



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



***INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y  
MECÁNICOS EN LA RELAJACIÓN DE ESFUERZOS DE ACEROS  
PERLÍTICOS EMPLEADOS EN CONCRETO PRETENSADO***

Adriana Patricia Delgado E.

Valencia, diciembre de 2007



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



***INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS EN LA  
RELAJACIÓN DE ESFUERZOS DE ACEROS PERLÍTICOS EMPLEADOS EN  
CONCRETO PRETENSADO***

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

Adriana Patricia Delgado E.

Valencia, diciembre de 2007



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado “Influencia de los tratamientos térmicos y mecánicos en la relajación de esfuerzos de aceros perlíticos empleados en concreto pretensado”, realizado por el bachiller: Adriana Patricia Delgado Espinoza, cedula de identidad: 14.959.360, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

Prof. Sandra Cabello  
Tutor

---

Jurado

---

Jurado



## RESUMEN

La investigación se basó en el comportamiento de relajación de un acero 1080, trefilado en frío empleado en la industria de la construcción, sometido a un tratamiento térmico a 400°C de relevado de tensiones, a un tratamiento mecánico de estirado durante 10 minutos a un 80% del esfuerzo de fluencia y a una combinación de ambos tratamientos. El estudio se realizó en alambres de 4,24 mm de diámetro, para ello se utilizó una maquina universal de ensayos MTS de 25 Ton. Modelo Sistema de 810, con un software de adquisición de datos Lap. View 6.1 DPMCA, la cual permite mantener a deformación constante, una carga inicial del 80% del promedio de cargas máximas, y registrar la disminución de esta en el tiempo. Los datos experimentales son ajustados mediante el modelo polinómico, siendo representativo el parámetro de correlación, en la definición de la condición óptima de baja relajación. En el desarrollo de la investigación no se encontró correlación entre la microestructura obtenida por microscopia óptica y los perfiles de relajación correspondientes a cada una de las condiciones ensayadas. Se determino que la condición óptima para reducir las perdidas de relajación que implica un tratamiento termomecánico.



## ÍNDICE GENERAL

### CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO</b>	
<b>I</b>	
<b>EL PROBLEMA</b>	
I.1. Título del trabajo	2
I.2. Planteamiento del problema	2
I.3. Objetivos	4
I.3.1. Objetivo general	4
I.3.2. Objetivos específicos	4
I.4. Justificación	4
I.5. Limitaciones	5
I.6. Delimitaciones	5
<b>II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	
II.1. Revisión de antecedentes	6
II.2. Bases teóricas	11
II.2.1. Aceros	11
II.2.1.1. Tipos de acero	11
II.2.1.2. Diagrama hierro – carbono	13
II.2.2. Acero de preesfuerzo	15
II.2.4.1. Pérdida de preesfuerzo	15
II.2.3. Proceso de trefilado	16
II.2.4. Concreto presforzado	20
II.2.4.1. Hormigón	20
II.2.4.2. Pretensado	20



II.2.4.2.1. Ventajas del pretensado	21
II.2.4.3. Postensado	21
II.2.4.2.1. Ventajas del postensado	22
II.2.5. Tratamiento térmico	22
II.2.5.1. Proceso de relevado de tensiones	23
II.2.5.2. Recocido de alivio de tensiones	23
II.2.5.3. Proceso termomecánico de baja relajación	23
II.2.5.3.1. Principales ventajas	24
II.2.6. Relajación de esfuerzos	24
II.2.6.2. Ensayo de relajación	25
II.2.6.4. Influencia de las tensiones residuales	25
<b>III</b>	
<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	
III.1. Nivel de la investigación	27
III.2. Diseño de la investigación	27
III.3. Población y muestra	28
III.4. Técnicas e instrumentos de la recolección de datos	28
III.5. Características del material de estudio	29
III.5.1. Material usado	29
III.5.1.1. Composición química	30
III.6. Preparación de probetas	30
III.10. Condiciones de estudio	31
III.11. Diseño de la realización de experimentos	31
III.12. Ensayo de tracción	31
III.12.1. Tratamiento de estirado	32
III.13. Tratamiento térmico	32
III.14. Ensayo de relajación	33
III.15. Estudio metalográfico	34



<b>IV</b>	<b>RESULTADOS</b>	
	IV.1. Ensayo de tracción	35
	IV.1.1. Condición original	36
	IV.1.2. Condición original + tratamiento mecánico	37
	IV.1.3. Condición original + tratamiento térmico	40
	IV.1.4. Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico	42
	IV.2. Ensayo de relajación	45
	IV.2.1. Condición original	46
	IV.2.2. Condición original + tratamiento mecánico	47
	IV.2.3. Condición original + tratamiento térmico	48
	IV.2.4. Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico	49
	IV.2.5. Patrones de relajación definidos	49
	IV.3. Metalografía	51
	IV.3.1. Vista longitudinal con aumento de 100X	52
	IV.3.2. Vista longitudinal con aumento de 500X	53
	IV.3.3. Vista longitudinal con aumento de 1000X	54
<b>V</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
	V.1. Ensayo de tracción	55
	V.1.1. Condición original	55
	V.1.2. Condición original + tratamiento mecánico	55
	V.1.3. Condición original + tratamiento térmico	55
	V.1.4. Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico	56
	V.2. Ensayo de relajación	
	V.1.1. Condición original	56
	V.1.2. Condición original + tratamiento mecánico	57



	V.1.3. Condición original + tratamiento térmico	57
	V.1.4. Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico	57
	V.2.5. Patrones de relajación seleccionados	58
	V.3. Metalografía	60
	IV.3.1. Vista longitudinal con aumento de 100X	60
	IV.3.2. Vista longitudinal con aumento de 500X	60
	IV.3.3. Vista longitudinal con aumento de 1000X	61
<b>VI</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>63</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXOS</b>	





## INDICE DE FIGURAS

### CONTENIDO

<b>Fig. #</b>	<b>Pag.</b>
2.1 Diagrama hierro – carbono	14
2.2 Representación esquemática de la microestructura de un acero eutectoide	16
2.3 Trefilado	18
2.4 Banco de trefila	18
2.5 Torón	20
2.6 Fabricación del torón	20
2.7 Concreto pretensado	21
2.8 Viga pretensada	22
2.9 Viga postensada	22
2.10 Curva de relajación	25
3.11 Microscopio óptico	29
4.12 Curva esfuerzo – deformación condición original (CO)	35
4.13 Curva esfuerzo – deformación CO + tratamiento mecánico (TM)	38
4.14 Curva esfuerzo – deformación CO + Tratamiento térmico (TT)	40
4.15 Curva esfuerzo deformación CO + TT + TM	42
4.16 Patrones de relajación CO – ajuste polinómico de grado 5	46
4.17 Patrones de relajación CO + TM – ajuste polinómico de grado 5	47
4.18 Patrones de relajación CO + TT – ajuste polinómico de grado 5	48
4.19 Patrones de relajación CO + TT + TM – ajuste polinómico de grado 5	49
4.20 Patrones de relajación seleccionados de las condiciones estudiadas	50
4.21 Vista longitudinal con un aumento de 100X para c/u de las condiciones	52
4.22 Vista longitudinal con un aumento de 500X para c/u de las condiciones	53
4.21 Vista longitudinal con un aumento de 1000X para c/u de las condiciones	54



## INDICE DE TABLAS CONTENIDO

<b>Tabla #</b>	<b>Pag.</b>
3.1 Composición química de un acero AISI 1080	30
3.2 Composición química del material suministrado	30
3.3 Características de las probetas	30
3.4 Diseño de la realización de experimento	31
4.5 Propiedades mecánicas para la condición original (CO)	36
4.6 Propiedades mecánicas para la CO + tratamiento mecánico (TM)	39
4.7 Propiedades mecánicas para la CO + tratamiento térmico (TT)	41
4.8 Propiedades mecánicas para la CO + (TT) + (TM)	43
4.9 Propiedades mecánicas promediadas de las 4 condiciones	44
4.10 Porcentaje de relajación de las condiciones estudiadas	51



## INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la relajación, se refiere a la pérdida de tensión en el tiempo cuando el material es tensado a una carga inicial, que es establecida previamente por un porcentaje de la carga máxima y manteniendo constante la deformación, según la NORMA COVENIN 1024.

La relajación es de especial interés en la industria del concreto pretensado; donde la carga inicialmente aplicada, previo al vaciado del concreto, desciende con el tiempo, comprometiendo la eficiencia del conjunto concreto-acero. Su magnitud varía dependiendo del tipo del acero, pero los parámetros más significativos son el tiempo y la intensidad del esfuerzo inicial. En los miembros de concreto presforzado, el flujo plástico y la contracción del concreto así como las fluctuaciones de las cargas aplicadas producen cambios en la longitud del torón.

Recientemente se ha demostrado la influencia de las tensiones residuales producidas por el trefilado en el comportamiento de estos aceros. El trefilado genera un perfil de tensiones residuales en el alambre final con importantes grietas en la superficie que resultan muy perjudiciales en tracción y relajación. Esto hace que los alambres trefilados no puedan utilizarse inmediatamente después del conformado y requieran un tratamiento adicional. En la industria se suele utilizar un tratamiento termomecánico de eliminación de tensiones, que mejora el comportamiento del alambre en corrosión bajo tensión pero sobre todo en tracción y relajación.

Esta investigación ha sido realizada con la finalidad de estudiar el comportamiento de relajación de esfuerzos en acero 1080, sometido a diferentes tratamientos tanto térmico como mecánicos, la cual definirá un tratamiento óptimo que genere baja relajación, la data experimental será analizada mediante un ajuste de tipo polinómico, y el parámetro de correlación será determinante para definir tal condición.



## **I. EL PROBLEMA.**

### **I.1. Título del trabajo.**

Influencia de los tratamientos térmicos y mecánicos en la relajación de esfuerzos de aceros perlíticos empleados en concreto pretensado.

### **I.2. Planteamiento del problema.**

El sector de la construcción en los últimos tiempos ha desarrollado un crecimiento acelerado, lo que ha hecho más competitivo el mercado en busca de mejores propiedades de los materiales, mayores resistencias, menores costos y en general una mayor calidad, que garantice un mayor grado de seguridad en las estructuras.

El concreto pretensado es una combinación de concreto-acero, ya que el concreto tiene baja resistencia a la tensión comparado con su alta resistencia a la compresión. Por lo tanto requiere que el componente metálico proporcione la resistencia necesaria cuando la estructura tiene que soportar fuerzas longitudinales elevadas. El acero que se introduce en el hormigón suele ser una malla de alambre o barras sin desbastar o trenzadas. El hormigón y el acero forman un conjunto que transfiere las tensiones entre los dos elementos.

Los componentes metálicos (torones) provienen de procesos de trefilado en frío donde se induce altas deformaciones en el metal para lograr de esta manera una alta resistencia. Las tensiones interiores desarrolladas durante el estirado en frío producen cambios importantes en la resistencia a la tensión, alargamiento, etc. del material.

Cuando el acero se esfuerza hasta niveles que son usuales en el tensado inicial, no debe haber una pérdida excesiva de tensión, por consiguiente los alambres de acero deben tener bajas propiedades de relajación.



Por definición, la relajación de tensión bajo condiciones de esfuerzo, se refiere a la disminución en la tensión en función del tiempo de un material manteniendo una longitud constante.

Una vez que el componente metálico es tensionado y el concreto ha fraguado, la estructura queda sometida a cargas de tracción-compresión. La relajación de componentes para concreto pretensado es una propiedad del material que define la habilidad del mismo para resistir la precarga aplicada, sin pérdidas importantes de la misma. En estructuras de concreto pretensado, las pérdidas de relajación de tensiones en torones de acero son de suma importancia, es por eso que existen normas como la ASTM que establecen mantener estas pérdidas dentro de márgenes seguros, esa norma define los componentes de baja relajación ( $\%R < 2,5\%$ ) y relajación normal ( $2,5\% < \%R < 7\%$ ).

La industria nacional produce componentes de acero AISI 1080 destinados al concreto pretensado, sin embargo los ensayos de relajación aplicados indican que se ubican como componentes de relajación normal. En un mercado globalizado como el actual, se persigue alcanzar los estándares de calidad a nivel de partes productoras de torones de alta calidad, tal es el caso de España, Francia, etc; donde componentes de relajación normal han dejado de ser un problema. Por otra parte es conocido que posterior al entorchado de los torones, éstos pasan por un tratamiento de estabilizado donde el material se somete a  $T \approx 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  y tratamiento mecánico, sin embargo esa información detallada de esos tratamientos son mantenidas en secreto por parte de las empresas fabricantes con la finalidad de abarcar el mercado de ese tipo de productos.

Por esta razón surge la idea de realizar una investigación donde se determine el efecto que tienen los tratamientos térmicos y mecánicos en la relajación de esfuerzos de alambres empleados en la industria de concreto pretensado.



### **I.3. Objetivos.**

#### **I.3.1. Objetivo General**

Determinar el efecto de los tratamientos térmicos y mecánicos en la relajación de esfuerzos de un acero perlítico empleado en concreto pretensado.

#### **I.3.2. Objetivos Específicos**

1. Definir las condiciones de los tratamientos térmicos y mecánicos a evaluar.
2. Realizar ensayos de tracción para obtener las propiedades mecánicas de cada condición a evaluar.
3. Realizar ensayos de relajación a las diferentes condiciones a estudiar.
4. Hacer un estudio metalográfico basado en microscopía óptica a las condiciones antes establecidas.
5. Comparar los perfiles de relajación a las diferentes condiciones estudiadas para establecer el tratamiento térmico y/o mecánico más adecuado.
6. Determinar si existe correlación entre las propiedades de relajación y la microestructura observada.

### **I.4. Justificación.**

Para el desarrollar materiales que compitan en los mercados internacionales, es necesario que estos cumplan con las especificaciones de calidad adoptadas por éstos, en el caso de los alambres para concreto pretensado se requiere que tengan propiedades de baja relajación para asegurar que en el tensado inicial del pretensado no ocurran pérdidas importantes de tensión.

Esta investigación está basada fundamentalmente, en investigaciones anteriores que han demostrado que con tratamientos térmicos y mecánicos se pueden desarrollar propiedades mecánicas importantes que son aprovechadas en la utilización del material. Partiendo de ello se determinará el efecto de estos tratamientos en la relajación de



esfuerzos, propiedad de los materiales que para el caso de los alambres empleados en concreto pretensado debe ser baja, para obtener un desempeño adecuado de la estructura además de que es una especificación con la que se debe cumplir para producir materiales competitivos a la altura del desarrollo que hoy en día vivimos.

