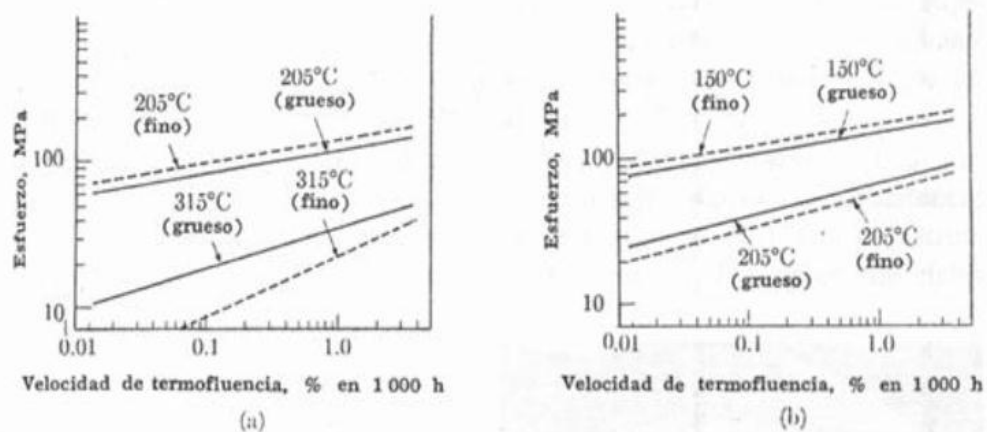


Figura.2.6 Velocidad de Termofluencia VS Tamaño de Grano. A) Aleación 77Cu-22 Zn-1 Sn; La TE es aproximadamente 250°C. B) Aleación 59Cu-40Zn-1Sn; La TE es aproximadamente 175°C. Arriba de la temperatura equicohesiva, los metales de grano grueso son ms resistentes que los metales de grano fino. Lo opuesto es cierto a bajas temperaturas. (Tomada de los datos de la ASTM)

b.1) Deslizamiento de los Límites de Grano

El deslizamiento de los límites de grano es controlado por la deformación plástica en el interior de los granos. Los límites de grano tienen una gran influencia en la deformación y fractura en termofluencia. Por lo general se acepta que los límites de grano tienen una resistencia mecánica propia la

cual varía con la temperatura. La temperatura a la cual la resistencia de los límites del grano es igual a la del cristal se llama temperatura equicohesiva. Así, a temperaturas superiores a la equicohesiva, el deslizamiento de límites de grano es favorecido y la fractura tiende a ser intergranular. Lo mencionado podemos ver en la Figura 2.7.

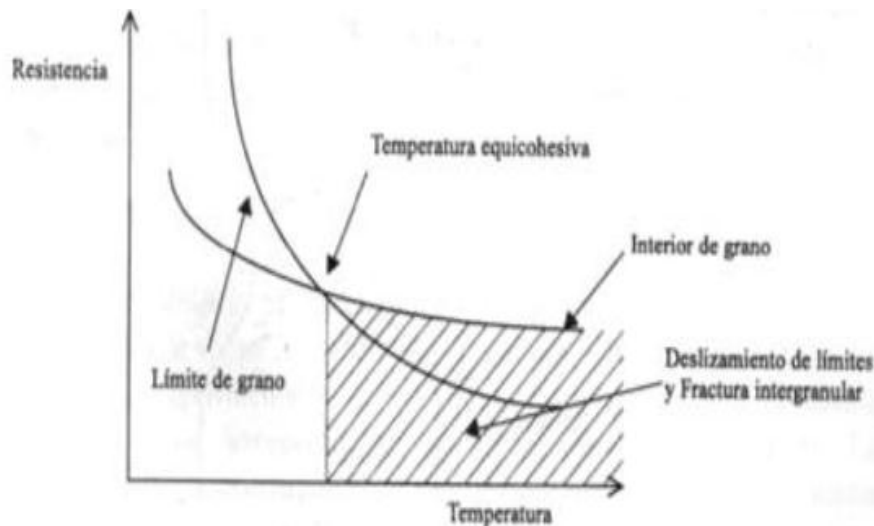


Figura. 2.7 Resistencia de los Límites de Grano VS Temperatura. A bajas temperaturas los límites de grano son más resistentes que el cristal debido a su alta concentración de defectos, pero a altas temperaturas la relación se invierte [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición Editorial Limusa, pág. 235.

2.1.2.7 Fractura en Termofluencia

La fractura por termofluencia es del tipo intergranular y presenta un aspecto granuloso, granos con pequeños cráteres que son cavidades separadas. El modo de fractura intergranular con frecuencia provoca que la fractura ocurra sin cambio aparente en las dimensiones de la pieza, confundiendo la fractura por termofluencia con la fractura por fragilización; sin embargo, las fracturas presentan cierta deformación plástica, formación de cuello y un relieve superficial (Figura 2.8).

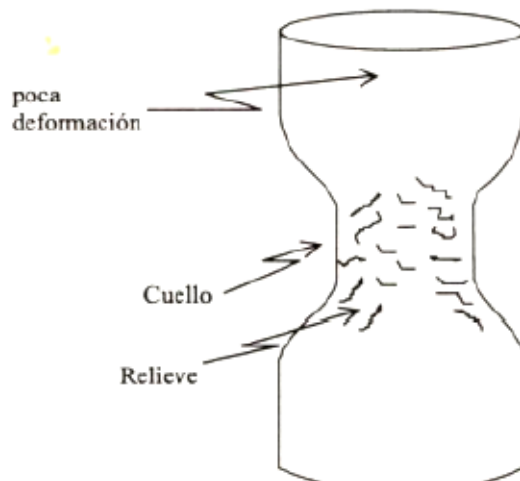


Figura. 2.8 Fractura Intergranular [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág. 236.

2.1.2.8 Procesos Involucrados en la Falla por Termofluencia

- 1.- Deslizamiento de los límites de grano
- 2.- Cavitación de los límites de grano
- 3.- Formación de subgranos
- 4.- Flujo difusivo

La fractura intergranular ocurre por la nucleación, crecimiento e interconexión de cavidades, obedeciendo a tres mecanismos fundamentales:

- 1.- Deslizamiento de los límites de grano
- 2.- Flujo y condensación de vacancias en límite de grano
- 3.- La termofluencia del material alrededor de la cavidad.

El deslizamiento de los límites de grano provoca la decohesión de las uniones triples de límite de grano formando las cavidades tipo **w**. Para su formación se requiere altas cargas y temperaturas relativamente bajas. Obsérvese la Figura 2.9.

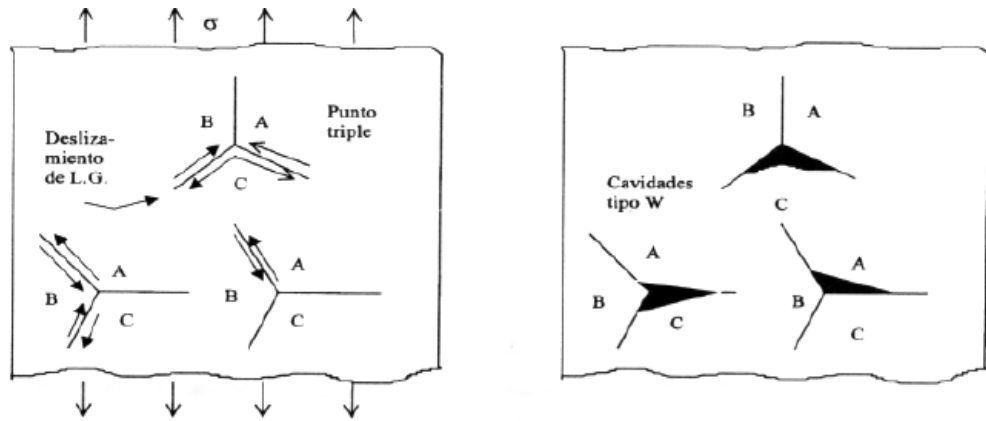


Figura 2.9 Formación de cavidades Tipo W [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág. 237.

La condensación de vacancias en los límites de grano origina cavidades esféricas a lo largo de los límites de grano y son llamadas tipo r y son favorecidas por alta temperatura y bajo esfuerzo. (Figura 2.10)

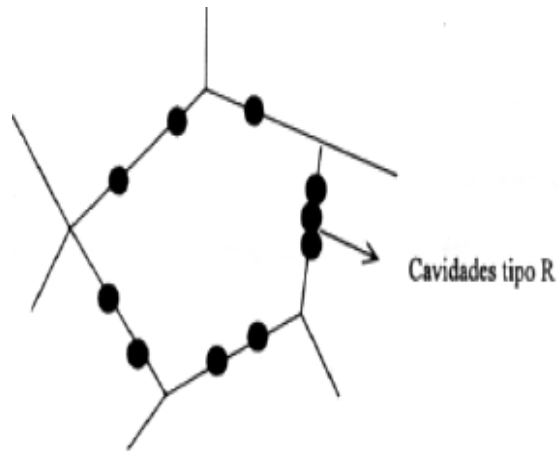


Figura 2.10 Formación de Cavidades Tipo R [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág. 237.

La distribución de cavidades tipo r depende de la orientación del límite de grano, teniendo la mayor cantidad de cavidades en los límites de grano casi perpendiculares a la dirección de la carga de tensión. La fractura por termofluencia también puede ocurrir en forma localizada cuando existe

una grieta o un concentrador de esfuerzos de manera que la estructura puede fallar en menor tiempo debido a que la concentración de esfuerzos propicia el crecimiento localizado de una grieta por termofluencia. La velocidad de crecimiento de la grieta depende del crecimiento e interconexión de cavidades en los límites de grano que está controlado por la velocidad de crecimiento de cavidades que a su vez depende de los esfuerzos en la punta de la grieta.

2.1.2.9 Relación entre la Temperatura, La Carga y la Velocidad de Deformación

Con el fin de predecir la vida de un componente metálico expuesto a deformación a alta temperatura, se han desarrollado ecuaciones para poder calcular la magnitud de la velocidad de deformación de acuerdo con la carga y la temperatura [2].

Ecuaciones para realizar el análisis de la deformación en termofluencia

$$d\varepsilon/dt=AL^2 D(\sigma/\varepsilon)^s \quad (2.1)$$

Donde:

L = es el tamaño de grano

D= la difusividad, la cual es expresada como:

$$D=Du \exp(-Qv/RT) \quad (2.2)$$

Donde:

D= la difusividad

Qv= ha sido interpretado como la energía de activación para la difusión de vacancias.

Qv= la energía de la activación para autodifusión.

2.1.2.10 Efectos de la exposición de los metales a temperaturas elevadas [2]

- La temperatura de operación deseada determina la composición más adecuada.
 - A temperaturas menores a la de recristalización, la resistencia a la termofluencia puede aumentarse ya sea mediante ciertos elementos que entran ampliamente en solución sólida en la ferrita como el níquel, el cobalto y el manganeso, o de los elementos carburizantes, tales como el cromo, molibdeno, el tungsteno y el vanadio.
 - A temperaturas superiores a la de recristalización los elementos carburizantes son los más efectivos para aumentar la resistencia a la termofluencia. Adiciones de titanio y columbio a los aceros inoxidable al cromo y níquel reducen los efectos de la termofluencia sobre un considerable rango de altas temperaturas.
- La resistencia a la termofluencia está influenciada por el tratamiento térmico. A temperaturas de 1000°F o mayores, la resistencia máxima es usualmente producida por normalización siempre y cuando la temperatura de estirado sea de 200°F sobre la temperatura de ensayo. La resistencia más baja se produce templando y estirando.
- La resistencia a la termofluencia es influida por el proceso de fabricación. Los resultados indican que el acero al horno de arco eléctrico es superior al producido en hogar abierto. El de horno de inducción es superior al acero de horno de arco eléctrico.
- La resistencia a la termofluencia es influida por el tamaño de grano del acero. A temperaturas inferiores a la de recristalización más baja, un acero de grano fino posee una resistencia mayor. A temperaturas superiores a ese punto, una estructura de grano grueso es superior.

2.1.2.11 Predicción de Vida en Termofluencia

El principal interés práctico del estudio de la termofluencia es el de predecir el tiempo que durará un componente expuesto a alta temperatura y las pruebas de ruptura son un medio para evaluar el desempeño de un material. Se considera un máximo de 10000 horas (416 días) como tiempo de ruptura límite. Es obvio que pruebas de tal duración son rara vez hechas y la duración esperada de los componentes va más allá de 400 días. Esto obliga a extrapolar los datos obtenidos en una prueba de termofluencia, de unos cientos de horas a períodos de miles de horas. El método más usado para predecir la vida en termofluencia son los Parámetros de Larson – Miller.

a) Relación de Larson-Miller $\Delta H/R = T(C + \log t)$

Suponiendo que $\Delta H/R$ es independiente de la carga y la temperatura, el material exhibe un mismo comportamiento a un mismo nivel de carga dado y por lo mismo la relación $T(C + \log t)$ es constante. Esto no es siempre cierto ya que la combinación de carga-temperatura modifica el comportamiento del material. El Término $T(C + \log t)$ es el parámetro Larson – Miller y una vez conocido es posible calcular el tiempo de ruptura a un nivel de carga constante.

Como puede verse en la Tabla 2.2, el valor promedio de C es 20 para la mayoría de las aleaciones ferrosas de uso común para alta temperatura, de ahí que el parámetro de Larson – Miller con frecuencia sea expresado como $T(20 + \log t)$, donde T es en °K y t en horas.

Tabla 2.2 Valores de la constante C para algunas aleaciones [2]

| Constante C del parámetro de Larson-Miller | |
|--|-----------|
| Aleación | C (horas) |
| Acero bajo carbono | 18 |
| Acero al molibdeno | 19 |
| Acero inoxidable 18-8 | 18 |
| Acero inoxidable 18-8-Mo | 17 |
| Acero 2¼ Cr - 1 Mo | 23 |
| Acero S 590 | 20 |
| Stellite Hynes 34 | 20 |
| Titanio D9 | 20 |
| Acero Cr-Mo-Ti-B | 22 |

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición Editorial Limusa, , pág. 230.

La curva esfuerzo-ruptura es otro método empleado para presentar los resultados de una serie de ensayos de termofluencia y permite determinar la vida esperada de un componente para una combinación particular de esfuerzo y temperatura (Figura 2.11 gráfica izquierda). Mientras que el parámetro de Larson – Miller (gráfica derecha) se utiliza para presentar la relación esfuerzo-temperatura-tiempo de ruptura en una sola gráfica.

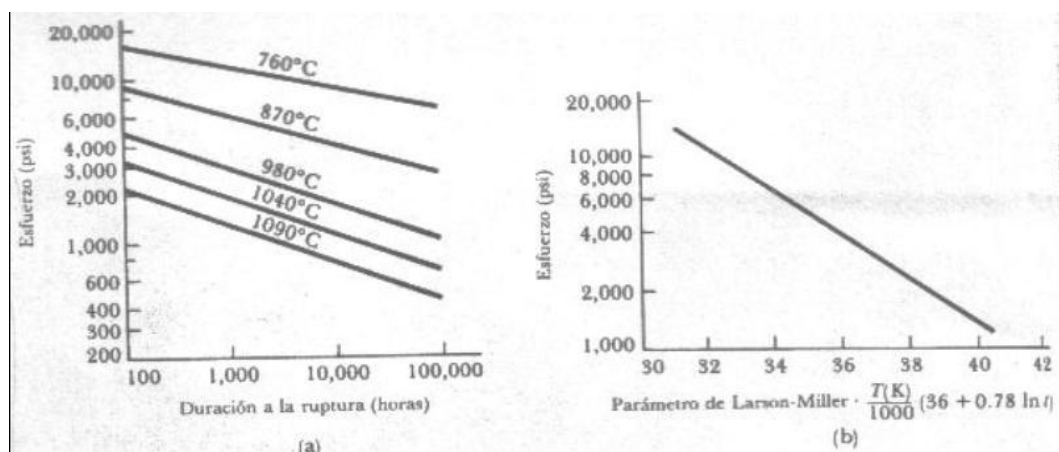


Figura. 2.11 Métodos para Predicción de Vida en Termofluencia [12].

Fuente: Ciencia e Ingeniería de los Materiales Autor: Donald R. Askeland. Editorial Thomson, tercera edición, pág. 159.

2.1.2.12 Superplasticidad

Es la habilidad de algunos materiales de presentar grandes alargamientos en tensión hasta varios miles por ciento con bajo esfuerzo y sin formación de cuello. El comportamiento superplástico se debe a que durante la deformación de alargamiento, el material no desarrolla cuellos incluso, los entalles y marcas de maquinado y muescas de superficie no crecen con la deformación debido a que éstos materiales poseen un elevado coeficiente de endurecimiento por velocidad de deformación. El comportamiento superplástico se ha observado en muchos sistemas de aleaciones y es un fenómeno de alta temperatura y la superplasticidad ocurre si se cumplen las siguientes condiciones.

- 1.- Velocidades de deformación muy bajas, de 10^{-4} a 10^{-6} s^{-1}
- 2.- Temperatura mayor de $0.5T_{\text{fus}}$
- 3.- Tamaño de grano fino y equiaxial, menor de 10 micras
- 4.- Precipitación dinámica de partículas finas de segunda fase

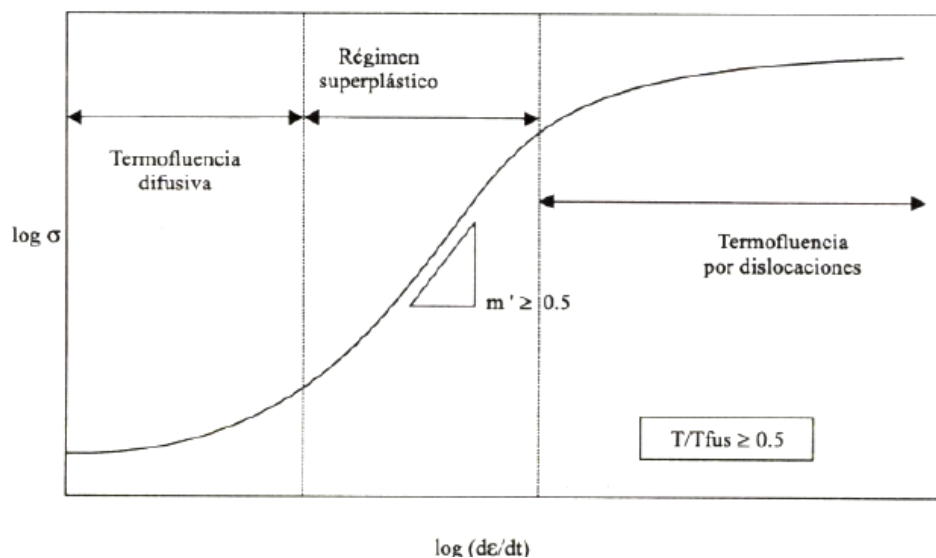


Figura. 2.12 Curva de Superplasticidad [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V.

Primera Edición Editorial Limusa, pág.244

Se acepta que la deformación en régimen superplástico involucra un extensivo deslizamiento de límites de grano en el que los granos permanecen equiaxiales y la deformación entre granos es acomodada por la rotación de los granos, no se observa formación de granos por lo que la actividad de las dislocaciones es baja. Véase la Figura 2.12.

Para saber si un material es superplástico es mediante una curva esfuerzo contra rapidez de deformación obtenida a partir de la prueba de tensión. La pendiente de la curva es el coeficiente m' . Si m' es mayor de 0.5 el material puede ser superplástico.

2.1.2.13 Materiales Para Uso a Alta Temperatura

- Las aleaciones y materiales refractarios deben ser de alto punto de fusión ya que la temperatura homóloga es el primer factor determinante de la magnitud de la deformación. Deben de ser resistentes a la oxidación y corrosión a alta temperatura.
- Los materiales para uso a alta temperatura debe de presentar una combinación de baja difusividad y alto módulo elástico.
- Los materiales con estructura cúbica centrada en las caras son más resistentes que los materiales cúbicos centrados en el cuerpo o con otras estructuras menos compactas. Los aceros inoxidable austeníticos y las aleaciones base níquel y base cobalto presentan estas cualidades.
- El tamaño del grano (d) con exponente n que varía entre 2 y 3 produce un efecto muy grande. A mayor tamaño de grano, mayor resistencia a la termofluencia. Esto debido a que hay menos fronteras de grano y la deformación Nabarro-Herring (por flujo difusivo) por deslizamiento de límites de grano y cavitación disminuyen.
- La distribución de cavidades depende de la orientación del límite de grano respecto a la dirección de la carga aplicada. Los granos perpendiculares a la dirección de la carga presentan la máxima población

de cavidades y los límites de grano paralelos a la carga no sufren cavitación. Los materiales con granos columnares orientados en la dirección de la carga se han diseñado para aumentar la resistencia a la fractura por termofluencia.

- El esfuerzo necesario para la nucleación de una cavidad es inversamente proporcional al tamaño de grano y al mismo tiempo, a menor tamaño de grano la superficie del límite de grano aumenta y con ello también la cavitación. Los metales fabricados con límites de grano, es decir, monocristales tienen mejor resistencia a la termofluencia.

- Si los límites de grano contienen escalones o precipitados estables de tamaño suficiente, el deslizamiento de los límites de grano será más difícil mejorando la resistencia a la termofluencia. La adición de aleantes formadores de solución sólida aumentan la resistencia a la termofluencia reduciendo la difusividad. Los precipitados estables a alta temperatura tienen el efecto más importante debido a que inhiben el ascenso de las dislocaciones. Las aleaciones endurecidas por dispersión de óxidos refractarios reforzadores de segunda fase aumentan la energía de activación y se suprime la etapa uno. Su resistencia llega a ser hasta veinte veces mayor que las aleaciones convencionales. Observe la Figura 2.13.

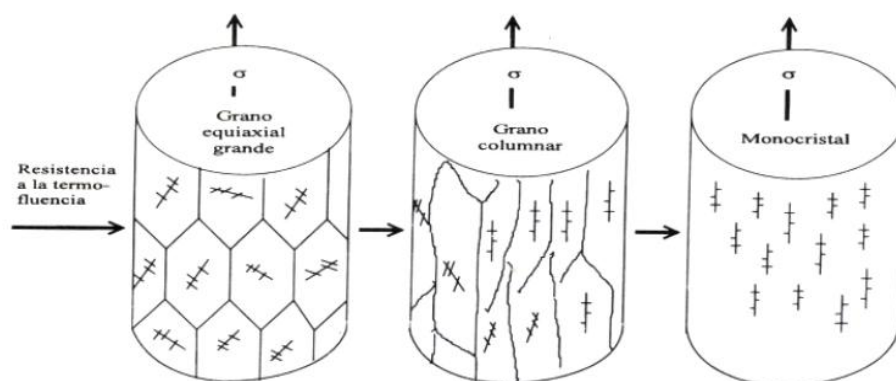


Figura. 2.13 Resistencia a la Termofluencia Dependiendo la Forma del Grano

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág. 241.

2.1.2.14 El Ensayo de Termofluencia

a) La Prueba de Termofluencia

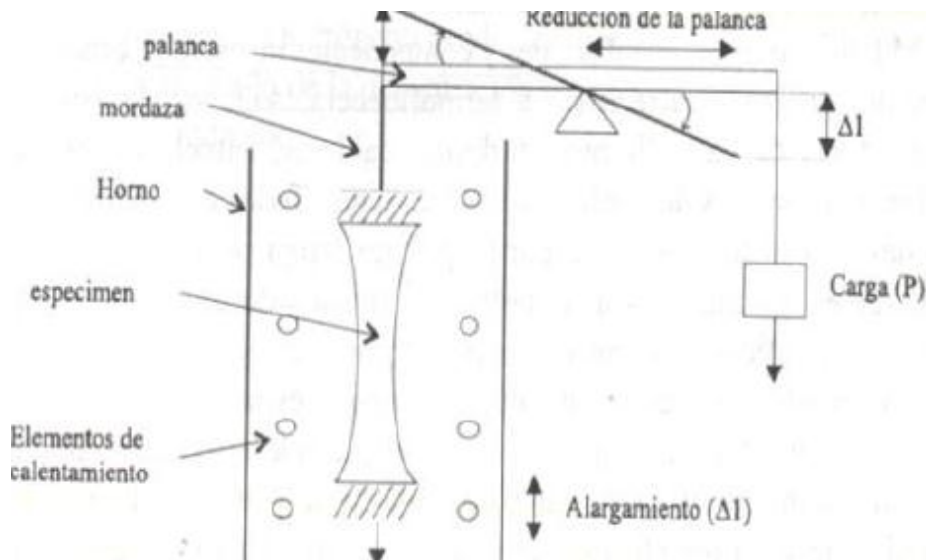


Figura. 2.14 Mecanismo para el Ensayo de Termofluencia [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág.222.

Este ensayo tendrá como referencia el procedimiento detallado en la Norma ASTM E-139 para el estudio del creep. Ciertas modificaciones las realizaremos con el fin de obtener condiciones mucho más reales presentes en una cámara de combustión.

El ensayo consiste en someter al espécimen de prueba a una carga constante y temperatura elevada (Figura 2.14). El espécimen se calienta dentro de un horno eléctrico y la carga es aplicada con un sistema de palanca de manera que la carga permanezca constante.

De este ensayo se genera la curva de termofluencia o también llamada la curva de ruptura (Figura 2.15). Usualmente la prueba se realiza a varios niveles de carga constante para un mismo material y se evalúa el tiempo de ruptura para cada una de ellas.

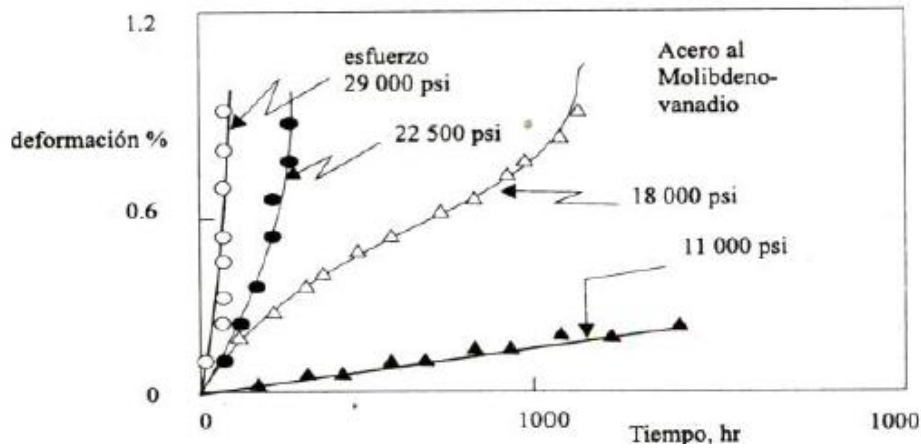


Figura. 2.15 Esfuerzo Aplicado VS Tiempo de Ruptura [2].

Fuente: Metalurgia Mecánica Autor: Dr. Jorge Luis Gonzales V. Primera Edición, Editorial Limusa, pág.241.

En los ensayos para analizar el efecto del fenómeno de la termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico para determinar la degradación de la microestructura, el objetivo es correlacionar estados de temperatura (T) y carga (F) en determinados tiempos (t) con los cambios o transformaciones que sufra el material a nivel microestructural.



Figura 2.16 Equipo para Ensayo de Fluencia a Elevada Temperatura

http://www.instron.com.ar/wa/solutions/elevated_temperature_tension_test_metals_astmE21_astmE8.aspx

b) Probetas

Las probetas para los ensayos a elevadas temperaturas y carga constante se elaborarán en base a la norma ISO 6892 E (Figura 2.18) y serán extraídas según se muestra en el esquema de la Figura 2.17.

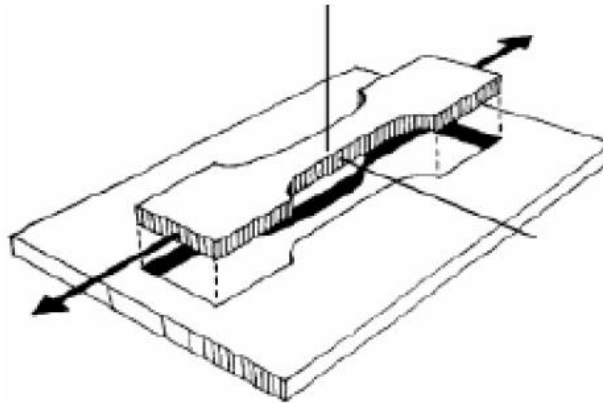


Figura.2.17 Esquema de la extracción de la probeta de tensión plana con sección reducida.

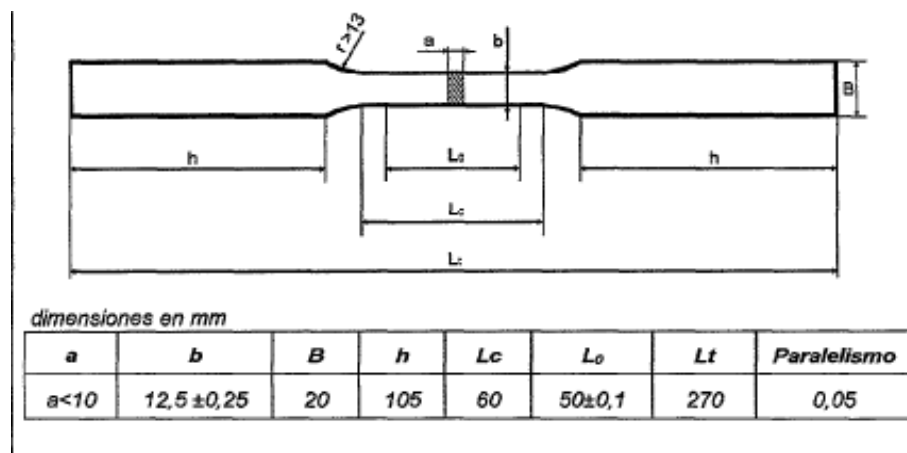


Figura.2.18 Esquema y dimensiones de la probeta utilizada para los ensayos de tracción ISO 6892 E.

2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA

En la actualidad surgen problemas inquietantes a nivel industrial, cuya relevancia no debemos ni podemos menospreciar y requieren de

soluciones concretas. Por ello la presente investigación se sustenta en el paradigma crítico positivo que nos permitirá realizar una correcta interpretación, comprensión y explicación de las variables involucradas y considerar las cualidades más no las cantidades que en la elaboración de dicha investigación se encontrará.

Debido al auge de la tecnología y de la investigación, la humanidad ha desarrollado una enorme capacidad para transformar su hábitat, capacidad que trasciende el marco temporal en el que vivimos. Todos los cambios que realicemos el día de hoy se extenderán y afectará, para bien o para mal, a nuestros hijos o a nuestros nietos; podemos afirmar que dichos cambios constituyen una herencia para las futuras generaciones que no alcanzaremos a ver.

Gracias al pensamiento y a la labor de personas ilustres hemos podido tomar conciencia de la repercusión de nuestras acciones presentes en el futuro y seguros estamos que hoy por hoy en nuestro país es posible incursionar un estudio concienzudo del efecto del fenómeno de la termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico para determinar la degradación de la microestructura gracias por una parte a la construcción de un equipo o máquina de ensayos que permitirá la medición y el seguimiento al comportamiento de las variables y por otra parte a la caracterización microestructural y de dureza de las probetas a ensayarse.

2.3 FUNDAMENTACIÓN LEGAL

La presente investigación se desarrollará con la aplicación de varias normas, como por ejemplo citaremos las siguientes:

ASTM D573 Deterioro bajo condiciones de temperatura.

ASTM D 671-90 Normativa de ensayos.

ASTM, 1916 Testing and Materials.

SCA B51 Código de calderas, recipientes y cañerías a presión.

ASTM E-139 Ensayos para caracterizar el comportamiento a creep de materiales metálicos.

ASTM E-8 Normalización de probetas para ensayos de tensión.

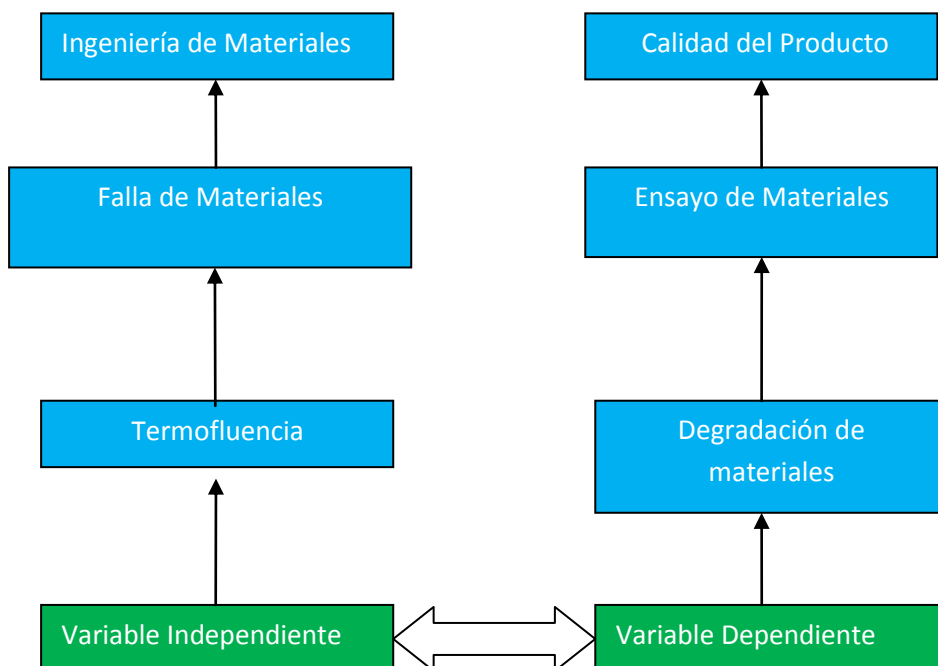
ISO 6892:1998(E) Normalización de probetas para ensayos de tensión.

ASTM E3 Técnicas de preparación de muestras para el análisis metalográfico.

ASTM A370 Técnicas de Extracción de muestras para análisis metalográfico.

CLEMEX Software para análisis de imagen. Utilizaremos esta herramienta para cuantificar las inclusiones ASTM E45, el tamaño de grano medio ASTM E112, cantidades relativas de fase y eventualmente precipitaciones y microcavidades.

2.4 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES



2.5 HIPÓTESIS

Con el estudio del efecto de termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico se determinará la posibilidad de obtener menor degradación microestructural en los espejos de la cámara de combustión de los hornos industriales para pan.

2.6 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES

2.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Efecto de termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico.

2.6.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Menor degradación microestructural.

2.6.3. TÉRMINO DE RELACIÓN

Determinar la posibilidad.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE

El enfoque de la investigación emplea el método deductivo, está asociado frecuentemente con la investigación cuantitativa y nos permitirá examinar los datos de manera científica, o más específicamente en forma numérica con el fin de determinar la degradación del hierro fundido gris perlítico, sin embargo también se realizará en una parte de este estudio análisis cualitativo para determinar aspectos físicos de la microestructura.

La información necesaria la cual será indispensable para la realización de la investigación proviene principalmente de fuentes primarias (libros, tesis, papers, etc) y secundarias (normas e internet).

3.2 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 DE CAMPO

La investigación de laboratorio es indispensable en este trabajo de investigación, por ello se ensayarán los especímenes para la recopilación de datos, posteriormente se procederá a la caracterización metalográfica y ensayos de dureza, todos los datos encontrados se someterán a un análisis estadístico que permitirá determinar y evaluar la fiabilidad de nuestro proyecto.

3.2.2 BIBLIOGRÁFICO

Acudiremos a diversas fuentes bibliográficas como, bibliotecas, hemerotecas, Internet, etc. Una vez localizadas las fuentes de información, procederemos a recopilarlas y a extraer, procesar y retener la información para emplearla en la investigación.

Los llamados papers son publicaciones especializadas que contienen resúmenes de investigaciones publicadas en revistas de ciencia y tecnología de renombre internacional, estas también serán de mucha utilidad para comparar datos, procedimientos y alimentar aún mas nuestros conocimientos.

3.2.3 EXPERIMENTAL

La investigación experimental es fundamental para llevar a cabo este trabajo investigativo, integraremos un conjunto de actividades metódicas y técnicas para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar, el problema a resolver y la hipótesis a verificar, para ello construiremos un equipo de ensayos en el cual se realizará una serie de ensayos para poder analizar el efecto del fenómeno de termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico y determinar la degradación de la microestructura por medio de la relación de la tensión aplicada, la temperatura y el tiempo de exposición del material.

3.2.4 APLICADA

Debido a que la pretensión del estudio de la degradación microestructural sobre el hierro fundido gris perlítico por efecto de termofluencia, es que a través de los resultados obtenidos se pueda utilizar dicho material en la producción de espejos para las cámaras de combustión de los hornos industriales para pan.

3.3 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.3.1 EXPLORATORIA

La investigación a desarrollarse tratará de solucionar un problema que se presenta en el sector industrial dedicados a la construcción de hornos para pan cuyas cámaras de combustión trabajan a elevadas temperaturas y sus espejos fallan por termofluencia, el incremento de este sector productivo de la Patria nos impulsa a palpar la necesidad de obtener un conjunto de datos que nos permita la posibilidad de garantizar una operación segura de los mismos a través del estudio del efecto de la termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico para determinar la degradación que sufre la microestructura frente a este fenómeno.

3.3.2 DESCRIPTIVO

Podemos predecir que el estudio a realizarse ayudará a satisfacer la necesidad que este importante sector requiere, así como también será de apoyo a los profesionales en el área de ingeniería mecánica dedicados al diseño y mantenimiento y construcción de estos equipos a los cuales va destinado esta investigación, con la cual se busca optimizar recursos con seguridad.

Además el desarrollo de esta investigación demanda de conocimientos muy amplios en especial del área de ingeniería de materiales, diseño mecánico y diagnóstico industrial.

3.3.3 ASOCIACIÓN DE VARIABLES

Al desarrollar este estudio es importante asociar las variables para de esta manera determinar si la implementación de este estudio en realidad contribuye a determinar la degradación microestructural de elementos sometidos a altas temperaturas de operación.

3.3.4 EXPLICATIVO

El estudio es explicativo ya que los resultados obtenidos permitirán dar una explicación fundamentada a las industrias nacionales dedicadas a la fabricación de hornos para pan sobre las ventajas de poder utilizar este material propuesto en la fabricación de los espejos de la cámara de combustión de los hornos.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1 POBLACIÓN

La población de la investigación está constituida por:

Acero A36 utilizado en la producción actual de espejos para la cámara de combustión de los hornos para la elaboración del pan y fundición gris perlítica obtenida mediante fundición y colado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) Riobamba –Ecuador.

3.4.2 MUESTRA

La muestra de la investigación consistirá en aproximadamente 15 probetas Acero A36 y 15 probetas de hierro fundido gris perlítico que servirán para analizar la termofluencia y determinar la degradación de la microestructura en iguales condiciones de operación (temperatura y tensión).

3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.5.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Efecto de termofluencia sobre el hierro fundido gris perlítico.

| CONCEPTO | CATEGORÍA | INDICADOR | ÍTEMS | TÉCNICAS E INSTRUMENTOS |
|--|------------------------|---|--|---|
| <p>El fenómeno de la termofluencia “creep” se define como el fallo del material por la aparición de deformaciones provenientes de tensiones vinculadas con temperaturas elevadas y largos periodos de trabajo.</p> | <p>– Termofluencia</p> | <p>Tensión</p> <p>Temperatura</p> <p>Tiempo</p> | <p>(1000-2000Kgf/cm²)</p> <p>(0,3-0,5 T_f acero-fundición)</p> <p>(1-4320min)</p> | <p>Observación directa</p> <p>Observación</p> <p>Ficha de datos</p> <p>Bibliográfica</p> <p>Normas ASTM</p> |

3.5.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Determinar la degradación microestructural.

| CONCEPTO | CATEGORÍA | INDICADOR | ÍTEMS | TÉCNICAS E INSTRUMENTOS |
|---|-------------------------|---|---------------|--|
| La degradación microestructural del acero es un proceso en el cual sus propiedades decaen debido a cambios morfológicos, transformaciones de fases y presencia de defectos dependiendo en esencia de su composición química y condiciones de trabajo. | Propiedades mecánicas | Dureza | > 140 Brinell | Ensayos de laboratorio Observación directa Hoja de toma de datos |
| | Transformación de fases | % de perlita laminar % de perlita globular | Metalografía | Ensayos de laboratorio Observación directa Hoja de toma de datos |
| | Presencia de defectos | % de defectos | Metalografía | Ensayos de laboratorio Observación directa Hoja de toma de datos |

3.6 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

La Operacionalización de variables de esta investigación apunta a que se recolectará información por medio de la técnica de la observación-experimental (Ensayos de laboratorio), para lo cual se tomará notas de todo lo que se considere necesario en un cuaderno, para describir los hechos de especial interés que ayuden a registrar incidentes hasta tener una base informativa consolidada.

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

3.7.1. PLAN DE PROCESAMIENTO

A continuación se presenta de manera detallada el procedimiento a llevar a cabo en los ensayos de termofluencia para analizar la degradación microestructural del hierro fundido gris perlítico como material alternativo. El mismo procedimiento y condiciones de ensayo se realizará con el acero A36 que actualmente es el material utilizado en la fabricación de los espejos para la cámara de combustión de los hornos para elaborar pan, a excepción de la obtención ya que en el caso del acero A36 será obtenida en un distribuidor local.

3.7.1.1 Caracterización

- Por medio del proceso de fundición y colado obtener el hierro fundido gris perlítico.
- Extraer las probetas para el ensayo metalográfico según la norma ASTM A370.
- Preparar la probeta para el ensayo según la norma ASTM E3.

- Caracterizar el hierro fundido gris perlítico en estado nuevo mediante microscopía óptica y ensayo de dureza.

3.7.1.2 Ensayos para estudiar la Degradación por Termofluencia

- Montar la probeta en las mordazas de la máquina de tracción.
- Acoplar el horno eléctrico.
- Se procede a verificar la instrumentación e interruptores respectivos de tal forma que garanticen la buena marcha del ensayo.
- Encender el horno eléctrico, elevar la temperatura hasta alcanzar la temperatura de ensayo T_e , Los ensayos se efectuarán en un nivel de tensión constante y a temperaturas determinadas en el rango de 500°C a 650°C , cada ensayo tres veces.
- Una vez que se ha calentado la probeta en la cámara de combustión a la temperatura requerida y esta se ha estabilizado, la carga constante para todos los ensayos se aplicará rápidamente por medio de la prensa hasta el nivel requerido F_i , mantener la carga constante durante todo el ensayo.
- Al final del ensayo debe de haber por lo menos 50 observaciones de la temperatura y de la carga aplicada al espécimen, el promedio de las cuales debe reportarse como temperatura y carga aplicada en el ensayo.
- Extraer el espécimen ensayado y procederlo a caracterizar mediante microscopía óptica y ensayos de dureza.
- Repetir el ensayo para otras combinaciones de las variables Temperatura y carga hasta en lo posible llegar a la fractura del espécimen.

3.7.2 PLAN DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presenta de manera detallada, el procedimiento para analizar e interpretar los resultados de los ensayos realizados:

1) Tabulación de los datos obtenidos durante el ensayo de acuerdo a la necesidad y a la relación que tengan con las variables de la hipótesis, se elaborarán tablas en las que se indique:

- Composición del Material.
- Dimensiones de las probetas.
- Temperatura aplicada. Promedio de 50 observaciones.
- Carga aplicada. Promedio de 50 observaciones.
- Tiempo de duración de cada uno de los ensayo.

2) Representación gráfica de los análisis metalográficos de las probetas ensayadas. El o los planos de análisis se establecerán en función de la norma ASTM y requerimientos.

- Proceder a caracterizar el tipo de rotura. Si fuese el caso.
- Analizar los diferentes estadios de degradación microestructural del material.
- Gráficas de Dureza Vs Distancia a partir de la fractura.
- Gráfica de % Perlita globular Vs Temperatura de ensayo.
- Gráfica de %Perlita laminar Vs Temperatura de ensayo.
- Gráfica de % de defectos Vs Temperatura de ensayo (de ser factible).

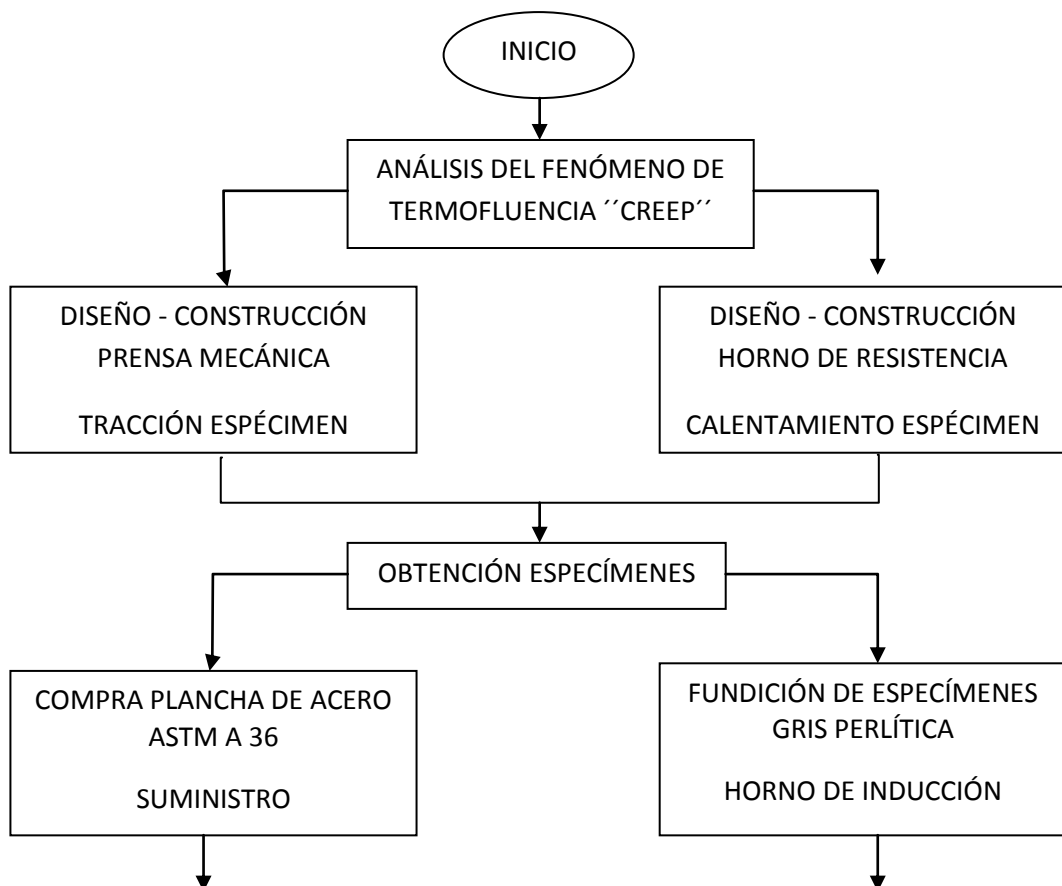
3) Analizar y relacionar los resultados obtenidos en las diferentes partes de la investigación para determinar el efecto de la termofluencia sobre las transformaciones de la microestructura y cambios de dureza del hierro fundido gris perlítico.

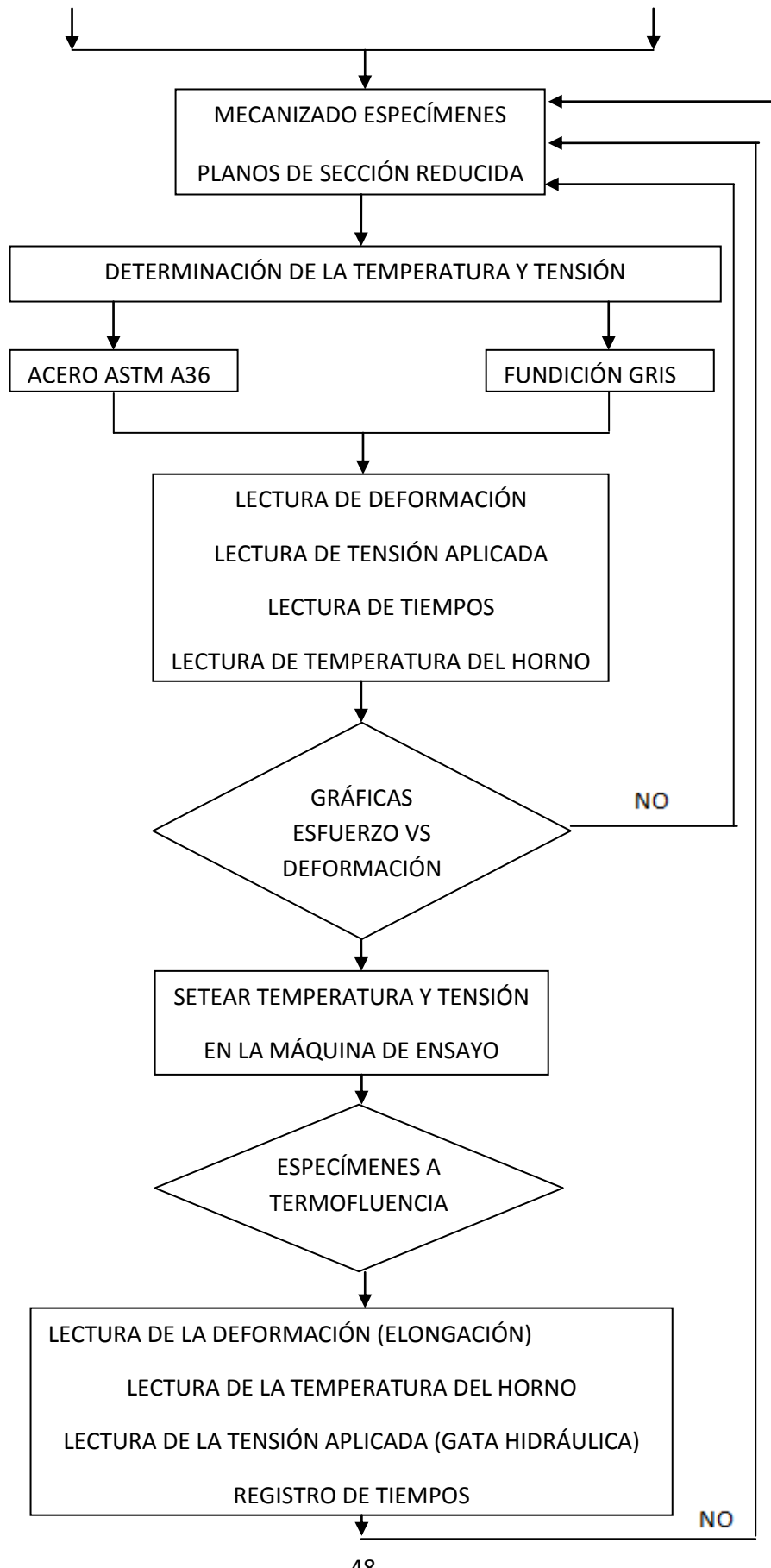
CAPÍTULO IV

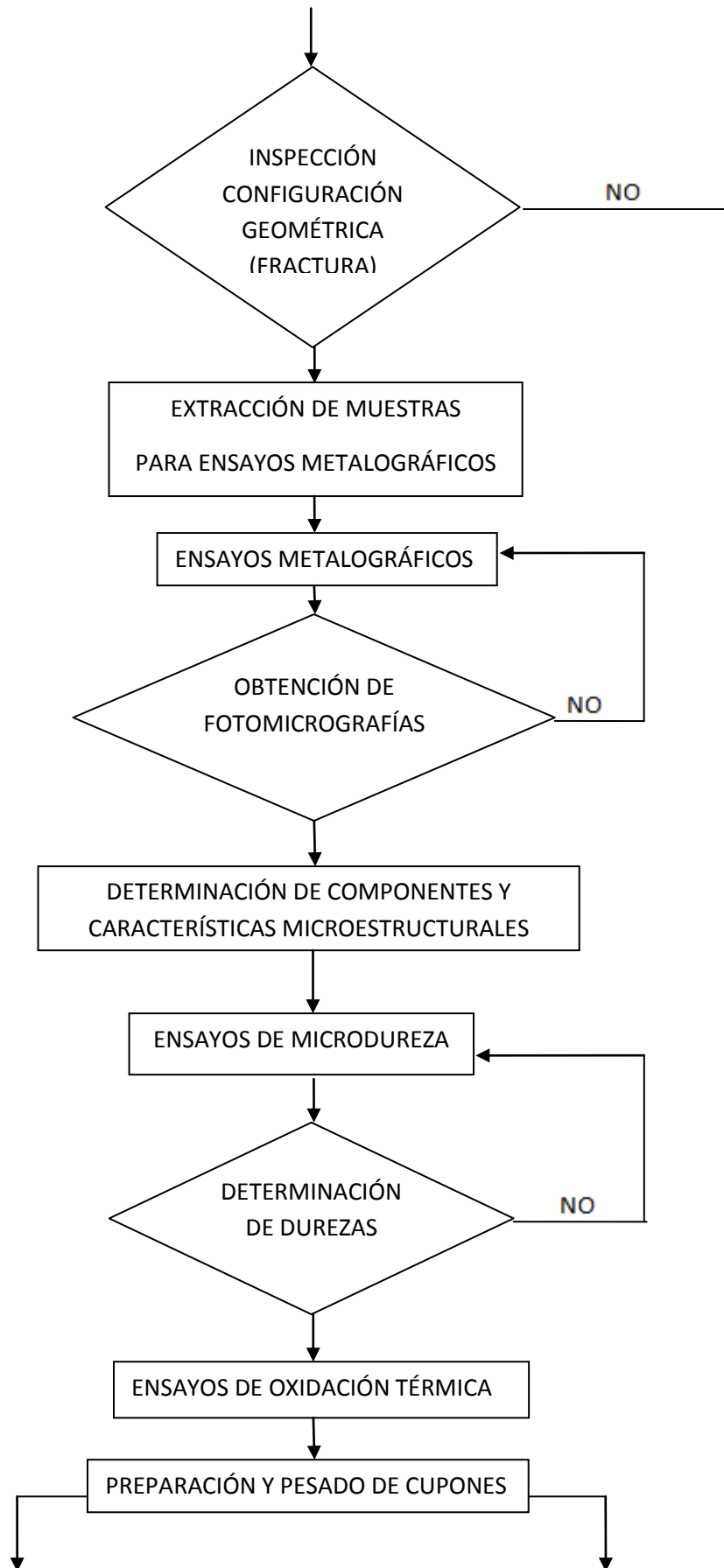
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 PROCESO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el desarrollo del estudio se requiere el seguimiento de varias actividades las cuales se detallan en el diagrama de flujo indicado en la Figura 4.1 que ayudarán a determinar la verdadera influencia que tiene la termofluencia en la degradación microestructural tanto en el acero A36 como en la fundición gris perlítica y que inciden en las propiedades mecánicas (dureza y tensión) de los mismos.







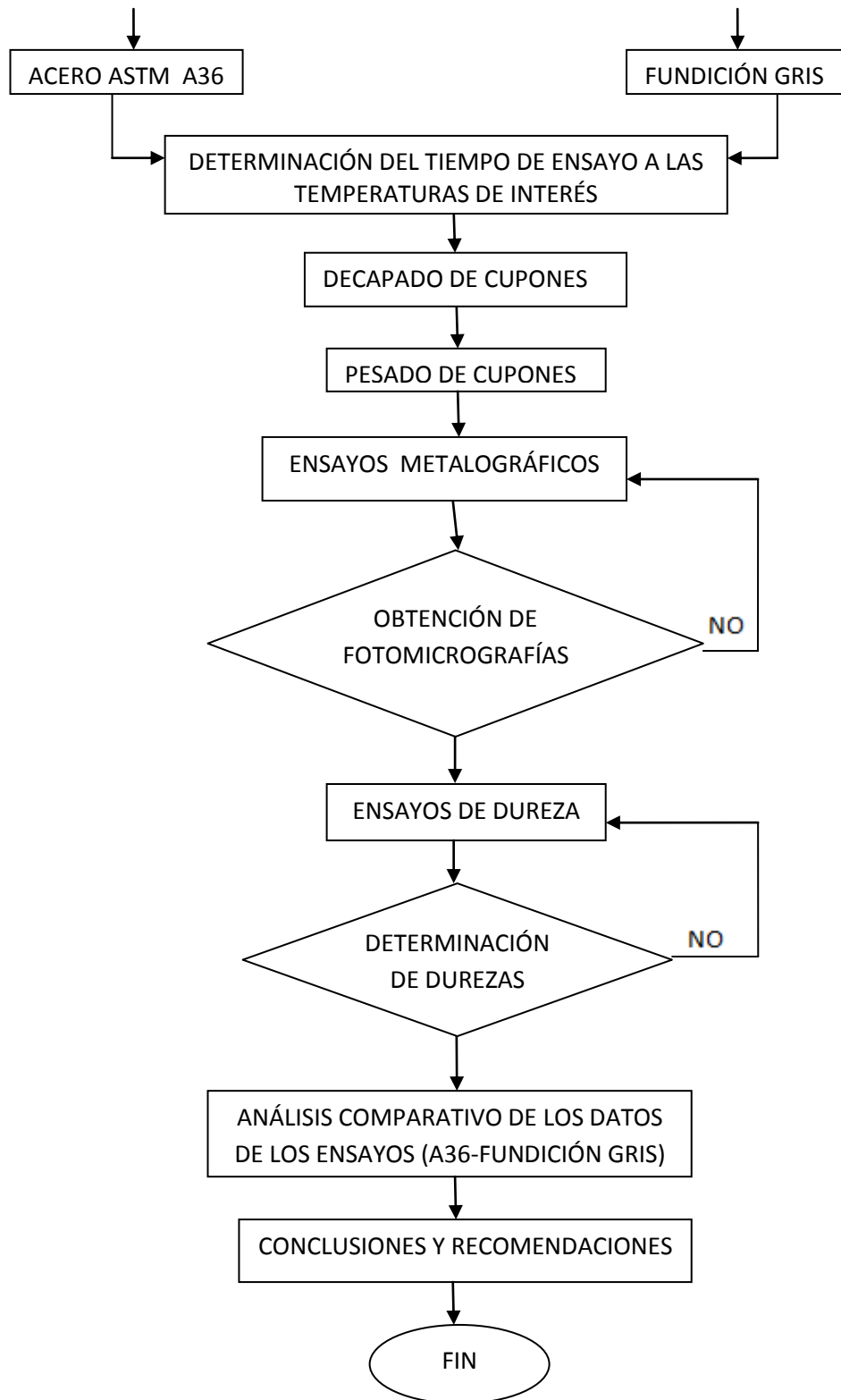


Figura.4.1 Diagrama de flujo para secuencia de ensayos y recolección de datos

(Fuente: Autor)

4.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO PARA LOS ENSAYO DE TERMOFLUENCIA

Uno de los aspectos de este trabajo es el equipo que será necesario construir para realizar los ensayos, ya que si bien es cierto a nivel mundial existen estos equipos, pero lamentablemente las Escuelas de Educación Superior en nuestro país no lo tienen disponible.

Para realizar los ensayos, necesitamos diseñar y construir un equipo para ensayos de tensión a elevada temperatura.

4.2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN. EQUIPO DE TENSIÓN (TRACCIÓN DE LOS ESPECÍMENES)

La termofluencia es la deformación plástica de un material bajo el efecto combinado de dos fenómenos (tensión y temperatura). Por lo mencionado se inicia diseñando una prensa mecánica que permita tensionar los especímenes de prueba. Este diseño será lo más simple y funcional posible con el fin de abaratar costos y para ello se aplicó los conocimientos adquiridos en las aulas del programa de maestría en diseño mecánico.

4.2.1.1 Diseño del equipo de tensión

El equipo de tensión (Figura 4.2) consiste en una estructura en la que se sustenta un eje que servirá de pivote para la palanca mecánica. La fuerza para tensionar los especímenes será aplicada en la palanca, en el extremo de mayor longitud con respecto al eje (pivote) con una gata hidráulica a la que se le incorporará un manómetro con la finalidad de poder medir la carga aplicada. Por medio de un mecanismo acoplado a la palanca se tensionará los especímenes planos de sección reducida.

La modelación estructural de la prensa se la realizó con la ayuda del programa computacional ANSYS. El mallado de la estructura se muestra en la Figura 4.2.

