



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTUDIO EN EL RANGO 500°C – 550°C DE LA DEGRADACIÓN  
MICROESTRUCTURAL DEL ACERO A36 Y FUNDICIÓN  
NODULAR PERLÍTICA POR EFECTO DE TERMOFLUENCIA”**

**LÓPEZ SAÑAY DENNIS PATRICIO**  
**OÑATE GUERRERO JIMMY DARÍO**

# **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO: TRABAJOS EXPERIMENTALES**

Previa a la obtención del Título de:

## **INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2017**

# **ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

## **CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2016-12-07

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**LÓPEZ SAÑAY DENNIS PATRICIO**

Titulado:

**“ESTUDIO EN EL RANGO 500°C – 550°C DE LA DEGRADACIÓN  
MICROESTRUCTURAL DEL ACERO A36 Y FUNDICIÓN NODULAR  
PERLÍTICA POR EFECTO DE TERMOFLUENCIA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos José Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes Msc.  
**DIRECTOR**

---

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez Msc.  
**ASESOR**

# **ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

## **CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2016-12-07

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**OÑATE GUERRERO JIMMY DARÍO**

Titulado:

**“ESTUDIO EN EL RANGO 500°C – 550°C DE LA DEGRADACIÓN  
MICROESTRUCTURAL DEL ACERO A36 Y FUNDICIÓN NODULAR  
PERLÍTICA POR EFECTO DE TERMOFLUENCIA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos José Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes Msc.  
**DIRECTOR**

---

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez Msc.  
**ASESOR**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

## EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** LÓPEZ SAÑAY DENNIS PATRICIO  
**TÍTULO DE LA TESIS:** “ESTUDIO EN EL RANGO 500°C – 550°C DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO A36 Y FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA POR EFECTO DE TERMOFLUENCIA”

**Fecha de Examinación:** 2017-08-09

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes. <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez. <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

\_\_\_\_\_  
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## **CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** JIMMY DARÍO OÑATE GUERRERO  
**TÍTULO DE LA TESIS:** “ESTUDIO EN EL RANGO 500°C – 550°C DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO A36 Y FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA POR EFECTO DE TERMOFLUENCIA”

**Fecha de Examinación:** 2017-08-09

### **RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes. <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez. <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro muy importante de mi vida a ese ser que aunque no se lo pueda ver ni sentir nos cuida y regala paz tranquilidad al corazón, alma, y espíritu, nos da esa fortaleza necesaria para vencer las adversidades que la vida nos pone DIOS gracias por todo.

A mis abuelos viejitos lindo Luis y Martha gracias recibirme en su hogar durante el lapso de estudio y compartir tanto, gracias por sostenerme cuando me desmoronaba por la ayuda de ustedes es quien soy ahora gracias de corazón.

A mis padres esas personas que me tuvieron paciencia y nunca perdieron la fe en mí que siempre me apoyaron y no desmayaron en apoyarme gracias.

A mi hermano ni alcahuete mi paño de lágrimas esa persona que no solo es hermano es amigo gracias por empujarme cuando tenía miedo.

A mis tios mis hermanos mayores gracias por ser mi hermana mayor Martha Elizabeth gracias por darme el ejemplo Lauro Marcelo a mis primos gracias por estar siempre al pendiente de mí.

A mi familia en general gracias por ese afecto incondicional.

A mis amigos a esas personas que me regalaron su amistad su afecto y buenos momentos a esas personas que hicieron con llevadera la vida politécnica con alegrías en los triunfos y con tristezas en las derrotas mijines se los quiere un montón a mis amigos de Ambato no me he olvidado de ustedes gracias por siempre estar al pendiente mío y brindarme cariño incondicional.

Dennis Patricio López Sañay.

## **DEDICATORIA**

A Dios y mis Angelitos, por ayudarme a llegar a este momento muy especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis padres Jimmy y Marcia por ser las personas que me han acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida que a más de ser mis padres son mis amigos.

A mi hermano Alex quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera profesional pese a las adversidades que hemos tenido.

A mi Abuelita Rosa el ser más sublime que puede existir.

A mi amada Ruth quien ha velado por mí durante este arduo camino para convertirme en un profesional significando mucho en mi vida.

A mis amigos, que gracias al compañerismo que formamos logramos llegar hasta el final del camino y que hasta el momento, seguimos siendo amigos.

Jimmy Darío Oñate Guerrero.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y mi Escuela Superior Politécnica de Chimborazo al igual que a mis profesores quienes me formaron como hombre de bien, A mis padres y hermano gracias por su apoyo, mis abuelitos por acogerme cuidarme y soportarme, a mis tutores quienes me ayudaron en la elaboración de nuestro trabajo y a todos quienes formaron parte de mi vida millón gracias.

Dennis Patricio López Sañay

## **AGRADECIMIENTO**

Me gustaría agradecer a Dios y la Virgen por sus bendiciones. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica y sus docentes, por acogerme y compartirme sus conocimientos, A mis padres gracias por su apoyo incondicional que día a día se esfuerzan por mí para que pueda ser un hombre de bien. A ti Ruth gracias por darme fuerzas en los momentos difíciles cuando nadie creía en mí tú fuiste ese empujón que necesitaba para ser lo que ahora soy, A mis maestros del saber, gracias por su tiempo, por su apoyo, así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional, a mis tutores quienes me ayudaron en la elaboración de nuestro trabajo, no me queda más que decir un Dios le pague a todos quienes estuvieron junto a mí en esos momentos de alegría y tristeza, en las buenas y en las malas les quedo infinitamente agradecido.

Jimmy Darío Oñate Guerrero

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El Trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricocientíficos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Dennis Patricio López Sañay

060479314-1

---

Jimmy Darío Oñate Guerrero

180463385-5

## RESUMEN

Se presentan los resultados que se recolectaron en el estudio de la afectación por el fenómeno denominado termofluencia en dos materiales metálicos denominados A36 y fundición nodular perlítica que en algunos países a este fenómeno también se lo conoce como creep. Este estudio se lo realiza ya que a nivel nacional no se conoce mucho sobre cómo afecta la termofluencia en estos dos materiales de común uso a nivel artesanal e industrial del país. Después de tabulado los resultados se dio a conocer el comportamiento, límites máximos de fatiga que pueden soportar los materiales a los rangos de temperaturas de 500°C – 550°C con la carga de 2448kgf ya que el fenómeno denominado termofluencia involucra estas dos variables físicas con esto se ayuda a la rama artesanal a tomar en cuenta este factor para el diseño de equipos que usen estos dos materiales y que estén sometidos a termofluencia. Se utilizó el método inductivo llegando a obtener 15 ensayos de termofluencia, 15 ensayos metalográficos, 15 ensayos de microdureza, a las temperaturas de 550°C, 545°C, 540°C, 535°C, 530°C para el acero A36 encontrando termofluencia a los 530°C debido a la presencia a nivel microestructural de las cavidades tipo W y R. Para la fundición nodular perlítica se realizaron 18 ensayos de termofluencia, 18 ensayos metalográficos, 18 ensayos de microdureza, a las temperaturas de 550°C, 540°C, 530°C, 520°C, 510°C, 500°C llegando a no encontrar termofluencia en ninguno de estos rangos ni cambios morfológicos a nivel microestructural. Se recomienda difundir la información de esta investigación al gremio industrial y profesional para que se obtenga diseños confiables y seguros de elementos estructurales que se construyen en acero A36 sometidos al fenómeno de termofluencia.

PALABRAS CLAVE: <MATERIALES METÁLICOS>, <ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA>, <TEMPERATURA>,<ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL>, <ENSAYOS METALOGRAFICOS>.

## Abstract

It is presented the results that were collected in the study of the effect of the phenomenon called thermofluence in two metallic materials called A36 and nodular perlite smelting, which in some countries this phenomenon is also known as creep. This study is carried out since in the country there is not much known about how affects the thermofluence in these two materials of common use, both artisanal and industrial. After tabulating the results were reported about behavior, maximum fatigue limits that can withstand materials at the temperature ranges of 500°C -550°C with the load of 2448kgf since the phenomenon called thermofluence involves these two physical variables. This helps the artisanal branch to take into account this factor for the design of equipment that use these two materials and that are subject to thermofluence. The inductive method was used to obtain 15 thermofluence tests, 15 metallographic tests, 15 microhardness tests, at temperatures of 550°C, 545°C, 540°C, 535°C, 530°C for A36 steel thermofluence at 530°C due to the presence at the microstructural level of the W and R cavities. For the perlite nodular cast iron, 18 thermofluence tests, 18 metallographic tests, 18 microhardness tests, were carried out at temperatures of 550°C, 540 °C, 530°C, 520°C, 510°C, 500°C, and there was not found thermofluence in any of them of these ranges or morphological changes at the microstructural level. It is recommended to disseminate the information of this research to the industrial and professional guild to obtain reliable and safe designs of structural elements that are built in A36 steel subjected to the thermofluence phenomenon.

**Keywords:** <METALLIC MATERIALS>, <THERMOFLUENCE TESTS>, <TEMPERATURE>, <MICROSTRUCTURAL ANALYSIS>, <METALLOGRAPHIC TESTS>.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes.	1
1.2	Planteamiento del problema.	2
1.3	Justificación.	3
1.3.1	<i>Justificación teórica.</i>	3
1.3.2	<i>Justificación metodológica.</i>	3
1.3.3	<i>Justificación práctica.</i>	4
1.4	Objetivos.	4
1.4.1	<i>Objetivo general.</i>	4
1.4.2	<i>Objetivos específicos.</i>	4
<b>2</b>	<b>MARCO REFERENCIAL DEL EFECTO DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO A36 Y LA FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA POR EFECTO DE TERMOFLUENCIA.</b>	<b>5</b>
2.1	Teorías fundamentales referentes al deterioro de los materiales por efecto de termofluencia.	5
2.2	Termofluencia.	5
2.2.1	<i>Temperatura.</i>	6
2.2.2	<i>Tensión.</i>	6
2.2.3	<i>Deformación.</i>	8
2.2.4	<i>Dilatación térmica.</i>	10
2.2.5	<i>Difusión térmica.</i>	11
2.3	La curva de termofluencia.	12
2.3.1	<i>Curva típica de termofluencia y sus etapas.</i>	13
2.4	Procesos que influyen para la deformación en termofluencia.	17
2.5	Termofluencia por dislocaciones.	17
2.6	Termofluencia por difusión.	19
2.7	Fractura debido a la termofluencia.	20
2.8	Acero A36.	22
2.9	Fundición nodular perlítica.	23
<b>3</b>	<b>ENSAYO DE TERMOFLUENCIA EN EL ACERO A36 Y LA FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA.</b>	<b>26</b>
3.1	Máquina para los ensayos de termofluencia.	26
3.1.1	<i>Sistema de carga.</i>	27
3.1.2	<i>Sistema de control de temperatura.</i>	27
3.1.3	<i>Para la toma de datos.</i>	30
3.2	Especímenes.	30
3.2.1	<i>Geometría y dimensiones de las probetas.</i>	31
3.2.2	<i>Geometría de referencia para la sección reducida.</i>	31
3.2.3	<i>Diagrama para obtener los especímenes mecanizado.</i>	35
3.2.4	<i>Probetas de acero A36.</i>	35
3.2.5	<i>Probetas de fundición nodular perlítica.</i>	37
3.3	Normativa para los ensayos de termofluencia.	44
3.3.1	<i>Diagrama del ensayo de termofluencia.</i>	44
<b>4</b>	<b>PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>	<b>45</b>
4.1	Ensayos en el acero A36.	48

4.1.1	<i>Ensayo de termofluencia en el acero A36.</i>	48
4.1.2	<i>Ensayos metalográficos en el acero A36.</i>	54
4.1.3	<i>Ensayos de microdureza en el acero A36.</i>	57
4.2	Ensayos en la fundición nodular perlítica	59
4.2.1	<i>Ensayos de termofluencia en la fundición nodular perlítica.</i>	59
4.2.2	<i>Ensayos metalográficos en la fundición nodular perlítica.</i>	64
4.2.3	<i>Ensayos de microdureza en la fundición nodular perlítica.</i>	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	74
5.1	Conclusiones	74
5.2	Recomendaciones	76
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	78

## LISTA DE TABLAS.

<b>Tabla 1-2:</b> Propiedades del Acero A36.....	23
<b>Tabla 2-2:</b> Propiedades de la fundición nodular perlítica.....	24
<b>Tabla 1-3:</b> Composición del acero A36.....	36
<b>Tabla 2-3:</b> Composición química de los elementos utilizados en la chatarra.....	40
<b>Tabla 1-4:</b> Termofluencia, metalografía y dureza en el acero A36.....	46
<b>Tabla 2-4:</b> Termofluencia, metalografía y dureza en la fundición nodular perlítica.....	47
<b>Tabla 3-4:</b> Ensayos de termofluencia.....	49
<b>Tabla 4-4:</b> Durezas obtenidas de las muestras de acero A36.....	58
<b>Tabla 5-4:</b> Ensayos de termofluencia.....	60
<b>Tabla 6-4:</b> Durezas obtenidas en el ensayo.....	72

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b> Viga sometida a Tensión .....	7
<b>Figura 2-2:</b> Barra sometida a esfuerzo de tracción.....	8
<b>Figura 3-2:</b> Deformación provocada por Cargas axiales.....	9
<b>Figura 4-2:</b> Deformación de una viga debido a tracción.....	10
<b>Figura 5-2:</b> Representación de una regla graduada a diferente temperatura.....	11
<b>Figura 6-2:</b> Difusión de átomos por vacancia.....	12
<b>Figura 7-2:</b> Difusión intersticial.....	12
<b>Figura 8-2:</b> Curva de termofluencia.....	14
<b>Figura 9-2:</b> Transformaciones microestructurales que ocurren en el creep.....	15
<b>Figura 10-2:</b> Influencia de la tensión $\sigma$ y la temperatura T.....	16
<b>Figura 11-2:</b> Ascenso de una dislocación.....	18
<b>Figura 12-2:</b> Movimiento de ascenso y deslizamiento.....	18
<b>Figura 13-2:</b> Representación esquemática de la termofluencia por difusión.....	19
<b>Figura 14-2:</b> Movimiento de ascenso y deslizamiento.....	20
<b>Figura 15-2:</b> Formación de cavidades tipo W.....	21
<b>Figura 16-2:</b> Formación de cavidades tipo R.....	22
<b>Figura 17-2:</b> Horno eléctrico propiedad de Fundilaser.....	24
<b>Figura 18-2:</b> Microestructura de la fundición nodular perlítica.....	25
<b>Figura 1-3:</b> Máquina para los ensayos de termofluencia y sus partes.....	26
<b>Figura 2-3:</b> Esquema de carga constante aplicada en los ensayos de termofluencia...	27
<b>Figura 3-3:</b> Sistema de calentamiento y control de temperatura on-off.....	28
<b>Figura 4-3:</b> Horno eléctrico y con el nuevo controlador de temperatura.....	28
<b>Figura 5-3:</b> Prueba del controlador de temperatura y sus componentes.....	29
<b>Figura 6-3:</b> Nuevo sistema de control de temperatura.....	29
<b>Figura 7-3:</b> Calibrador para la toma de datos de la deformación.....	30
<b>Figura 8-3:</b> Esquema del espécimen plano de sección reducida para los Ensayos. ....	31
<b>Figura 9-3:</b> Sección transversal .....	32
<b>Figura 10-3:</b> Nomograma cálculo del ancho de B.....	34
<b>Figura 11-3:</b> Dimensione de la probeta .....	34
<b>Figura 12-3:</b> Bloque de quilla para probetas de ensayo.....	38
<b>Figura 13-3:</b> Diagrama de la quilla modificada.....	38
<b>Figura 14-3:</b> Molde con medidas modificadas previa a la fundición.....	39
<b>Figura 15-3:</b> Arenas de moldeo para la fundición.....	39
<b>Figura 16-3:</b> Taller de arenas de moldeo FUNDILASER.....	40
<b>Figura 17-3:</b> Crisol de horno eléctrico “Fundilaser”.....	41
<b>Figura 18-3:</b> Bloque de fundición obtenida.....	41
<b>Figura 19-3:</b> Bloque de fundición sin vertederos y cortada.....	42

<b>Figura 20-3:</b> Primer mecanizado del bloque en cepilladora.....	42
<b>Figura 21-3:</b> Mecanizado en fresadora de las probetas. ....	43
<b>Figura 22-3:</b> Probetas obtenidas a partir del bloque de fundición.....	43
<b>Figura 1-4:</b> Especímenes de acero 36 ensayados. ....	48
<b>Figura 2-4:</b> Probeta ensayada cortada para ensayos metalográficos. ....	54
<b>Figura 3-4:</b> Microestructura a 100µm de la fractura a 550°C.....	55
<b>Figura 4-4:</b> Microestructura a 100µm de la fractura a 545°C. ....	56
<b>Figura 5-4:</b> Microestructura a 100µm de la fractura a 540°C.....	56
<b>Figura 6-4:</b> Microestructura a 100µm de la fractura a 535°C. ....	57
<b>Figura 7-4:</b> Microestructura a 100µm de la fractura a 535°C. ....	57
<b>Figura 8-4:</b> Especímenes de fundición nodular perlítica ensayados. ....	60
<b>Figura 9-4:</b> Probeta ensayada cortada para ensayos de termofluencia. ....	64
<b>Figura 10-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 500°C sin atacar y atacada.....	65
<b>Figura 11-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 500°C sin atacar y atacada.....	66
<b>Figura 12-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 500°C sin atacar y atacada.....	66
<b>Figura 13-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 510°C sin atacar y atacada.....	66
<b>Figura 14-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 510°C sin atacar y atacada.....	67
<b>Figura 15-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 510°C sin atacar y atacada.....	67
<b>Figura 16-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 520°C sin atacar y atacada.....	67
<b>Figura 17-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 520°C sin atacar y atacada.....	68
<b>Figura 18-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 520°C sin atacar y atacada.....	68
<b>Figura 19-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 530°C sin atacar y atacada.....	68
<b>Figura 20-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 530°C sin atacar y atacada.....	69
<b>Figura 21-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 530°C sin atacar y atacada.....	69
<b>Figura 22-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 540°C sin atacar y atacada.....	69
<b>Figura 23-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 540°C sin atacar y atacada.....	70
<b>Figura 24-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 540°C sin atacar y atacada.....	70
<b>Figura 25-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 550°C sin atacar y atacada.....	70
<b>Figura 26-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 550°C sin atacar y atacada.....	71
<b>Figura 27-4:</b> Microestructura 100µm de fractura a 550°C sin atacar y atacada.....	71

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-4:</b>	Codificación de los especímenes y probetas. ....	45
<b>Gráfico 2-4:</b>	Curvas correspondientes a los ensayos de 550°C Acero A36.....	49
<b>Gráfico 3-4:</b>	Curvas correspondientes a los ensayos de 545°C Acero A36.....	50
<b>Gráfico 4-4:</b>	Curvas correspondientes a los ensayos de 540°C Acero A36.....	50
<b>Gráfico 5-4:</b>	Curvas correspondientes a los ensayos de 535 ° C Acero A36.....	51
<b>Gráfico 6-4:</b>	Curvas correspondientes a los ensayos de 530°C Acero A36.....	51
<b>Gráfico 7-4:</b>	Probeta ensayada a termofluencia, área calculada en AutoCAD.....	52
<b>Gráfico 8-4:</b>	Probeta ensayada a termofluencia, área calculada en AutoCAD.....	53
<b>Gráfico 9-4:</b>	Probeta ensayada a termofluencia, área calculada en AutoCAD.....	53
<b>Gráfico 10-4:</b>	Metalografía a 500x del Acero A36.....	55
<b>Gráfico 11-4:</b>	Microdureza a partir de la fractura Acero A36. ....	58
<b>Gráfico 12-4:</b>	Curvas de los ensayos de 550°C fundición nodular perlítica.....	61
<b>Gráfico 13-4:</b>	Curvas de los ensayos de 540°C fundición nodular perlítica.....	61
<b>Gráfico 14-4:</b>	Curvas de los ensayos de 530°C fundición nodular perlítica.....	62
<b>Gráfico 15-4:</b>	Curvas de los ensayos de 520°C fundición nodular perlítica.....	62
<b>Gráfico 16-4:</b>	Curvas de los ensayos de 510°C fundición nodular perlítica.....	63
<b>Gráfico 17-4:</b>	Curvas de los ensayos de 500°C fundición nodular perlítica.....	63
<b>Gráfico 18-4:</b>	Metalografía a 100x fundición nodular perlítica.....	65
<b>Gráfico 19-4:</b>	Microdureza a partir de la fractura fundición nodular perlítica. ....	73

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

### 1.1 Antecedentes.

Los materiales al estar sometidos a una deformación de tipo plástica producida por la combinación de un esfuerzo que puede ser en ciertos casos menor a su coeficiente de resistencia a la fluencia y temperaturas relativamente altas en intervalos prolongados de tiempo llamándose termofluencia, produciendo así en el material un movimiento de las dislocaciones, las cuales son causantes de movimientos atómicos y cambios a nivel microestructural.

Acero A36 es una aleación de bajo carbono y elementos aleantes, es muy utilizado en la construcción, la manufactura y muchas otras aplicaciones industriales, es de común uso en el mercado Ecuatoriano por su bajo costo y por ser muy fácil encontrarlo en los centros de distribución a nivel nacional. Es un material que presenta una favorable condición para procesos de soldadura, es propenso a la corrosión (Oxidación), las bondades de este material es que ofrecen una buena combinación entre resistencia y fuerza, por tratarse de un acero que tiene un bajo porcentaje de carbono y elementos aleantes. El acero A36 en el mercado nacional se comercializa con una amplia variedad de presentaciones como: planchas, perfiles estructurales, tubos, barras, láminas, platinas, ángulos.

La fundición nodular perlítica es un material ferroso de común uso en la industria mecánica por su bajo costo y su relativa facilidad de maquinabilidad, su nombre se debe a la presencia de nódulos de grafito presente en su microestructura. Las características físicas y propiedades mecánicas dependen de factores tales como: la composición química, tratamiento térmico, tiempo de enfriamiento, matrices, tamaño y forma del grafito. La fundición nodular debido a la forma del grafito en nódulos presenta unas buenas ventajas ya que le hacen resistentes a la atracción y una mayor tenacidad en comparación de las otras variedades de fundiciones, uno de los más grandes beneficios que diferencia a la fundición nodular en el momento de fabricarla es que se obtiene de

manera directa, ya que no necesita de tratamientos térmicos posteriores. El grafito es un mineral de carbón cristalizado con estructura en forma de hexágono y se hallan en reservas y depósitos de la naturaleza, una de las aplicaciones del grafito está en los rodamientos y pistones al ser un buen lubricante.

En el siguiente trabajo experimental se analizará el estado del arte del fenómeno denominado termofluencia también conocido como creep, este término es relativamente nuevo en el Ecuador ya que pocos trabajos se han desarrollado a nivel de América del Sur, pero en América del Norte se han expuesto trabajos importantes sobre el tema en países como México y EEUU, debido a su alta producción industrial en el campo de la construcción de equipos que trabajan directa o indirectamente al fenómeno denominado termofluencia.

La importancia de este trabajo de investigación hace énfasis de desarrollo para su estudio, ya que en el mercado Ecuatoriano el acero A36 y la fundición nodular perlítica son muy utilizados por su facilidad de comercialización y fabricación, debido que en la gran parte de distribuidores a nivel nacional se lo expende, y es gracias a ello que es muy utilizado en la industria y a nivel de nuestros artesanos, el uso de estos materiales es muy diverso en aplicaciones varias de la ingeniería a nivel nacional ya sea en construcción de equipos, equipamiento y elementos mecánicos que están sometidos al fenómeno de termofluencia, entre ellos se hallan: hornos, intercambiadores de calor, calderas, etc. las cuales en su gran mayoría se usan en el sector energético, industrial, agrícola, alimenticio, químico, hospitalario, turístico de nuestro país, entre otros. Los equipos construidos con acero A36 y fundición nodular perlítica se vuelven costosos ya que se sobredimensionan al desconocimiento de fallas por termofluencia, lo que hacen que los equipos sean robustos, además los factores que producen la falla de estos equipos genera paradas de producción y por ende pérdidas económicas, por eso se hace importante el análisis experimental del material sometido a altas temperaturas.

## **1.2 Planteamiento del problema.**

Al ser el acero A36 y la fundición nodular perlítica productos muy comerciales y de fácil acceso en el medio nacional entonces se hace necesario analizar y conocer las

características de los materiales cuando se someten a termofluencia, con el afán que el constructor que ocupe como materia prima cualquiera de estos materiales él mismo pueda brindar estándares de seguridad y confiabilidad en sus productos.