### **1.5. Limitaciones.**

- Los ensayos de relajación y la fase de tratamientos térmicos serán realizados en la Universidad Central de Venezuela (Caracas) ya que en la Universidad de Carabobo no se cuenta con el equipo necesario para realizar ensayos de relajación.
- Se dispone de dos semestres para realizar esta investigación.

### **1.6. Delimitaciones.**

- Para el estudio se utilizara alambre empleado en concreto pretensado (Acero ANSI 1080) trefilado en frío desde un  $\text{Ø} = 11 \text{ mm}$  a un  $\text{Ø} = 4.24 \text{ mm}$ .
- Sólo se realizarán ensayos de tracción, relajación y microscopia óptica.



## II. MARCO TEÓRICO.

En el marco teórico, se presentan los antecedentes de la investigación y las bases teóricas, éstas a su vez comprenden un conjunto de conceptos dirigidos a explicar el problema planteado. Estos fundamentos teóricos sirven de apoyo para desarrollar el presente estudio.

### II.1. Revisión de Antecedentes.

**J. M Atienza & M. Elices (2004) “Influencia de los esfuerzos residuales en la relajación de esfuerzos de alambres trefilados en frío”, Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, España.**

Este estudio demuestra la influencia de los esfuerzos residuales en alambres de acero ferrítico sobre la relajación de esfuerzos.

Se realizó ensayos de relajación a cuatro condiciones de alambres, todos con aproximadamente las mismas propiedades mecánicas pero con diferentes esfuerzos residuales para comparar la pérdida de relajación de esfuerzos con los valores de tensiones residuales.

Los esfuerzos residuales fueron calculados al final del proceso de estirado, cuando el alambre había pasado completamente a través de la matriz, en una zona donde se había alcanzado el estado estacionario. Se vio que la simulación tiene buena concordancia con los cálculos experimentales: difracción de neutrones en el núcleo y difracción de rayos X en la superficie. Los resultados experimentales muestran que la pérdida de tensión por relajación disminuye, a medida que disminuyen los esfuerzos residuales en la superficie.

Este estudio muestra que la eficiencia del pretensado depende de la interacción de los esfuerzos residuales: cuando el perfil de esfuerzos residuales es muy bajo, el pretensado por debajo del esfuerzo de fluencia probablemente sea ineficiente, porque es incapaz de modificar los niveles de tensión. Por otro lado, cuando las tensiones residuales son altas, en alambres estirados en frío sin tratamiento adicional, el





pretensado por debajo del esfuerzo de fluencia puede disminuir notablemente el perfil de esfuerzos residuales y disminuir la relajación de esfuerzos.

**Adalet Zeren & Muzaffer Zeren (2001) “Propiedades de relajación de esfuerzos en alambres de acero para pretensado”, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, Universidad Kocaeli, Izmir-Kocaeli, Turquía.**

En este estudio, el fenómeno de relajación de esfuerzos se ha examinado de forma general. Los experimentos se llevaron a cabo en alambres de acero al carbono con un diámetro de 8 mm que se usa particularmente como compuesto del pre-tensado de concreto. También fueron llevados a cabo tratamientos termomecánicos para relevar las tensiones residuales acumuladas después del trabajo en frío.

La temperatura del tratamiento térmico y la relación de estiramiento, los cuales son parámetros de tratamientos termomecánicos, fueron variadas.

Los experimentos de los tratamientos termomecánicos fueron separados en dos grupos. En uno de los grupos, se cambiaron las relaciones de estiramiento a una temperatura constante de 350 ° C. En el otro grupo, la temperatura del tratamiento térmico fue variada mientras la relación de deformación fue constante en un 40 %. Las condiciones óptimas del tratamiento termomecánico fueron determinadas variando la temperatura del tratamiento térmico y la relación de estiramiento, para observar el efecto de los cambios de tensión y el comportamiento de la relajación de esfuerzos en los alambres de acero estirados en frío.

**J.M. Atienza & J. Ruiz-Hervias & M.L. Martinez-Perez, F.J. Mompean & M. García-Hernández & M. Elices (mayo 2005) “Esfuerzos residuales en varillas perlíticas estiradas en frío”, Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, España.**

En este trabajo, han sido determinados los esfuerzos residuales generados por el estirado en frío en una varilla de acero perlítico. Para la experiencia de los autores, esta es la primera vez en la cual los resultados numéricos y experimentales son comparados sobre toda la sección de la varilla para este tipo de material.

Un modelo del elemento finito 3D, usando el código ABAQUS, fue desarrollado para reproducir el proceso de estirado y para calcular los esfuerzos residuales.



Se ha incorporado la anisotropía de la perlita estirada para usar el criterio de Hill, como una primera aproximación para el problema.

Para el trabajo experimental, se ha utilizado una varilla de acero perlítico para una pasada de estirado bajo condiciones cuidadosamente controladas. Se ha usado difracción sincrotrónica de rayos X para medir el perfil de tensiones en la dirección axial y radial de ambas fases (ferrita y cementita).

Ambos perfiles de tensiones residuales el experimental y el simulado exponen el mismo comportamiento a lo largo del diámetro de la varilla, mostrando que el proceso de estirado genera un estado de tensiones residuales en el alambre final con esfuerzos de tracción en la superficie, en la dirección axial.

**Hoo-Jeong Lee & Ping Zhang & John C. Bravman (2004) “Relajación de esfuerzos en barras de aluminio”, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Yale, USA. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería, Universidad de Stanfor, USA.**

En este estudio se realizarón ensayos de relajación para tres vigas de aluminio aisladas, con varias microestructuras. Según esos ensayos, las curvas de relajación muestran características consistentes con relajación de comportamiento anelástico (el cual incluye estabilización de esfuerzos en las etapas finales y luego de la descarga se recupera el esfuerzo).

Para los resultados se usó un modelo de relajación inelástica, para interpretar y analizar la información de la relajación. Los análisis sugieren que el mecanismo de relajación presentado está asociado con deslizamiento a través del límite de grano. La resistencia a la relajación se ve afectada con el tamaño de grano, mayor tamaño de grano menor pérdida de tensión en el tiempo.



**J.M. Atienza & J. Ruiz-Hervias & M.L. Martínez-Pérez & F.J. Mompean, M. García-Hernández & M. Elices (2004) “Esfuerzos residuales en varillas ferríticas estiradas en frío”, Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, España.**

En esta investigación se determinó el estado de tensiones residuales generado por el estirado en frío, a través de mediciones y simulaciones del modelo del elemento finito. Se empleó una varilla de acero ferrítico sometida a una pasada de estirado, bajo condiciones cuidadosamente controladas.

Se empleó difracción de neutrones, para medir el perfil de esfuerzos en los tres ejes principales (axial, anular y radial) a lo largo del diámetro de la varilla. Además, la superficie esforzada fue medida por difracción de rayos X en muchos puntos confirmando la hipótesis de un estado de esfuerzos uniforme en la superficie de la varilla, coincidiendo los resultados de ambos procedimientos (difracción de neutrones y rayos X) en esa zona.

También se empleó un modelo 3D del elemento finito, usando un código ABAQUS, con el propósito de comprender los efectos del proceso de estirado. La concordancia entre la simulación y la información experimental es excelente.

A partir de eso, se mostró que el proceso de estirado genera un estado de esfuerzos con significantes esfuerzos de tensión en la superficie de las varillas. Esto podría influenciar en el comportamiento mecánico del material por la reducción del límite elástico en los ensayos de tracción, incrementando pérdidas en el ensayo de relajación de esfuerzos, y reduciendo la vida de servicio en esfuerzos de corrosión por picaduras y fatiga.

Los fabricantes tratan de evitar este problema, aplicando tratamientos termomecánicos luego del estirado en frío, para aliviar tensiones residuales. De esta manera, la simulación del elemento finito es una herramienta muy poderosa para predecir los perfiles de esfuerzos macroresiduales. Esto podría ayudarlos a comprender el desarrollo de los esfuerzos residuales asociados con el estirado en frío y así optimizar estos tratamientos termomecánicos.



**J. M. Atienza & J. Ruiz-hervías & L. Caballero & M. Elices (2005) “Mejora del comportamiento a corrosión bajo tensión de los alambres de pretensado”,  
Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Politécnica de Madrid**

La corrosión bajo tensión de las armaduras activas está generando problemas de durabilidad en las estructuras pretensadas construidas en la proximidad de ambientes agresivos. En este trabajo se pone de manifiesto la influencia que tienen las tensiones residuales producidas por el proceso de conformado (trefilado) en la fragilización por hidrógeno de los alambres y se propone un tratamiento alternativo que genera tensiones residuales de compresión en la superficie y mejora significativamente el comportamiento del material a corrosión bajo tensión. Las tensiones residuales se han medido por difracción de rayos X y neutrones y calculado mediante simulación numérica. La susceptibilidad a la corrosión bajo tensión se ha evaluado mediante el ensayo entiocianato amónico propuesto por la Federación Internacional del Pretensado (FIP).

Recientemente los autores han mostrado la influencia de las tensiones residuales producidas por el trefilado en el comportamiento de estos aceros. El trefilado genera un perfil de tensiones residuales en el alambre final con importantes tracciones en la superficie que resultan muy perjudiciales en corrosión bajo tensión, pero también en tracción y relajación. Esto hace que los alambres trefilados no puedan utilizarse inmediatamente después del conformado y requieran un tratamiento adicional. En la industria se suele utilizar un tratamiento termomecánico de eliminación de tensiones (estabilizado), que mejora el comportamiento del alambre en corrosión bajo tensión pero sobre todo en tracción y relajación (las dos propiedades exigidas por los Códigos. No obstante, dados los problemas producidos en estos alambres cuando se utilizan en ambientes agresivos, en opinión de los autores podría resultar más efectivo someterlos a un tratamiento adicional de forma que se crearan tensiones residuales de compresión en su superficie, lo cual provocaría una importante mejora en la durabilidad.



**Sandra Cabello & Eli Saúl Puchi C. & Engels Ochoa (2006) “Comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros al carbono sometidos a distintos niveles de esfuerzo en zonas de deformación elástica y plástica”, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo. Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Universidad Central de Venezuela, Venezuela**

Se investigó el comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros al carbono sometidos a distintos niveles de esfuerzo en zonas de deformación elástica y plástica. El estudio se realizó en alambres de 5 mm de diámetro, con porcentajes de carbono entre 0.1 y 0.75. Para ello fue empleada una máquina servohidráulica controlada por computador (Instron 8502), la cual permite, trabajando en modo de relajación, mantener constante la deformación producida una vez aplicada cierta carga y registrar la disminución de ésta con el tiempo. Los ensayos fueron realizados a una velocidad de aplicación de carga de 2 mm/min y a cargas de 30, 40, 50, 70, 80 y 90% de la carga de rotura correspondiente a cada acero, comprendiendo condiciones de deformación elástica y plástica. La data experimental es tratada según una ecuación mecánica de estado del tipo potencial y es comparada con el modelo teórico de Stussi.

## **II.2. Bases Teóricas.**

### **II.2.1. Aceros [8]**

Se considera una aleación hierro - carbono con agregados e impurezas naturales como fósforo y azufre; está compuesto por hierro y carburo de hierro, con una proporción de carbono inferior a 1.8 %, y puede adquirir propiedades mediante la aplicación de tratamientos térmicos o mecánicos.

#### **II.2.1.1. Tipos de acero [9]**

En las aleaciones Fe-C pueden encontrarse hasta once constituyentes diferentes, que se denominan: ferrita, cementita, perlita, austenita, martensita, troostita, sorbita, bainita, ledeburita, steadita y grafito. A continuación describiremos los constituyentes de las mezclas eutéctoides.



**Ferrita:** aunque es en realidad una solución sólida de carbono en hierro, su solubilidad a la temperatura ambiente es tan pequeña que no llega a disolver ni un 0.008% de C. Es por esto que prácticamente se considera la ferrita como hierro puro. La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros. Cristaliza en una estructura BCC. Tiene una dureza de 95 Vickers, y una resistencia a la rotura de 28 Kg/mm<sup>2</sup>, llegando a un alargamiento del 35 al 40%. Además de todas estas características, presenta propiedades magnéticas. En los aceros aleados, la ferrita suele contener Ni, Mn, Cu, Si, Al en disolución sólida sustitucional. Al microscopio aparece como granos monofásicos, con límites de grano más irregulares que la austenita. El motivo de esto es que la ferrita se ha formado en una transformación en estado sólido, mientras que la austenita, procede de la solidificación.

La ferrita en la naturaleza aparece como elemento proeutectoide que acompaña a la perlita en:

- Cristales mezclados con los de perlita (0.55% C)
- Formando una malla que limita los granos de perlita (0.55% a 0.85% de C)
- Formando agujas en dirección de los planos cristalográficos de la austenita.

**Cementita:** es carburo de hierro y por tanto su composición es de 6.67% de C y 93.33% de Fe en peso. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros, alcanzando una dureza de 960 Vickers. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño. Es magnética hasta los 210 °C, temperatura a partir de la cual pierde sus propiedades magnéticas. Aparece como:

- Cementita proeutectoide, en aceros hipereutectoides, formando un red que envuelve a los granos perlíticos.
- Componente de la perlita laminar.
- Componente de los glóbulos en perlita laminar.
- Cementita alargada (terciaria) en las uniones de los granos (0.25% de C)



**Perlita:** es un constituyente compuesto por el 86.5% de ferrita y el 13.5% de cementita, es decir, hay 6.4 partes de ferrita y 1 de cementita. La perlita tiene una dureza de aproximadamente 200 Vickers, con una resistencia a la rotura de 80 Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 15%. Cada grano de perlita está formado por láminas o placas alternadas de cementita y ferrita. Esta estructura laminar se observa en la perlita formada por enfriamiento muy lento. Si el enfriamiento es muy brusco, la estructura es más borrosa y se denomina perlita sorbítica. Si la perlita laminar se calienta durante algún tiempo a una temperatura inferior a la crítica (723 °C), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, recibiendo entonces la denominación de perlita globular.