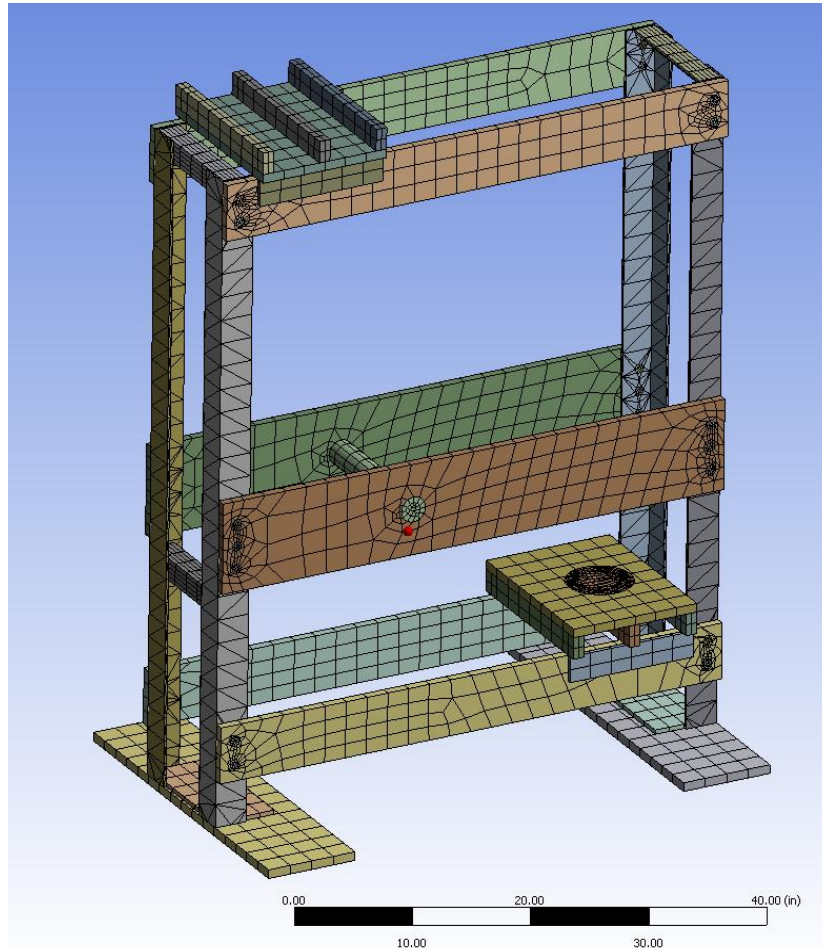
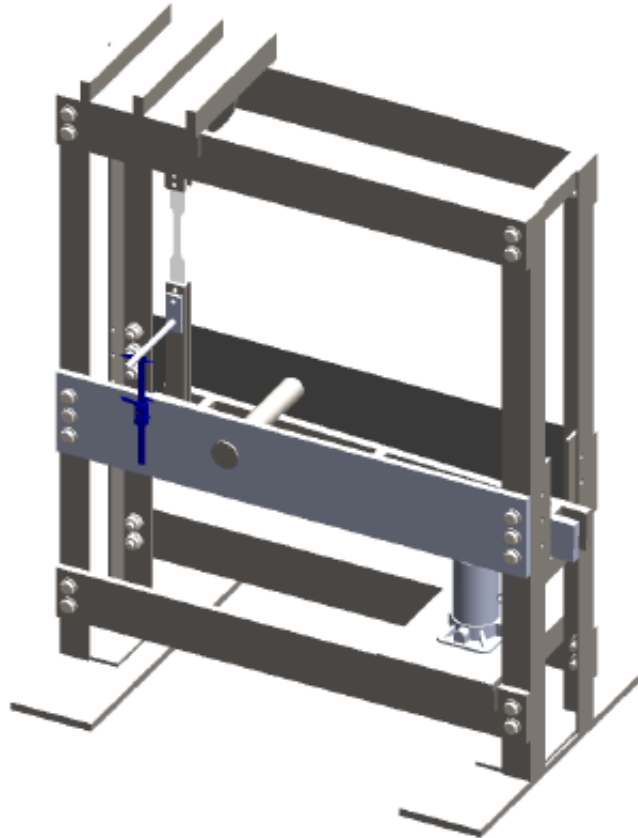


Figura 4.2. Mallado de la estructura del equipo de tensión en el programa ANSYS
(Fuente: Autor)

Los planos del equipo de tensión se presentan en el Anexo 1.

Los detalles del diseño y construcción del equipo de tensión se considera que está fuera del alcance de este documento, las características de la prensa mecánica se presentan a continuación en formato de catálogo.

4.2.1.2 Catálogo del Equipo de Tensión



| ESPECIFICACIONES MÁQUINA DE TENSION | | |
|--|--|--|
| Tipo | Mecánica | |
| Dimensiones | • Largo = 122.004 cm | |
| | • Ancho = 31.2 cm | |
| | • Altura = 157.23 cm | |
| Estructura | Columnas | 4 l A36 e= 8mm |
| | Vigas | Cuatro planchas extremos A36 e= 12mm Dos planchas intermedias A36 e= 12mm |
| | Bases | Dos planchas A36 e=12mm |
| SISTEMA DE TRACCIÓN | | |
| Eje | • Acero 4140 para pivoteo de palanca (Sustentado en vigas intermedias) | |
| Palanca | Material | • Acero A36 |
| | | • Robusta relación 1:2,4 • Carga de trabajo 1020 Kg • Deformación 0,01mm |
| Mordazas para sujetar espécimen | Cantidad | • Dos mordazas superiores • Dos mordazas inferiores |
| | Material | Acero 1Cr-0,5Mo (Mayor resistencia a elevadas temperaturas) |
| Medidor de deformación | Vemier (pie de rey digital) | |
| Gata Hidráulica | Tipo | Botella |
| | Capacidad | 20 toneladas |
| | Altura máxima | 47,5 cm |
| Manómetro | Altura mínima | 24 cm |
| | Capacidad | 10000 psi - 70000 kpa |
| Ensamblaje | Carátula | 2 plg con glicerina |
| | Pernos 5/16 plg - 1/2 plg | Acero Grado 8 |
| Acabado | Soldadura Mig Pintura sintética Automotriz | |

Figura 4.3 Catálogo del Equipo de Tensión
(Fuente: Autor)

4.2.1.3 Construcción del equipo de tensión

Una vez realizado el diseño y la modelación de la estructura del equipo de tensión con la ayuda del programa computacional para diseño mecánico ANSYS y verificado que su comportamiento frente a las cargas y esfuerzos a los que va a ser sometido sean satisfactorios, se procede a la construcción de la estructura del equipo de tensión para los especímenes de acuerdo a los planos que los podemos ver adjuntos en el Anexo 1.

Previo al montaje de la gata hidráulica de capacidad 20 toneladas en la estructura del equipo de tensión (Figura 4.4), se procede a la calibración del manómetro que se lo ha instalado con ayuda de la máquina universal.



Figura 4.4 Calibración de la gata hidráulica en la Máquina Universal
Tinus Olsen capacidad 100000 Kg.
(Fuente: Autor)

Se realizaron tres ensayos en la escala de 10000 Kg y los datos promedios registrados se los registra en la Tabla 4.1 a continuación.

Tabla 4.1 Registro de la calibración del manómetro instalado en la gata hidráulica

| FUERZA(Kgf) | | | PRESIÓN(Psi) | ERROR | |
|-------------|--------|-------|--------------|----------|-------------|
| MÍNIMO | MÁXIMO | MEDIA | | RELATIVO | PORCENTUAL |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 368 | 372 | 370 | 100 | 4 | 1,081081081 |
| 479 | 481 | 480 | 200 | 2 | 0,416666667 |
| 701 | 699 | 700 | 300 | 2 | 0,285714286 |
| 821 | 819 | 820 | 400 | 2 | 0,243902439 |
| 1018 | 1022 | 1020 | 500 | 4 | 0,392156863 |
| 1133 | 1127 | 1130 | 600 | 6 | 0,530973451 |
| 1361 | 1359 | 1360 | 700 | 2 | 0,147058824 |
| 1540 | 1540 | 1540 | 800 | 0 | 0 |
| 1711 | 1709 | 1710 | 900 | 2 | 0,116959064 |
| 1878 | 1882 | 1880 | 1000 | 4 | 0,212765957 |
| 2061 | 2059 | 2060 | 1100 | 2 | 0,097087379 |
| 2198 | 2202 | 2200 | 1200 | 4 | 0,181818182 |
| 2411 | 2409 | 2410 | 1300 | 2 | 0,082987552 |
| 2589 | 2591 | 2590 | 1400 | 2 | 0,077220077 |
| 2748 | 2752 | 2750 | 1500 | 4 | 0,145454545 |
| 2886 | 2884 | 2885 | 1600 | 2 | 0,06932409 |
| 3081 | 3079 | 3080 | 1700 | 2 | 0,064935065 |
| 3221 | 3219 | 3220 | 1800 | 2 | 0,062111801 |
| 3402 | 3398 | 3400 | 1900 | 4 | 0,117647059 |
| 3589 | 3591 | 3590 | 2000 | 2 | 0,055710306 |

(Fuente: Autor)

Con estos datos podremos determinar la fuerza aplicada al espécimen por medio de la gata hidráulica.

De acuerdo a la Figura 4.5 el error relativo 6 correspondiente a un error porcentual de 0,530973451 del punto número 7, se lo puede tomar como un dato anómalo.

El error de la gata correspondería a un valor relativo de 4 y un error porcentual de 0,392156863. Los registros fueron tomados tanto en carga como descarga.

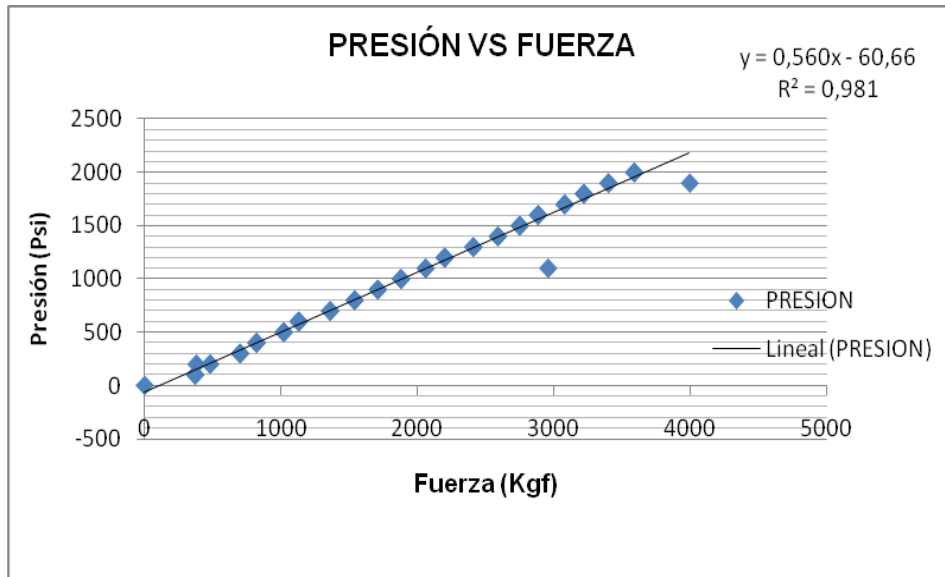


Figura.4.5 Gráfica Presión vs Fuerza. Calibración del manómetro acoplado a la gata hidráulica (Fuente: Autor)

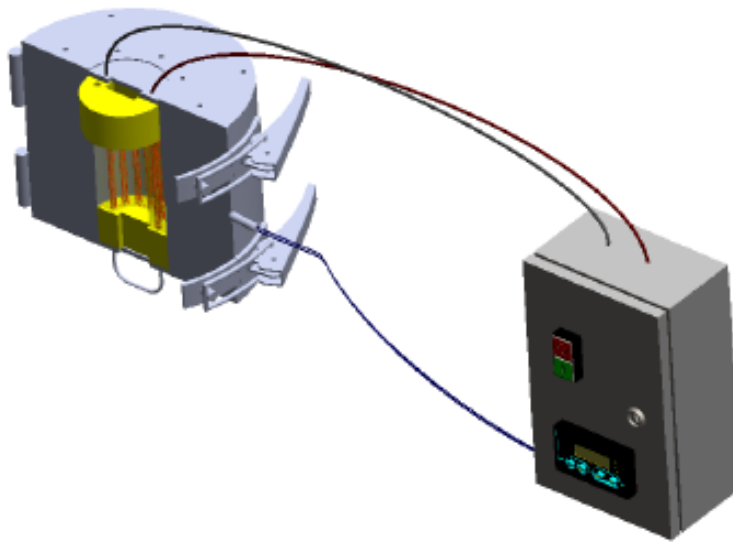
4.2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HORNO DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

Para producir el calentamiento de los especímenes para los ensayos de termofluencia se construye un horno de resistencias eléctricas metálicas ya que este tipo de horno permitirá con la ayuda de un controlador y un termopar, sensar y controlar la temperatura al interior del horno.

4.2.2.1 Diseño del horno de resistencias eléctricas

En el diseño del horno intervienen fundamentalmente, el espacio disponible, la forma, el tamaño, el peso y material de las piezas a calentarse, la temperatura máxima de operación, las pérdidas de temperatura que se producirán, la temperatura máxima en el interior y exterior del horno. Al tomar en consideración cada uno de los parámetros mencionados en el diseño del horno se obtendrá un sistema de calentamiento para los especímenes funcional y práctico.

4.2.2.2 Catálogo del sistema de calentamiento y control de temperatura



| ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO | |
|---|--|
| HORNO | |
| Dimensiones | <ul style="list-style-type: none"> • Diámetro = 295mm • Altura = 229mm |
| Tipo | Libro para permitir abrir y cerrar |
| Temperatura máxima de operación | 1000 °C |
| Carcasa del Horno | Tolnegro e= 2mm |
| Aislante Termico | Lana de vidrio |
| Caldera | <ul style="list-style-type: none"> • 1 Cr - 0,5 Mo Resistente a altas temperaturas • e= 10mm |
| Placa cerámica | Para sustentar a las resistencias |
| Resistencias eléctricas | <ul style="list-style-type: none"> • Metálicas • Calibre 19 56w • Diámetro= 0.091cm • Conexión en serie • Diámetro de la espira= 5,46mm • Número de espiras= 823 espiras • Longitud enrollada con espiras= 74,8cm |
| Tensión de Alimentación | 110 V |
| Temperatura máxima exterior | 70 °C |
| CAJA DE CONTROL | |
| Botonero | ON - OFF |
| Controlador de Temperatura | <ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones: 20cm x 30cm x 15cm • Tipo: K • Marca: CamSCO • Tipo: ON - OFF |
| Termocupla | Tipo K adecuado para largos periodos de permanencia a elevadas temperaturas |

Figura 4.6 Catálogo del sistema de calentamiento y control de temperatura

(Fuente: Autor)

Se diseñó y construyó un horno tipo libro con el fin de poder montar y desmontar con facilidad los especímenes en la máquina de ensayos de termofluencia. Los detalles del diseño y construcción de este equipo, se presentan en la Figura 4.6 en formato de catálogo y los planos del sistema de calentamiento se muestran en el Anexo 2.

4.2.2.3 Construcción y montaje del horno eléctrico

Realizado los cálculos y determinado la distribución de las resistencias eléctricas, espesores de aislamiento y dimensionamiento del horno, se procede a la construcción y montaje de acuerdo a los planos adjuntos en el Anexo 2. A continuación se presenta el equipo (máquina) que se empleará para los ensayos de termofluencia necesarios para el presente trabajo investigativo totalmente ensamblado de acuerdo a los diseños y planos realizados de acuerdo a los requerimientos necesarios para llevar a cabo los ensayos del acero ASTM A36 y de la fundición gris perlítica laminar.

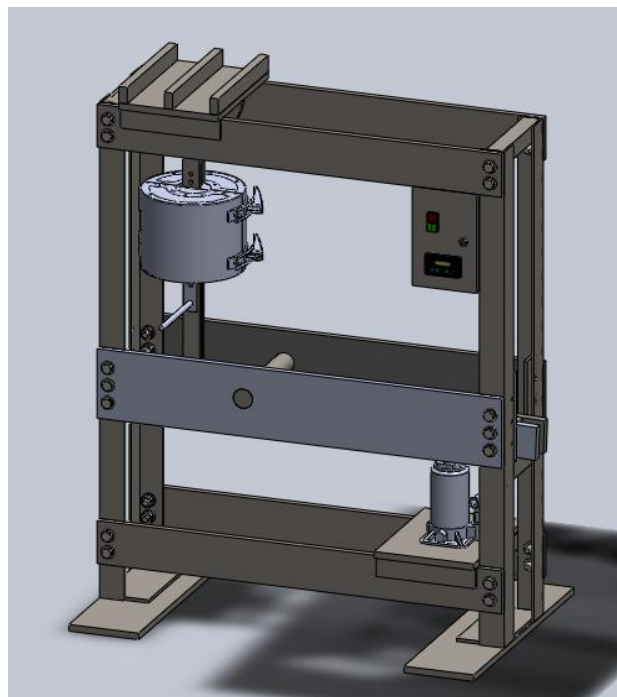


Figura.4.7 Equipo de termofluencia que se empleará en las experimentaciones totalmente ensamblado

(Fuente: Autor)

4.3 ESPECÍMENES PARA LOS ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA

Los especímenes de acero ASTM A36 se los obtuvieron de una lámina. Ver en Anexo 3 la hoja de registro del material de un distribuidor a nivel nacional (IPAC).

Para la obtención de los especímenes de fundición gris perlítica se utilizó un horno de inducción. Ver en Anexo 4 las propiedades de la fundición gris.

4.3.1 DIMENSIONES DE LOS ESPECÍMENES

La Figura 4.8 muestra el esquema de la geometría del espécimen plano de sección reducida según ISO 6892.

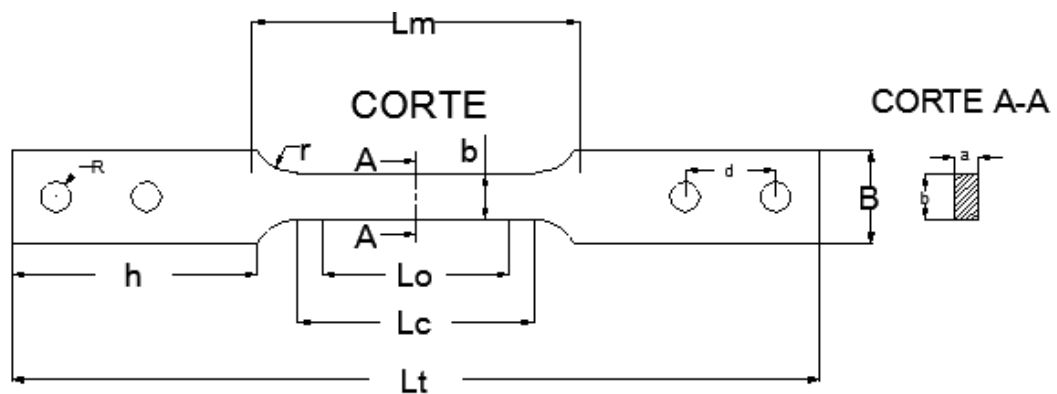


Figura 4.8 Esquema del espécimen plano de sección reducida para los ensayos

(Fuente: ISO 6892:1998(E))

Se realizan los cálculos de cada una de las partes de la geometría del espécimen. Se determina como dato de inicio la sección reducida (espesor-ancho), esto en relación directa a la disponibilidad del espacio en el interior del horno. El horno en su interior dispondrá de un diámetro de 50.8mm y una altura de 125 mm.

Datos

Espesor $a=10\text{mm}$

Ancho $b=20\text{mm}$

Tabla 4.2 Cálculo de las dimensiones del espécimen según la Figura 4.8

| Área sección (corte) | Longitud Original | Longitud Paralela | Longitud libre mordazas |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| $S_o=a \times b$ | $L_o=5.65(S_o)^{1/2}$ | $L_c= L_o+1.5(S_o)^{1/2}$ | $L_m= L_o+3b$ |
| $S_o =10 \times 20$ | $L_o=5.65(200)^{1/2}$ | $L_c=80+1.5(200)^{1/2}$ | $L_m=80+3(20)$ |
| $S_o= 200\text{mm}^2$ | $L_o=80\text{mm}$ | $L_c=101.2\text{mm}$ | $L_m=140\text{mm}$ |

Tabla 4.3 Dimensiones en mm del espécimen para los ensayos según Figura 4.8

| a | b | B | h | L _o | L _c | L _t | r | R | d | L _m |
|----|----|----|-------|----------------|----------------|----------------|----|---|----|----------------|
| 10 | 20 | 40 | 122.5 | 80 | 101.2 | 380 | 40 | 5 | 25 | 135 |

(Fuente: ISO 6892:1998(E))

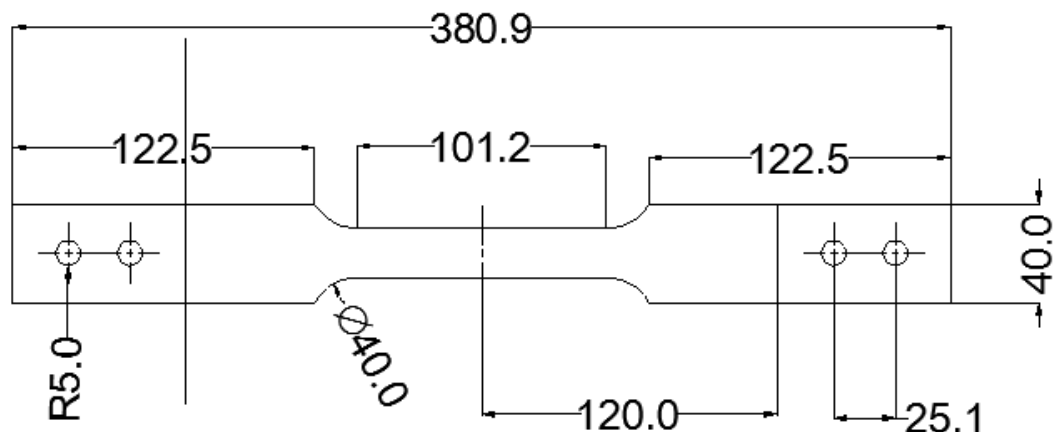


Figura 4.9 Dimensiones calculadas para los especímenes (Fuente: ISO 6892:1998(E))

Estos cálculos se ratifican con la utilización del Nomograma que se presenta a continuación:

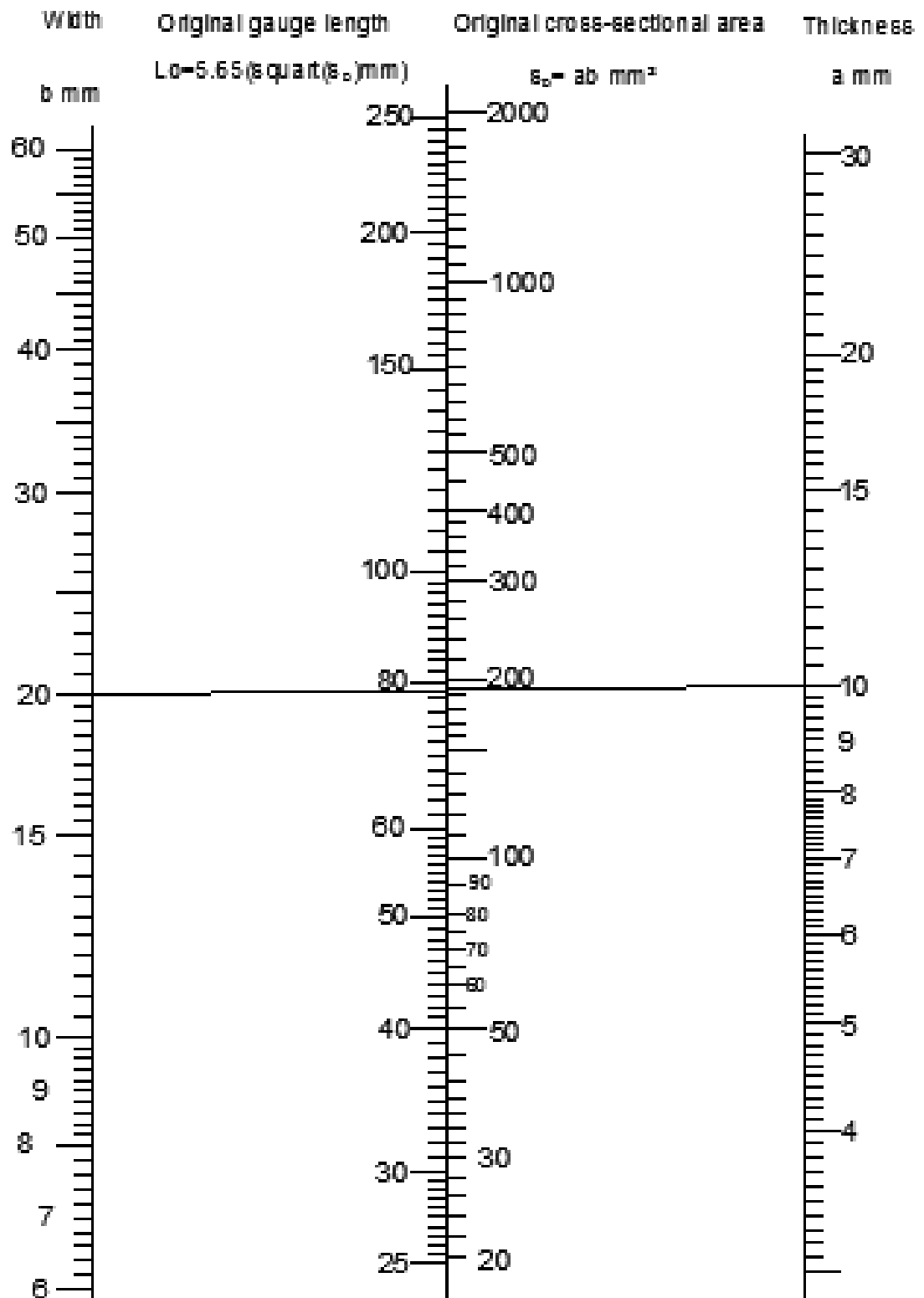


Figura 4.10 Dimensiones calculadas para los especímenes con ayuda del Nomograma

Fuente: [ISO 6892:1998(E)]

4.3.2 EXTRACCIÓN DE LOS ESPECÍMENES PARA TERMOFLUENCIA

Una vez determinadas las dimensiones de los especímenes planos de sección reducida a utilizarse para los ensayos de termofluencia es necesario adquirir una lámina de acero A36 espesor 10mm (suministrada laminada en caliente).

La Figura 4.11 muestra que el espécimen estará orientado longitudinalmente en dirección a la laminación de la plancha de acero. Esto es muy importante para determinar las propiedades mecánicas de los especímenes a ensayarse y poder soportar los resultados con el análisis metalográfico del material.

Se requiere de 15 especímenes de acero ASTM A36 para efectuar 3 ensayos a 4 temperaturas de interés.

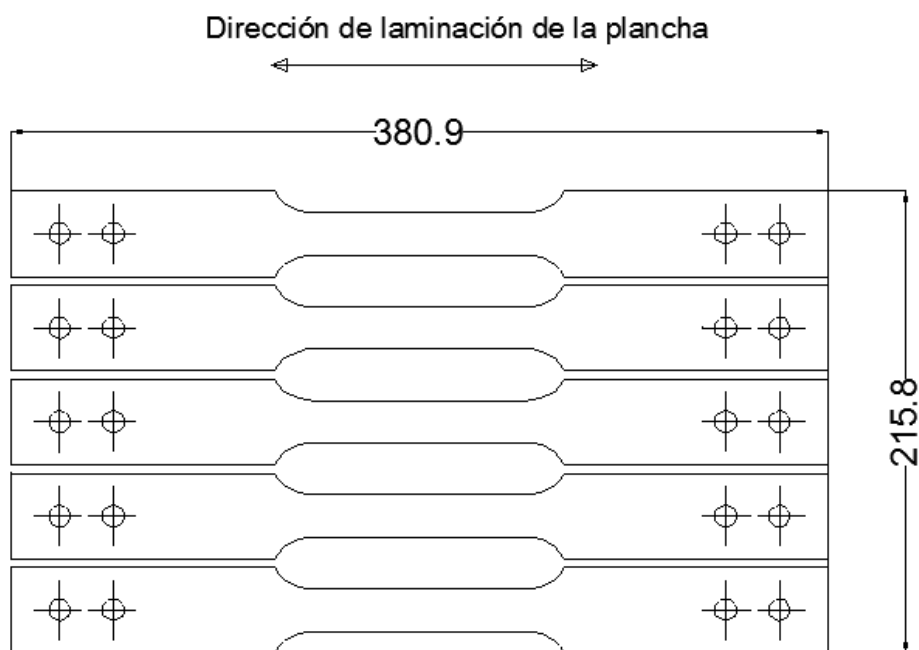


Figura 4.11 Disposición de las probetas para su extracción de la lámina A36

(Fuente: Autor)

Para la obtención de los especímenes de fundición gris perlítica, se fundieron placas en un horno de inducción. Se fundieron tres placas con las siguientes dimensiones (381x216)mm y espesor 20mm, de cada una de ellas se extraerán 5 especímenes dando un total de 15. Como muestra la Figura 4.12.

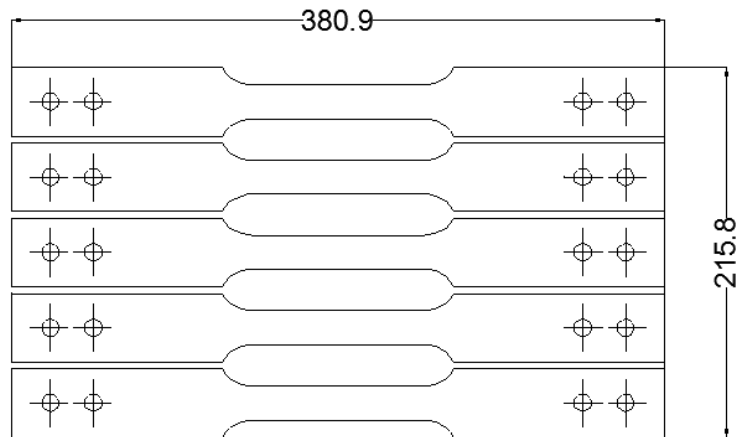


Figura 4.12 Disposición de las probetas para su extracción de la plancha fundida
(Fuente: Autor)

Posteriormente, los especímenes se los somete a un proceso de mecanizado con la finalidad de obtener la configuración y medidas precisas para realizar los ensayos.

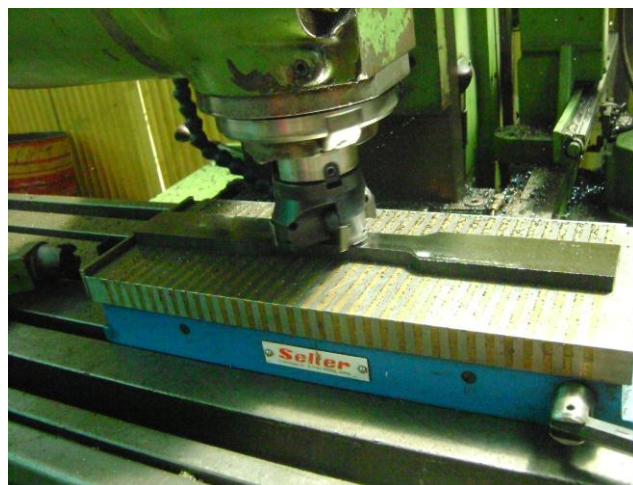


Figura 4.13 Mecanizado de especímenes (fundición gris)
(Fuente: Autor)

4.4 DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS Y TENSIÓN PARA LOS ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA

El punto de fusión de las aleaciones Fe-C depende del tipo de aleación. El acero presenta frecuentemente temperaturas de fusión alrededor de 1530°C, la fundición por su parte se funde alrededor de 1300°C.

Tomando en consideración las temperaturas de fusión de los dos materiales de interés, para el presente trabajo investigativo se ha determinado que las temperaturas de ensayo serán de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C, esto con el fin de cumplir la recomendación dada por la bibliografía [12] que menciona que la termofluencia ocurre a cualquier temperatura incluso a temperatura ambiente, pero es a temperaturas comprendidas en el rango de 500-650°C donde se presenta de manera significativa para producir efectos de creep. La determinación del rango de temperatura es clave para determinar tiempos de ensayo moderados.

La literatura [2] menciona además, que el tiempo límite de para un ensayo de termofluencia es de 10000 horas (416 días), pero la misma literatura menciona que difícilmente se realizan ensayos de ese rango de tiempo por ser poco prácticos.

En cuanto a la determinación de la tensión para los ensayos, la literatura no es muy explícita, pues simplemente menciona que el esfuerzo que se aplicará al espécimen sometido a termofluencia debe ser el suficiente para producir termofluencia generalizada.

Para determinar la carga constante a aplicarse en todos los ensayos de termofluencia en este trabajo se requiere realizar preliminarmente ensayos de Esfuerzo vs Deformación tanto en el acero ASTM A36 como en la fundición gris a temperatura ambiente y a elevadas temperaturas para tener una idea de su comportamiento en función de la temperatura.

4.4.1 ENSAYOS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE DEL ACERO ASTM A36

Se registran los datos de carga aplicada y deformación producida en el espécimen. Emplearemos una máquina Universal Tinus Olsen. El ensayo se lo realizará 3 veces. El promedio de los resultados está tabulado en la Tabla 4.4 y su gráfica correspondiente en la Figura 4.14.

Tabla 4.4 Resultados de los ensayos de tracción. Acero ASTM A36.

| Carga (kg) | Esfuerzo (kg/mm²) | Deformación (mm) | Deformación Unitaria |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500 | 2,5 | 0,005 | 0,0001 |
| 1000 | 5,0 | 0,01 | 0,0002 |
| 1500 | 7,5 | 0,015 | 0,0003 |
| 2000 | 10,0 | 0,018 | 0,00036 |
| 2500 | 12,5 | 0,022 | 0,00044 |
| 3000 | 15,0 | 0,026 | 0,00052 |
| 3500 | 17,5 | 0,035 | 0,0007 |
| 4000 | 20,0 | 0,053 | 0,00106 |
| 4500 | 22,5 | 0,085 | 0,0017 |
| 5000 | 25,0 | 0,186 | 0,00372 |
| 5250 | 26,25 | 0,303 | 0,00606 |
| 5500 | 27,5 | 0,429 | 0,00858 |
| 5750 | 28,75 | 0,559 | 0,01118 |
| 6000 | 30,0 | 0,684 | 0,01368 |
| 6250 | 31,25 | 0,814 | 0,01628 |
| 6500 | 32,5 | 0,982 | 0,01964 |
| 6750 | 33,75 | 1,15 | 0,023 |
| 7000 | 35,0 | 1,339 | 0,02678 |
| 9350 | 46,75 | Rotura | |

(Fuente: Autor)

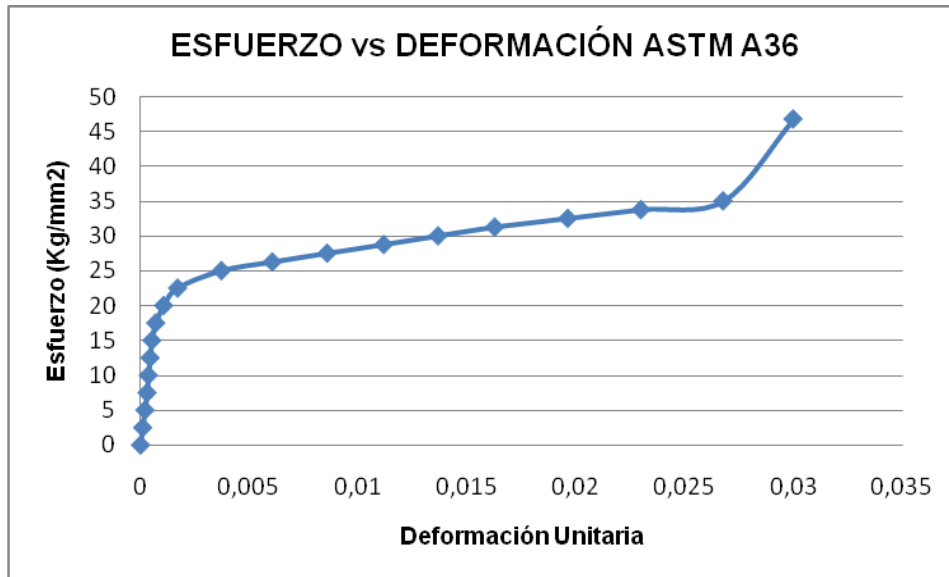


Figura 4.14 Gráfica Esfuerzo vs Deformación. Temperatura ambiente.
A36 (Suministro)
(Fuente: Autor)

De acuerdo a los ensayos el esfuerzo máximo que soporta el acero A36 es de 4675 Kg/cm².

4.4.2 ENSAYOS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE DE LA FUNDICIÓN GRIS

Registraremos los datos de carga aplicada y deformación producida en el espécimen. Emplearemos la máquina universal Tinus Olsen. El ensayo lo realizaremos 3 veces.

El promedio de los registros se los tabula en la Tabla 4.5. Se obtiene el esfuerzo y la deformación unitaria. Posteriormente para una mejor visualización y análisis de los resultados se realiza la curva Esfuerzo vs Deformación Unitaria (Figura 4.15).

Tabla 4.5 Resultado de los ensayos de tensión fundición gris

| Carga (kg) | Esfuerzo (kg/mm ²) | Deformación (mm) | Deformación Unitaria |
|------------|--------------------------------|------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500 | 2,5 | 0,021 | 0,00042 |
| 1000 | 5 | 0,038 | 0,00076 |
| 1500 | 7,5 | 0,052 | 0,00104 |
| 2000 | 10 | 0,067 | 0,00134 |
| 2500 | 12,5 | 0,083 | 0,00166 |
| 3000 | 15 | 0,099 | 0,00198 |
| 3500 | 17,5 | 0,12 | 0,0024 |
| 4000 | 20 | 0,14 | 0,0028 |
| 4250 | 36,99 | 0,162 | 0,00324 |

(Fuente: Autor)

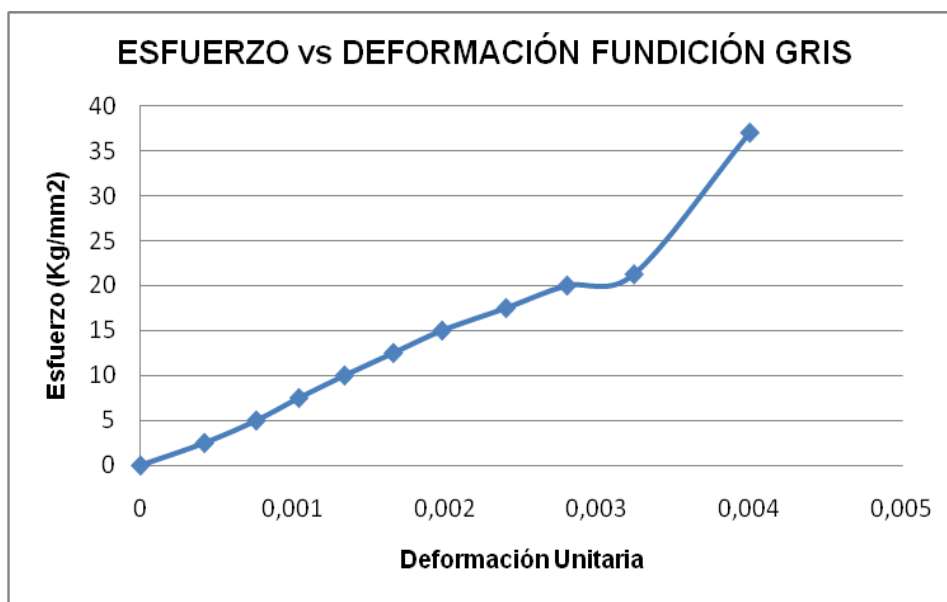


Figura 4.15 Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Temperatura ambiente.

Fundición gris

(Fuente: Autor)

De acuerdo a los ensayos el esfuerzo máximo que soporta la fundición gris es de 3699 Kg/cm² correspondiendo a la clase ASTM 50 [13].

4.4.3 ENSAYOS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN EL ACERO ASTM A36 A ELEVADAS TEMPERATURAS

Estos ensayos se los realizó a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C. Con esto se pretende tener información que permita conocer el comportamiento del acero ASTM A36 a elevadas temperaturas. A continuación, la Tabla 4.5 muestra los registros de los datos para la temperatura de 500°C para el acero ASTM A36.

Tabla 4.6 Registro de datos del ensayo de Esfuerzo-Deformación a la temperatura de 500°C. ASTM A36.

| Carga Aplicada (Kgf) | Esfuerzo Aplicado (Kg/cm ²) | Deformación Espécimen (mm) |
|----------------------|---|----------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 888 | 444 | 0,01 |
| 1152 | 576 | 0,08 |
| 1680 | 840 | 0,22 |
| 1968 | 984 | 0,38 |
| 2448 | 1224 | 0,7 |
| 2712 | 1356 | 0,94 |
| 3264 | 1632 | 1,22 |
| 3696 | 1848 | 1,52 |
| 4104 | 2052 | 1,7 |
| 4512 | 2256 | 1,95 |
| 4944 | 2472 | 2,33 |
| 5280 | 2640 | 2,63 |
| 5784 | 2892 | 4 |
| 5280 | 2640 | 7,85 |
| 4944 | 2472 | 9,58 |
| 4512 | 2256 | 11,82 |
| 4104 | 2052 | 13,64 |
| 3696 | 1848 | 15,38 |
| 3264 | 1632 | 17,08 |
| 2712 | 1356 | 18,9 |

(Fuente: Autor)

La Figura 4.16 muestra gráficamente los datos registrados de los ensayos de Esfuerzo vs Deformación efectuados a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C en el acero ASTM A36.

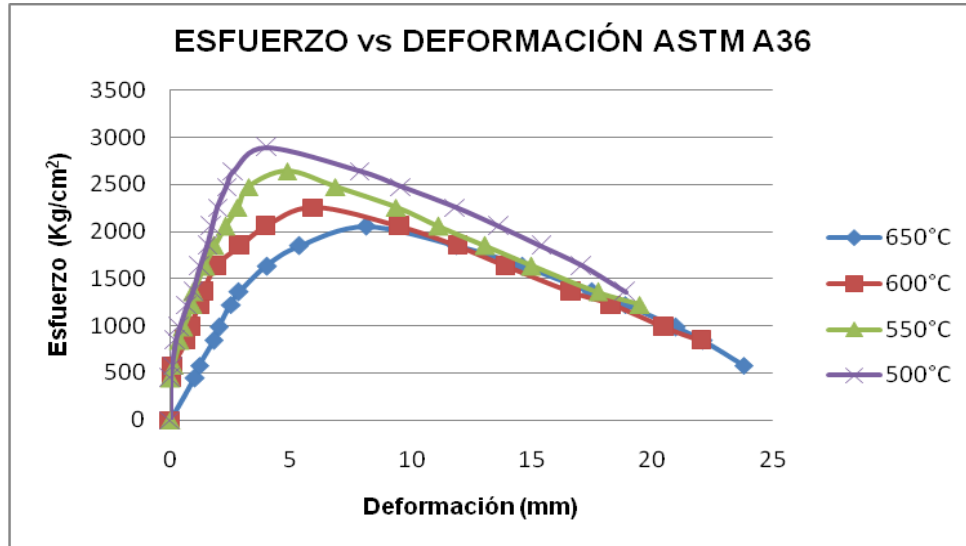


Figura 4.16 Gráfica Esfuerzo vs Deformación a elevadas temperaturas.

Acero ASTM A36.

(Fuente: Autor)

A continuación en la Tabla 4.7 se presenta el esfuerzo máximo y su respectiva deformación alcanzada por los especímenes de acero ASTM A36 a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C.

Tabla 4.7 Esfuerzo Máximo y Deformación de los especímenes a las temperaturas de interés. ASTM A36.

| Temperatura (°C) | Deformación (mm) | Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²) |
|------------------|------------------|---------------------------------------|
| 500 | 4 | 2892 |
| 550 | 4,85 | 2640 |
| 600 | 5,93 | 2256 |
| 650 | 8,1 | 2052 |

(Fuente: Autor)

Los datos registrados en la Tabla 4.7 son de mucha importancia para poder determinar el esfuerzo que se aplicará en los ensayos de termofluencia, estos datos se procede a graficarlos para apreciarlos de mejor manera en las Figuras 4.17 y 4.18.

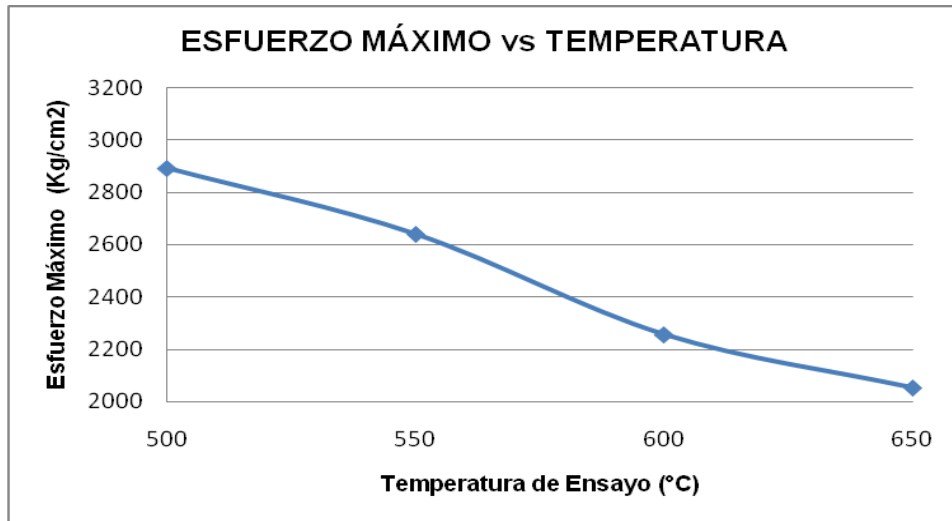


Figura 4.17 Gráfica Esfuerzo Máximo vs Temperatura de ensayo. ASTM A36.

(Fuente: Autor)

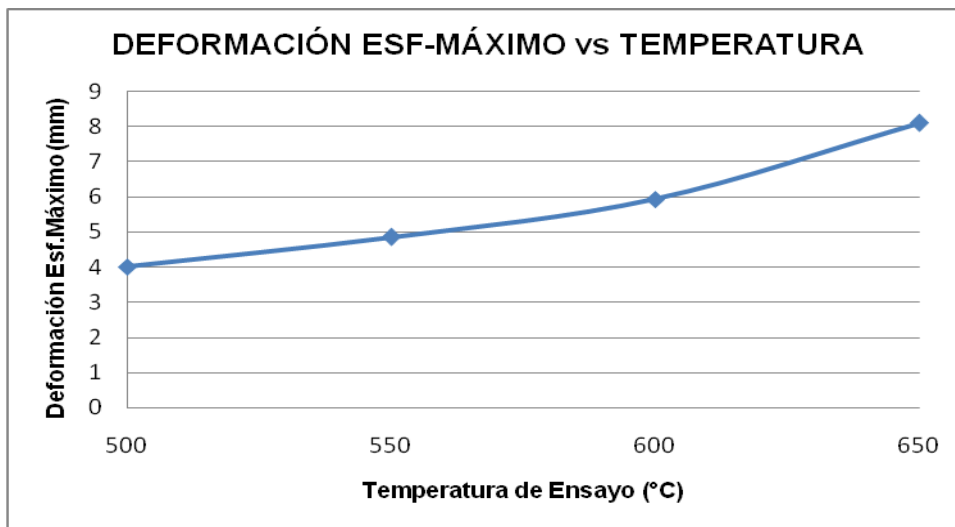


Figura 4.18 Deformación presentada en el Esfuerzo Máximo vs Temperatura de ensayo. ASTM A36.

(Fuente: Autor)

De acuerdo a los datos registrados, el esfuerzo máximo del acero A36 a 500°C es de 3012 Kg/cm², por otro lado a 650°C es de 2137,5 Kg/cm². Se puede mencionar que a mayor temperatura el esfuerzo que soporta el acero A36 disminuye. Esto es consolidado por el comportamiento del acero que como se observa los datos presentan mayor deformación a mayor temperatura, es decir disminuye por deformación su sección y con ello soporta menores esfuerzos.

4.4.4 ENSAYOS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN LA FUNDICIÓN GRIS A ELEVADAS TEMPERATURAS

El procedimiento para la fundición gris es el mismo realizado con el acero ASTM A 36.

Tabla 4.8 Registro de datos del ensayo de Esfuerzo-Deformación a la temperatura de 500°C. Fundición gris

| Carga Aplicada (Kgf) | Esfuerzo Aplicado (Kg/cm²) | Deformación Espécimen (mm) |
|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 888 | 444 | 0,07 |
| 1152 | 576 | 0,12 |
| 1680 | 840 | 0,21 |
| 1968 | 984 | 0,27 |
| 2448 | 1224 | 0,33 |
| 2712 | 1356 | 0,37 |
| 3264 | 1632 | 0,44 |
| 3696 | 1848 | 0,49 |
| 4104 | 2052 | 0,54 |
| 4512 | 2256 | 0,58 |
| 4944 | 2472 | 0,63 |
| 5280 | 2640 | 0,67 |
| 5784 | 2892 | 0,71 |
| 6216 | 3108 | 0,75 |
| 6600 | 3300 | 0,77 |

(Fuente: Autor)

La Tabla 4.8 presentada anteriormente, muestra los registros de los datos obtenidos de los ensayos de Esfuerzo vs Deformación a la temperatura de 500°C efectuados con la fundición gris pelítica laminar. La siguiente Figura 4.19 muestra gráficamente los promedios de los ensayos de Esfuerzo vs Deformación para las cuatro temperaturas de interés realizadas en la fundición gris.

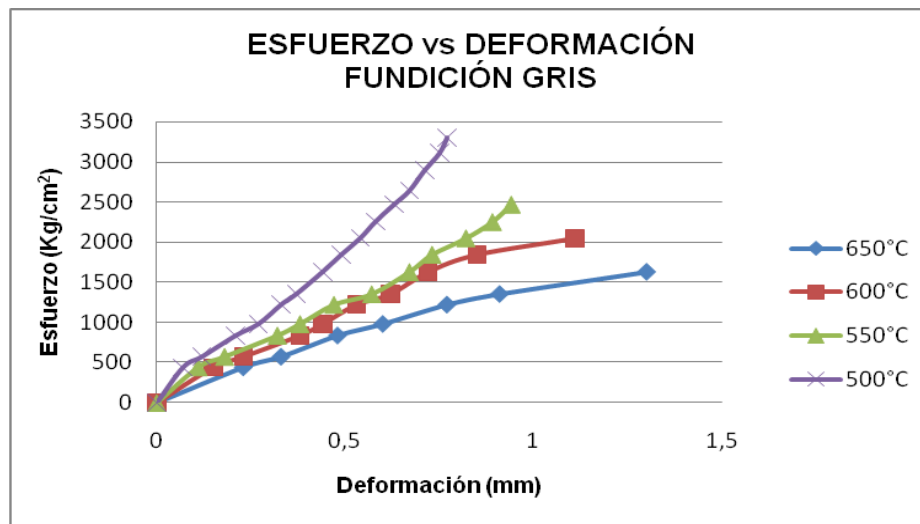


Figura 4.19 Gráfica Esfuerzo vs Deformación a elevadas temperaturas.
Fundición gris
(Fuente: Autor)

A continuación en la Tabla 4.9 se presenta el esfuerzo máximo y su respectiva deformación alcanzada por los especímenes a las temperaturas de estudio.

Tabla 4.9 Esfuerzo Máximo y Deformación de los especímenes a las temperaturas de interés. fundición gris

| Temperatura (°C) | Deformación (mm) | Esfuerzo (Kg/cm ²) |
|------------------|------------------|--------------------------------|
| 500 | 0,77 | 3300 |
| 550 | 0,94 | 2472 |
| 600 | 1,11 | 2052 |
| 650 | 1,3 | 1632 |

(Fuente: Autor)
72

Los datos de la Tabla 4.9 se procedió a graficarlos para apreciarlos mejor en las Figuras 4.20 y 4.21.

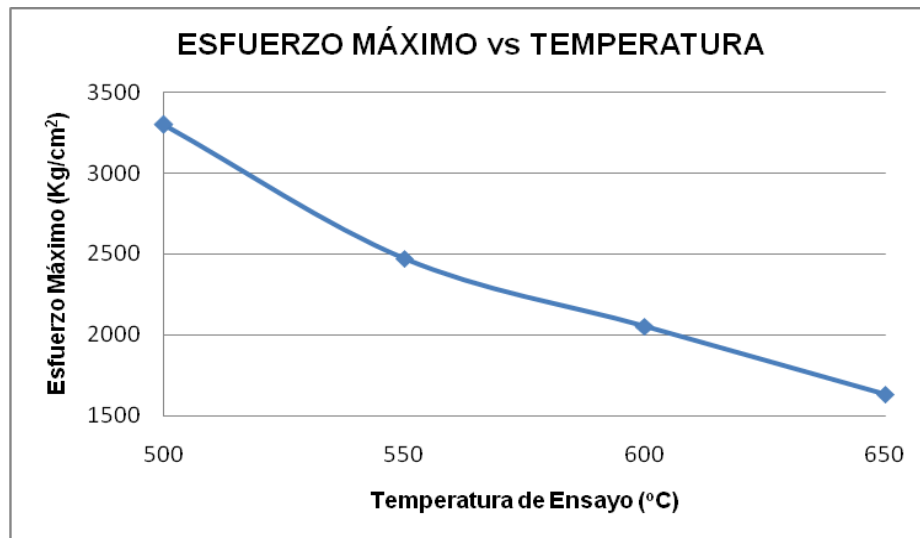


Figura 4.20 Gráfica Esfuerzo Máximo vs Temperatura de ensayo. Fundición gris (Fuente: Autor)

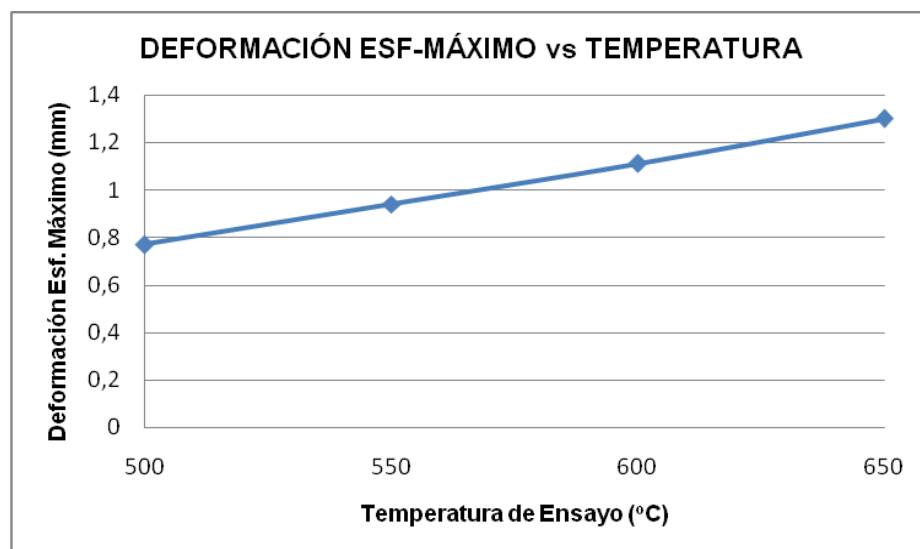


Figura 4.21 Deformación vs Temperatura de ensayo. Fundición gris (Fuente: Autor)

De acuerdo a los datos registrados el esfuerzo máximo que soporta la fundición gris a 500°C es de 3300 Kg/cm², por otro lado a 650°C es de

1632 Kg/cm². Se puede mencionar que la fundición gris a mayor temperatura soporta un menor esfuerzo.

La fundición gris no presenta una deformación considerable. A 500°C presenta un deformación de 0,77mm y la máxima deformación que presenta es a 650°C que es de 1,3mm. Por ello la zona de fractura no presenta disminución de susección apreciable a simple vista por lo que se puede mencionar que aun a elevadas temperaturas la fundición no se deforma significativamente y la fractura continua siendo tipo frágil.

Basándose en esta información se determina que el esfuerzo de tensión inicial que se aplicará a los especímenes sometidos a los ensayos de termofluencia, será de 1224 Kg/cm² (Figura 4.22), para definir este valor se necesitó varios ensayos preliminares a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C con el fin de que los tiempos de ensayos de termofluencia sean razonables.

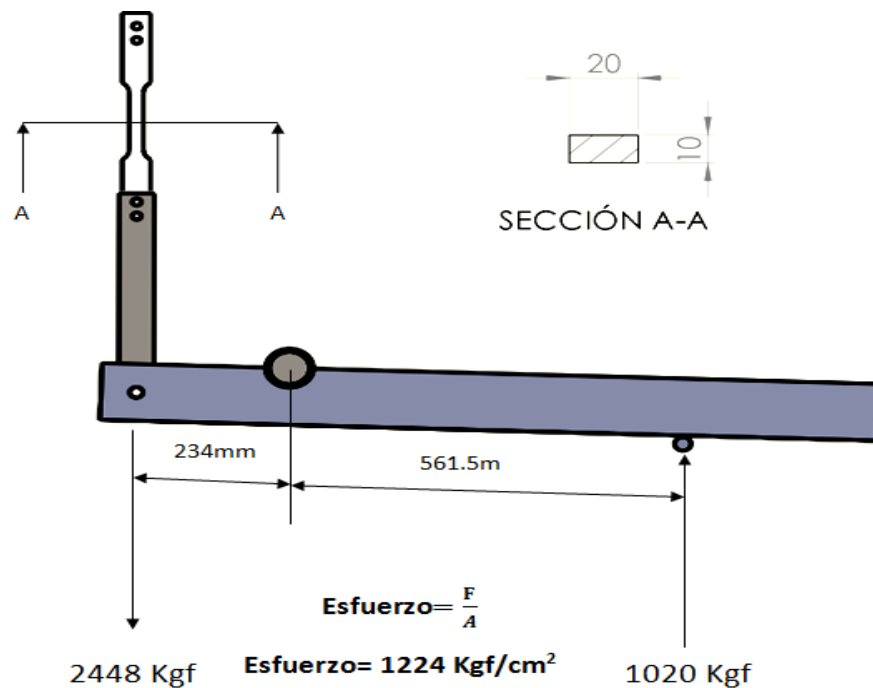


Figura 4.22 Esquema de la carga constante aplicada en los ensayos de termofluencia. Relación 1:2.4 en la palanca

(Fuente: Autor)

En la Figura 4.22 presentada anteriormente, se puede ver esquemáticamente que la carga constante que se aplicará en la palanca por medio de la gata hidráulica es de 1224Kgf. La relación de la palanca es de 2,4 por lo tanto la carga que se transmitirá al espécimen es de 2448 Kgf. Dado esta carga aplicada el esfuerzo que soportará inicialmente el espécimen de sección reducida (2cm^2) será de 1224 Kg/cm^2 .

Se torna necesario determinar a qué porcentaje corresponde el esfuerzo de 1224 Kg/cm^2 que se aplicará en los ensayos de termofluencia con respecto al esfuerzo máximo que soportan estos materiales (acero ASTM A36, Fundición gris perlítica laminar) a temperatura ambiente.

Tabla 4.10 Resumen esfuerzos máximos del acero A36 y de la fundición gris

| Temperatura (°C) | Esfuerzo Máximo A36 (Kg/cm²) | Esfuerzo Máximo Fundición (Kg/cm²) |
|-------------------------|--|--|
| Tamb | 4675 | 3699 |
| 500 | 2892 | 3300 |
| 550 | 2640 | 2472 |
| 600 | 2256 | 2052 |
| 650 | 2050 | 1632 |

(Fuente: Autor)

Según los datos presentados en la Tabla 4.10 el esfuerzo de 1224 Kg/cm^2 que se aplicará constantemente en todos los ensayos de termofluencia corresponde a un 26,18% del esfuerzo máximo del acero ASTM A36 y a un 33,09% del esfuerzo máximo correspondiente a la fundición gris. Estos valores están en buen acuerdo con los correspondientes a los usados por otros investigadores [12].

4.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Las Tablas 4.11 y 4.12 muestran la matriz de los ensayos que serán necesarios realizarlos tanto con el acero ASTM A36 como con la fundición gris perlítica.

Los ensayos son los mismos para los dos materiales con el fin de poder realizar la comparación respectiva del comportamiento de estos materiales frente al fenómeno de termofluencia.

Para ello, los ensayos se los han registrado mediante un formato que permitirá documentar y analizar los resultados.