Teniendo en cuenta como base los trabajos de investigación ya realizados sobre el tema y como referente la tesis “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” como autor el Ingeniero Jorge Isaías Caicedo Reyes. El rango de temperaturas de análisis va desde los 500°C a 550°C para someter al acero A36 y la vez hacer pruebas con otro tipo de fundición como es la fundición nodular perlítica a termofluencia debido a que en ese rango de temperatura está comprobado que estos colapsan.

### **1.3 Justificación.**

#### **1.3.1 *Justificación teórica.***

La termofluencia en los materiales ferrosos produce descarburación de los mismos, por ende cambios a nivel microestructural y físicos, los cambios se dan en mayor o menor proporción dependiendo del tipo de material ferroso, estos cambios se hacen evidentes de manera visual ya que éste pierde espesor y si los materiales pierden espesor estos reducen de manera significativa las propiedades físicas, conllevando al colapso del material debido a la descarburación y cambios micro estructurales.

#### **1.3.2 *Justificación metodológica.***

Al poner en consideración el presente trabajo de investigación el mismo que aportará con datos cuantitativos y cualitativos del comportamiento del acero A36 y la fundición nodular perlítica frente al fenómeno denominado termofluencia con la realización de ensayos bajo sus respectivas normas en la máquina para termofluencia, la misma que se encuentra en a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH.

### **1.3.3 Justificación práctica.**

Los datos que arrojen los análisis de los ensayos realizados servirá para saber cuál es el límite de trabajo óptimo del acero A36 y la fundición nodular perlítica que están sometidos a termofluencia, siendo de suma importancia que se debería tomar en cuenta este trabajo experimental por parte del gremio artesanal e industrial, ya que actualmente uno de los métodos que usan los artesanos e industriales para la fabricación de los equipos es sobredimensionar los mismos.

## **1.4 Objetivos.**

### **1.4.1 Objetivo general.**

- Analizar el comportamiento del acero A36 y la fundición nodular perlítica frente al fenómeno de termofluencia mediante análisis experimental para valorar su degradación microestructural.

### **1.4.2 Objetivos específicos:**

Recopilar información de tipo académico y bibliográfico acerca de los estudios realizados previamente acerca de termofluencia para establecer el estado del arte en el tema expuesto.

Realizar la fundición previa a la mecanización de las probetas de fundición nodular perlítica bajo las especificaciones ASTM A126-TIPO B, ASTM A339-55.

Realizar los ensayos de termofluencia en los rangos de temperatura de 500°C a 550°C, en los especímenes de acero A36 y fundición nodular perlítica construídos con la norma ISO 6892 en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la (ESPOCH).

Realizar los análisis metalográficos y de microdureza de las probetas extraídas de los especímenes sometidos a termofluencia en el Laboratorio de Metalurgia e Ingeniería de Materiales de la (ESPOCH).

## **CAPÍTULO II**

### **2 MARCO REFERENCIAL DEL EFECTO DE LA DEGRADACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL ACERO A36 Y LA FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA POR EFECTO DE TERMOFLUENCIA.**

#### **2.1 Teorías fundamentales referentes al deterioro de los materiales por efecto de termofluencia.**

La combinación de parámetros físicos como la temperatura y la tensión durante tiempos prolongados hacen una notoria afectación en las propiedades de los materiales ya sean estos metálicos o no metálicos, uno de los cambios principales y de mayor énfasis se ve en su microestructura y propiedades físicas.

Existen un sinnúmero de componentes metálicos que son usados en varias aplicaciones a nivel industrial, estos al ser sometidas a la combinación de parámetros como son temperatura y tensión tienen un efecto de termofluencia, estos pueden verse seriamente afectados impidiendo su funcionalidad para la que fueron diseñados y reduciendo el rendimiento tanto de la máquina como del componente mecánico y estructuras metálicas a la que fueron diseñadas.

#### **2.2 Termofluencia.**

Si a un material metálico o aleación se la somete a la combinación de los parámetros físicos como son la tensión y temperatura, puede someterse a una deformación plástica progresiva en función del tiempo. Esta deformación se denomina termofluencia más conocida como creep. La termofluencia es un factor limitante en muchos diseños de ingeniería cuando los elementos mecánicos en cuestión operan a temperaturas elevadas, en ese caso, la termofluencia define el tiempo en servicio máximo y la vida útil de la pieza antes de que ésta llegue a colapsar y supere la deformación plástica permitida.

### **2.2.1 *Temperatura.***

Un parámetro importante en el fenómeno denominado termofluencia es la magnitud física llamada temperatura este parámetro nos permite medir las sensaciones de frío o calor.

La temperatura de un cuerpo es una medida de su estado relativo de calentamiento o enfriamiento, cuando tocamos un cuerpo, nuestro sentido del tacto nos permite hacer una estimación del grado de calentamiento o enfriamiento del cuerpo con respecto a la parte de nuestra piel que está en contacto con dicho cuerpo. Esta estimación del tacto es demasiado limitada e imprecisa para ser de valor en los trabajos técnicos y científicos. (Peña, 2007 pág. 3)

Siendo la temperatura una magnitud física medible se debe utilizar instrumentos que pueda dar los valores de temperatura y se los pueda interpretar. Para efectuar medidas de temperatura se necesita un instrumento llamado termómetro y este puede ser de diferente tipo:

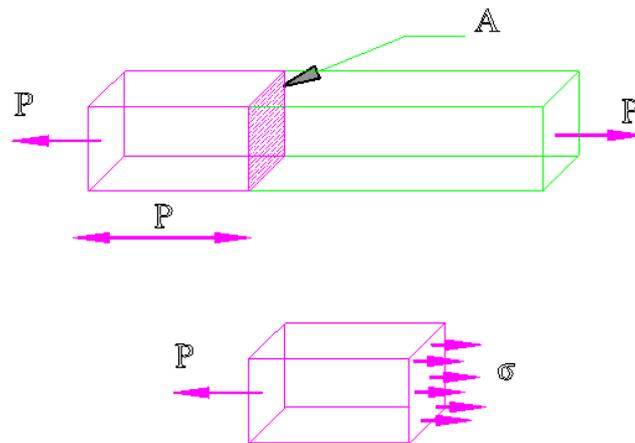
- Termómetro de líquido
- Termómetro de resistencia
- Termómetro de par resistencia

Estos instrumentos dan lecturas ya sea directa e indirectamente pero existen diferentes tipos de escalas que varían de acuerdo a su referencia, un ejemplo es como actúa la escala CELSIUS o Centígrada, que es la escala que hace referencia al punto de fusión del hielo y el punto de ebullición del agua variando de 0°C A 100°C respectivamente.

### **2.2.2 *Tensión.***

Otro parámetro importante que está presente en el fenómeno de termofluencia es la tensión, que no es más que la fuerza que se aplica por la unidad de área presente en el entorno de un punto que contiene un cuerpo o material.

Se presenta cuando, sobre un elemento actúan dos fuerzas iguales pero en sentido contrario y que tienden a alargar el material. Para tener únicamente tracción, el esfuerzo debe situarse en el centro de gravedad de la sección. Las tensiones se estudian en el sentido del corte. Si cortamos una sección perpendicular al esfuerzo a una distancia  $x, y$ , separando el corte tenemos que, el esfuerzo  $P$  nos dará tensiones  $\sigma$ . Suponemos que las tensiones son uniformes, es decir, iguales en todos los puntos de la sección. (Badiola, 2004 pág. 9).



**Figura 1-2:** Viga sometida a Tensión

Fuente: (Badiola, 2004 pág. 9)

Donde:

$P$  = Fuerza axial [N].

$\sigma$  = Esfuerzo [ $\text{N}/\text{m}^2$ ].

$A$  = Área Transversal [ $\text{m}^2$ ]

La tensión es un esfuerzo del tipo normal producido por fuerzas axiales, siendo este parámetro físico importante tanto en el estudio de la termofluencia como en la resistencia del material ya que si la fuerza axial es muy elevada el material sufre una considerable deformación. Al estar sometido un material a un ensayo de tensión como establece la norma ASTM E8, E8M-09 se puede especificar la resistencia elástica, plasticidad y su resistencia última en presencia de fuerzas que actúan en dirección uniaxial.

La barra de la Figura 2-2 está sometida a un esfuerzo de tracción  $\sigma_a$ . Si se corta la barra según una sección BB perpendicular a su eje, la resultante de las tensiones que actúan sobre la sección de corte, de área  $A_c$ , será igual a  $\sigma_a$ . Suponiendo una distribución uniforme de  $\sigma_a$  a lo largo de la superficie, puede introducirse el concepto de fuerza por unidad de superficie,  $\sigma_a$  llamado esfuerzo. (Badiola, 2004 pág. 6).

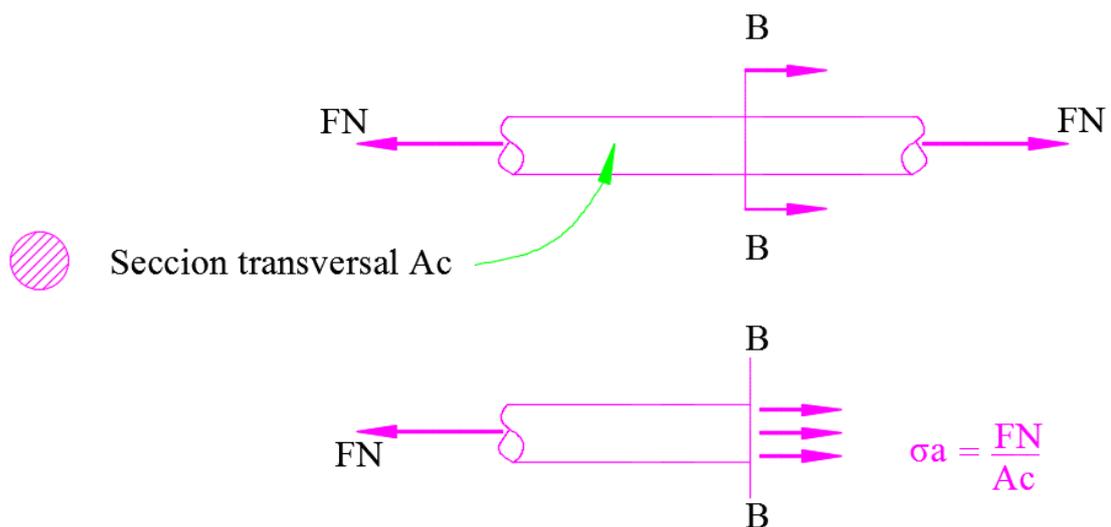
$$\sigma_a = \frac{F_N}{A_C} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_a$  = Esfuerzo [N/m<sup>2</sup>]

$F_N$  = Fuerza [N]

$A_C$  = Área Transversal [m<sup>2</sup>]



**Figura 2-2:** Barra sometida a esfuerzo de tracción.

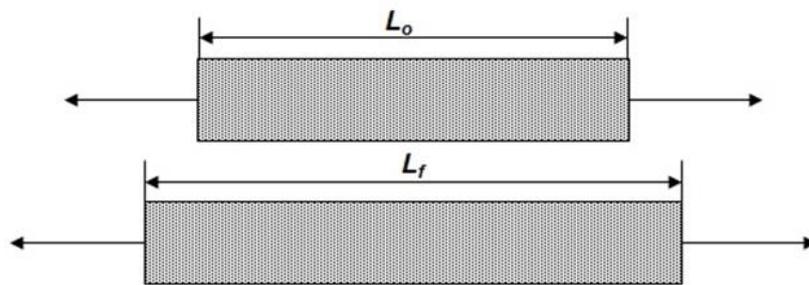
Fuente: (Badiola, 2004 pág. 7)

### 2.2.3 Deformación.

La deformación es otro tipo de falla menos evidente, pero por eso no menos importante. Un material al estar sometido a cargas de distinta naturaleza ya sean moderadas o excesivas puede sufrir cambios significativos en su forma y tamaño que afectarían el funcionamiento y desempeño del mismo, la deformación está relacionada con las propiedades mecánicas de un material al estar sometido a diferentes tipos de carga.

### 2.2.3.1 Deformación provocada por cargas axiales.

Una barra sometida a cargas axiales además de experimentar deformación según la dirección de la fuerza, el cuerpo también se deforma en las direcciones normales a ella. La tracción provoca alargamiento con disminución de la sección transversal en la zona donde se concentran los esfuerzos. (Mayori, 2008)



**Figura 3-2:** Deformación provocada por Cargas axiales

Fuente: (Salazar P. Castro S., 2012)

Para el cálculo de la deformación simple se necesita la siguiente ecuación:

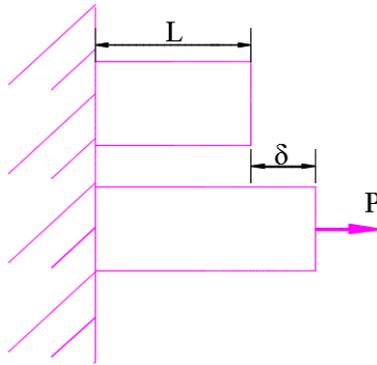
$$\delta = L_f - L_0 \quad (2)$$

Donde:

$\delta$  = Deformación simple [m]

$L_f$  = Longitud final [m]

$L_0$  = Longitud inicial [m]



**Figura 4-2:** Deformación de una viga debido a tracción.

Fuente: (Salazar P. Castro S., 2012)

Donde:

$P$  = Fuerza [N].

$\delta$  = Deformación [mm]

Para el cálculo de la deformación unitaria que provocan las cargas de tipo axiales la ecuación siguiente:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (3)$$

Donde:

$\delta$  = Deformación simple [m]

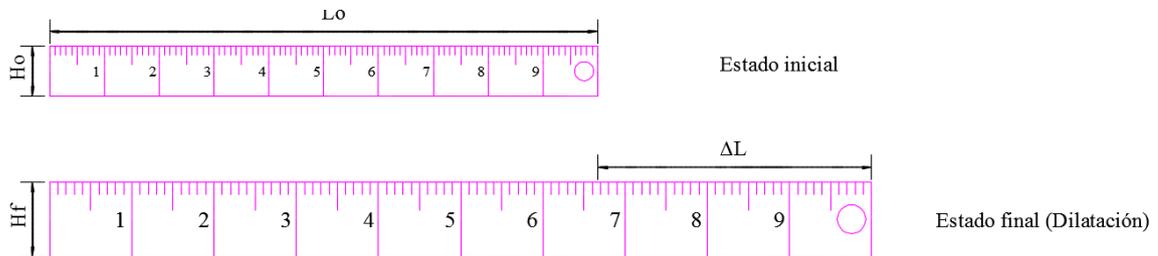
$\varepsilon$  = Deformación unitaria [ad.]

#### **2.2.4 Dilatación térmica.**

Dilatación se denomina al incremento o variación de cualquiera de sus medidas en su longitud o alguna otra dimensión de un cuerpo o material en presencia de un aumento de temperatura.

La dilatación es el cambio de cualquier dimensión lineal del sólido tal como su longitud, alto o ancho, que se produce al aumentar su temperatura. Generalmente se observa la dilatación lineal al tomar un trozo de material en forma de barra o alambre de pequeña sección, sometido a un cambio de temperatura, el aumento que experimentan las otras dimensiones son despreciables frente a la longitud. Si la longitud de esta dimensión

lineal es  $L_0$ , a la temperatura  $t_0$  y se aumenta la temperatura a  $t$ , como consecuencia de este cambio de temperatura, que llamaremos  $\Delta t$  se aumenta la longitud de la barra o del alambre produciendo un incremento de longitud que simbolizaremos como  $\Delta L$ . (Corace, 2009 pág. 2)



**Figura 5-2:** Representación de una regla graduada a diferente temperatura.

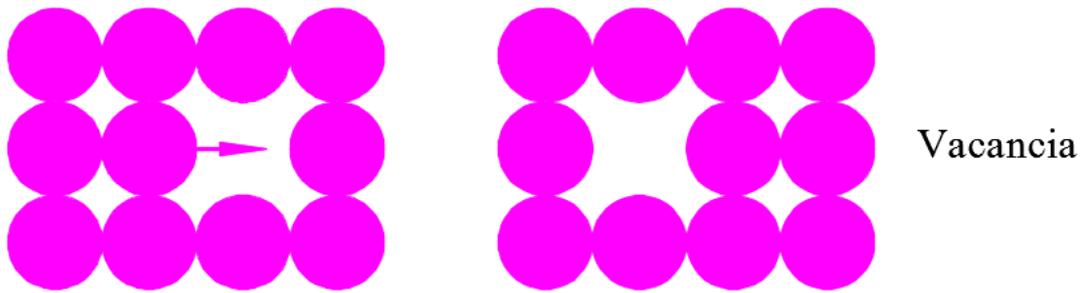
Fuente: (Corace, 2009 pág. 6)

### 2.2.5 *Difusión térmica.*

La difusión es el movimiento de los átomos en un material. Los átomos se mueven de una manera predecible, tratando de eliminar diferencias de concentración y de producir una composición homogénea y uniforme (Askerland, 1998 pág. 108).

La difusión térmica es una propiedad característica de cada material para describir las propiedades de conducción de calor de cada elemento en presencia de condiciones estacionarias. La medida de difusión cuantifica cuán rápido cierto material reacciona a los cambios de temperatura. Esta propiedad se relaciona directamente con la conductividad térmica y el tipo de material, pese que un factor que influye en el valor de la difusión es la densidad característica del material.

Los átomos de los materiales tienden a moverse en presencia de temperatura de una posición a otra, a este movimiento se lo conoce como autodifusión. El movimiento de un átomo y abandono del sitio original para ocupar uno cercano pero de otra red se conoce como difusión por vacancia como muestra la figura 6-2, si este número aumenta por la presencia de temperatura puede determinar el tamaño de la difusión de átomos sustituciones.

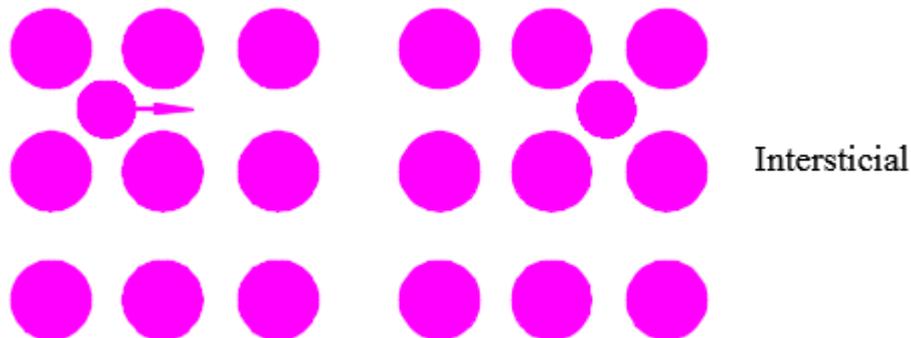


**Figura 6-2:** Difusión de átomos por vacancia.

Fuente: (Askerland, 1998 pág. 108)

Cuando en la estructura cristalina está presente un pequeño átomo intersticial, este átomo pasará de un sitio intersticial a otro. Para este mecanismo no es necesario que existan vacancias. En parte porque el número de sitios intersticiales es mucho mayor que el de vacancias, por tanto, se espera que la difusión intersticial sea rápida. (Askerland, 1998 pág. 108)

Si en una estructura cristalina existe un átomo intersticial y además un incremento de temperatura y este átomo tiende a moverse intersticialmente en presencia o no de una vacancia se dice que hay una difusión intersticial como se muestra en la figura 7-2.



**Figura 7-2:** Difusión intersticial.

Fuente: (Askerland, 1998 pág. 108)

### 2.3 La curva de termofluencia.

El fenómeno de termofluencia o creep es un proceso dinámico de deformación plástica de un material bajo una carga constante menor al esfuerzo de cedencia, debido a movimientos de nivel atómico, clásicamente asociados con temperaturas elevadas. (Loor J., 2012 pág. 3)

Al hablar del creep o termofluencia la bibliografía indica que se trata de una deformación que va cambiando con el tiempo con una carga constante, esa carga constante generará una tensión de la misma característica de la carga, el creep o termofluencia se hace notoria en los materiales metálicos a partir de los rangos de temperatura comprendidos de 0,3 a 0,6  $T_f$ , donde  $T_f$  es la temperatura de fusión del metal.

Se hace importante saber que la termofluencia también existe y se da a notar de mayor manera en materiales poliméricos y vidrios los efectos se hacen notorios en estos tipos de materiales cuando se hallan alrededor de la temperatura  $T_g$  que es la temperatura de transición vítrea.

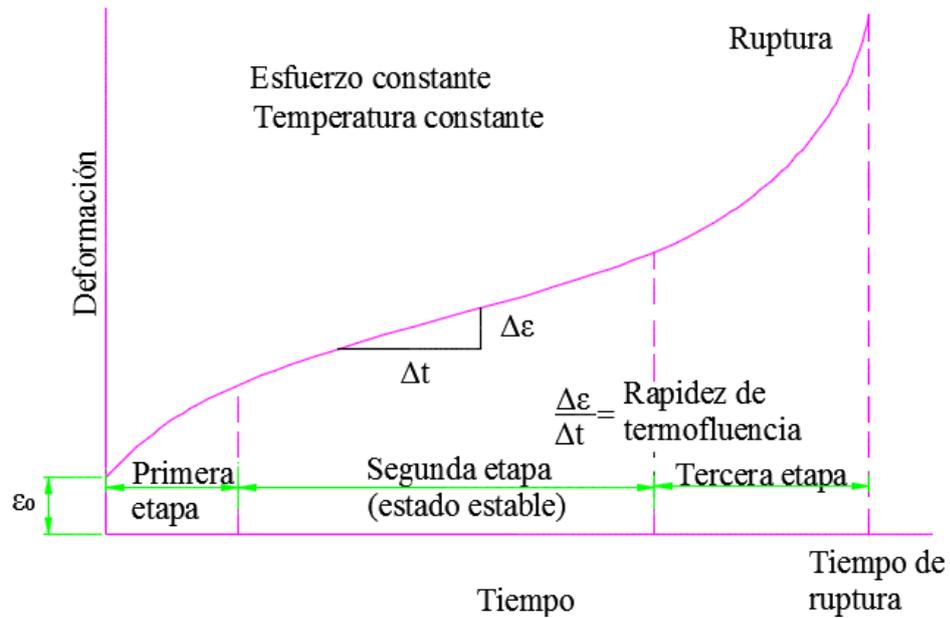
Concluyendo que los metales en general no sufren efectos del creep a temperatura ambiente por su alto punto de fusión, mientras que en los polímeros y vidrios si se hacen notorios los efectos a temperatura ambiente.

En el fenómeno de la termofluencia o creep, se definen tres etapas distintas de deformación, las cuales están marcadas por el comportamiento de la velocidad de deformación. Estas etapas del fenómeno pueden ser estudiadas mediante curvas que representan fluencia contra el tiempo, y pueden evidenciarse y diferenciarse mediante los cambios microestructurales del material. (Loor J., 2012 pág. 12)

Luego de conocer los factores que intervienen en el fenómeno denominado termofluencia se puede obtener la curva característica, esta se obtiene luego de experimentar con una carga constante que será suficiente para lograr obtener una deformación de termofluencia general, a una temperatura que supere 0,3 de la temperatura absoluta de fusión ( $T_f$ ), con lo mencionado anteriormente se podrá notar un cambio en la longitud de la muestra en el transcurso del tiempo.

### **2.3.1 Curva típica de termofluencia y sus etapas.**

Como se puede apreciar en la Figura 8-2 se produce una deformación instantánea del tipo elástica  $\epsilon_0$ , después de ésta deformación debida a la precarga pasamos a las etapas de deformación.



**Figura 8-2:** Curva de termofluencia.

Fuente: (Askerland, 1998)

Donde:

$\Delta\epsilon$  = Variación de la deformación [mm].

$\Delta t$  = Variación del tiempo [s].