### II.2.1.2. Diagrama hierro – carbono [10]

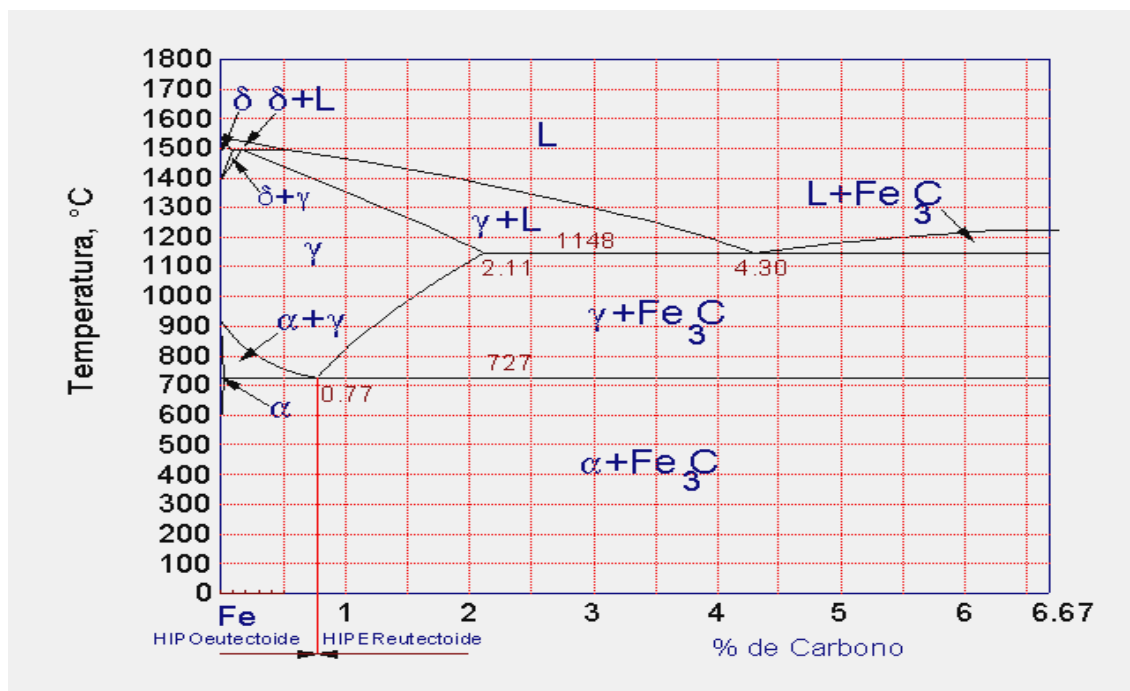
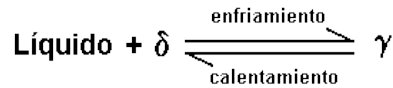


Fig. # 2.1 Diagrama hierro – carbono

El diagrama hierro-carbono, aun cuando teóricamente representa unas condiciones metaestables, se puede considerar que en condiciones de calentamiento y/o enfriamiento relativamente lentas representa cambios de equilibrio. En el diagrama aparecen tres líneas horizontales, las cuales indican reacciones isotérmicas. La parte del diagrama situada en el ángulo superior izquierdo de la figura se denomina *región delta*. En ella se reconocerá la horizontal correspondiente



a la temperatura de 1493°C como la típica línea de una reacción peritética. La ecuación de esta reacción puede escribirse en la forma.



La máxima solubilidad del carbono en el hierro delta (de red cúbica centrado en el cuerpo) es 0,10 % de C, mientras que el Fe gamma (de red cúbica centrado en las caras) disuelve al carbono en una proporción mucho mayor. En cuanto al valor industrial de esta región es muy pequeño ya que no se efectúa ningún tratamiento térmico en este intervalo de temperaturas.

La siguiente línea horizontal corresponde a una temperatura de 1129°C, esta temperatura es la de solidificación del eutéctico. y la reacción que en ella se desarrolla es:



La mezcla eutéctica, por lo general, no se ve al microscopio, ya que a la temperatura ambiente la fase gamma no es estable y experimenta otra transformación durante el enfriamiento.

La última línea horizontal, se presenta a los 722°C, esta línea corresponde a la temperatura de formación del eutectoide, y al alcanzarse en un enfriamiento lento la fase gamma debe desaparecer. La ecuación de la reacción eutectoide que se desarrolla puede expresarse por:



En función del contenido de carbono suele dividirse el diagrama de hierro-carbono en dos partes: una que comprende las aleaciones con menos del 2 % de carbono y que se llaman aceros, y otra integrada por las aleaciones con más de un 2 % de carbono, las cuales se llaman fundiciones. A su vez, la región de los aceros se



subdivide en otras dos: una formada por los aceros cuyo contenido en carbono es inferior al correspondiente a la composición eutectoide (0,77 %C) los cuales se llaman aceros hipoeutectoides, y la otra compuesta por los aceros cuyo contenido se encuentra entre 0,77 y 2 %, y que se conocen por aceros hipereutectoides

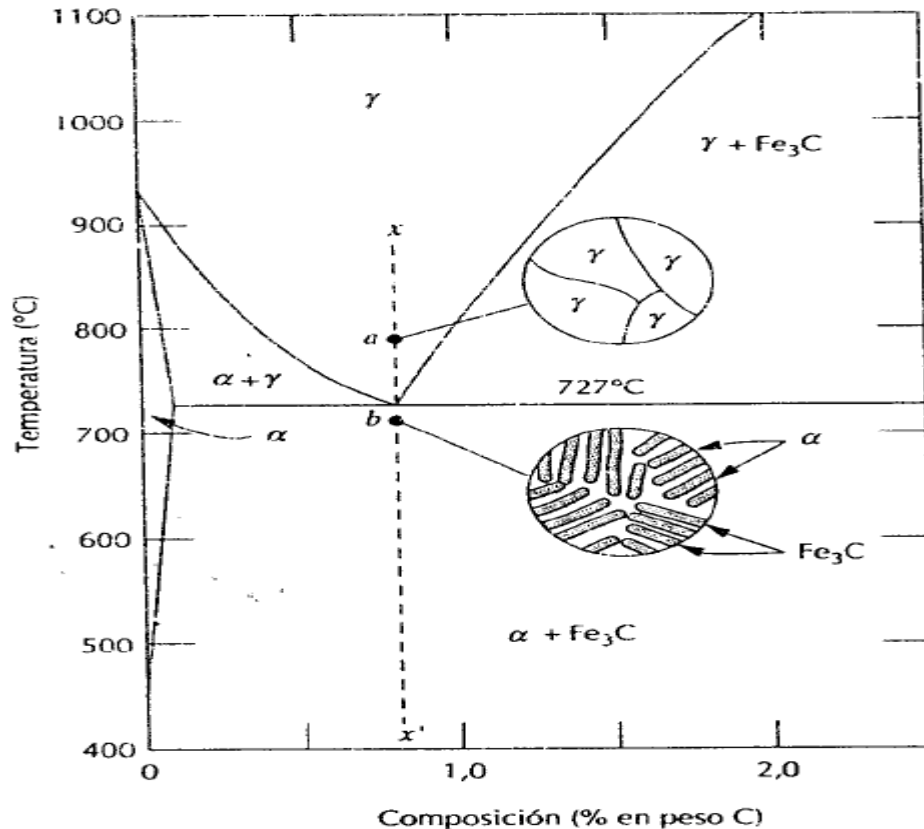


Fig. # 2.2 Representación esquemática de la microestructura de un acero eutectoide [11]

## II.2.2. Acero de preesfuerzo

Existen tres formas comunes en las cuales se emplea el acero como torón en concreto presforzado: alambres redondos estirados en frío, torón y varillas de acero de aleación. Los alambres y los cables trenzados tienen una resistencia a la tensión de más o menos 17600 kg/cm<sup>2</sup>, en tanto que la resistencia de la varillas de aleación está entre los 10200 y 11250 kg/cm<sup>2</sup> dependiendo del grano.

### II.2.2.1. Pérdidas de preesfuerzo

- Deformación elástica del concreto



- Contracción y escurrimiento plástico del concreto
- Relajación del torón de acero
- Deslizamiento o movimiento de los torones en los anclajes durante el anclaje.
- Otras causas en circunstancias especiales, tales como cuando se utiliza vapor para el fraguado con el concreto pretensado.

Su proceso de fabricación se realiza en los llamados “Trenes de Laminación de alambre”. Se parte de un derivado de la acería llamada palanquilla con diferentes composiciones metálicas. Se puede dividir en dos tipos: altos en carbono, y bajos en carbono. El gradiente de dureza es proporcional a los porcentajes de este componente, pudiendo llegar a ser hasta del 80%.

### II.2.3. Proceso de trefilado [12]

Luego del proceso de fundición del acero, se obtiene la palanquilla, de sección cuadrada, después por laminación en caliente se obtienen los rollos de alambón con cascarilla. Este sufre un tratamiento térmico de austempering o patentado durante el cual, la austenita se transforma en bainita. La estructura bainítica da al material una ductilidad suficiente para facilitar su deformación en frío durante el proceso de trefilado.

Si se trata de alambres de acero con un bajo contenido en carbono, es suficiente un recocido, que recristaliza la ferrita dejando el material apto para trefilar. El alambre así tratado pasa a continuación por un proceso de desoxidación en medio ácido, en el cual se eliminan los óxidos y la cascarilla que lo recubren al salir del horno de patentado.

Antes del trefilado conviene proteger la superficie del alambre con una capa de fosfatos, (bonderización) o bien cobre, cal u otro depósito que servirá de soporte del lubricante de trefilería.

El trefilado propiamente dicho consiste en el estirado del alambre en frío, por pasos sucesivos a través de hileras, dados o trefilas de carburo de tungsteno cuyo



diámetro es paulatinamente menor. Esta disminución de sección da al material una cierta acritud en beneficio de sus características mecánicas.

La disminución de sección en cada paso es del orden de un 20% a un 25% lo que da un aumento de resistencia entre 10 y 15 kg/mm<sup>2</sup>. Alcanzado cierto límite, variable en función del tipo de acero, no es aconsejable continuar con el proceso de trefilado, a pesar de que la resistencia a la tracción aumente, se pierden otras características como la ductilidad.

Si es imprescindible disminuir el diámetro del alambre, se hace un nuevo tratamiento térmico que devuelve al material sus características iniciales. Las máquinas utilizadas para realizar este proceso se denominan trefiladoras. En ellas se hace pasar el alambre a través de las hileras, como se ha dicho antes. Para lograrlo el alambre se enrolla en unos tambores o bobinas de tracción que fuerzan el paso del alambre por las hileras. Estas hileras se refrigeran mediante unos lubricantes en polvo y las bobinas o tambores de tracción se refrigeran normalmente con agua y aire. Las trefiladoras pueden ser de acumulación en las que no hay un control de velocidad estricto entre pasos o con palpadores en las que sí se controla la velocidad al mantener el palpador una tensión constante.

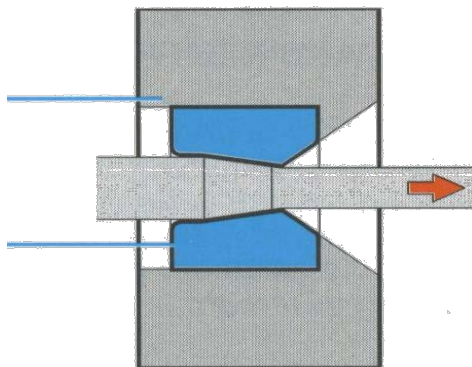


Fig. # 2.3 Trefilado



Fig. # 2.4 Banco de trefila.



El alambroón es un producto metalúrgico derivado de un proceso de laminación en caliente, de sección redonda y macizo, con diferentes espesores de diámetros, que puede ir de 4,5 mm a 30 mm. Para estos espesores, se sirve en formato de rollo cilíndrico de dimensiones variadas, siendo la más usual 1.700 mm de largo, con exterior de 1.200 mm e interior de 1.000 mm. Por encima de estos espesores suele llamarse “redondo”, porque su conformación en el proceso de acabado, ya no lleva formación de espiras, siendo su terminación en forma de barras rectas, de diversas longitudes.

Se denomina alambre a todo tipo de hilo delgado que se obtiene por estiramiento de los diferentes metales de acuerdo a la propiedad de ductilidad que poseen los mismos. Hay muchos tipos y calidades de alambre de acuerdo con las aplicaciones que tengan. Así mismo el diámetro del alambre es muy variable y no hay un límite exacto cuando un hilo pasa a denominarse varilla o barra en vez de alambre, la principal característica del alambre es que permite enrollarse en rollos o bobinas de diferentes longitudes que facilitan su manipulación y transporte. El alambre normal de acero suele tener un tratamiento superficial de galvanizado para protegerla de la oxidación y corrosión y también hay alambre endurecido con proceso de temple.

El torón se usa casi siempre en elementos pretensados, y a menudo se usa también en construcción postensada. El torón es fabricado con siete alambres, seis firmemente torcidos alrededor de un séptimo de diámetro ligeramente mayor. El paso de la espira es de 12 a 16 veces el diámetro nominal del cable, teniendo una resistencia a la ruptura garantizada de 17590 kg/cm<sup>2</sup> conocido como grado 259k.

Para los torones se usa el mismo tipo de alambres relevados de esfuerzo y estirados en frío que los que se usan para los alambres individuales de preesfuerzo. Sin embargo, las propiedades mecánicas se evidencian ligeramente diferentes debido a la tendencia de los alambres torcidos a enderezarse cuando se les sujeta a tensión, debido a que el eje de los alambres no coincide con la dirección de la tensión.

Al torón se le releva de esfuerzos mediante tratamiento térmico después del trenzado. Los torones de baja relajación se pueden conseguir mediante pedido especial. Los torones pueden obtenerse entre un rango de tamaños que va desde 0,25 pulg. hasta 0,6 pulg. de diámetro.