La codificación utilizada para identificar y registrar los ensayos de termofluencia necesarios para la presente investigación se muestra a continuación:

Número de Probeta:

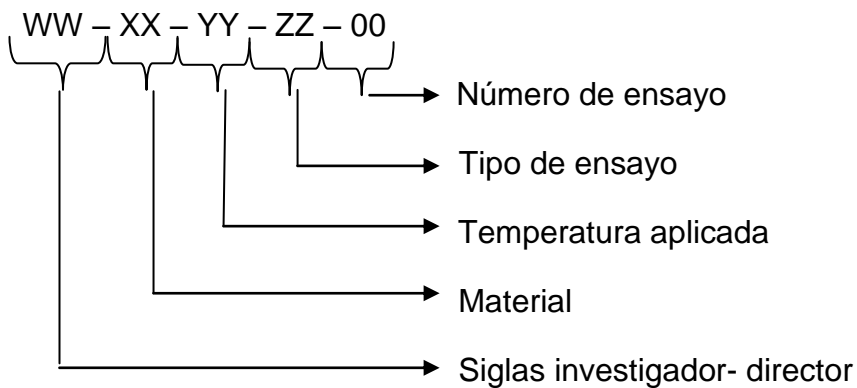


Tabla 4.11 Ensayos de termofluencia a realizarse en el acero ASTM A36.

| ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA | | | ENSAYOS METALOGRAFICOS | | ENSAYOS DE MICRODUREZA | | OXIDACIÓN TÉRMICA | |
|--------------------------|-----------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|-------------------|----------|
| Identificación | # de Probetas | # ensayo | # de Probetas | # ensayo | # de Probetas | # ensayo | # de Probetas | # ensayo |
| A36 T 500 | CP-A36-T500-T-1 | 1 | CP-A36-T500-M-1 | 13 | CP-A36-T500-D-1 | 25 | CP-A36-T500-O-1 | 37 |
| | CP-A36-T500-T-2 | 2 | CP-A36-T500-M-2 | 14 | CP-A36-T500-D-2 | 26 | CP-A36-T500-O-2 | 38 |
| | CP-A36-T500-T-3 | 3 | CP-A36-T500-M-3 | 15 | CP-A36-T500-D-3 | 27 | CP-A36-T500-O-3 | 39 |
| A36 T 550 | CP-A36-T550-T-1 | 4 | CP-A36-T550-M-1 | 16 | CP-A36-T550-D-1 | 28 | CP-A36-T550-O-1 | 40 |
| | CP-A36-T550-T-2 | 5 | CP-A36-T550-M-2 | 17 | CP-A36-T550-D-2 | 29 | CP-A36-T550-O-2 | 41 |
| | CP-A36-T550-T-3 | 6 | CP-A36-T550-M-3 | 18 | CP-A36-T550-D-3 | 30 | CP-A36-T550-O-3 | 42 |
| A36 T 600 | CP-A36-T600-T-1 | 7 | CP-A36-T600-M-1 | 19 | CP-A36-T600-D-1 | 31 | CP-A36-T600-O-1 | 43 |
| | CP-A36-T600-T-2 | 8 | CP-A36-T600-M-2 | 20 | CP-A36-T600-D-2 | 32 | CP-A36-T600-O-2 | 44 |
| | CP-A36-T600-T-3 | 9 | CP-A36-T600-M-3 | 21 | CP-A36-T600-D-3 | 33 | CP-A36-T600-O-3 | 45 |
| A36 T 650 | CP-A36-T600-T-1 | 10 | CP-A36-T650-M-1 | 22 | CP-A36-T650-D-1 | 34 | CP-A36-T650-O-1 | 46 |
| | CP-A36-T600-T-2 | 11 | CP-A36-T650-M-2 | 23 | CP-A36-T650-D-2 | 35 | CP-A36-T650-O-2 | 47 |
| | CP-A36-T600-T-3 | 12 | CP-A36-T650-M-3 | 24 | CP-A36-T650-D-3 | 36 | CP-A36-T650-O-3 | 48 |

(Fuente: Autor)

Tabla 4.12 Ensayos de termofluencia a realizarse en la fundición gris perlítica

| ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA | | | ENSAYOS METALGRÁFICOS | | ENSAYOS DE MICRODUREZA | | OXIDACIÓN TÉRMICA | |
|--------------------------|----------------|----------|-----------------------|----------|------------------------|----------|-------------------|----------|
| Identificación | # de Probetas | # ensayo | # de Probetas | # ensayo | # de Probetas | # ensayo | # de probetas | # ensayo |
| FG T 500 | CP-FG-T500-T-1 | 49 | CP-FG-T500-M-1 | 61 | CP-FG-T500-D-1 | 73 | CP-FG-T500-O-1 | 85 |
| | CP-FG-T500-T-2 | 50 | CP-FG-T500-M-2 | 62 | CP-FG-T500-D-2 | 74 | CP-FG-T500-O-2 | 86 |
| | CP-FG-T500-T-3 | 51 | CP-FG-T500-M-3 | 63 | CP-FG-T500-D-3 | 75 | CP-FG-T500-O-3 | 87 |
| FG T 550 | CP-FG-T550-T-1 | 52 | CP-FG-T550-M-1 | 64 | CP-FG-T550-D-1 | 76 | CP-FG-T550-O-1 | 88 |
| | CP-FG-T550-T-2 | 53 | CP-FG-T550-M-2 | 65 | CP-FG-T550-D-2 | 77 | CP-FG-T550-O-2 | 89 |
| | CP-FG-T550-T-3 | 54 | CP-FG-T550-M-3 | 66 | CP-FG-T550-D-3 | 78 | CP-FG-T550-O-3 | 90 |
| FG T 600 | CP-FG-T600-T-1 | 55 | CP-FG-T600-M-1 | 67 | CP-FG-T600-D-1 | 79 | CP-FG-T600-O-1 | 91 |
| | CP-FG-T600-T-2 | 56 | CP-FG-T600-M-2 | 68 | CP-FG-T600-D-2 | 80 | CP-FG-T600-O-2 | 92 |
| | CP-FG-T600-T-3 | 57 | CP-FG-T600-M-3 | 69 | CP-FG-T600-D-3 | 81 | CP-FG-T600-O-3 | 93 |
| FG T 650 | CP-FG-T650-T-1 | 58 | CP-FG-T650-M-1 | 70 | CP-FG-T650-D-1 | 82 | CP-FG-T650-O-1 | 94 |
| | CP-FG-T650-T-2 | 59 | CP-FG-T650-M-2 | 71 | CP-FG-T650-D-2 | 83 | CP-FG-T650-O-2 | 95 |
| | CP-FG-T650-T-3 | 60 | CP-FG-T650-M-3 | 72 | CP-FG-T650-D-3 | 84 | CP-FG-T650-O-3 | 96 |

(Fuente: Autor)

4.6 OBTENCIÓN DE DATOS DE LOS ENSAYOS

La obtención y registro de los datos se obtendrán de cada uno de los ensayos que se los realizarán según las Tablas 4.11 y 4.12.

De acuerdo a la matriz planteada se inicia realizando los ensayos de termofluencia en el acero ASTM A36.

4.6.1 ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA EN EL ACERO ASTM A36

Tabla 4.13 Identificación ensayo # 1. ASTM A36

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Identificación | A36 T 500 |
| # de Probeta | CP-A36-T500-T-1 |
| # de Ensayo | 1 |

El ensayo número 1 según la identificación registrada en la Tabla 4.11 y extraída en la Tabla 4.13 corresponde a un ensayo que se efectuará en el acero ASTM A36. Es un ensayo de termofluencia a una temperatura y carga constante de 500°C y 2448 Kgf, respectivamente. Se registran los datos de Deformación vs Tiempo. El ensayo lo realizamos 3 veces.

En la Figura 4.23 se muestra una fotografía de la máquina de termofluencia que se construyó operando y realizando el ensayo, en la Tabla 4.14 se presentan los datos registrados de los ensayos.

Posteriormente en las Figuras 4.24-4.27 se presentan las gráficas Deformación vs Tiempo de los tres ensayos de termofluencia efectuados en el acero ASTM A36 para cada una de las temperaturas (500°C, 550°C, 600°C y 650°C) a una carga constante de 2448 Kgf aplicada al espécimen.



Figura 4.23 Máquina de termofluencia durante la realización del ensayo a 500°C, carga aplicada al espécimen de 2448 Kgf. Acero ASTM A36.

(Fuente: Autor)

Tabla 4.14 Registro de datos obtenidos de los ensayos de termofluencia efectuados a varias temperaturas en el acero ASTM A36.

| Identificación | # Ensayo | (mm ²) | (mm ²) | % | % | (min) |
|------------------|----------|--------------------|--------------------|----------------|------------|-----------------|
| | | Área inicial | Área final | Reducción Área | Elongación | Duración Ensayo |
| A36 T 500 | 1 | 200 | 190,18 | 4,91 | 2,8 | 4320 |
| | 2 | 200 | 190,17 | 4,92 | 2,82 | 4320 |
| | 3 | 200 | 190,1 | 4,95 | 2,84 | 4320 |
| A36 T 550 | 4 | 200 | 34,3 | 82,85 | 39 | 2490 |
| | 5 | 200 | 34,36 | 82,82 | 38,96 | 2962 |
| | 6 | 200 | 34,28 | 82,86 | 39,04 | 2056 |
| A36 T 600 | 7 | 200 | 24,52 | 87,74 | 44,06 | 254 |
| | 8 | 200 | 24,59 | 87,71 | 44,02 | 246 |
| | 9 | 200 | 24,5 | 87,75 | 44,1 | 217 |
| A36 T 650 | 10 | 200 | 17,09 | 91,46 | 47,58 | 31 |
| | 11 | 200 | 17,04 | 91,48 | 47,62 | 29 |
| | 12 | 200 | 17,07 | 91,47 | 47,6 | 26 |

(Fuente: Autor)

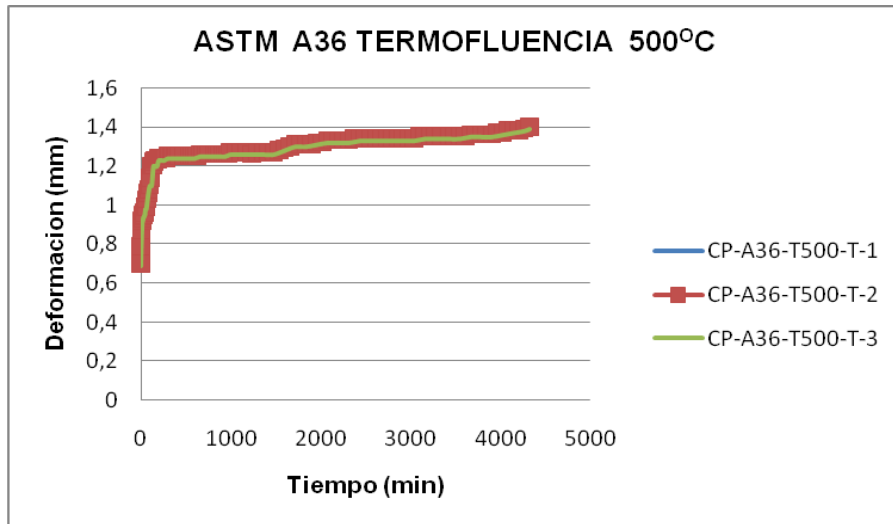


Figura 4. 24 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T500°C.
(Fuente: Autor)

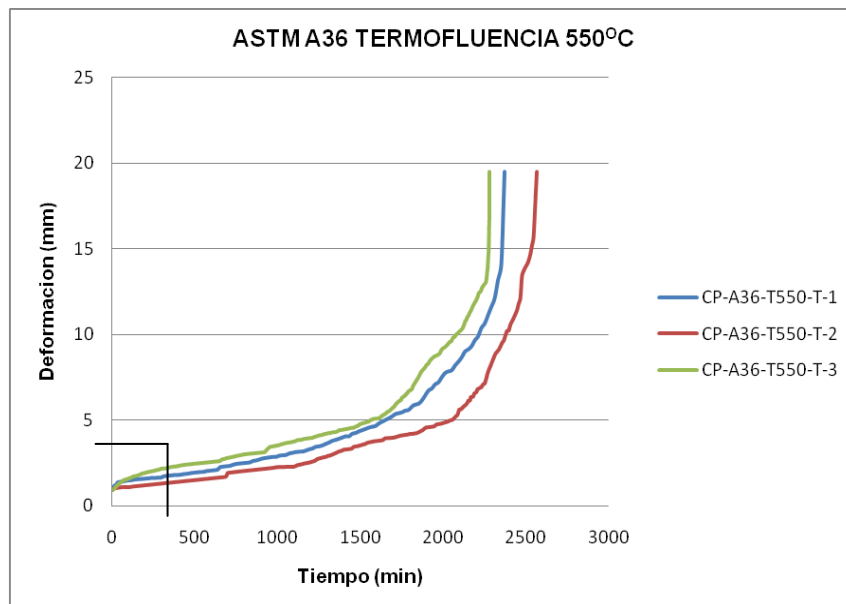
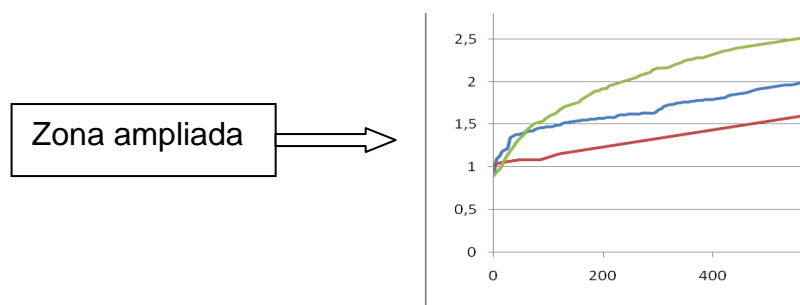


Figura 4.25 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T550°C.
(Fuente: Autor)

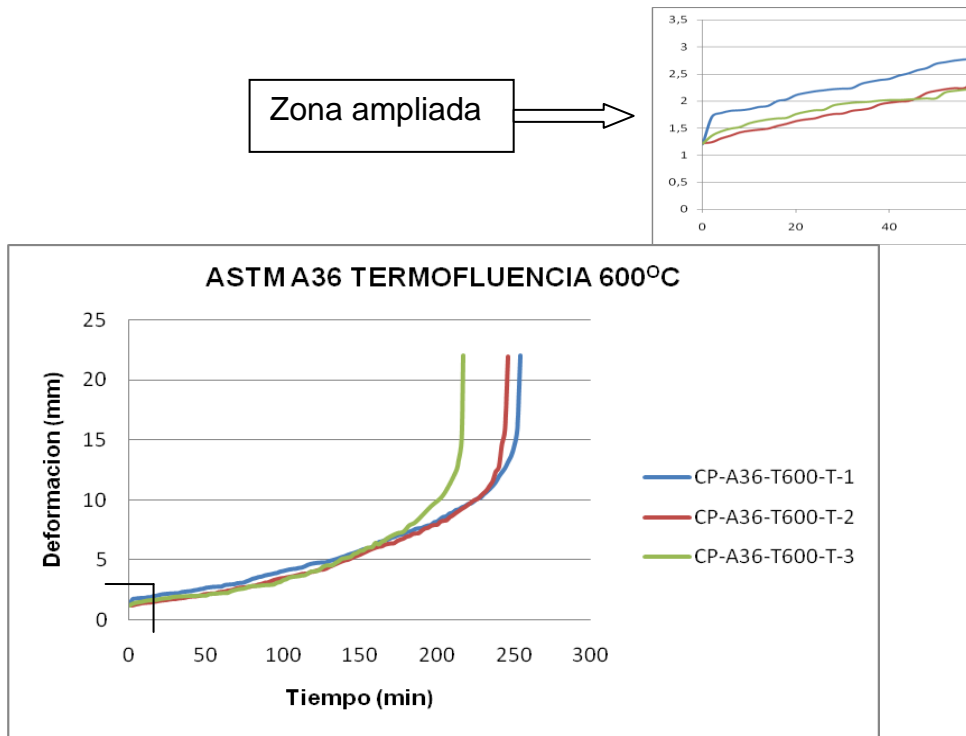


Figura 4.26 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T600°C.
(Fuente: Autor)

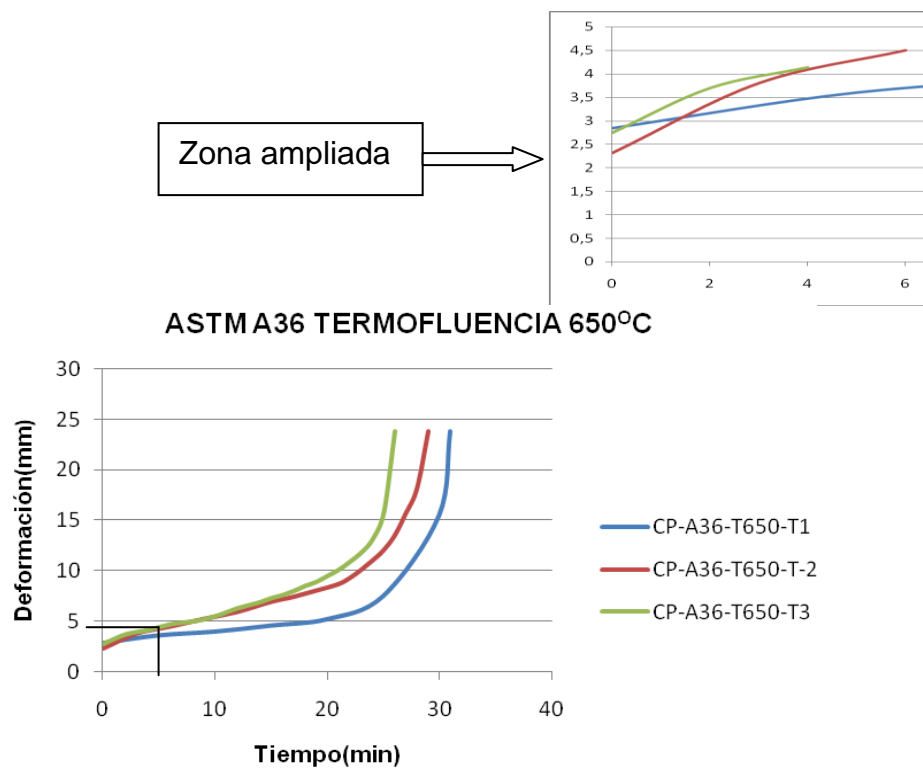


Figura 4.27 Gráficas Deformación vs Tiempo. ASTM A36 T650°C.
(Fuente: Autor)

Las curvas presentadas son Deformación vs Tiempo producto de los datos extraídos de los ensayos de termofluencia en el acero ASTM A36. La curva típicamente presenta una deformación instantánea al aplicar la carga (2448 Kgf) una vez que se ha alcanzado y estabilizado la temperatura correspondiente de ensayo. Las deformaciones instantáneas son: 0,7mm, 09mm, 1,2mm y 2,5mm a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C respectivamente.

En las gráficas, se aprecia una primera zona donde la pendiente de la curva aumenta rápidamente para posteriormente alcanzar una segunda zona donde se puede decir que la curva tiene una pendiente estable. En la experimentación a 500°C se logró alcanzar hasta esta zona, pero a las temperaturas de 550°C, 600°C y 650°C se entra a una tercera zona donde la pendiente de la curva aumenta considerablemente, hasta finalmente, en un corto lapso de tiempo llegar a la fractura del espécimen de prueba.

A 500°C el acero ASTM A36 en un tiempo de ensayo de 72 horas no llega a fracturarse, tiene una reducción promedio de área de 4,93% y una elongación promedio de 2,82%.

A 550°C el tiempo promedio necesario para llegar a la fractura es de 2502,3 min (41,7h) presentando una reducción de área de 82,84% y un porcentaje promedio de elongación de 39%.

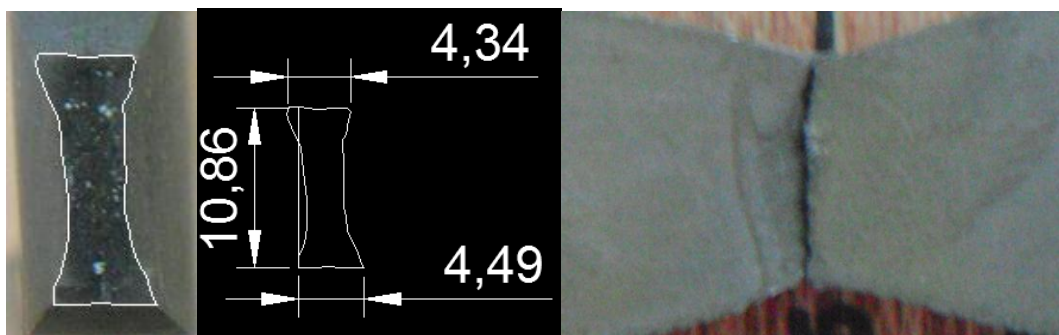


Figura 4.28 Especimen de acero A36 fracturado luego del ensayo de termofluencia a 550°C. Formación del cuello de botella (copa y cono)-

Reducción de la sección

(Fuente: Autor)

A 600°C el tiempo promedio para llegar a la fractura del espécimen es de 239 min (3,98 h) con un porcentaje promedio de reducción de área de 87,73% y un porcentaje de elongación promedio de 44,06%.

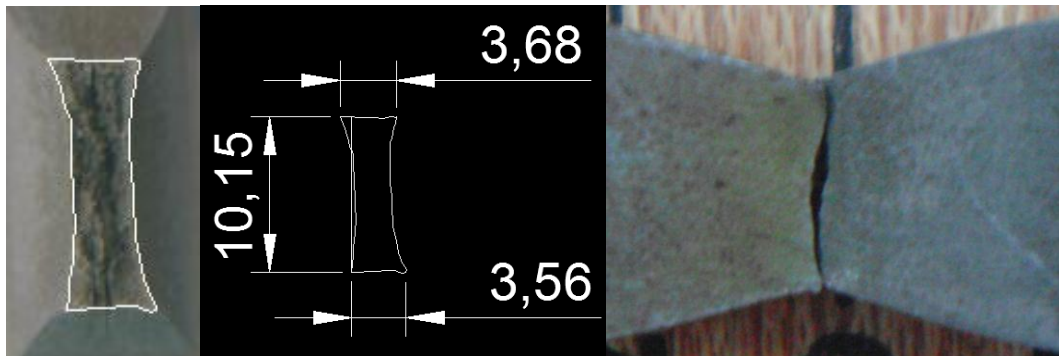


Figura 4.29 Espécimen de acero A36 fracturado luego del ensayo de termofluencia a 600°C. Formación del cuello de botella (copa y cono)- Mayor reducción de la sección con respecto al ensayo a 550°C.

(Fuente: Autor)

A 650°C el tiempo promedio para llegar a la fractura es de 28,6 min con un porcentaje promedio de reducción de área de 91,47% y un porcentaje de elongación promedio de 47,6%.

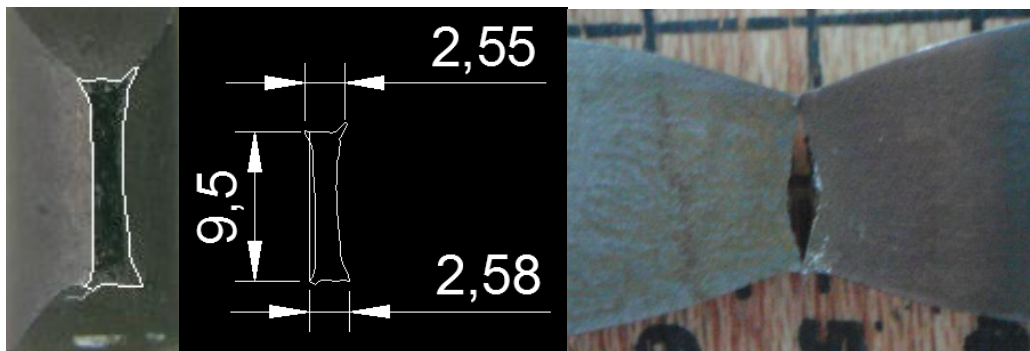


Figura 4.30 Espécimen de acero A36 fracturado luego del ensayo de termofluencia a 650°C. Formación del cuello de botella (copa y cono)- Mayor reducción de la sección con respecto al ensayo a 600°C.

(Fuente: Autor)

Como se puede observar, a medida que la temperatura aumenta el tiempo de duración del ensayo disminuye, el porcentaje de reducción de área aumenta y el porcentaje de alargamiento también aumenta.

Lo que se menciona es posible observar gráficamente en las Figuras 4.31- 4.33.

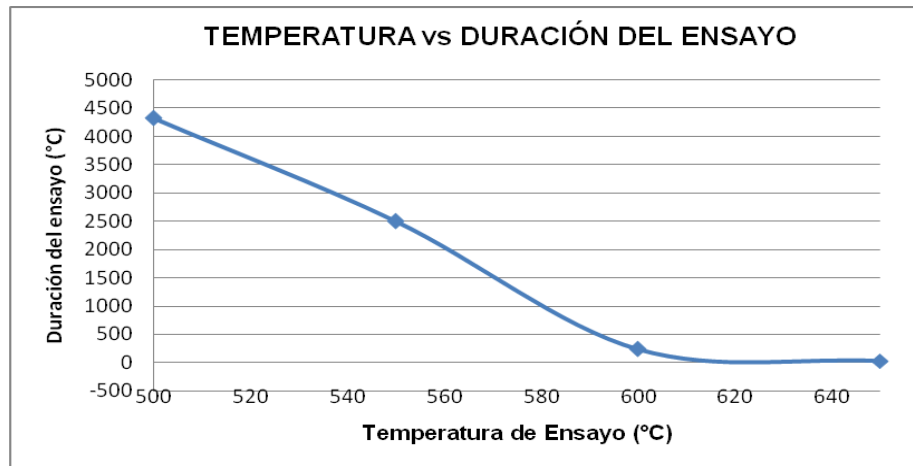


Figura 4. 31 Gráfica Temperatura de Ensayo vs Duración del ensayo.

Termofluencia ASTM A36

(Fuente: Autor)

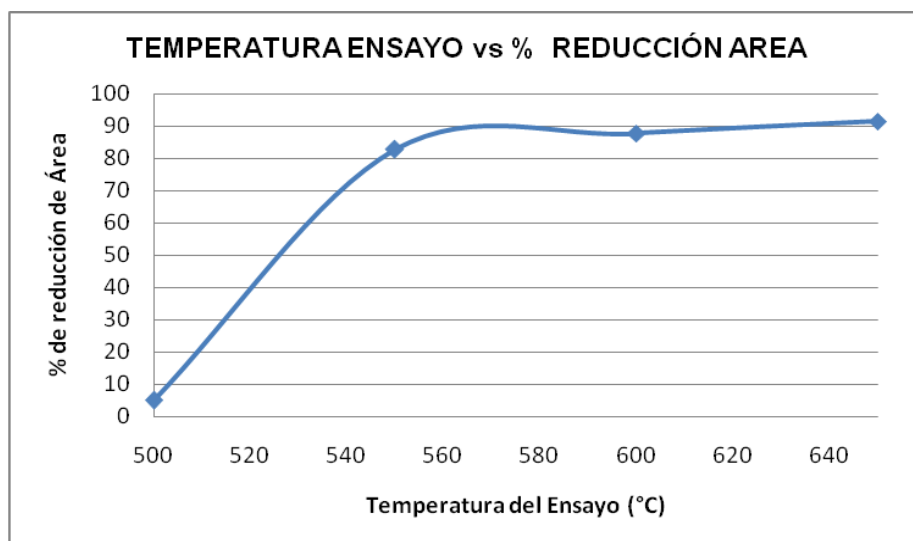


Figura 4.32 Gráfica Temperatura de Ensayo vs % Reducción de Área.

Ensayo de Termofluencia ASTM A36

(Fuente: Autor)

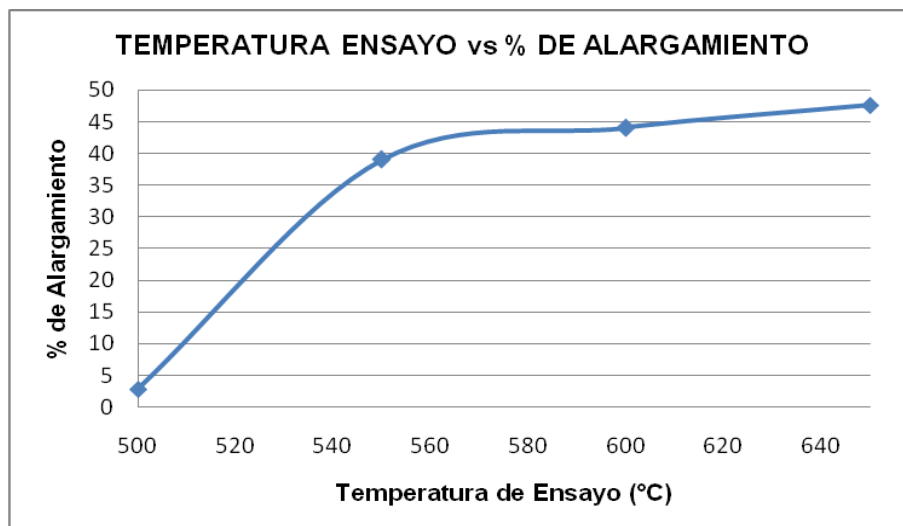


Figura 4.33 Gráfica Temperatura de Ensayo vs % Alargamiento.

Ensayo de Termofluencia. ASTM A36

(Fuente: Autor)

4.6.2 ENSAYOS METALOGRAFICOS. ESPECÍMENES SOMETIDOS A TERMOFLUENCIA. ACERO ASTM A36

Tabla 4.15 Identificación ensayo # 13. ASTM A36

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Identificación | A36 T 500 |
| # de Probeta | CP-A36-T500-M-1 |
| # de Ensayo | 13 |

El ensayo número 13 según la identificación registrada en la Tabla 4.11 y extraída en la Tabla 4.15 corresponde a un ensayo que se efectuará en el acero ASTM A36. Es un ensayo metalográfico realizado a la probeta extraída del espécimen sometido a un ensayo de termofluencia a una temperatura y carga constante de 500°C y 2448 Kgf, respectivamente.

El objetivo del ensayo metalográfico en los especímenes sometidos al fenómeno de termofluencia es buscar las transformaciones que pudo haber sufrido el material frente a mencionado fenómeno, puede producirse el aparecimiento de cavidades, cambio en la configuración geométrica de los granos y transformaciones de fase desde la zona de

fractura. Para ello se realiza la extracción de una probeta según la norma ASTM A370 en sentido longitudinal de la zona de fractura de cada uno de los especímenes que fueron sometidos a los ensayos de termofluencia. Se prepara adecuadamente las superficie de las probetas extraídas de acuerdo a la norma ASTM A3. Posteriormente se realiza con la ayuda del microscopio óptico un barrido de inspección metalográfica, se utiliza el reactivo nital 4 para el ataque químico de las probetas en un tiempo aproximada de 30-60 segundos.

Luego del barrido metalográfico, se observan cambios metalográficos a las distancias de 100 μ m–(2-4-6-8-13 y 18) mm a partir de la fractura. Los ensayos metalográficos permiten constatar que los granos se han alineado en dirección de la tensión aplicada. A medida que la temperatura aumenta los granos son mucho más alargados por lo que la relación largo-ancho tendría que ser mayor. Para cuantificar esta relación (largo ancho) se recurre a una herramienta computacional para análisis de imágenes metalográficas.

En el Anexo 5 se puede observar las fotomicrografías realizadas en las probetas a las respectivas distancias a partir de la fractura de cada espécimen de acero A36 ensayado a termofluencia. De cada probeta se tomaron 30 granos. Según la norma ASTM E 112 se procede a medir el largo de cada uno de los 30 granos y posteriormente el ancho. La longitud del grano se mide paralelo a la dirección de la aplicación de la carga en vista de que los granos por efecto del fenómeno de termofluencia se han alineado en dirección a la carga aplicada.

Con el fin de evaluar la deformación de los granos se tomó como punto de referencia el análisis de las fotomicrografías tomadas a 2mm y a 4mm de distancia de la fractura el espécimen. Se obtiene un promedio del cociente largo-ancho de cada una de las probetas.

La medición de la longitud de los 30 granos de la probeta extraída del espécimen sometido a termofluencia (500°C y 2448Kgf) se presenta en la Figura 4.34.

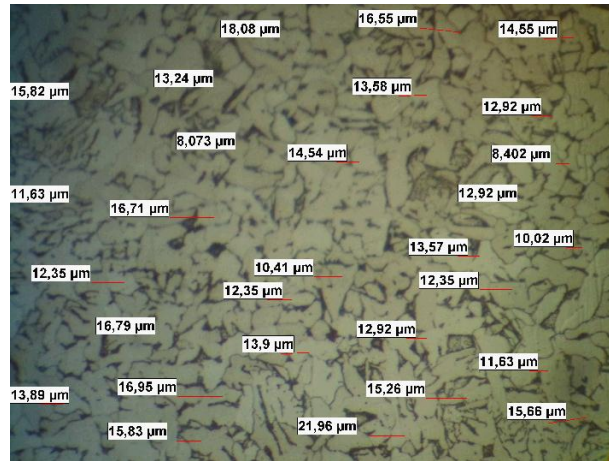


Figura 4.34 Medición de la longitud de 30 granos. Distancia 2mm de la fractura. A36 T 500 .Promedio 13,889 µm.

(Fuente: Autor)

En la Figura 4.35, se observa la medición del ancho de los 30 granos de la misma fotomicrografía. La medición tanto del largo como del ancho de los granos se lo realiza con la ayuda del programa computacional para análisis de imagen.

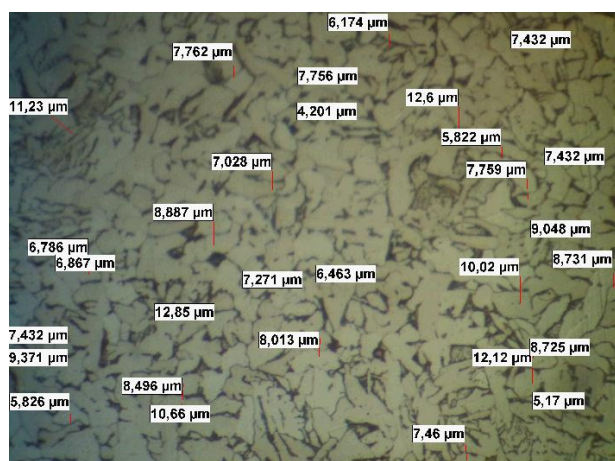


Figura 4.35 Medición del ancho de 30 granos. Distancia 2mm de la fractura. A36 T 500 .Promedio 8,179 µm.

(Fuente: Autor)

De acuerdo al análisis de imágenes, la longitud promedio es de (13,889 μm), el ancho promedio (8,179 μm), la relación largo-ancho (1,698 μm). Estos valores corresponden a los ensayos de termofluencia realizados a 500°C y a una tensión de 2448Kgf.

El mismo procedimiento se efectúa en las fotomicrografías obtenidas de las probetas de los especímenes ensayados a 550°C- 600°C y 650°C, los resultados del cociente de la relación largo/ancho del grano se presenta en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Relación longitud/ancho de grano vs Ensayo de termofluencia.
Distancia 2mm a partir de la fractura

| Temperatura (°C) | Longitud del grano (μm) | Ancho del grano (μm) | Relación (L/A) |
|-------------------------|--|---|-----------------------|
| 500 | 13,889 | 8,179 | 1,698 |
| 550 | 34,316 | 5,06 | 6,781 |
| 600 | 36,79 | 4,85 | 7,585 |
| 650 | 37,03 | 4,51 | 8,21 |

(Fuente: Autor)

Es importante notar en la Tabla 4.16 que a medida que la temperatura del ensayo de termofluencia se incrementa la relación largo-ancho (L/A) del grano se incrementa en la dirección de la fuerza aplicada.

También, cuando el ensayo involucra mayor temperatura la zona en la vecindad de la fractura presenta cavidades producto del desgarre producido en las conexiones triples de los límites de grano que han sufrido deformación (alargamiento).

Además, a mayor temperatura de ensayo, muy cerca de la fractura (100 μm) el tamaño de las cavidades formadas es mayor, producto de la difusión de las pequeñas cavidades y a la facilidad de deformación de los granos. Las Figuras 4.36–4.39 muestran las cavidades para los ensayos

de termofluencia a las temperaturas 500°C, 550°C, 600°C, y 650°C a la distancia de 100µm de la fractura.

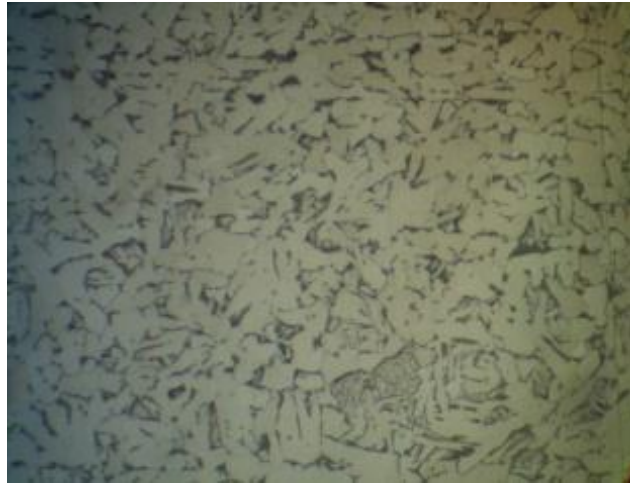


Figura 4.36 Distancia 100µm de la fractura. Fotomicrografía a 400X. El espécimen no llegó a fracturarse, no se observa formación de cavidades.

Acero A36. Atacada con Nital 4. T 500°C

(Fuente: Autor)

La fotomicrografía muestra que en los ensayos de termofluencia efectuados a 500°C y 2448 Kgf (Figura 4.36), dado a que no se llegó a la fractura en un lapso de tiempo de 72 horas no se produjo la formación de cavidades.



Figura 4.37 Distancia 100µm de la fractura. Fotomicrografía a 400X. Se observan cavidades esféricas. Acero A36. Atacada con Nital 4. T 550°C.

(Fuente: Autor)

Se aprecia claramente en la fotomicrografía que la matriz de la microestructura es ferrítica con perlita bien definida.

En los ensayos de termofluencia efectuados a la temperatura de 550°C y 2448 Kgf, el análisis metalografico permite observar (Figura 4.37) que los granos han sufrido un alargamiento en la dirección de la tensión aplicada, la matriz es totalmente ferrítica, la perlita es globular ubicada en los bordes de los granos alargados. Existe la presencia de cavidades esféricas distribuidas a lo largo de la zona de la fractura.

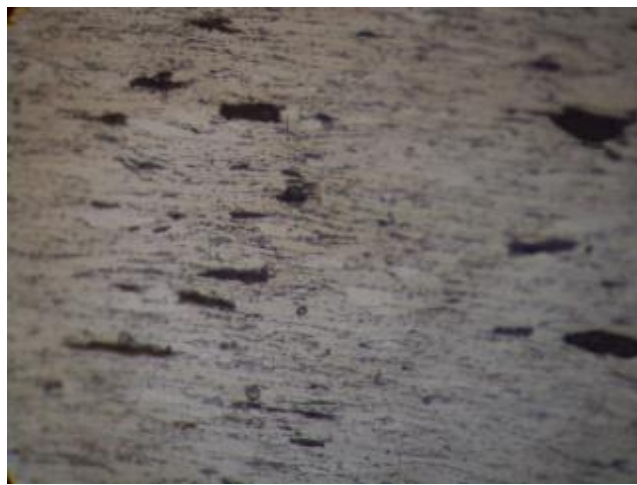


Figura 4.38 Distancia 100 μ m de la fractura. Fotomicrografía a 400X. Se observan cavidades alargadas en la deirección de la carga aplicada.

Acero A36. Atacada con Nital 4. T 600°C.

(Fuente: Autor)

En los ensayos de termofluencia efectuados a la temperatura de 600°C y 2448 Kgf, La fotomicrografía (Figura 4.38) muestra que los granos se han alargado aun más que en el caso de los ensayos efectuados a 500°C, la matriz es ferrítica, la perlita se la aprecia que es globular y se encuentra ubicada en los bordes de los granos. Las cavidades son alargadas en la dirección de la carga aplicada pero varias de ellas han aumentado su tamaño y se mantienen distribuidas a lo largo de la zona de fractura.



Figura 4.39 Distancia 100 μ m de la fractura. Fotomicrografía a 400X. Se observan cavidades mucho mas grandes alargadas en la dirección de la carga aplicada. Acero A36. Atacada con Nital 4. T 650°C

(Fuente: Autor)

Finalmente el análisis micrográfico efectuados en los especímenes sometidos a termofluencia con 650°C y 2248 Kgf (Figura 4.39), muestra que la matriz es totalmente ferrítica, no se puede apreciar la perlita y las cavidades son de mayor tamaño en relación a las anteriores y continúan distribuidas a lo largo de la fractura.

4.6.3 ENSAYOS DE MICRODUREZA. ESPECÍMENES SOMETIDOS A TERMOFLUENCIA. ACERO ASTM A36

Tabla 4.17 Identificación ensayo # 25. ASTM A36.

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Identificación | A36 T 500 |
| # de Probeta | CP-A36-T500-D-1 |
| # de Ensayo | 25 |

El ensayo de microdureza se realizó en las probetas de acero A36 que se extrajeron de los especímenes sometidos a termofluencia en una sección longitudinal de la zona de fractura. Se tomaron 3 medidas usando un microdurómetro Vickers. HV-300gr (Figura 4.40)



Figura 4.40 Microdurómetro. Obtención de microdureza. Termofluencia ASTM A36.

(Fuente: Autor)

Los datos de microdureza a partir de la fractura a distancias de $100\mu\text{m}$ – 2–4–6–8–13 y 18 mm representan los valores medidos en puntos en los que se observan cambios o transformación de la perlita y que pueden ser de interés analizarlos.

La Tabla 4.18 muestra los resultados de las microdurezas obtenidas en los ensayos. Para una mejor apreciación de los datos se procede a presentarlos gráficamente.

En la Figura 4.41, se muestra las durezas promedios de los ensayos realizados a las probetas extraídas de los especímenes sometidos al fenómeno de termofluencia (tensión constante y temperaturas de 500°C , 550°C , 600°C y 650°C) a las respectivas distancias de interés a partir de la fractura.

Tabla 4.18 Resumen de los datos de los ensayos de microdureza. ASTM A36

| | | Distancia | 100μm | 2(mm) | 4(mm) | 6(mm) | 8(mm) | 13(mm) | 18(mm) |
|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | Diagonal 1 (μm) | 59,5 | 58,5 | 58 | 56,3 | 60,7 | 60,6 | 60 |
| | | Diagonal 2 (μm) | 49 | 59,6 | 56,6 | 58,8 | 59,5 | 57 | 61,6 |
| | | Diag promedio (μm) | 54 | 9,05 | 57,3 | 57,55 | 60,1 | 58,8 | 60,8 |
| Identificación | # de Probeta | # Ensayo | MICRODUREZA (HV-300gr) | | | | | | |
| A36 T500 | CP-A36-T500-D-1 | 25 | 190,77 | 165,65 | 169,43 | 167,96 | 154,01 | 160,9 | 150,49 |
| | CP-A36-T500-D-2 | 26 | 190,68 | 165,56 | 169,51 | 167,87 | 154 | 161,1 | 150,48 |
| | CP-A36-T500-D-3 | 27 | 191 | 165,12 | 170,2 | 168,31 | 154,87 | 161,51 | 151,1 |
| A36 T550 | CP-A36-T550-D-1 | 28 | 159,27 | 159,54 | 160,08 | 149,99 | 150,98 | 150,49 | 144,25 |
| | CP-A36-T550-D-2 | 29 | 160,12 | 159,15 | 160,42 | 150,41 | 151,76 | 150,9 | 145,13 |
| | CP-A36-T550-D-3 | 30 | 160,16 | 159,12 | 160,09 | 150,5 | 151,5 | 150,61 | 145,87 |
| A36 T600 | CP-A36-T600-D-1 | 31 | 149,01 | 148,53 | 159,54 | 146,36 | 146,36 | 145,65 | 140,16 |
| | CP-A36-T600-D-2 | 32 | 150,05 | 147,98 | 158,79 | 146,89 | 146,31 | 145,09 | 140,07 |
| | CP-A36-T600-D-3 | 33 | 149,99 | 148,06 | 158,09 | 146,96 | 146,08 | 145 | 141 |
| A36 T650 | CP-A36-T650-D-1 | 34 | 118,55 | 144,48 | 158,46 | 142,18 | 139,71 | 134,76 | 131,06 |
| | CP-A36-T650-D-2 | 35 | 119 | 144,8 | 158,16 | 142,76 | 140,08 | 134,72 | 131,05 |
| | CP-A36-T650-D-3 | 36 | 118,89 | 144,79 | 158,92 | 143,65 | 139,96 | 135,67 | 131,86 |

(Fuente: Autor)

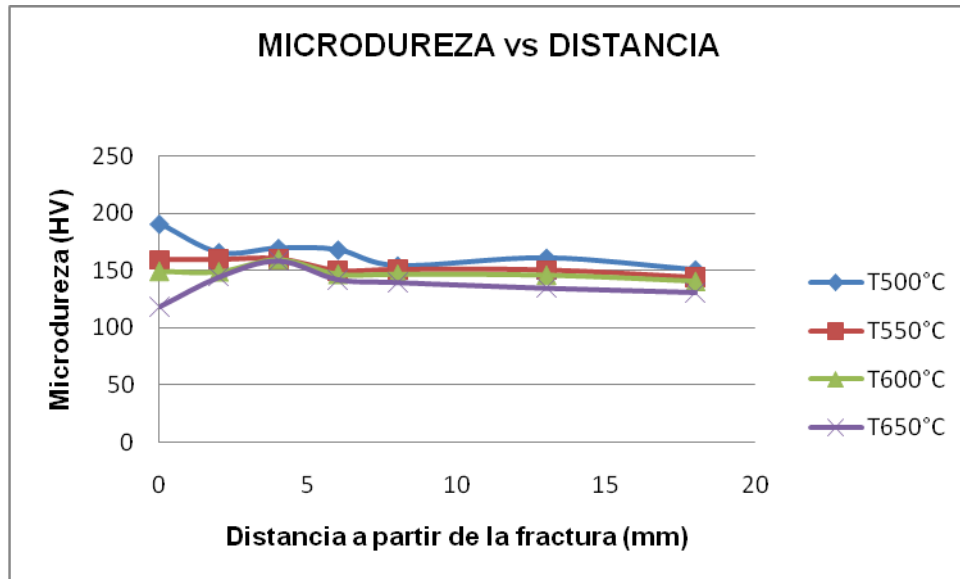


Figura 4.41 Gráfica de Microdureza vs Distancia a partir de la fractura. Especímenes sometidos a termofluencia. ASTM A36.

(Fuente: Autor)

En general de acuerdo a la gráfica de microdureza se puede decir que las curvas presentan un similar comportamiento o tendencia a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C.

A medida que la temperatura aumenta la dureza tiende a disminuir y se mantiene relativamente constante a lo largo del material ensayado, además se puede notar que a medida que se incrementa la temperatura del ensayo.

Por otro lado, en la vecindad de la fractura (100µm) la dispersión de los datos de dureza podría ser causada por un efecto competitivo entre deformación plástica y degradación de la estructura. La deformación debería teóricamente producir un incremento de dureza pero se observa un efecto contrario. La causa probable sería una importante transformación a nivel microestructural que resulte en fases mucho más blandas a medida que la temperatura aumenta.

4.6.4 OXIDACIÓN TÉRMICA Y ESTUDIO DE DEGRADACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA EN EL ACERO ASTM A36

Tabla 4.19 Identificación ensayo # 25. ASTM A36

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Identificación | A36 T 500 |
| # de Probeta | CP-A36-T500-O-1 |
| # de Ensayo | 37 |

Elaboramos 12 cupones de acero ASTM A36 cuyas medidas fueron (40x100x10) mm, los sometimos a la temperatura de interés (500°C, 550°C, 600°C y 650°C) en la mufla por un tiempo de 72 horas 3 cupones por cada temperatura con el propósito de evaluar el % de pérdida de peso del material debido a la descarburización de la superficie de los cupones.

Al realizar los ensayos de oxidación térmica en los cupones de acero ASTM A36 con un tiempo de 72 horas es necesario un tiempo adicional de 24 horas de enfriamiento de los mismos al interior de la mufla. Al extraerlos se pudo observar que presentaron un desprendimiento del material en forma de capa, por lo que fue necesario proceder a realizar un decapado de los cupones con una solución al 10% de ácido sulfúrico y una temperatura de 80°C para asegurarnos de extraer o sacar totalmente la capa o material desprendido producto de la oxidación térmica producida.

Además, es muy importante de estos ensayos obtener un análisis metalográfico y de dureza con el fin de evaluar la degradación a nivel microestructural que ha sufrido el material producto de la exposición a elevadas temperaturas. La Tabla 4.20 muestra un resumen de los resultados obtenidos en cuanto a la pérdida de peso que se ha producido en los cupones ensayados producto de la oxidación térmica.

Tabla 4.20 Registro de la pérdida de peso en los ensayos de oxidación térmica. ASTM A36.

| Identificación | # Probeta | # Ensayo | Peso inicial (g) | Peso final (g) | % Pérdida de peso |
|-----------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|
| A36 T500 | CP-A36-T500-O-1 | 37 | 214,6 | 213 | 0,75 |
| | CP-A36-T500-O-2 | 38 | 220,7 | 219,1 | 0,72 |
| | CP-A36-T500-O-3 | 39 | 214,9 | 213,3 | 0,74 |
| A36 T550 | CP-A36-T550-O-1 | 40 | 222,2 | 219,1 | 1,395 |
| | CP-A36-T550-O-2 | 41 | 214,7 | 211,7 | 1,397 |
| | CP-A36-T550-O-3 | 42 | 215,4 | 212,3 | 1,44 |
| A36 T600 | CP-A36-T600-O-1 | 43 | 220,7 | 216,6 | 1,85 |
| | CP-A36-T600-O-2 | 44 | 217 | 212,8 | 1,94 |
| | CP-A36-T600-O-3 | 45 | 220,9 | 216,8 | 1,91 |
| A36 T650 | CP-A36-T650-O-1 | 46 | 217,5 | 209 | 3,9 |
| | CP-A36-T650-O-2 | 47 | 220,8 | 214 | 3,08 |
| | CP-A36-T650-O-3 | 48 | 219,5 | 212,4 | 3,23 |

(Fuente: Autor)

Los resultados de la Tabla 4.20 se presentan gráficamente en la Figura 4.42, muestran que la pérdida de material se incrementa a medida que se incrementa la temperatura, se obtuvieron promedios de 0.74%, 1,41%, 1,9% y 3,4% para las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C respectivamente.

Este fenómeno se puede atribuir a la reacción del material de los cupones (acero ASTM A36) con la atmósfera del horno provocando descarburación. Se producen las reacciones: $Fe_3C + CO_2 = 3Fe + 2CO$
 $Fe_3C = 3Fe + C$ que son función del tiempo y la temperatura.

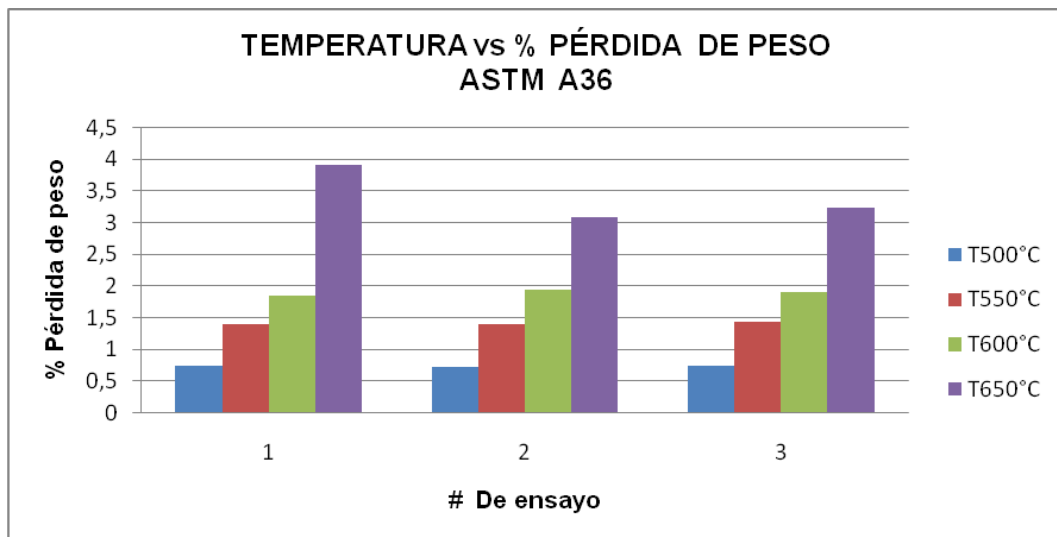


Figura 4.42 Gráfica de los registros de pérdida de peso en los ensayos de Oxidación térmica. ASTM A36.

(Fuente: Autor)

Para complementar la información a estos cupones se los someterá a ensayos metalográficos y de dureza.

4.6.4.1 Ensayos metalográficos. Oxidación térmica, acero ASTM A36

A los cupones los realizamos un análisis metalográfico, para ello se preparan metalográficamente de acuerdo a la norma ASTM E3 las superficies de la sección transversal a la dirección de laminación de las placas. Realizamos un ataque químico con nital 4 (ASTM E407) y tomamos fotografías a 400x. Las Figuras 4.43-4.46 muestran las imágenes metalográficas de los ensayos de oxidación térmica a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C.

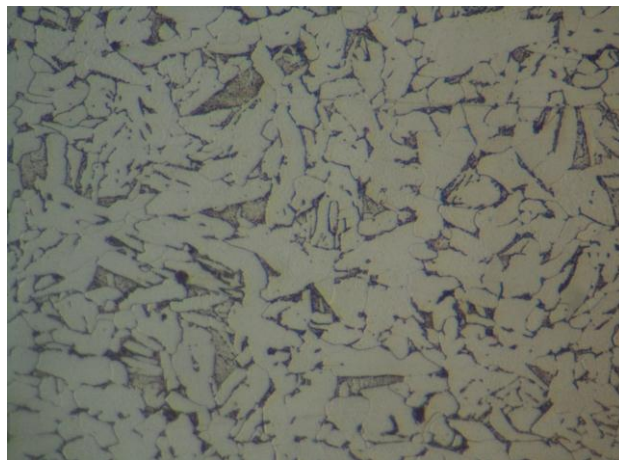


Figura 4.43 Metalografía. Oxidación térmica A36 T500°C. se observa la presencia de ferrita y perlita laminar, atacado con nital 4, 400X.

(Fuente: Autor)

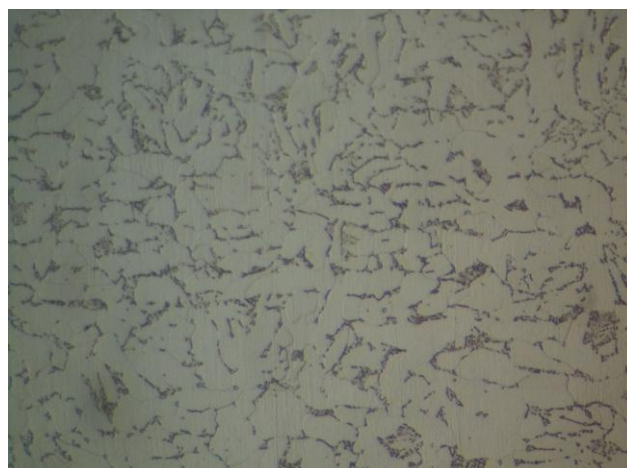


Figura 4.44 Metalografía. Oxidación térmica A36 T550°C. se observa la descomposición de la perlita laminar, atacado con nital 4, 400X.

(Fuente: Autor)

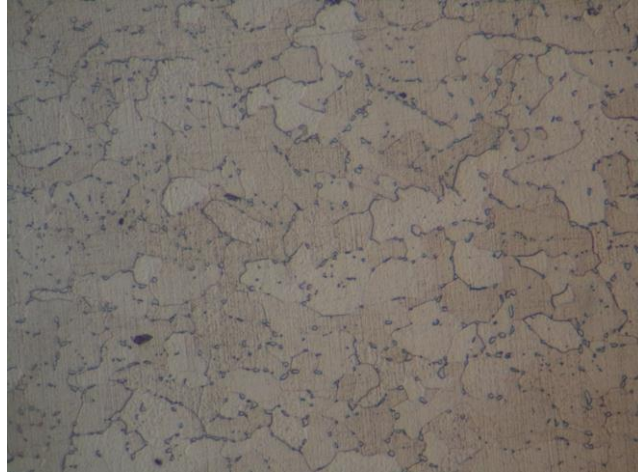


Figura 4.45 Metalografía. Oxidación térmica A36 T600°C. se observa perlita en los bordes de los granos, atacado con nital 4, 400X.

(Fuente: Autor)

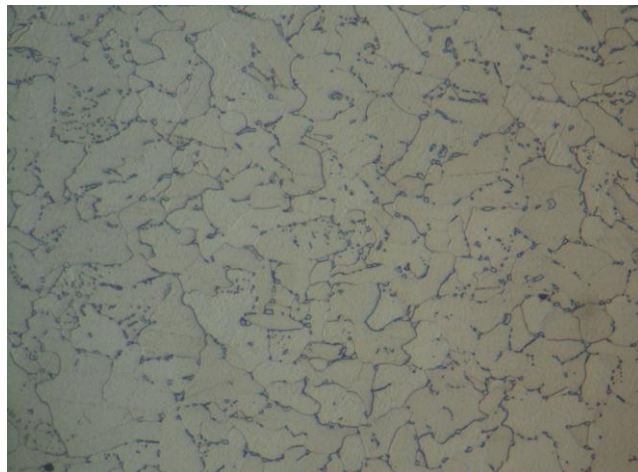


Figura 4.46 Metalografía. Oxidación térmica A36 T650°C. se observa la perlita globular en los límites de grano, atacado con nital 4, 400X.

(Fuente: Autor)

Como se puede observar en las Figuras 4.43-4.46, la oxidación térmica en el acero ASTM A36 a mayor temperatura provoca mayor descomposición de la perlita.

A 500°C (Figura 4.43) se observa claramente la presencia de dos fases ferrita y perlita. La perlita es globular y está distribuida en la matriz ferrítica en forma definida.

La perlita aún se encuentra ubicada en su lugar original.

A 600°C (Figura 4.44) la perlita es totalmente globular y se ha ubicada por procesos de difusión en los bordes de los grano. Muy poca perlita se encuentra ubicada en su posición inicial.

A 650°C (Figura 4.45) toda la perlita está ubicada en los límites de los granos ferríticos e incluso ya existe cementita globular precipitada en el interior de los granos.

A 650°C (Figura 4.46) se observa una matriz en su totalidad ferrítica con partículas globulares de cementita globular dispersas a lo largo de los límites de grano y precipitados en los granos ferríticos.

De acuerdo a la observación de los datos se puede mencionar que existe una degradación a nivel microestructural cada vez más intensa a medida que la temperatura de exposición aumenta produciendo la transformación y difusión de la perlita llegando finalmente a obtenerse una matriz totalmente ferrítica con cementita globular muy dispersa a lo largo de todos los límites de grano e invadiendo los granos de ferrita.

Entonces resulta muy importante realizar ensayos de dureza a estos cupones sometidos a elevadas temperaturas.

4.6.4.2 Ensayos de Dureza Brinell en los cupones sometidos a Oxidación térmica. Acero ASTM A36

A las probetas ensayadas metalográficamente las realizamos un análisis de dureza. La Tabla 4.21 y la Figura 4.47 muestran los resultados de los ensayos realizados.

Tabla 4.21 Resultados. Ensayos de dureza Brinell. Oxidación térmica.
ASTM A 36

| Identificación | # de Probeta | Ø indentador (mm) | Test Force (Kgf) | Ø huella (mm) | Dureza Brinell |
|----------------|-----------------|-------------------|------------------|---------------|----------------|
| A36 T 500 | CP-A36-T500-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,33 | 125 |
| | CP-A36-T500-O-2 | 2,5 | 187,5 | 1,335 | 124 |
| | CP-A36-T500-O-3 | 2,5 | 187,5 | 1,33 | 125 |
| A36 T 550 | CP-A36-T550-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,35 | 121 |
| | CP-A36-T550-O-2 | 2,5 | 187,5 | 1,345 | 122 |
| | CP-A36-T550-O-3 | 2,5 | 187,5 | 1,35 | 121 |
| A36 T 600 | CP-A36-T600-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,38 | 115 |
| | CP-A36-T600-O-2 | 2,5 | 187,5 | 1,385 | 114 |
| | CP-A36-T600-O-3 | 2,5 | 187,5 | 1,38 | 115 |
| A36 T 650 | CP-A36-T650-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,42 | 108 |
| | CP-A36-T650-O-2 | 2,5 | 187,5 | 1,425 | 107 |
| | CP-A36-T650-O-3 | 2,5 | 187,5 | 1,42 | 108 |

(Fuente: Autor)

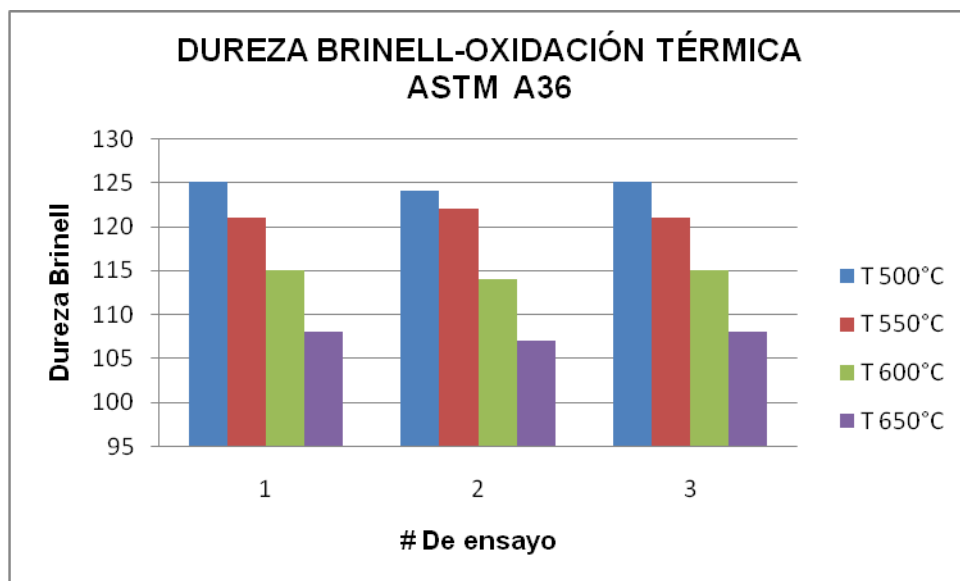


Figura 4.47 Gráfica de datos de los ensayos de dureza. Oxidación térmica 500°C. ASTM A 36.