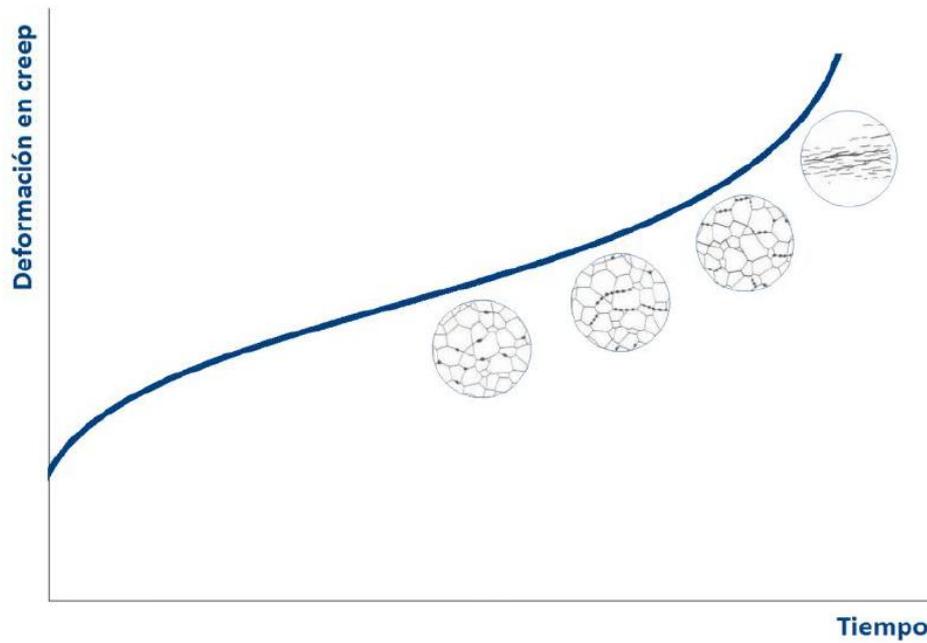
$\epsilon_0$  = Deformación elástica (instantánea) debido a la precarga [mm].

**Primera Etapa:** También conocida como creep primario, es en donde la deformación se ve disminuida paulatinamente en el tiempo hasta llegar a un valor teóricamente estable, eso quiere decir que en la curva la pendiente ( $\Delta\epsilon/\Delta t$ ) va disminuyendo hasta llegar a un valor casi estable.

**Segunda Etapa:** También conocida como creep secundario o de estado estacionario, en esta etapa se puede apreciar que la pendiente de la curva ( $\Delta\epsilon/\Delta t$ ) varía muy poco en función del tiempo, teniendo saltos de los valores de la pendiente que con el tiempo son bajos, esta etapa es la de mayor importancia ya que aquí sucede la mayor cantidad de transformaciones debido a la carga y la temperatura mientras el tiempo transcurre. En esta etapa se genera las dislocaciones entre los granos debido al flujo difusivo de calor.

**Tercera Etapa:** También conocida como creep terciario en esta etapa la pendiente crece de manera exponencial en función del tiempo hasta llegar a la fractura, en esta etapa las dislocaciones se hicieron más grandes formando cavidades que se interconectan entre sí,

provocando la fractura intergranular del material como se observa en la figura 9-2, se puede observar que a partir de la tercera etapa ya aparecieron cavidades, a medida que transcurre el tiempo las cavidades aumentan y los granos se alargan, ya cuando nos aproximamos a la rotura los granos se estiran totalmente hasta llegar a la fractura del material.

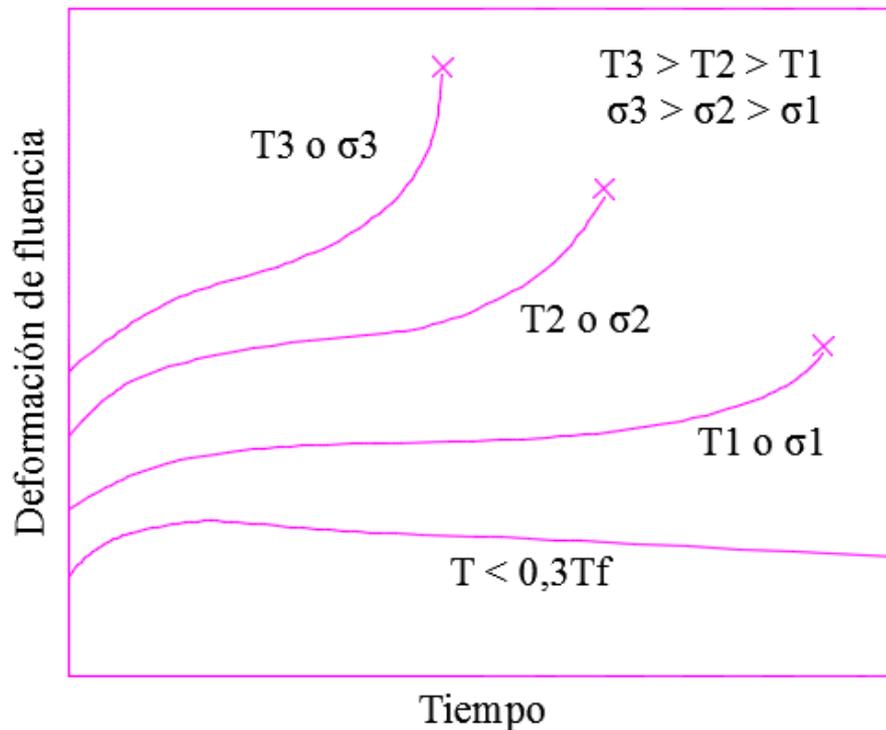


**Figura 9-2:** Transformaciones microestructurales que ocurren en el creep.

Fuente: (Loor J., 2012)

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  $0.3T_f$  (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. (Caicedo Reyes, 2014 pág. 18)

La forma de la curva de termofluencia variará debido a la tensión y la temperatura, si estos factores incrementan en su magnitud el proceso de termofluencia se dará de manera más rápida incrementando su pendiente como se muestra en la figura 10-2.



**Figura 10-2:** Influencia de la tensión  $\sigma$  y la temperatura  $T$ .

Fuente: (Callister, 1995 pág. 115)

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 un metal. (Caicedo Reyes, 2014 pág. 16)

A temperaturas menores a  $0,3T_f$  que en este texto  $T_f$  también lo considera como temperatura de fusión y con cargas bajas, los metales se encuentran en la etapa primaria de la curva que caracteriza a la termofluencia no puede ascender hacia la segunda etapa de la curva debido a que la temperatura está por debajo de la temperatura que activa la difusión en el material.

## **2.4 Procesos que influyen para la 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 0.3Tf) predominan los mecanismos de deslizamiento, pero a temperaturas mayores (0.5 a 0.8Tf) predominan los mecanismos basados en la difusión y el deslizamiento de los límites de grano. (Caicedo Reyes, 2014 pág. 18)

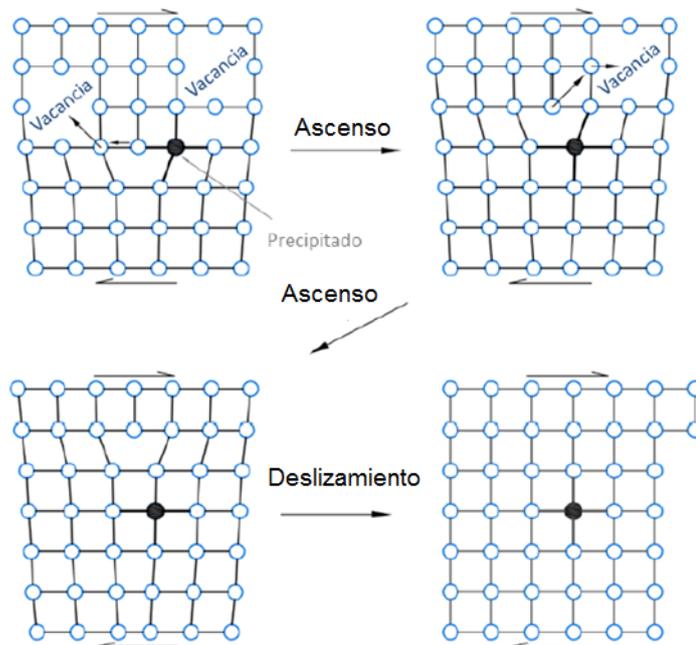
Para que ocurran cambios a nivel microestructural es necesario estudiar todos los mecanismos que intervienen en la aparición de termofluencia y poder entender de mejor manera el comportamiento de materiales en presencia de temperaturas relativamente elevadas.

## **2.5 Termofluencia por dislocaciones.**

Para que se dé el avance de las dislocaciones es necesaria la presencia de la temperatura, ya que facilita el movimiento de los átomos y permite que las dislocaciones puedan vencer los obstáculos que detendrían dicha movilidad.

Una dislocación para que pueda moverse debe vencer los precipitados que detengan, obstaculicen o estén en su trayectoria, pero la alta temperatura de activación térmica permite que las dislocaciones atraviesen los obstáculos con un proceso que se lo llama ascenso de las dislocaciones.

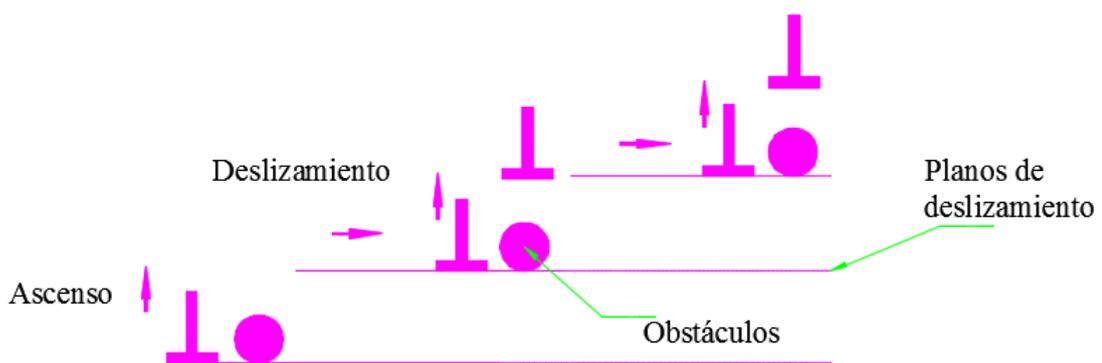
En la figura 11-2 se muestra que en presencia de una vacancia y de temperatura las dislocaciones tienden a moverse de tal manera que puede este ascender a un espacio por encima a su vez que puede evitar un obstáculo formado por las incrustaciones, a este movimiento se lo conoce como ascenso.



**Figura 11-2:** Ascenso de una dislocación.

Fuente: (Martinez, 2003).

Mediante un proceso de difusión el átomo de la parte inferior ocupa el lugar de la vacancia, provocando que el borde de la dislocación “ascienda”, este proceso se conoce como “ascenso”. Si una nueva vacancia intercambia posición con el átomo inferior el proceso se repite y la dislocación puede moverse de esta forma de manera indefinida fuera de su plano de deslizamiento. (Lor J., 2012 pág. 8)



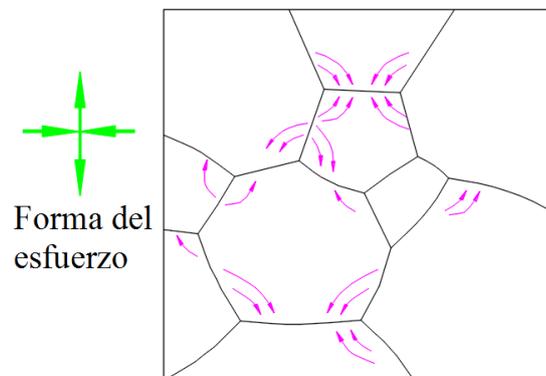
**Figura 12-2:** Movimiento de ascenso y deslizamiento

Fuente: (Gonzales Velázquez, 2003 pág. 56)

Cuando los metales se hallan a baja temperatura, los límites de grano se oponen al movimiento de las dislocaciones, entonces si se eleva la temperatura a los límites de grano ayudan al proceso de termofluencia.

## 2.6 Termofluencia por difusión.

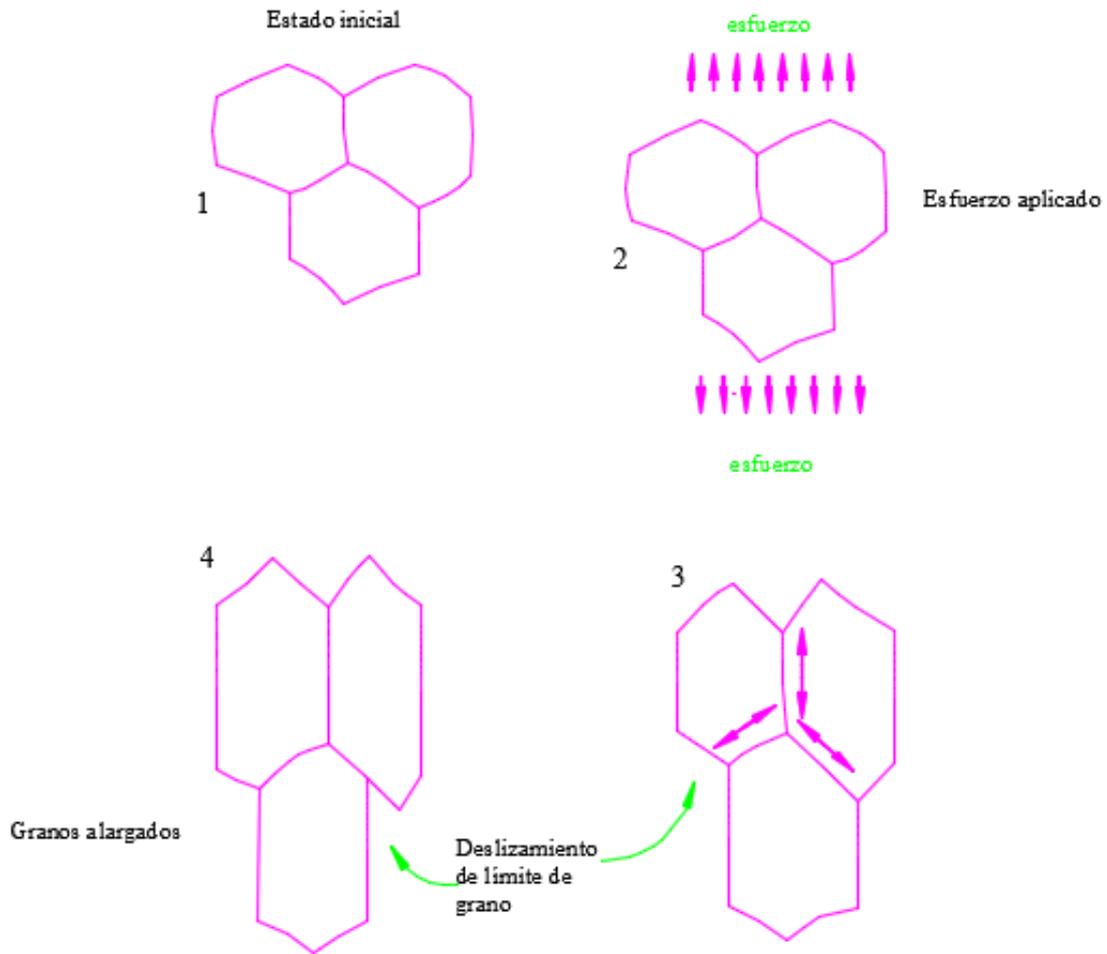
Esta caracterizado por la deformación de la morfología del grano que se produce por el flujo masivo de las vacancias que se van generando en el interior del grano, produciendo así una alteración en los límites de grano y por ende un alargamiento del material.



**Figura 13-2:** Representación esquemática de la termofluencia por difusión.

Fuente: (Reed Hill, 1982 pág. 68)

En el mecanismo de Nabarro-Herring se asume que la difusión de las vacantes se produce por el interior del grano, es decir, en todo el volumen en la cual los átomos emigran por difusión, desde las zonas sometidas a los esfuerzos mayores (caras superior e inferior) hacia las caras sometidas a los esfuerzos menores (caras derecha e izquierda). Este movimiento va acompañada por la migración de vacantes en sentido contrario, ambos movimientos provocan la deformación. (Loor J., 2012)



**Figura 14-2:** Movimiento de ascenso y deslizamiento.

Fuente: Autores.

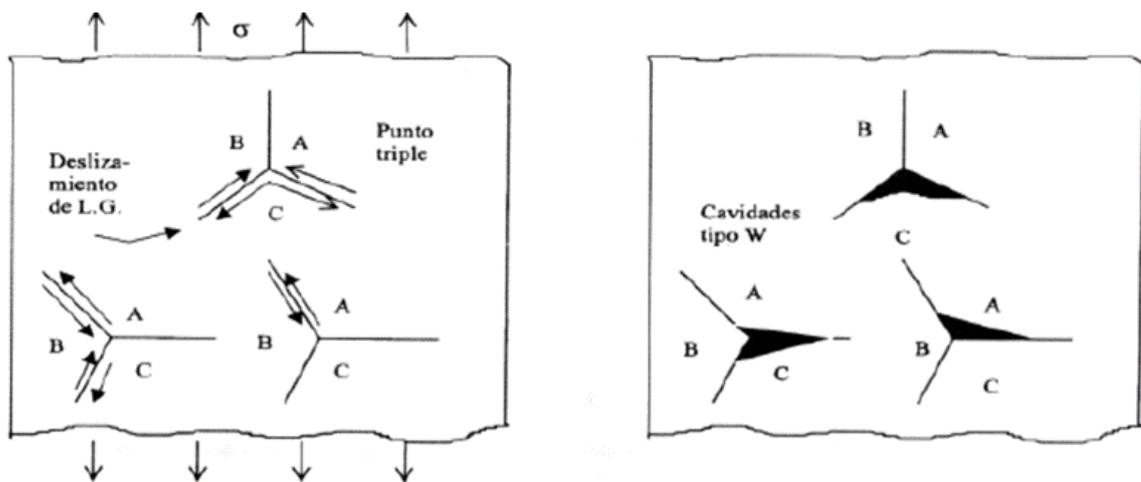
## 2.7 Fractura debido a la termofluencia.

La fractura en termofluencia es de tipo intergranular y conjuga varios factores como son: el deslizamiento de los límites de grano, aparición las cavidades tipo R en los límites de grano debido en gran parte a la temperatura y luego al esfuerzo que están sometidos, estas cavidades se transportan a lo largo de los límites de grano, los proceso de difusión ayuda a que estas cavidades puedan vencer los obstáculos (precipitados) existentes en el material, la aparición de cavidades tipo W en las uniones triples de los granos debido en mayor parte a la tensión y luego por la temperatura, los límites de grano se convierten en sumideros de vacancias, estas acumulaciones cada vez se hacen más grandes conllevando así al colapso del material.

En resumen la fractura intergranular ocurre por el crecimiento y la conexión de las cavidades y estas se debe a:

- Deslizamiento de los límites de grano.
- Flujo y concentración de vacancias en los límites de grano.
- El cómo actúa la termofluencia del material alrededor de la cavidad.

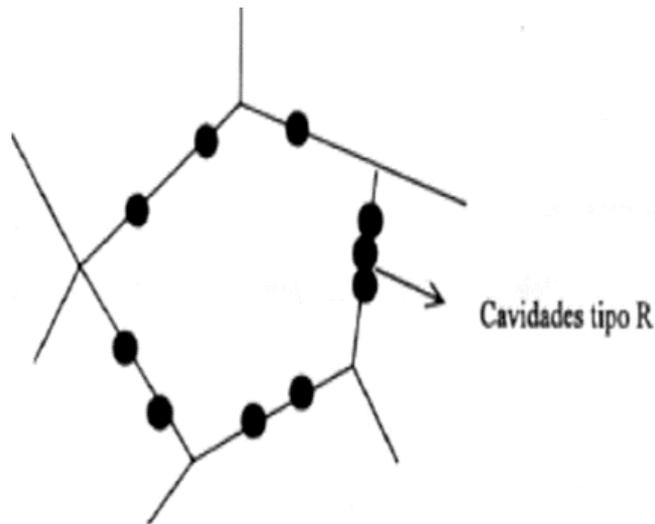
Una cavidad tipo W puede producirse por el movimiento de los límites de grano, estos hacen que las uniones triples se desgarran formando así las mismas, para la formación de este tipo de cavidades es necesario cargas altas y temperaturas bajas. Esto quiere decir que la fractura es originada debido a la termofluencia por dislocaciones, en la figura 15-2 se observa la formación de cavidades tipo W, también se puede notar que las cavidades tipo W presentan formas irregulares asimétricas.



**Figura 15-2:** Formación de cavidades tipo W

Fuente: (Gonzales Velázquez, 2003)

Una cavidad tipo R es la generación de espacios vacíos en los límites de grano, son de tipo esféricas, estas se producen a lo largo de los límites de grano, la aparición de este tipo de cavidades se debe a la alta temperatura y un bajo esfuerzo, En la figura 16-2 se puede observar la aparición de cavidades tipo R en los límites de grano.



**Figura 16-2:** Formación de cavidades tipo R.

Fuente: (Gonzales Velázquez, 2003)

Entonces una grieta o cavidad es un claro concentrador de esfuerzos, de tal manera que esto conlleva a un evidente fallo del material, la formación y crecimiento de la grieta depende de la conexión entre las cavidades que se hallen en los límites de grano, también depende de la magnitud de los esfuerzos y la temperatura.

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. (Caicedo Reyes, 2014 pág. 25)

## 2.8 Acero A36.

El acero A 36 es el más utilizado en la construcción mecánica a nivel nacional por su bajo costo, facilidad de adquisición y presentaciones disponibles en el mercado Ecuatoriano, ya sea en forma de barras, tubos, planchas, láminas, perfiles, ángulos, etc.

Este acero se considera un acero de bajo carbono de tipo estructural para construcción, por sus propiedades y buena aplicación por su soldabilidad, además de una composición química fácil de obtenerla al momento de la fabricación lo que hace más atractivo para aplicaciones de tipo estructural.

Las características y composición química del acero A36 se muestran en la tabla 1-2.

**Tabla 1-2: Propiedades del Acero A36**

Propiedades		
<b>ACERO ASTM A36</b>	Químicas	
	Predomina el hierro aprox (98-99)%	
	Contiene 0.18% de C, 0.2% de Cu, (0.8 y 0.9)% de Mn	
	Impurezas: 0.04% max de P, 0.05% max de S	
	Físicas	
	Densidad = 7,85 gramos (0,017 lb) por centímetro cúbico.	
	Modulo de elasticidad = 200 GPa o 29.000 ksi (199.948,01 MPa).	
	Modulo de cizallamiento = 79,3 GPa o 11.500 ksi (79.289,73 MPa).	
	Mecánicas	
	Resistencia a la Tensión = 58.000 a 79.800 libras (26.308,35 a 36.196,67 kg) por pulgada cuadrada.	
Limite de Fluencia = 36.300 psi		
Alargamiento del 20 por ciento.		
Temperatura de Fusión	1530 aproximadamente	

Realizado por: Autores

Fuente: (Askerland, 1998)

## 2.9 Fundición nodular perlítica.

Las fundiciones son aleaciones de hierro y carbono al igual que los aceros tienen un porcentaje de carbono entre 2 - 6,67% Carbono. Cuando el porcentaje de carbono es muy alto estos se hacen muy frágiles y no se los puede trabajar en frío.

Se conoce como fundición nodular perlítica a un grupo de aleaciones que en su composición química tiene como base la mayor parte de hierro y un considerable contenido de carbono y silicio que varían entre 3%-4%; y, 1.8%-2.8%; respectivamente. Cabe mencionar que para que se dé la estructura de la fundición nodular es necesario la adición de otros elementos químicos que en cantidades específicas modifican las características tanto físicas como mecánicas. Entre sus principales características y composición química se muestran en la tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Propiedades de la fundición nodular perlítica

Propiedades	
<b>FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA</b>	Químicas
	Físicas
	Mecánicas
	Temperatura de Fusión

Predomina el hierro arpoX (98-99)%	
Contiene 2,75% Y 3,50 de C, entre el 0,5%-1% de Si y 0,5-1% de Cu,	
1,5% de Mn, 0,59% DE Ni	
P<0,08%, S 0,06-0,12% S	
Densidad = 6,95 y 7,35 gramos por centímetro cúbico.	
Modulo de elasticidad E= 100000Kg por centímetro cuadrado	
Modulo de cizallamiento = 79,3 GPa o 11.500 ksi (79.289,73 MPa).	
Resistencia a la Tensión = varía entre 30, 40, y 45 Kg/mm2	
Tiene una dureza de 140 a 250 Brinell	
Alargamiento generalmente menor de 0,6 %	
Inferior a los 1200 grados C	

Realizado por: Autores.

Fuente: (Askerland, 1998)

La fundición nodular perlítica es una variación de las fundiciones que presenta el grafito en forma de nódulos y esta variación de la distribución del grafito hace que sea una importante fundición ya que mejora de cierto modo su resistencia y el grado de ductilidad, además de aceptar el uso de tratamientos térmicos. Otra característica importante de las fundiciones nodulares es su excelente fluidez lo cual permite que se puedan fabricar piezas de espesores pequeños, siempre y cuando se garantice una enfriamiento adecuado y teniendo en cuenta las contracciones en el material.