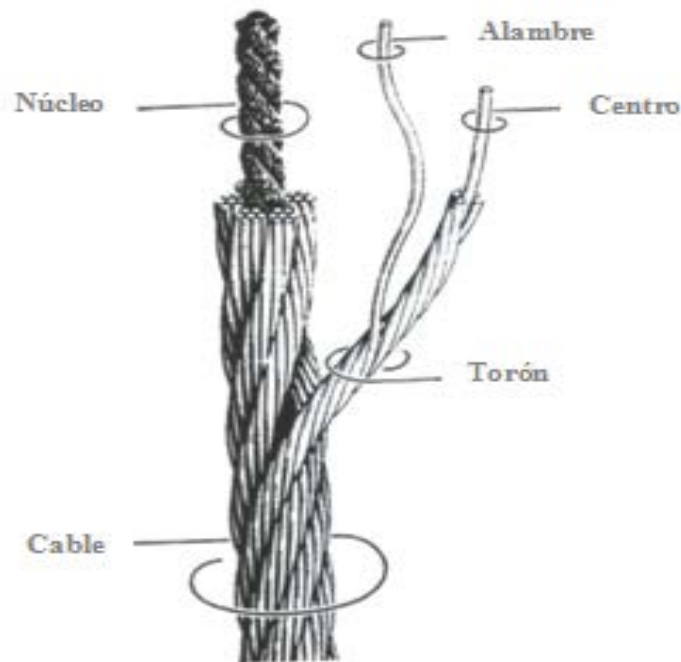


Fig. # 2.5 Torón

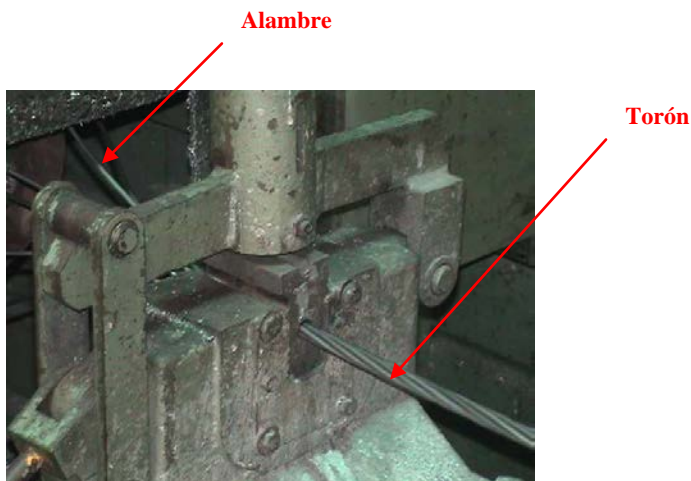


Fig. # 2.6 Fabricación del torón



## II.2.4. Concreto presforzado

Comité de Concreto Presforzado del ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE): “Concreto en el cual han sido introducidos esfuerzos internos de tal magnitud y distribución que los esfuerzos resultantes de las cargas externas dadas se equilibran hasta un grado deseado”.

### II.2.4.1. Hormigón

El hormigón o concreto es un tipo de piedra artificial muy utilizada en la construcción que resulta de la mezcla de uno o más conglomerantes (generalmente, se usa cemento) con áridos (grava, gravilla y arena), agua y, eventualmente, aditivos y adiciones. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que derivan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla, obteniéndose al final del proceso un material con consistencia pétreo. Los aditivos se utilizan para modificar las características básicas, existiendo una gran variedad de ellos: colorantes, aceleradores y retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, etc.

### II.2.4.2. Pretensado

Se entiende por pretensado a la aplicación controlada de una tensión al concreto, mediante el tensado de alambres de alta resistencia, previa a la entrada en servicio de la estructura. La tensión del refuerzo se realiza antes de colocar el concreto. La trayectoria del refuerzo es recta.



Fig. # 2.7 Concreto pretensado

### II.2.4.2.1. Ventajas del pretensado

- Se tiene una mejoría del comportamiento bajo la carga de servicio por el control del agrietamiento y la deflexión.
- Mejor comportamiento sísmico
- Elementos más eficientes y esbeltos Mayor control de calidad en elementos presforzados (producción en serie)
- Mayor rapidez en elementos presforzados hechos en serie.

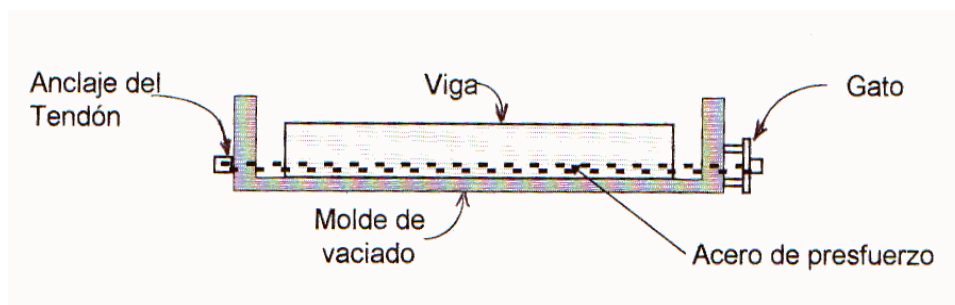


Fig. # 2.8 Viga pretensada

### II.2.4.3. Postensado

La tensión del refuerzo se realiza después de vaciado el concreto. La trayectoria del refuerzo puede ser recta o curva.

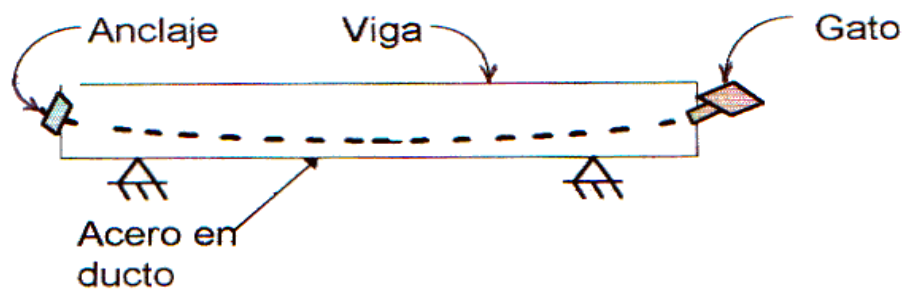


Fig. # 2.9 Viga postensada



### II.2.4.3.1. Ventajas del postensado

- Acortamiento significativo de plazos de ejecución de gran parte de la obra gracias a rápidos y eficientes programas de construcción. El sistema de moldaje se puede retirar inmediatamente concluido el tensado.
- Ahorros en hormigón, acero, mano de obra y moldaje, ya que el sistema disminuye en forma considerable cada uno de estos puntos.
- Integridad estructural superior proporcionada por la continuidad de la losa y cables, con un buen desempeño sísmico.
- Esbeltas estructuras que permiten disminuir la altura del edificio y reducir las cargas de fundación.
- Uniones sencillas y eficientes entre losas, vigas, muros y columnas, que eliminan problemas de juntas entre dichos elementos
- Soluciones estructurales con bajos requerimientos de mantenimiento
- Mayor firmeza, durabilidad y resistencia al fuego.

### II.2.10. Tratamientos térmicos [3]

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y las características de los aceros; consiste en calentar y mantener la pieza de acero a una temperatura adecuada, durante un periodo de tiempo y luego enfriarla, a temperatura conveniente, logrando de esta manera modificar la estructura microscópica de los aceros, además se verifican transformaciones físicas, y algunas veces también hay cambios en su composición.

El tiempo y la temperatura son factores principales, los cuales hay que fijarlos a conveniencia, de acuerdo a la composición del acero y las características que se desean obtener

Las temperaturas de calentamiento para los aceros, en una gran variedad se toman del diagrama hierro – carbono (**ver figura # 2.1**), ya que el proceso se acerca a condiciones de equilibrio.





### **II.2.10.1. Proceso de relevado de tensiones**

Es un proceso térmico en el cual los cordones de acero luego de la conformación de la trenza, son calentados a una temperatura de 300 – 400 °C para eliminar las tensiones residuales del material que se obtuvieron en el trefilado o torneado. Con este proceso se obtienen además las siguientes propiedades:

- Devanado uniforme de rollos
- Posibilidad de tendido simultáneo de mayor cantidad de cordones
- Mayor ductilidad y mejor operabilidad
- Sensible reducción del tiempo insumido en el tensado de los cordones
- El proceso de fabricación asegura que al cortarse el cordón no se abran los alambres que lo forman.

### **II.2.10.2. Recocido de alivio de tensiones [13]**

También conocido como recocido subcrítico, tiene por objeto la eliminación de las tensiones internas que aparecen en el material después de haber sufrido una mecanización o cualquier otro proceso de deformación en frío. Normalmente se realiza a temperaturas bajas, en hornos de atmósfera controlada, seguido de un enfriamiento lento hasta la temperatura ambiente; para prevenir los efectos de la deformación por enfriamiento y para no afectar a otros tratamientos térmicos. Esta temperatura esta por debajo de la línea crítica inferior.

### **II.2.11.3. Proceso termomecánico de baja relajación [6]**

El proceso de baja relajación de los alambres y cordones para pretensado se realiza para disminuir la pérdida por relajación, que es la disminución de la tensión en función del tiempo, bajo una deformación impuesta de magnitud constante. Dicha pérdida es considerada en el cálculo de las estructuras, por lo tanto si se reduce la pérdida por relajación, se reducirá la sección de acero requerida para un esfuerzo dado.



### II.2.11.3.1. Principales ventajas

- Menores pérdidas por relajación en cualquier rango de temperaturas
- Mayor límite de proporcionalidad y mayor uniformidad en la relación carga - deformación
- Cumplimiento de las exigencias de los distintos sistemas de anclaje
- Mayor reducción de costos debido a la economía en sección de acero
- Comportamiento homogéneo, dado el buen contacto entre alambres
- Mejor adherencia con el hormigón, en el caso de estructuras pretensadas
- Comportamiento estable, sin desarmarse, cuando se cortan los cordones
- Mayor esfuerzo de pretensado.

### II.2.11. Relajación de esfuerzos

Es la pérdida de la carga (tensión) en función del tiempo, cuando el cordón es tensado a una carga inicial, en un porcentaje preestablecido de la carga nominal de rotura y manteniendo constante la deformación del cordón [5]. Este fenómeno es consecuencia del efecto viscoso de los materiales, lo que implica que las deformaciones dependen del tiempo.

Este efecto produce una contracción en el componente elástico de la deformación inicialmente provocada, dando lugar a la deformación plástica inherente lo que finalmente se traduce en un descenso en el esfuerzo como resultado de la saturación en el movimiento de dislocaciones, hasta que las mismas alcanzan el término de la zonas de deslizamiento o hasta que coinciden con campos de esfuerzos de dislocaciones que las han precedido. El movimiento de dislocaciones continuará hasta que se alcance un esfuerzo de equilibrio y el esfuerzo de origen sea reducido a un valor crítico. Este fenómeno es de especial interés en la industria del concreto pretensado; donde la carga inicialmente aplicada al componente metálico, y previo al vaciado del concreto, desciende con el tiempo, comprometiendo la eficiencia del conjunto concreto-acero. La magnitud de la relajación varía dependiendo del tipo del acero, pero los parámetros más significativos son el tiempo y la intensidad del esfuerzo inicial.

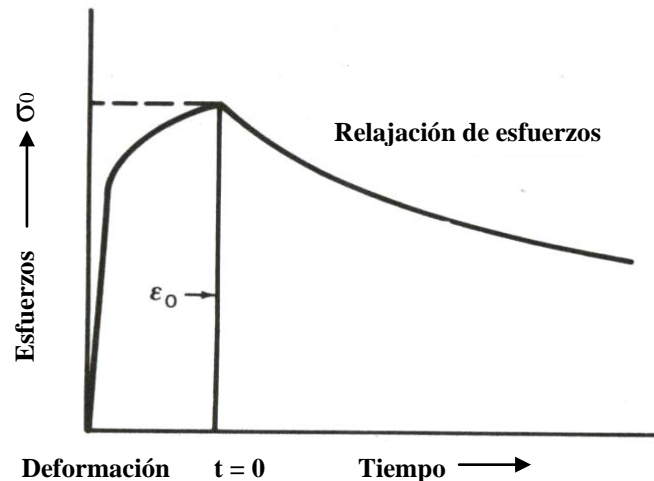


Fig. # 2.10 Curva de relajación

#### II.2.11.2. Ensayo de relajación [7]

Se realiza en una maquina universal de ensayos, la cual debe ser capaz de aplicar una carga inicial, en un porcentaje preestablecido de la carga nominal de rotura, manteniendo constante la longitud del cordón, y registre la disminución de tensión por un lapso de tiempo definido. La longitud de la probeta a ensayar debe ser tal que permita un agarre adecuado entre las mordazas dejando libre entre ellas la zona marcada como “Lo”. El cordón o alambre ensayado debe cumplir con los valores establecidos en la NORMA COVENIN 1024.

#### II.2.11.4 Influencia de las tensiones residuales en la relajación

Recientemente se ha demostrado la influencia de las tensiones residuales producidas por el trefilado en el comportamiento de los aceros para pretensado [6]. El trefilado genera un perfil de tensiones residuales en el alambre final con importantes grietas en la superficie que resultan muy perjudiciales en tracción y relajación. Esto hace que los alambres trefilados no puedan utilizarse inmediatamente después del conformado y requieran un tratamiento adicional. En la industria se suele utilizar un tratamiento termomecánico de eliminación de



tensiones, que mejora el comportamiento del alambre en corrosión bajo tensión pero sobre todo en tracción y relajación.

En ensayos de tracción y relajación el mejor comportamiento se obtiene con los alambres estabilizados [6], que consiste en dar un tratamiento térmico al alambre durante un tiempo muy corto manteniendo aplicada, simultáneamente, una carga de tracción importante, esto es debido a que en estos casos es importante lo que ocurre en toda la sección del alambre y no sólo en la región superficial.