(Fuente: Autor)

Se puede notar (Figura 4.47) que a medida que la temperatura aumenta la dureza del acero ASTM A36 disminuye. Estos datos son consistentes

con el análisis metalográfico pues se observó que la matriz a mayor temperatura tiende a ser totalmente ferrítica ya que al descomponerse la perlita en cementita globular y ferrita para ubicarse por procesos de difusión inicialmente en los límites de grano y luego también distribuirse en el interior de los granos.

4.6.4 ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA EN LA FUNDICIÓN GRIS

Todos los ensayos realizados con el acero A36 se los realiza también con la fundición gris. El objetivo es realizar un análisis comparativo del comportamiento de estos dos materiales frente al fenómeno de la termofluencia. La obtención y registro de los datos de los ensayos se lo realiza en base a la Tabla 4.12 (página 78) y de acuerdo a la matriz planteada corresponde empezar realizando el ensayo cuyo registro es el siguiente, Tabla 4.22:

Tabla 4.22 Identificación ensayo # 49. Fundición gris

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Identificación | FG T 500 |
| # de Probeta | CP-FG-T500-T-1 |
| # de Ensayo | 49 |

El ensayo número 49 según la identificación corresponde a un ensayo de termofluencia efectuado con la fundición gris a una temperatura y carga constante de 500°C y 2448 Kgf, respectivamente. Se registran los datos de Deformación vs Tiempo producida en el espécimen durante el ensayo. El ensayo lo realizamos 3 veces para cada temperatura de interés. En la Tabla 4.23 se presentan los datos registrados de los ensayos, posteriormente en las Figuras 4.48-4.51 se presentan las gráficas Deformación vs Tiempo de los tres ensayos de termofluencia efectuados en la fundición gris para cada una de las temperaturas (500°C, 550°C, 600°C y 650°C), todos los ensayos a una carga constante de 2448 Kgf aplicada al espécimen durante toda la duración del ensayo.

Tabla 4.23 Registro de datos obtenidos de los ensayos de termofluencia.
Efectuados a varias temperaturas en la fundición gris

| Identificación | # Ensayo | (mm ²) | (mm ²) | % | % | (min) |
|----------------|----------|--------------------|--------------------|----------------|------------|-----------------|
| | | Área inicial | Área final | Reducción Área | Elongación | Duración Ensayo |
| FG T500 | 49 | 200 | 197,63 | 1,19 | 1,54 | 1011 |
| | 50 | 200 | 197,61 | 1,2 | 1,56 | 1000 |
| | 51 | 200 | 197,65 | 1,18 | 1,52 | 1005 |
| FG T550 | 52 | 200 | 196,27 | 1,87 | 1,86 | 60 |
| | 53 | 200 | 196,23 | 1,89 | 1,9 | 63 |
| | 54 | 200 | 196,25 | 1,88 | 1,88 | 59 |
| FG T600 | 55 | 200 | 194,48 | 2,76 | 2,2 | 12 |
| | 56 | 200 | 194,47 | 2,77 | 2,24 | 13 |
| | 57 | 200 | 194,46 | 2,77 | 2,22 | 12 |
| FG T650 | 58 | 200 | 193,17 | 3,42 | 2,6 | 1 |
| | 59 | 200 | 193,18 | 3,41 | 2,58 | 1 |
| | 60 | 200 | 193,1 | 3,45 | 2,62 | 1 |

(Fuente: Autor)

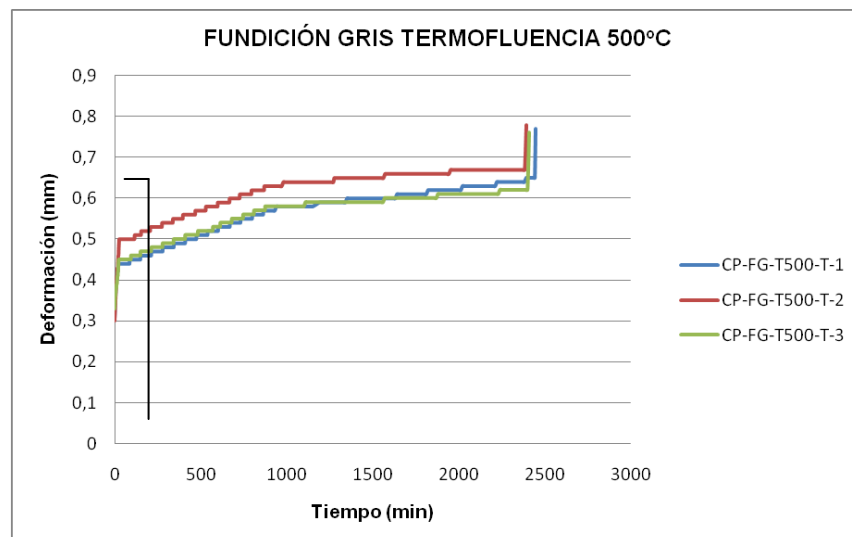
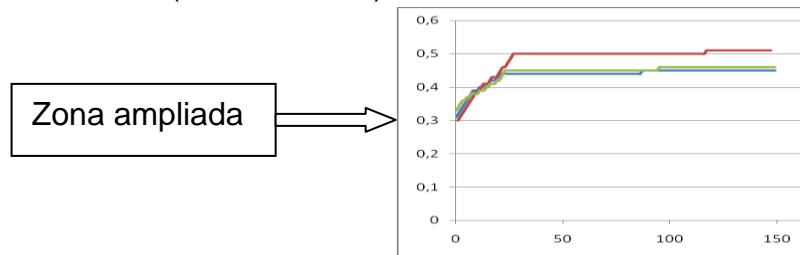


Figura 4.48 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T500°C

(Fuente: Autor)

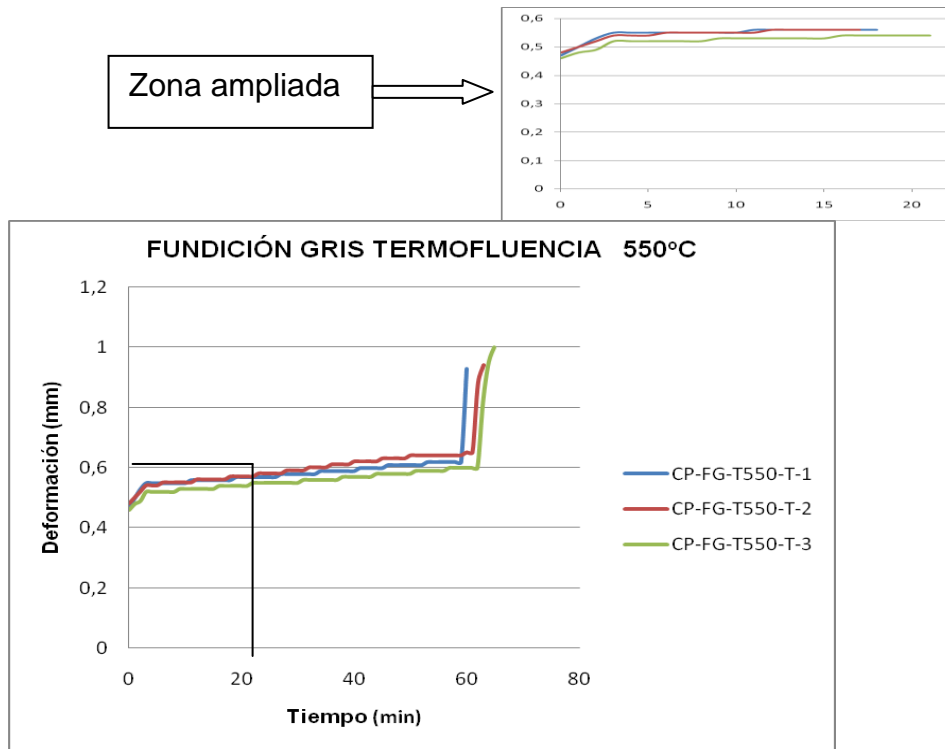


Figura 4.49 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T550°C
(Fuente: Autor)

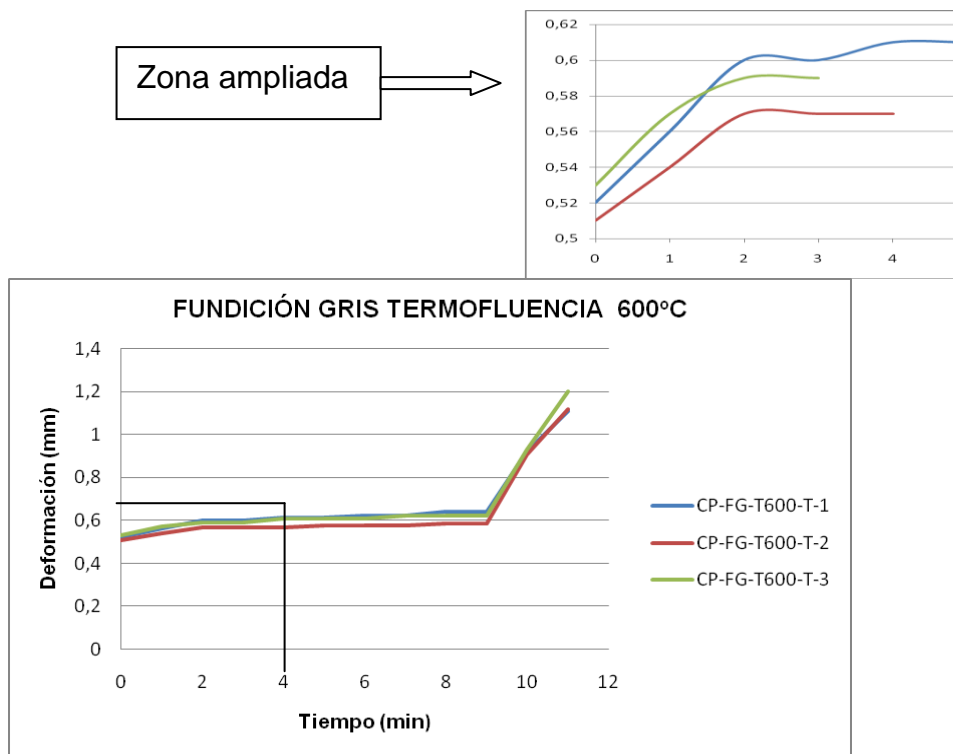


Figura 4.50 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T600°C.
(Fuente: Autor)

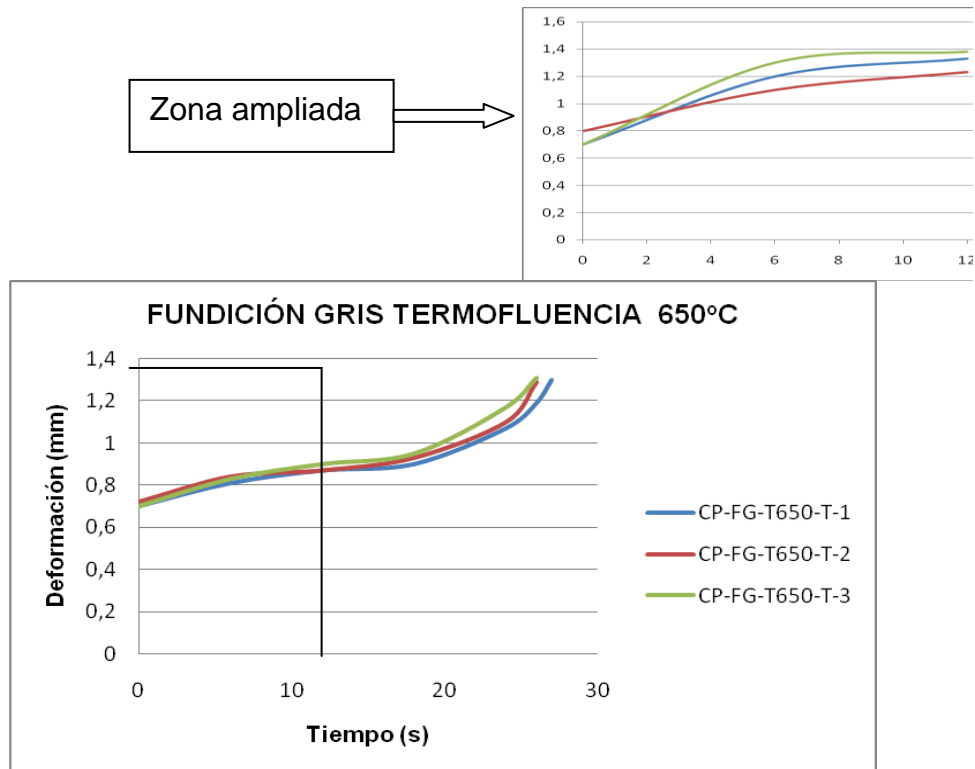


Figura 4.51 Gráfica Deformación vs Tiempo. Fundición gris T 650°C.

(Fuente: Autor)

Las curvas Deformación vs Tiempo presentadas en las Figuras 4.48-4.51 muestran que la fundición gris pelítica presenta una deformación instantánea al aplicar la carga 2448Kgf una vez que se ha alcanzado y estabilizado la temperatura correspondiente de ensayo. Estas deformaciones instantáneas tienen valores promedios de: 0,31-0,47-0,52 y 0,73mm para las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C respectivamente.

Las gráficas muestran una primera zona muy pequeña donde se puede decir que la curva tiene una pendiente que se incrementa rápidamente, posteriormente alcanza una segunda zona más amplia con respecto a la primera donde la pendiente es estable para finalmente llegar a un punto en el que se produce espontáneamente la fractura del espécimen de prueba.

En el ensayo de termofluencia en la fundición gris efectuado a una temperatura de 500°C (Figura 4.46) y una carga de 2448 Kgf requirió de un tiempo promedio de 1005,33 minutos para llegar a la fractura, presenta un porcentaje promedio de reducción de área de 1,19% y una elongación promedio de 1,54% (Figura 4.52).



Figura 4.52 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 500°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura

(Fuente: Autor)

A 550°C (Figura 4.53) el tiempo promedio necesario para llegar a la fractura es de 60,66 minutos presentando un porcentaje de reducción de área de 1,88% y un porcentaje promedio de elongación de 1,88%.

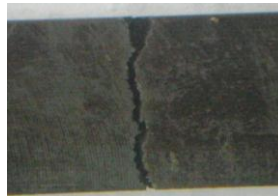


Figura 4.53 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 550°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura

(Fuente: Autor)

A 600°C (Figura 4.54) el tiempo promedio para llegar a la fractura del espécimen es de 12,3 minutos con un porcentaje promedio de reducción de área de 2,77% y un porcentaje de elongación promedio de 2,22% .

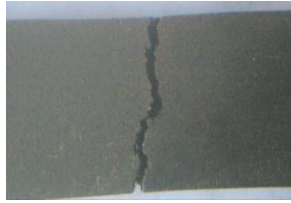


Figura 4.54 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 600°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura

(Fuente: Autor)

A 650°C (Figura 4.55) el tiempo promedio para llegar a la fractura es de 1 min, es decir que se alcanzó la carga de ensayo 2448 Kgf y la fundición no tardó en fracturarse presentando un porcentaje promedio de reducción de área de 3,45 % y un porcentaje de elongación promedio de 2,6% .



Figura 4 55 Espécimen de fundición gris fracturado en el ensayo de termofluencia a 650°C. No se aprecia formación de cuello en la zona de la fractura

(Figura: Autor)

Como se puede observar, a medida que la temperatura aumenta el tiempo de duración del ensayo disminuye, el porcentaje de reducción de área aumenta y el porcentaje de alargamiento también aumenta. Pero en relación al acero A36 el porcentaje de reducción de área y el porcentaje de alargamiento son muy pequeños por lo que se puede manifestar que la fundición gris aun a elevadas temperaturas no presenta o admite deformación.

Lo que se menciona es posible observarlo gráficamente en las Figuras

4.56- 4.58 presentadas a continuación.

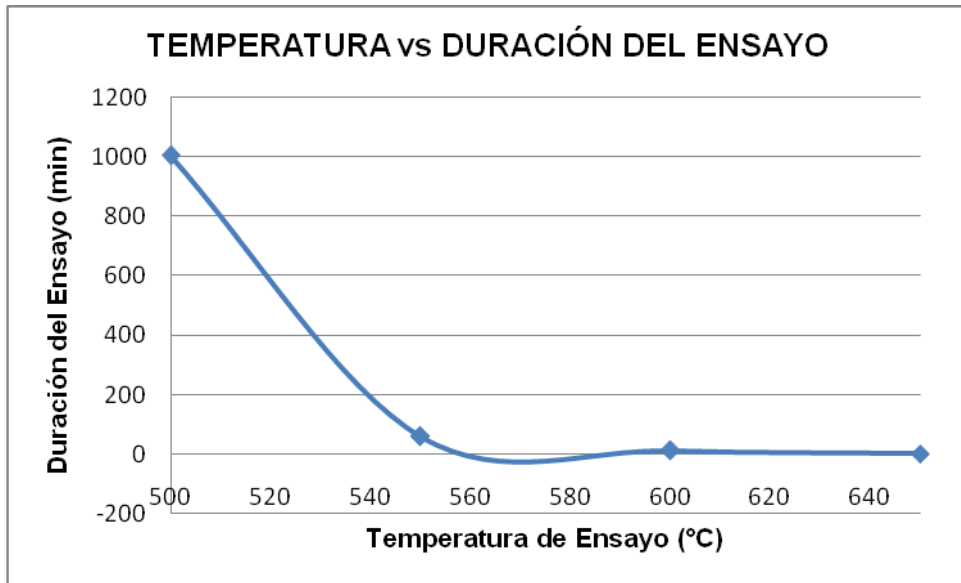


Figura 4. 56 Gráfica Temperatura de ensayo vs Duración del ensayo. Termofluencia fundición gris
(Fuente: Autor)

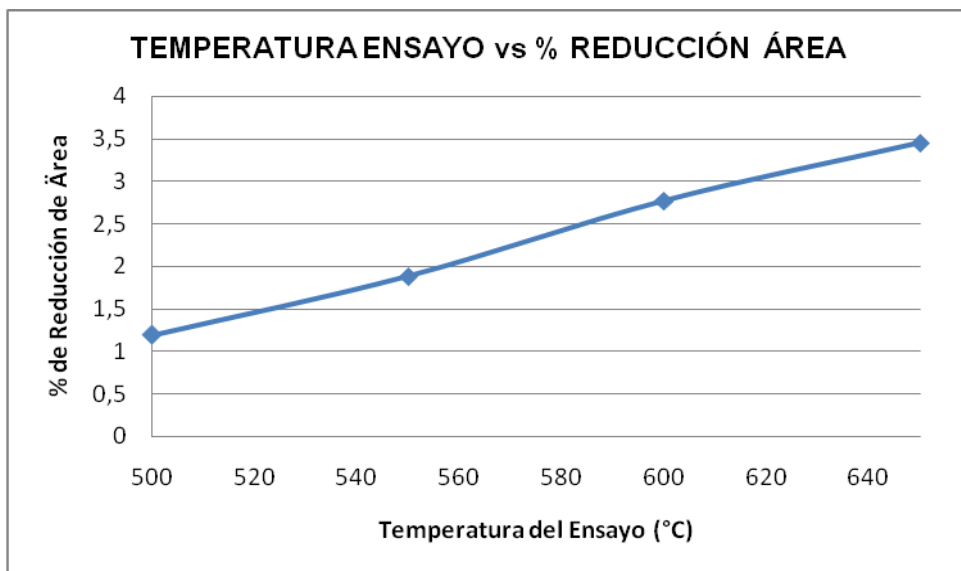


Figura 4.57 Gráfica Temperatura de ensayo vs % Reducción de Área.
Termofluencia fundición gris
(Fuente: Autor)

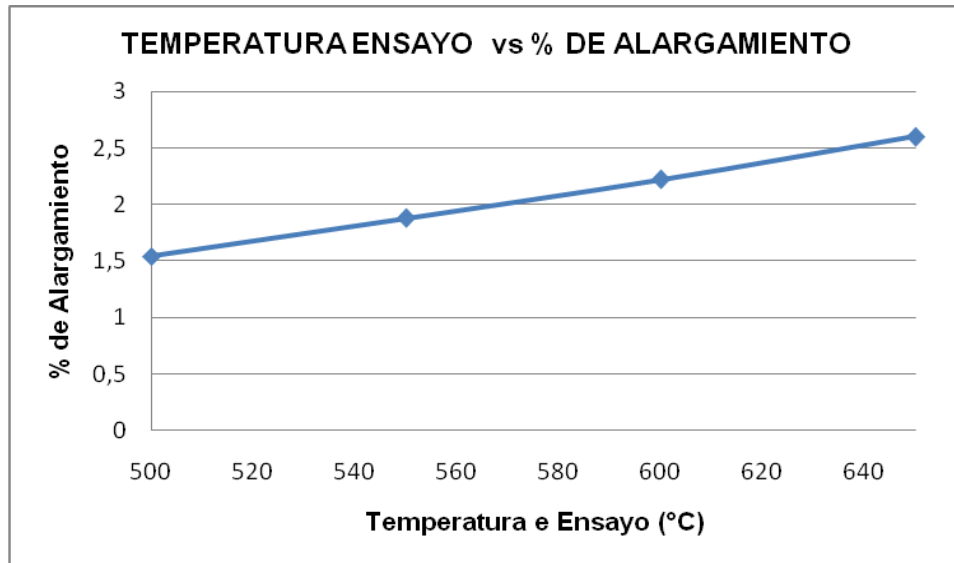


Figura 4.58 Gráfica Temperatura de ensayo vs % Alargamiento.
Termofluencia fundición gris
(Fuente: Autor)

4.6.5 ENSAYOS METALOGRAFICOS. ESPECÍMENES SOMETIDOS A TERMOFLUENCIA. FUNDICIÓN GRIS

Tabla 4.24 Identificación ensayo # 49. Fundición gris

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Identificación | FG T 500 |
| # de Probeta | CP-FG-T500-M-1 |
| # de Ensayo | 61 |

El objetivo es buscar las transformaciones que puede haber sufrido la fundición gris a nivel microestructural frente al fenómeno de termofluencia, para lo que primeramente se procede a la caracterización del grafito.

4.6.5.1 Caracterización del grafito

Para caracterizar el grafito de la fundición gris, y poder determinar si este cambia luego de someter al material a los ensayos de termofluencia en cuanto a la forma, distribución, tamaño y porcentaje del grafito es

necesario partir caracterizando el grafito cuando la fundición esta en estado de suministro. Para ello las muestras fueron preparadas metalográficamente hasta $1\mu\text{m}$ y luego observadas en el microscopio.

El grafito presente en la fundición gris es el mostrado en la Figura 4.59.

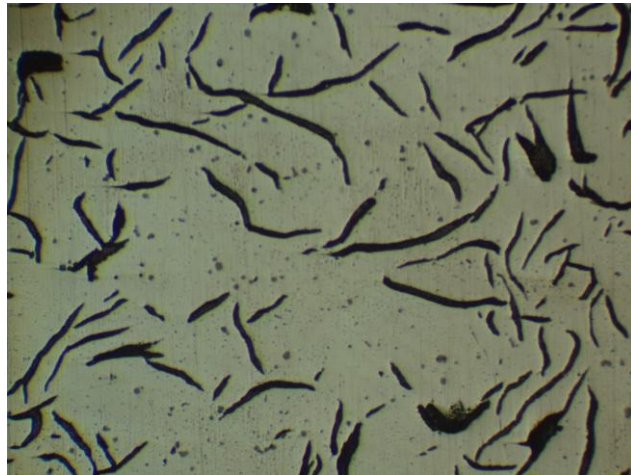


Figura 4.59 Caracterización del grafito en estado de suministro, 100X.
(Fuente: Autor)

De acuerdo a la norma técnica colombiana NTC 1620, equivalente a la ISO/R 945-1969 (E), la clasificación y designación del grafito se hace de acuerdo a su forma, distribución y tamaño.

De acuerdo a los posters de comparación Anexo 6, se observa que la forma del grafito es del tipo I (escamas de grafito) en su mayoría y cierta presencia de grafito tipo III (casi escamas de grafito), con una distribución predominante del subtipo A (distribución uniforme con orientación al azar) y un tamaño 4/5, teniendo en cuenta para el tamaño del grafito un área de observación que corresponda a la de los posters con un diámetro o un área de análisis de $0,5\text{ mm}^2$.

4.6.5.2 Morfología del grafito posterior a los ensayos de termofluencia

Para ello se procede a extraer una probeta según la norma ASTM A370 en sentido longitudinal de la zona de fractura de cada uno de los especímenes que fueron sometidos al fenómeno de termofluencia. Se prepara adecuadamente las superficies de las probetas.

Se observa que el grafito tiende a formar nodolos cada vez más definidos a medida que la temperatura aumenta, este comportamiento se mantiene a 500°C, 550°C y 600°C. Observar las Figuras 4.60 - 4.62.

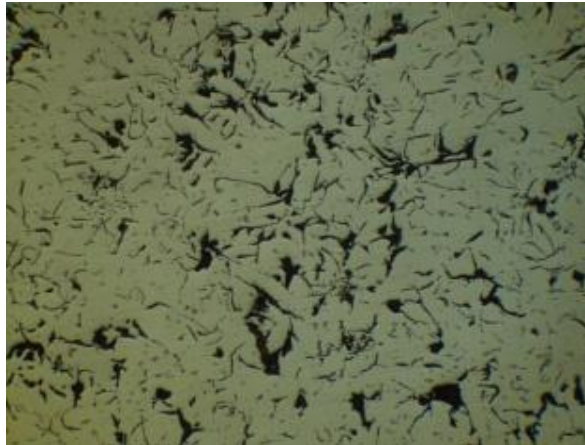


Figura 4.60 Caracterización del grafito. Termofluencia 500°C.100X.

(Fuente: Autor)

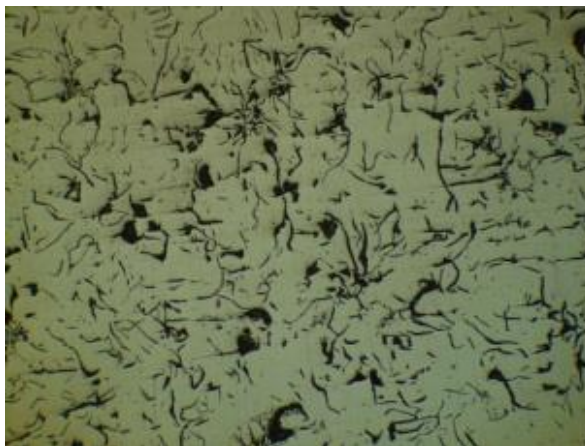


Figura 4.61 Caracterización del grafito. Termofluencia T550°C.100X.

(Fuente: Autor)

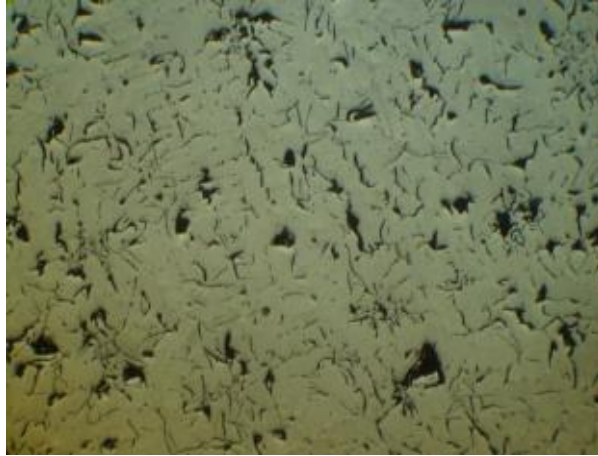


Figura 4.62 Carcterización del grafito. Termofluencia T600°C.100X.
(Fuente: Autor)

En los ensayos a 650°C con un tiempo promedio de duración de 1 min, es decir, una vez estabilizada la temperatura a 650°C se aplica la carga 2448Kgf y casi inmediatamente se produce la fractura, por ello es que los resultados de la caracterización del grafito Figura 4.63 no presenta mayor cambio con relación al material base. Se puede mencionar entonces que no hubo suficiente tiempo para que se produzca el proceso de degradación a nivel microestructura por procesos de difusión.

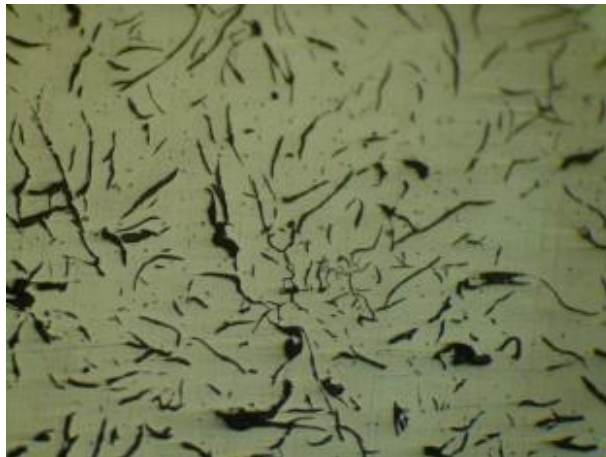


Figura 4.63 Carcterización del grafito. Termofluencia T650°C.100X.
(Fuente: Autor)

4.6.5.3 Metalografía fundición gris

En cuanto al análisis microestructural se observa que hay un incremento de las zonas de cementita a medida que la temperatura aumenta (500°C-550°C y 600°C), esto se puede apreciar en las Figuras 4.64 – 4.66.

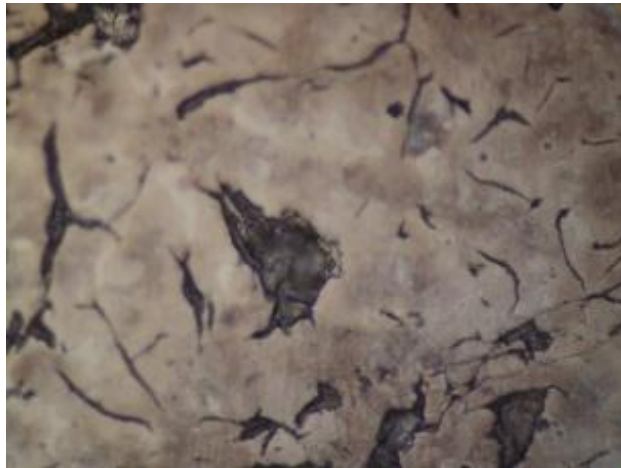


Figura 4.64 Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 500°C.400X.

(Fuente: Autor)



Figura 4.65 Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 550°C.400X.

(Fuente: Autor)



Figura 4.66 Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 600°C.400X.
(Fuente: Autor)

En los ensayos a 650°C con un tiempo promedio de duracion de 1min, es decir, una vez estabilizada la temperatura a 650°C se aplica la carga 2448Kgf e inmediatamente se produce la fractura, por ello la fotomicrografía (Figura 4.67) no presenta mayor cambio con relación al material base.

Se puede mencionar entonces que no hubo suficiente tiempo para que se produzca el proceso de degradación a nivel microestructura por procesos de difusión.



Figura 4.67 Fotomicrografía fundición gris. Termofluencia 650°C.100X.
(Fuente: Autor)

En el Anexo 7 se presentan las fotomicrografías de las probetas de fundición a las distancias de interés para el estudio a partir de la fractura.

4.6.6 ENSAYOS DE MICRODUREZA. ESPECÍMENES SOMETIDOS A TERMOFLUENCIA. FUNDICIÓN GRIS

Tabla 4.25 Identificación ensayo # 49. Fundición gris

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Identificación | FG T 500 |
| # de Probeta | CP-FG-T500-D-1 |
| # de Ensayo | 73 |

El ensayo número 73 según la identificación corresponde a la fundición gris. Es un ensayo de microdureza que se realizó a la probeta de fundición gris que se extrajo del espécimen sometido al ensayo de termofluencia según la norma A370 en sentido longitudinal de la zona de fractura. El ensayo se lo realizará 3 veces. Emplearemos el microscopio óptico.

Se analizó la microdureza a partir de la fractura a distancias de 100 μ m – 2 – 4 – 6 – 8 – 13 – y 18 milímetros al igual que en el acero A36. A continuación la Tabla 4.26 muestra los datos obtenidos de los ensayos.

Tabla 4.26 Registro de los datos obtenidos en los ensayos de microdureza. Termofluencia fundición gris

| | | Distancia | 100μm | 2(mm) | 4(mm) | 6(mm) | 8(mm) | 13(mm) | 18(mm) |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | | Diagonal 1 (μm) | 44,5 | 53,8 | 45,1 | 39,6 | 46,6 | 42,4 | 45 |
| | | Diagonal 2 (μm) | 40,7 | 54,4 | 48,2 | 40,4 | 43,4 | 45,5 | 45,6 |
| | | Diag Promedio (μm) | 42,6 | 54,1 | 46,65 | 40 | 45 | 43,95 | 45,3 |
| Identificación | # de Probeta | # Ensayo | MICRODUREZA (HV-300gr) | | | | | | |
| FG T 500 | CP-FG-T500-D-1 | 73 | 307,27 | 191,13 | 256,18 | 363,88 | 274,72 | 324,58 | 281,09 |
| | CP-FG-T500-D-2 | 74 | 307,27 | 191,1 | 256,19 | 363,8 | 274,73 | 324,5 | 281,08 |
| | CP-FG-T500-D-3 | 75 | 307,13 | 191,11 | 256,19 | 363 | 274,73 | 324,7 | 281,09 |
| FG T 550 | CP-FG-T550-D-1 | 76 | 306,54 | 190,07 | 255,84 | 347,69 | 248,65 | 288 | 271,2 |
| | CP-FG-T550-D-2 | 77 | 306,53 | 190,06 | 255,6 | 347,68 | 255,7 | 288,01 | 271 |
| | CP-FG-T550-D-3 | 78 | 306,55 | 190,07 | 255 | 347,69 | 257 | 288,02 | 272 |
| FG T 600 | CP-FG-T600-D-1 | 79 | 306,13 | 188,03 | 253,5 | 296,03 | 261,77 | 298,56 | 283,87 |
| | CP-FG-T600-D-2 | 80 | 306,1 | 190 | 254 | 298,6 | 262,3 | 298,41 | 283,77 |
| | CP-FG-T600-D-3 | 81 | 306,8 | 189,34 | 254,56 | 298,87 | 260,89 | 299,5 | 282 |
| FG T 650 | CP-FG-T650-D-1 | 82 | 307,76 | 216,42 | 256,18 | 327,73 | 300,87 | 300,17 | 281,56 |
| | CP-FG-T650-D-2 | 83 | 307,76 | 216,45 | 255,64 | 330,3 | 299,34 | 300,01 | 283,1 |
| | CP-FG-T650-D-3 | 84 | 306,21 | 215,94 | 256,78 | 329,87 | 298,65 | 301,32 | 282,34 |

(Fuente: Autor)

Para una mejor apreciación, la Figura 4.68 muestra la durezas promedios de los ensayos realizados a las probetas sometidas al fenómeno de termofluencia (carga 2448 Kgf y temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C).

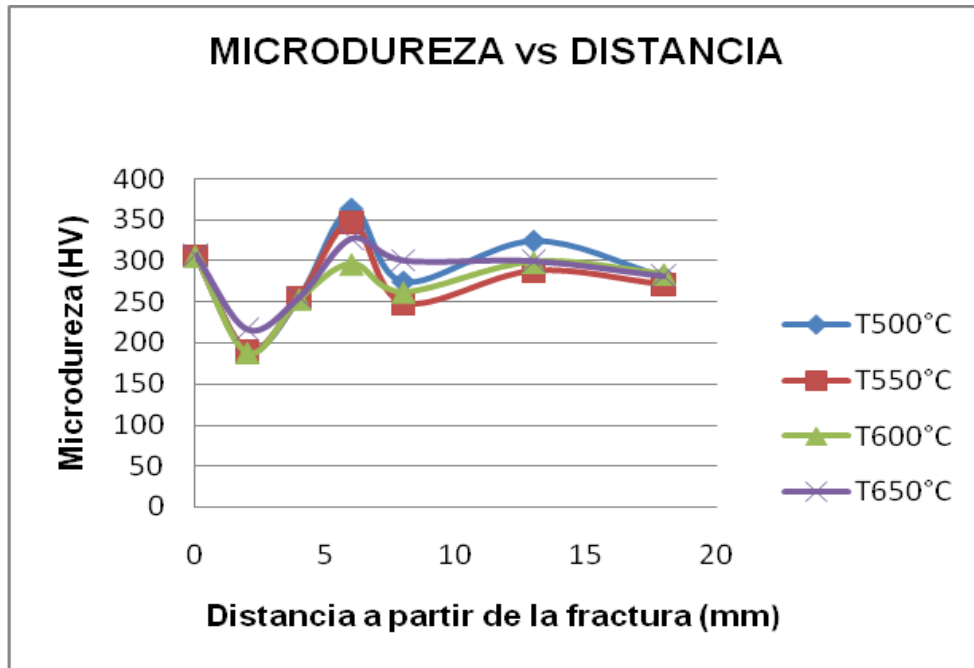


Figura 4.68 Gráfica de Microdureza vs Distancia a partir de la fractura. Especímenes sometidos a termofluencia. Fundición gris
(Fuente: Autor)

Se aprecia un similar comportamiento o tendencia de las curvas. Además se puede notar que si bien es cierto que a medida que se incrementa la temperatura del ensayo, la microdureza disminuye pero, esta disminución es relativamente muy pequeña, esto probablemente por el hecho de que a mayor temperatura menor tiempo de ensayo y viceversa.

4.6.7 OXIDACIÓN TÉRMICA Y ESTUDIO DE DEGRADACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA EN LA FUNDICIÓN GRIS

Igual que para el acero A36, se elaboran 12 cupones de fundición gris de las siguientes dimensiones (40x100x10)mm, los sometimos a la temperatura de interés (500°C, 550°C, 600°C y 650°C) en la mufla por un tiempo de 72 horas, 3 cupones por cada temperatura. Observe la Figura 4.69.

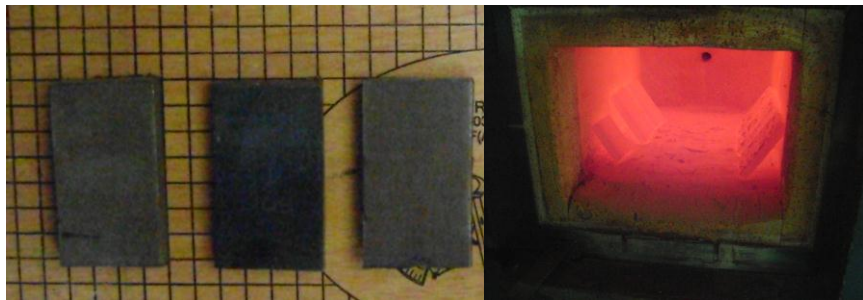


Figura 4.69 Cupones para el ensayo de oxidación térmica. Cupones sometidos a oxidación térmica. Fundición gris
(Fuente: autor)

Una vez cumplidas las 72 horas de ensayo fue necesario un tiempo adicional de 24 horas de permanencia de los cupones en la mufla hasta conseguir que alcancen la temperatura ambiente. En la Figura 4.70 se observa los cupones extraídos de la mufla.

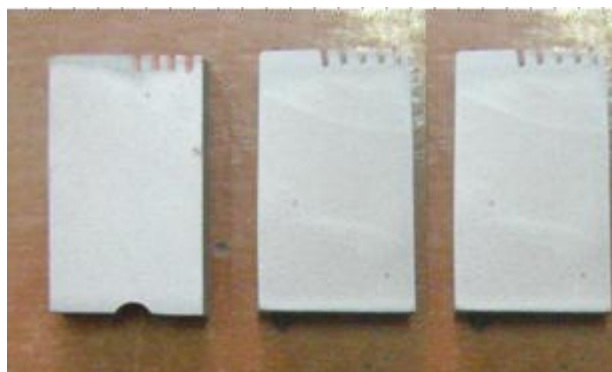


Figura 4.70 Cupones extraídos de la mufla luego del ensayo de oxidación térmica. Fundición gris
(Fuente: Autor)

Al prestar atención a la Figura 4.68, se puede apreciar que los cupones de fundición gris no presentan ampolladuras ni desprendimientos de material luego del ensayo de oxidación térmica. A cambio de ello únicamente presentaron una capa muy fina de carbón originada probablemente por la difusión de su grafito constituyente.

Esta capa de grafito seguramente cumple el papel de proteger al material para evitar que se produzca ampolladuras y consecuentemente desprendimiento de material. Para retirar totalmente esta capa fina de grafito se procedió a realizar un decapado de los cupones con una solución al 10% de ácido sulfúrico a 80°C.

La Tabla 4.27 presenta los datos obtenidos de los ensayos de oxidación térmica efectuada en los cupones de fundición gris a las temperaturas de interés.

Para apreciar mejor la información de interés de los ensayos de oxidación térmica, la Figura 4.71 muestra el porcentaje de pérdida de peso producida por cada uno de los 3 cupones sometidos a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C.

Tabla 4.27 Registro de la pérdida de peso en los ensayos de oxidación térmica. Fundición gris

| Identificación | # Probeta | # Ensayo | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Tiempo (h) | % Pérdida de peso |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|
| FG T500 | CP-FG-T500-O-1 | 85 | 201 | 200,5 | 72 | 0,25 |
| | CP-FG-T500-O-2 | 86 | 199 | 198,4 | 72 | 0,3 |
| | CP-FG-T500-O-3 | 87 | 200,1 | 194,5 | 72 | 0,29 |
| FG T550 | CP-FG-T550-O-1 | 88 | 198,4 | 197,7 | 72 | 0,35 |
| | CP-FG-T550-O-2 | 89 | 199,8 | 199,2 | 72 | 0,3 |
| | CP-FG-T550-O-3 | 90 | 199,1 | 198,4 | 72 | 0,35 |
| FG T600 | CP-FG-T600-O-1 | 91 | 188,7 | 187,9 | 72 | 0,42 |
| | CP-FG-T600-O-2 | 92 | 188,9 | 188 | 72 | 0,47 |
| | CP-FG-T600-O-3 | 93 | 190,3 | 189,5 | 72 | 0,42 |
| FG T650 | CP-FG-T650-O-1 | 94 | 191,6 | 190,5 | 72 | 0,57 |
| | CP-FG-T650-O-2 | 95 | 197,5 | 196,5 | 72 | 0,51 |
| | CP-FG-T650-O-3 | 96 | 195,1 | 194 | 72 | 0,56 |

(Fuente: Autor)

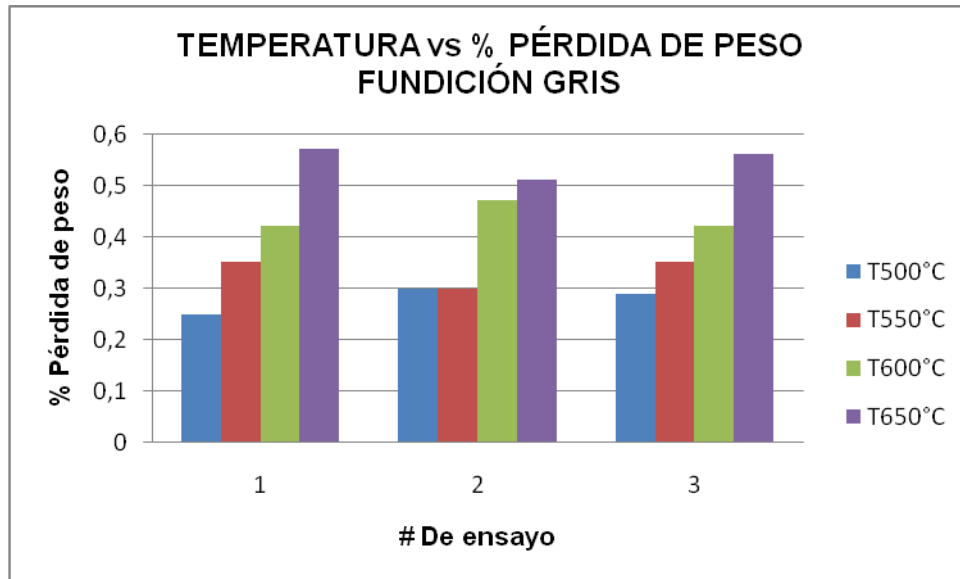


Figura 4.71 Gráfica de los registros de pérdida de peso obtenidos en los ensayos de oxidación térmica. Fundición gris
(Fuente: Autor)

Los resultados muestran que a medida que se incrementa la temperatura, se ha formado una capa de grafito de mayor espesor cuantificado por medio de la pérdida de peso, se obtuvieron promedios de 0,25%, 0,3%, 0,42% y 0,51% para las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C respectivamente.

A estos cupones los sometimos además para complementar la información a ensayos metalográficos y de dureza.

4.6.7.1 Caracterización del grafito. Oxidación Térmica

La caracterización del grafito efectuada en los cupones de fundición gris sometidas a oxidación térmica muestran que el grafito a medida que se incrementa la temperatura este tiende a difundirse para producir betas de grafito más alargada, de menor espesor y más dispersas por procesos difusivos que activan por calor en función del tiempo. Lo mencionado podemos observar en las Figuras 4.72 – 4.75.

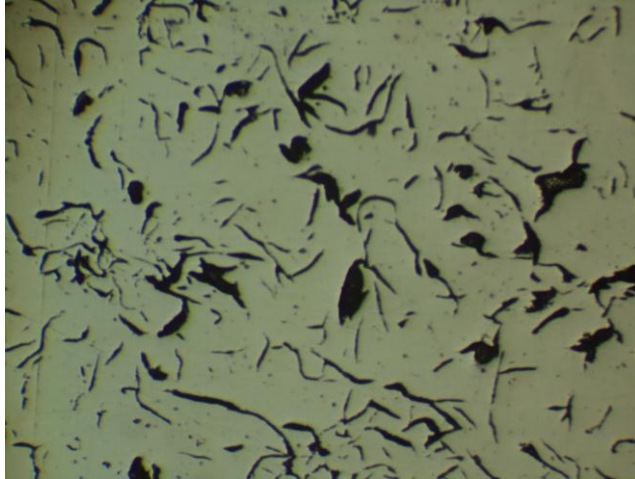


Figura.4.72 Metalografía. Oxidación térmica. Fundición gris T500°C. Sin ataque. 100X. (Fuente: Autor)

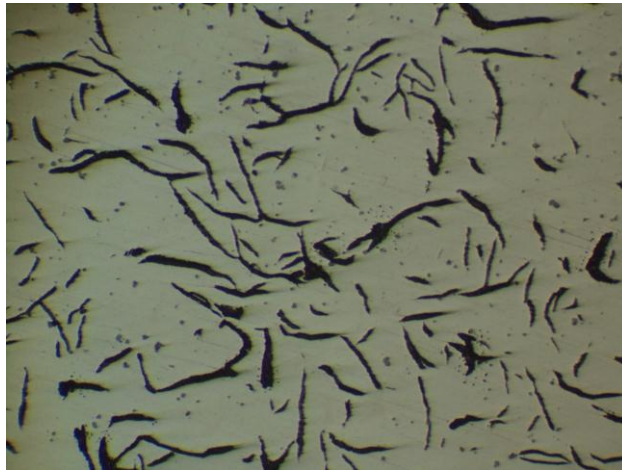


Figura 4.73 Metalografía.Oxidación térmica. Fundición gris T550°C. Sin ataque. 100X. (Fuente: Autor)

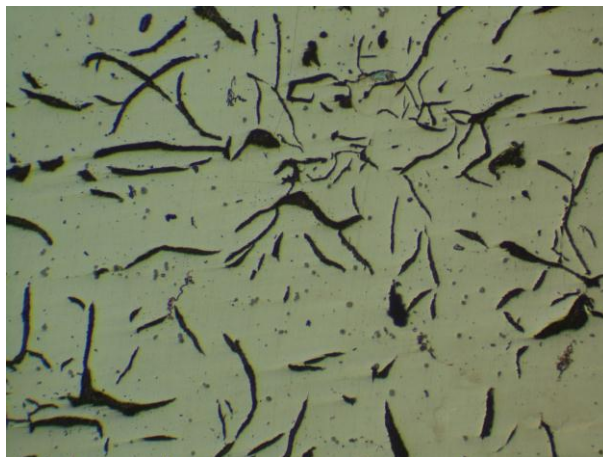


Figura 4.74 Metalografía.Oxidación térmica. Fundición gris T600°C. Sin ataque. 100X. (Fuente: Autor)



Figura 4.75 Metalografía.Oxidación térmica. Fundición gris T650°C. Sin ataque. 100X.

(Fuente: Autor)

4.6.7.2 Ensayos Metalográficos. Oxidación térmica fundición gris

En cuanto a la microestructura se observa que a la temperatura de 500°C se incrementa la zona de cementita y ya existe una pequeña descomposición de la perlita (Figura 4.76).

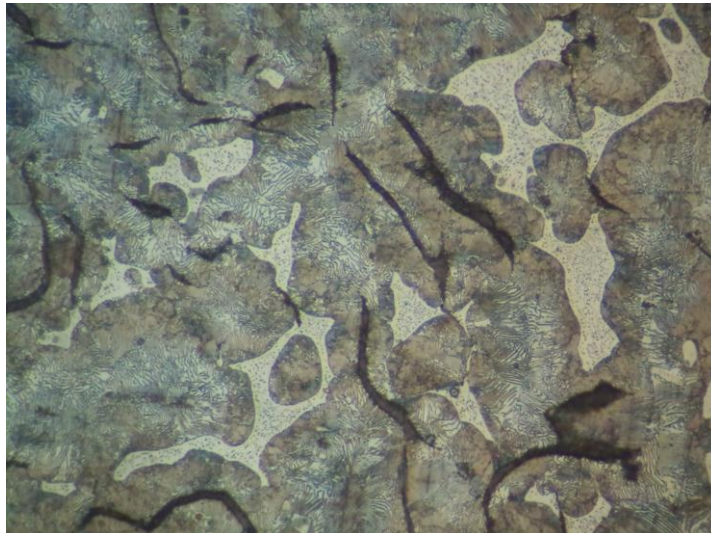


Figura 4.76 Oxidación Térmica. Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x T500°C. Comienzan aparecer lagnas de cementita

(Fuente: Autor)

A las temperaturas de 550°C- 600°C va progresando respectivamente la descomposición de la perlita hasta que a la temperatura de ensayo de 650°C la matriz es totalmente ferrítica. Observe las Figuras 4.77 – 4.79.

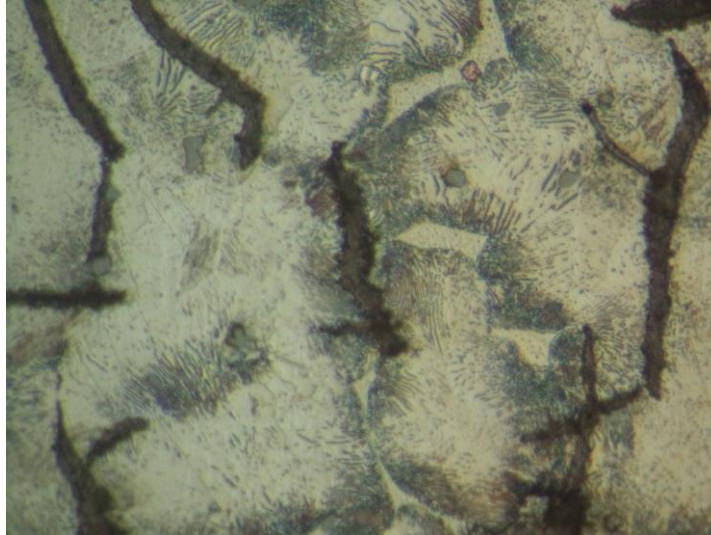


Figura.4.77 Oxidación Térmica. Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x
T550°C Las lagunas de cementita se intensifican
(Fuente: Autor)

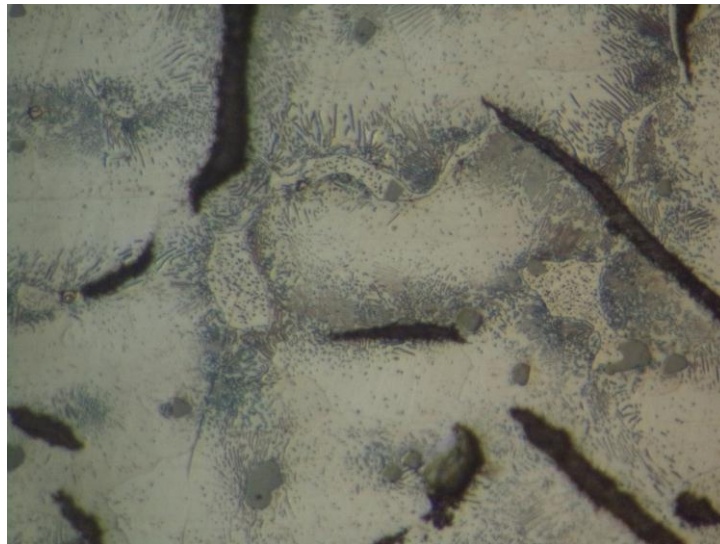


Figura 4.78 Oxidación Térmica.Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x
T600°C La matriz es casi totalmente ferrítica
(Fuente: Autor)

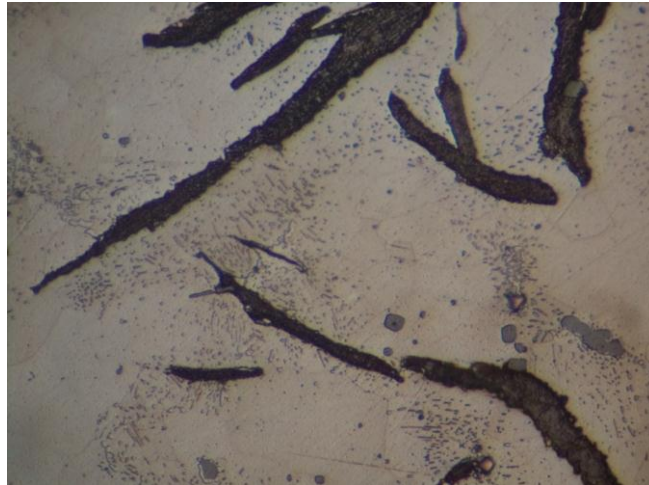


Figura 4.79 Oxidación Térmica. Fundición gris. Atacado con nital 4. 400x
T650°C. Matriz totalmente ferrítica
(Fuente: Autor)

4.6.7.3 Ensayos de Dureza. Oxidación térmica fundición gris

A los cupones se los realiza el análisis de dureza para determinar cómo es afectada esta propiedad por efecto de la oxidación térmica.

Tabla 4.28 Resultados Ensayos de dureza Brinell. Oxidación térmica.
Fundición gris

| Identificación | # de Probeta | Ø indentador (mm) | Test Force (Kgf) | Ø huella (mm) | Dureza Brinell |
|-----------------|----------------|-------------------|------------------|---------------|----------------|
| FG T 500 | CP-FG-T500-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,015 | 222 |
| | CP-FG-T500-O-2 | 2,5 | 187,5 | 0,98 | 239 |
| | CP-FG-T500-O-3 | 2,5 | 187,5 | 0,985 | 236 |
| FG T 550 | CP-FG-T550-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,29 | 133 |
| | CP-FG-T550-O-2 | 2,5 | 187,5 | 1,295 | 132 |
| | CP-FG-T550-O-3 | 2,5 | 187,5 | 1,29 | 133 |
| FG T 600 | CP-FG-T600-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,325 | 126 |
| | CP-FG-T600-O-2 | 2,5 | 187,5 | 1,33 | 125 |
| | CP-FG-T600-O-3 | 2,5 | 187,5 | 1,33 | 125 |
| FG T 650 | CP-FG-T650-O-1 | 2,5 | 187,5 | 1,345 | 122 |
| | CP-FG-T650-O-2 | 2,5 | 187,5 | 1,34 | 123 |
| | CP-FG-T650-O-3 | 2,5 | 187,5 | 1,345 | 122 |

(Fuente: Autor)

La Tabla 4.28 presentada anteriormente, muestra los datos de dureza obtenidos de los cupones sometidos al fenómeno de oxidación térmica. En la Figura 4.80 que se muestra a continuación se presentan gráficamente los datos de dureza de la tabla 4.28 para una mejor visualización

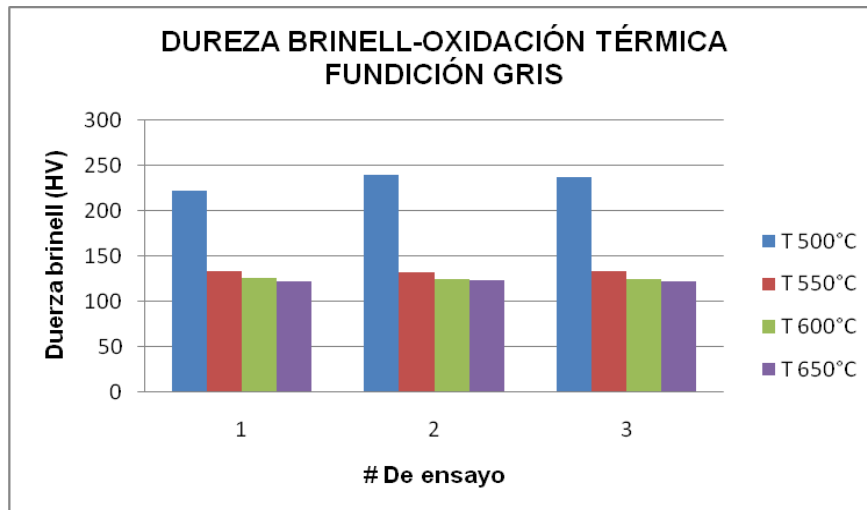


Figura 4.80 Gráfica de los datos de los ensayos de dureza. Oxidación térmica. Fundición gris. (Fuente: Autor)

Se puede observar que a medida que la temperatura aumenta la dureza de la fundición gris disminuye. Esta deducción se consolida con el análisis metalográfico pues se observa que la matriz a mayor temperatura tiende a ser ferrítica al descomponerse la perlita.

4.6.8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Ya realizados los ensayos requeridos tanto con el acero ASTM A 36 como también con la fundición gris, para facilidad de realizar un análisis comparativo se torna necesario acoplar la información de los ensayos realizados en los dos materiales, por lo tanto procederemos a retomar la información recopilada en las respectivas Figuras y Tablas anteriormente presentadas y se emitirá con mayor facilidad las respectivas conclusiones y recomendaciones del presenta trabajo de investigación.

4.6.8.1 Análisis metalográfico de los ensayos de Termofluencia









| Temperatura | Acero ASTM A36 | Fundición Cris |
|-------------|---|--|
| 500°C |  |  |
| 550°C |  |  |
| 600°C |  |  |
| 650°C |  |  |

Figura 4.81 Recopilación de las fotomicrografías. Ensayos de termofluencia. Acero ASTM A36-Fundición gris perlítica
(Fuente: Autor)

4.6.8.2 Análisis metalográfico de los ensayos de Oxidación térmica

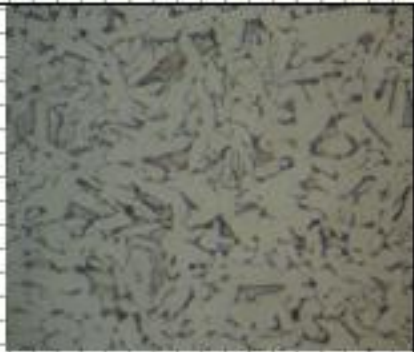


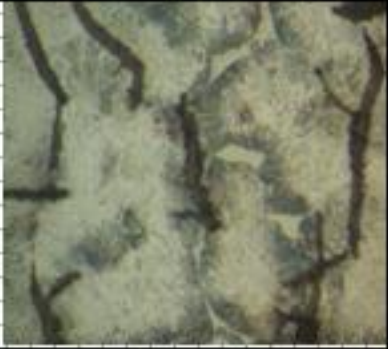




| Temperatura | Acero ASTM A36 | Fundición Cris |
|-------------|---|--|
| 500°C |  |  |
| 550°C |  |  |
| 600°C |  |  |
| 650°C |  |  |

Figura 4.82 Recopilación de las fotomicrografías. Ensayos de Oxidación térmica. Acero ASTM A36-Fundición gris perlítica
(Fuente: Autor)

De acuerdo al análisis de degradación microestructural producidos en los ensayos de termofluencia y oxidación térmica (Figuras 6.81-6.82) se observa que: El acero ASTM A36 va a sufrir la presencia de cavidades más pronunciadas en función de la temperatura de trabajo. De igual forma la perlita va a sufrir transformación y difusión llegando a obtener una matriz totalmente ferrítica con perlita globular dispersa en los límites de grano e incluso invadiendo el interior de los granos, esto implica que el material va a sufrir un ablandamiento considerable en función de la temperatura.