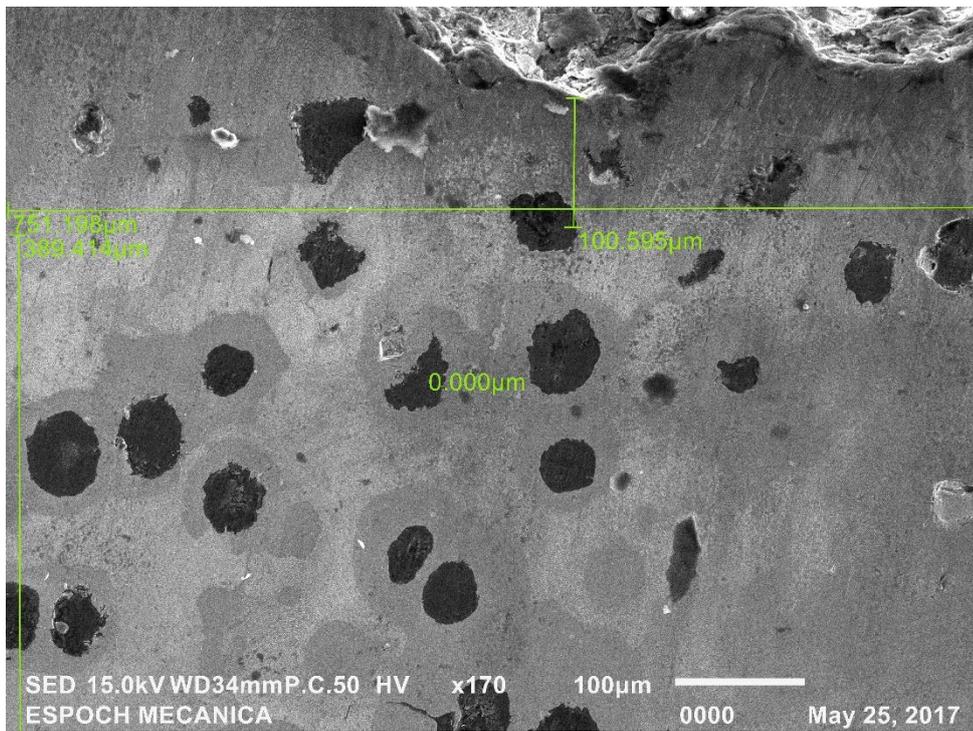
La construcción de los bloques de fundición nodular perlítica se la realizó en la fundidora FUNDILASER ubicado en la ciudad de Ambato bajo la Norma NTE INEN 2499 cabe indicar que la norma anteriormente mencionada se basa en la norma ASTM A126-TIPO B: “Fundición nodular (hierro dúctil)” y la norma ASTM A339-55. En la figura 17-2 se muestra el horno de inducción eléctrico perteneciente a la empresa, la característica principal de éste es que al ser de inducción la fundición es más limpia.



**Figura 17-2:** Horno eléctrico propiedad de Fundilaser.

Fuente: Autores.

Hay que tener en cuenta que para la realización de las probetas de fundición es necesario un estricto control de la chatarra, ya que la adición de cualquier otro tipo de material afectaría drásticamente en la obtención de la fundición nodular perlítica, además para que la formación del grafito sea en forma de nódulos tiene que ser controlada ya sea en su enfriamiento o una adición tanto de silicio como de cerio.



**Figura 18-2:** Microestructura de la fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores

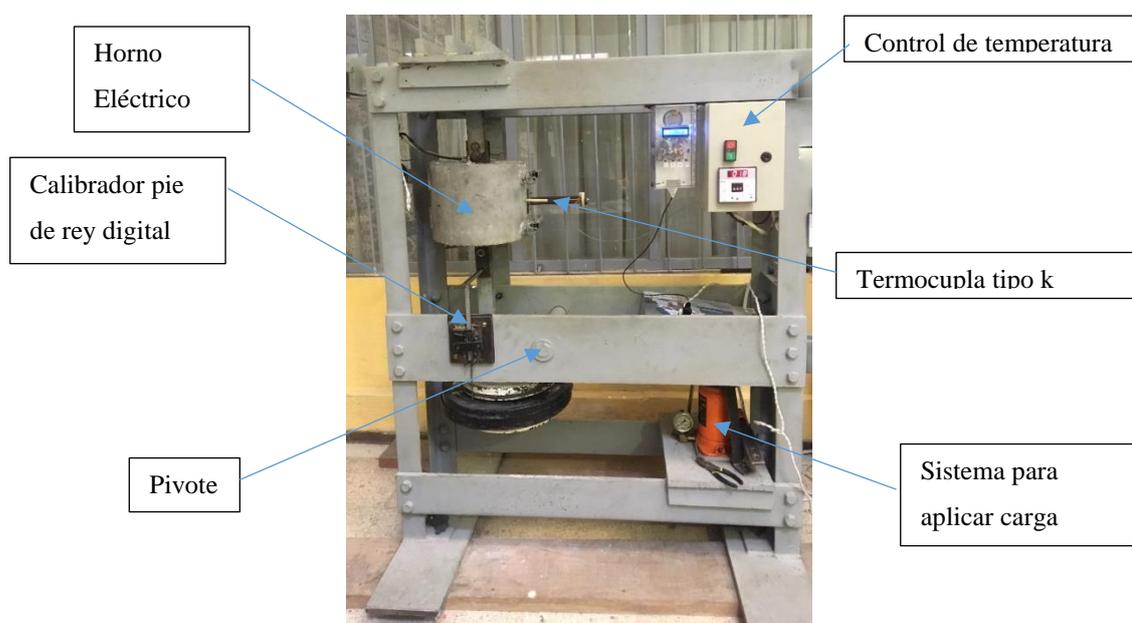
## CAPÍTULO III

### 3 ENSAYO DE TERMOFLUENCIA EN EL ACERO A36 Y LA FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA.

Los ensayos de creep se realizaron en la máquina para termofluencia, que está ubicada en el laboratorio de resistencia de materiales de la ESPOCH en la Facultad de Mecánica, el diseño y construcción de la máquina es autoría del Ingeniero Jorge Isaías Caicedo Reyes docente de la Facultad. La máquina fue diseñada para probetas planas de sección reducida.

#### 3.1 Máquina para los ensayos de termofluencia.

La máquina controla de manera independiente dos propiedades físicas como: tensión - temperatura y las combina gracias al diseño de la misma, esta combinación produce el fenómeno denominado termofluencia. Incorpora la tensión con la ayuda de una gato hidráulico y la temperatura mediante un horno eléctrico controlado por un sistema on - off. En la figura 1-3 se muestra los sistemas que conforman la máquina.

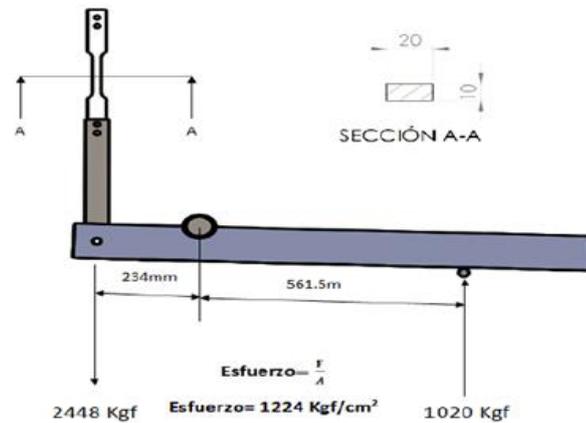


**Figura 1-3:** Máquina para los ensayos de termofluencia y sus partes.

Fuente: Autores

### 3.1.1 Sistema de carga.

La fuerza aplicada en la probeta es transmitida por el principio de la palanca como se muestra en la figura 2-3, un gato hidráulico es el que genera la fuerza en la palanca.



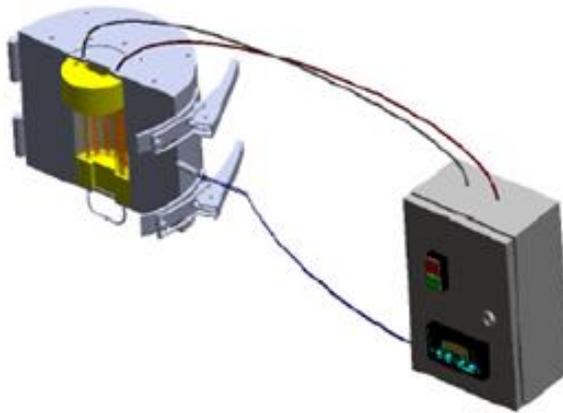
**Figura 2-3:** Esquema de carga constante aplicada en los ensayos de termofluencia.

Fuente: (Caicedo Reyes, 2014)

La prensa hidráulica brinda la facilidad de controlar la magnitud de la carga que se va a aplicar sobre la probeta a ensayar, gracias a un manómetro que se incorporó en el sistema hidráulico del gato, en el manómetro se puede leer las dos escalas el valor de la presión en: en psi y kPa.

### 3.1.2 Sistema de control de temperatura.

El control de la temperatura en el ensayo de termofluencia se lo realiza mediante un horno eléctrico tipo libro, esta unidad es la encargada de producir un ambiente caliente y controlado por una termocupla tipo k instalada en el interior del horno y a un sistema de control on – off. En la figura 4-3 se muestra el horno eléctrico y el sistema on-off de la máquina.



**Figura 3-3:** Sistema de calentamiento y control de temperatura on-off.

Fuente: (Caicedo Reyes, 2014)

Previo al inicio de los ensayos se incorporó un nuevo sistema de control que se indica en la figura 4-3 de temperatura al ya existente para poder estabilizar la temperatura en un valor constante mediante este nuevo sistema incorporado, se controló la inercia térmica que se generaba en el horno eléctrico adaptándolo al sistema on - off ya existente en la máquina, una placa arduino y un relé de estado sólido con su respectiva programación ayudan así a estabilizar la temperatura de interés.

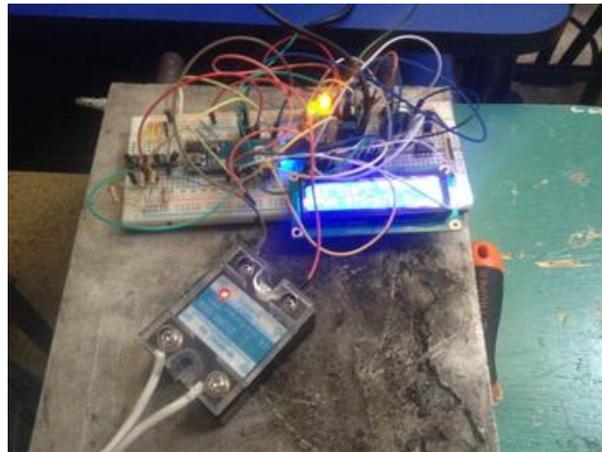


**Figura 4-3:** Horno eléctrico y con el nuevo controlador de temperatura.

Fuente: Autores.

La programación de la tarjeta arduino se la realizó con el método prueba error ya que es necesario descartar valores que generen una mayor inercia térmica en el horno eléctrico. Toda la programación se enfocó a controlar la variable que es la corriente eléctrica por medio del PWM conocida por sus siglas en inglés (pulse-width modulation), al controlar el PWM modifica el ciclo de una señal periódica ya sea esta senoidal o

cuadrada en forma de pulsos pero en porcentajes variados tanto en la subida como en la bajada. La señal de PWM es enviada al relé de estado sólido y a su vez este controla la señal en forma de pulsos gracias al circuito de mando y el circuito de potencia, de esta manera llegando a estabilizar en los valores de interés. En la figura 5-3 se puede observar el Sistema on-off aun en pruebas.



**Figura 5-3:** Prueba del controlador de temperatura y sus componentes.

Fuente: Autores.

La ventaja que brinda la tarjeta arduino es el poder controlar por medio de un circuito de mando al de potencia con la facilidad de usar pulsadores que ayuda a seleccionar el rango de temperatura previamente programada en una pantalla led la temperatura de interés a la que se va a ensayar, el nuevo controlador de temperatura se muestra en la figura 6-3.



**Figura 6-3:** Nuevo sistema de control de temperatura.

Fuente: Autores.

Con la mejora realizada en el sistema de temperatura se logró obtener una temperatura estable con un error de  $\pm 1$  grados Celsius de temperatura tanto en subida como en bajada de la inercia térmica logrando garantizar un buen resultado en los ensayos.

### **3.1.3 Para la toma de datos.**

La máquina tiene incorporado un calibrador pie de rey digital como se indica en la figura 7-3 que está debidamente instalado para la toma de datos de deformación de la probeta durante los ensayos, en el calibrador se puede leer los datos con una precisión de centésimas de milímetro.



**Figura 7-3:** Calibrador para la toma de datos de la deformación.

Fuente: Autores.

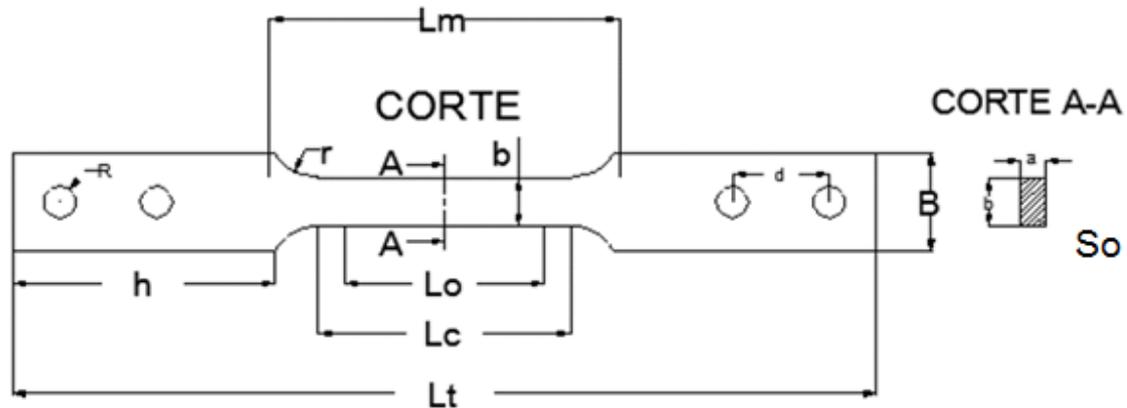
Al combinar los dos sistemas tanto el de presión como el de temperatura obtenemos el fenómeno denominado termofluencia, el diseño característico de esta máquina conjuga los dos eventos para poder obtener el fenómeno mencionado en un ambiente controlado y condiciones ambientales.

## **3.2 Especímenes.**

Para los ensayos de termofluencia es necesaria la elaboración de los especímenes bajo la norma ISO 6892 E tanto para el acero A36 como para la fundición nodular.

### 3.2.1 Geometría y dimensiones de las probetas.

Las dimensiones de los especímenes fueron diseñados para especímenes planos de sección reducida y su geometría se establecen en la norma ISO 6892 como muestra en la figura 8-3:



**Figura 8-3:** Esquema del espécimen plano de sección reducida para los Ensayos.

Fuente: (ISO 6892-1 E, 2009)

Donde:

$a$  = ancho de sección transversal [mm].

$b$  = altura de sección transversal [mm].

$L_o$  = Longitud original [mm].

$L_t$  = Longitud total [mm].

$L_c$  = Longitud paralela [mm].

$L_m$  = Longitud libre de mordazas [mm].

$d$  = Ancho entre centros de agujeros para sujeción [mm].

$B$  = Ancho externo [mm].

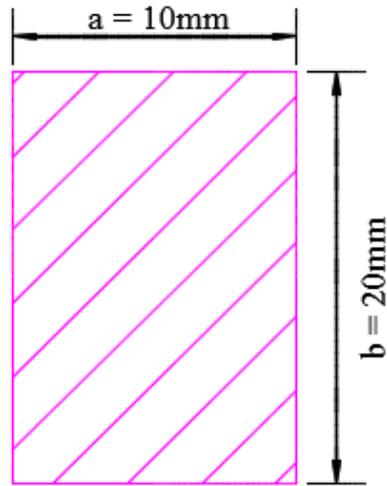
$h$  = longitud de sección de sujeción [mm].

$r$  = radio de cambio de sección o de transición [mm].

$R$  = radio de agujeros [mm].

### 3.2.2 Geometría de referencia para la sección reducida

Con la sección transversal  $S_0$  establecida en la figura 8-3 da la pauta para realizar los cálculos de geometría de los especímenes.



Corte A-A

**Figura 9-3:** Sección transversal

Fuente: Autores.

Cálculo del área  $S_o$

$$S_o = b \times a \quad (4)$$

$$S_o = 20\text{mm} \times 10\text{mm}$$

$$S_o = 200 \text{ mm}^2$$

Cálculo de la Longitud original  $L_o$

$$L_o = K\sqrt{S_o} \quad (5)$$

Donde:

$$K = 5.65$$

(Valor adaptado internacionalmente para longitudes no menores a 20mm)

$$L_o = 5.65 \sqrt{(200\text{mm}^2)}$$

$$L_o = 79.903 \text{ mm.}$$

$$L_o \approx 80 \text{ mm}$$

Cálculo de la longitud paralela Lc

$$Lc = L_0 + 1,5 (S_0)^{1/2} \quad (6)$$

$$Lc = 79.903 + 1.5 (200\text{mm}^2)^{0.5}$$

$$Lc = 101.116 \text{ mm}$$

$$Lc \approx 102 \text{ mm}$$

Cálculo de la longitud libre de mordazas Lm

$$Lm = L_0 + 3 B \quad (7)$$

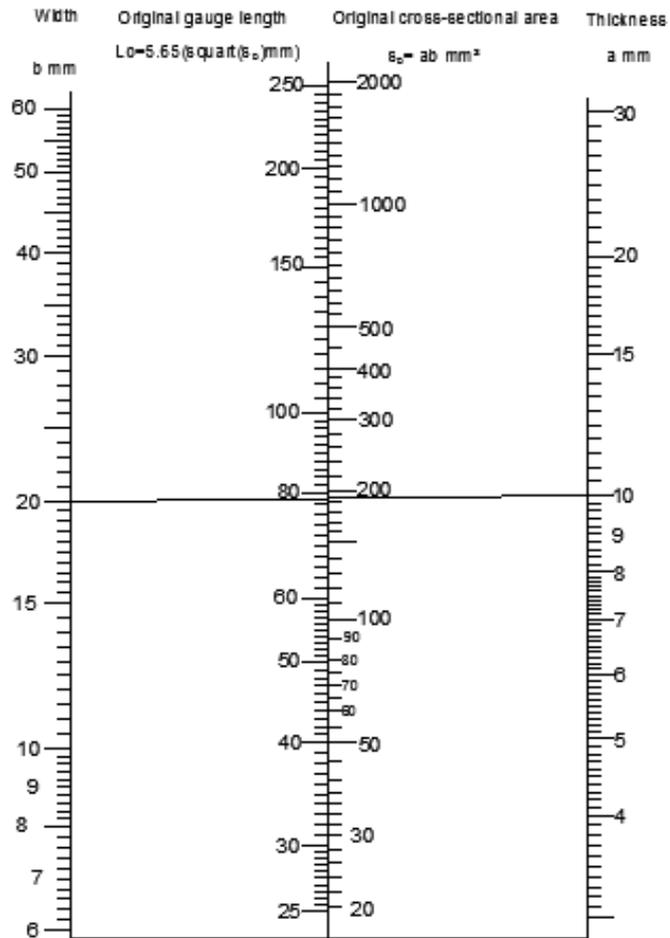
$$Lm = 79.903 \text{ mm} + 3 (20\text{mm})$$

$$Lm = 139.903\text{mm}$$

$$Lm \approx 140 \text{ mm}$$

Cálculo del ancho externo B

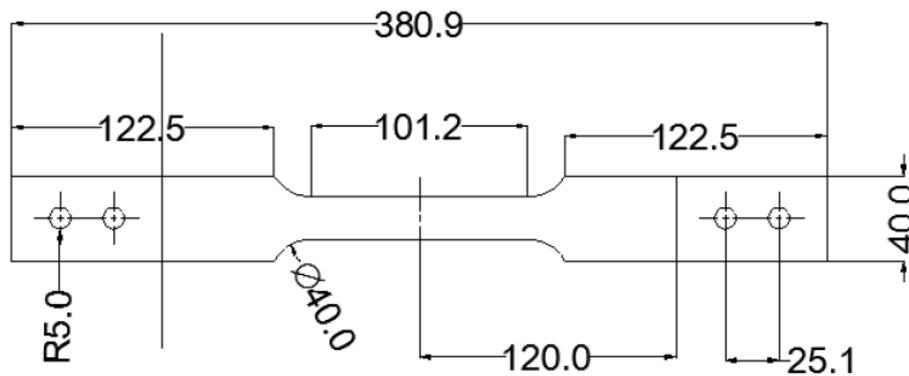
Para calcular el ancho B se utilizó el nomograma de la figura 12-3 de la norma ISO 6892 dando los siguientes valores para la geometría de la probeta dados en milímetros.



**Figura 10-3:** Nomograma cálculo del ancho de B

Fuente: (ISO 6892-1 E, 2009)

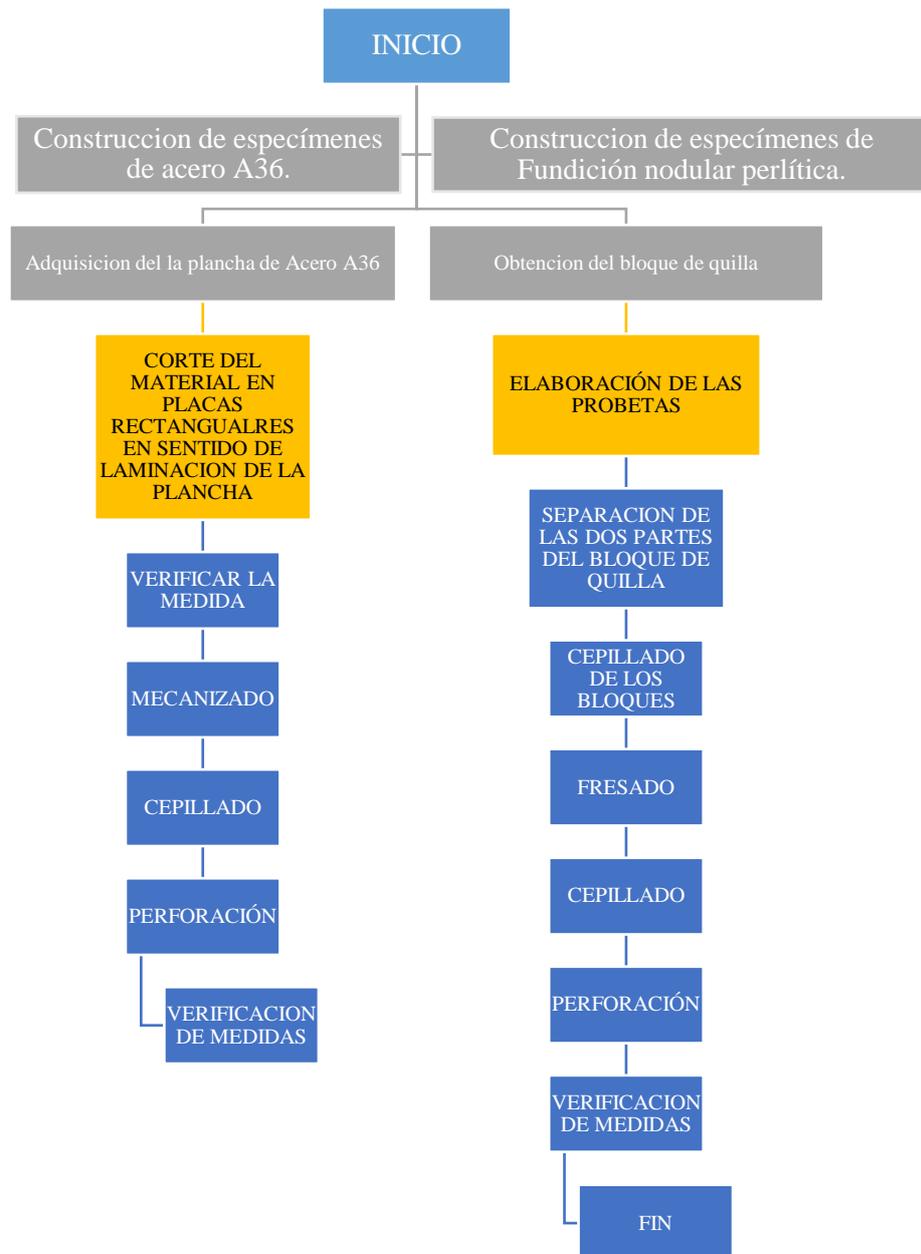
Las dimensiones estandarizadas de las probetas se muestran en la figura 11-3, dichas dimensiones de la parte ancha de la probeta son dadas y establecidas ya que el diseño de 7la máquina acepta esas dimensiones como las distancias entre orificios y longitud total.