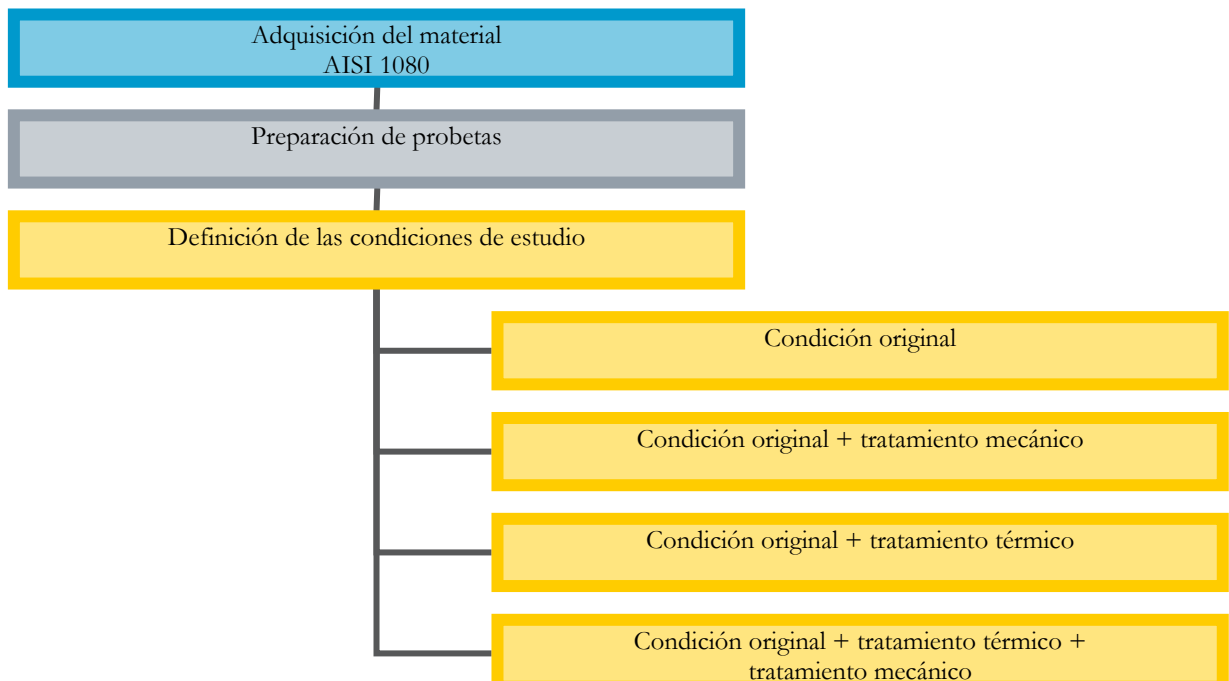
### III. MARCO METODOLÓGICO.

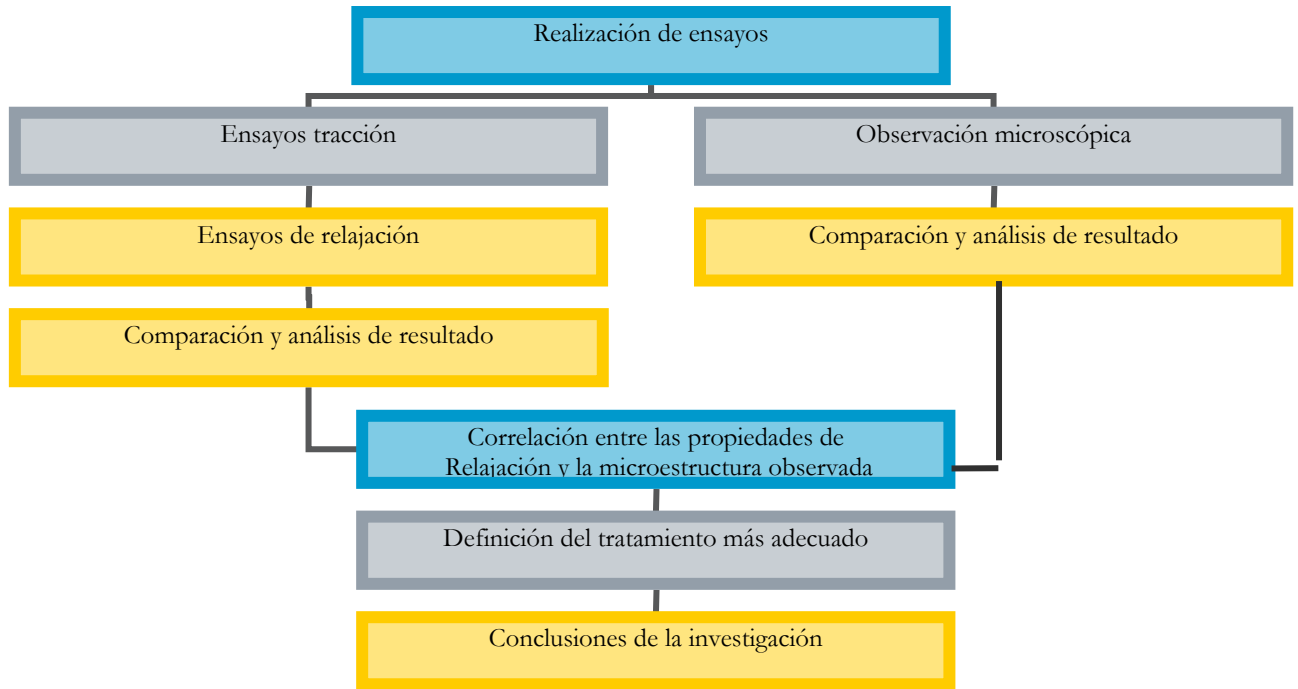
La metodología a utilizar es de tipo exploratoria, descriptiva y explicativa. Consiste en la realización de una serie de ensayos mecánicos a diferentes condiciones en las que se evaluará el efecto de tratamientos térmicos y mecánicos en el comportamiento de relajación de aceros perlíticos trefilados en frío; para finalmente determinar la condición óptima del tratamiento.

#### III.1. Nivel de la investigación.

Tomando en cuenta la naturaleza de la investigación, es de tipo exploratoria, descriptiva y explicativa, ya que no solo se efectúa sobre la base de la influencia de los tratamientos térmicos y mecánicos en la relajación de esfuerzos de aceros perlíticos, si no que también abarca la caracterización del fenómeno de relajación de esfuerzos con el fin de obtener el comportamiento mecánico del material, además se buscare el por qué de este hecho en base a los ensayos realizados, para lo cual se hizo un registro, análisis e interpretación del comportamiento de aceros perlíticos trefilados en frío (Acero AISI-1080), bajo ciertas condiciones y con ello establecer dicho comportamiento.

#### III.2. Diseño de la investigación.





**Diagrama # 3.1 Diseño de la investigación**

Fuente: propia

### III.3. Población y muestra.

De una población de aceros perlíticos se tomaron muestras, para hacer comparaciones y análisis del desarrollo de la investigación, la componen aceros trefilados en frío empleado en concreto pretensado (ACERO AISI 1080) de producción nacional.

Se utilizaron en la realización de los ensayos un total de 36 probetas, las cuales se prepararan más adelante.

### III.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

La recolección de datos depende en gran parte del tipo de investigación. Debido a que ésta es de tipo exploratorio, descriptivo y explicativo, se utilizaron las siguientes técnicas para la recolección de datos: revisión bibliográfica y observación directa e indirecta. Con respecto a los instrumentos que se emplearon en la recolección de datos, tenemos:



1. Máquina universal de ensayos MTS de 25 Ton. Modelo Sistema 810, ubicada en la Universidad Simón Bolívar, capaz de registrar datos provenientes tanto de ensayos de relajación como de ensayos de tracción entre otros.
2. Horno de atmósfera controlada, ubicado en la Universidad Central de Venezuela.
3. Microscopio óptico, ubicado en la empresa VICSON C.A



**Fig. # 3.1 Microscopio óptico**

### **III.5. Caracterización del material en estudio.**

La caracterización del material se refiere al conocimiento exhaustivo del mismo, desde su composición hasta su comportamiento bajo ciertas condiciones de tratamientos térmicos y mecánico. Los pasos para realizar la caracterización del material se señalan a continuación:

#### **II.5.1. Material usado**

El material usado es proveniente de un alambren de diámetro 11 mm, de acero perlitico (AISI 1080) trefilado en frío y empleado en concreto pretensado, suministrado por la empresa VICSON S.A, Valencia.



### III.5.1.1 Composición química del material

#### Composición química acero AISI 1080 [14]

Designación AISI	C	Mn	P (max)	S (max)
NO RESULFURIZADOS MÁXIMO DE MANGANESO: 1,00 %				
1080	0,75 - 0,88	0,60 - 0,90	0,040	0,050

Tabla # 3.1 Composición química de un Acero AISI 1080

#### Anexo 1 – Certificado de calidad material suministrado

##### Colada # 52

%S	%C	%Mn	%P	%Si	%Al	%Cr	%Cu	%Ni	%Ho	%N <sub>2</sub>
0,006	0,825	0,791	0,011	0,282	0,01	0,213	0,037	0,013	0,000	0,00027

Tabla # 3.2 Composición química del material suministrado

El material trefilado en frío fue suministrado con un diámetro de 4.24 mm.

### III.6. Preparación de probetas.

Para el desarrollo de los ensayos, se prepararon 36 probetas, distribuidas de la siguiente manera:

Ensayo / característica	Cantidad	Longitud (mm)	Diámetro (mm)
Tracción	12	200	4,24
Relajación	12	300	4,24
Microscopia	12	200	4,24

Tabla # 3.3 Características de las probetas





### III.10. Condiciones de estudio.

Se definieron cuatro condiciones:

1. Condición original
2. Condición original + tratamiento mecánico (estirado previo de 80%  $S_y$  )
3. Condición original + tratamiento térmico (alivio de tensiones a 400°C)
4. Condición original + tratamiento térmico (alivio de tensiones a 400°C) + tratamiento mecánico (estirado previo de 80%  $S_y$  )

### III.11. Diseño de la realización de experimentos

Ensayo / Condición	Ensayo de tracción	Ensayo de relajación	Observación microscópica
Condición original	3	3	3
Condición original + 80% $\sigma$ fluencia	3	3	3
Condición original + Tratamiento térmico a 400 °C	3	3	3
Condición original + T.T a 400 °C + 80% $\sigma$ fluencia	3	3	3

Tabla # 3.4 Diseño de la realización de experimentos

### III.12. Ensayo de tracción.

Se realizaron tres ensayos por condición, las muestras evaluadas de diámetro 4,24 mm y longitud 200 mm, fueron ensayadas en una máquina universal de ensayos MTS de 25 Ton. Modelo sistema 810, con un programa de adquisición de datos Lab. View 6.1 DPMAC, a una velocidad de ensayo de 8 mm/min, ubicada en la Universidad Simón Bolívar, se siguieron una serie de pasos estandarizados para la correcta manipulación de



las probetas, para así obtener valores establecidos en la NORMA COVENIN 1024 como lo son: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de fractura, alargamiento, tenacidad y % de reducción de área. Dichos ensayos se realizarón a las 4 condiciones establecidas previamente.

### II.12.1. Tratamiento mecánico de estirado. [10]

Luego de realizar los ensayos de tracción a las probetas en condición original, se tomo un promedio del esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ) de las tres probetas traccionadas, para así obtener un valor único y tomar como carga de estirado el 80%  $S_y$ . Una vez calculada la carga de estirado, sometimos tres probetas a esta carga inicial por un tiempo de 10 minutos, obteniendo así la condición original + tratamiento mecánico. Una vez aplicado el tratamiento de estirado a las 3 probetas, se les aplico ensayos de tracción.

Calculo de la carga de estirado

$$80\% \cdot S_y$$

$S_y$ : Esfuerzo de fluencia

$$A_0 = \Pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2$$

$A_0$  : Área inicial

$$F_{estirado} = 80\% \cdot S_y * A_0$$

Festirado: Carga inicial para el tratamiento de estirado

### II.13. Tratamiento térmico. [2]

Se realizarón tratamientos térmicos de alivio de tensiones a seis probetas, tres de las cuales fueron para la condición original + tratamiento térmico, y tres para la condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico, el tratamiento consistió en llevar las probetas a una temperatura de 400°C durante dos horas y luego enfriar hasta temperatura ambiente por un espacio de cuatro horas, para ello se utilizo un horno de atmósfera controlada.

**III.14. Ensayo de relajación.**

Se realizaron tres ensayos por condición para obtener resultados mas confiables, las muestras evaluadas de diámetro 4,24 mm de diámetro y 300 mm de longitud, fueron ensayadas en una maquina universal de ensayos MTS de 25 Ton. Modelo sistema 810, con un programa de adquisición de datos Lab. View 6.1 DPMAC, ubicada en la Universidad Simón Bolívar. La velocidad del ensayo fue 8 mm/min y la frecuencia de adquisición de datos de 5 datos/min, para la realización de los experimentos se siguieron los estándares de las NORMA COVENIN 1024, el cordón fue tensado a una carga inicial de 0,7 de la carga máxima manteniendo constante la longitud del cordón. El tiempo establecido para el ensayo fue de 60 min y se realizaron a las 4 condiciones establecidas previamente.

**Calculo de la carga inicial de relajación [7]**

$S_{y \max}$  (Valor promedio de esfuerzo máximo)

$$A_0 = \Pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2$$

$A_0$  : Área inicial

$$S_{yR} = 70\% \cdot S_{y \max}$$

$S_{yR}$  : Esfuerzo inicial de relajación

$$S_{yR} = 70\% \cdot S_{y \max} \cdot N$$

$$F_{relajación} = 70\% \cdot S_{y \max} \cdot A_0$$

$F_{relajación}$  : Carga inicial para el ensayo de relajación

**Calculo de porcentaje de relajación**

$$\% \text{ Relajación} = [(carga \text{ inicial} - carga \text{ final}) / carga \text{ inicial}] \cdot 100$$



## **Ajuste de la data experimental**

Para el ajuste de la data experimental del ensayo de relajación, se utilizo el modelo polinomico. Se realizaron diferentes pruebas, utilizando desde un polinomio de grado 2 hasta un polinomio de grado 6, siendo el polinomio de grado 5 el ajuste que mas se acercaba a una curva de relajación, en donde se observan claramente la relajación acelerada, la relajación intermedia y la estabilización, además de eso fue el ajuste que arrojó factores de correlación superiores a 0,9, lo cual garantiza un ajuste apropiado para las curvas de relajación.

### **III.15. Estudio metalográfico.**

La observación metalografica se realizó en la empresa Vicson S.A. Las probetas se prepararon mediante el método de desbaste grueso (lijas de 80 y 240), medio (lijas de 400 y 600) y fino (lijas de 1200), para luego ser pulidas en la pulidora metalográfica con alúmina. Una vez preparadas las probetas fueron atacadas por un reactivo con la siguiente composición: 15 ml. de ácido clorhídrico, 50 ml. de agua destilada y un gramo de bisulfito de sodio. Para realizar el ataque se colocó el reactivo en la superficie del material con un algodón hasta que se torno opaco, luego se enjuagó con agua y se agrego etanol, se colocó en la secadora para eliminar residuos de humedad. Este ataque se realizó para observar el tipo de microestructura de cada una de las condiciones; y consistió en detectar las heterogeneidades del material tales como: defectos superficiales, porosidades, segregaciones, líneas de fluencia, entre otras, ya que éstas pueden influir en los resultados de los ensayos.