La fundición gris por su parte en función de la temperatura no va a sufrir la presencia de cavidades. La perlita se transforma dando lugar a la presencia de lagunas de cementita cada vez de mayor tamaño en función de la temperatura en una matriz ferrítica.

4.6.8.3 Curvas Deformación vs Tiempo obtenidas de los ensayos de termofluencia (acero ASTM A36)

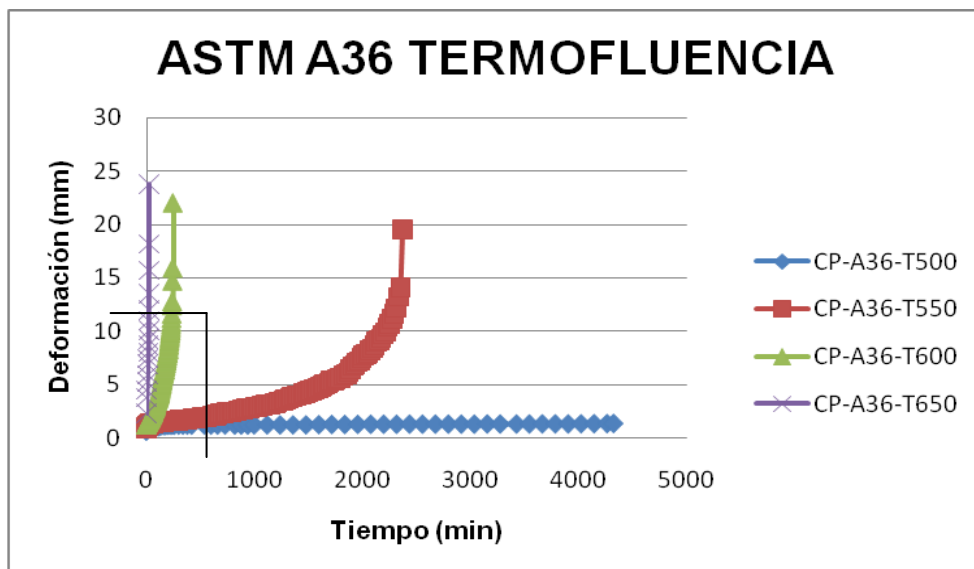


Figura 4.83 Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Acero ASTM A36

(Fuente: Autor)

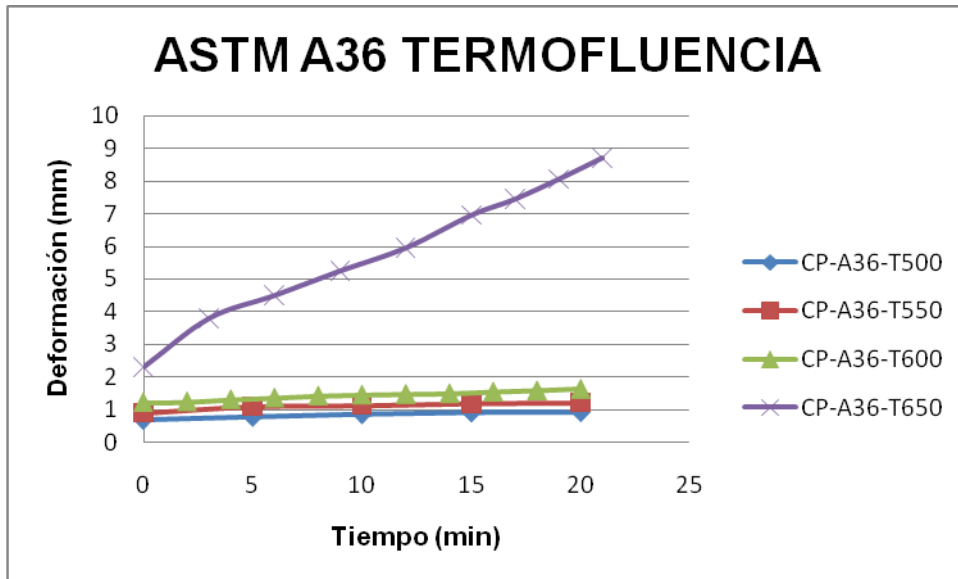


Figura 4.84 Ampliación. Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Acero ASTM A36
(Fuente: Autor)

4.6.8.4 Curvas Deformación vs Tiempo obtenidas de los ensayos de termofluencia (Fundición gris perlítica)

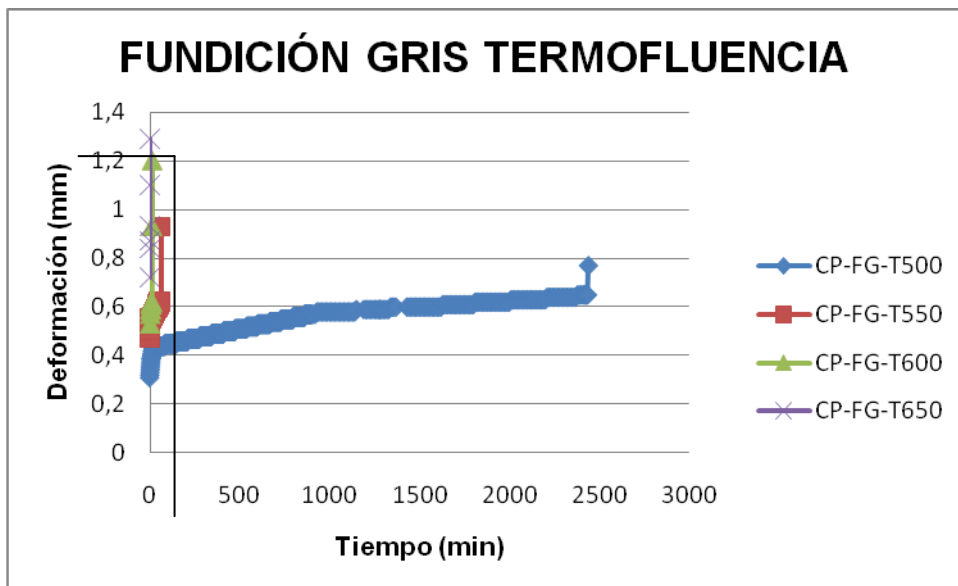


Figura 4.85 Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Fundición gris
(Fuente: Autor)

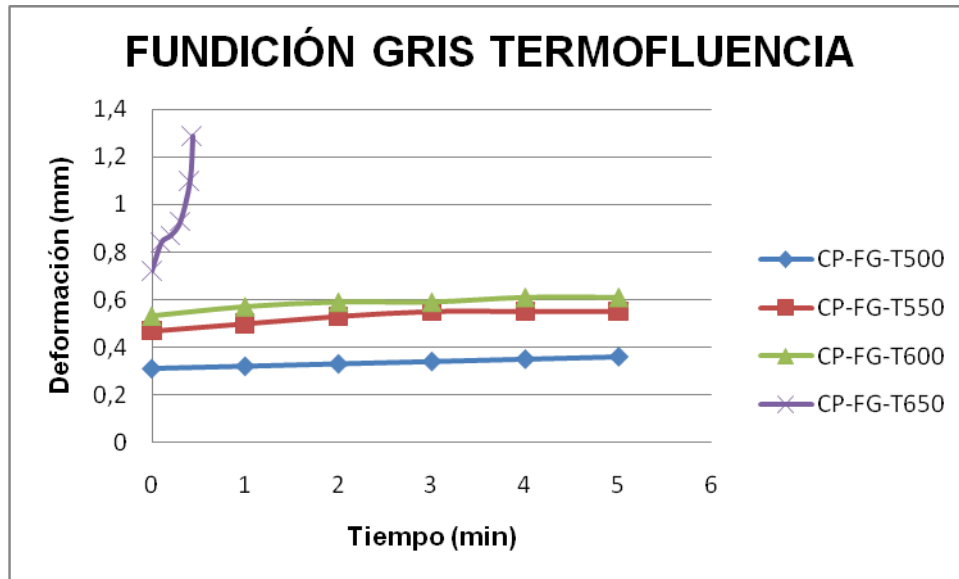


Figura 4.86 Ampliación. Resumen de las curvas de Termofluencia a las temperaturas de 500°C-550°C-600°C y 650°C. Fundición gris (Fuente: Autor)

En los ensayos de termofluencia efectuados tanto en el acero ASTM A36 como en la fundición gris se consideraron los siguientes parámetros: Carga constante de 2448 Kgf, temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C estableciendo como tiempo límite de ensayo 72 horas.

La fundición gris presentó una deformación instantánea menor con respecto al acero A36 alrededor del 53%.

Tabla 4.29 Deformaciones instantáneas en los ensayos de termofluencia a las temperaturas de interés

| | Temperatura (°c) | 500 | 550 | 600 | 650 |
|-----------------------|-------------------------|-------|-------|-------|------|
| ASTM A36 | Deformación (mm) | 0,7 | 0,9 | 1,2 | 2,5 |
| Fundición gris | Deformación (mm) | 0,31 | 0,47 | 0,52 | 0,73 |
| | Comparación | 44,3% | 52,2% | 43,3% | 73% |

(Fuente: Autor)

Las curvas Deformación vs Tiempo de los dos materiales presenta una primera zona donde la pendiente aumenta rápidamente, luego alcanzan una segunda zona donde la pendiente es estable. El acero A36 presentó una tercera zona donde la deformación aumenta rápidamente hasta llegar a la fractura. La fundición gris no presenta una tercera zona simplemente en la segunda zona llega un punto en el que alcanza la fractura.

A medida que la temperatura de ensayo aumenta la deformación instantánea aumenta, el tiempo para llegar a la fractura disminuye y la deformación total aumenta.

4.6.8.5 Otros aspectos a considerar en los ensayos de Termofluencia efectuados con el acero ASTM A36

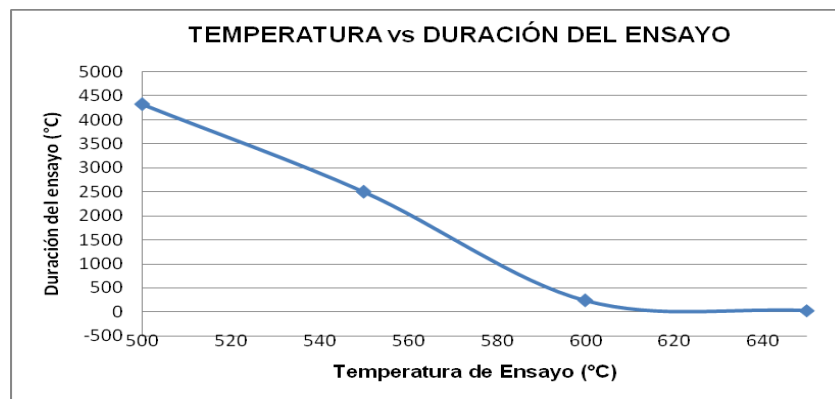


Figura 4.31 Tomada de la página 85

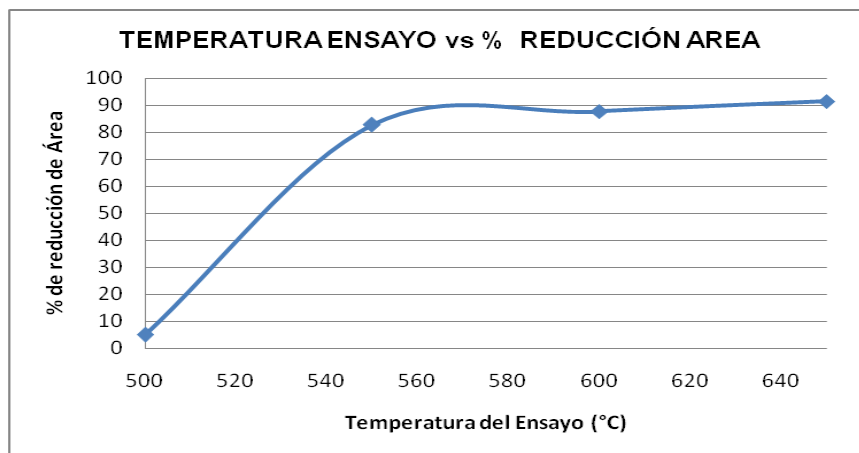


Figura 4.32 Tomada de la página 85

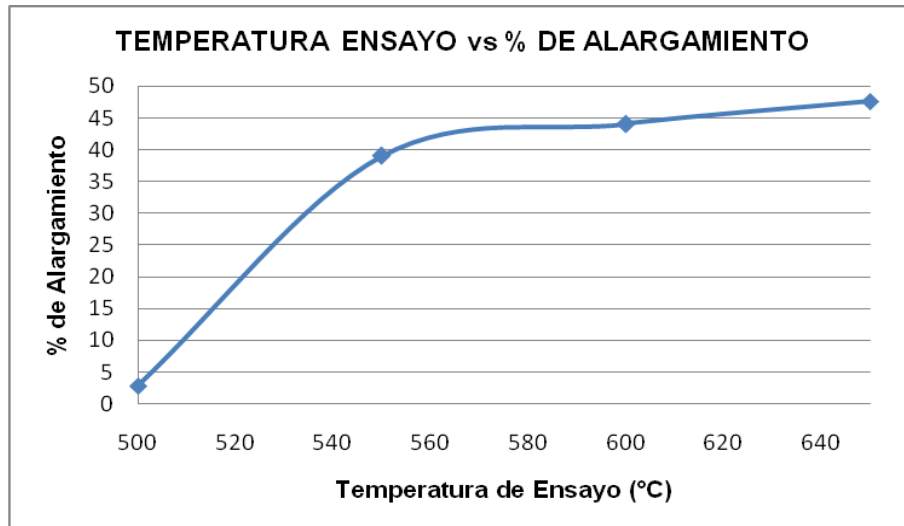


Figura 4.33 Tomada de la página 86

Como se puede observar, a medida que la temperatura aumenta el tiempo de duración del ensayo disminuye, el porcentaje de reducción de área aumenta y el porcentaje de alargamiento también aumenta.

4.6.8.6 Otros aspectos a considerar en los ensayos de Termofluencia efectuados en la Fundición gris perlítica laminar

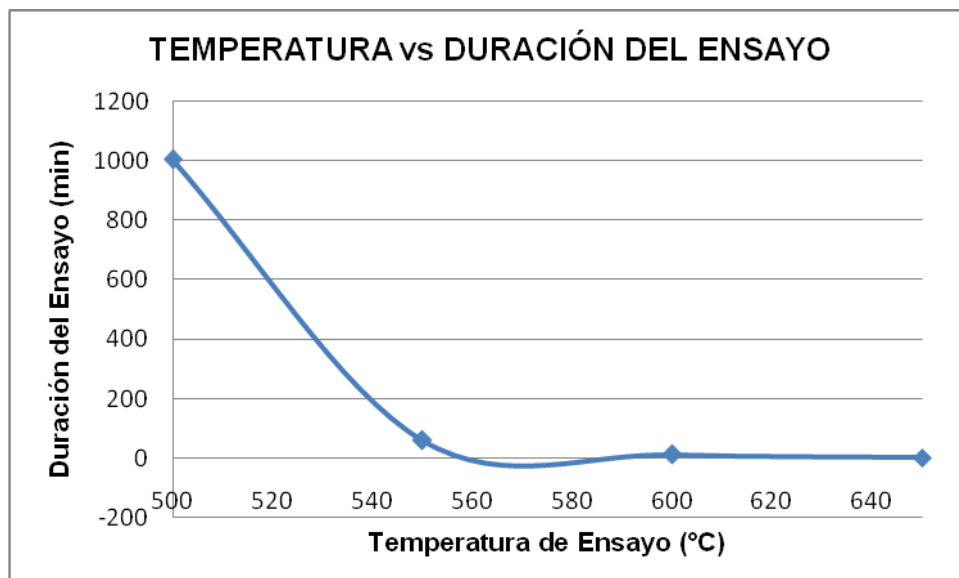


Figura 4.56 Tomada de la página 109

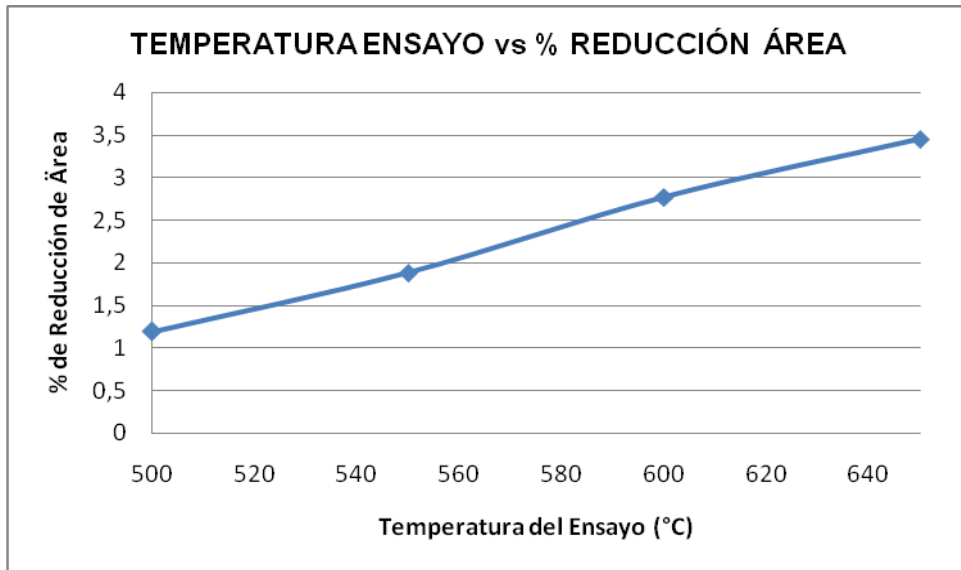


Figura 4.57 Tomada de la página 109

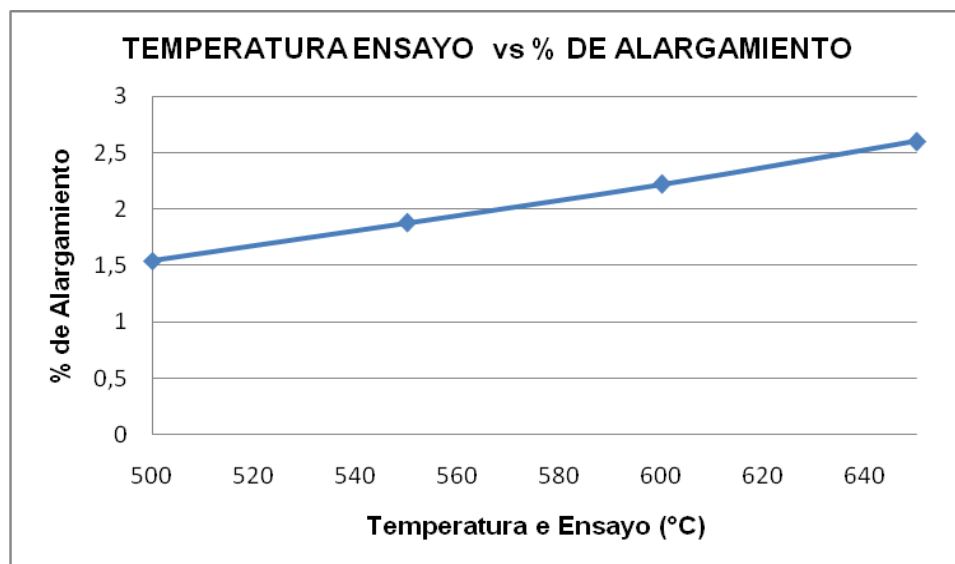


Figura 4.58 Tomada de la página 110

Como se puede observar, a medida que la temperatura aumenta el tiempo de duración del ensayo disminuye, el porcentaje de reducción de área aumenta y el porcentaje de alargamiento también aumenta.

La fundición gris en relación al acero A36 el porcentaje de reducción de área y el porcentaje de alargamiento son muy pequeños por lo que se

puede manifestar que la fundición gris aún a elevadas temperaturas no presenta o admite deformación considerable.

4.6.8.7 Ensayos de Esfuerzo vs Deformación. Acero ASTM A36

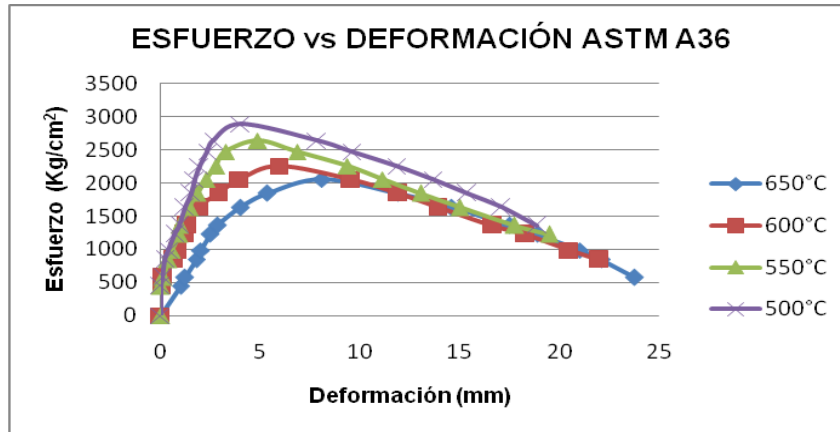


Figura 4.16 Tomada de la página 69

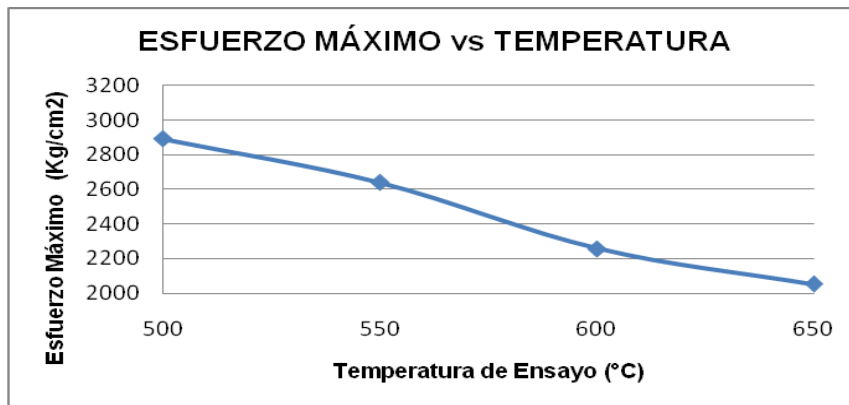


Figura 4.17 Tomada de la página 70

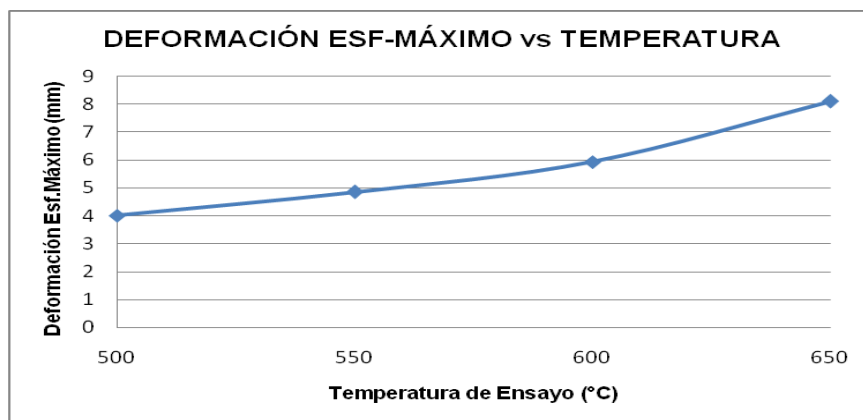


Figura 4. 18 Tomada de la página 70

4.6.8.8 Ensayos de Esfuerzo vs Deformación. Fundición gris

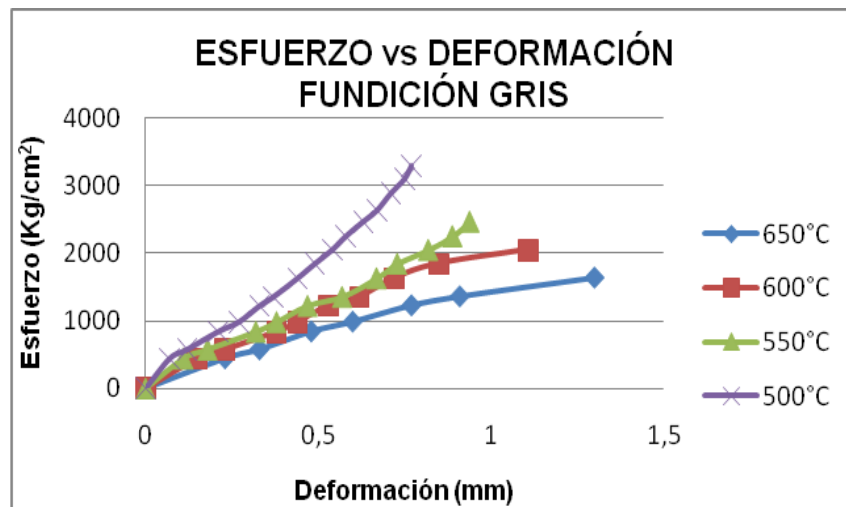


Figura 4.19 Tomada de la página 72

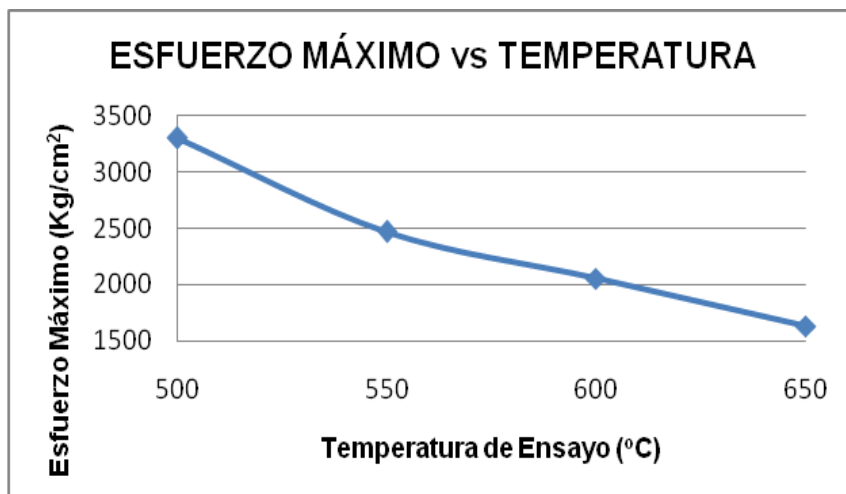


Figura 4.20 Tomada de la página 73

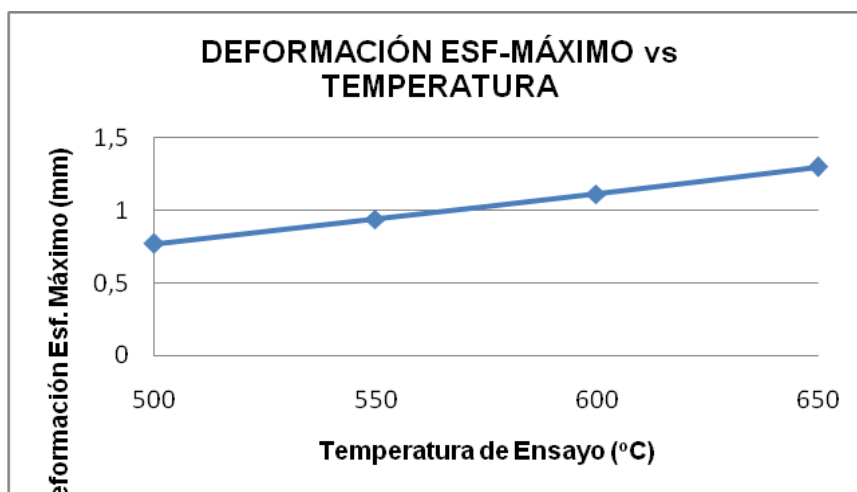


Figura 4.21 Tomada de la página 73

Las curvas Esfuerzo vs Deformación en el acero A36 presentan una forma característica acampanada. A mayor temperatura soporta mayor esfuerzo y presenta una menor deformación. Su esfuerzo máximo a las temperaturas de interés se lo muestra en la tabla a continuación. Posteriormente a ello el esfuerzo disminuye debido a que el acero A36 disminuye su sección y la deformación continua hasta llegar a promedios de 18,9-19,5-22,03-23,79mm a las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C respectivamente.

Tabla 4.7 Tomada de la página 69

| Temperatura (°C) | Deformación (mm) | Esfuerzo Máximo (Kg/cm ²) |
|------------------|------------------|---------------------------------------|
| 500 | 4 | 2892 |
| 550 | 4,85 | 2640 |
| 600 | 5,93 | 2256 |
| 650 | 8,1 | 2052 |

Las curvas Esfuerzo vs Deformación de la fundición gris no tienen la forma característica del acero A36. Pero si resisten a mayor temperatura un mayor esfuerzo y viceversa. También a menor temperatura menor deformación. A diferencia de las curvas del acero A36, la fundición gris cuando alcanza su esfuerzo máximo llega a la fractura alcanzando por lo tanto su mayor deformación. Además es importante notar que a la temperatura de 500°C la fundición gris alcanza un esfuerzo mayor al alcanzado por el acero A36. Esto podría ser un referente que la fundición trabaja mejor que el acero a temperaturas de operación menores a 500°C.

Tabla 4.9 Tomada de la página 72

| Temperatura (°C) | Deformación (mm) | Esfuerzo (Kg/cm ²) |
|------------------|------------------|--------------------------------|
| 500 | 0,77 | 3300 |
| 550 | 0,94 | 2472 |
| 600 | 1,11 | 2052 |
| 650 | 1,3 | 1632 |

4.6.8.9 Microdureza a varias distancias a partir de la fractura. Acero ASTM A36

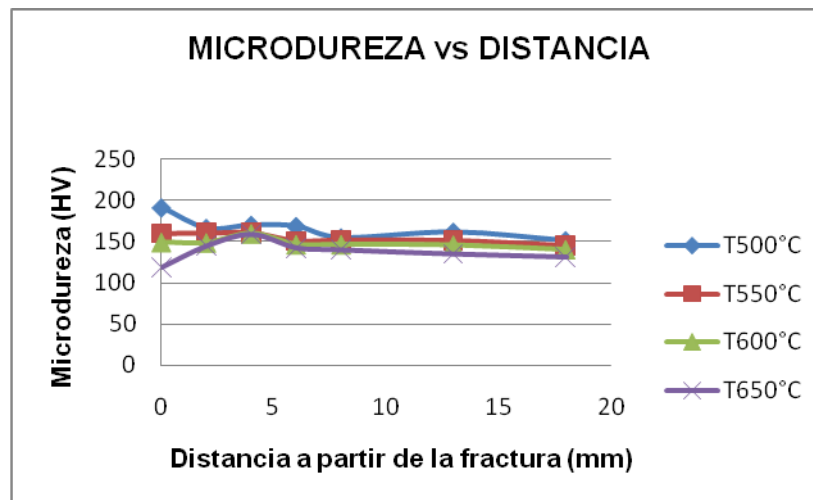


Figura 4.41 Tomada de la página 95

4.6.8.10 Microdureza a varias distancias a partir de la fractura. Fundición gris perlítica

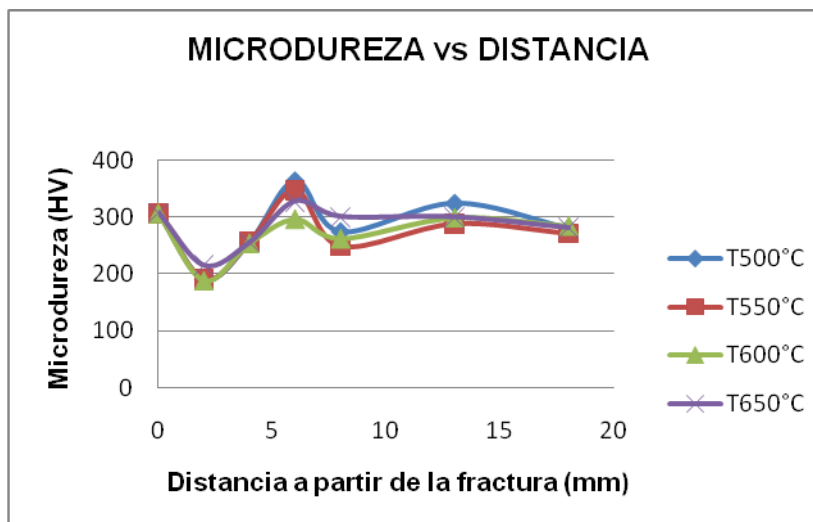


Figura 4.68 Tomada de la página 118

La dureza del acero a36 está en el rango de 100 a 200HV y la fundición en el rango de 200 a 300 Hv. Esto debido a que en la fundición al descomponerse la perlita se dio lugar a la formación de lagunas de

cementita cada vez de mayor tamaño a medida que se incrementa la temperatura lo que propicia la fractura de tipo frágil.

4.6.8.11 Pérdida de Peso vs Temperatura. Oxidación térmica. Acero ASTM A 36

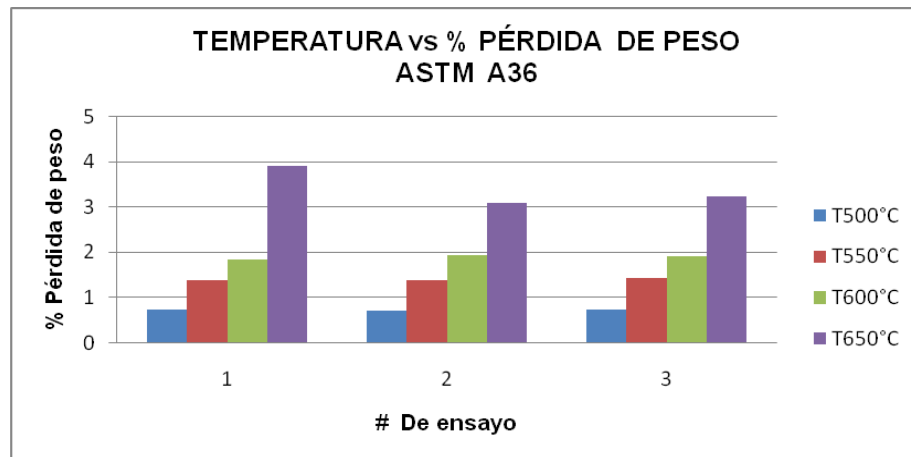


Figura 4.42 Tomada de la página 98

Los resultados muestran que la pérdida de material se incrementa a medida que se incrementa la temperatura, se obtuvieron promedios de 0.74%, 1,41%, 1,9% y 3,4% para las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C respectivamente.

Este fenómeno se puede atribuir a la reacción del acero ASTM A36 con la atmósfera del horno provocando descarburación. Se producen las reacciones: $Fe_3C + CO_2 = 3Fe + 2CO$ $Fe_3C = 3Fe + C$ que son función del tiempo y la temperatura.

4.6.8.12 Pérdida de Peso vs Temperatura. Oxidación térmica. Fundición gris perlítica

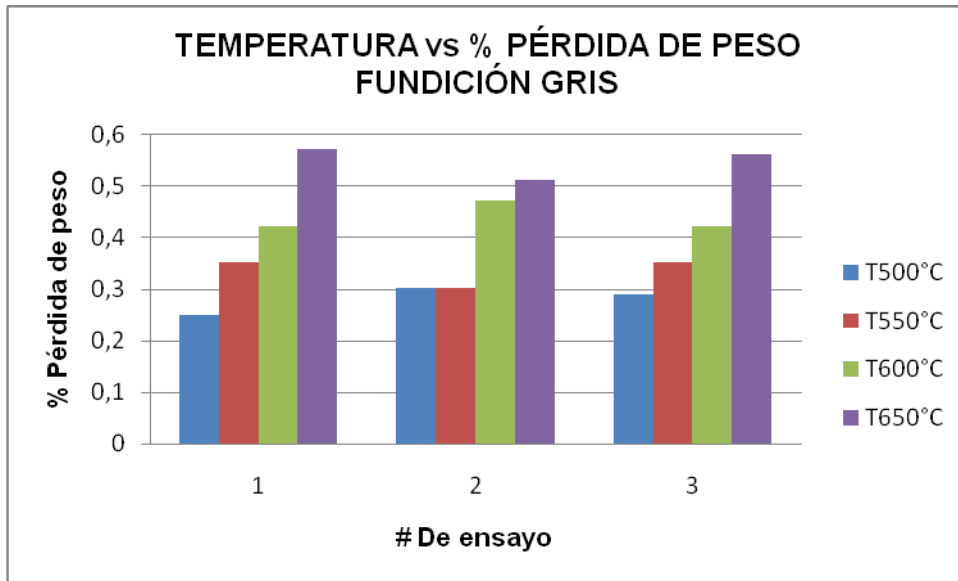


Figura 4.71 Tomada de la página 122

Los resultados muestran que a medida que se incrementa la temperatura, se ha formado una capa de grafito de mayor espesor cuantificado por medio de la pérdida de peso, se obtuvieron promedios de 0,25%, 0,3%, 0,42% y 0,51% para las temperaturas de 500°C, 550°C, 600°C y 650°C respectivamente.

4.6.8.13 Ensayos de dureza-Oxidación térmica. Acero ASTM A36

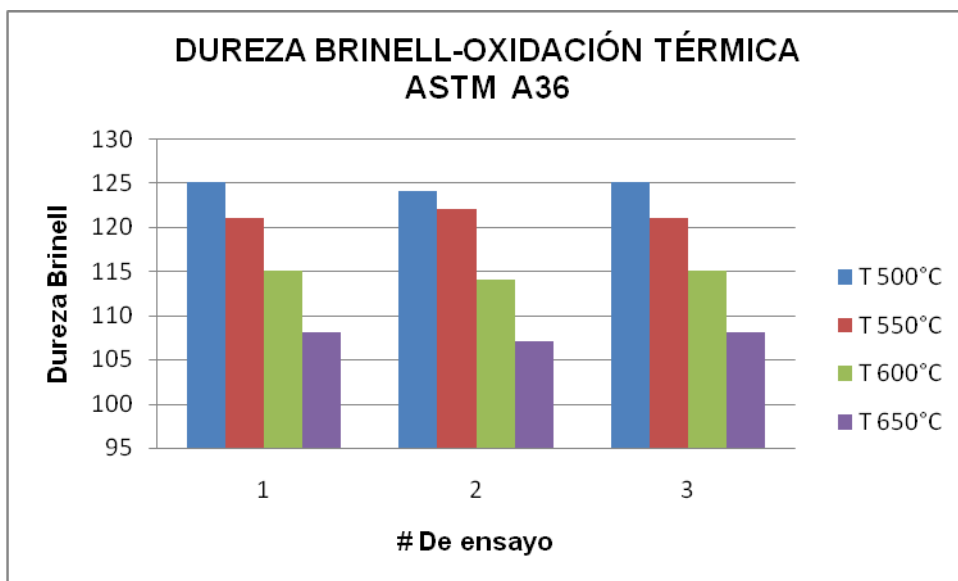


Figura 4.47 Tomada de la página 102

Se puede notar que a medida que la temperatura aumenta la dureza del acero ASTM A36 disminuye. Estos datos son consistentes con el análisis metalográfico pues se observó que la matriz a mayor temperatura tiende a ser totalmente ferrítica ya que al descomponerse la perlita en cementita globular y ferrita para ubicarse por procesos de difusión inicialmente en los límites de grano y luego también distribuirse en el interior de los granos.

4.6.8.14 Ensayos de Dureza-Oxidación térmica. Fundición gris

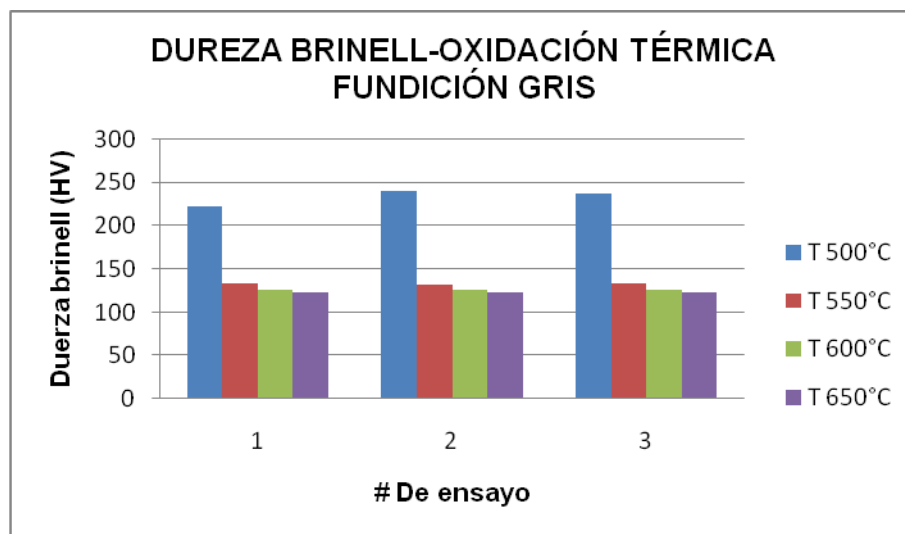


Figura 4.89 Tomada de la página 127

Se puede observar que a medida que la temperatura aumenta la dureza de la fundición gris disminuye. Esta deducción se consolida con el análisis metalográfico pues se observa que la matriz a mayor temperatura tiende a ser ferrítica al descomponerse la perlita.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los ensayos de Esfuerzo vs Deformación a elevadas temperaturas realizados en el acero ASTM A36 y en la fundición gris perlítica muestran que a la temperatura de 500°C el acero A36 soporta un esfuerzo máximo de 2890 Kg/cm², en cambio la fundición gris soporta un esfuerzo máximo de 3300Kg/cm². Note que a esta temperatura la fundición soporta un mayor esfuerzo, pero a las temperaturas de 550°C, 600°C y 650°C las condiciones cambian, es decir el acero soporta mayores esfuerzos que la fundición.
- Las curvas de termofluencia realizadas en los dos materiales mostraron una deformación instantánea al momento de aplicar la carga de 2448Kgf, en el caso del acero va de 0,7mm hasta 2,5mm a las temperaturas de 500°C y 650°C respectivamente. La fundición gris por su parte experimentó deformaciones instantáneas de 0,31mm a 0,7mm. La fundición gris referente al acero A36 presenta deformaciones instantáneas mucho menores.
- El acero A36 en los ensayos de termofluencia experimento deformaciones en el rango de 2,8% a 47,6% y porcentajes de reducción de área en el rango de 4,91% a 91,47% en tiempos de ensayo de 4320min a 26min. Por su parte la fundición gris experimentó deformaciones en el rango de 1,52% a 2,62% y porcentajes de reducción

de área en el rango de 1,19% a 3,45% en tiempos de ensayo de 1011min a 1min. Estos valores son para las temperaturas de 500°C y 650°C respectivamente. Se aprecia que el acero se deforma elongándose y formando cuellos en las zonas de fractura, por su parte la fundición gris, no se deforma significativamente.

- Los ensayos metalográficos muestran que en el acero ASTM A36 los granos sufren, por temofluencia, un alargamiento en la dirección de la carga aplicada, a medida que la temperatura se incrementa estos granos sufren un desgarre en las uniones triples lo que da lugar a la aparición de cavidades en la zona de fractura. Estas cavidades al aumentar la temperatura por procesos difusivos, se agrupan y forman cavidades de mayor tamaño. Esto no sucede con la fundición gris, ya que los granos no se deforman y el tiempo de ensayo no es lo suficientemente largo para que se produzca la difusión.
- Las pruebas de dureza en el acero ASTM A36 muestran una dispersión en la vecindad de la fractura causada por un efecto competitivo entre la deformación plástica y la degradación de la microestructura la deformación teóricamente debería producir un incremento de dureza pero el acero presentó un efecto contrario probablemente debido a que se produjo una importante transformación a nivel microestructural que da como resultado fases mucho más blandas al aumentar la temperatura. Por su parte la fundición gris, si presenta un endurecimiento en la vecindad de la fractura aunque no muy considerable.
- Los ensayos metalográficos mostraron que en el acero ASTM A36, a medida que se incrementa la temperatura la fase perlítica laminar se va transformando en perlita globular cada vez menos definidas puesto que la perlita globular por difusión se va ubicando en los bordes de los granos.

La fundición gris por su parte presenta descomposición de la perlita así como también incremento de lagunas de cementita.

- Los ensayos de oxidación térmica mostraron que el acero ASTM A36 sufre descarburización en función del tiempo y la temperatura lo que conlleva a un desprendimiento del material de la superficie. Por su parte la fundición gris perlítica laminar presentó la formación de una capa muy fina de carbón en su superficie, esta capa aumenta de espesor en función del tiempo y la temperatura y aparentemente protege al material de la oxidación, desprendimiento de material y pérdida de peso.
- En cuanto a la caracterización del grafito en la fundición, luego del ensayo de termofluencia se puede observar que a medida que aumente la temperatura, también aumenta la tendencia del grafito de agruparse y formar nódulos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar ensayos de termofluencia con miras a determinar la vida residual de los materiales ya que en la industria hay muchos equipos sometidos a termofluencia y aplicar replicas metalográficas para su mantenimiento.
- Obtener mayor base de datos de la degradación de los estos materiales frente al fenómeno de termofluencia e incursionar diseños en base a la información recolectada.
- Realizar ensayos a la temperatura y carga de funcionamiento reales del horno industrial para pan fabricado por INOX para obtener registros de degradación a nivel microestructural en varios estadios de análisis.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

ESTUDIO PARA LA FABRICACIÓN DE ESPEJOS PARA LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS MAGNUM HPT 1005-INOX POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LA FUNDICIÓN

6.1 DATOS INFORMATIVOS

INOX, es una empresa nacional dedicada a la fabricación de Hornos y Equipos para panadería, pastelería y gastronomía fundada en agosto de 2004. Gracias a un proceso dinámico de innovación e inversión tecnológica se ha transformado en uno de los principales puntos de referencia en el sector. Un tipo de horno fabricado por INOX es el MAGNUM HPT 1005G que lo podemos observar en la Figura 6.1 y sus características en la Tabla 6.1.



Figura 6.1 Hornos Magnum HPT 1005G fabricado por INOX

Tabla 6.1 Características del horno Magnum HPT 1005G-INOX

| | |
|-----------------------------|---------|
| Tamaño de bandeja | 660x460 |
| Número de bandejas | 10 |
| Consumo de gas GLP (Kg/h) | 1.8 |
| Temperatura Máxima (°C) | 260 |
| Potencia Eléctrica (Kw/h) | 0,9 |
| Altura (C) (mm) | 1770 |
| Ancho (A) (mm) | 860 |
| Profundidad (B) (mm) | 1470 |
| Peso (Kg) | 280 |
| Calentamiento a 180°C (min) | 14 |
| Presión de Trabajo (mbar) | 50 |

Fuente: INOX

El estudio para la fabricación del espejo para la cámara de combustión de estos hornos Magnum para pan por medio de la técnica de la fundición, se lo realizó en la provincia de Chimborazo, ciudad de Riobamba, específicamente en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica ubicado dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH).

Para la fabricación del espejo se utilizó un modelo de madera. Además, durante el proceso de moldeo fue necesario utilizar aditivos para la arena y pinturas en los modelos de la moldura y del sistema de alimentación, esto con el objeto de mejorar las cualidades de los espejos fundidos.

6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Los espejos de la cámara de combustión de los hornos Magnum HPT 1005G actualmente son fabricados con acero ASTM A36 y estos al ser sometidos a largos periodos de trabajo a temperaturas cercanas a los 500°C y muy bajo esfuerzo (el peso propio de la placa) están presentando en tiempos relativamente cortos una deformación y alteración considerable de su geometría producto de la degradación a nivel

microestructural del material debido al fenómeno de termofluencia y oxidación térmica.

En el desarrollo del capítulo IV del presente estudio, se demostró que la fundición gris a temperaturas cercanas a 500°C y moderado esfuerzo no presenta una deformación considerable, así como también a nivel microestructural no presenta mayor cambio en las fases presentes. En los ensayos de oxidación térmica no se produjo la pérdida de material por efecto de ampollamiento de la superficie del material. Todos estos comportamientos característicos de la fundición gris serán de mucha utilidad en los espejos de la cámara de combustión de los hornos Magnum construidos en INOX.

A pesar de la gran demanda de piezas fundidas, casi la totalidad de estas se obtienen sin sistemas de alimentación completamente definidos y especificados. Esto, la mayor parte del tiempo conlleva a fallas en las piezas fundidas así como también penosas discusiones entre fundidores y moldeadores. Muy a menudo se deja toda la iniciativa en manos del moldeador a quien se le pide:

- Traducir en formas las ideas que el ingeniero a dibujado en el papel.
- Elegir la posición del modelo en el molde, a pesar de que es importante tener un profundo conocimiento de los métodos de moldeo.
- Construir el modelo teniendo en cuenta los sobrespesores dada la cuantía de las contracciones.

Para que el aporte investigativo a este sector industrial sea altamente provechoso se pone a su alcance la presente propuesta que consiste en presentar un estudio para la fabricación de espejos para la cámara de combustión de los hornos Magnum HPT 1005 por medio de la técnica de la fundición, en el cual se contemplará, en forma detallada, el cálculo del

sistema de alimentación, del modelo, de las cargas y el proceso de moldeo para conseguir fácilmente espejos por medio de la técnica de la fundición.

6.3 JUSTIFICACIÓN

En la industria de la fundición cada vez aparecen alternativas tecnológicas de solución a los problemas que surgen en el proceso de la producción. Aunque existen recomendaciones sobre el proceso de fundición para obtener piezas, estos son muy generales. Esta falta de información, conduce a que en los talleres de fundición falten criterios para poder realizar un correcto diseño y proceso de fundición que permita evitar las causas de muchos defectos que se presentan en las piezas fundidas.

La fundición gris perlítica a temperaturas cercanas a los 500°C-650°C presenta un comportamiento satisfactorio frente al fenómeno de termofluencia y oxidación térmica, por lo tanto este trabajo de fabricación de los espejos con fundición gris se ve totalmente justificado ya que contribuirá a tener un equipo (horno) mucho más confiable desde el punto de vista funcional.

Evidentemente, para iniciar nuestro estudio, comprendemos y enfatizamos la importancia que presenta el proceso de fundición, ya que es un aspecto muy importante para lograr obtener piezas de calidad. El término calidad se determina como el grado de correspondencia del artículo a las exigencias del usuario. Una elevada calidad en la producción y fiabilidad de estos artículos permite economizar materia prima, materiales y mano de obra así como también alcanzar mayor disponibilidad y fiabilidad del equipo.

En esta investigación se asume la tarea de profundizar en el estudio de la fundición gris, desarrollar una tecnología de investigación científica y

tecnológica de selección de datos de varias fuentes para resolver un problema particular, brindándome la oportunidad de obtener mayor experiencia en la solución de un problema tecnológico lo cual afianzará mayor solvencia en mi formación profesional.

6.4 OBJETIVOS

6.4.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un procedimiento para la obtención de espejos para la cámara de combustión del horno Magnum HPT 1005G, usando fundición gris con el fin de mejorar el desempeño de dicho elemento.

6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el sistema de alimentación.
- Determinar los pasos a seguir para la preparación del molde.
- Cálculo de cargas del horno para obtener la fundición con la composición adecuada.
- Analizar y evaluar los costos de elaborar un espejo con el uso del acero ASTM A36 y uno con fundición gris como Material Alternativo.

6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

Contamos con el apoyo de la Facultad de Mecánica, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en cuanto a equipos ya que su laboratorio de Fundición se encuentra en buenas condiciones. La obtención del espejo con fundición gris perlítica se realizará en el horno de inducción de 100 Kg de capacidad.

De igual forma, el laboratorio de análisis de arenas de la ESPOCH está en buenas condiciones, una vez determinadas las propiedades de la arena procederemos a realizar el moldeado del modelo para ello se cuenta dentro del laboratorio de fundición con la infraestructura, equipos y herramientas necesarias.

Para el diseño del sistema de alimentación se usará información obtenida en investigaciones anteriores [14, 15, 16, 17] además se cuenta con los conocimientos adquiridos en los módulos de la maestría en diseño mecánico.

De acuerdo a lo mencionado, la presente propuesta es factible de realizarla ya que se cuenta con los equipos, infraestructura y el recurso humano para su desarrollo

6.5.1 ANÁLISIS TECNOLÓGICO

En el entorno o región donde se va a desarrollar el estudio, se cuenta con la materia prima (chatarra), los equipos e infraestructura y necesaria (taller de fundición y de arenas) y los conocimientos necesarios para la obtención adecuada de los espejos, es decir, tecnológicamente es factible realizar un estudio para la obtención más adecuada de un espejo por medio de la técnica de la fundición.

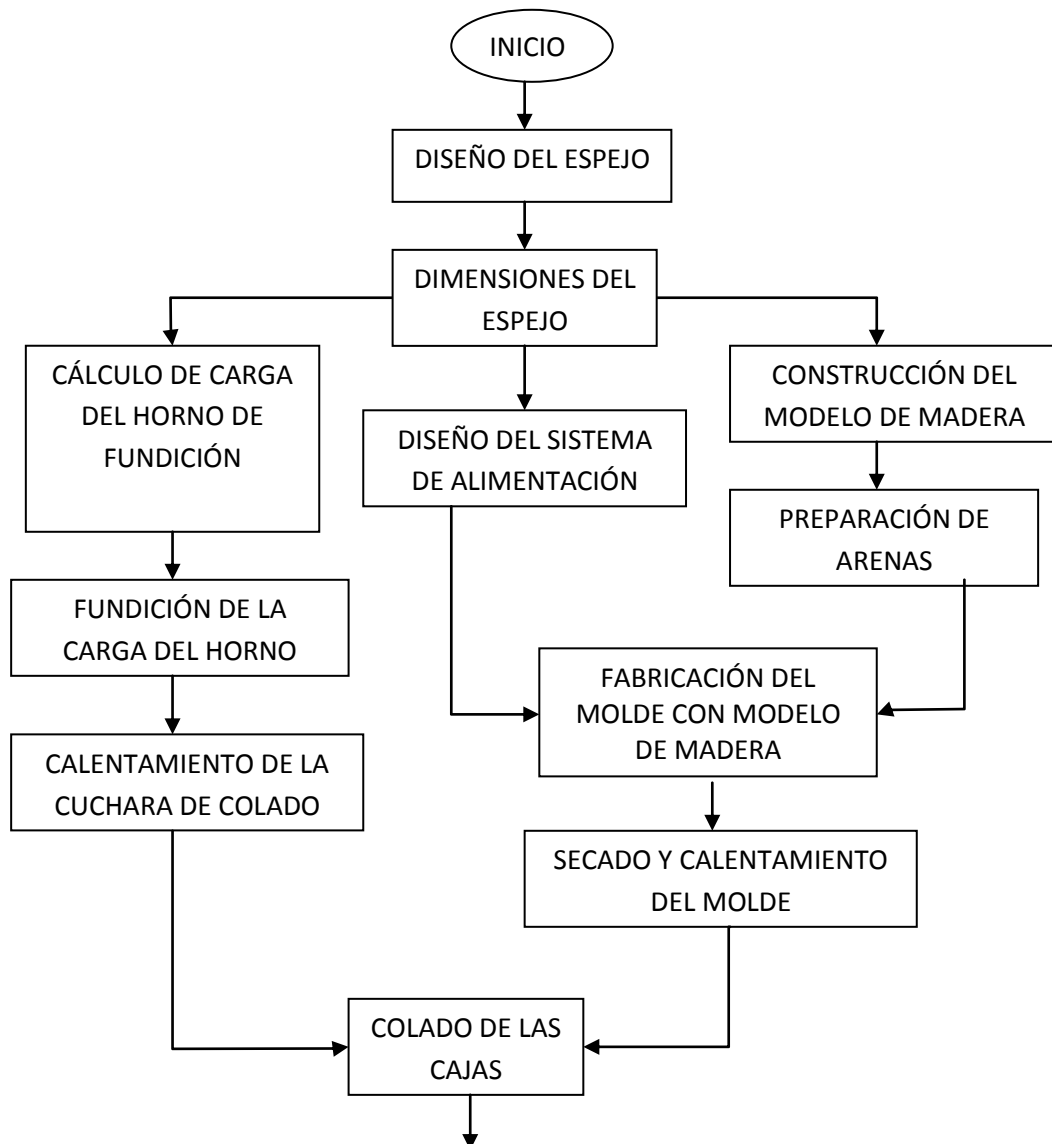
6.6 FUNDAMENTACIÓN

La presente propuesta se basa en la información recolectada en los capítulos II, III, IV y V que se relaciona con el marco teórico, experimentación, análisis e interpretación de resultados y conclusiones respectivamente, hasta que se preparó una base de datos que permite

garantizar mejores condiciones de funcionamiento del espejo de la cámara de combustión al ser construido con fundición gris perlítica.

6.7 ETAPAS REQUERIDAS PARA LA TÉCNICA DE LA FUNDICIÓN

En la Figura 6.2 se presenta el diagrama de flujo con las etapas requeridas para el procedimiento de fundición. Cada una de estas etapas se las desarrollará específicamente para la obtención del espejo con la finalidad que este trabajo sea muy fácil y práctico de emplearlo.



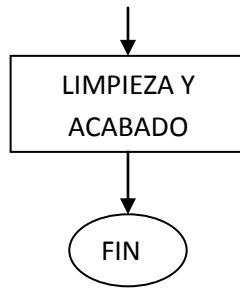


Figura 6.2 Diagrama de flujo de las etapas para la fundición del Espejo
(Fuente: Autor)

6.7.1 DISEÑO DEL ESPEJO

En cuanto al diseño del espejo, la empresa INOX ya tiene el diseño del mismo, un cambio en su configuración involucraría ciertas alteraciones en los otros componentes del horno como por ejemplo: la distribución y dimensiones de los tubos del intercambiador de calor, soportes, etc. Que involucrarían cambios en su proceso de fabricación y ensamble que por el momento la empresa no está interesada en realizarlas. Por estos antecedentes, esta investigación no abarca el diseño del espejo, tomaremos el diseño de INOX.

6.7.2 DIMENSIONES Y CONFIGURACIÓN DEL ESPEJO

El espejo para la cámara de combustión del horno Magnum HPT 1005G FABRICADO por INOX tiene las dimensiones y configuración mostradas en la Figura 6.3.

Las medidas están en milímetros y el plano detallado lo podemos encontrar en el Anexo 9.

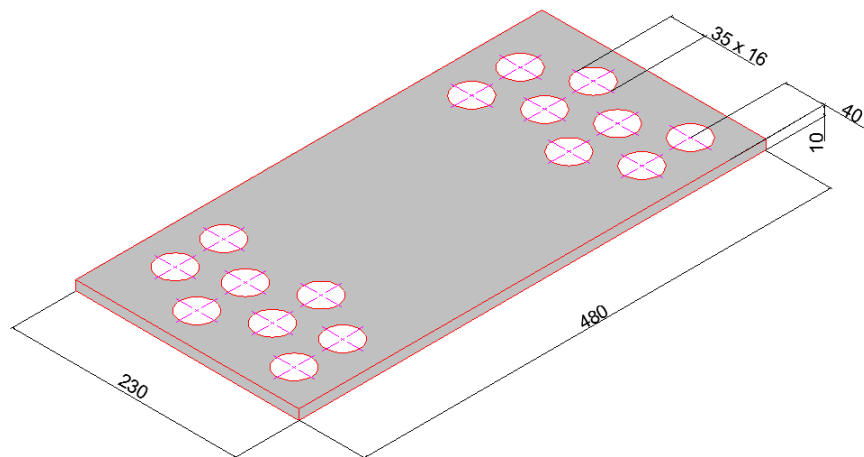


Figura 6.3 Dimensiones y configuración del espejo para la cámara de combustión de los hornos Magnum HPT 1005 fabricado por INOX

Fuente: INOX Hornos y Equipos

6.7.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El modelo puede ser metálico si se lo va a utilizar para moldear un gran lote de piezas o a su vez puede ser de madera si se van a moldear contadas cantidades. Por lo tanto el modelo a construirse será de madera. Tenemos ya las dimensiones del espejo, pero estas dimensiones en fundición se denominan dimensiones de acabado (finales), por cuanto el material fundido al interior del molde experimentará una contracción que necesariamente la tenemos que determinar previa a la construcción del molde y para ello es necesario conocer:

6.7.3.1 La Variación de volumen en la solidificación

Generalmente la contracción total durante el vaciado y enfriamiento de la moldura en el molde se compone de tres tipos de contracciones: Contracción de la aleación en estado líquido, contracción durante la solidificación y contracción en estado sólido (Figura 6.4).