**Figura 11-3:** Dimensione de la probeta

Fuente: (Caicedo Reyes, 2014)

### 3.2.3 Diagrama para obtener los especímenes mecanizado.



### 3.2.4 Probetas de acero A36.

Para verificar que se trata de un acero A36 se realizó el ensayo de espectrometría en el Laboratorio de Materiales de la ESPOCH en la Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, los resultados obtenidos del espectrómetro se muestran en el gráfico 1-3.



Sample:		Method: Fe110				
Analysis Time: 06.06.2017 13:05:41						
∅	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	
	0,255	0,175	0,712	<0,0030	<0,0030	
∅	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]	
	0,059	0,038	0,034	0,022	0,044	
∅	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]	
	0,0030	<0,0050	0,0022	0,0057	<0,020	
∅	B [%]	Sn [%]	Fe [%]			
	<0,0010	<0,0020	98,65			

Sample:		Method: Fe110				
Analysis Time: 09.06.2017 10:57:48						
∅	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	
	0,259	0,175	0,718	<0,0030	<0,0030	
∅	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]	
	0,061	0,038	0,034	0,022	0,045	
∅	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]	
	<0,0030	<0,0050	0,0023	0,0059	<0,020	
∅	B [%]	Sn [%]	Fe [%]			
	<0,0010	<0,0020	98,63			

**Gráfico 1-3:** Resultados del Acero A36 espectrómetro del Laboratorio de Materiales

Fuente: Autores.

Y para constatar que efectivamente se trata de un acero A36 y compararlo con los datos de la composición que genera el fabricante del acero como indica la tabla 1-3.

**Tabla 1-3:** Composición del acero A36.

NORMA	% C	% Mn	% P	% Si	% S
ASTM A 36	0.26 Máx.	0.60 a 1.35	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.

Realizado por: (IPAC. 2017)

Fuente: (Caicedo Reyes, 2014 pág. 178)

Los resultados obtenidos fueron comparados con el informe del distribuidor que nos facilitó el fabricante de acero A36 mostrada en la tabla 1-3 con el reporte generado por el espectrómetro en el gráfico 1-3, certificando los valores en base a la norma INEN 115 (Tolerancias para planchas de Acero al carbono Laminadas en Caliente o en Frío).

Comparando los valores obtenidos tanto en laboratorio como los que el fabricante presenta se puede constatar que efectivamente los elementos químicos que constituyen el material están dentro de los rangos del acero de bajo carbono, por lo tanto efectivamente se trata de un acero A36.

Para el mecanizado de las probetas de acero A36 se realizaron procedimientos en máquinas herramientas, trabajándolas en frío para garantizar que la temperatura no

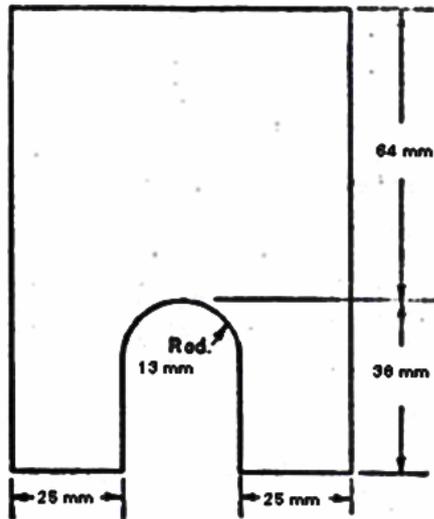
afecte su microestructura ya que es fundamental que el espécimen mantenga sus propiedades en estado de suministro.

El proveedor del acero A36 es un distribuidor a nivel nacional (IPAC), este proveedor oferta diferentes presentaciones del acero, en nuestro caso se requirió una plancha en forma de lámina para mecanizar las probetas con un espesor de 10mm, una vez que se obtuvo el material se procedió al mecanizado con sus posteriores cortes con las medidas de 40mm de ancho x 380.9mm de largo, y así dejarlas con las dimensiones que establece la norma ISO 6892 y finalmente aplicar un cepillado en la superficie mecanizada para un mejor acabado y mayor precisión en las medidas.

### ***3.2.5 Probetas de fundición nodular perlítica.***

La fundición nodular perlítica se obtuvo de la colada de la fundidora FUNDILASER ubicada en la provincia de Tungurahua cantón Ambato, Av. Indoamérica Km 4 1/2 Vía a Quito A 100 Metros de entrada a IZAMBA Barrio: Santa Clara, su trabajo está basado en la norma NTE INEN 2499: “Fundición nodular (hierro dúctil)” cabe indicar que la norma NTE INEN 2499 está basada en la norma ASTM A126-TIPO B que sirve para fundición gris.

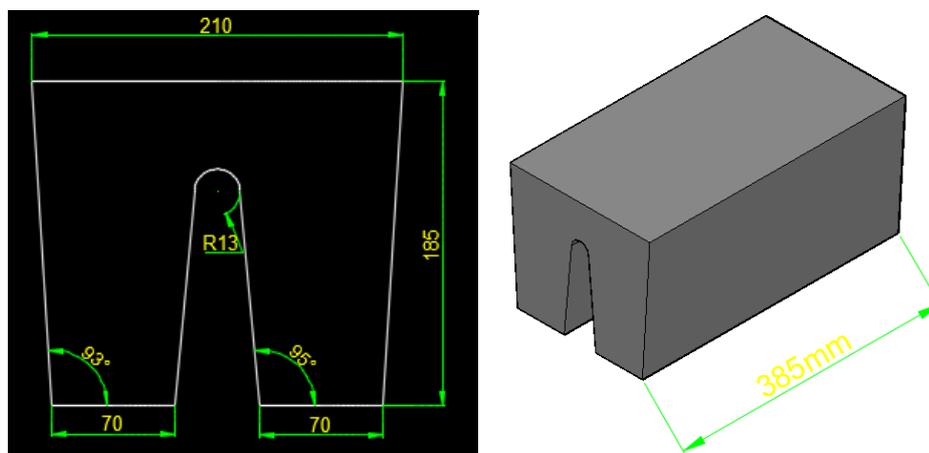
La construcción de la quilla se la realizó en base a lo que establece la norma INEN 2499 como se indica en la figura 12-3, para garantizar la composición, su enfriamiento y no tener rechupes en el material, garantizando su homogeneidad para todos los especímenes, el molde de quilla fue construido en madera.



**Figura 12 -3:** Bloque de quilla para probetas de ensayo.

Fuente: (ISO 6892-1 E, 2009)

Se hizo necesario adaptar las dimensiones de la quilla debido que las probetas que se extraerán del bloque de hierro fundido son más grandes para el estudio que se realizó, cabe aclarar que modificando las dimensiones estamos realizando una prueba de campo basada en la norma, el motivo de éste es conservar la geometría de la quilla original garantizando que no existan rechupes en el material. A continuación se muestra las nuevas dimensiones del bloque de quilla para la fundición nodular perlítica, se mantiene la forma pero las medidas están modificadas en base a la necesidad, tamaño de los especímenes y además para garantizar que no exista rechupes en la parte útil de la quilla, en la figura 13-3 y 14-3 se indica el diagrama y el molde de la quilla modificada.



**Figura 13-3:** Diagrama de la quilla modificada

Fuente: Autores



**Figura 14-3:** Molde con medidas modificadas previa a la fundición.

Fuente: Autores.

Luego de haber construido la quilla se procede al conformado del molde de arena en el taller de fundición de la empresa, Se hace necesario indicar que la empresa maneja estándares muy rigurosos por lo que se debe tener mucho cuidado en la compactación de las arenas de moldeo.



**Figura 15-3:** Arenas de moldeo para la fundición.

Fuente: Autores.



**Figura 16-3:** Taller de arenas de moldeo FUNDILASER.

Fuente: Autores.

La colada se elaboró con un porcentaje de chatarra estableciendo las composiciones químicas de cada material indicada por el fabricante de cada elemento de la chatarra, es decir se tomó como base los porcentajes que contienen cada material que ya están estandarizados y se obtuvieron los siguientes valores:

**Tabla 2-3:** Composición química de los elementos utilizados en la chatarra.

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

Realizado por: (Caicedo Reyes, 2014)

Fuente: (Caicedo Reyes, 2014 pág. 178)

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 se necesita separar la pieza fundida del sistema de alimentación. (Caicedo Reyes, 2014 pág. 179)

Se hace necesario indicar que la empresa adiciona otros elementos aleantes que son de confidencialidad propia de la empresa para garantizar la formación de los nódulos de grafito que hacen característica a esta fundición.

Cuando ya se obtiene la colada de fundición se procede a verter en el molde y dejándolo con un enfriamiento controlado ya que es un requerimiento primordial para la formación del grafito en forma de nódulos además de la adición de los elementos aleantes tales como son el silicio y el cerio. En la figura 17-3 se muestra el crisol donde se genera la colada.



**Figura 17-3:** Crisol de horno eléctrico “Fundilaser”.

Fuente: Autores

Luego de verter el metal en el molde de fundición se dejó enfriar por el lapso de 48 horas para así garantizar un enfriamiento moderado que garantice la formación de la fundición nodular perlítica, obteniendo como resultado un bloque de hierro fundido que se muestra en la figura 18-3:



**Figura 18-3:** Bloque de fundición obtenida.

Fuente: Autores



**Figura 19-3:** Bloque de fundición sin vertederos y cortada.

Fuente: Autores.

Luego de obtener el bloque de fundición se realizaron cortes longitudinales como se muestra en la figura 19-3, después de obtener las placas alargadas se las mecanizó con el procedimiento de corte en frío mediante una cepilladora mecánica como se muestra en la figura 20-3 con el afán de tener superficies planas, el procedimiento inicial de corte se lo realizó separando las dos partes y cortando el sistema de alimentación del molde (vertederos). Cabe mencionar que por la velocidad de enfriamiento que tiene el bloque de fundición se puede obtener un material homogéneo y 100 % útil a 15mm de distancia de las paredes del bloque, en el mecanizado se desprende todo ese material.



**Figura 20-3:** Primer mecanizado del bloque en cepilladora.

Fuente: Autores.

Una vez obtenidas los dos bloques como siguiente paso fue realizar cortes longitudinales en la máquina herramienta conocida como fresadora como se muestra en la figura 21-3, para así generar los espesores que están establecidos para el ensayo de termofluencia antes citados, cuidando siempre no afectar la microestructura y garantizando las dimensiones como establece la norma ISO 6892.



**Figura 21-3:** Mecanizado en fresadora de las probetas.

Fuente: Autores.

Finalmente se las aplicó un cepillado para un mejor acabado superficial y mayor precisión en las medidas, luego se verificó las medidas y su geometría dando como resultado los especímenes requeridos para efectuar los ensayos de termofluencia, los especímenes se muestran en la figura 22-3.



**Figura 22-3:** Probetas obtenidas a partir del bloque de fundición

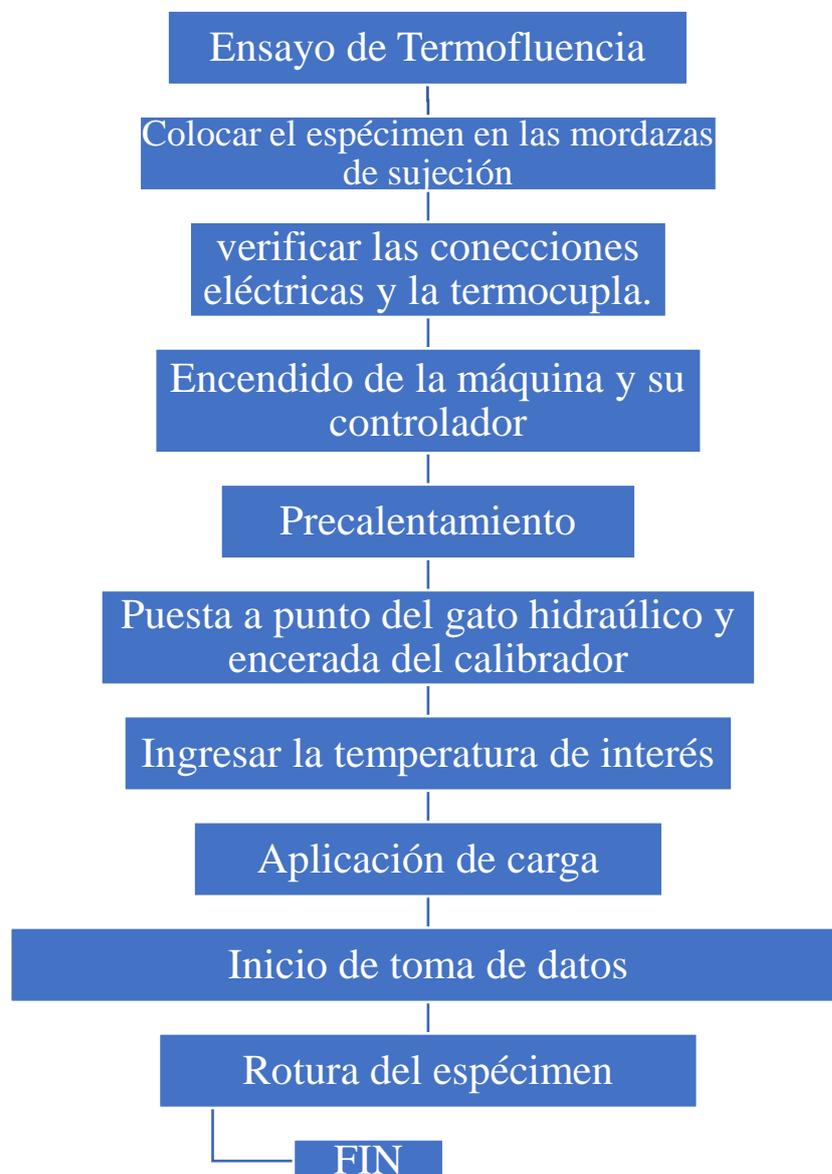
Fuente: Autores.

### 3.3 Normativa para los ensayos de termofluencia.

Los ensayos tendrán como base la normativa ASTM E-139 que detalla el estudio de termofluencia.

El ensayo consiste en someter al espécimen de prueba a una carga constante y una temperatura elevada. El espécimen se calienta dentro de un horno eléctrico y la carga es aplicada con un sistema de manera que la carga permanezca constante durante todo el ensayo. (Caicedo Reyes, 2014)

#### 3.3.1 Diagrama del ensayo de termofluencia.

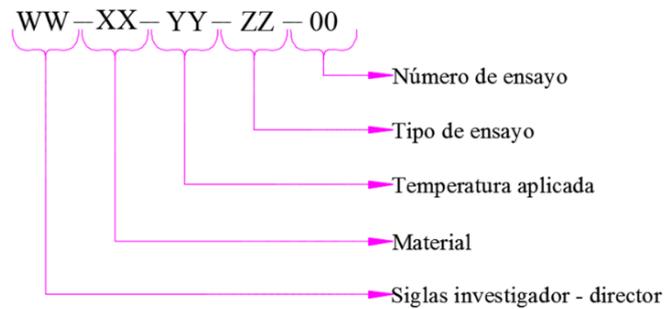


## CAPÍTULO IV

### 4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Se realizó la tabulación de los datos obtenidos para el acero A36 y la fundición nodular perlítica y se utilizó una codificación para identificar a cada uno de los especímenes y probetas que se ensayaron.

Codificación de especímenes y probetas:



**Gráfico 1-4:** Codificación de los especímenes y probetas.

Fuente: Autores

Los datos obtenidos tanto en los ensayos de termofluencia, metalografía y dureza se registraron en dos tablas tanto para el acero A36 como para la fundición nodular perlítica las mismas que se muestran a continuación en la tabla 1-4 y en la tabla 1-5.

**Tabla 1-4:** Termofluencia, metalografía y dureza en el acero A36.

ACERO ASTM A36						
Material, Temperatura	ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA		ENSAYOS METALOGRAFÍCOS		ENSAYOS DE MICRODUREZA	
	Codificación de espécimen	Nº Ensayo	Codificación Probeta	Nº Ensayo	Codificación Probeta	Nº Ensayo
ASTM A36 TEMP 550	LOC-A36-T550-T-1	1	LOC-A36-T550-M-1	16	LOC-A36-T550-D-1	31
	LOC-A36-T550-T-2	2	LOC-A36-T550-M-2	17	LOC-A36-T550-D-2	32
	LOC-A36-T550-T-3	3	LOC-A36-T550-M-3	18	LOC-A36-T550-D-3	33
ASTM A36 TEMP 545	LOC-A36-T545-T-1	4	LOC-A36-T545-M-1	19	LOC-A36-T545-D-1	34
	LOC-A36-T545-T-2	5	LOC-A36-T545-M-2	20	LOC-A36-T545-D-2	35
	LOC-A36-T545-T-3	6	LOC-A36-T545-M-3	21	LOC-A36-T545-D-3	36
ASTM A36 TEMP 540	LOC-A36-T540-T-1	7	LOC-A36-T540-M-1	22	LOC-A36-T540-D-1	37
	LOC-A36-T540-T-2	8	LOC-A36-T540-M-2	23	LOC-A36-T540-D-2	38
	LOC-A36-T540-T-3	9	LOC-A36-T540-M-3	24	LOC-A36-T540-D-3	39
ASTM A36 TEMP 535	LOC-A36-T535-T-1	10	LOC-A36-T535-M-1	25	LOC-A36-T535-D-1	40
	LOC-A36-T535-T-2	11	LOC-A36-T535-M-2	26	LOC-A36-T535-D-2	41
	LOC-A36-T535-T-3	12	LOC-A36-T535-M-3	27	LOC-A36-T535-D-3	42
ASTM A36 TEMP 530	LOC-A36-T530-T-1	13	LOC-A36-T530-M-1	28	LOC-A36-T530-D-1	43
	LOC-A36-T530-T-2	14	LOC-A36-T530-M-2	29	LOC-A36-T530-D-2	44
	LOC-A36-T530-T-3	15	LOC-A36-T530-M-3	30	LOC-A36-T530-D-3	45

Fuente: Autores.

**Tabla 2-4:** Termofluencia, metalografía y dureza en la fundición nodular perlítica.

FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA						
Material, Temperatura	ENSAYOS DE TERMOFLUENCIA		ENSAYOS METALOGRAFÍCOS		ENSAYOS DE MICRODUREZA	
	Codificación de espécimen	Nº Ensayo	Codificación Probeta	Nº Ensayo	Codificación Probeta	Nº Ensayo
FNP TEMP 550	LOC-FNP-T550-T-1	46	LOC-FNP-T550-M-1	64	LOC-FNP-T550-D-1	82
	LOC-FNP-T550-T-2	47	LOC-FNP-T550-M-2	65	LOC-FNP-T550-D-2	83
	LOC-FNP-T550-T-3	48	LOC-FNP-T550-M-3	66	LOC-FNP-T550-D-3	84
FNP TEMP 540	LOC-FNP-T540-T-1	49	LOC-FNP-T540-M-1	67	LOC-FNP-T540-D-1	85
	LOC-FNP-T540-T-2	50	LOC-FNP-T540-M-2	68	LOC-FNP-T540-D-2	86
	LOC-FNP-T540-T-3	51	LOC-FNP-T540-M-3	69	LOC-FNP-T540-D-3	87
FNP TEMP 530	LOC-FNP-T530-T-1	52	LOC-FNP-T530-M-1	70	LOC-FNP-T530-D-1	88
	LOC-FNP-T530-T-2	53	LOC-FNP-T530-M-2	71	LOC-FNP-T530-D-2	89
	LOC-FNP-T530-T-3	54	LOC-FNP-T530-M-3	72	LOC-FNP-T530-D-3	90
FNP TEMP 520	LOC-FNP-T520-T-1	55	LOC-FNP-T520-M-1	73	LOC-FNP-T520-D-1	91
	LOC-FNP-T520-T-2	56	LOC-FNP-T520-M-2	74	LOC-FNP-T520-D-2	92
	LOC-FNP-T520-T-3	57	LOC-FNP-T520-M-3	75	LOC-FNP-T520-D-3	93
FNP TEMP 510	LOC-FNP-T510-T-1	58	LOC-FNP-T510-M-1	76	LOC-FNP-T510-D-1	94
	LOC-FNP-T510-T-2	59	LOC-FNP-T510-M-2	77	LOC-FNP-T510-D-2	95
	LOC-FNP-T510-T-3	60	LOC-FNP-T510-M-3	78	LOC-FNP-T510-D-3	96
FNP TEMP 500	LOC-FNP-T500-T-1	61	LOC-FNP-T500-M-1	79	LOC-FNP-T500-D-1	97
	LOC-FNP-T500-T-2	62	LOC-FNP-T500-M-2	80	LOC-FNP-T500-D-2	98
	LOC-FNP-T500-T-3	63	LOC-FNP-T500-M-3	81	LOC-FNP-T500-D-3	99

Fuente: Autores

## 4.1 Ensayos en el acero A36.

Se realizaron tres ensayos por cada rango de temperatura dando un total de 15 ensayos de termofluencia, 15 ensayos metalográficos, 15 ensayos de microdureza.

### 4.1.1 Ensayo de termofluencia en el acero A36.

Los ensayos se realizaron en un orden descendente en cuanto a la temperatura, es decir fuimos desde los 550°C reduciendo 5°C de temperatura cada vez hasta poder determinar la temperatura en la que el acero A36 no presenta termofluencia. Se lo realizó de esta manera ya que en el trabajo de titulación de (Caicedo Reyes, 2014) encontró que a 500°C el material no experimenta termofluencia con una carga moderada, entonces el objetivo de este trabajo experimental es realizar un barrido entre el rango de 500°C a 550°C y determinar con mayor precisión la temperatura a la cual el material presenta degradación por termofluencia.

#### 4.1.1.1 Resultados de los ensayos de termofluencia del acero A36.

En la figura 1-4 se muestra especímenes luego de haber sido ensayados, éstas corresponden a la codificación LOC-A36-T550-T-1, LOC-A36-T545-T-1, LOC-A36-T540-T-1, LOC-A36-T535-T-1, LOC-A36-T530-T-1, una para cada rango de temperatura que se las ensayó.



Figura 1-4: Especímenes de acero 36 ensayados.

Fuente: Autores.

En la tabla 3-4 se presentan los resultados tabulados de la duración del ensayo de termofluencia en minutos, reducción del área en porcentaje (%) y elongación en porcentaje (%).

Tabla 3-4: Ensayos de termofluencia.

Identificación	Ensayo #	Duración del ensayo (min)	Reducción del Área(%)	Elongación (%)	Área inicial (mm)	Área final (mm)
ASTM A36 TEMP 550	1	3080	79,64	6,17	200	40,72
	2	3116	79,62	6,17	200	40,77
	3	3132	79,72	6,14	200	40,56
ASTM A36 TEMP 545	4	4662	79,1	5,66	200	41,81
	5	4486	79,05	5,67	200	41,9
	6	4721	79,02	5,68	200	41,96
ASTM A36 TEMP 540	7	5169	77,74	6,02	200	44,52
	8	5106	77,76	6,01	200	44,49
	9	5236	77,72	6,02	200	44,56
ASTM A36 TEMP 535	10	5760	28	1,36	200	144
	11	5760	27,95	1,36	200	144,1
	12	5760	28,4	1,35	200	143,2
ASTM A36 TEMP 530	13	5760	14,5	1,13	200	171
	14	5760	14,7	1,12	200	170,6
	15	5760	14,6	1,12	200	170,8

Fuente: Autores.

A continuación se muestra las curvas de termofluencia para cada una de las temperaturas ensayadas en los gráficos: 2-4, 3-4, 4-4, 5-4, 6-4 además en los gráficos respectivos se muestra la deformación instantánea debido a la precarga del espécimen.

Ensayos a 550°C, tiempo promedio de duración de los ensayos 3109,33min, deformación instantánea promedio 1,24mm.