## IV. RESULTADOS.

### IV.1. Ensayo de tracción.

#### IV.1.1. Condición original del material

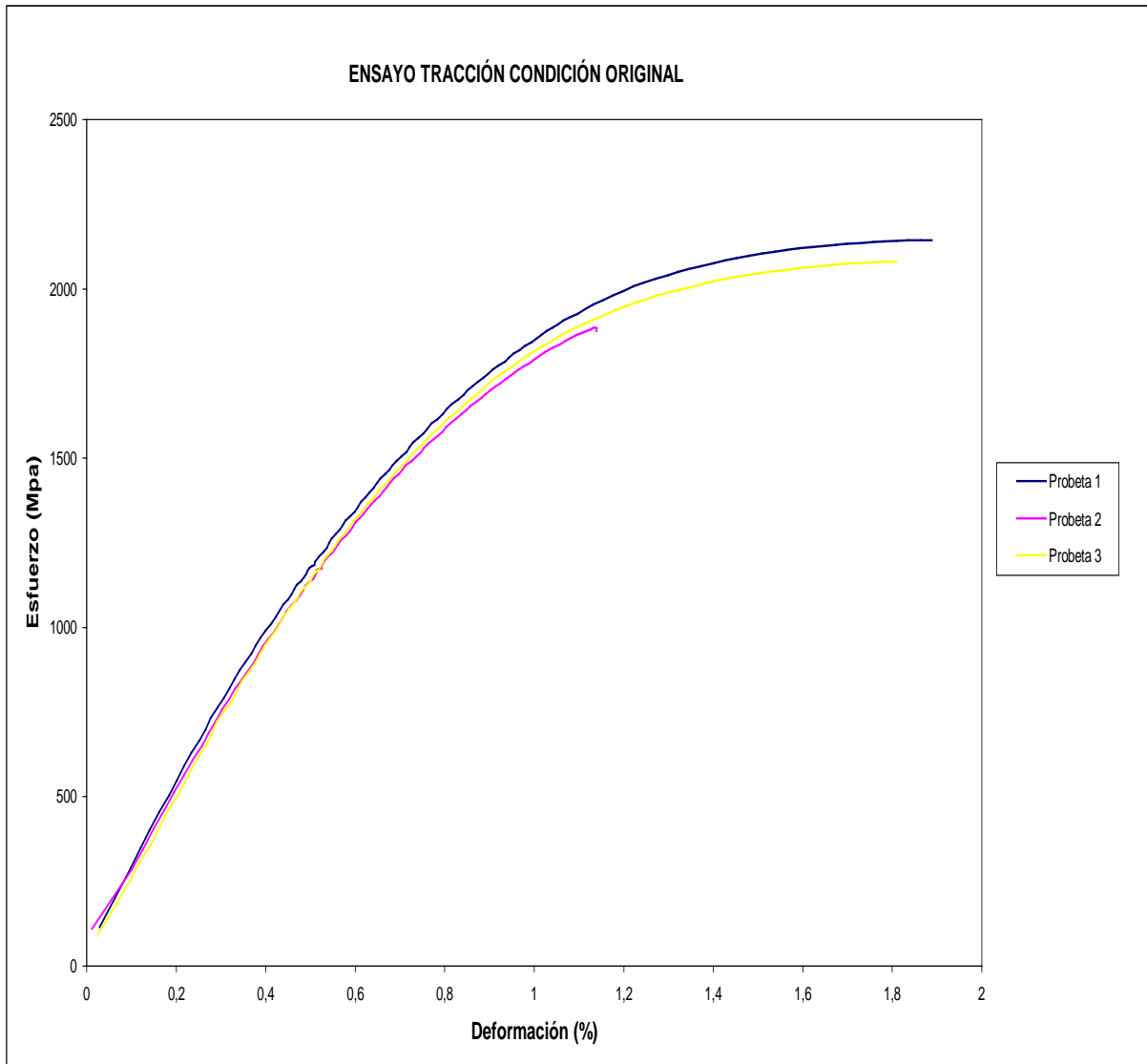


Fig. # 4.12 Curvas esfuerzo – deformación  
Condición original



Propiedades mecánicas obtenidas a partir de la fig. # 4.12 son los siguientes:

Condición original	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Sy (MPa)	S max (MPa)	S rotura (MPa)	E (MPa)	Alargamiento (%)	Red. Área (%)	Tenacidad (Joule)
Probeta 1	13,99	1601	2124	1741	202241	2,2	33,20	15,80
Probeta 2	14,05	1655	1858	1471	176947	1,2	38,40	4,30
Probeta 3	14,05	1670	2051	1616	179897	2,1	38,40	14,40
Promedio	14,03	1642	2011	1609,33	186361	1,83	36,67	11,50

**Tabla # 4.5 Propiedades mecánicas para la condición original**



### IV.1.2. Condición original + tratamiento mecánico

Para aplicar el tratamiento mecánico de estirado en la segunda condición, se determinó una carga con el 80% del esfuerzo de fluencia (promedio) obtenido a partir de las propiedades mecánicas del ensayo a tracción de la condición original.

$$80\% \cdot S_y [10]$$

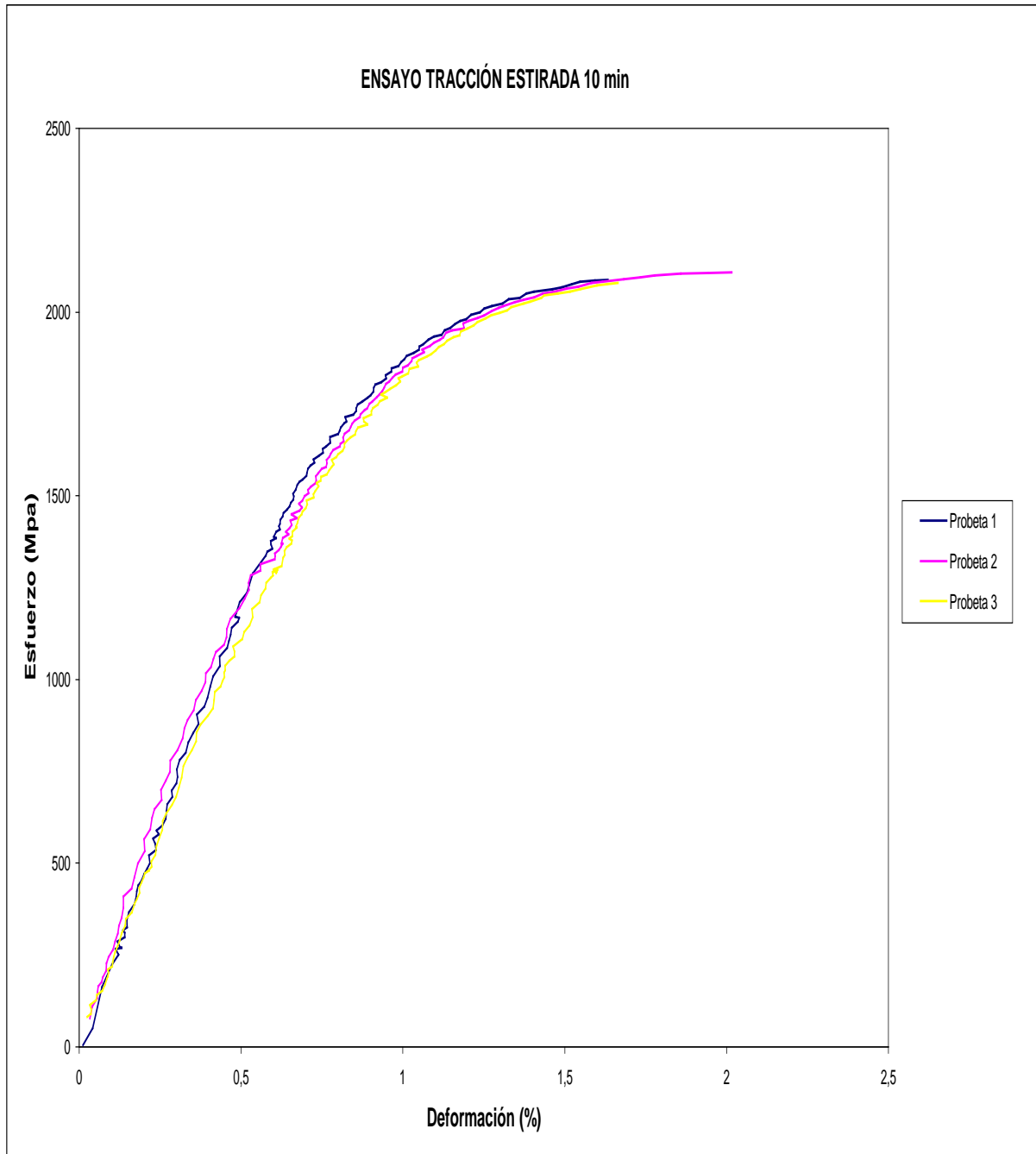
$$S_y = 1642 \text{ Mpa} \rightarrow 80\% \cdot S_y = 1313,6 \text{ Mpa}$$

$$A_0 = \Pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = \Pi \cdot \left(\frac{4,24}{2}\right)^2 = 14,03 \text{ mm}^2$$

$$A_0 = 14,03 \text{ mm}^2 = 1,403 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$F = 80\% \cdot S_y \cdot A_0 = 1313,6 \cdot 10^6 \cdot 1,403 \cdot 10^{-5} = 18429,80 \text{ N}$$

$$F = 1842,98 \text{ Kgf}$$



**Fig. # 4.13 Curvas esfuerzo – deformación  
Condición original + tratamiento mecánico**





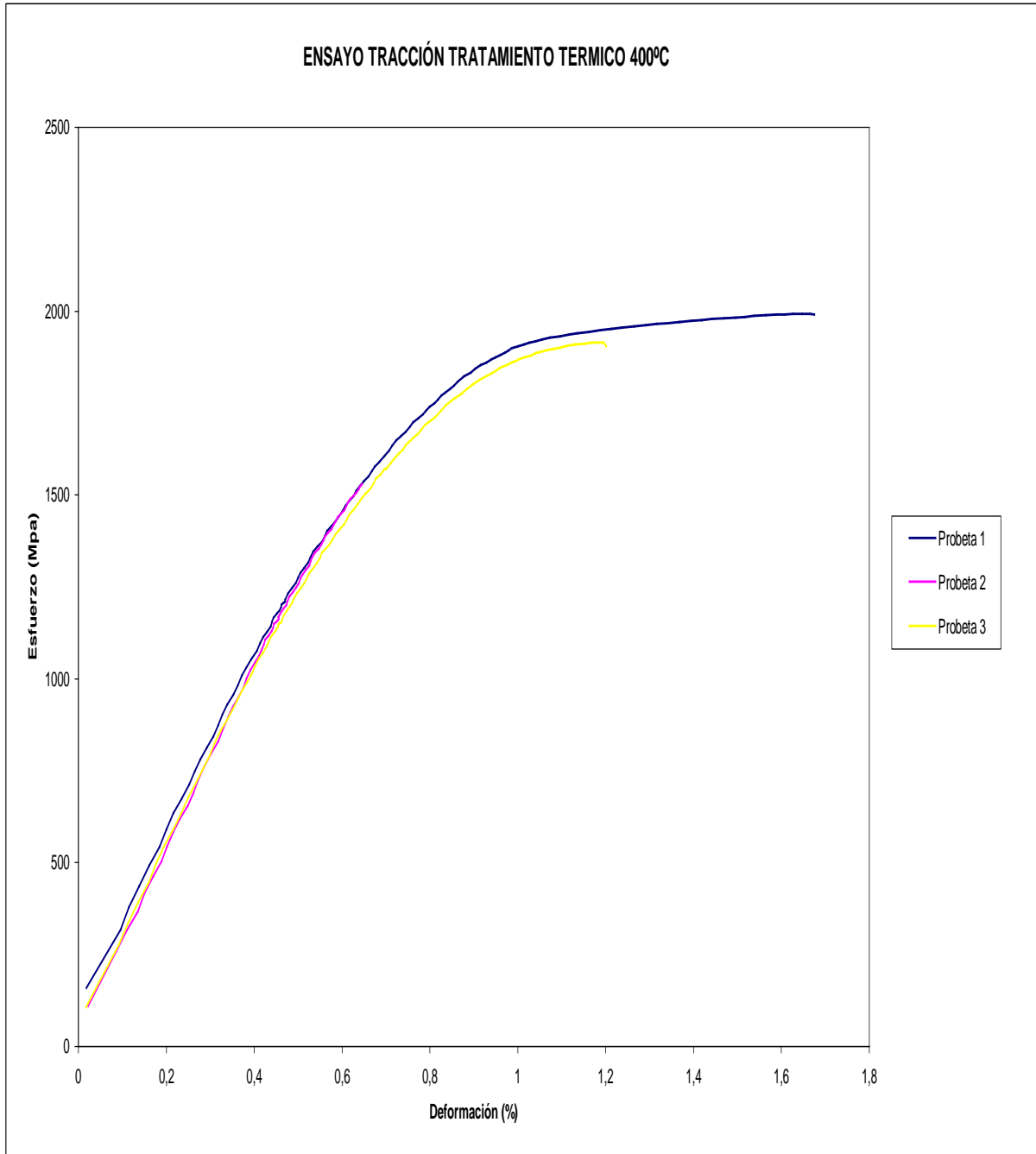
Propiedades mecánicas obtenidas a partir de la Fig. # 4.13 son los siguientes:

Condición original + tratamiento mecánico	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Sy (MPa)	S max (MPa)	S rotura (MPa)	E (MPa)	Alargamiento (%)	Red. Área (%)	Tenacidad (Joule)
Probeta 1	13,92	1801	2078	2078	200560	2	37,10	9,20
Probeta 2	13,99	1313	2088	2085	270401	2,6	31,60	15,70
Probeta 3	13,99	1963	2059	2059	148561	2	36,60	8,80
Promedio	13,97	1692	2075	2074	206507	2,20	35,10	11,23