La contracción líquida es la reducción del metal líquido que se produce al disminuir el metal su temperatura a partir de la de colado hasta alcanzar la de líquidus.

La contracción de solidificación es una disminución del volumen en el cambio de estado líquido a estado sólido. Esto es común para casi la totalidad de los metales a excepción del bismuto y cadmio ya que en esta fase, estos dos metales sufren una expansión de su volumen de modo similar a lo que ocurre con el agua.

La contracción sólida es la disminución de volumen que ocurre al contraerse el metal ya solidificado hasta alcanzar la temperatura ambiente. Estos tres tipos de contracción se los puede expresar en porcentaje de volumen [11].

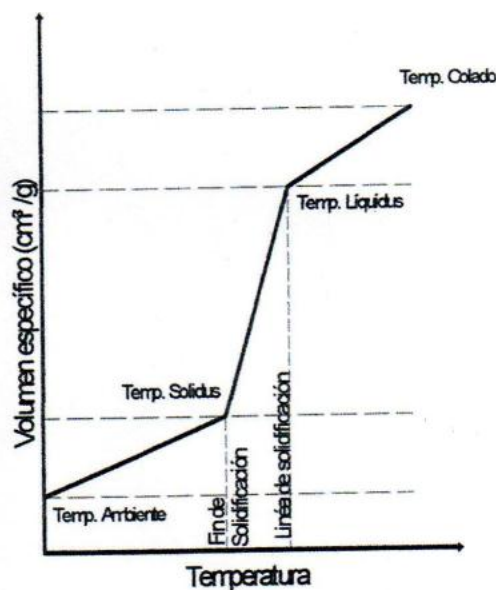


Figura 6.4 Contracción del metal durante su solidificación y enfriamiento
Fuente: REED-HILL, Principios de Metalurgia Física

Resulta fácil comprender entonces que los coeficientes de contracción volumétrica presentados por los metales y aleaciones son diferentes. Para el caso específico de la fundición gris y otras fundiciones presentamos a continuación la siguiente Tabla 6.2:

Tabla 6.2 Contracción lineal de algunas fundiciones

| Tipo Fundición Gris | % de Contracción lineal |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Fundición gris común | 1 |
| Fundición de alta resistencia | 1,3 a 1,4 |
| Fundición Blanca | 1,6 |
| Fundición Maleable | 1,2 a 1,3 |
| Fundición nodular | 1,3 a 1,5 |

Fuente: REED-HILL, Principios de Metalurgia Física

6.7.4 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO

Una vez determinado el porcentaje de contracción de la fundición gris, se puede calcular la dimensión del molde para obtener el espejo. En la Tabla 6.3 se calcula en base a las dimensiones finales del espejo, las dimensiones necesarias del molde de madera serán 1% mayor para compensar la contracción que experimentará la colada al interior del molde

Tabla 6.3 Dimensiones del modelo de madera

| Espejo Fundición gris | Dimensiones (cm) | 1% Contracción (cm) | Dimensión molde cm |
|------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Longitud | 48 | 0,48 | 48,48 |
| Ancho | 23 | 0,23 | 23,23 |
| Espesor | 1 | 0,01 | 1.01 |

(Fuente: Autor)

Ya tenemos determinadas las dimensiones del molde de madera, y en la Figura 6.5 podemos apreciarlas mejor.

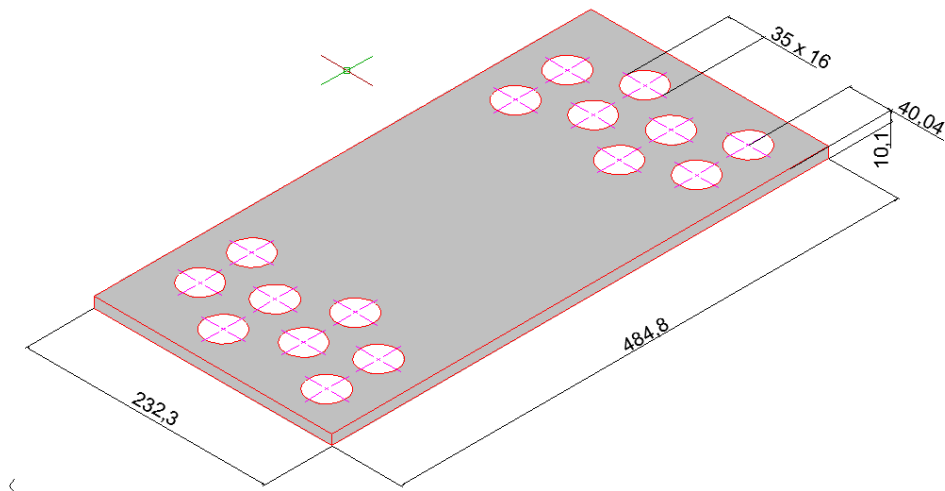


Figura 6.5 Dimensiones del modelo de madera. Medidas en mm
(Fuente: Autor)

A continuación se procede a la construcción del modelo.

En la fundición a la persona encargada en elaborar el molde se la conoce como modelista y tiene la misión de construir el modelo considerando todos los detalles que van a tener las piezas fundidas. En la Figura 6.6 observamos el molde de madera. El acabado del molde debe ser extremadamente liso para que la arena no se adhiera al molde produciendo rugosidad en la superficie de la pieza fundida, se recomienda tener extremo cuidado en este aspecto y de ser necesario se puede utilizar masilla, barnices o pinturas para alcanzar el óptimo acabado del molde. Figura 6.6 nos muestra el molde de madera terminado.

La perfección de las piezas fundidas depende de varios factores, pero fundamentalmente de la configuración y precisión con que se elaboran los modelos, ya que además tienen que considerar en su geometría ángulos que permitan su extracción fácil y segura de la arena para no estropear el moldeado. Dado que el espesor del espejo a fundir es de 1 cm se considera necesario y suficiente un ángulo de $0,5^\circ$ en la configuración del modelo para su extracción segura de la arena.

Si se moldea con un modelo mal preparado salen siempre piezas imperfectas. Si el molde se rompe al extraer el modelo, aparte de que el retoque del molde queda imperfecto el retoque da lugar a que se tapen los poros de la arena.



Figura 6.6 Modelo de madera para la obtención del espejo
(Fuente: Autor)

6.7.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

En el procedimiento de fundición de metales ferrosos es fundamental para tener piezas sanas y de buena calidad controlar la forma como el metal ingresa a los moldes, ya que el proceso de llenado del molde por gravedad involucra altas velocidades del flujo y la mejor forma de controlarlo es mediante un sistema de alimentación bien diseñado. En lo referente al diseño de Sistemas de Alimentación de piezas fundidas, no existe mayor información, pero de la poca información disponible se tomará varias recomendaciones generales para obtener una eficiente alimentación del molde [14, 15, 16, 17]:

. El sistema de alimentación debe contener suficiente volumen de metal fundido para satisfacer la demanda y distribuir de igual forma el metal fundido al interior de la moldura de la pieza a fundirse.

- . Evitar cambios bruscos en la dirección del flujo y en las secciones del sistema de alimentación.
- . El diseño del sistema de alimentación debe provocar la solidificación direccional.
- . Utilizar sistemas presurizados.
- . Emplear bebederos con estrechamiento en la base.
- . Llenar la cavidad del molde por debajo.
- . Asegurar un llenado suave del molde, sin impactos ni remolinos, para evitar el desmoronamiento del material del molde.
- . Atrapar las inclusiones no metálicas que se encuentren en el metal líquido.
- . Ayudar a evacuar aire y gases que se crean al tomar contacto el metal fundido con el material del molde.

Si no se toma en cuenta algunas de estas recomendaciones se tiende a producir algunos defectos en las piezas fundidas, principalmente cuando no se llena completamente el sistema de alimentación, así por ejemplo: sí el estrechamiento del bebedero se lo realiza con un cambio brusco de la sección transversal, probablemente se generará turbulencia. Además, es necesario tomar en cuenta ciertas sugerencias [16] como son: A) para realizar el colado, la altura entre la cuchara y el molde debe ser la más corta posible. El uso de la taza o bacía de colada es recomendable. B) La posición de los canales de alimentación deben ser proyectados para evitar cualquier falta de líquido dentro de la cavidad del molde, por lo que es necesario el llenado de la moldura desde abajo. C) El metal fundido

debería mantener contacto con el molde, principalmente cuando la velocidad del flujo es alta, evitando las zonas de baja presión y la formación de burbujas de aire [16].

6.7.5.1 Partes de un Sistema de Alimentación

Un sistema de alimentación, como el que se muestra en la Figura 6.7, consta de las siguientes partes:

- a) Embudo o bacía de colada.
- b) Canal vertical o bebedero.
- c) Talón de caída.
- d) Canal de distribución.
- e) Canales de alimentación.

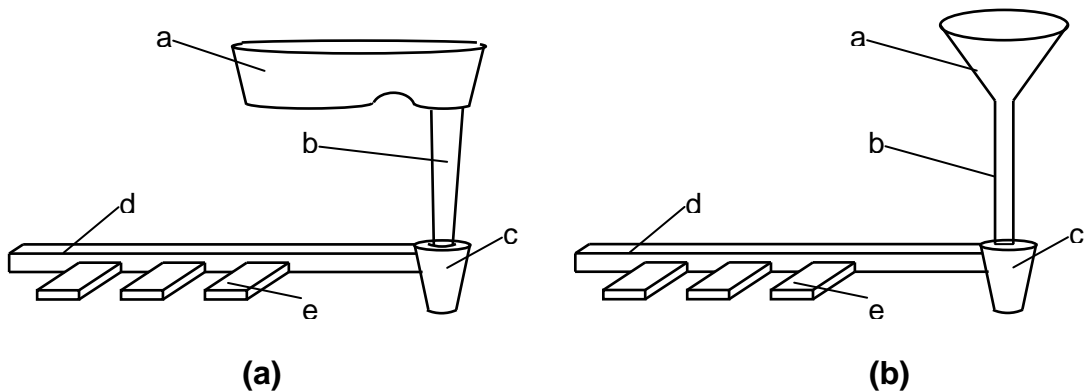


Figura 6.7 Partes de un sistema de alimentación a) con tasa de colada, b) con embudo de colada

(Fuente: Autor)

a) Embudo de colada

Tienen la función de recibir el chorro de metal fundido que se vierte de la cuchara, por lo cual es necesario que este se encuentre lleno de metal líquido durante el colado, esto para evitar que ingrese al interior del molde aire y escoria que producirían desperfectos en la pieza fundida.

b) Bebedero

Es aquel por donde baja la corriente de metal líquido, este canal debe ser más angosto en su parte inferior con el fin de crear la presión metalostática positiva en el sistema de alimentación [14]. El diámetro del canal vertical si es cilíndrico puede estar entre 15 y 25 mm, o rectangular, de espesor entre 6 y 10 mm, dependiendo del tamaño de la pieza [18].

c) Talón de Caída

Está ubicado bajo el bebedero o canal vertical, su función es permitir la expulsión de aire que ingresa al inicio del colado y además ayuda a proveer en forma continua de metal fundido al canal de distribución y por ende a los canales alimentadores.

d) Canal de Distribución

Es aquel que permite conducir el metal líquido a los distintos puntos donde se encuentran los canales de alimentación que llenarán la cavidad del molde, además tienen la misión de retener la espuma de óxido. La sección transversal del canal de distribución se lo debe hacer en forma trapezoidal del mismo ancho que alto [17, 18].

e) Canales de alimentación

Estos canales suministran el metal fundido a la cavidad del molde, se encuentran situados en los puntos de más profundidad y menos espesor de la pieza [18], además la sección de los alimentadores deben ayudar a que la temperatura del metal fundido no descienda demasiado en el trayecto del canal de distribución a la moldura [17]. La sección de los canales de alimentación puede ser rectangular.

6.7.5.2 Relación de secciones en un sistema de alimentación

En el sistema presurizado se recomienda la relación continua de las áreas de las diferentes partes, desde el bebedero hasta los canales de alimentación de la pieza. En la Figura 6.8 se puede diagramar dos líneas convergentes de izquierda a derecha, divididas verticalmente en secciones que representan las distintas partes del sistema de alimentación.

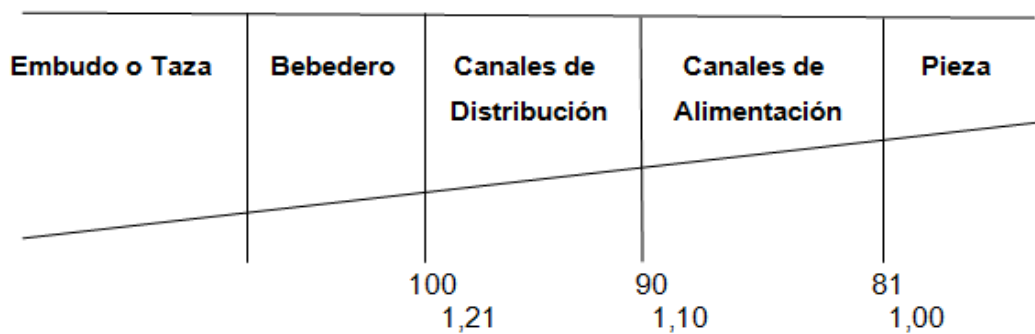


Figura 6.8 Relación continua de las secciones del sistema de alimentación presurizado

Fuente: Apuntes de fundición [19]

Partiendo desde la pieza a fundir, al extremo derecho del diagrama y una vez calculada la sección de los canales de alimentación, se va aumentando las secciones hacia la izquierda de manera que el crecimiento relativo sea sucesivamente de un 10% cada vez.

6.7.5.3 Métodos para abordar el dimensionamiento del sistema de alimentación

En general, se puede aplicar dos métodos para resolver el problema de un correcto diseño del sistema de alimentación de piezas.

1.- Partiendo desde el bebedero, este método se utiliza para producciones estandarizadas, agrupando las piezas según su peso y normalizando los bebederos. Los demás elementos se van reduciendo de sección si se

trata de proyectar el sistema presurizado o aumentando las secciones si el caso es de sistemas despresurizados.

2. Partiendo de los canales de alimentación, este método se prefiere para colar piezas de producción individual. En este método se calculan las secciones de alimentación y luego se dimensiona el canal de distribución y el bebedero.

Analizaremos el caso número 2 ya que es el que encaja en nuestro estudio para la obtención del espejo para la cámara de combustión del horno Magnum HPT 1005G fabricado por INOX.

2. Partiendo de la sección del canal de distribución

La sección total del canal de alimentación para llenar un molde metálico se lo puede obtener a partir de la Ecuación de Continuidad, la cual expresa que el volumen de líquido fluyendo a través de un canal lleno es el mismo en todos los puntos del canal [4]. Esta ley puede expresarse matemáticamente por la fórmula:

$$Q = A \times U \quad (6.1)$$

Donde,

Q = flujo volumétrico del metal fundido (m³/s)

A = área en punto dado del sistema de alimentación (m²)

U = velocidad del metal fluyendo en ese punto (m/s)

La aplicación práctica de la ecuación de continuidad es que puede ser usada para representar la cantidad de metal fundido fluyendo a lo largo del sistema de alimentación mientras este permanezca lleno. De este modo la cantidad de flujo será la misma en todos los puntos del sistema de alimentación tal que:

$$Q = U_1 \times A_1 = U_2 \times A_2$$

$$A_2 = \frac{U_1 \times A_1}{U_2}, \text{ Si } A_1 = \frac{Q_1}{U_1}$$

$$\text{Entonces, } A_2 = \frac{Q_1}{U_2}$$

$$\text{Como } Q = \frac{V}{t} \text{ y } V = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

V = volumen (m³)

t = tiempo de colado (s)

m = masa de la pieza (kg.)

ρ = densidad del metal líquido (kg/m³)

Así, la sección transversal total del canal o canales de alimentación lo podemos encontrar mediante la siguiente fórmula:

$$A_2 = \frac{m}{\rho \times t \times U} = S_{alim} \quad (6.2)$$

Donde:

S_{alim} = Sección transversal total de los canales de entrada (m²)

m = Masa del metal que debe llenar la moldura (Kg)

U = Velocidad de llenado (m/s)

t = Tiempo de colado (s)

Mediante la Ecuación de Bernoulli podemos deducir la velocidad de entrada del metal a la moldura, partiendo de una velocidad inicial de cero, como lo ilustra la Figura 6.9. En su forma más simple, esta ley es basada en la fórmula:

$$U = \sqrt{2g \times H} \quad (6.3)$$

Donde:

U = velocidad del metal en el punto 2 (m/s)

g = aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2)

H = altura de presión o altura estática de cálculo (m)

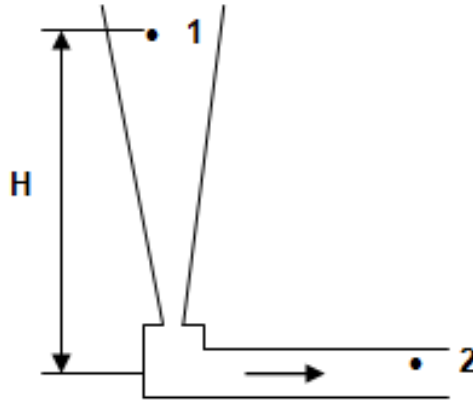


Figura 6.9 Punto 1 y 2 en el sistema de alimentación para aplicar la Ecuación de Bernoulli

Entonces la ecuación (6.2) toma la siguiente forma y es la que nos permitirá calcular la sección total del canal de alimentación:

$$S_{alim} = \frac{m}{\rho \times t \times \sqrt{2g \times H}} \quad (6.4)$$

Note que esta ecuación es aplicable siempre que se garantice que el bebedero está lleno durante el colado. En la ecuación presentada (6.4) no conocemos los valores de H y t . La altura de presión del metal durante el llenado al suministrar la masa fundida, según Titov [14], podemos calcular de la siguiente forma:

a) Para colada a sifón:

$$H = H' - \frac{c}{2} \quad (6.5)$$

Donde:

H' = altura del canal vertical desde el lugar de suministro de la masa fundida del molde (cm).

c = altura de la moldura (cm)

b) Para colada por el plano de separación del molde:

$$H = h - \frac{c}{8} \quad (6.6)$$

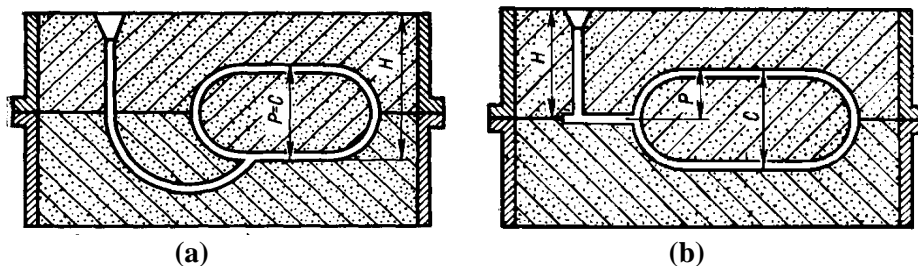


Figura 6.10 Para el cálculo de la altura de presión del metal durante el llenado, (a) colada a sifón, (b) colada por el plano de separación del molde

Fuente: M. TIRYAKIOGLU, J.T. BERRY: The Use of Riser Recommendations and Criteria Functions for the Efficient Feeding of Aluminum Castings [15]

En lo referente al tiempo de colado para fundiciones de hierro se ha considerado necesario hacer uso en nuestro estudio de una serie de formulas presentadas por Titov [1] para calcular el tiempo de colado para fundiciones de hierro.

La literatura no presenta datos sobre los valores de la viscosidad cinemática de las aleaciones, pero el uso de los valores de los metales puros es una aproximación razonable. La densidad y la viscosidad de los metales líquidos son funciones de temperatura. En la Tabla 6.4 tenemos las propiedades físicas del hierro líquido.

Según Smithells [6], la variación de la viscosidad a distintas temperaturas para los metales líquidos lo podemos calcular a partir de:

$$\mu = \mu_0 \exp^{(E/RT)} \quad (6.7)$$

Donde:

μ = es la viscosidad a la temperatura de interés.

μ_0 = es la viscosidad estándar del metal líquido a la temperatura de fusión.

E= es la energía de activación de la viscosidad.

R= es la constante universal de los gases (8.314 J/mol.°K).

T = es la temperatura de interés a la que se desea calcular la viscosidad.

La variación de la densidad ρ de metales líquidos para diferentes rangos de temperatura, según Smithells [6], puede ser obtenida a partir de:

$$\rho = \rho_0 + (T - T_0)(d\rho/dt) \quad (6.8)$$

Donde:

ρ = es la densidad a la temperatura de interés (g/cm³).

ρ_0 = es la densidad del metal líquido a la temperatura de fusión (g/cm³).

T = es la temperatura de interés (°C).

T₀= es la temperatura de fusión del metal líquido (°C).

$d\rho/dt$ = es el coeficiente de temperatura de la densidad (mg/cm³°K).

Tabla 6.4 Propiedades físicas del hierro líquido

| Temperatura de fusión | Densidad | | Tensión Superficial | | Viscosidad | E (KJ/mol) |
|-----------------------|------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|
| | T° (°C) | ρ_0 (g/cm ³) | $d\rho/dt$ (mg/cm ³ °K) | σ_0 (mN/m) | $d\sigma/dt$ (mN/m°K) | |
| 1536 | 7.015 | -0.883 | 1872 | -0.49 | 0.3699 | 41.4 |

Fuente: SMITHELLS: Metals Reference Book [19]

El flujo de metal al pasar a través del sistema de alimentación está sujeto a fuerzas de fricción, las cuales provocan disminución de la velocidad del metal fundido. Las pérdidas por fricción en el sistema de alimentación dependen de ciertas características del sistema, así tenemos [17]:

- Superficies rugosas del sistema de alimentación.
- Cambios en la dirección del flujo de metal.
- Cambios súbitos o graduales en la sección transversal de los canales y bebederos.
- Múltiples canales de alimentación, etc.

Debemos acotar que la ecuación (6.4) no considera pérdidas de presión en el sistema de alimentación, las cuales pueden ser importantes, por lo que se considerará un factor total de pérdidas K_T que contemple todos los factores que pueden causar pérdidas de presión dentro del sistema de alimentación.

Cuando el metal fluye dentro del sistema de alimentación existen fuerzas de rozamiento con las paredes del bebedero, con los canales de distribución y de alimentación. Esto causa pérdidas de presión y por lo tanto deberá aplicarse un coeficiente de pérdidas k_1 .

Adicionalmente, dentro del molde ocurren cambios de sección, entradas y salidas de flujo metálico, lo cual también es una causa de pérdida de presión metalostática. Estas pérdidas pueden considerarse aplicando un coeficiente de pérdidas k_2 .

Finalmente, la presión de los gases producidos por reacciones químicas de la aleación e interacciones del metal con el molde, pueden también ser causa de resistencia al flujo metálico. Este coeficiente es prácticamente imposible de cuantificar debido al sin número de variables involucradas,

sin embargo deben ser tomadas en cuenta para el diseño del sistema de alimentación como un factor de pérdidas por resistencia al flujo k_3 , para el cual podemos asumir un valor empírico entre 0.10 y 0.20 [17].

En lo que se refiere al factor de pérdidas por fricción, existen muy pocos trabajos del factor de fricción en sistemas metálicos, pero lo podemos calcular siguiendo los conceptos tradicionales de la mecánica de fluidos. El número de Reynolds nos servirá para caracterizar el tipo de flujo que se produce en el sistema de alimentación. Por los datos experimentales obtenidos y por recomendaciones de autores como J. Campbell o R. Gallo [17], podemos afirmar que dentro del sistema de alimentación prevalecen situaciones de flujo turbulento, específicamente, al encontrarse Reynolds entre 5×10^3 y 10^8 , podemos hablar de que el flujo del metal líquido se encuentra en la zona de transición [21], por lo que el factor de fricción k_1 lo podemos tomar igual a 0.04 o lo podemos calcular usando la siguiente expresión:

$$K_1 = \frac{0.25}{\{\log[e/(3.7D_H) + 5.74/Re^{0.5}]\}^2} \quad (6.9)$$

Donde:

e = rugosidad absoluta de las paredes de los conductos del sistema de alimentación (2.5×10^{-4} m).

D = diámetro hidráulico del canal de alimentación (m).

Re = Número de Reynolds = vD/ν . Donde, v es la velocidad promedio del metal líquido dentro de; canal de alimentación (m/s). ν es la viscosidad cinemática del metal (5.53×10^{-8} m²/s).

La velocidad promedio del metal líquido dentro del canal de alimentación, lo podemos encontrar por la siguiente expresión [17]:

$$v = \frac{(W_P + W_{SA})}{t.A.\delta} \quad (6.10)$$

Donde:

W_P = peso de la pieza (kg).

W_{SA} = peso de los canales del sistema de alimentación (kg).

t = tiempo de llenado (s).

A = área de la sección del canal de alimentación (m^2).

δ = densidad del metal líquido (7300 kg/m^3).

El factor de pérdidas K_2 , debido a los cambios de sección en el sistema de alimentación se pueden obtener de la literatura y dependen de la geometría de la entrada y salida de los canales. Asumiendo que en los moldes no existirán aristas vivas en los cambios de sección, la literatura muestra que el coeficiente de pérdidas para las entradas está entre 0.04 y 0.05 [22]. En consecuencia, para un sistema de alimentación simple, considerando 3 entradas, el factor K_2 de pérdidas totales por cambios de dirección del flujo puede tomarse aproximadamente igual a 0.72.

De esta manera, el factor K_T agrupará los tres factores de pérdidas antes mencionados de la siguiente forma:

$$K_T = K_1 + K_2 + K_3 \quad (6.11)$$

La pérdida de presión metalostática en el sistema de alimentación se puede calcular a partir de:

$$H_p = \frac{v^2}{2g} K_T \quad (6.12)$$

Por lo tanto, la ecuación (6.4) corregida con los factores de pérdida se puede escribir de la siguiente manera:

$$S_{a\lim} = \frac{m}{\rho t \sqrt{\frac{2gH}{K_T}}} \quad (6.13)$$

La densidad de la fundición gris oscila entre 6.95-7.35 g/cm³. Se emplea el más crítico (alto) para los cálculos respectivos 7.35 g/cm³. El volumen del espejo es 981,98cm³. Con esto se calcula la masa del espejo.

$$\delta = m/V$$

$$m = \delta \cdot V$$

$$m = (7.35 \text{ g/cm}^3)(981,98)\text{cm}^3$$

$$m = 7217.6 \text{ g.}$$

$$m = 7.3 \text{ Kg} = 16,1 \text{ lb.}$$

Una vez calculada la masa de la pieza a fundir (espejo). Calculamos con la ayuda de la ecuación 6.13 presentada anteriormente, la sección del canal de alimentación necesaria para abastecer con metal fundido al molde.

Aplicando la ecuación (13) tenemos:

$$S_{a\lim} = \frac{m}{\rho t \sqrt{\frac{2gH}{K_T}}}$$

Reemplazando datos y empleando la altura de presión del metal durante el llenado al suministrar el metal fundido por el plano de separación del

molde $H'' - \frac{c}{8}$.

$$S_{a\lim} = \frac{m}{\rho t \sqrt{\frac{2g(H'' - \frac{c}{8})}{K_T}}}$$

$$K_T = K_1 + K_2 + K_3$$

$$K_1 = 0,04$$

$$K_2 = 0,72$$

$$K_3 = 0,1a0,2$$

$$K_T = 0,04 + 0,72 + 0,15$$

$$K_T = 0,91$$

Para determinar el tiempo de colado, en la Figura 6.11 de velocidades de colado, se encuentra que se requiere un colado rápido para una pieza de 18lb, y el tiempo requerido es de 5 segundos.

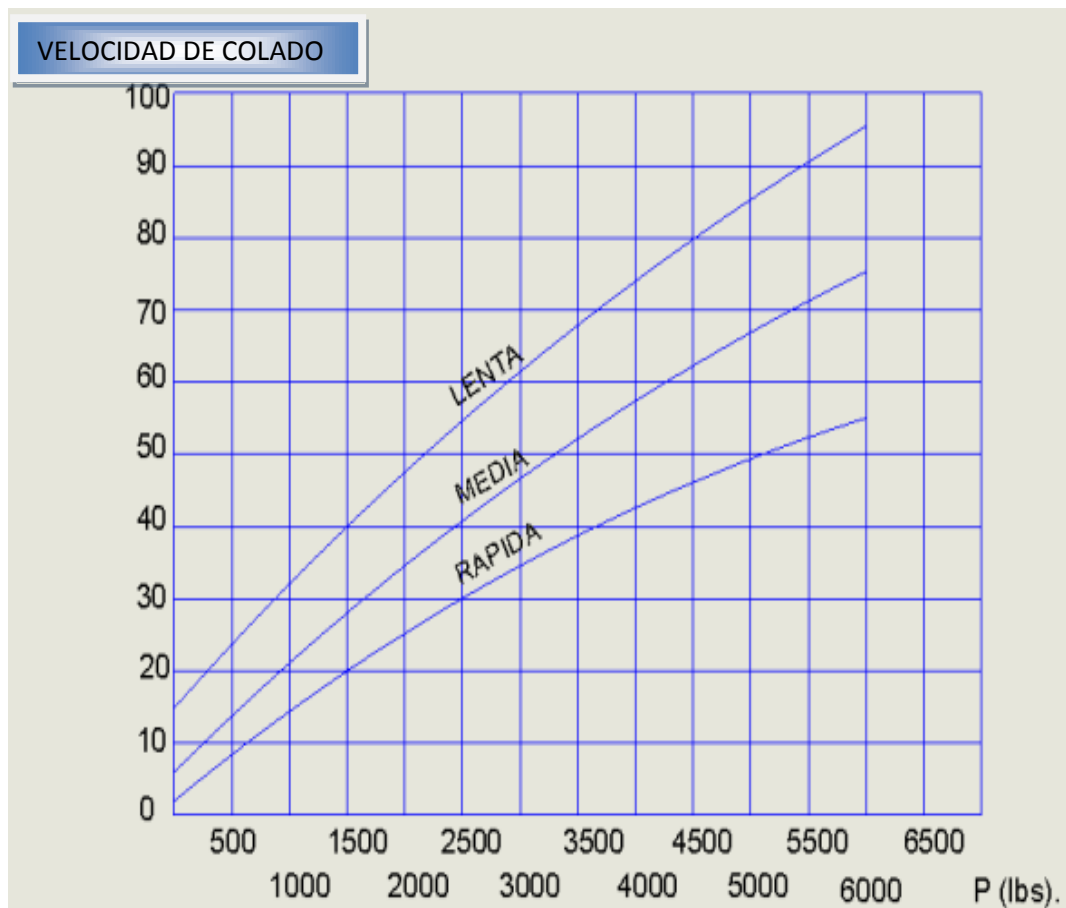


Figura 6.11 Velocidades de colado

Fuente: Apuntes de fundición [19]

$$S_{a\text{lim}} = \frac{7217,6g}{7,35 \frac{g}{cm^3} \times 5s \sqrt{\frac{2 \times 980 \frac{cm}{s^2} \times \left(11,5cm - \frac{7,5}{8}cm\right)}{0,91}}}$$

$$S_{a\text{lim}} = \frac{7217,6g}{36,75 \frac{g \times s}{cm^3} \times \sqrt{\frac{1960 \frac{cm}{s^2} \times 10,56cm}{0,91}}}$$

$$S_{a\text{lim}} = \frac{7217,6g}{36,75 \frac{g \times s}{cm^3} \times \sqrt{22744,62 \frac{cm^2}{s^2}}}$$

$$S_{a\text{lim}} = \frac{7217,6g}{36,75 \frac{g \times s}{cm^3} \times \left(150,81 \frac{cm}{s}\right)}$$

$$S_{a\text{lim}} = \frac{7217,6g}{5542,26 \frac{g}{cm^2}}$$

$$S_{a\text{lim}} = 1,3cm^2$$

Con la sección del canal de alimentación procedemos a encontrar la sección del canal de distribución y la del bebedero , se requiere un sistema de alimentación presurizado por ello nos guiamos en la Figura 6.3 y los resultados los presentamos en la Figura 6. 12.

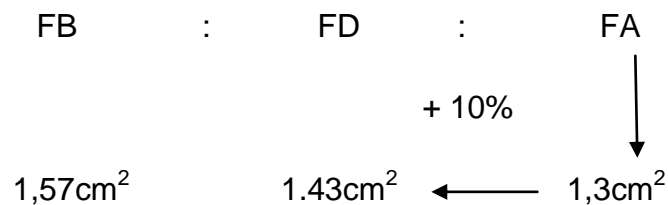


Figura 6.12 Relación de secciones del sistema de alimentación

(Fuente: Autor)

. Bebedero

$$S_{Bebedero} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$1.57cm^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{1.57cm^2 \cdot 4}{\pi}}$$

$$D = 1.41cm$$

. Canal de distribución

$$S_{alimentación} = D \cdot R$$

$$1.43cm^2 = 1.41cm \cdot R$$

$$R = 1.01cm$$

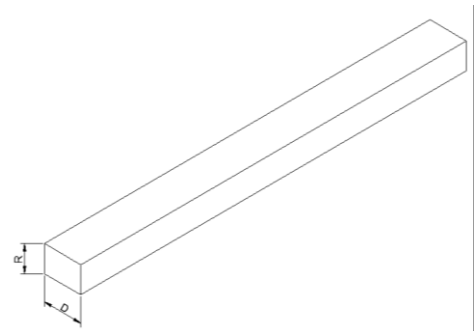
. Talón de caída

$$2D = 2(1.41cm)$$

$$2D = 2.82cm$$

$$2.5R = 2.5(1.01cm)$$

$$2.5R = 2.53cm.$$

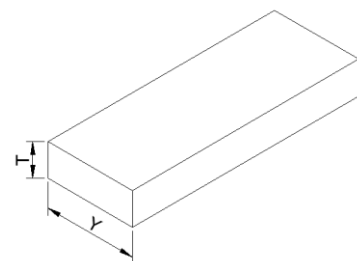


. Canal de alimentación

$$S_{alimentación} = T \cdot Y \quad T = 0.7 \cdot R$$

$$1.33cm^2 = 0.7 \cdot Y \quad T = 0.7(1.01)$$

$$Y = 1.86cm \quad T = 0.7cm$$



Emplearemos dos canales de alimentación con la finalidad de asegurar un completo llenado de la pieza en un tiempo de colado recomendado de 5 segundo. Por ello a los resultados encontrados para abastecer el metal líquido con un solo canal de alimentación tenemos que realizarles un correctivo en la relación de secciones del sistema de alimentación. En la Figura 6.13 se presenta las secciones corregidas.

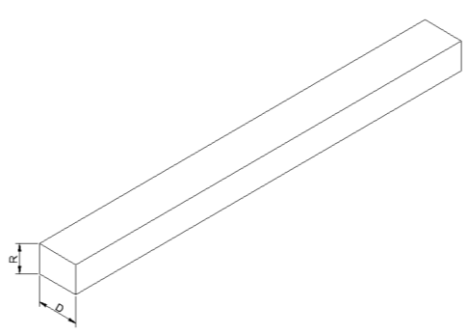


Figura 6.13 Corrección de la relación de secciones del sistema de alimentación
(Fuente: Autor)

. Corrección canal de distribución

D= 1 cm.

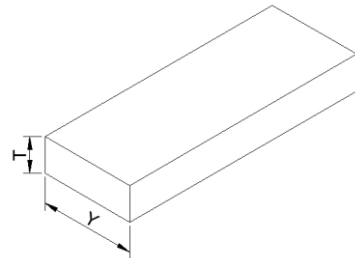
R= 0.715 cm.



. Corrección del canal de alimentación.

T=0.54 cm.

Y= 1.2 cm.



En la Figura 6.14 podemos observar la configuración y medidas del sistema de alimentación requerido para abastecer con metal líquido al molde. En el Anexo 10 podemos observar en detalle el plano del sistema de alimentación a construirse.

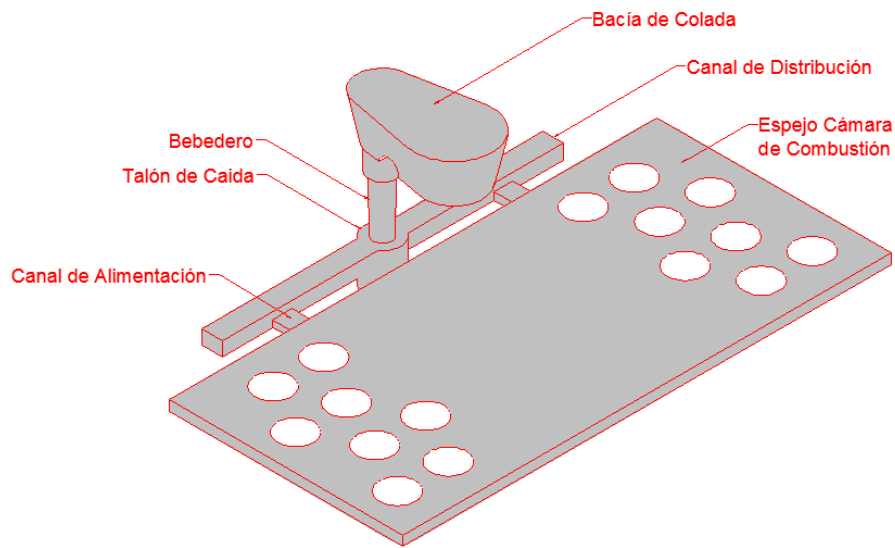


Figura 6.14 Esquema de la configuración del sistema de alimentación y espejo a fundir
(Fuente: Autor)

Con las dimensiones del bebedero, talón de caída, canales de distribución y canales de alimentación se requiere una carga de 40 libras para obtener nuestro espejo con fundición gris.

6.7.6 CÁLCULO DE LA CARGA DEL HORNO DE INDUCCIÓN PARA OBTENER EL ESPEJO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LA FUNDICIÓN

La fabricación del espejo con fundición gris implica la preparación de la materia prima. Típicamente es chatarra, escogemos la chatarra que nos servirá como materia prima base. Basándonos en la composición de las aleaciones de las fundiciones y materiales ferrosos existentes en el mercado, se determina necesario para preparar nuestra aleación las camisas de cilindros de automotores y también cigüeñales.

Con estas aleaciones base, cuyas composiciones se presentan en la Tabla 6.5 procedemos a realizar el cálculo de carga para obtener fundición gris perlítica con 3,2%C y 1,5%Si.

Para efectuar el cálculo de carga se debe tomar muy en cuenta el porcentaje de evaporación que experimentan los componentes de la aleación durante su proceso de fusión. Según Titov [14] el porcentaje de evaporación para el Si y Cu está entre (0.5-1) %, y (0.5-1) % respectivamente, de los cuales se tomaron los valores de 0.5% para el Si y 0.8 para el Cu. En cuanto a los restantes elementos existentes en la aleación, su porcentaje de evaporación se ha considerado de 1.5% y 0,6% correspondientes al Mn y Ni [23].

Note que por el contrario, se considera que al realizar la fundición existe un incremento del 0,754% de C y 0,2% tanto de P y S [23].

Se realiza el cálculo de carga para 100Kg que es la capacidad del horno de inducción del taller de fundición de la ESPOCH y es el que emplearemos para realizar la fundición.

Para la compensación de ferrosilicio se requiere saber que 2,5lb (1134 gramos) contiene 1lb (454 gramos) de silicio. De similar forma el ferromanganeso con un peso de 3lb (1361 gramos) contiene 2lb (907 gramos) de manganeso, esto es fundamental conocer para la carga.

Tabla 6.5 Cálculo de carga para la obtención de espejos de fundición gris

| Fundiciones aleadas | %C | %Si | %Mn | %Cr | %Cu | %Mo | %Ni | %P | %S | Peso(Kg) | Fracción |
|---------------------------------|------|------|-----|------|------|-----|-----|----|-------|----------|----------|
| Camisas de cilindros de motores | 3,25 | 2,2 | 0,6 | 0,5 | 1 | 1 | 0,2 | 0 | 0 | 58 | 0,58 |
| Cigüeñales | 1,5 | 0,95 | 0,7 | 0,45 | 1,75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 | 0,42 |
| | | | | | | | | | TOTAL | 100 | 1 |

Cálculo para 100Kg

| | %C | %Si | %Mn | %Cr | %Cu | %Mo | %Ni | %P | %S |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----|-----|
| Desde las camisas | 1,885 | 1,276 | 0,348 | 0,29 | 0,58 | 0,58 | 0,116 | 0 | 0 |
| Desde los cigüeñales | 0,63 | 0,399 | 0,294 | 0,189 | 0,735 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Resultado | 2,515 | 1,675 | 0,642 | 0,479 | 1,315 | 0,58 | 0,116 | | |
| % de evaporación | | 0,5 | 1,5 | | 0,8 | | 0,6 | | |
| | 2,515 | 1,66 | 0,632 | 0,479 | 1,304 | 0,58 | 0,115 | | |
| Requerido | 3,500 | 2,100 | 0,63 | | | | | 0,1 | 0,2 |
| Faltante | 0,985 | 0,44 | | | | | | 0,1 | 0,2 |

Carga de carbón = 0,985Kg

Ferrosilicio= 1.1kg

(Fuente: Autor)

6.7.7 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Se considera como materia prima para fundición a aquellos metales que son ingresados al horno en el cual se van a fundir. Son todo tipo de piezas de hierro en desuso, "chatarra" como también aquellos desechos de la propia fundición, de hecho esto siempre va a existir ya que una vez realizada la fundición necesitamos separar la pieza fundida del sistema de alimentación,. lo importante es notar que la fundición gris es reciclable.



Figura 6.15 Materia prima para la fundición (Chatarra). Desechos de fundición gris

Fuente: Siderúrgica Tungurahua [24]

Hay que tener un estricto control de limpieza de la materia prima, ya que estarán con oxido, aceites, grasas y contaminantes en sí que pueden entrar en el horno y contaminar la colada y por ende a la pieza a fundir. Además si no se limpia bien la materia prima antes de cargarlas en el horno, en el proceso de fundición se desprenderan gases provenientes de pinturas, lubricantes, recubrimientos o aditivos de plomo, níquel o cromo que pueden ser peligrosos si se respiran. El lugar donde se realiza la fundición debe tener

buena ventilación y para evitar problemas con los gases que se generen en el proceso de fundición use siempre mascarillas.

Por ello se procedió a lavar la materia prima en una lavadora rotatoria de blocks utilizadas en las rectificadoras de motores.

Posteriormente es necesario trozar el material hasta obtenerlo en tamaños relativamente pequeños para que la carga del horno se la realice fácilmente y su fundición se aligere.

6.7.8 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA PARA MOLDEAR

Durante el colado, el metal muy caliente avanza por los canales del molde con movimientos turbulentos que provocan choques contra sus paredes, durante esta etapa es muy fácil que se produzcan erosiones del molde, generación de una gran cantidad de gases y consecuentemente defectos en la pieza fundida.

Después del colado y mientras el metal esté líquido, el metal ejerce una presión sobre todas las paredes del molde. Cuando el metal se ha solidificado, este gravita por su propio peso sobre la pared inferior del molde, e inicia su contracción que dura hasta que la pieza a alcanzado la temperatura ambiente. Por lo tanto, el diseño del sistema de alimentación debe necesariamente ir acompañado por las adecuadas propiedades tecnológicas de las mezclas de moldeo que dependen de las propiedades de las arenas de moldeo que se emplean en su composición, garantizando de esta forma un óptimo proceso de fundición para la pieza.

Entonces, para obtener buenos trabajos en fundición, necesariamente se requiere preparar buenas arenas, y estas han de ser lo suficientemente

plásticas para copiar las huellas de los modelos, ser muy porosas a fin de que su permeabilidad facilite el paso de los gases. Etc.

Las arenas de moldeo están compuestas principalmente de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), cal (CaO) y magnesia (MgO) en proporciones variables.

Como el propósito es llegar a obtener espejos de buena calidad, entonces es fundamental conseguir que los moldes presenten propiedades y características adecuadas. Por ello es preciso entonces controlar las diversas propiedades de la arena pues influye directamente por medio de sus propiedades térmicas en la capacidad y el comportamiento presentado por el metal al fluir.

Las propiedades que fundamentalmente controlaremos de la arena son: Módulo de finura, humedad, permeabilidad, % de arcilla, dureza, Ph, resistencia al corte y a la compresión. Cuantitativamente estas propiedades presentadas por la arena que emplearemos se presentan en la siguiente Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Propiedades de la arena utilizada para la elaboración de los moldes

| Módulo Finura | Humedad | Permeabilidad | % de arcilla | Dureza | Ph | Resistencia al corte | Resistencia compresión |
|----------------------|----------------|---------------------------------|---------------------|---------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------|
| 70(AFS) | 7% | 57,5 $\text{cm}^4/\text{g min}$ | 20% | 73 | 8.6 | 42 g/cm^2 | 447 g/cm^2 |

(Fuente: Autor)

En la Figura 6.16 podemos observar la máquina en la cual se realizó la mezcla para preparar la arena de moldeo.



Figura 6.16 Máquina para realizar la mezcla de la arena

(Fuente: Autor)

6.7.9 FABRICACIÓN DEL MOLDE CON MODELO

Dentro del área de fundición, el encargado de realizar el molde de arena se llama moldeador, tiene una tarea muy compleja, el más insignificante descuido dará lugar a una pieza con defectos.

Después de preparado un molde y este está listo para ser colado, tenemos el temor de que pueda producirse un defecto y esto nos tiene intranquilo hasta que se efectúa el desmoldeo y a menudo recibimos la sorpresa de encontrar una falta donde menos sospechamos. Un buen moldeador debe estar muy atento en el trabajo para evitar piezas malas y cuando salga algún defecto debe estudiar bien sus causas para que no se repita.

En las Figuras 6.17 se observa paso a paso la construcción del molde.



Figura 6.17 Construcción del molde. a) Colocación del molde en la caja. Ponemos la arena de contacto b) Completamos con arena la caja c) Compactación de la arena d) Extracción de exceso. Alisado de arena

(Fuente: Autor)

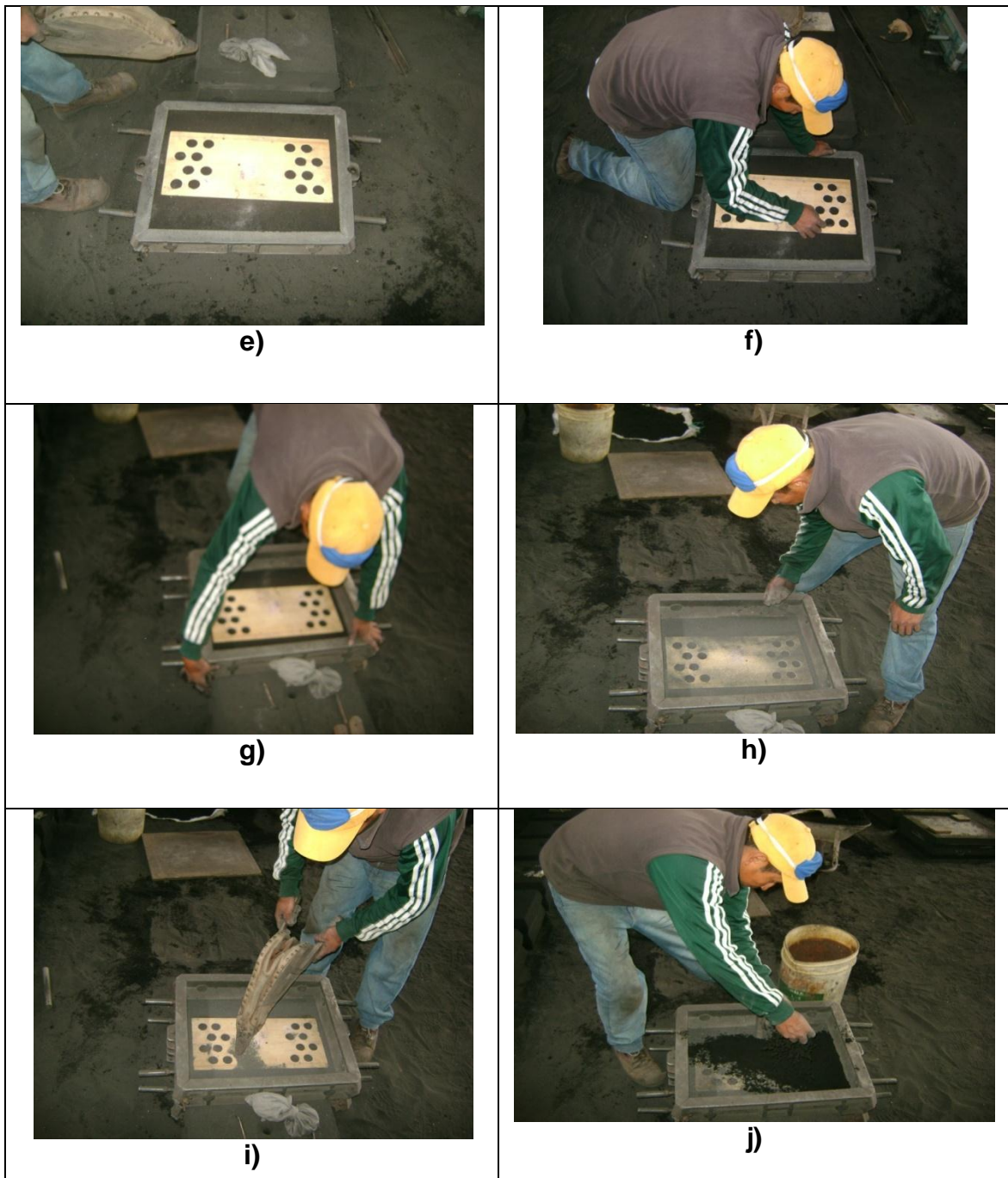


Figura 6.17 e) Volteo de la caja inferior. f) Retoque de configuración de la arena. g) Colocación de la caja superior h) Aspergeo de sílice en la arena. Caja inferior. i) Soplado del exceso de sílice ubicado en el área del molde de madera j) Ubicación del bebedero, canales de distribución y alimentación.
Colocación de arena

(Fuente: Autor)

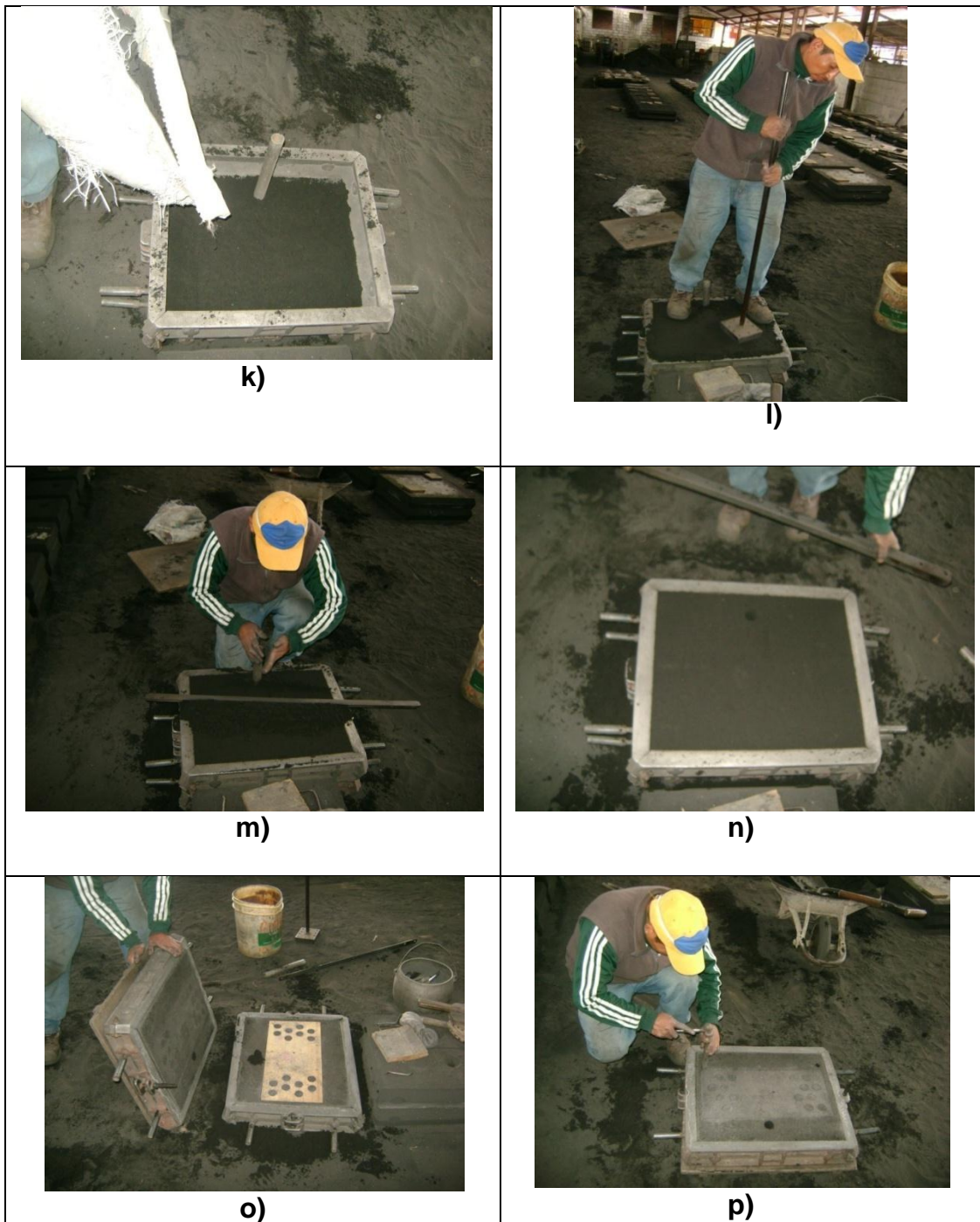


Figura 6.17 k) Llenamos la caja superior de arena l) Compactación de la arena. Caja superior m) Extracción del bebedero n) Retirar el exceso de arena. Alisado de la arena caja superior o) Separar la caja superior p) Moldeamos los rebosaderos o registros de colado. Caja inferior

(Fuente: Autor)

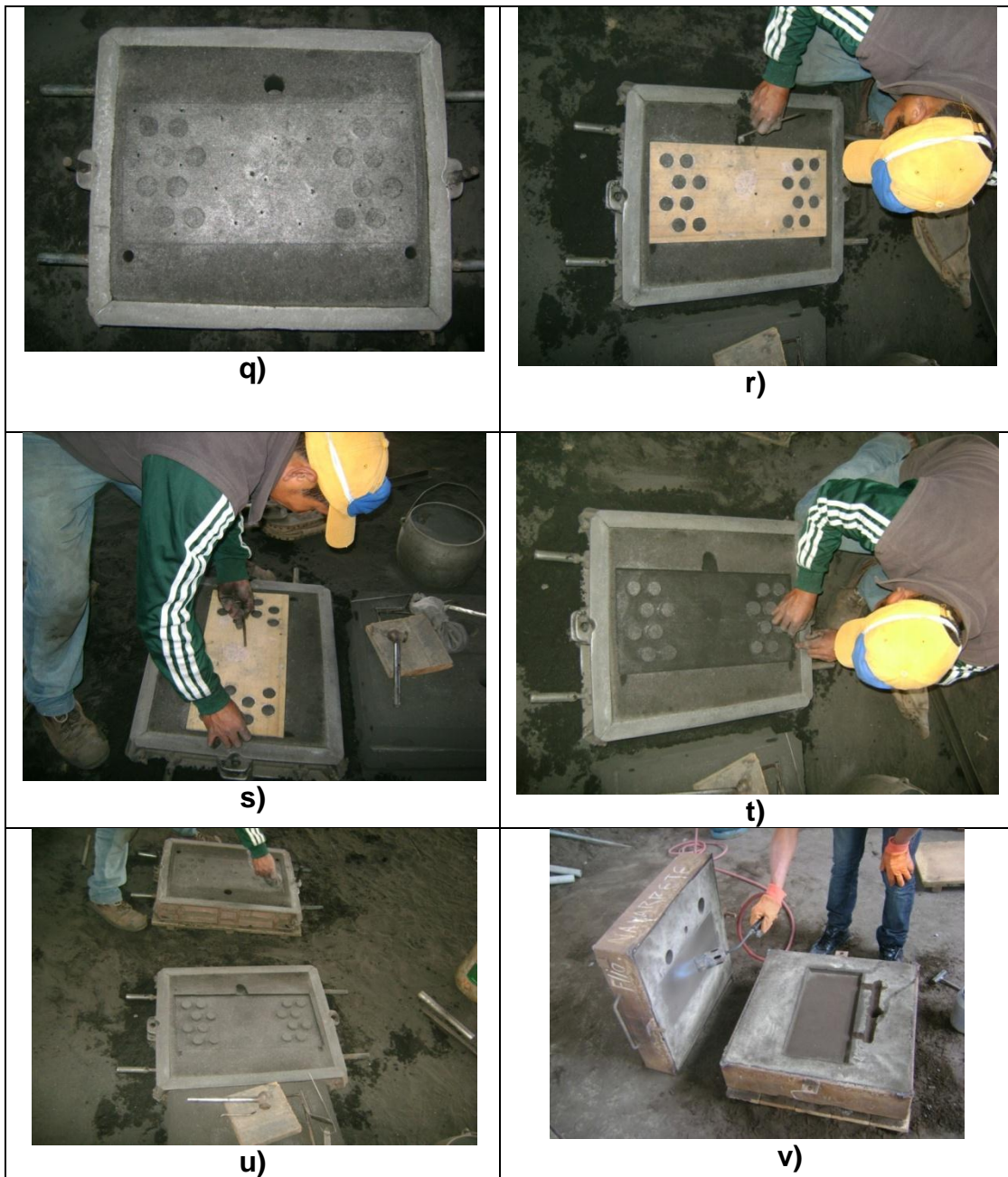


Figura 6.17 q) Moldeamos los rebosaderos o registros de colado. Caja superior. r) Extracción del talón de caída. Retoque de arena. s) Extracción del modelo de madera. t) Retoque de la arena en la configuración del espejo. u) Aspergeo de sílice en la arena. Caja superior e inferior. v) Calentamiento de las cajas

(Fuente: Autor)

6.7.10 FUNDICIÓN DE LA CARGA EN EL HORNO

El proceso de fundición se inicia con la carga al horno, la carga debe estar limpia y trozada en pedazos pequeños (Figura 6.18). Una vez que el material llega a fundirse en el horno, se procede a separar la escoria del metal (Figura 6.19)



Figura 6.18 Carga y fusión de la chatarra
(Fuente: Autor)



Figura 6.19 Extracción de la escoria. Homogenización de la colada
(Fuente: Autor)

6.7.11 CALENTAMIENTO DE LA CUCHARA DE COLADO

Para el colado de los moldes se utilizan las denominadas cucharas de colado. La cuchara de colado es un recipiente de acero dulce revestido interiormente de material refractario. Su capacidad debe ser mayor que la del horno de fundición. Su tamaño, su forma y su manipulación influyen en la calidad de la fundición (Figura 6.20 a).

Resulta ideal el precalentamiento de las cucharas antes de empezar a verter el metal fundido del horno de fundición en la cuchara (Figura 6.20 b), ya que se reducirá el choque térmico por concepto de humedad o por diferencia de temperatura. Además evitará la pérdida súbita de la temperatura del metal líquido.

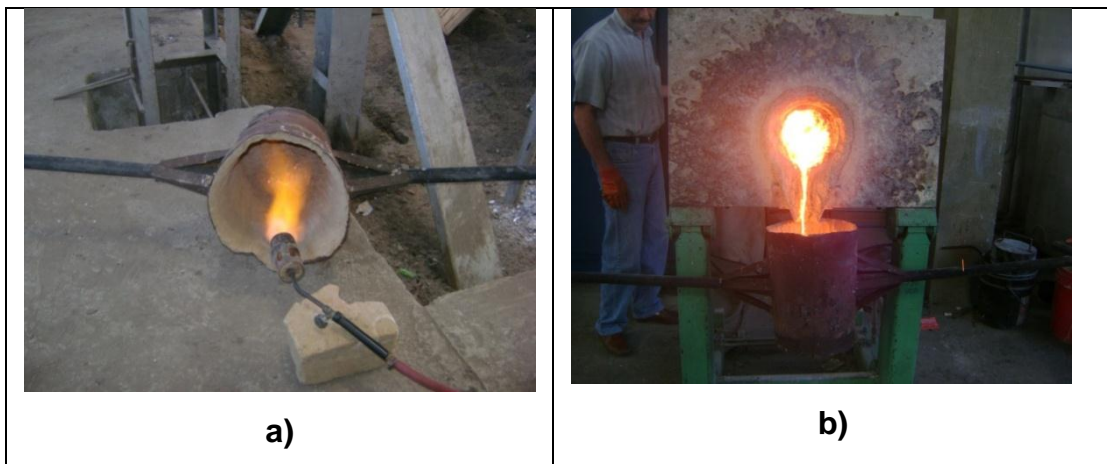


Figura 6.20 a) Calentamiento de la cuchara de colado. b) Vertido de colada desde el horno de fundición a la cuchara de colado

(Fuente: Autor)

Como el metal fundido en el horno al vaciar en la cuchara y colar en el molde pierde temperatura, se debe considerar un sobrecalentamiento de 150°C a partir de la línea de líquidus de acuerdo al diagrama de equilibrio Fe-C mostrado en la siguiente Figura 6.21.