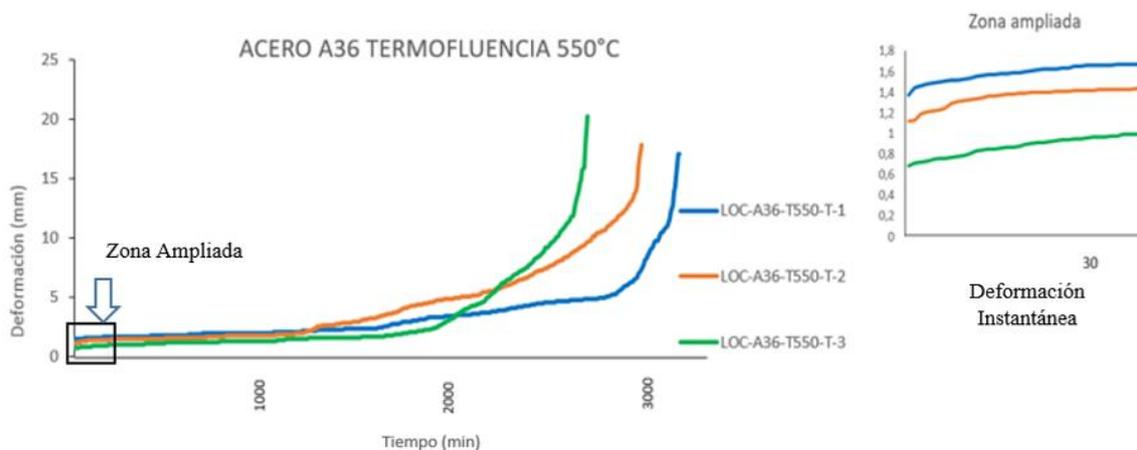
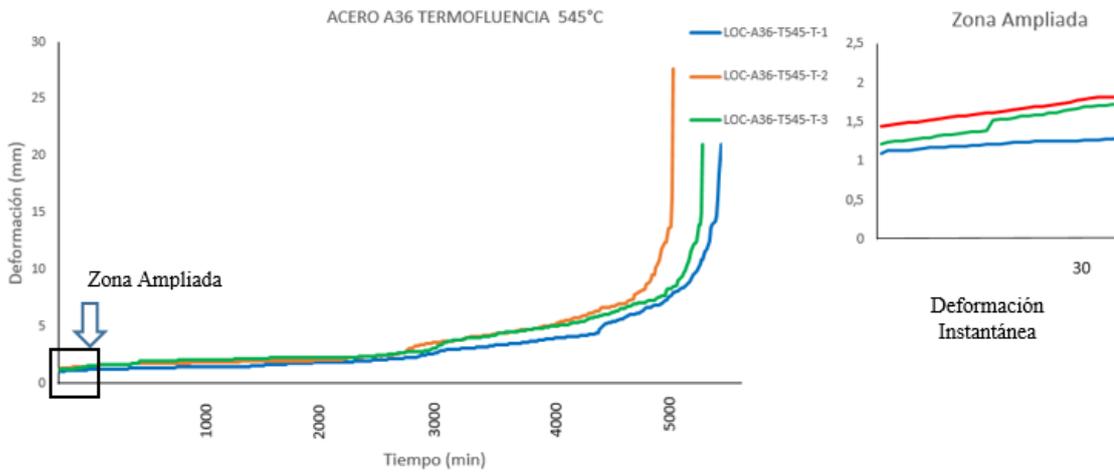


Gráfico 2-4: Curvas correspondientes a los ensayos de 550°C Acero A36.

Fuente: Autores.

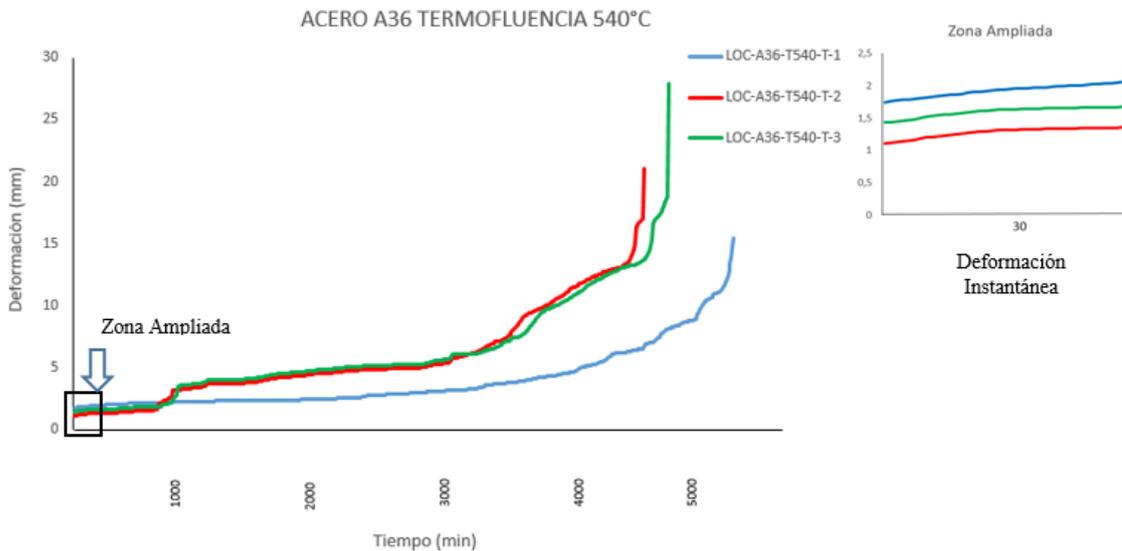
Ensayos a 545°C tiempo promedio de duración de los ensayos 4623min, deformación instantánea promedio 1,21mm.



**Gráfico 3-4:** Curvas correspondientes a los ensayos de 545°C Acero A36

Fuente: Autores.

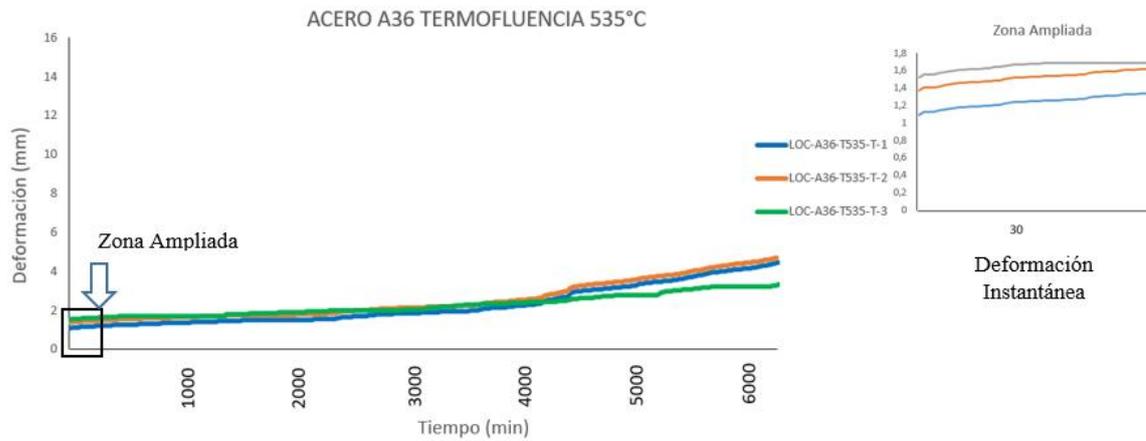
Ensayos a 540°C tiempo promedio de duración de los ensayos 5710,33min, deformación instantánea promedio 1,18mm.



**Gráfico 4-4:** Curvas correspondientes a los ensayos de 540°C Acero A36.

Fuente: Autores

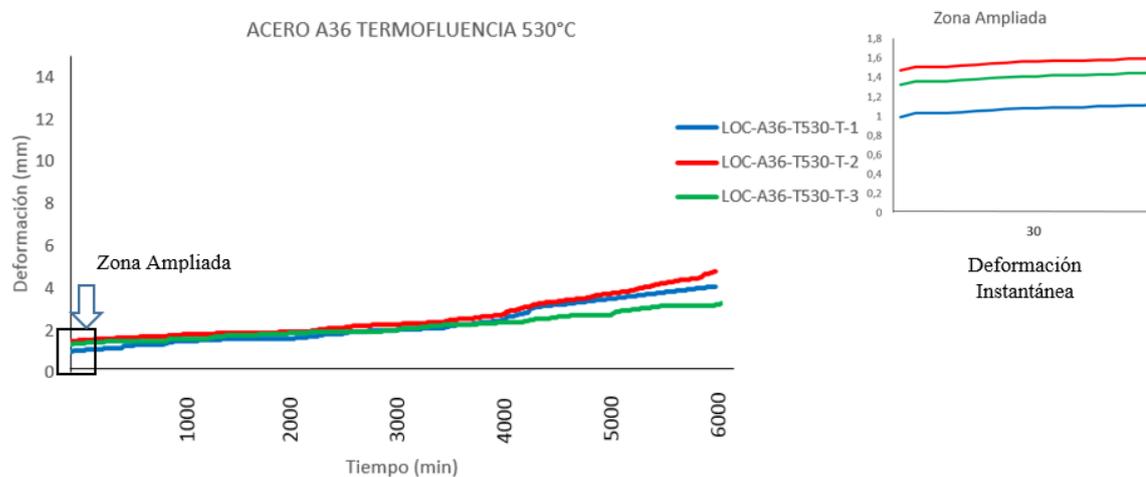
Ensayos a 535°C tiempo promedio de duración de los ensayos 5760min, deformación instantánea promedio 1,09mm



**Gráfico 5-4:** Curvas correspondientes a los ensayos de 535 ° C Acero A36

Fuente: Autores

Ensayos a 530°C tiempo promedio de duración de los ensayos 5760min deformación instantánea promedio 1,12mm.



**Gráfico 6-4:** Curvas correspondientes a los ensayos de 530°C Acero A36.

Fuente: Autores.

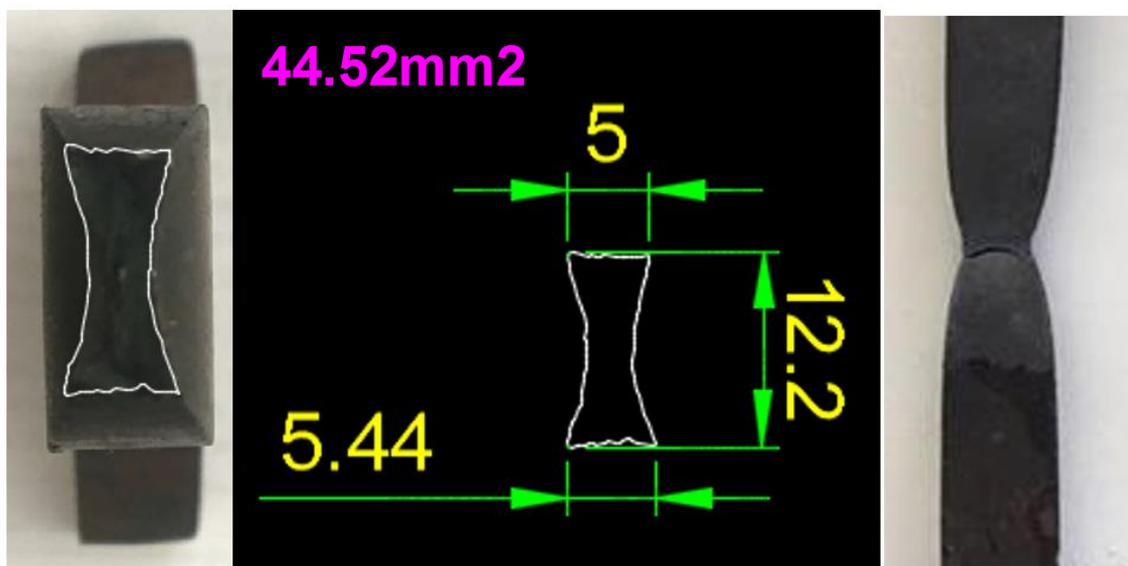
Se puede observar que a las temperaturas de 550°C, 545°C y 540°C correspondiente a los gráficos 2-4, 3-4, 4-4, las probetas pasan por las tres etapas de la termofluencia hasta alcanzar la fractura en el tiempo inferior a 96 horas, mientras que en las temperaturas de 535°C y 530°C correspondiente a los gráficos 5-4, 6-4 respectivamente, no se llega a la

fractura del material ya que en las curvas se interpreta que el fenómeno permanece en la segunda etapa de la curva típica de termofluencia para materiales metálicos durante el mismo tiempo de 96 horas.

A las temperaturas de 530°C y 535°C no se determinó la presencia de termofluencia, es por eso que al cubrir el rango de 500°C - 550°C no se realizaron los ensayos a 525°C, 520°C, 515°C, 510°C, 505°C, 500°C porque la termofluencia a temperaturas inferiores a el rango de 540°C no se hace evidente.

De los especímenes que se fracturaron durante los ensayos se puede observar la reducción del área en la zona de la fractura:

A 550°C el tiempo promedio de los tres ensayos para que se fracture el material fue de 3109,33 min (51,82h), con una reducción del área de 79,66 % y una elongación de 6,16%, en el gráfico 7-4 se muestra el cálculo del área de la sección de rotura del espécimen LOC-A36-T550-T-1 con la ayuda del software AutoCAD.

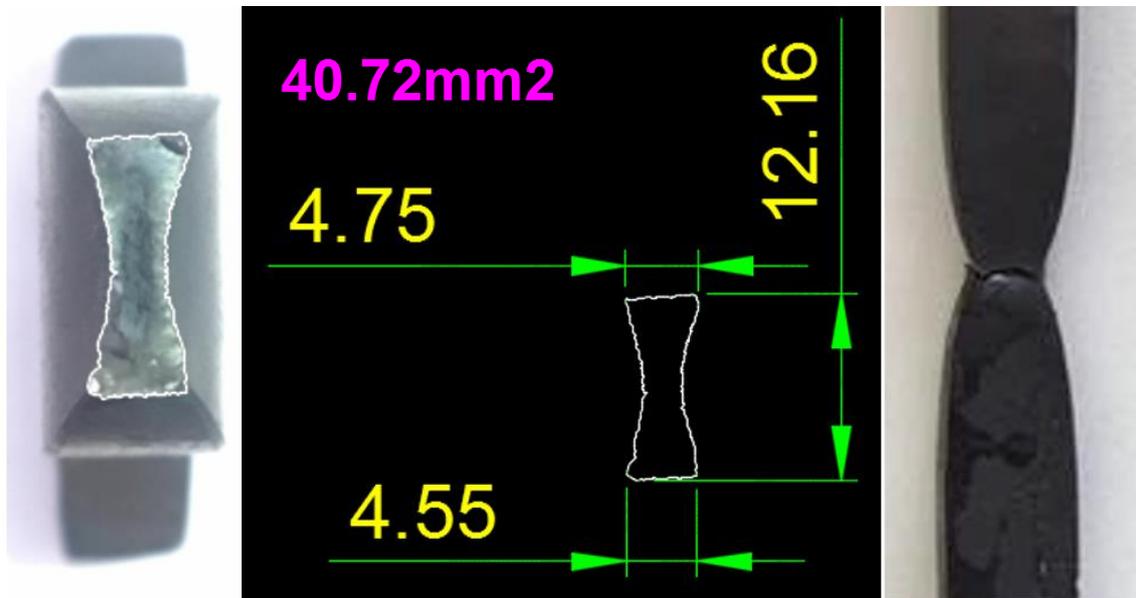


**Gráfico 7-4:** Probeta ensayada a termofluencia, área calculada en AutoCAD.

Fuente: Autores.

A 545°C el tiempo promedio de los tres ensayos para que se fracture el material fue de 4623 min (77,05h) con una reducción del área de 79,05 % y una elongación de 5,67%,

en el gráfico 8-4 se muestra el cálculo del área de la sección de rotura del espécimen LOC-A36-T545-T-1 con la ayuda del software AutoCAD.



**Gráfico 8-4:** Probeta ensayada a termofluencia, área calculada en AutoCAD.

Fuente: Autores.

A 540°C el tiempo promedio de los tres ensayos para que se fracture el material fue de 5170,33 min (86,17h) con una reducción del área de 77,74 % y una elongación de 6,01%, en el gráfico 9-4 se muestra el cálculo del área de la sección de rotura del espécimen LOC-A36-T545-T-1 con la ayuda del software AutoCAD.



**Gráfico 9-4:** Probeta ensayada a termofluencia, área calculada en AutoCAD.

Fuente: Autores.

Después de obtenido los resultados de los ensayos, se puede notar que: a medida que la temperatura se eleve; la duración de los ensayos se reduce y el porcentaje de reducción de área aumenta significativamente en los especímenes.

#### **4.1.2 Ensayos metalográficos en el acero A36.**

El principal objetivo de realizar las metalografías en las probetas extraídas de los especímenes sometidos al ensayo de termofluencia es obtener información visual de la morfología de las microestructuras presentes en el acero A36 con ayuda del microscopio óptico de barrido que se encuentra en el laboratorio de materiales de la ESPOCH en la Facultad de Mecánica Escuela de Ingeniería Mecánica.

La norma ASTM A370 indica como extraer las probetas de los especímenes, se las atacó con el reactivo nital al 4% durante un tiempo aproximado de 30 a 60 segundos, las metalografías se tomaron a 100 $\mu$ m 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm a partir de la fractura, los cortes que establece la norma se muestran en la figura 2-4.



**Figura 2-4:** Probeta ensayada cortada para ensayos metalográficos.

Fuente: Autores.

Para poder comparar los cambios morfológicos del acero A36 se hizo necesario preparar un espécimen en estado de suministro como muestra el gráfico 10-4, para luego compararla con las microestructuras de las muestras ya ensayadas.

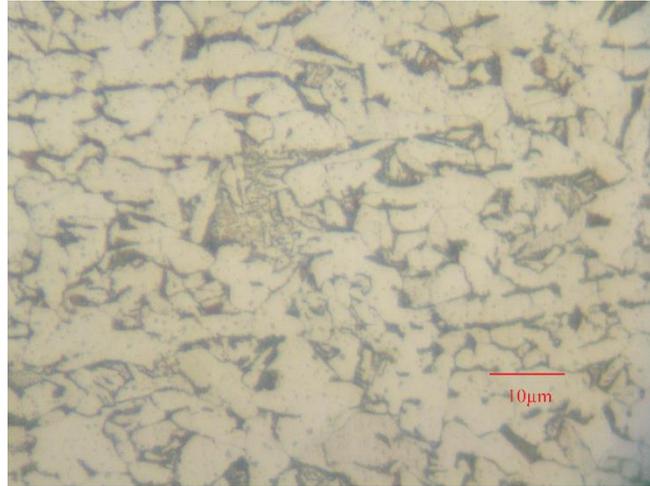


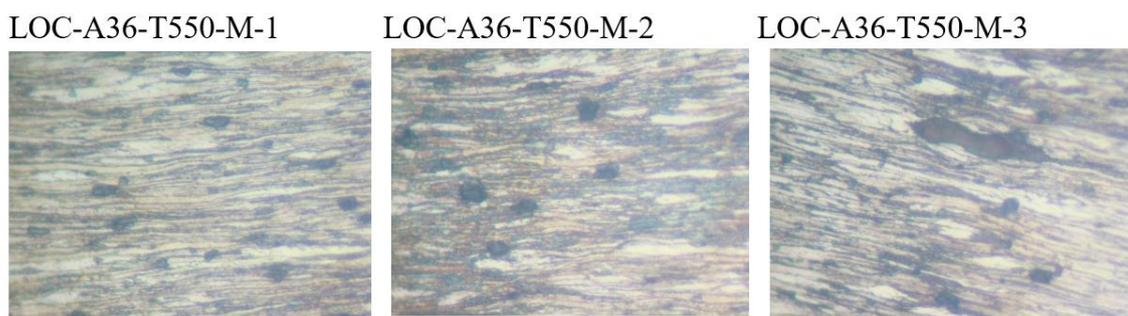
Gráfico 10-4: Metalografía a 500x del Acero A36.

Fuente: Autores.

#### 4.1.2.1 Resultados de los ensayos metalográficos del acero A36.

A continuación en las figuras se muestra las microestructuras a 100µm de distancia de la fractura para las temperaturas de 550°C, 545°C, 540°C a 500X de ampliación, atacada con nital al 4%.

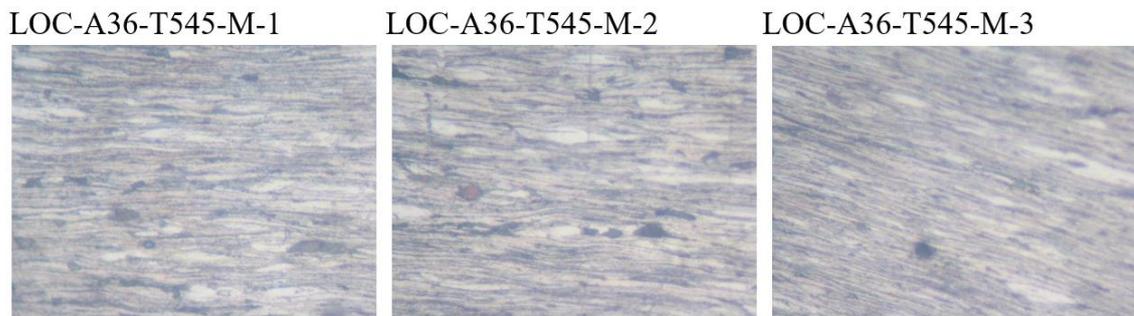
A 550°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 3-4, con una ampliación de 500X.



**Figura 3-4:** Microestructura a 100µm de la fractura a 550°C

Fuente: Autores.

A 545°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 4-4, con una ampliación de 500X.



**Figura 4-4:** Microestructura a 100µm de la fractura a 545°C.

Fuente: Autores.

A 540°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 5-4, con una ampliación de 500X.



**Figura 5-4:** Microestructura a 100µm de la fractura a 540°C.

Fuente: Autores.

A las temperaturas de 540°C, 545°C, 550°C, en la proximidad de la fractura es notorio encontrar las cavidades tipo R y tipo W, evidenciando la presencia del fenómeno denominado termofluencia en el acero A36.

A 535°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 6-4, con una ampliación de 500X.



**Figura 6-4:** Microestructura a 100 $\mu$ m de la fractura a 535°C.

Fuente: Autores.

A 530°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 7-4, con una ampliación de 500X.



**Figura 7-4:** Microestructura a 100 $\mu$ m de la fractura a 535°C.

Fuente: Autores.

A las temperaturas de 535°C, 530°C en la proximidad de la fractura no se encontró la presencia de las cavidades tipo R y tipo W, esto quiere decir que los especímenes no fueron afectados por el fenómeno de termofluencia y por lo tanto no llegaron a la fractura.

#### **4.1.3 Ensayos de microdureza en el acero A36.**

Los ensayos de microdureza se efectuaron a las distancias de: 100 $\mu$ m, 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm, donde se realizaron los ensayos metalográficos con el fin de validar su dureza en función de la microestructura del acero y consolidar si existe o no degradación por termofluencia tanto a nivel microestructural como físico.

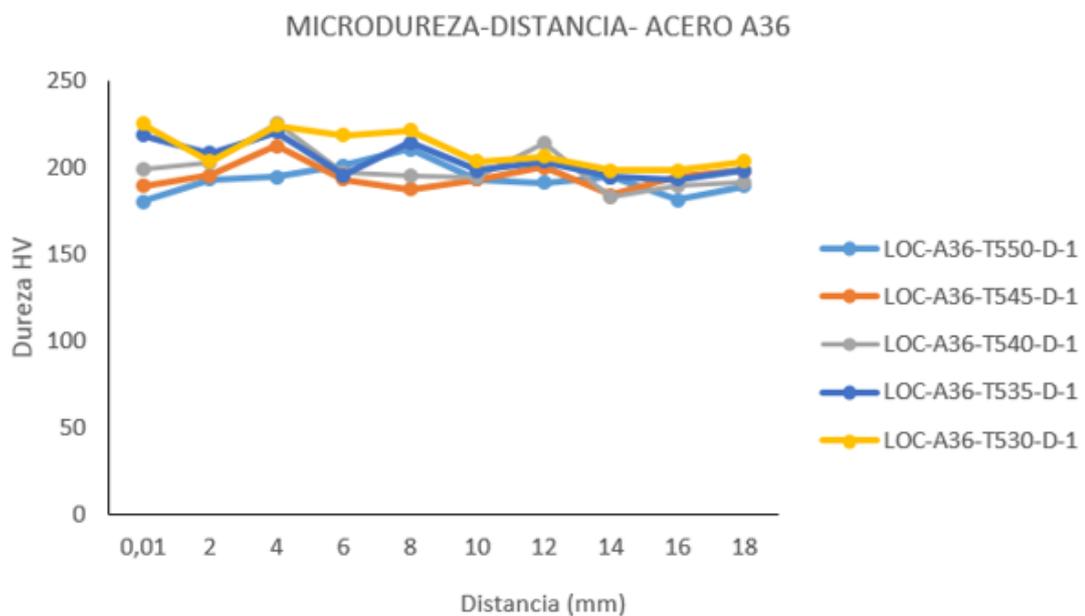
#### 4.1.3.1 Resultados de los ensayos de microdureza

En la tabla 4-4 se muestran los resultados de los ensayos de microdureza y en la gráfica 11-4 los resultados obtenidos de los ensayos.