**Tabla # 4.6 Propiedades mecánica para la condición original + tratamiento mecánico**



### IV.1.3. Condición original + tratamiento térmico



**Fig. # 4.14 Curvas esfuerzo – deformación  
Condición original + tratamiento térmico**



Propiedades mecánicas obtenidas a partir de la Fig. # 4.14 son los siguientes:

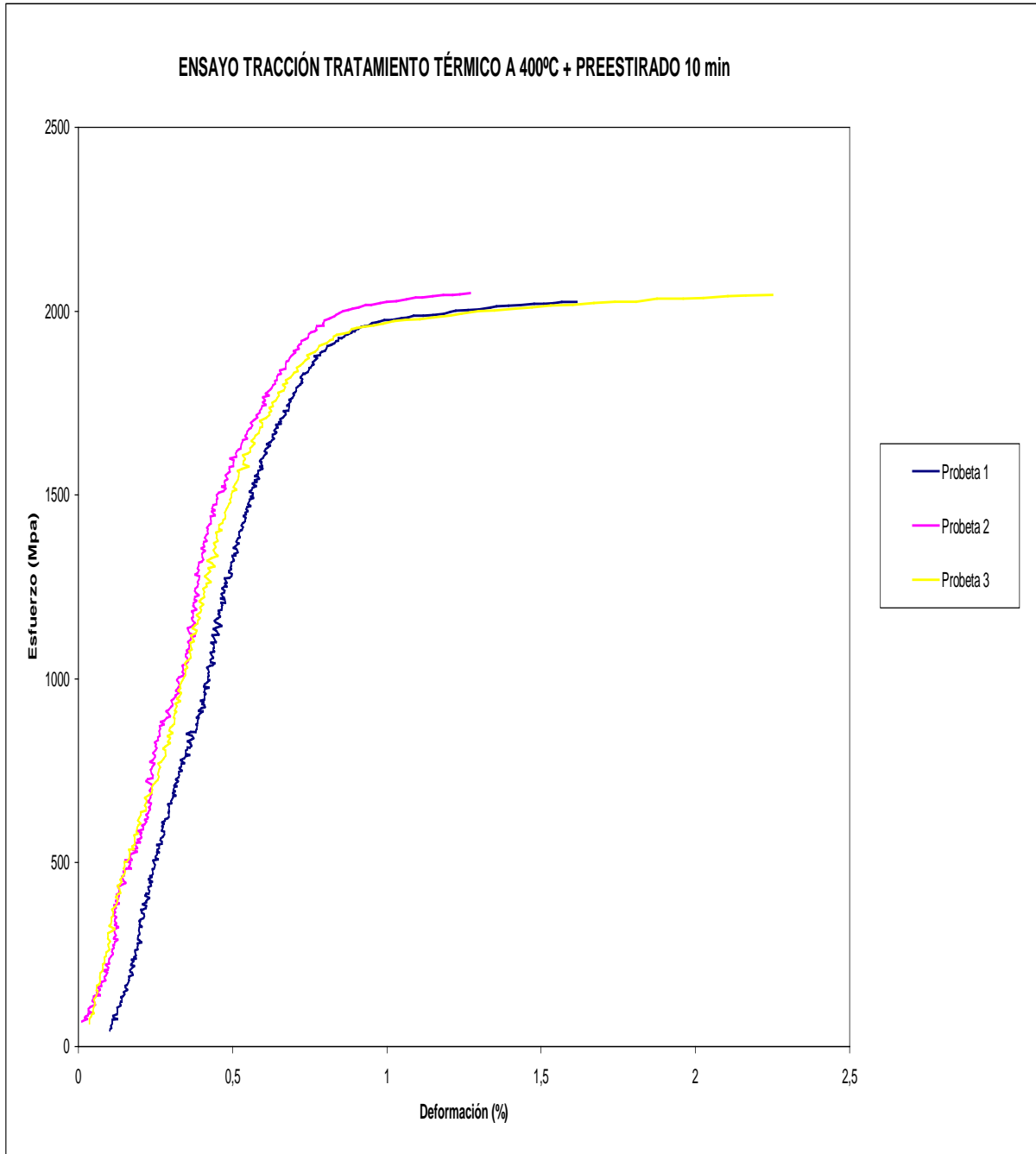
Condición original + tratamiento térmico a 400°C	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Sy (MPa)	S max (MPa)	S rotura (MPa)	E (MPa)	Alargamiento (%)	Red. Área (%)	Tenacidad (Joule)
Probeta 1	13,99	1826	2038	1745	185706	2	33,2	13,1
Probeta 3	13,99	1758	2038	1447	194346	1,2	33,2	6,4
Promedio	13,99	1792	2038	1596	190026	1,60	33,20	9,75

**Tabla # 4.7 Propiedades mecánica para la condición original + tratamiento térmico**

La probeta 2 fracturo antes de alcanzar el Sy por lo tanto se descarta.



### IV.1.4. Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico



**Fig. # 4.15 Curvas esfuerzo – deformación**  
**Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico**



Propiedades mecánicas obtenidas a partir de la Fig. # 4.15son los siguientes:

Condición original + tratamiento térmico a 400°C + tratamiento mecánico	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Sy (MPa)	S max (MPa)	S rotura (MPa)	E (MPa)	Alargamiento (%)	Red. Área (%)	Tenacidad (Joule)
Probeta 1	14,12	1961	2005	2005	123564	3,30	0,5	21,90
Probeta 2	14,12	1948	2009	2009	187935	1,92	0,5	7,70
Probeta 3	14,12	1871	1986	1986	192488	2,70	0,5	11,80
Promedio	14,12	1926	2000	2000	167995	2,64	0,50	13,80

**Tabla # 4.8 Propiedades mecánica para la condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico**



A partir de los resultados obtenidos en las tablas # 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 se establece una nueva tabla comparativa, donde se observan, los valores promedios de las cuatro condiciones estudiadas.

Condición	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Sy (MPa)	S max (MPa)	S rotura (MPa)	E (MPa)	Alargamiento %	Red. Área %	Tenacidad (Joule)
Condición original	14,03	1642	2011	1609	186361	1,83	36,67	11,50
Condición original + tratamiento mecánico	13,97	169	2075	2074	206507	2,20	35,10	11,23
Condición original + tratamiento térmico a 400°C	13,99	1792	2038	1596	190026	1,60	33,20	9,75
Condición original + tratamiento térmico a 400°C + tratamiento mecánico	14,12	1926	2000	2000	167995	2,64	0,50	13,80

**Tabla # 4.9 Propiedades mecánicas promedios de las cuatro condiciones en estudio**



## IV.2. Ensayo de Relajación.

Para realizar los ensayos de relajación, se define la carga inicial a la cual estará tensado el cordón a longitud constante, como el 70% del  $S_{max}$ , por lo cual se promediaron todos los valores de  $S_{max}$ , obtenidos en las propiedades mecánicas de los ensayos a tracción, y así obtener un valor único de esfuerzo máximo. Carga  $F_2$  a la cual estarán sometidas las probetas en el ensayo de relajación

$$S_{y \max} = 2031 \text{ Mpa} \text{ (Valor promedio de esfuerzo máximo)}$$

$$A_0 = \Pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = \Pi \cdot \left(\frac{4,24}{2}\right)^2 = 14,03 \text{ mm}^2$$

$$A_0 = 14,03 \text{ mm}^2 = 1,403 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$S_{yR} = 70\% \cdot S_{y \max} \rightarrow S_{yR} = 0,7 * 2031 = 1421,7 \text{ Mpa}$$

$$S_{yR} = 70\% \cdot S_{y \max} \text{ N}$$

$$F_{\text{relajación}} = 70\% \cdot S_{y \max} * A_0$$

$$F_{\text{relajación}} = 1994,64 \text{ Kgf}$$



### IV.2.1. Condición original

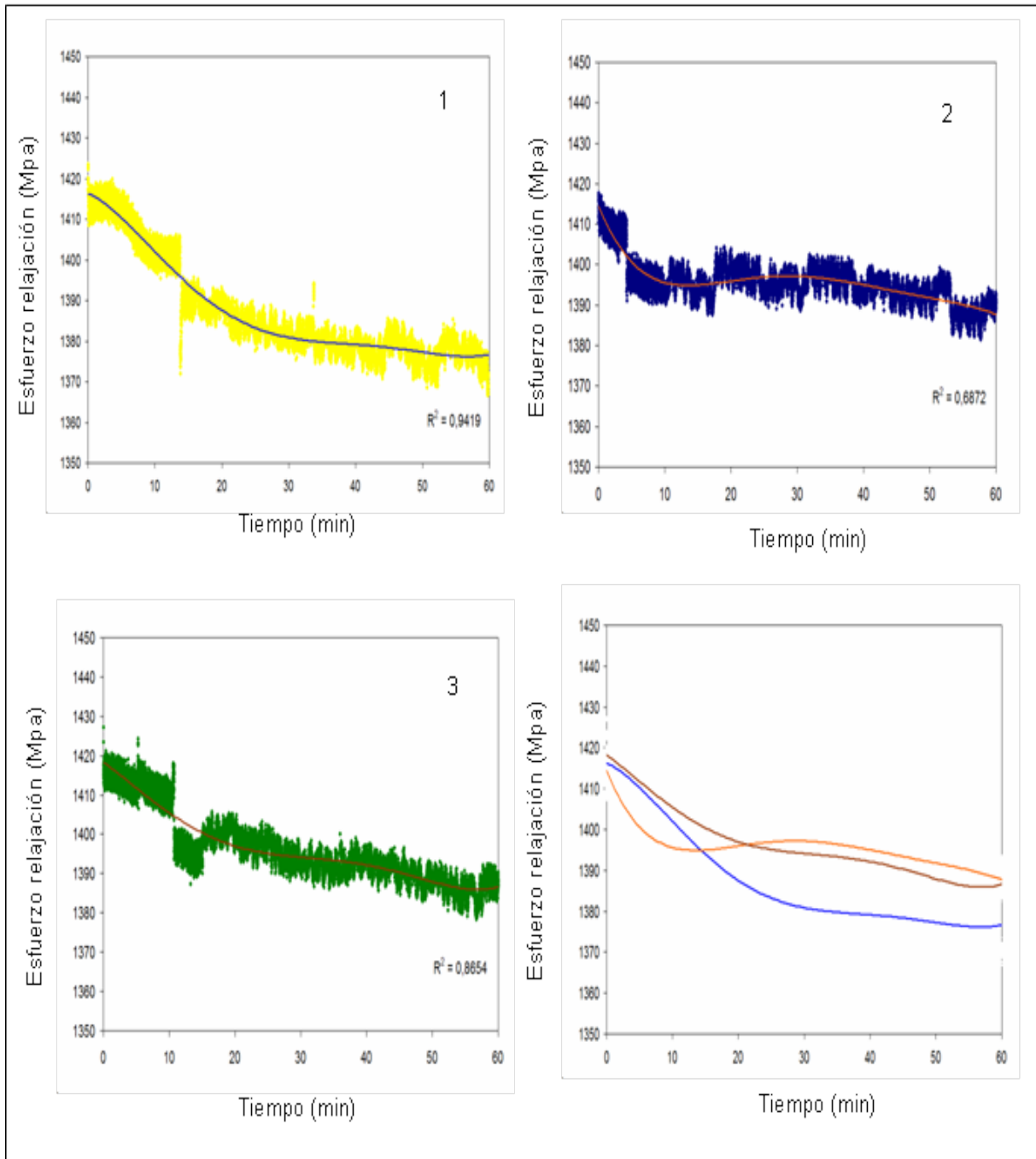


Fig. # 4.16 Patrones de relajación condición original – ajuste polinómico de grado 5





### IV.2.2. Condición original + tratamiento mecánico

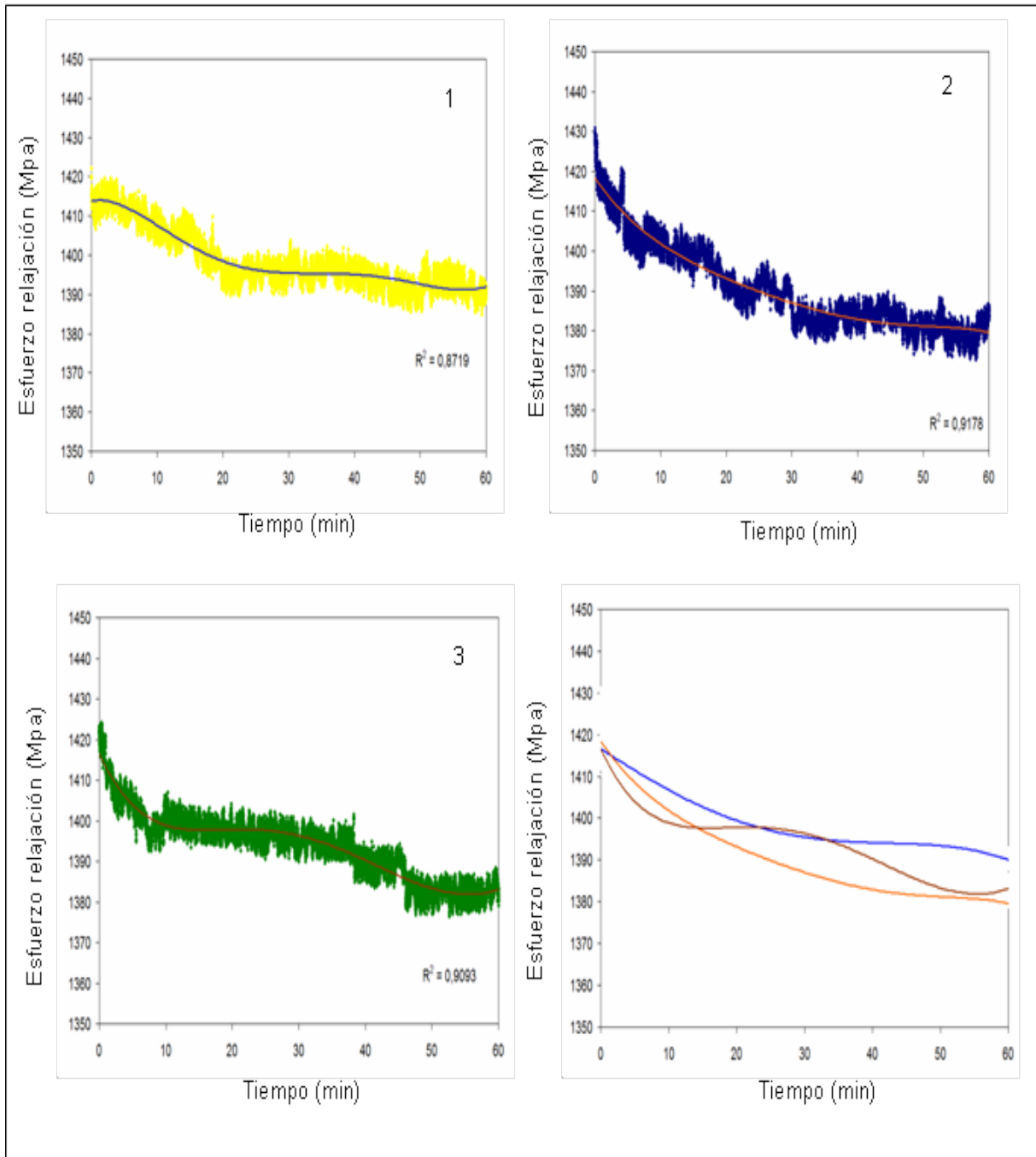


Fig. # 4.17 Patrones de relajación condición original + tratamiento mecánico – ajuste polinomico de grado 5