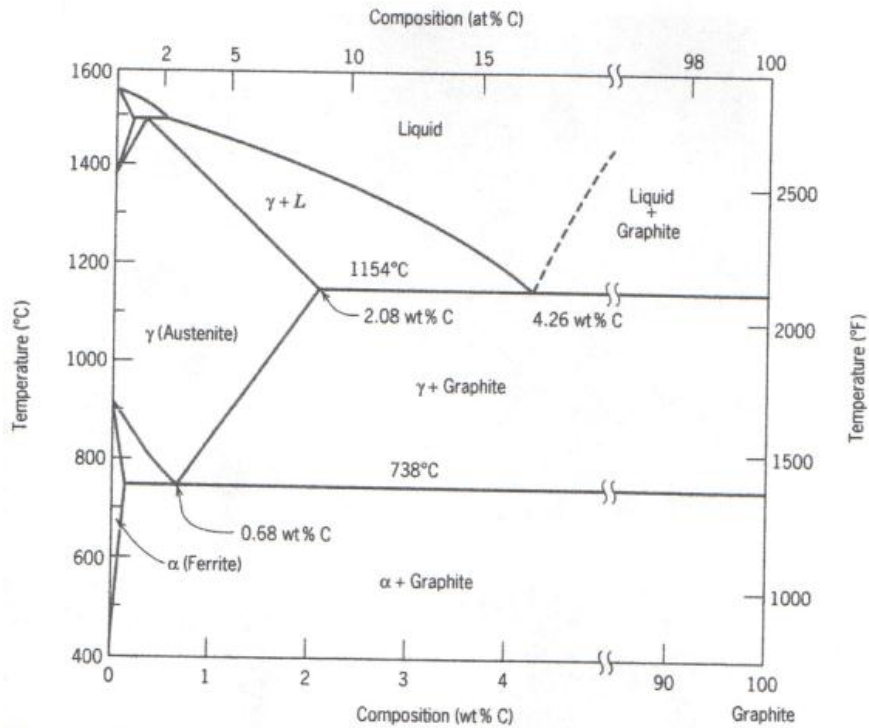


Figura 6.21 Ampliación del diagrama de equilibrio Fe-C, en la zona de interés

Fuente: WILLIAM D. CALLISTER JR. Material Science and Engineering [5]

Para asegurarnos que la colada alcance la temperatura deseada, utilizamos un pirómetro óptico que nos dará la lectura de la temperatura a la que se encuentra la colada ya que la temperatura a la que se mantiene el horno no es igual a la que se encuentra la colada por que la transferencia de calor al interior del horno no es del 100%.

6.7.12 CALENTAMIENTO DE MOLDE

Con el mismo propósito que calentamos la cuchara de colado también lo hacemos con las cajas moldeadas. Calentamos las caras de arena de las cajas que van a tomar contacto con el metal líquido al realizar el proceso de

colado e evitar el choque térmico brusco (por diferencia de temperatura) molde-colada y con ello la pérdida de temperatura de la colada. Si no se realiza este calentamiento del molde la colada perderá temperatura y esto influye en la fluidez del material, es decir en su capacidad de fluir y llenar toda la cavidad del molde. Además, si se produce el choque térmico se generarán gases al interior del molde que afectaran la calidad de la pieza fundida.



Figura 6.22 Calentamiento de las caras de la caja que tomaran contacto con la colada
(Fuente: Autor)

6.7.13 COLADO DEL METAL

El éxito de la operación del colado depende: por una parte de ciertas cualidades de la misma fundición como por ejemplo composición y temperatura que influyen en su capacidad de fluir. Y por otra parte también depende del diseño-construcción del molde, de las propiedades y naturaleza de la arena y de la técnica empleada al colar.

Al llevar a cabo el colado del metal, las paredes de los canales del molde por donde avanza el flujo de metal, extraen calor del metal caliente. Esta transferencia de calor que se produce en el molde disminuye la temperatura del metal líquido, por lo tanto si la arena no está lo suficientemente seca y caliente se puede obstruir el flujo de metal cuando el frente de solidificación avance rápidamente. Entonces, la pérdida de calor en un metal líquido disminuye su fluidez, esto se torna muy crítico cuando las temperaturas de sobrecalentamiento son demasiadas bajas, pues se puede establecer que las condiciones de flujo del metal líquido serán fuertemente afectadas por la densidad de la aleación y por su viscosidad que dependen de la temperatura.

Luego que el metal sea ha fundido en el horno, este se vierte en la cuchara de colado, en donde se extrae manualmente la escoria del metal, posteriormente se procede al colado de las cajas, la cuchara de colada debe estar la más cerca a la caja y el colado se realiza lo más rápido posible (5 segundos)

El vaciado del metal fundido desde la cuchara al molde es uno de los pasos críticos en el colado de los metales, ya que el comportamiento de la colada líquida, su solidificación y enfriamiento que se produzcan al interior del molde dependerá de muchos factores, entre ellos la técnica con la cual se efectuó el colado, y son estos procedimientos los que en fundición determinan si la forma de la pieza fundida será apropiada y libre de defectos.

En la Figura 6.23 presentada a continuación se puede observar el proceso de colado de los moldes para la obtención de los espejos para la cámara de combustión para los hornos para pan fabricados por la empresa INOX.



Figura 6.23 Colado de los moldes de arena. Retención de escoria
(Fuente: Autor)

6.7.14 DESMOLDEO DE LAS CAJAS

A las 24 horas del colado de las cajas se procedió a desmoldar la caja para extraer el espejo fundido. Este procedimiento no requiere de mayor conocimiento o técnica pero si de un alto cuidado con el fin de no echar a perder o estropear la pieza fundida ya que se necesita de elementos pesados para golpear la arena compactada del molde. A continuación en las Figuras 6.24 y 6.25 se puede observar la ejecución de este proceso.



Figura 6.24 Desmoldeo de las cajas. 24 horas de haber realizado el colado
(Fuente: Autor)



Figura 6.25 Obtención del espejo de fundición gris perlítica
(Fuente: Autor)

6.7.15 LIMPIEZA Y ACABADO

Se debe limpiar las piezas fundidas con operaciones de corte, rebanado, esmerilado, pulido, etc. para que las piezas presenten un acabado en bruto lo mejor posible.

A la par de la limpieza debe realizar un control de la pieza fundida con el objeto de rechazar todo espejo que no cumpla con las especificaciones de calidad pre-establecidas (configuración y dimensiones) además de aquellos espejos que presenten defectos de superficie y de estructura que hacen aconsejable el rechazo de espejo con el fin de mantener la más alta calidad de la fundición.

6.8 SEGURIDAD PARA LOS TRABAJADORES EN LAS FUNDICIONES

En el proceso de fundición existen muchos peligros. Uno de los peligros potenciales es sufrir quemaduras o que se produzcan incendios producto de las altas temperaturas del horno y las maniobras de carga, descoriado,

descarga y colado de metal fundido. Además de la fundición se desprenden gases así como también de los materiales utilizados en los moldes de arena que son tóxicos. También los dispositivos de corte y el esmerilado crean una atmosfera de polvo combinadas con un ambiente ruidoso que conlleva al trabajador a ser muy vulnerable a accidentes. Por ello los trabajadores en fundición necesitan buenos instructivos y capacitación de la labor a desempeñar, adicionalmente a ello es fundamental contar con una ventilación adecuada y equipos de protección personal.

6.8.1 Medidas preventivas de higiene y seguridad

- Orden y limpieza en las áreas de trabajo: Contribuir a que el puesto de trabajo se encuentre libre de suciedad, sustancias resbaladizas o residuos.
- Al reducir la chatarra a un tamaño manejable para la carga del horno suelen utilizarse mazas grandes. Para reducir el riesgo de proyección de fragmentos utilice una las protecciones necesarias y adecuadas.
- El deslumbramiento y la radiación infrarroja producidos por los hornos y el metal en proceso de fusión, provocan lesiones oculares y quemaduras, por ello es muy importante que el operario use gafas adecuadas y protectores faciales.
- Los niveles de ruido producidos por la trituración de la materia prima, bombas de recirculación de agua de refrigeración del horno y los hornos eléctricos de alta potencia, pueden provocar riesgo de pérdida auditiva. Si no es posible confinar o aislar la fuente de ruido, deben usarse protectores auditivos. Se debe implementar un programa de

conservación auditiva que incluya pruebas audiométricas y capacitación del personal.

- La elevación y manipulación manual de materiales puede ocasionar lesiones de espalda y de las extremidades superiores. Los medios de elevación mecánicos y una capacitación adecuada acerca de los métodos ergonómicos de levantamiento de cargas y de elevación son necesarios en la reducción de estos riesgos.

6.9 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio se requiere el seguimiento de varias actividades las cuales se detallan a continuación:

6.10 VALORACIÓN ECONÓMICA POR ESPEJO OBTENIDO

6.10.1 VALORACIÓN ECONÓMICA POR ESPEJO DE FUNDICIÓN GRIS PERLÍTICA

Con la ayuda de uno de los principales centros de fundición de la zona (Siderúrgica Tungurahua) se ha considerado el costo actual de un espejo para la cámara de combustión, es decir el costo a la fecha de realización de este trabajo de investigación. El costo es de 3 dólares americanos la libra. Con esta información calculamos el costo del espejo de acuerdo a su peso:

$$16.1 \text{ lb} \times \$3 = \$ 48,30.$$

Es decir un espejo fundido en Siderúrgica Tungurahua cuesta \$48,30.

6.10.2 VALORACIÓN ECONÓMICA POR ESPEJO DE ACERO ASTM A36

6.10.2.1 Costos de materia prima

La plancha de acero ASTM A36 de dimensiones 48X23X1 cm se la adquirió directamente de un proveedor a nivel nacional IPAC.

$$48 \times 23 \times 1 = 1104\text{cm}^3$$

$$1104\text{cm}^3 \times 0.8 = 883,2$$

$$883,2/100000 = 0,0088$$

$$8,8 \text{ Kg}$$

El costo actual del Kg de la plancha de acero en espesor 10mm es de 1,60 más IVA = \$1,792. Calculamos el costo del material de acuerdo al peso:

$$8,8 \text{ Kg} \times \$1,792 = \$15.77$$

Es decir el costo de la plancha de dimensiones 48X23X1 cm tiene un costo de \$15.77.

Posteriormente se tiene que realizar el proceso de corte de los agujeros que deben coincidir con la posición y dimensión de los tubos del intercambiador de calor del horno, los cortes se los realiza actualmente con un plasma CNC.

En la Figura 6.26 se observa el proceso de corte.



Figura 6.26 a) Corte con CNC de plasma. Seteo de coordenadas. b) Corte con CNC de plasma. Seteo de coordenadas. c) Corte concluido. d) Limpieza de rebabas. Espejo listo para ser instalado

(Fuente: Autor)

El costo actual del corte con plasma es de 10 centavos por cada centímetro. Para el espejo se necesita varios cortes que longitudinalmente serian:

$$\begin{aligned}
 16 \text{ agujeros de diámetro } 3,5 \text{ cm.} &= (2 \times \pi \times r) \cdot 16 \\
 &= 176 \text{ cm} \times \$ 0,10
 \end{aligned}$$

Lo que da un costo de \$17,60 por concepto de corte. Para encontrar el costo total de espejo sumamos el costo de la plancha que es de \$15,77, lo que nos da un costo de \$33,37.

6.11 COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE ESPEJOS FABRICADOS CON FUNDICIÓN GRIS Y CON ACERO ASTM A36

Luego de haber obtenido los costos unitarios del espejo construido tanto con fundición gris como con acero ASTM A36 es necesario realizar un análisis comparativo de costos, para ello presentamos la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Costos comparativos. Espejo fabricado a partir de fundición gris y fabricado con acero A36

| Material | Costo unitario |
|-----------------|-----------------------|
| ASTM A36 | \$33,37 |
| Fundición Gris | \$48,30 |

(Fuente: Autor)

Al observar la Tabla 6.8 se puede apreciar que el costo de fabricar un espejo con fundición gris es relativamente mayor al de fabricar un espejo con acero A36, teniendo una diferencia entre estos costos del 30,9% es decir \$14,93 lo cual se ve compensado con el hecho de que al usar un fundición gris se obtiene un producto final con mejor comportamiento frente al fenómeno de termofluencia y oxidación térmica.

6.12 ADMINISTRACIÓN

En esta sección se redacta en una Tabla 6.8 los valores económicos requeridos durante el desarrollo de esta investigación:

Tabla6.8 Valores económicos requeridos durante el desarrollo de esta investigación

| CONCEPTO | CANTIDAD | V.UNITARIO | SUBTOTAL |
|--|----------|------------|----------|
| 2013-FEBRERO | | | |
| MATERIALES DE OFICINA | | | |
| RESMAS DE PAPEL BOND | 5 | 5 | 25 |
| ESFEROS, LAPIZ MECANICO, CARPETAS | 1 | 20 | 20 |
| FLASH MEMORY | 1 | 30 | 30 |
| ANILLADOS/ IMPRESIONES (BIBLIOGRAFIA) | 1 | 80 | 80 |
| LIBROS TECNICOS | | | |
| METALURGIA-DISEÑO MECANICO-NORMAS | 1 | 800 | 800 |
| OTROS | | | |
| TRANSPORTE BAÑOS- AMBATO -RIOBAMBA | | | 400 |
| INTERNET | | | 120 |
| CONSTRUCCIÓN EQUIPO DE ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA | | | |
| ESTRUCTURA PRENSA | | | |
| ANGULOS A36 40X40X6 mm LARGO 30cm | 8 | 2 | 16 |
| ANGULOS ACERO GALVANIZADO 75X75X6 mm LARGO 1,50m | 4 | 35 | 140 |
| PLANCHAS A36 13x122 cm e=20mm | 4 | 53 | 212 |
| PLANCHAS A36 20x80 cm e=20mm | 2 | 53 | 106 |
| PLANCHAS A36 15x30 cm e=10mm | 2 | 7,5 | 14 |
| PLANCHAS A36 5x30cm e=20mm | 4 | 10 | 40 |
| PLANCHAS A36 40x30cm e=20mm | 2 | 30 | 60 |
| PLANCHAS A36 20x122cm e=20mm | 2 | 81 | 162 |
| 28 PERNOS ACERADOS 3/4 x 2, RODELAS DE PRESION | 28 | 2,5 | 70 |

| | | | |
|--|---|------|-----|
| MECANISMO DE TRACCIÓN Acero Cr-Mo | 1 | 500 | 500 |
| MANÓMETRO | 1 | 1 | 100 |
| GATA HIDRAULICA 20 T | 1 | 90 | 90 |
| ELECTRODOS 7018 | 1 | 45 | 45 |
| ELECTRODOS 6011 | 1 | 45 | 45 |
| MATERIALES DE PROTECCIÓN | 1 | 30 | 30 |
| HORNO DE RESISTENCIAS | | | |
| CALDERIA Cr-Mo | 1 | 30 | 30 |
| PLACAS CERAMICAS | 6 | 15 | 90 |
| RESISTENCIAS Ni-Cr | 2 | 34 | 68 |
| LANA CERÁMICA | 1 | 30 | 30 |
| ARMADURA CARCASA HORNO | 1 | 60 | 60 |
| CONTROLADOR DE TEMPERATURA TIPO K | 1 | 80 | 80 |
| CONTACTOR | 2 | 18 | 36 |
| GAVINETE MODULAR | 1 | 25 | 25 |
| RIEL DIN ACERO | 1 | 3,5 | 3,5 |
| FUSIBLE | 2 | 2,25 | 5 |
| BASE FUSIBLE | 2 | 5 | 10 |
| TERMOCUPLA TIPO K | 1 | 20 | 20 |
| CABLE DE ASBESTO | 1 | 12 | 12 |
| CABLE SÓLIDO # 10 | 1 | 12 | 12 |
| CABLE SOLIDO # 12 | 1 | 6 | 6 |
| PULSADOR MARCHA-PARO | 1 | 8 | 8 |
| TAIPE | 1 | 3 | 3 |
| BROCA DE HORMIGON | 1 | 15 | 15 |
| MATERIALES PREPARACIÓN ESPECÍMENES-PROBETAS | | | |

| | | | |
|-----------------------------------|----|-----|-----|
| PLANCHA ACERO ASTM A36 SUMINISTRO | 1 | 40 | 40 |
| FUNDICION GRIS PERLITICA | 1 | 30 | 30 |
| DISCOS DE PULIR | 10 | 1,5 | 15 |
| DISCOS DE CORTE | 5 | 1,5 | 7,5 |

| | | | |
|---|---|-------|------|
| RECURSOS HUMANOS CONSTRUCCIÓN TERMOPRENSA | | | |
| MANO DE OBRA CONSTRUCCIÓN PRENSA | 1 | 1000 | 1000 |
| MANO DE OBRA CONSTRUCCIÓN HORNO | 1 | 500 | 500 |
| MANO DE OBRA INSTALACIÓN Y CONTROL ELECTRICO | 1 | 50 | 50 |
| CONTINUACIÓN ENSAYOS | | | |
| ANALISIS DE METALOGRAFICO LABORATORIO | | | |
| PROBETAS | | | 200 |
| | | | |
| 2013-MARZO | | | |
| TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS, ASESORIA | | | 300 |
| IMPRESIONES (TESIS) | | | 60 |
| EMPASTADOS (TESIS) | | | 200 |
| | | | |
| | | TOTAL | 6021 |

OBSERVACIONES:

NOMBRE DEL DIRECTOR:

FECHA DE ELABORACIÓN:

FIRMA:

FIRMA Y SELLO DE SECRETARIA:

6.13 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN

Una vez culminado el trabajo de investigación, el mismo que fue realizado en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Mecánica la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Riobamba-Ecuador), se sugiere tomar en cuenta todas las conclusiones y recomendaciones presentes en este trabajo, a fin de prevenir inconvenientes al momento de ejecutar la caracterización mecánica.

Adicionalmente se sugiere una investigación posterior a este trabajo, en la cual se investigue la aplicabilidad de la propuesta a otro tipo de elementos o partes mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] SMITH WILLIAM, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales,. Tercera Edición, Editorial Mc-Graw Hill, pp 276-294-328.

[2] GONZALEZ J. LUIS, 2003, Metalurgia Mecánica, Editorial Limusa,SA. De C.V. Grupo Noriega Editores, pp 221-244.

[3] EPRI PORTFOLIO 2006. Boiler Life and Availability Improvement, Program.htm. Electric Power Research Institute, N^o 63

[4] BPVC-2004 Boiler and Pressure Vessel Code, Section II- Materials –Part A-Ferrous Material Specifications.

[5] WILLIAM D. CALLISTER JR. Material Science and Engineering.Septima Edición. John Wiley & Sons. Inc, pag 101-122.

[6] H.K.D.H. 2001, Bhadeshia, Bainita in steels, transformations, microstructure and properties, Second Edition.

[7] MORALES M, 2009, Diseño y construcción de un prototipo didáctico de termofluencia para el laboratorio de ciencias de materiales de la E.S.I.M.E unidad Culhuacan, Tesis de Ing. Mecánica, Culhuacán (México), Facultad de ingeniería Mecánica y Eléctrica. pp 13-80.

[8] L.H. TOFT, L.I.M. MARSDEN, The structure and properties of 1Cr-0.5Mo steel after service in CEGB power stations, Iron and Steel Institute, N° 70, pp 276-294.

[9] B. NEUBAUER, U. WEDEL, 1983, Restlife estimation of creeping components by meas of replicas, Ed. ,ASME, pp 307-314.

[10] J. DOBRZANSKI, A. HERNAS, Correlation between phase composition and life-time of 1Cr-0.5Mo steels during long-term service at elevated temperaturas, Journal of Materials Processing Technology, 53, pp 101-108.

[11] REED-HILL, Principios de Metalurgia Física, Tercera Edición, Editorial CECSA, pág. 745-750.

[12] DONALD R. ASKELAND, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Tercera Edición, Editorial Thomson, pág. 157-160.

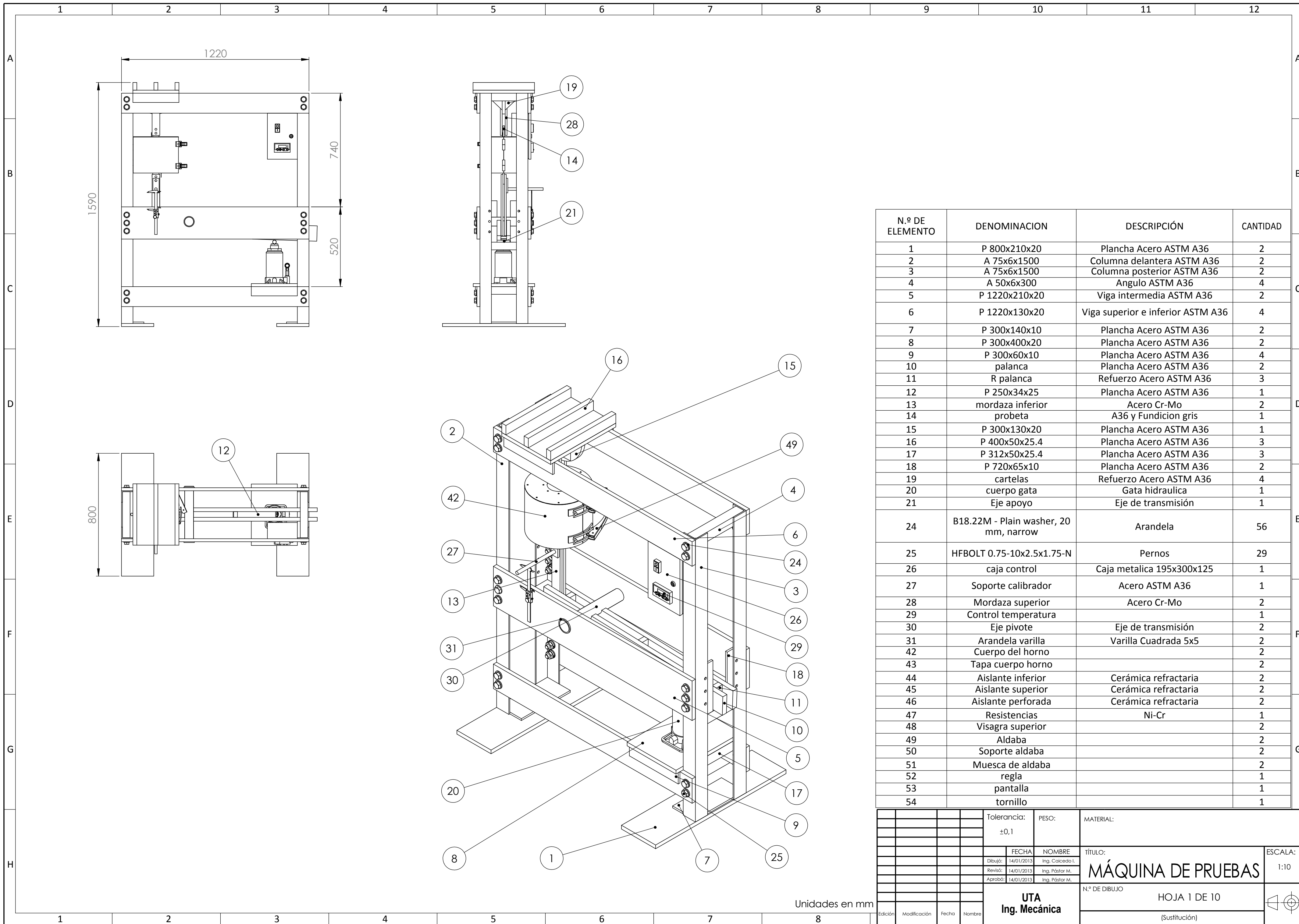
[13] ASM: Metals Handbook, Vol. 1, Editor Taylor Lyman, Metals Park, ohio, United States of America, 1975, pp 886.

[14] N. D. TITOV y U. A. STEPANOV: Tecnología del Proceso de Fundición, Editorial MIR, Moscú, 1981, pp. 148, 156-158, 392, 393.

- [15] M. TIRYAKIOGLU, J.T. BERRY: The Use of Riser Recommendations and Criteria Functions for the Efficient Feeding of Aluminum Castings, 1st International AFS Conference on Gating Filling and Feeding of Aluminum Casting Proceedings, October 10-13, 1999, CD-ROM, pp. 246.
- [16] R. FUOCO, C. SOUZA, E. CORREA y M. ANDRADE: Study on Gating System Design for Aluminum Gravity Casting Using Water Models, 1st International AFS Conference on Gating Filling and Feeding of Aluminum Casting Proceedings, October 10-13, 1999, CD-ROM, pp. 67, 68.
- [17] R. GALLO, “ Gating for Aircraft Dry Sand C355 Alloy Castings”, 1st International AFS Conference on Gating Filling and Feeding of Aluminum Casting Proceedings, October 10-13, 1999, CD-ROM, pp. 253-257.
- [18] ALUMINIO DE GALICIA, S.A.: Técnicas manuales para el moldeo del aluminio, pp. 34, 35.
- [19] PASTOR MARIO, Apuntes de fundición, pp 125-141.
- [20] SMITHELLS: Metals Reference Book, Ed. Butterwohs, London, 1983, pp. 8.54, 14.6, 14.7, 14.14, 14.15.
- [21] R. MOTT: Mecánica de Fluidos, pp 351, 352, 379, 380.
- [22] CRANE: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, Ed. McGraw-Hill, México, 1988, pp. A-49.

ANEXOS

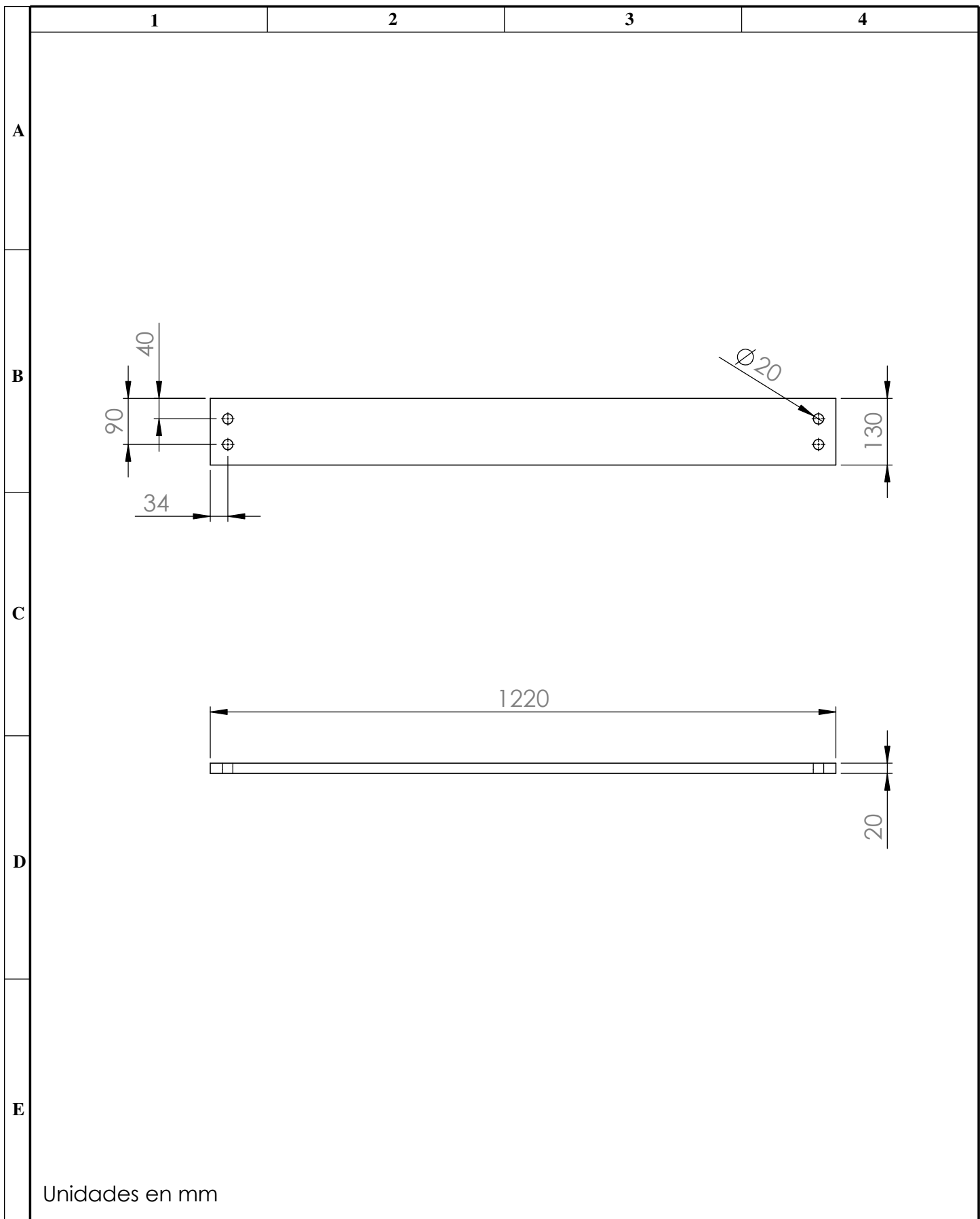
ANEXO 1



| N.º DE ELEMENTO | DENOMINACION | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD |
|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------|
| 1 | P 800x210x20 | Plancha Acero ASTM A36 | 2 |
| 2 | A 75x6x1500 | Columna delantera ASTM A36 | 2 |
| 3 | A 75x6x1500 | Columna posterior ASTM A36 | 2 |
| 4 | A 50x6x300 | Angulo ASTM A36 | 4 |
| 5 | P 1220x210x20 | Viga intermedia ASTM A36 | 2 |
| 6 | P 1220x130x20 | Viga superior e inferior ASTM A36 | 4 |
| 7 | P 300x140x10 | Plancha Acero ASTM A36 | 2 |
| 8 | P 300x400x20 | Plancha Acero ASTM A36 | 2 |
| 9 | P 300x60x10 | Plancha Acero ASTM A36 | 4 |
| 10 | palanca | Plancha Acero ASTM A36 | 2 |
| 11 | R palanca | Refuerzo Acero ASTM A36 | 3 |
| 12 | P 250x34x25 | Plancha Acero ASTM A36 | 1 |
| 13 | mordaza inferior | Acero Cr-Mo | 2 |
| 14 | probeta | A36 y Fundicion gris | 1 |
| 15 | P 300x130x20 | Plancha Acero ASTM A36 | 1 |
| 16 | P 400x50x25.4 | Plancha Acero ASTM A36 | 3 |
| 17 | P 312x50x25.4 | Plancha Acero ASTM A36 | 3 |
| 18 | P 720x65x10 | Plancha Acero ASTM A36 | 2 |
| 19 | cartelas | Refuerzo Acero ASTM A36 | 4 |
| 20 | cuerpo gata | Gata hidraulica | 1 |
| 21 | Eje apoyo | Eje de transmision | 1 |
| 24 | B18.22M - Plain washer, 20 mm, narrow | Arandela | 56 |
| 25 | HFBOLT 0.75-10x2.5x1.75-N | Pernos | 29 |
| 26 | caja control | Caja metalica 195x300x125 | 1 |
| 27 | Soporte calibrador | Acero ASTM A36 | 1 |
| 28 | Mordaza superior | Acero Cr-Mo | 2 |
| 29 | Control temperatura | | 1 |
| 30 | Eje pivote | Eje de transmision | 2 |
| 31 | Arandela varilla | Varilla Cuadrada 5x5 | 2 |
| 42 | Cuerpo del horno | | 2 |
| 43 | Tapa cuerpo horno | | 2 |
| 44 | Aislante inferior | Cerámica refractaria | 2 |
| 45 | Aislante superior | Cerámica refractaria | 2 |
| 46 | Aislante perforada | Cerámica refractaria | 2 |
| 47 | Resistencias | Ni-Cr | 1 |
| 48 | Visagra superior | | 2 |
| 49 | Aldaba | | 2 |
| 50 | Soporte aldaba | | 2 |
| 51 | Muesca de aldaba | | 2 |
| 52 | regla | | 1 |
| 53 | pantalla | | 1 |
| 54 | tornillo | | 1 |

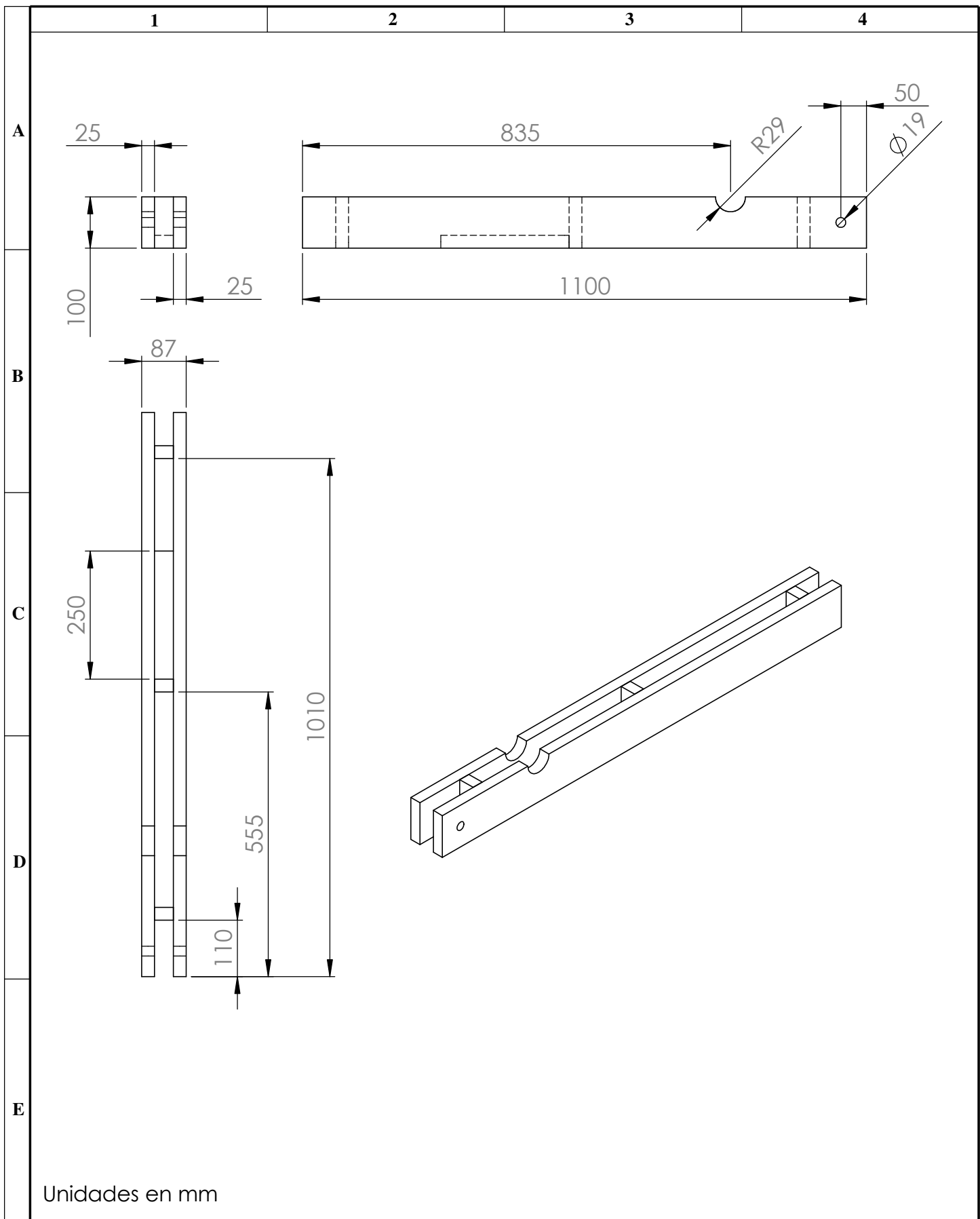
| | | | | |
|--------------------|-----------------|--------------------|-----------|---------------|
| Tolerancia: ±0,1 | | PESO: | MATERIAL: | |
| FECHA | NOMBRE | TÍTULO: | | ESCALA: |
| Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Cáicedo I. | MÁQUINA DE PRUEBAS | | 1:10 |
| Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | N.º DE DIBUJO | | |
| Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | HOJA 1 DE 10 | | |
| Edición | | Modificación | | Fecha |
| Nombre | | UTA | | |
| | | Ing. Mecánica | | (Sustitución) |

Unidades en mm



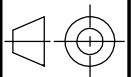
Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | | | | Tolerancia: ±0,1 | PESO: | MATERIAL: ACERO AISI A36 | |
| | | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: |
| | | | | Dibujó: | 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | VIGA SUPERIOR-INFERIOR |
| | | | | Revisó: | 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | Aprobó: | 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | ESCALA: |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | HOJA 2 DE 10 | 1:10 |
| | | | | | | (Sustitución) | |



Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|--|
| | | | | Tolerancia: $\pm 0,1$ | PESO: | MATERIAL: ACERO AISI A36 | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: PALANCA | |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | ESCALA: 1:10 | |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO HOJA 4 DE 10 | |
| | | | | | | (Sustitución) | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | | |



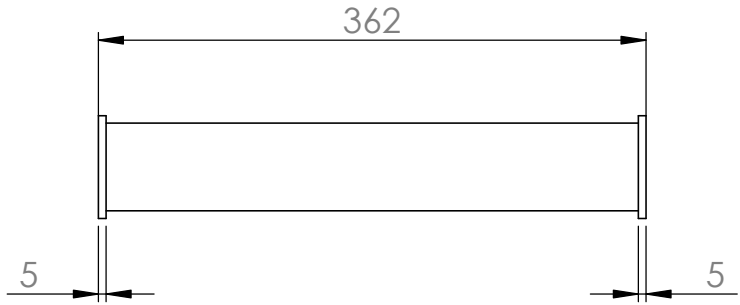
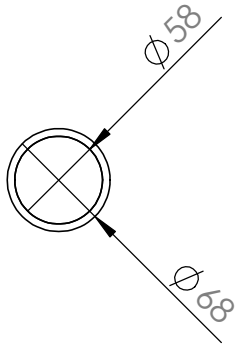
1

2

3

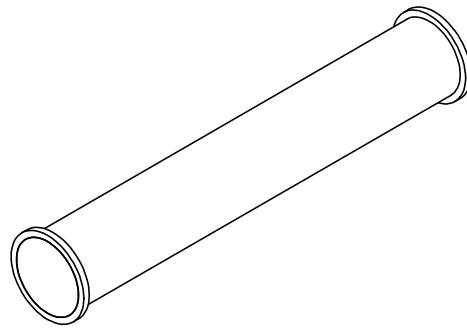
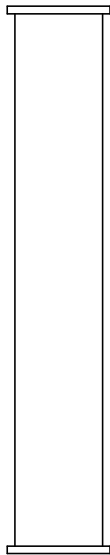
4

A



B

C



D

E

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|--------------------|-----------------|---------------------------|--|
| | | | | Tolerancia: | PESO: | MATERIAL: | |
| | | | | ±0,1 | | EJE DE TRANSMISIÓN | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: | |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | EJE PIVOTE | |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | ESCALA: | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | 1:5 | |
| | | | | UTA | | N.º DE DIBUJO | |
| | | | | Ing. Mecánica | | HOJA 5 DE 10 | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | (Sustitución) | |
| | | | | | | | |

1

2

3

4

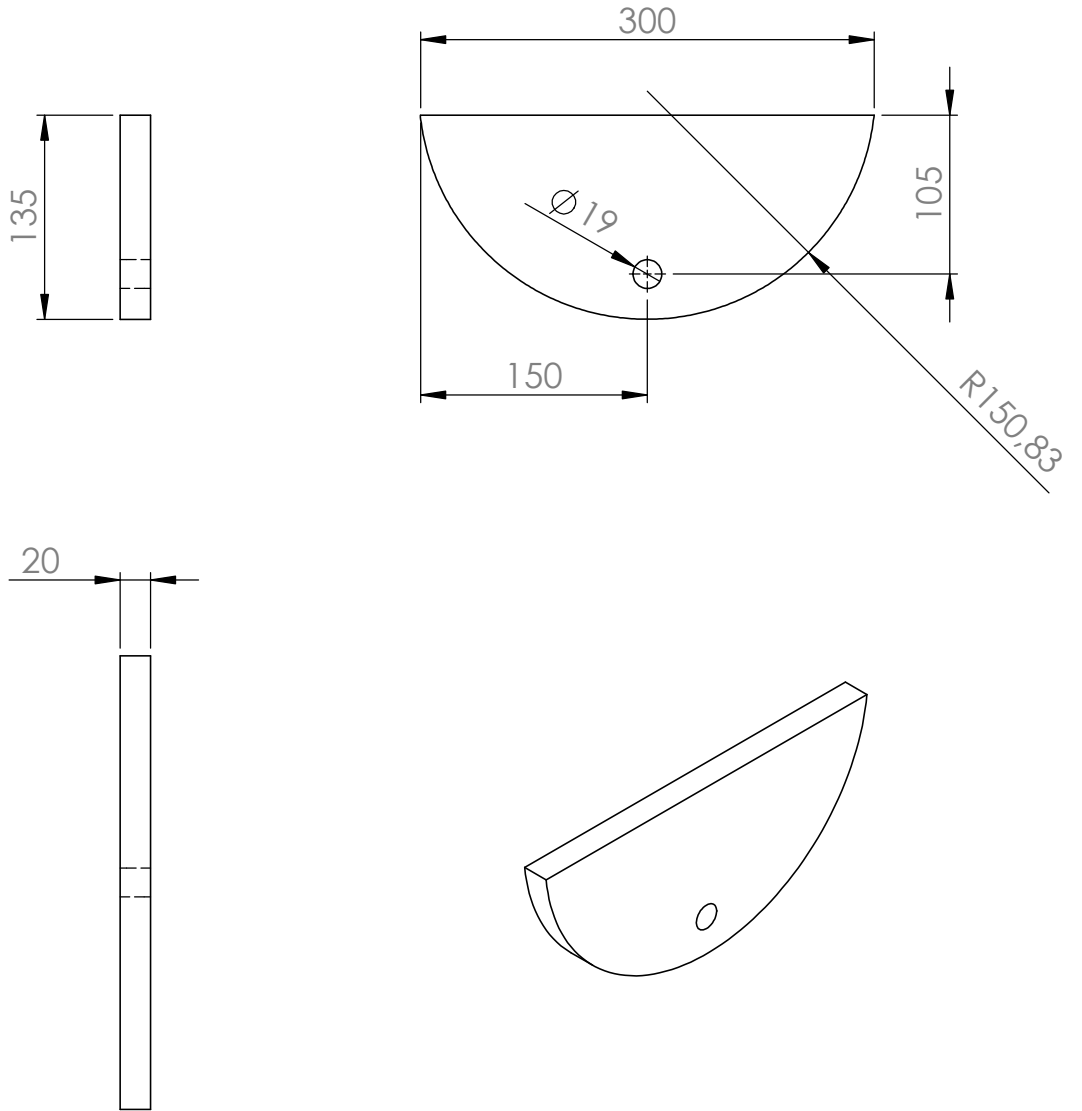
A

B

C

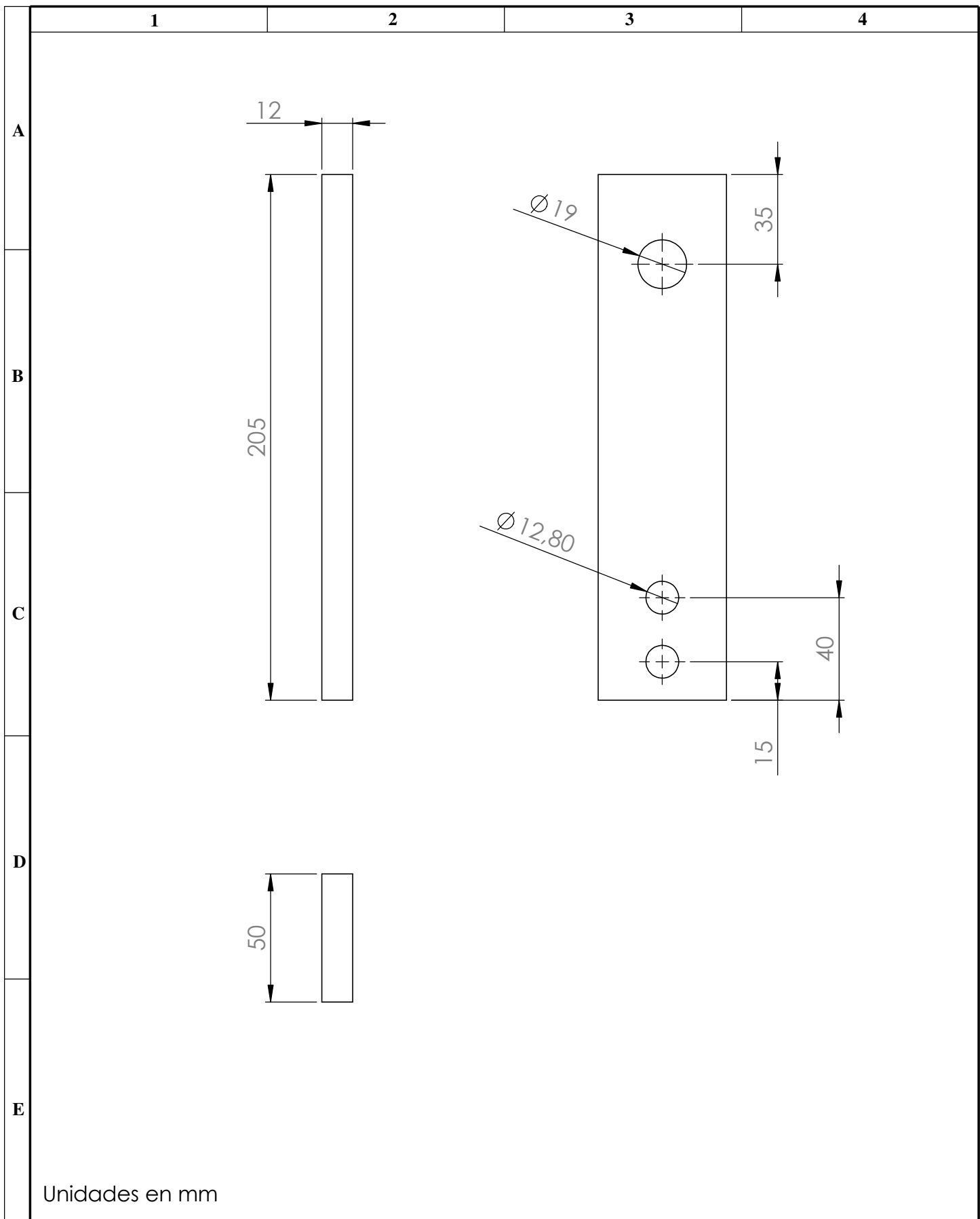
D

E



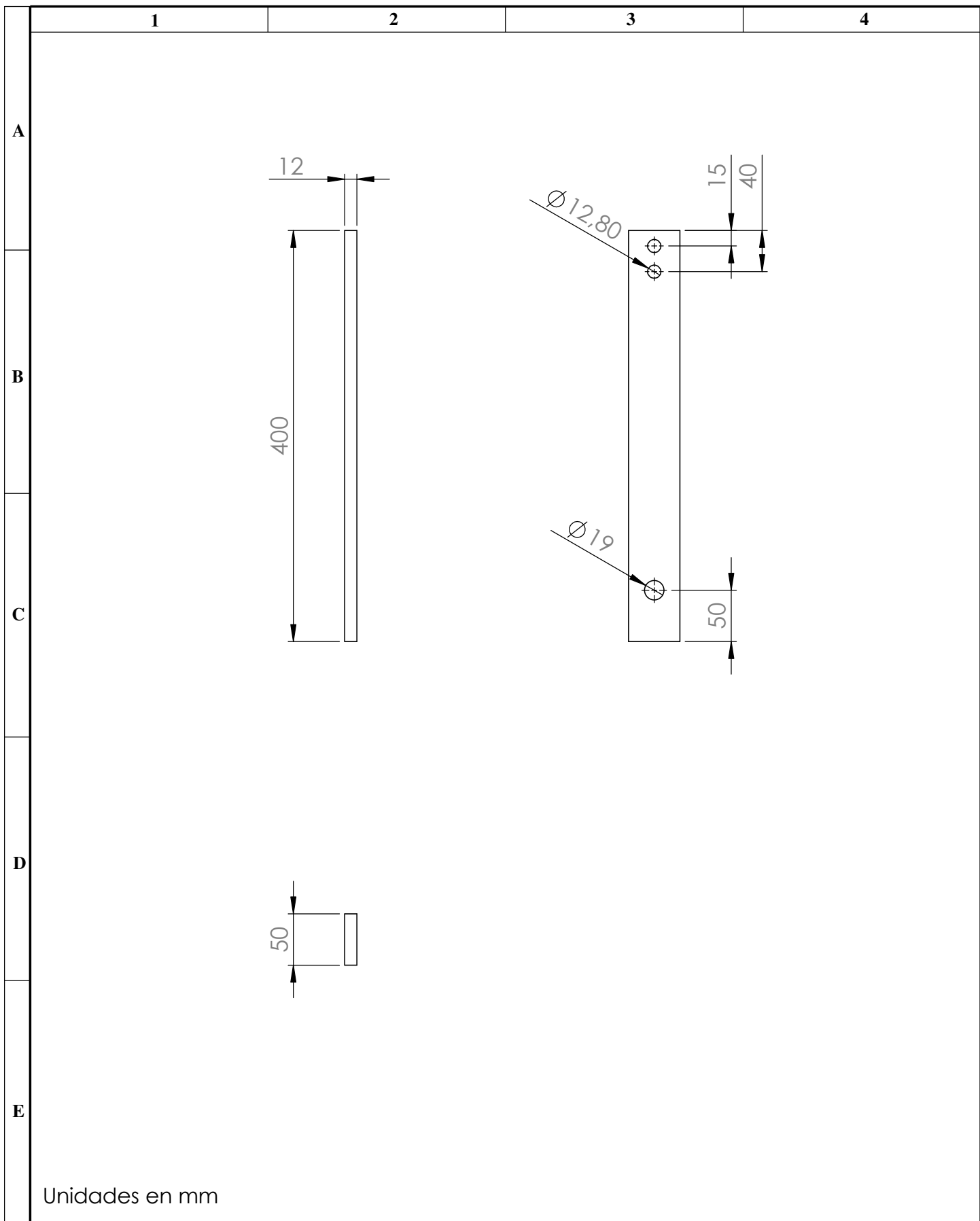
Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | | | | Tolerancia: ±0,1 | PESO: | MATERIAL: ACERO AISI A36 | |
| | | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: |
| | | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | SOPORTE M. SUPERIOR |
| | | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | ESCALA: |
| | | | | | | HOJA 6 DE 10 | 1:5 |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | (Sustitución) | |



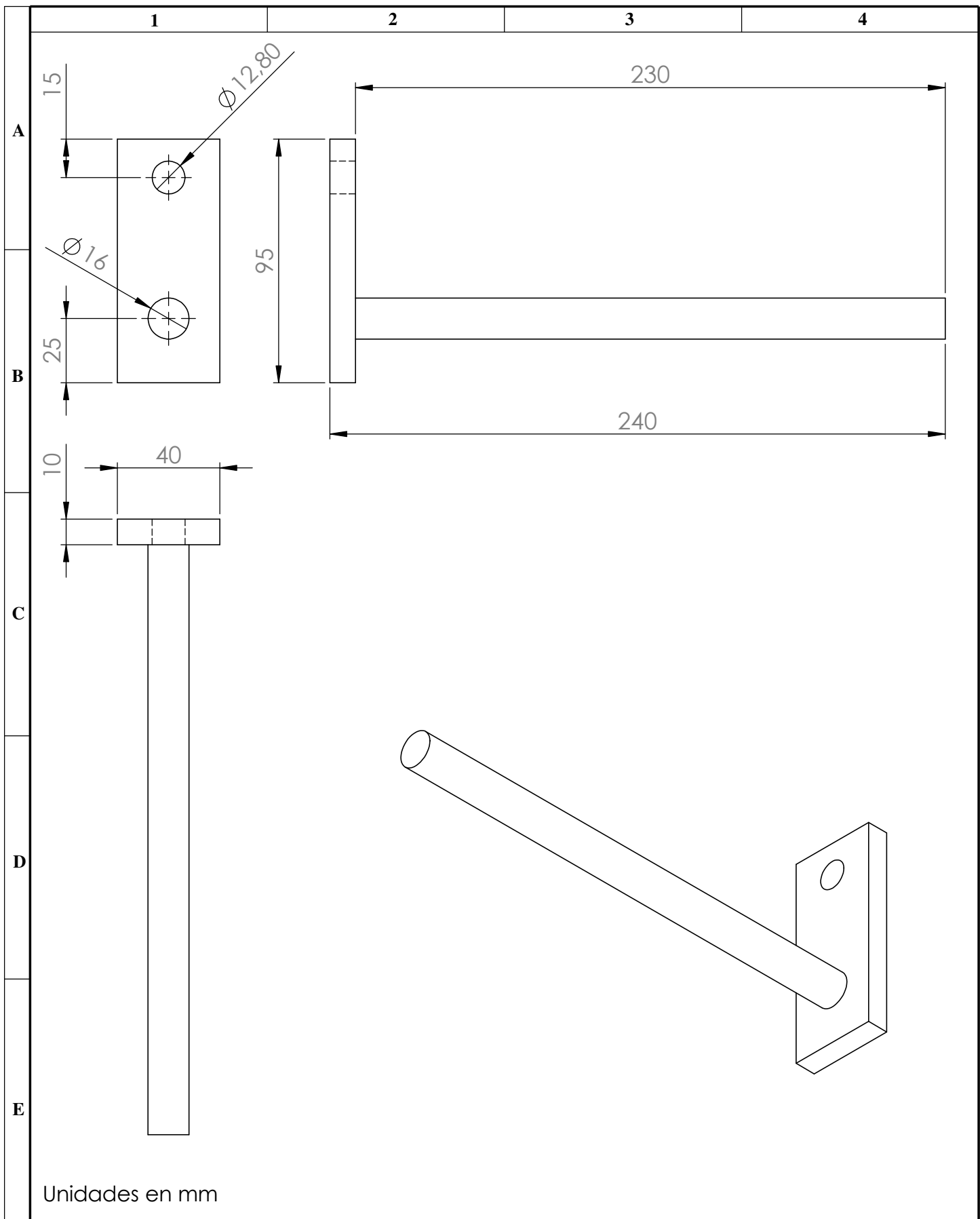
Unidades en mm

| | | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|----------------------|-----------------|-------------------------|---------|--|
| | | | | Tolerancia: | PESO: | MATERIAL: | | |
| | | | | ±0,1 | | ACERO AISI A36 | | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: | ESCALA: | |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | MORDAZA SUPERIOR | 1:2 | |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | | |
| | | | | UTA | | N.º DE DIBUJO | | |
| | | | | Ing. Mecánica | | HOJA 7 DE 10 | | |
| | | | | | | (Sustitución) | | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | | | |



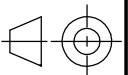
Unidades en mm

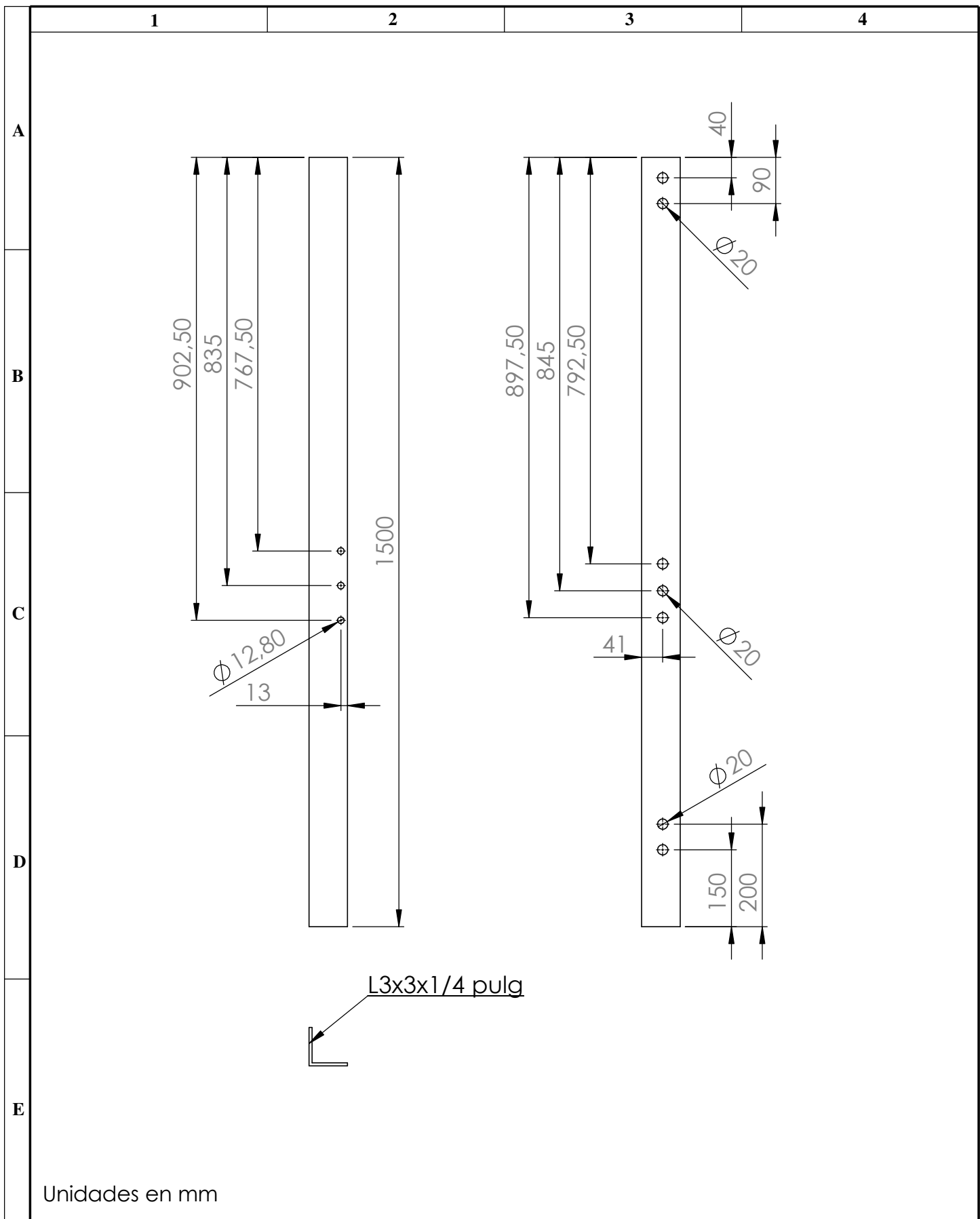
| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| | | | | Tolerancia: ±0,1 | PESO: | MATERIAL: ACERO Cr-Mo | |
| | | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: |
| | | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | MORDAZA INFERIOR |
| | | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | HOJA 8 DE 10 |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | (Sustitución) | |
| | | | | | | | ESCALA: 1:5 |
| | | | | | | | |



Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|-----------------------------|----------------|--------------------------------------|--|
| | | | | Tolerancia: $\pm 0,1$ | PESO: | MATERIAL: ACERO AISI A36 | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: SOPORTE CALIBRADOR | |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo. | ESCALA: 1:2 | |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO HOJA 9 DE 10 | |
| | | | | | | (Sustitución) | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | | |

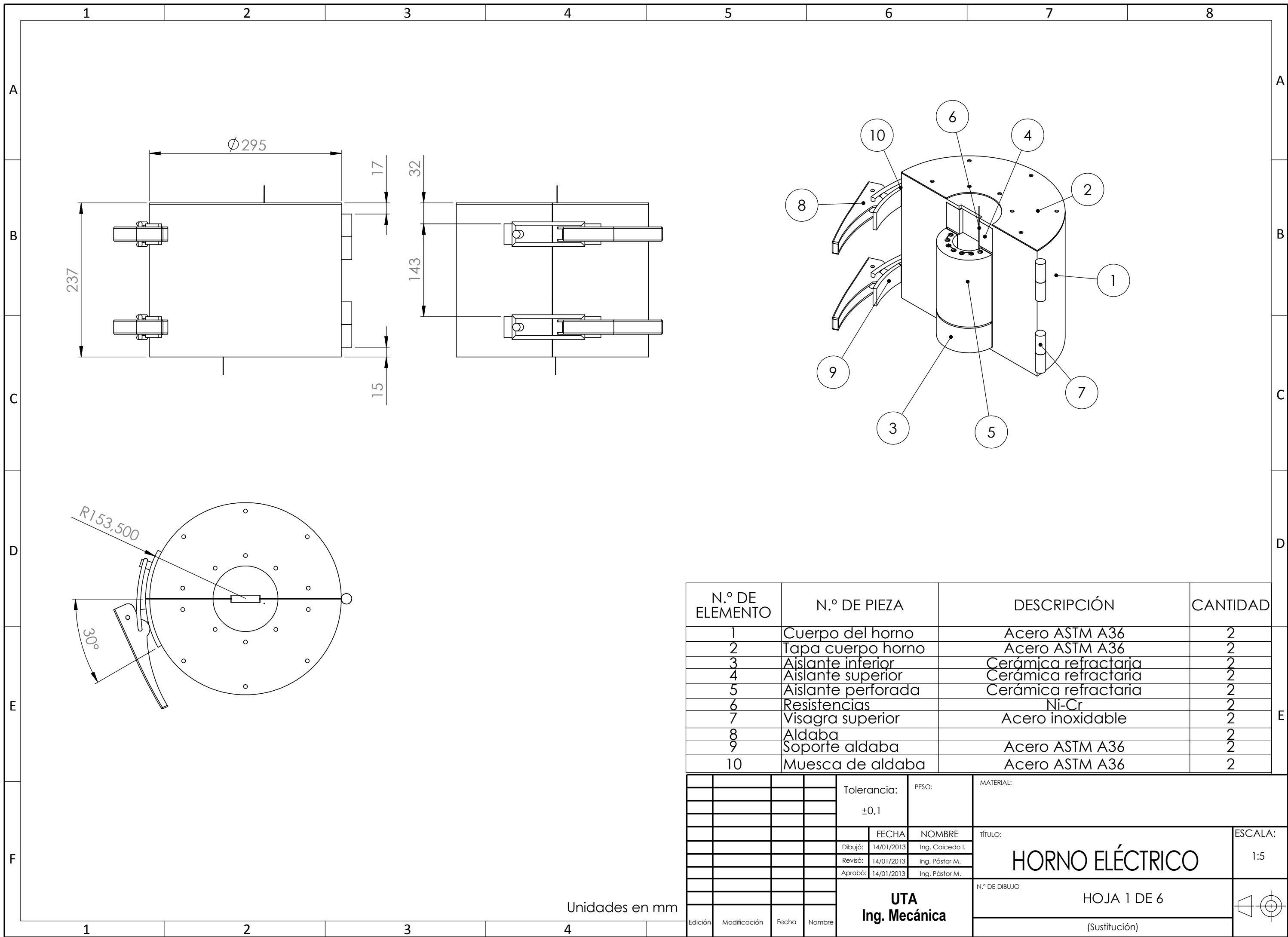




Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | | | | Tolerancia: $\pm 0,1$ | PESO: | MATERIAL: ASTM A36 Acero | |
| | | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: COLUMNA |
| | | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | ESCALA: 1:10 |
| | | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | HOJA 10 DE 10 |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | (Sustitución) | |
| | | | | | | | |

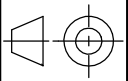
ANEXO 2

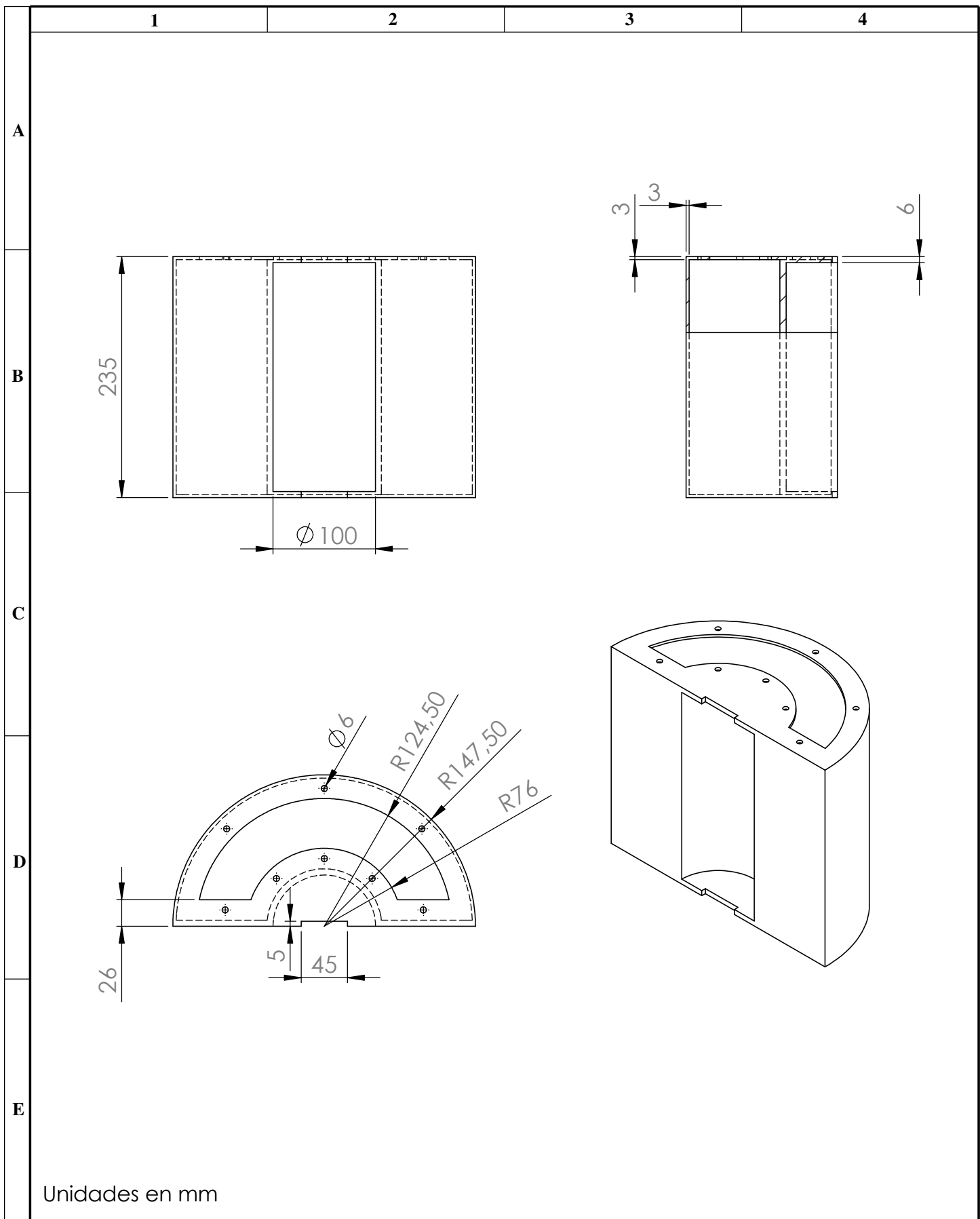


| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD |
|-----------------|--------------------|----------------------|----------|
| 1 | Cuerpo del horno | Acero ASTM A36 | 2 |
| 2 | Tapa cuerpo horno | Acero ASTM A36 | 2 |
| 3 | Aislante inferior | Cerámica refractaria | 2 |
| 4 | Aislante superior | Cerámica refractaria | 2 |
| 5 | Aislante perforada | Cerámica refractaria | 2 |
| 6 | Resistencias | Ni-Cr | 2 |
| 7 | Visagra superior | Acero inoxidable | 2 |
| 8 | Aldaba | | 2 |
| 9 | Soporte aldaba | Acero ASTM A36 | 2 |
| 10 | Muesca de aldaba | Acero ASTM A36 | 2 |

| | | | | |
|---------------|------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Tolerancia: | | PESO: | MATERIAL: | |
| ±0,1 | | | | |
| FECHA | | NOMBRE | | TÍTULO: |
| Dibujó: | 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | | HORNO ELÉCTRICO |
| Revisó: | 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| Aprobó: | 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| UTA | | | N.º DE DIBUJO | ESCALA: |
| Ing. Mecánica | | | HOJA 1 DE 6 | 1:5 |
| | | | (Sustitución) | |

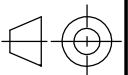
Unidades en mm

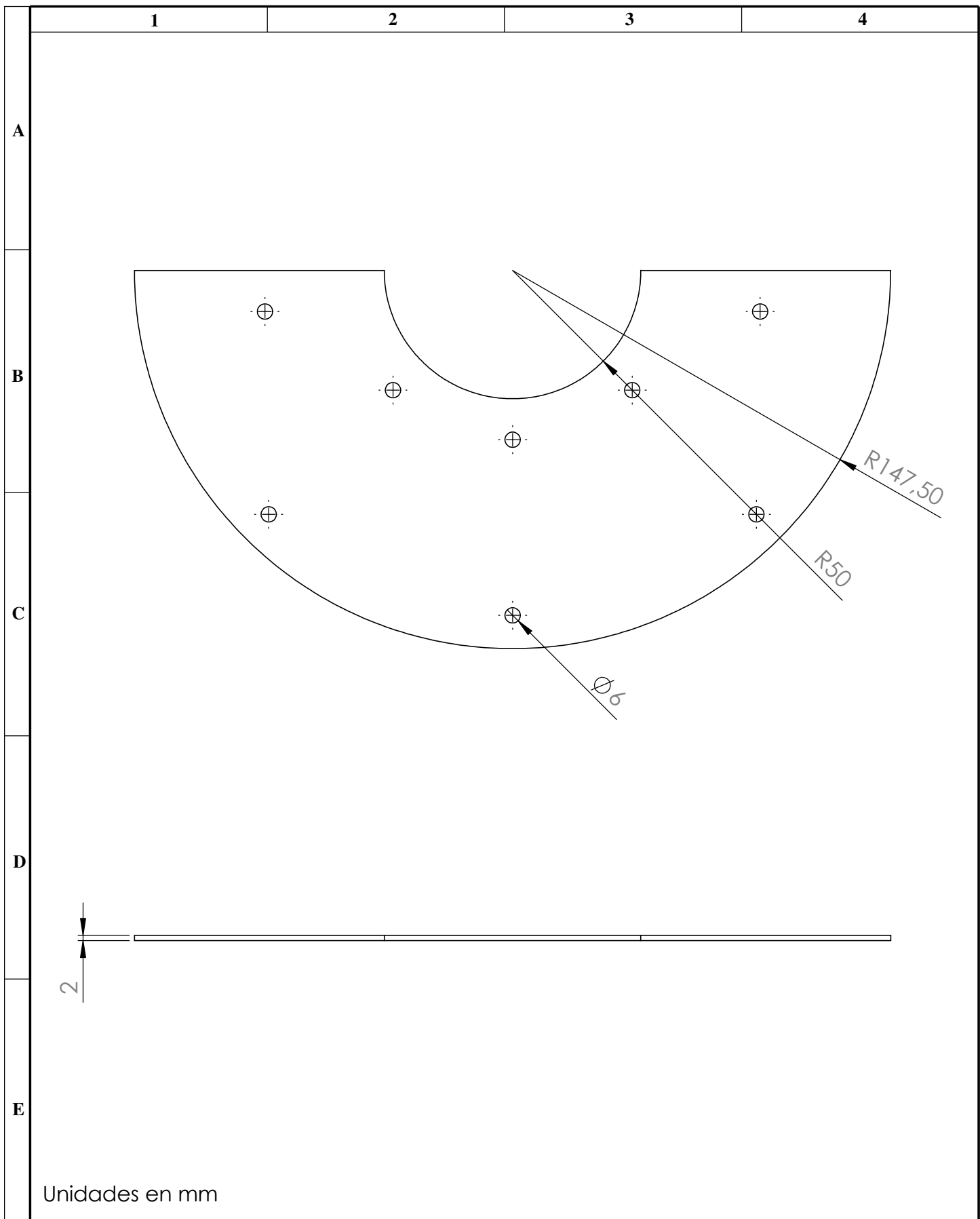




Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|--|
| | | | | Tolerancia: ±0,1 | PESO: | MATERIAL: ACERO AISI A36 | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: CUERPO HORNO | |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | ESCALA: 1:5 | |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO HOJA 2 DE 6 | |
| | | | | | | (Sustitución) | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | | |





Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|------------|-------------------------------------|----------------|
| | | | | Tolerancia: ±0,1 | PESO: | MATERIAL: ACERO AISI A36 | |
| | | | | | | TÍTULO: TAPA CUERPO HORNO | ESCALA: 1:2 |
| | | | | | FECHA | NOMBRE | |
| | | | | Dibujó: | 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | |
| | | | | Revisó: | 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | Aprobó: | 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | |
| | | | | | | HOJA 3 DE 6 | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | (Sustitución) | |

1

2

3

4

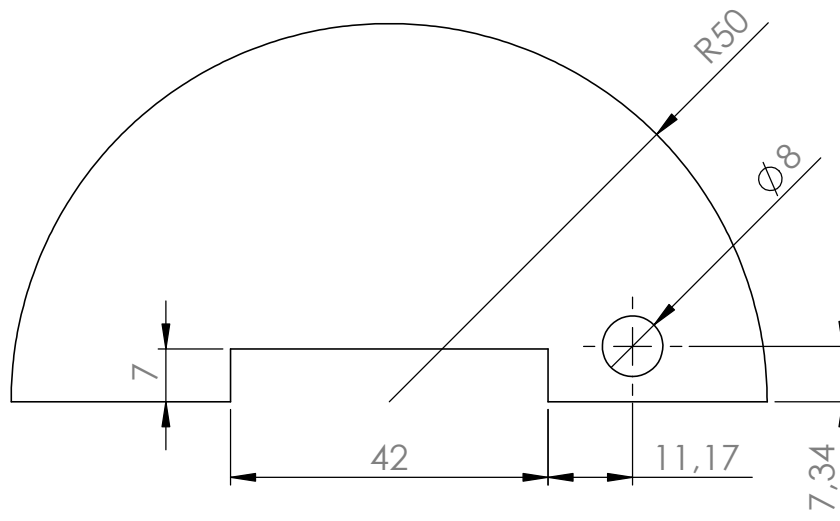
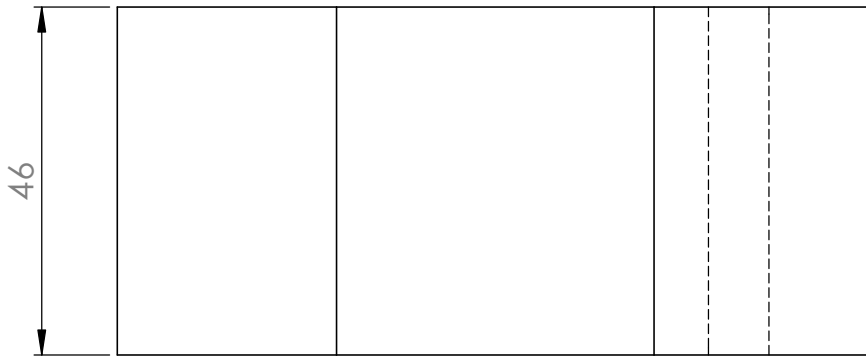
A

B

C

D

E



Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|-----------------|--|-------------|
| | | | | Tolerancia: ±0,1 | PESO: | MATERIAL: CERÁMICA REFRACTARIA | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: | ESCALA: |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | AISLANTE SUPERIOR-INFERIOR | 1:1 |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | HOJA 4 DE 6 |
| | | | | | | (Sustitución) | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | | |

1

2

3

4

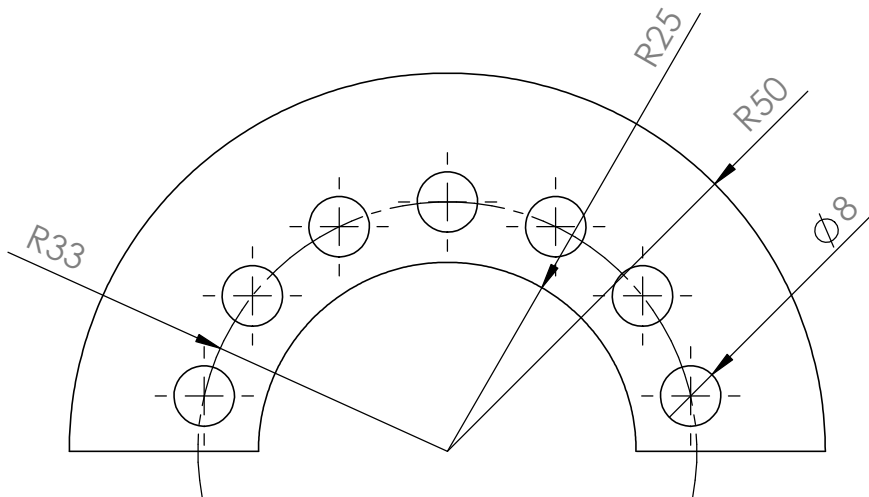
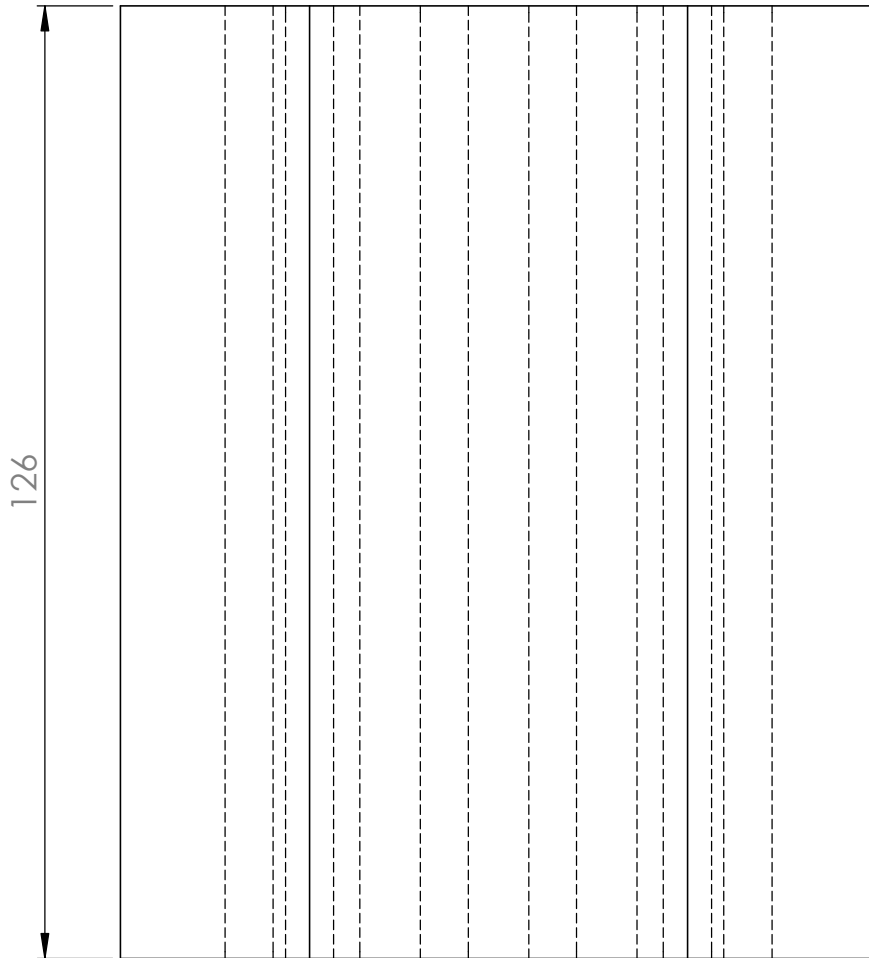
A

B

C

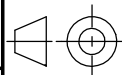
D

E



Unidades en mm

| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------------------------|-----------------|--|---------|
| | | | | Tolerancia: ±0,1 | PESO: | MATERIAL: CERÁMICA REFRACTARIA | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: | |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | AISLANTE DEL CUERPO | |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | ESCALA: |
| | | | | | | HOJA 5 DE 6 | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | (Sustitución) | |



1

2

3

4

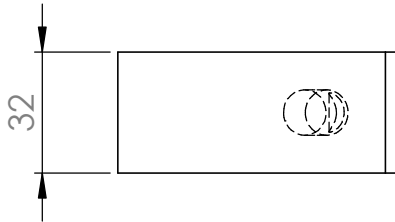
A

B

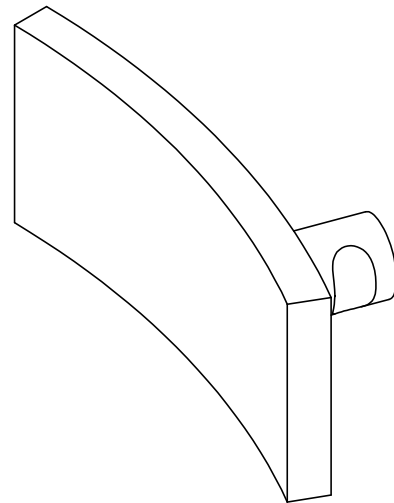
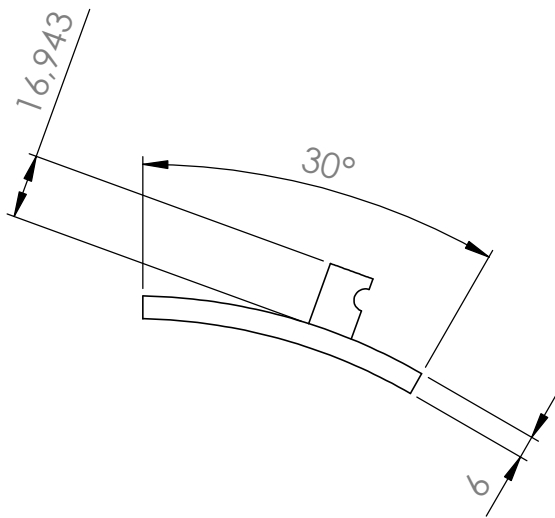
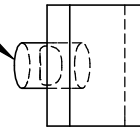
C

D

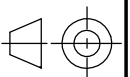
E



R VERDADERO 6



| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------|
| | | | | Tolerancia: | PESO: | MATERIAL: | |
| | | | | ±0,1 | | ACERO AISI A36 | |
| | | | | FECHA | NOMBRE | TÍTULO: | ESCALA: |
| | | | | Dibujó: 14/01/2013 | Ing. Caicedo I. | MUESCA DE ALDABA | 1:2 |
| | | | | Revisó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | Aprobó: 14/01/2013 | Ing. Pástor M. | | |
| | | | | UTA Ing. Mecánica | | N.º DE DIBUJO | HOJA 6 DE 6 |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | (Sustitución) | |



ANEXO 3



CC FOR 17 Ver 16 01 07

JULIO 2013

Señores

Saludos

Por la presente certificamos que las planchas que elabora IPAC S.A. En calidad laminado en frío comercial, son del tipo JIS G 3141 SPCC SD, las planchas laminadas en caliente son del tipo ASTM A 36 y las planchas en acero galvanizado son de calidad ASTM A 653 cuyo proceso de fabricación en frío cumplen con la norma INEN 115 (Tolerancias para Planchas de Acero al Carbono Laminadas en Caliente o en Frío) por lo cual se adjuntan rangos de composición química y características mecánicas del material que se utiliza en la fabricación de estas planchas.

Propiedades Químicas

| NORMA | % C | % Mn | % P | % Si | % S |
|-----------------|-----------|------------|------------|----------|------------|
| ASTM A 36 | 0.26 Máx. | 0.60 a 135 | 0.04 Máx. | 0.40 Máx | 0.05 Máx. |
| JIS G 3141 SPCC | 0.15 Máx. | 0.50 Máx. | 0.10 Máx | | 0.05 Máx. |
| ASTM A 653 | 0.15 Máx. | 0.60 Máx. | 0.030 Máx. | | 0.035 Máx. |

Propiedades Mecánicas

| ASNORMA | Esf.Tracción | Esf.Fluencia (Mpa) | % elongación |
|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| ASTM A 36 | 400 a 500 | 250 mín. | 21 a 23 |
| JIS G 3141 SPCC SD | 270 Mín. | | 36 mín, |
| ASTM A 653 | 380 a 205 | | > 20 |

| INEN 115 | | |
|---|-----------------------------|---------------------|
| <i>Desviaciones admisibles (mm) por exceso (+) y por defecto (-) en el espesor e especificado para los anchos dados</i> | | |
| Espesor e especificado (mm) | Anchos especificados (mm) | |
| | 1000 < ancho < 1200 | 1200 < ancho < 1800 |
| 0,5 < espesor < 0.8 | 0,04 | 0,05 |
| 0,8 < espesor < 1.0 | 0,05 | 0,05 |
| 1.0 < espesor < 1.3 | 0,10 | 0,13 |
| 1.3 < espesor < 1.8 | 0,13 | 0,13 |
| Tolerancia en Planitud (mm) | Espesor < 1.45 mm 13 | |
| Flecha (mm) | Largo < 1000 mm | 3 |
| | 1000 < Largo < 1500 mm | 5 |
| | 1500 < largo < 2000 mm | 6 |
| | 2000 < largo < 3000 mm | 8 |

Atte.

José Córdova P.

Jefe control de Calidad

ANEXO 4

FUNDICION GRIS

| Fundiciones aleadas | %C | %Si | %Mn | %Cr | %Cu | %Mo | %Ni | %P | %S | Peso(Kg) | Fraccion |
|---------------------------------|------|------|-----|------|------|-----|-----|----|-------|----------|----------|
| Camisas de cilindros de motores | 3,25 | 2,2 | 0,6 | 0,5 | 1 | 1 | 0,2 | 0 | 0 | 58 | 0,58 |
| Cigüeñales | 1,5 | 0,95 | 0,7 | 0,45 | 1,75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 | 0,42 |
| | | | | | | | | | TOTAL | 100 | 1 |

Cálculo para 100Kg

| | %C | %Si | %Mn | %Cr | %Cu | %Mo | %Ni | %P | %S |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----|-----|
| Desde las camisas | 1,885 | 1,276 | 0,348 | 0,29 | 0,58 | 0,58 | 0,116 | 0 | 0 |
| Desde los cigüeñales | 0,63 | 0,399 | 0,294 | 0,189 | 0,735 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Resultado | 2,515 | 1,675 | 0,642 | 0,479 | 1,315 | 0,58 | 0,116 | | |
| % de evaporación | | 0,5 | 1,5 | | 0,8 | | 0,6 | | |
| | 2,515 | 1,66 | 0,632 | 0,479 | 1,304 | 0,58 | 0,115 | | |
| Requerido | 3,500 | 2,100 | 0,63 | | | | | 0,1 | 0,2 |
| Faltante | 0,985 | 0,44 | | | | | | 0,1 | 0,2 |

Carga de carbón = 0,985Kg

Ferrosilicio= 1.1kg

(Fuente: Autor)

ANEXO 5

ENSAYOS METALOGRAFICOS ACERO ASTM A36

ENSAYO A 500°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 72 HORAS SIN LLEGAR A LA FRACTURA

100µm

2mm

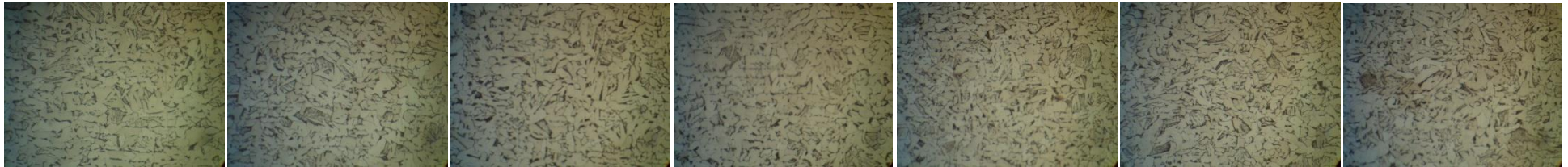
4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-A36-T500-M-1 Fotografías a 400X Ensayo #13



CP-A36-T500-M-2 Fotografías a 400X Ensayo #14



CP-A36-T500-M-3 Fotografías a 400X Ensayo #15

ENSAYO A 550°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 49H30

100µm

2mm

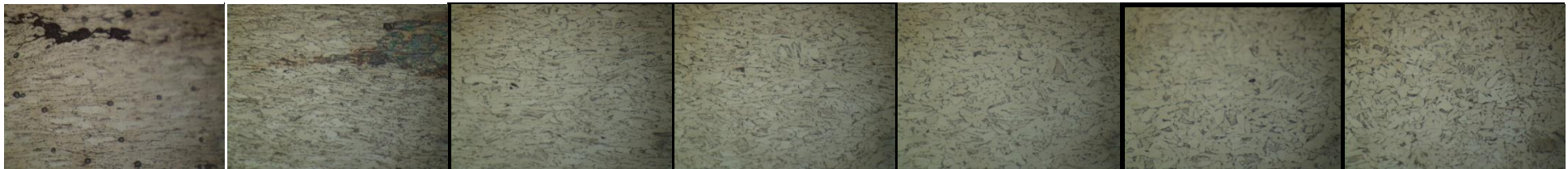
4mm

6mm

8mm

13mm

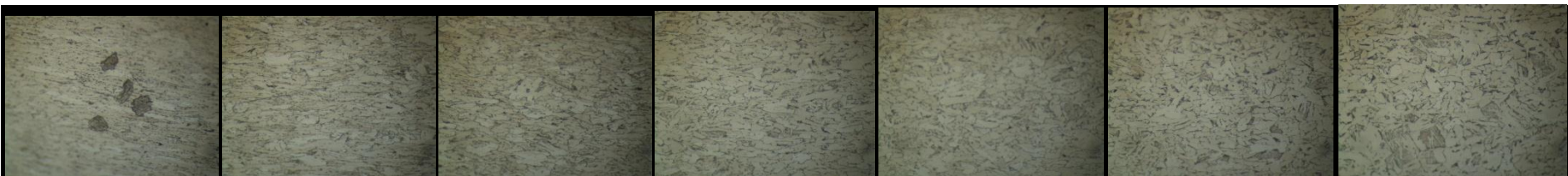
18mm



CP-A36-T550-M-1 Fotografías a 400X Ensayo #16



CP-A36-T550-M-2 Fotografías a 400X Ensayo #17



CP-A36-T550-M-3 Fotografías a 400X Ensayo #18

ENSAYO A 600°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 04H23

100μm

2mm

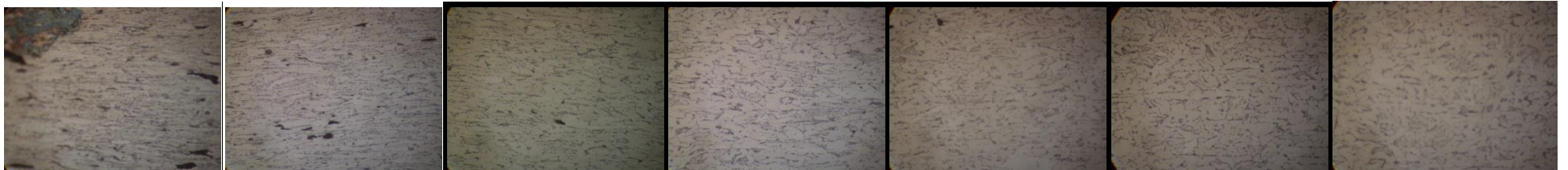
4mm

6mm

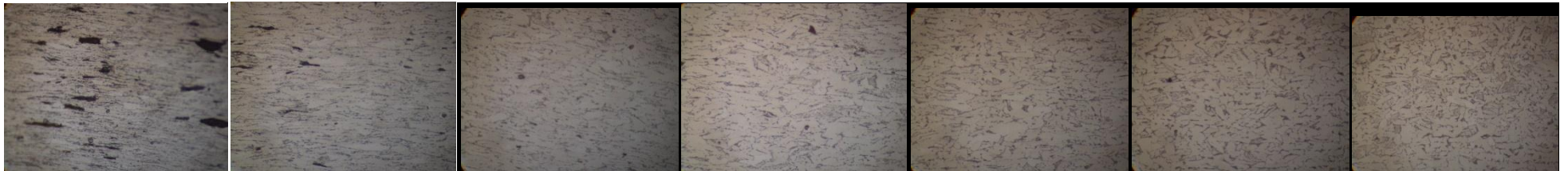
8mm

13mm

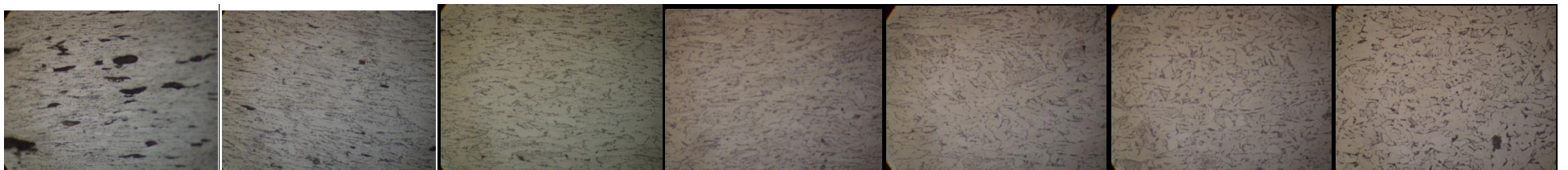
18mm



CP-A36-T600-M-1 Fotografías a 400X Ensayo #19



CP-A36-T600-M-2 Fotografías a 400X Ensayo #20



CP-A36-T600-M-3 Fotografías a 400X Ensayo #21

ENSAYO A 650°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 04H23

100 μm

2mm

4mm

6mm

8mm

13mm

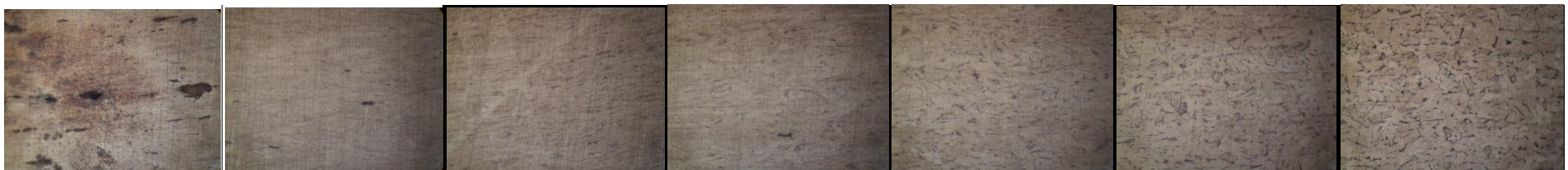
18mm



CP-A36-T650-M-1 Fotografías a 400X Ensayo #22



CP-A36-T650-M-2 Fotografías a 400X Ensayo #23



CP-A36-T650-M-3 Fotografías a 400X Ensayo #24

ANEXO 6

ENSAYOS METALGRÁFICOS FUNDICIÓN GRIS

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 500°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 40H50min

100μm

2mm

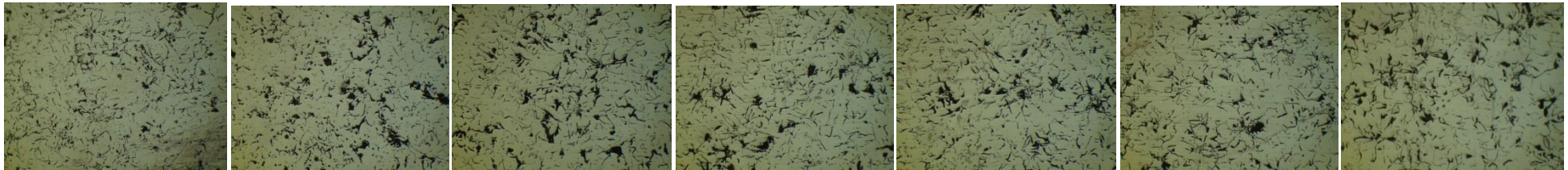
4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T500-CG-1

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T500-M-1

Fotografías a 400X Ensayo # 61

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 500°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 40H50min

100μm

2mm

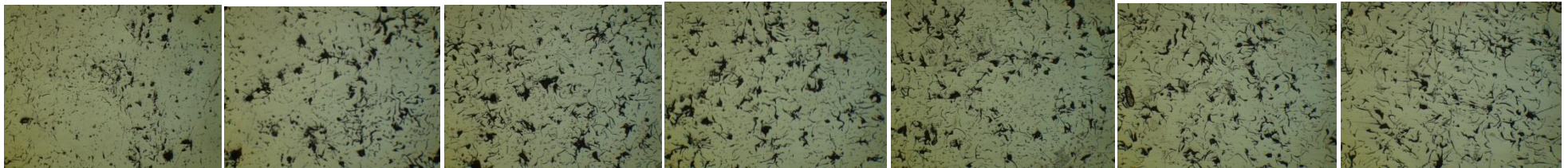
4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T500-CG-2

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T500-M-2

Fotografías a 400X Ensayo # 62

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 500°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 40H50min

100μm

2mm

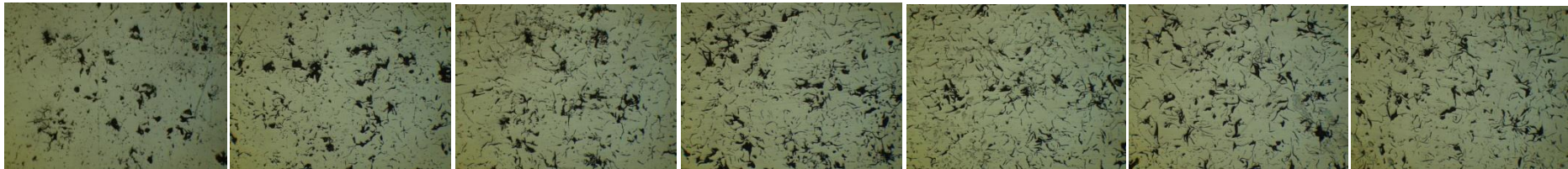
4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T500-CG-3

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T500-M-3

Fotografías a 400X Ensayo # 63

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 550°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 01H00

100µm

2mm

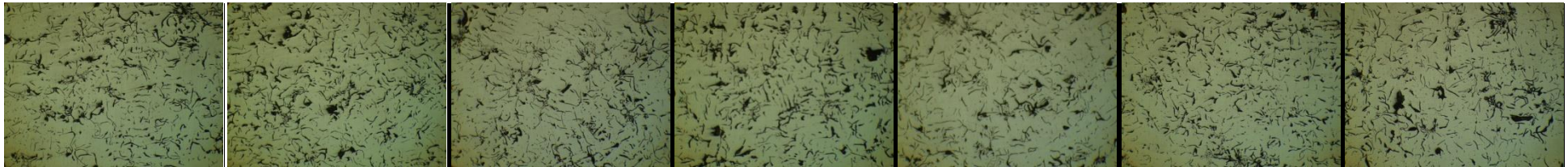
4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T550-CG-1

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T550-M-1

Fotografías a 400X Ensayo # 64

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 550°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 01H00

0mm

2mm

4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T550-CG-2

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T550-M-2

Fotografías a 400X Ensayo # 65

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 550°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 01H00

100μm

2mm

4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T550-CG-3

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T550-M-3

Fotografías a 400X Ensayo # 66

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 600°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 12 min

0mm

2mm

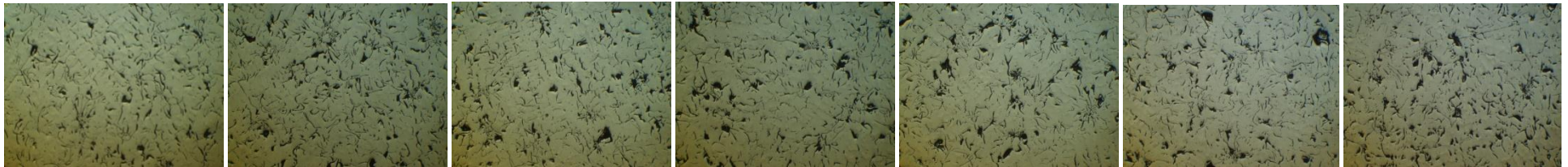
4mm

6mm

8mm

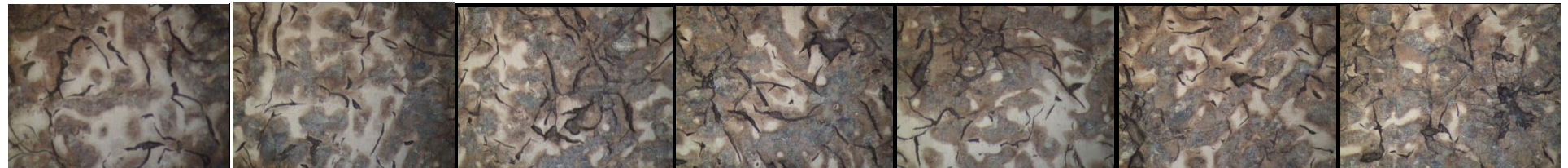
13mm

18mm



CP-FG-T600-CG-1

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T600-M-1

Fotografías a 400X Ensayo # 67

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 600°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 12 min

0mm

2mm

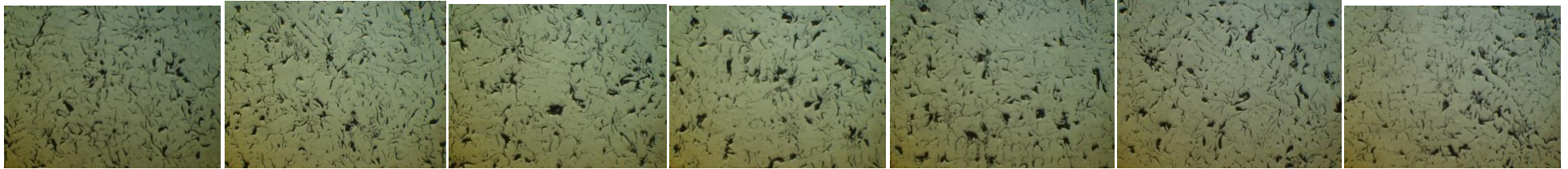
4mm

6mm

8mm

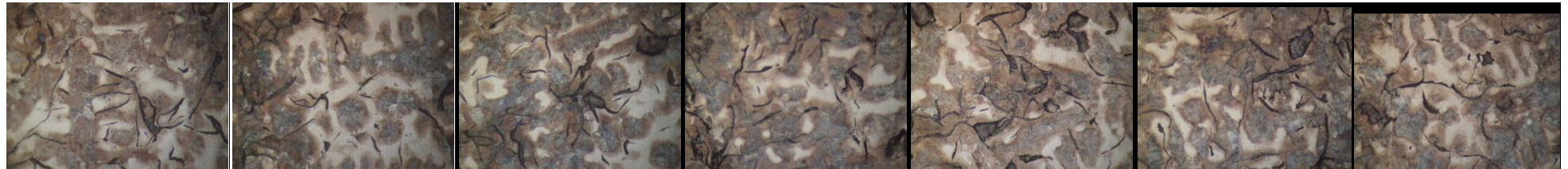
13mm

18mm



CP-FG-T600-CG-2

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T600-M-2

Fotografías a 400X Ensayo # 68

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 600°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 12 min

100μm

2mm

4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T600-CG-3

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T600-M-3

Fotografías a 400X Ensayo # 69

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 650°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 0,5min

100μm

2mm

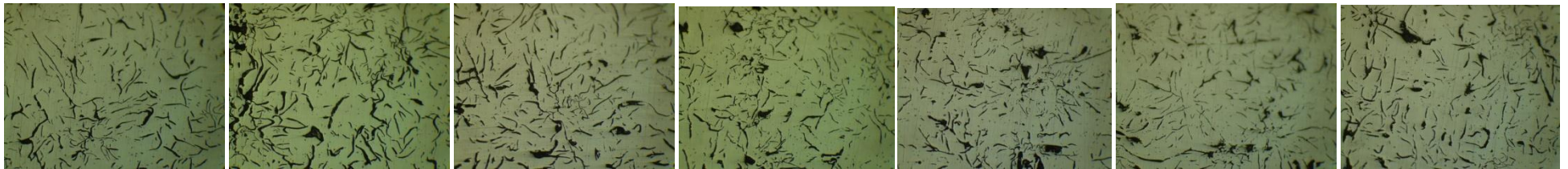
4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T650-CG-1

Fotografías a 100X Ensayo #



CP-FG-T650-M-1

Fotografías a 400X Ensayo # 70

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 650°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 0,5min

100µm

2mm

4mm

6mm

8mm

13mm

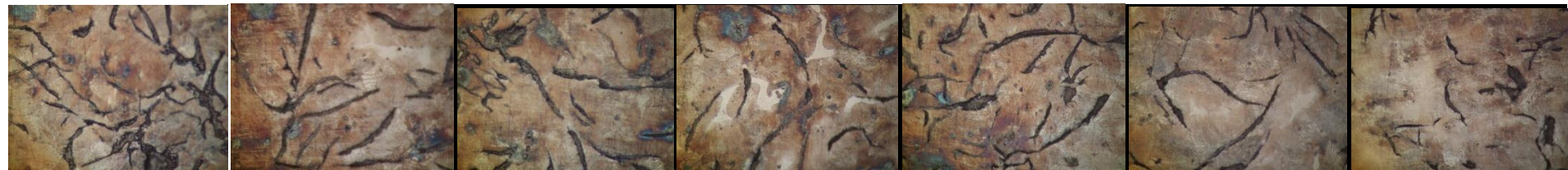
18mm



CP-FG-T650-CG-2

Fotografías a 100X

Ensayo #



CP-FG-T650-M-2

Fotografías a 400X

Ensayo # 71

CARACTERIZACIÓN DEL GRAFITO

ENSAYO A 650°C TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DEL ENSAYO 0,5min

100µm

2mm

4mm

6mm

8mm

13mm

18mm



CP-FG-T650-CG-3

Fotografías a 100X

Ensayo #

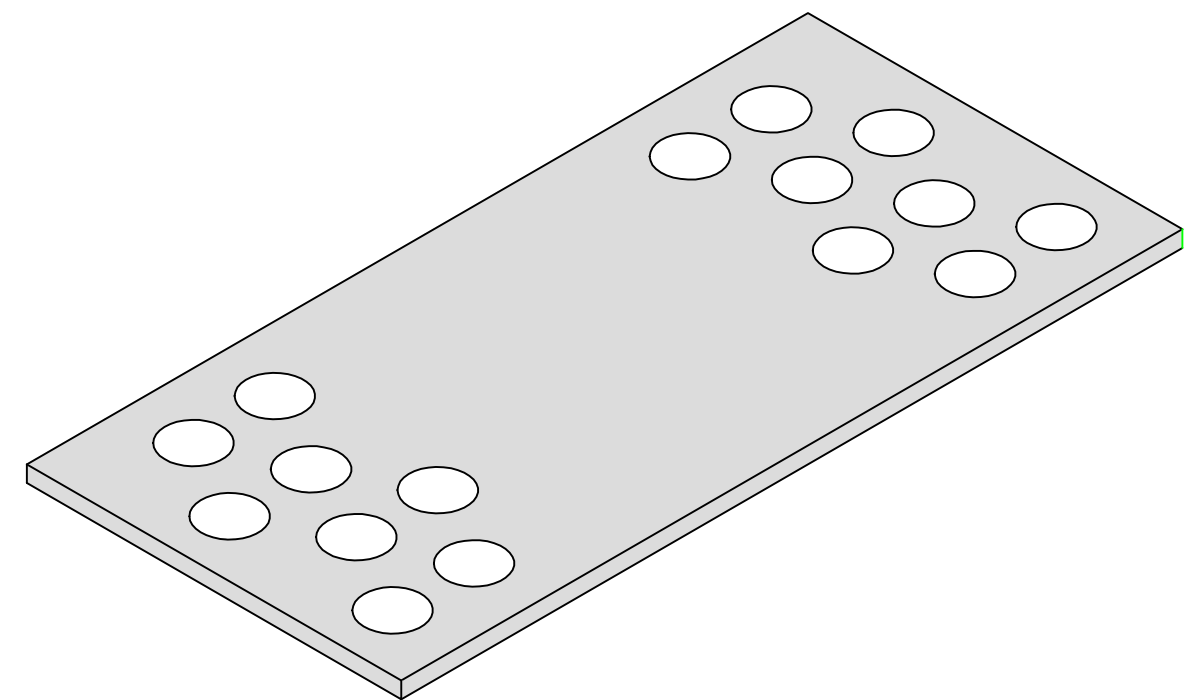
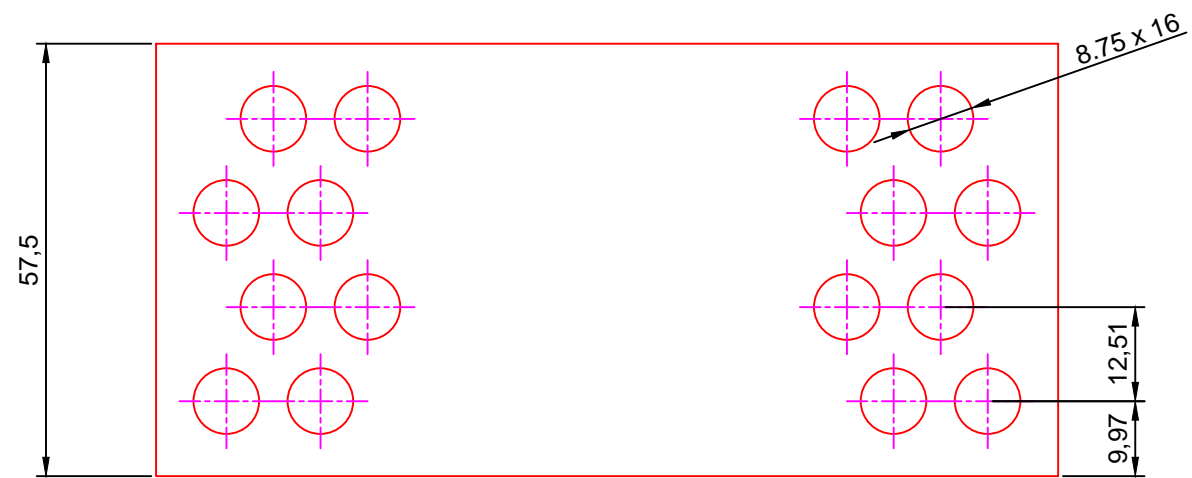
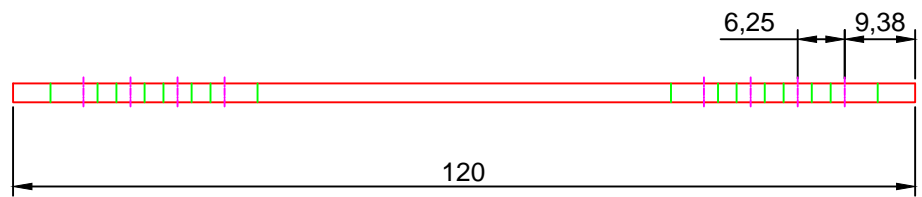


CP-FG-T650-M-3

Fotografías a 400X

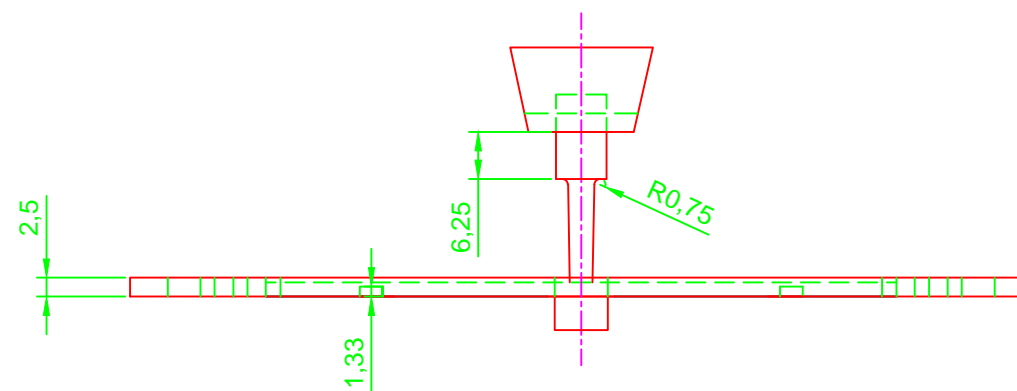
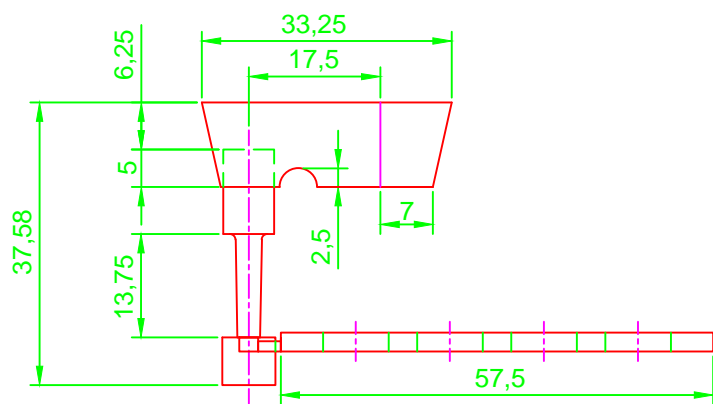
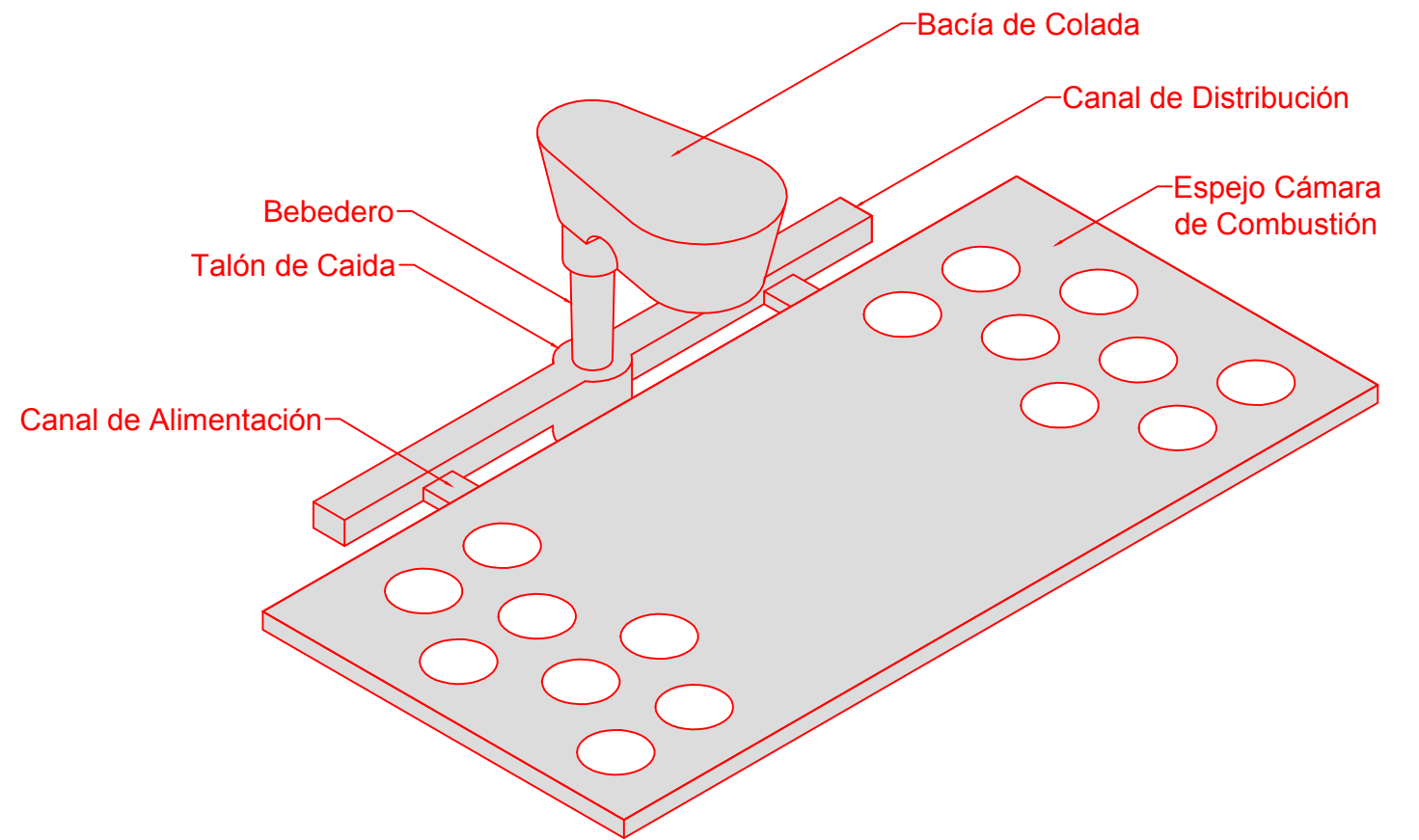
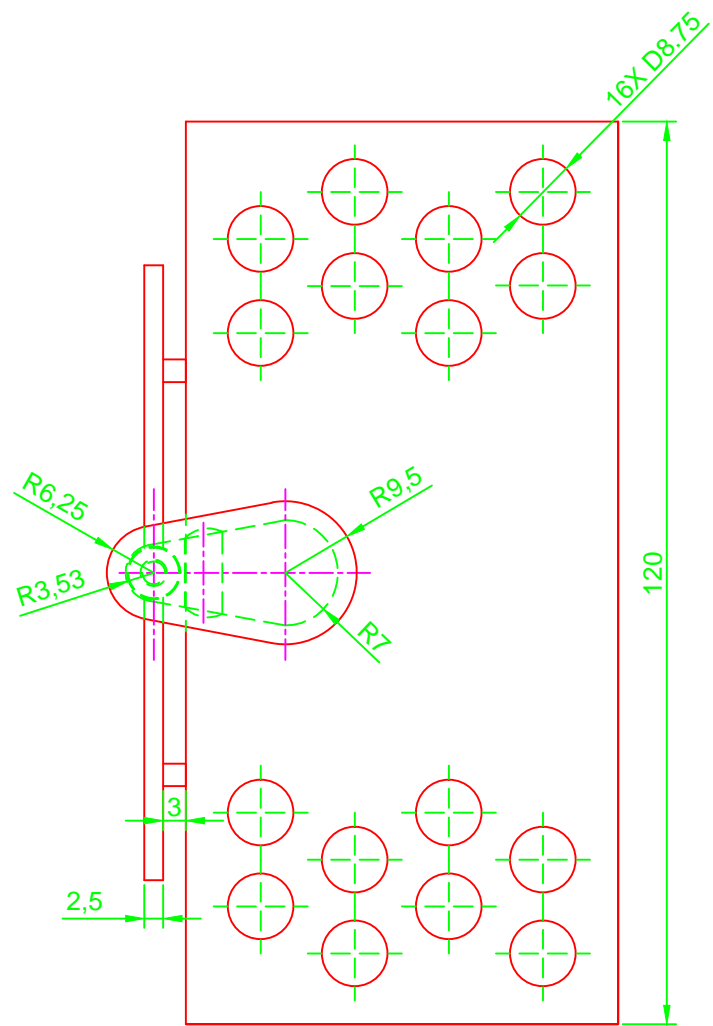
Ensayo # 72

ANEXO 7



| | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------|----------------|--|--|
| | | | | Tolerancias | Peso: | MATERIAL: | |
| | | | | ± 0.5 | | FUNDICION GRIS | |
| | | | | Fecha | Nombre | TÍTULO: | |
| | | | | Dib. 10/03/2013 | Ing. Caicedo I | ESPEJO PARA LA CÁMARA DE COMBUSTION. HORNO- INOX | |
| | | | | Rev. 10/03/2013 | Ing. Pastor M. | | |
| | | | | Apro. 10/03/2013 | Ing. Pastor M. | | |
| | | | | U T A | | N° DE DIBUJO | |
| | | | | Ing. Mecánica | | HOJA 1 DE 1 | |
| | | | | | | (Sustitución) | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | | |

ANEXO 8



| | | | | | | | | |
|---------|--------------|-------|--------|------------------|----------------|-------------------------|--------|---------------|
| | | | | Tolerancias | Peso: | MATERIAL: | | |
| | | | | ± 0.5 | | FUNDICION GRIS | | |
| | | | | Fecha | Nombre | TÍTULO: | Escala | |
| | | | | Dib. 10/03/2013 | Ing. Caicedo I | SISTEMA DE ALIMENTACIÓN | 1: 4 | |
| | | | | Rev. 10/03/2013 | Ing. Pastor M. | | | |
| | | | | Apro. 10/03/2013 | Ing. Pastor M. | | | |
| | | | | U T A | | Nº DE DIBUJO | | |
| | | | | Ing. Mecánica | | HOJA 1 DE 1 | | |
| Edición | Modificación | Fecha | Nombre | | | | | (Sustitución) |