**Tabla 4-4:** Durezas obtenidas de las muestras de acero A36.

Distancia	ACERO ASTM A36				
	TEMPERATURA				
	LOC-A36-T550-D-1	LOC-A36-T545-D-1	LOC-A36-T540-D-1	LOC-A36-T535-D-1	LOC-A36-T530-D-1
	550°C	545°C	540°C	535°C	530°C
	MICRODUREZA HV				
100µm	180	189	199	218	225
2mm	193	195	202	208	203
4mm	194	212	225	220	224
6mm	201	193	197	195	218
8mm	210	187	195	214	221
10mm	193	193	194	198	203
12mm	191	200	214	203	206
14mm	194	184	183	194	198
16mm	181	194	189	193	198
18mm	189	198	191	198	203

Fuente: Autores



**Gráfico 11-4:** Microdureza a partir de la fractura Acero A36.

Fuente: Autores.

En la gráfica 11-4 se observa como afecta la temperatura en la dureza del material ya que el máximo rango de temperatura a la que se ensayó fue de 550°C, a este valor de temperatura presenta una dureza inferior con respecto a la de las demás probetas. Esto se debe a que la termofluencia al ser un fenómeno que combina tracción con temperatura cuando más alta es la temperatura el valor de dureza leída será más pequeña, mientras que si el valor de temperatura es más bajo el valor leído de la dureza es grande, esto es debido en gran parte al endurecimiento por deformación. Evidencia de lo expuesto anteriormente es que las probetas que fueron extraídos de los especímenes ensayados a las temperaturas de 550°C, 545°C, 540°C muestran una baja dureza con respecto a las probetas de 530°C, 535°C que están a menor temperatura por ende el valor de la dureza es mayor que las de mayor temperatura.

## **4.2 Ensayos en la fundición nodular perlítica.**

Para la fundición nodular perlítica se realizaron tres ensayos por cada rango de temperatura dando un total de 18 ensayos de termofluencia, 18 ensayos metalográficos, 18 ensayos de microdureza.

### **4.2.1 *Ensayos de termofluencia en la fundición nodular perlítica.***

Los ensayos se realizaron en el rango de los (500°C a 550°C) en intervalos de 10 ° C cada vez, hasta poder determinar cómo afecta la termofluencia en la fundición nodular perlítica.

#### **4.2.1.1 *Resultados de los ensayos de termofluencia en la fundición nodular perlítica.***

En la figura 8-4 se muestra especímenes luego de haber sido ensayados, estos corresponden a la codificación LOC-FNP-T550-T-1, LOC-FNP-T540-T-1, LOC-FNP-T530-T-1, LOC-FNP-T520-T-1, LOC-FNP-T510-T-1, LOC-FNP-T500-T-1, una para cada rango de temperatura que se las ensayo.



**Figura 8-4:** Especímenes de fundición nodular perlítica ensayados.

Fuente: Autores.

En la tabla 5-4 se presenta los resultados tabulados de la duración del ensayo de termofluencia en minutos, reducción de área en porcentaje % y elongación en porcentaje %.

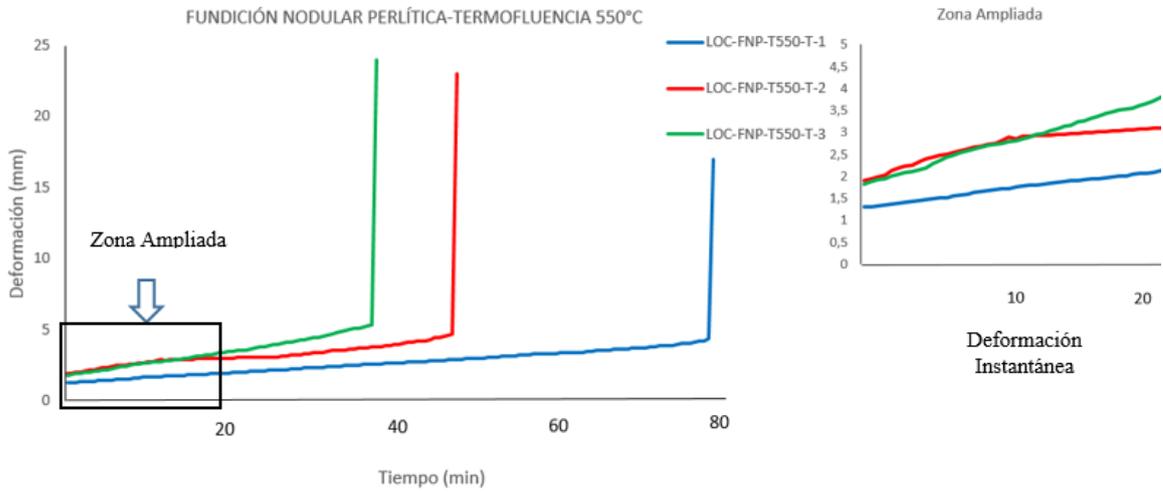
Tabla 5-4: Ensayos de termofluencia.

Identificación	Ensayo #	Duración del ensayo(min)	Reducción del Área (%)	Elongación (%)	Área inicial (mm)	Área final (mm)
FNP TEMP 550	46	71	4,43	5,20	200	191,14
	47	43	4,40	5,31	200	191,2
	48	35	4,36	5,18	200	191,28
FNP TEMP 540	49	46	3,66	4,28	200	192,69
	50	33	3,99	4,36	200	192,02
	51	39	3,83	4,14	200	192,34
FNP TEMP 530	52	66	3,40	3,45	200	193,2
	53	56	3,22	3,41	200	193,56
	54	100	3,32	3,43	200	193,37
FNP TEMP 520	55	226	2,80	2,79	200	194,4
	56	238	2,88	2,69	200	194,25
	57	158	2,84	2,71	200	194,32
FNP TEMP 510	58	214	1,83	1,87	200	196,33
	59	262	1,86	1,89	200	196,27
	60	360	2,44	1,92	200	195,12
FNP TEMP 500	61	465	2,18	1,56	200	195,64
	62	309	1,18	1,54	200	197,65
	63	339	1,18	1,52	200	197,64

Fuente: Autores.

A continuación se muestra las curvas de termofluencia para cada una de las temperaturas ensayadas en los gráficos 12-4, 13-4, 14-4, 15-4, 16-4 respectivamente, además en los gráficos se muestra la deformación instantánea debido a la precarga del espécimen.

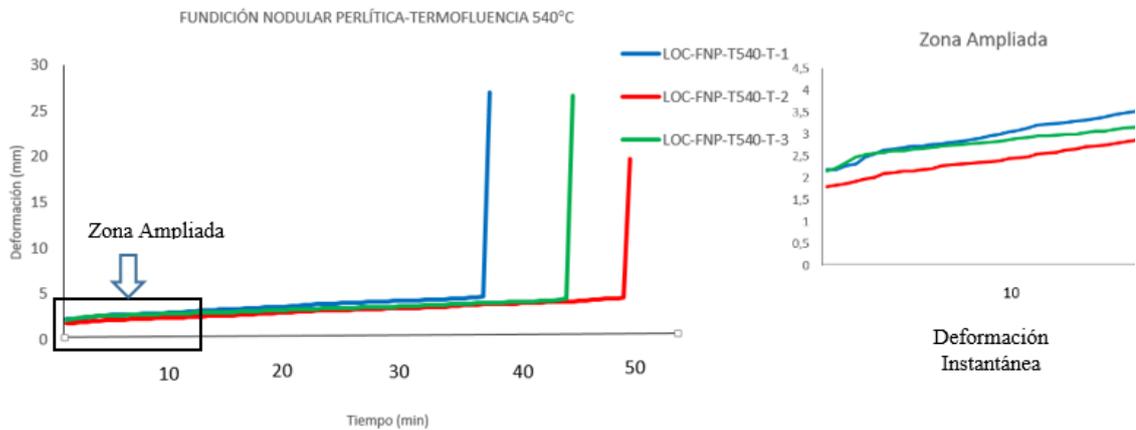
Ensayos a 550°C tiempo promedio de duración de los ensayos 50,66min, deformación instantánea promedio 1,87mm.



**Gráfico 12-4:** Curvas de los ensayos de 550°C fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

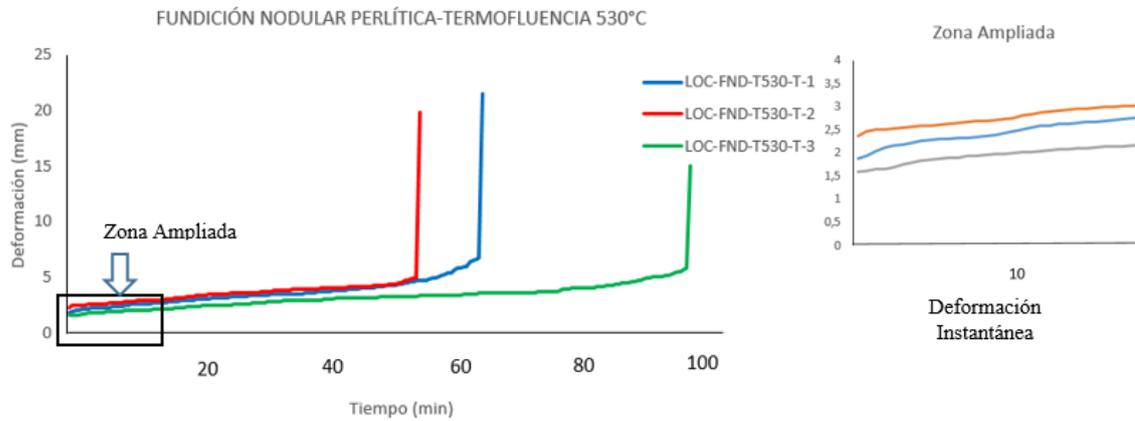
Ensayos a 540°C tiempo promedio de duración de los ensayos 39,33min, deformación instantánea promedio 2,03mm.



**Gráfico 13-4:** Curvas de los ensayos de 540°C fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

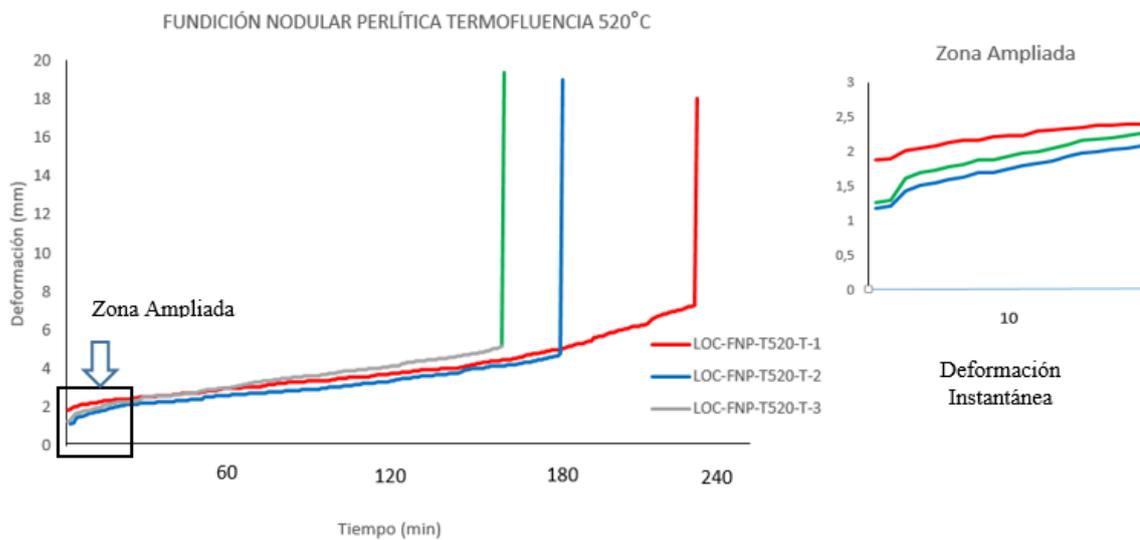
Ensayos a 530°C tiempo promedio de duración de los ensayos 74min, deformación instantánea promedio 1,72mm.



**Gráfico 14-4:** Curvas de los ensayos de 530°C fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

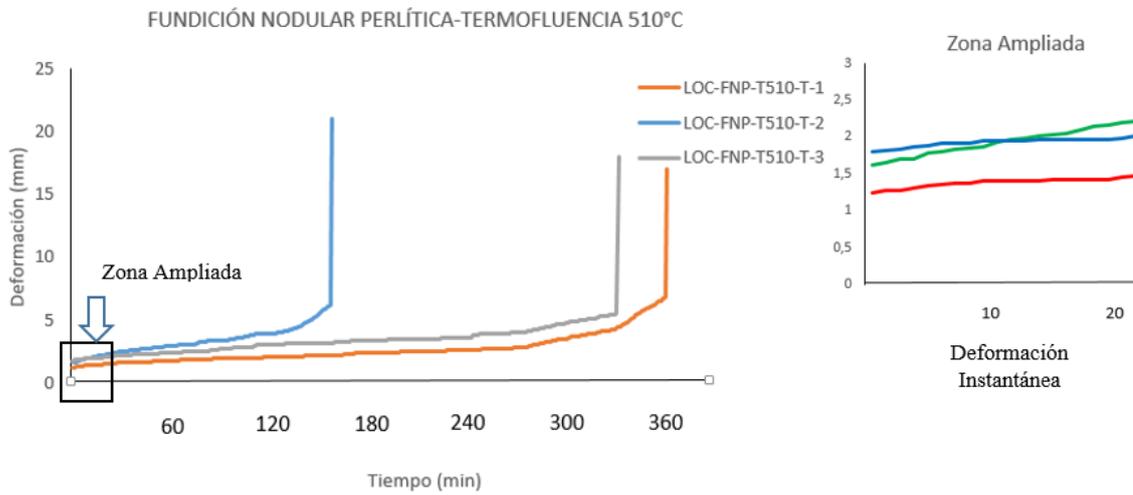
Ensayos a 520°C tiempo promedio de duración de los ensayos 207,33min, deformación instantánea promedio 1,41mm.



**Gráfico 15-4:** Curvas de los ensayos de 520°C fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

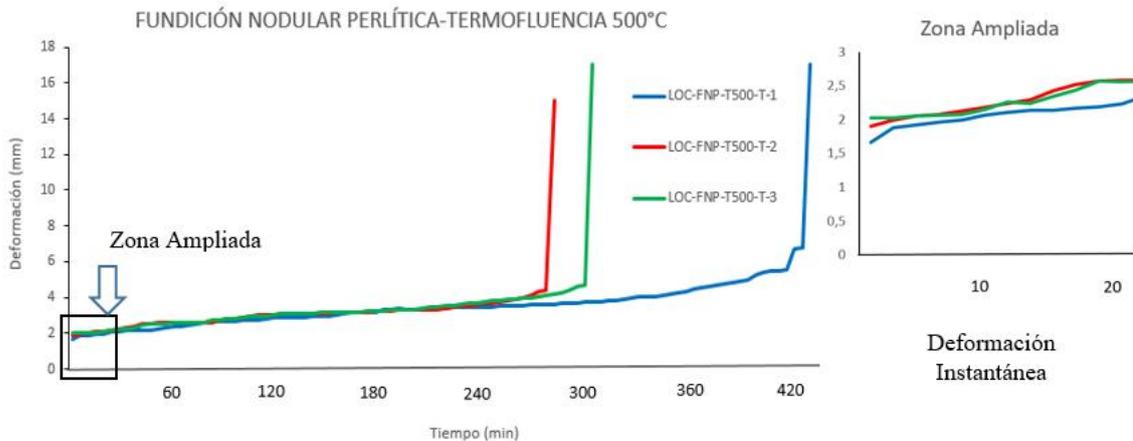
Ensayos a 510°C tiempo promedio de duración de los ensayos 278,66min, deformación instantánea promedio 1,52mm.



**Gráfico 16-4:** Curvas de los ensayos de 510°C fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

Ensayos a 500°C tiempo promedio de duración de los ensayos 371min, deformación instantánea promedio 1,92mm



**Gráfico 17-4:** Curvas de los ensayos de 500°C fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

Después de obtener los resultados de los ensayos se muestra que a medida que la temperatura de ensayo se eleva la duración del ensayo se acorta, el porcentaje de reducción del área es muy bajo en los especímenes ya que se trata de un material frágil.

#### 4.2.2 Ensayos metalográficos en la fundición nodular perlítica.

El principal objetivo de realizar las metalografías en las probetas extraídas de los especímenes sometidos al ensayo de termofluencia es obtener información visual de la morfología de las microestructuras presentes en la fundición nodular perlítica con ayuda del microscopio óptico de barrido que se encuentra en el laboratorio de materiales de la ESPOCH en la Facultad de Mecánica Escuela de Ingeniería Mecánica.

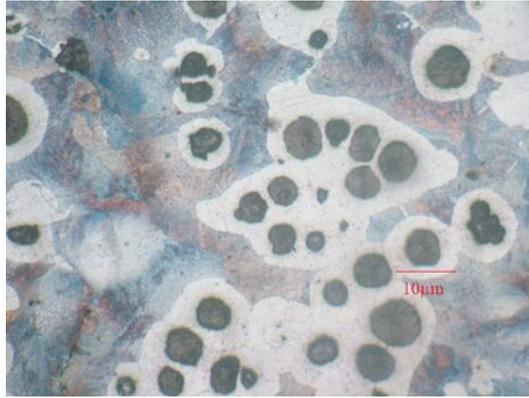
La norma ASTM A370 es la que indica como extraer las probetas de los especímenes, se las atacó con el reactivo nital al 4% durante un tiempo aproximado de 30 a 60 segundos, las metalografías se tomaron a 100 $\mu$ m, 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm, a partir de la fractura, los cortes que establece la norma se muestran en la figura 2-4



**Figura 9-4:** Probeta ensayada cortada para ensayos de termofluencia.

Fuente: Autores.

Para poder comparar los cambios morfológicos de la fundición nodular perlítica se hizo necesario preparar un espécimen en estado de suministro como muestra el gráfico 17-4, para luego compararla con las muestras ya ensayadas.



**Gráfico 18-4:** Metalografía a 100x fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

#### 4.2.2.1 Resultados de los ensayos metalográficos de la fundición nodular perlítica.

A continuación se muestra las microestructuras a 100 $\mu$ m de distancia de la fractura para las temperaturas de 500°C, 510°C, 520°C, 530°C, 540 °C, 550°C a 100X de ampliación sin atacar y atacada con nital al 4%.

A 500°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 10-4, 11-4, 12-4 con una ampliación de 100X.

LOC-FNP-T500-M-1

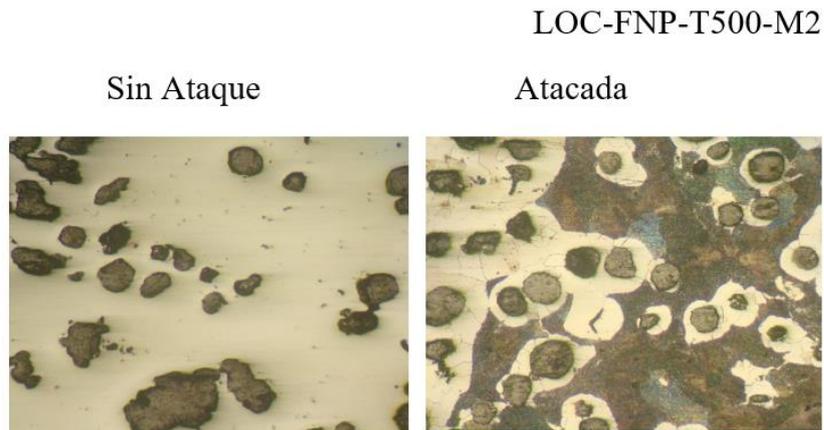
Sin Ataque

Atacada



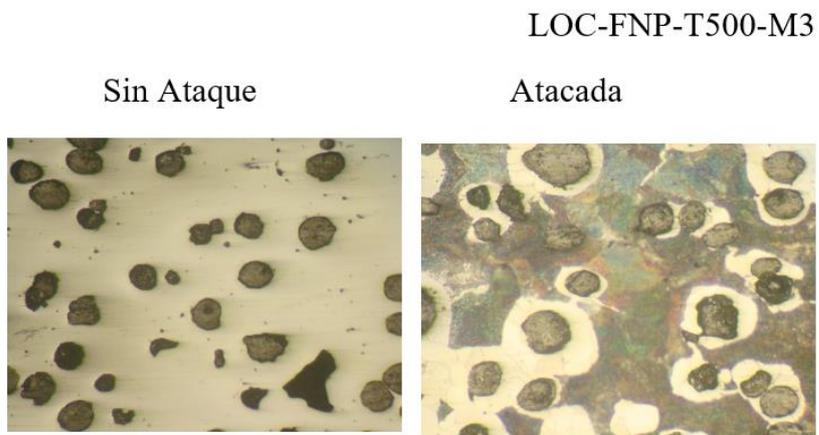
**Figura 10-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 500°C sin atacar y atacada.

Fuente: Autores.



**Figura 11-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 500°C sin atacar y atacada.

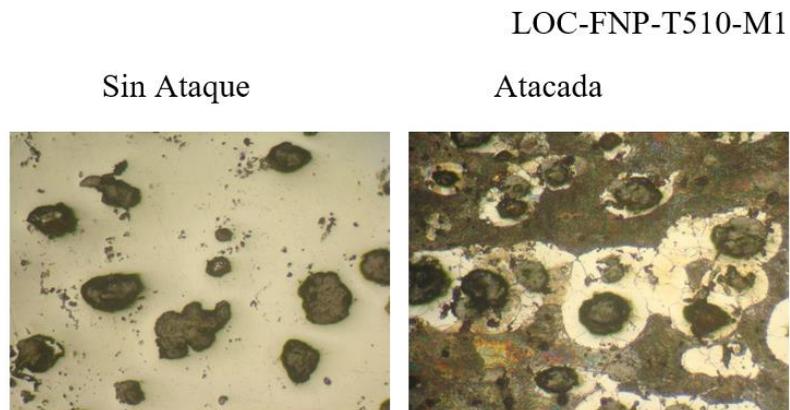
Fuente: Autores.



**Figura 12-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 500°C sin atacar y atacada.

Fuente: Autores.

A 510°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 13-4, 14-4, 15-4 con una ampliación de 100X.



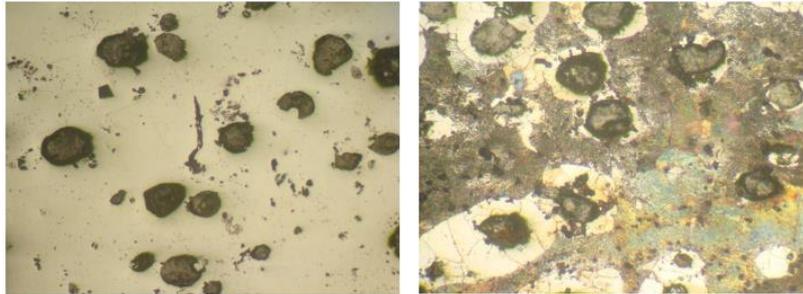
**Figura 13-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 510°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T510-M2

Sin Ataque

Atacada



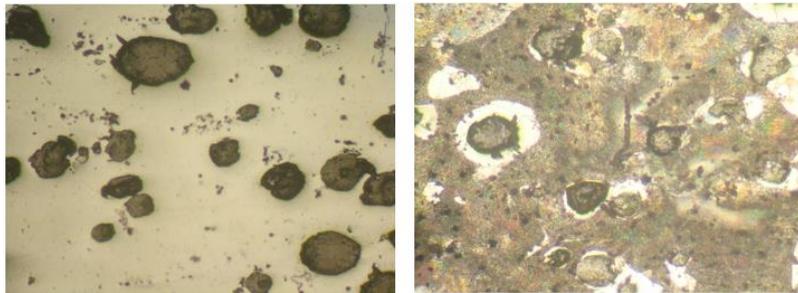
**Figura 14-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 510°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T510-M3

Sin Ataque

Atacada



**Figura 15-4** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 510°C sin atacar y atacada

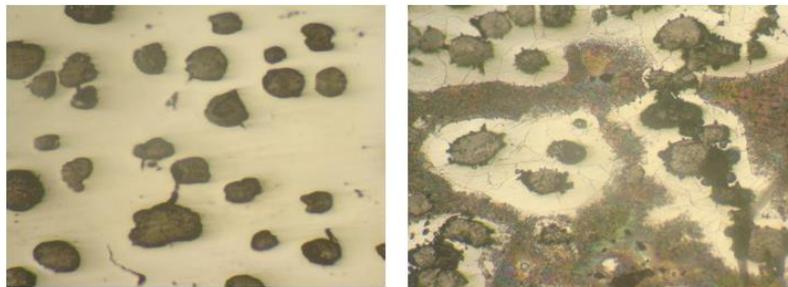
Fuente: Autores.

A 520°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 16-4, 17-4, 18-4 con una ampliación de 100X.

LOC-FNP-T520-M1

Sin Ataque

Atacada



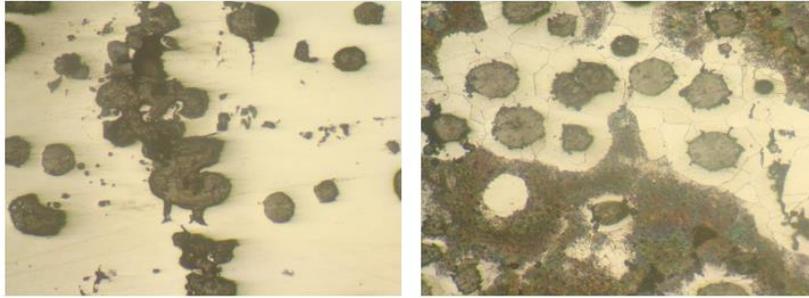
**Figura 16-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 520°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T520-M2

Sin Ataque

Atacada



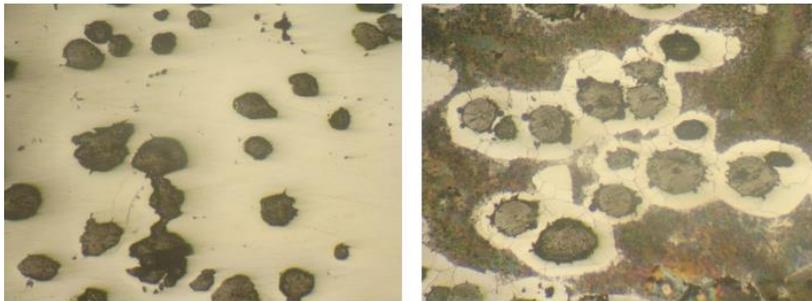
**Figura17 -4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 520°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T520-M3

Sin Ataque

Atacada



**Figura 18-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 520°C sin atacar y atacada

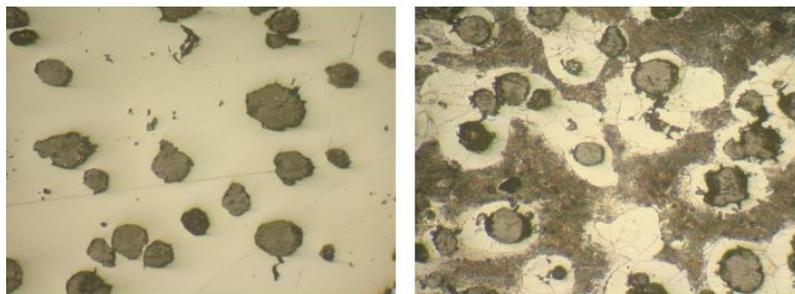
Fuente: Autores.

A 530°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 19-4, 20-4, 21-4 con una ampliación de 100X.

LOC-FNP-T530-M1

Sin Ataque

Atacada



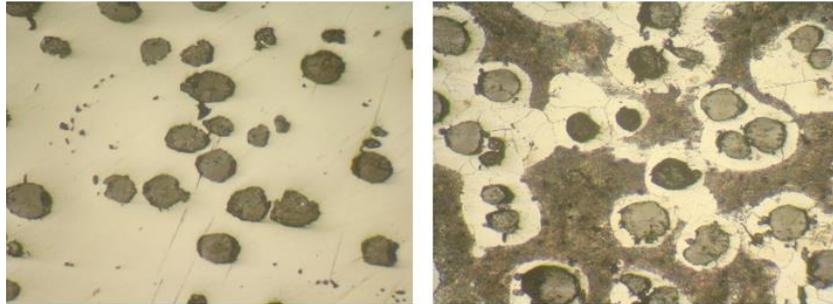
**Figura 19-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 530°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T530-M2

Sin Ataque

Atacada



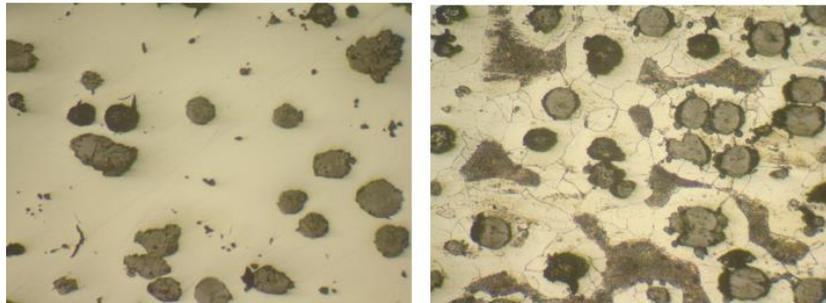
**Figura 20-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 530°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T530-M3

Sin Ataque

Atacada



**Figura 21-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 530°C sin atacar y atacada

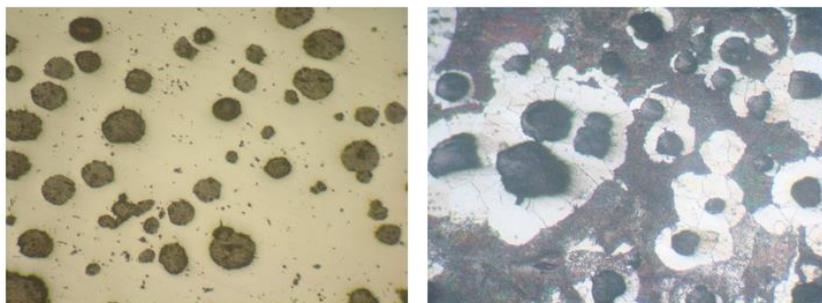
Fuente: Autores.

A 540°C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 22-4, 23-4, 24-4 con una ampliación de 100X.

LOC-FNP-T540-M1

Sin Ataque

Atacada



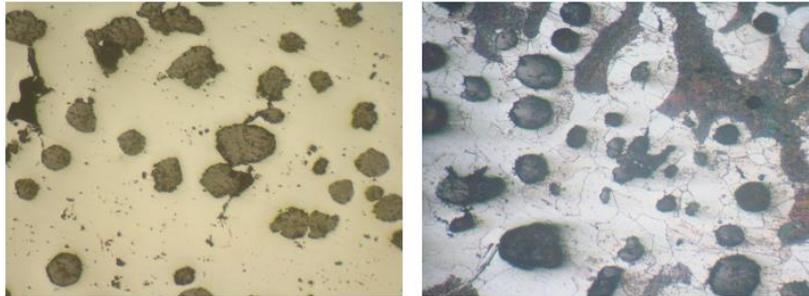
**Figura 22-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 540°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T540-M2

Sin Ataque

Atacada



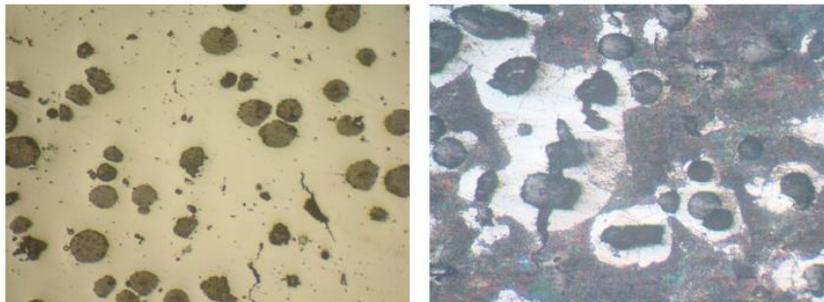
**Figura 23 -4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 540°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T540-M3

Sin Ataque

Atacada



**Figura 24-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 540°C sin atacar y atacada

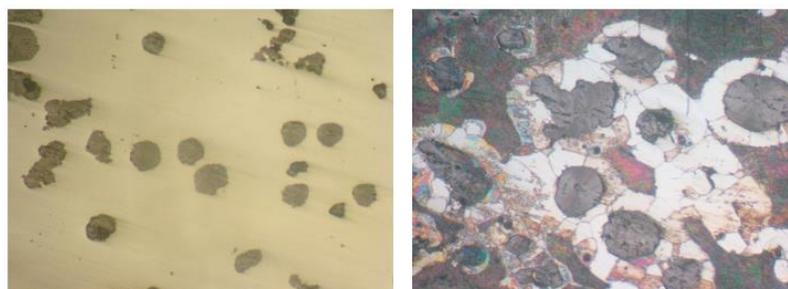
Fuente: Autores.

A 550 ° C se obtuvieron las siguientes metalografías mostradas en la figura 25-4, 26-4, 27-4 con una ampliación de 100X.

LOC-FNP-T550-M1

Sin Ataque

Atacada



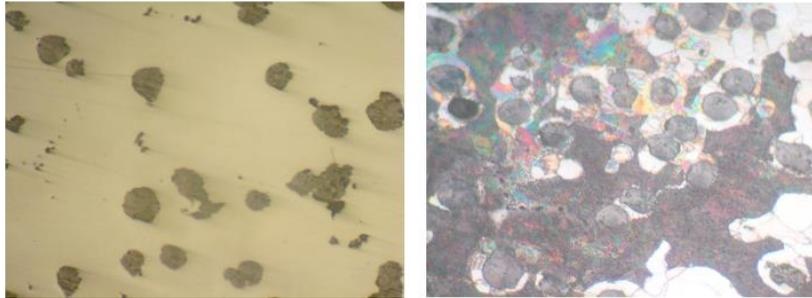
**Figura 25-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 550°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T550-M2

Sin Ataque

Atacada



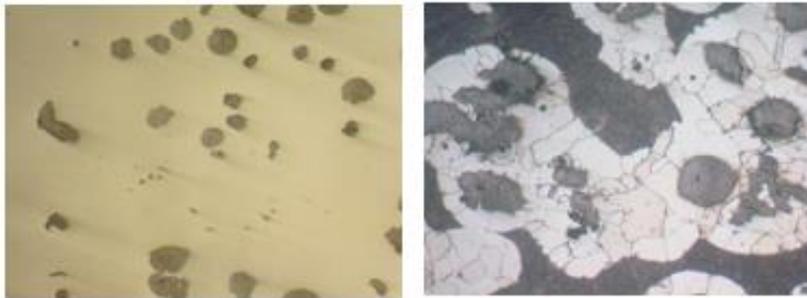
**Figura 26 -4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 550°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

LOC-FNP-T550-M3

Sin Ataque

Atacada



**Figura 27-4:** Microestructura 100 $\mu$ m de fractura a 550°C sin atacar y atacada

Fuente: Autores.

En las metalografías se puede observar nódulos de grafito que hace característica a este tipo de fundición. Las metalografías realizadas tanto en el estado de suministro como las mostradas a 100 $\mu$ m de la distancia de fractura no muestran cambio en la morfología, tanto por afectación de la tracción como de la temperatura, dando a notar que no afecta la termofluencia en este tipo de material. Esto puede ser quizás porque la termofluencia es un fenómeno dinámico que transcurre con el tiempo, por lo tanto los tiempos de ensayo fueron cortos sin dar lugar a que la termofluencia actué degradando el material.

#### 4.2.3 Ensayos de microdureza en la fundición nodular perlítica.

Los ensayos de microdureza se efectuaron a las distancias de 100µm, 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm, donde se realizaron los ensayos metalográficos con el fin de validar su dureza en función de la microestructura de la fundición nodular perlítica y consolidar si existe o no degradación por termofluencia tanto a nivel microestructural como físico.

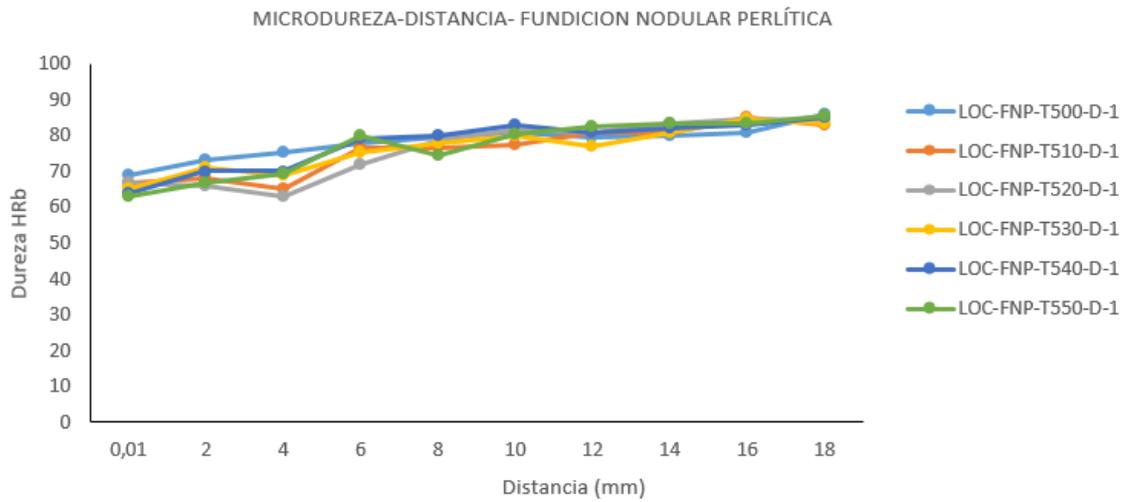
##### 4.2.3.1 Resultados de los ensayos de microdureza

En la tabla 6-4 se muestran los resultados de los ensayos de microdureza y en la gráfica 18-4 los resultados obtenidos de los ensayos.

**Tabla 6-4:** Durezas obtenidas en el ensayo.

FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA						
TEMPERATURA						
Distancia	LOC-FNP-T500-D-1	LOC-FNP-T510-D-1	LOC-FNP-T520-D-1	LOC-FNP-T530-D-1	LOC-FNP-T540-D-1	LOC-FNP-T550-D-1
	500°C	510°C	520°C	530°C	540°C	550°C
MICRODUREZA HRb						
100µm	69	67	67	65	64	63
2mm	73	68	66	71	70	67
4mm	75,5	65	63	69	70	69,5
6mm	78	76,5	72	75,5	79	80
8mm	79,5	76,5	78,5	78	80	74,5
10mm	81	77,5	81,5	80	83	80,5
12mm	79,5	81	81	77	81	82,5
14mm	80	81	83,5	81	82	83,5
16mm	81	85	84,5	84,5	83	83,5
18mm	86	83	84	83,5	85	85,5

Fuente: Autores.



**Gráfico 19-4:** Microdureza a partir de la fractura fundición nodular perlítica.

Fuente: Autores.

Al ser la fundición un material que trabaja de mejor manera a cargas axiales de compresión la dureza no se ve afectada en gran parte por efectos de termofluencia.

## CAPITULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 5.1 Conclusiones.

Las curvas de los ensayos de termofluencia obtenidas a las temperaturas de 550°C, 545°C, 540°C, muestran las tres etapas de la curva característica de termofluencia y por lo tanto llegaron a fracturarse, pero a partir de la temperatura de 535°C y 530°C solo llegaron hasta la segunda etapa de la curva en un tiempo de 4 días de ensayo.

A medida que la temperatura aumenta el tiempo de ensayo disminuye, la deformación instantánea es mayor, es así que a la temperatura de 550°C el tiempo necesario para que llegue a la fractura fue de 3109,33min con una deformación instantánea de 1,24mm, y a la temperatura de 535°C transcurrieron 5970 min sin llegar a la fractura con un deformación instantánea de 1,09mm.

Caicedo I. en su tesis determinó que el acero A36 presentaba termofluencia a partir de los 550°C, pero hasta 500°C a una carga moderada el acero no presentaba termofluencia, ya que el realizó un barrido de temperatura cada 50 °C, nuestro objetivo fue hacer barridos cada 5°c de temperatura para determinar con mayor exactitud la temperatura a la cual este material inicia a ser afectado por termofluencia, por lo que empezamos a realizar este barrido en orden descendente desde los 550 °C determinando que hasta los 535°C el acero A36 a un carga de 2448Kgf no presenta termofluencia.

A medida que la temperatura aumenta la ductilidad del acero A36 aumenta y tenemos cuantificado en porcentaje de alargamiento y de reducción de Área, es así que a la temperatura de 550°C el porcentaje de alargamiento es de 6,17 % y de reducción de área de 79,64%, y a la temperatura de los 535°C el porcentaje de alargamiento es de 1,35 % y de reducción de área de 27,95%.

La deformación excesiva es un tipo de falla del material muy evidente debido a esfuerzo pero no menos importante, por lo que el diseñador deberá tener muy en cuenta que a la temperatura de 550°C hasta 540°C el acero A36 presenta deformaciones excesivas es decir el material fallará por deformación excesiva.

En las microestructuras de los especímenes ensayados a termofluencia a las temperaturas de 550°C ,545°C ,540°C, se puede notar claramente que la microestructura ha cambiado totalmente por efectos de la degradación en el material por el fenómeno de termofluencia, es así que podemos observar que las fases de ferrita y perlita están alargadas en dirección a la carga aplicada, pero además no guardan una configuración de distribución, también se puede visualizar la presencia de cavidades tipo R y W que son características de la termofluencia en el acero, todo esto contribuye a la degradación del material tanto a nivel microestructural como físico (dureza).

A medida que la temperatura aumenta las cavidades tipo R y tipo W aumentan y crecen debido a la difusión térmica que le permite a las cavidades moverse a través de los límites de grano y agruparse formando cavidades más grandes, así como también esta difusión térmica hace que estos límites de grano y las uniones triples formen nuevas cavidades tipo R y W respectivamente debido a desgarres.

Cuando el acero A36 está sometido a termofluencia el valor de la dureza disminuye a medida que la temperatura de ensayo aumenta, esto es debido a la formación de fases blandas por descarburización del material a causa de la temperatura y del esfuerzo aplicado, es así que a la temperatura de 550°C tenemos una dureza de 180HV y a los 535°C tenemos una dureza de 218HV en la cercanía de la fractura (100µm).

Los resultados de esta investigación serán de gran ayuda para el diseñador de elementos estructurales y de máquinas que estén sometidas a termofluencia, ya que si la temperatura sobrepasa los 535°C a un esfuerzo moderado (2448Kgf) el diseñador deberá tomar en cuenta de que este acero resulta seriamente afectado a nivel microestructural y físico, por lo tanto sus propiedades decaen drásticamente por lo que la mejor opción es optar por otro tipo de material, pero no así a temperaturas menores a

35°C donde el material se comporta aceptablemente como lo demuestra este trabajo, consiguiendo así diseños seguros y confiables.

En la fundición nodular perlítica se realizaron las mismas experimentaciones que con el acero A36 llegando a la conclusión de que el material a esta temperatura y a este esfuerzo no presentó termofluencia, pese a que el material llegó a fracturarse en los ensayos respectivos, se fracturó por efectos de la carga aplicada mas no por termofluencia, esto lo validamos al realizar el análisis microestructural ya que a lo largo de los ensayos no presentó cambios microestructurales.

El fenómeno de termofluencia es un fenómeno dinámico que transcurre a través del tiempo, los ensayos en la fundición nodular perlítica duraron relativamente poco tiempo (250 minutos promedio) impidiendo que la termofluencia pueda actuar.

Termofluencia se denomina un fenómeno porque combina dos factores importantes y agresivos para los materiales. Al ser un fenómeno no se puede analizar cada factor por separado ya que si analizáramos la influencia de la temperatura y la tracción por separados el resultado no sería el mismo porque no tiene un comportamiento lineal.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda realizar ensayos de termofluencia aplicando esfuerzos superiores e inferiores al analizado en este trabajo.

Se recomienda realizar los ensayos de termofluencia en la fundición nodular perlítica con esfuerzos menores al analizado en este trabajo, para que los tiempos de ensayo tengan una mayor duración y por ende la termofluencia tenga el tiempo suficiente para degradar este material.

Se recomienda difundir la información de esta investigación al gremio industrial y profesional para que se obtenga diseños confiables y seguros de elemento estructurales que se construyen en acero A36 sometidos al fenómeno de termofluencia.

Se recomienda realizar los ensayos de termofluencia en ambientes con atmosferas agresivas ya sea dióxido de carbono, ambientes salinos, etc. que corroen a los materiales, y de esta manera obtener una base de datos más grande sobre este fenómeno.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

**ASKERLAND, Donald R.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Tercera. Rolla: Editorial Thomsom, 1998. pp. 60-104.

**BADIOLA, V.** Departamento Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales. *Diseño de máquinas I*. [En línea] 2004. [Consultado: 24 de 05 de 2017.]

**CAICEDO REYES, Jorge Isaías.** *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*. (Universida Técnica de Ambato), (Facultad de ingeniería civil y mecánica), (Escuela de ingeniería civil y mecánica).(Maestría). Ambato. 2014. pp. 23-96

**CALLISTER, William D.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Utah: Editorial Reverté, 1995. pp. 136-218

**CORACE, Juan J.** Física II. [En línea] 2009. [Consultado: 08 de 06 de 2017.] <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/U03.pdf>.

**GONZALES G. & PERDER G.** *Estudio de la variación estructural de aceros sometidos a termofluencia*. Bahía Blanca: Universidad Tecnológica Nacional, 2008. Vol. 2. pp. 21-76.

**GAUNA, Edgar.** *Análisis del creep con temperatura variable aplicando elemnto de frontera*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2011. pp. 63-94. Vol. 1.

**GONZALES VELÁZQUEZ, Jorge Luis.** 2003. *Metalurgia Mecánica*. Primera. México: Limusa, S.A. de C.V., 2003. pp. 5-18.

**INTERNACIONAL, ASTM.** *Stain Steel Casting Alloys: Metallographic Techniques and Microstructures*. Ohio USA: ASM International, 1998. Vol. 9.

**ISO 6892-1 E.** *Method of test at room temperature*. Hong Kong: ISO, 2009.

**LOOR J. & MORALES F.,** "Ensayo de Termofluencia del Acero AISI-SAE 1018 y Construcción del Modelo Predictivo de Vida. Guayaquil: 2012. pp. 7-11.

**MARTINEZ, J.R.** *Defromacion a escala cristalina*. Salamanca: Universidad de Salamanca, 2003. pp. 3-14.

**MAYORI, M. & ALEJANDRO M.** *Resistencia de Materiales Aplicada*. La Paz Bolivia: Yucatán Hermosa, 2008. pp. 305.

**MORO L. & SARAVIA Rey.** *Influencia de los aleantes y del ataque por hidrógeno sobre las propiedades mecánicas de aceros ferríticos termoresistentes*. Bahía Blanca, ARGENTINA: Universidad Nacional del Sur, 2003. Vol. 1. pp. 2-21.

**MURRAY, Spiegel.** *Mecánica Teórica*. México: McGRAW-HILL, 1977. pp. 28-36.

**MUSSINI, Rodolfo.** *Nuevas tendencias en la evaluación del daño por creep a través de técnicas no destructivas*. Montevideo-Uruguay: PANNDT, 2003. Vol. 1. pp. 1-7.

**CARRILLO P., & ATXAGA, G. & IRISARRI M.** *Estudio del comportamiento a fluencia de un acero*. San Sebastián: Fundación INASMET, 2001. pp. 130-145. Vol. 18.

**PÁSTOR, Mario.** *Introducción a la metalurgia*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2004. pp. 8-78.

**PEÑA, Martín.** Temperatura. [En línea] 2007. [Consultado: 24 de 07 de 2017.]

**REED HILL, Robert E.** *Principios de Metalurgia Física*. Tercera. Florida: CECSA, 1982. pp. 23-54.

**SALAZAR P. & CASTRO S.** Metalografía-Universidad Tecnológica de Pereira. *Metalografía-Universidad Tecnológica de Pereira*. [En línea] 31 de Julio de 2012. [Consultado: 4 de Julio de 2017.] <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/#219>.