### IV.2.3. Condición original + tratamiento térmico

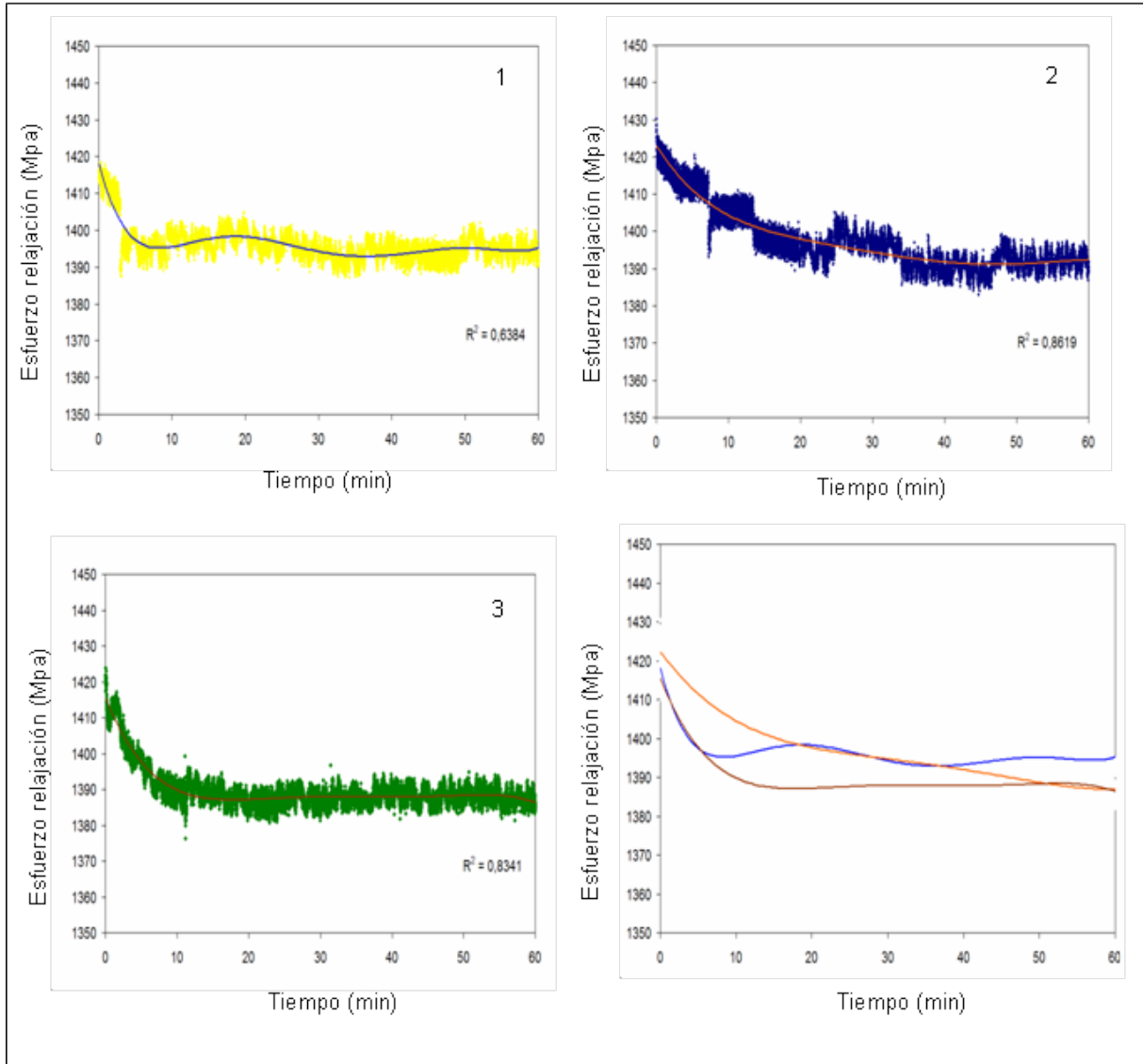


Fig. # 4.18 Patrones de relajación condición original + tratamiento térmico – ajuste polinomico de grado 5

#### IV.2.4. Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico

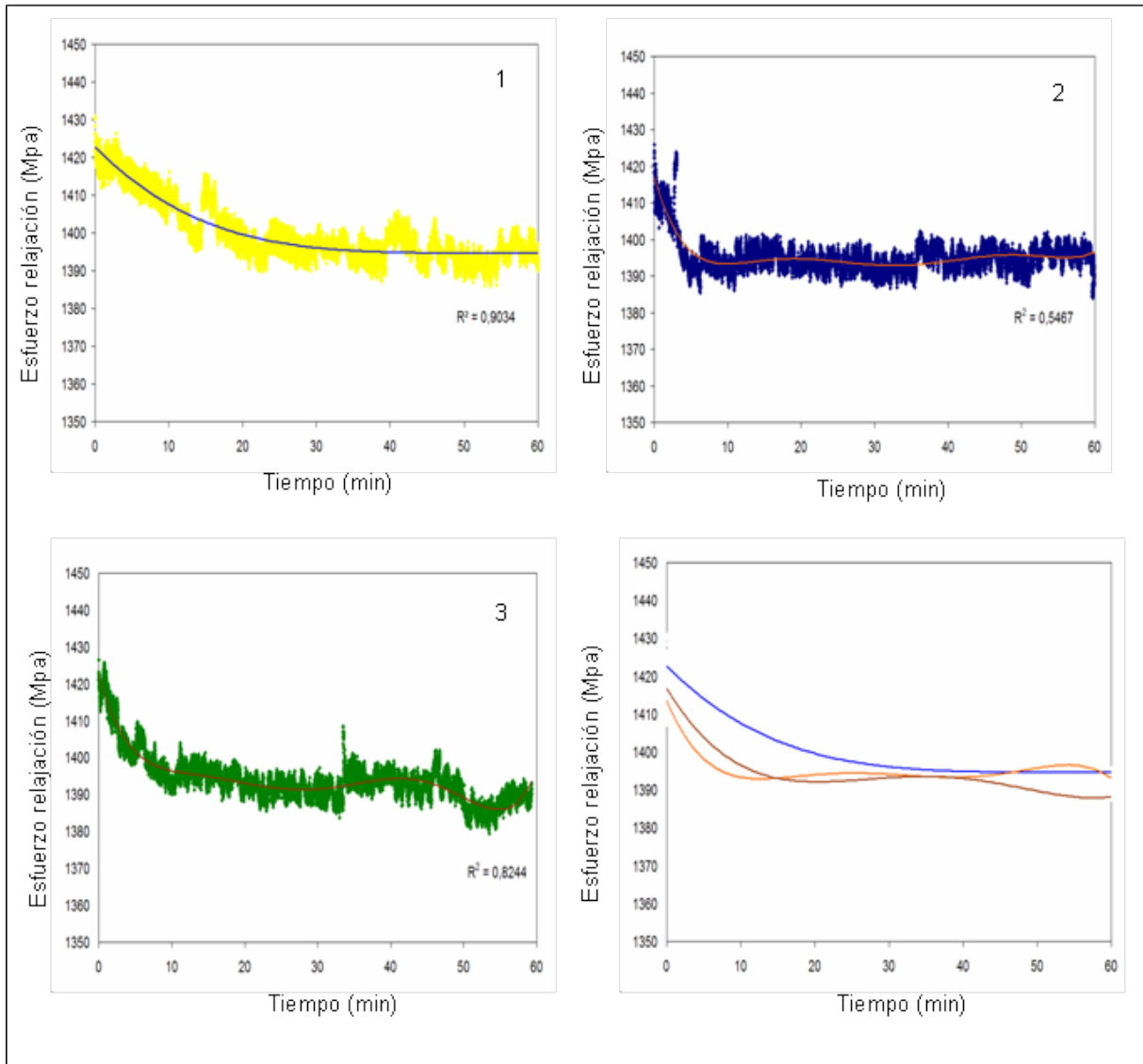


Figura # 4.19 Patrones de relajación condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico – ajuste polinómico de grado 5

#### IV.4.5. Patrones de relajación definidos

A partir de los resultados obtenidos en las figuras # 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, se seleccionó de cada una de las condiciones, el patrón representativo de una muestra relajada en función del coeficiente de correlación  $R^2$  más alto.

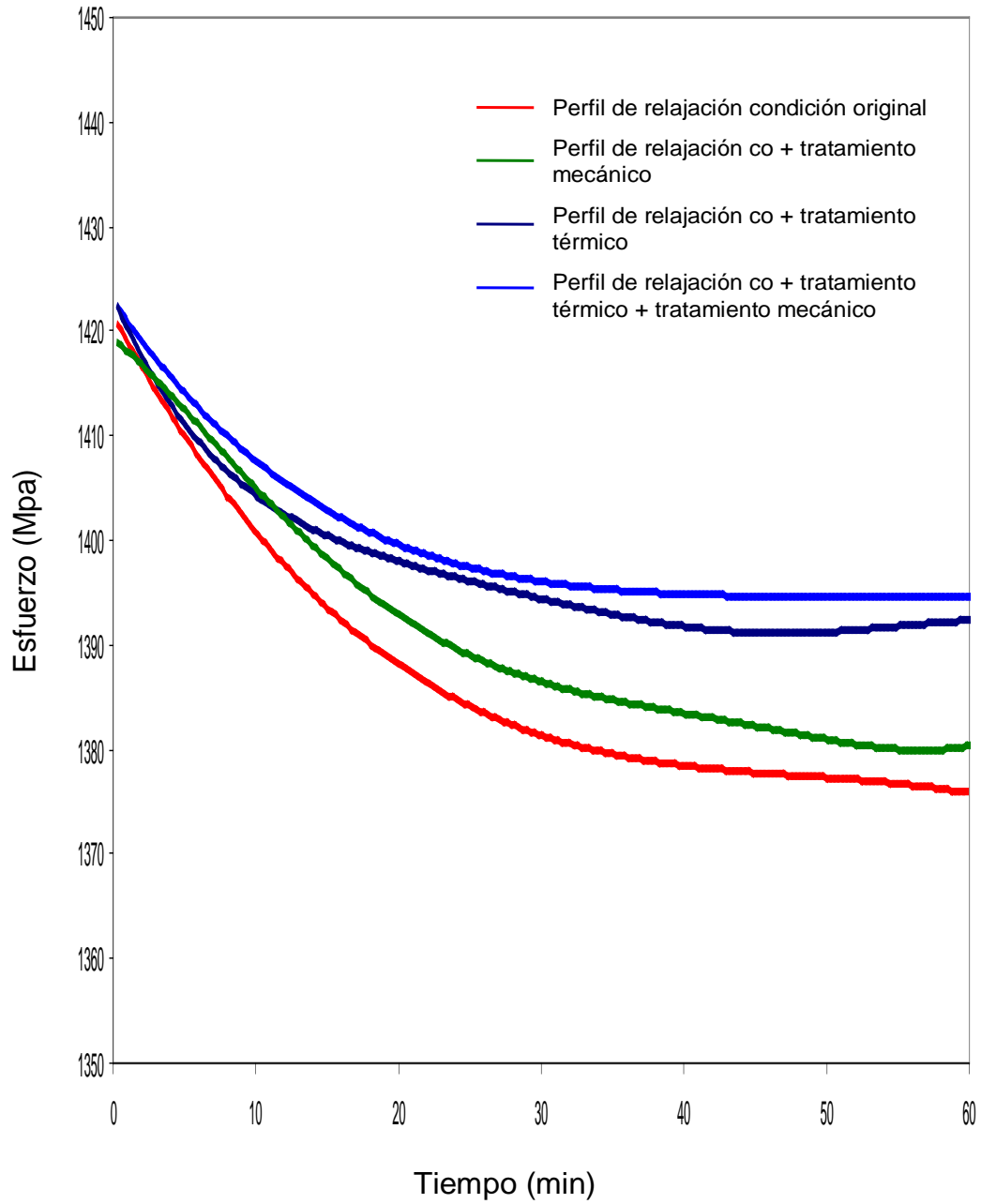


Fig. # 4.20 Patrones de relajación seleccionados de las condiciones estudiadas



A partir la fig. # 4.20, se calculó el porcentaje de relajación de los patrones de relajación de cada una de las condiciones estudiadas.

Condición	Carga Inicial	Carga Final	% de relajación
Condición original	1422	1368,68	3,75
Condición original + tratamiento mecánico	1422	1383,32	2,72
Condición original + tratamiento térmico	1422	1389,08	2,32
Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico	1422	1396,85	1,77

**Tabla # 4.10 Porcentaje de relajación de las condiciones estudiadas**

### IV.3. Metalografía.

La metalografía óptica se realizó con el fin de observar el tipo de microestructura del material, el estudio se llevó a cabo en el laboratorio de metalografía de la empresa VICSON S.A, para las condiciones establecidas previamente en la metodología, que son las mismas a las cuales le practicamos ensayos de tracción y relajación. En las siguientes imágenes se muestra la microestructura del material, para cada una de las condiciones, observadas en el microscopio metalográfico.

### IV.3.1. Vista longitudinal con un aumento de 100X

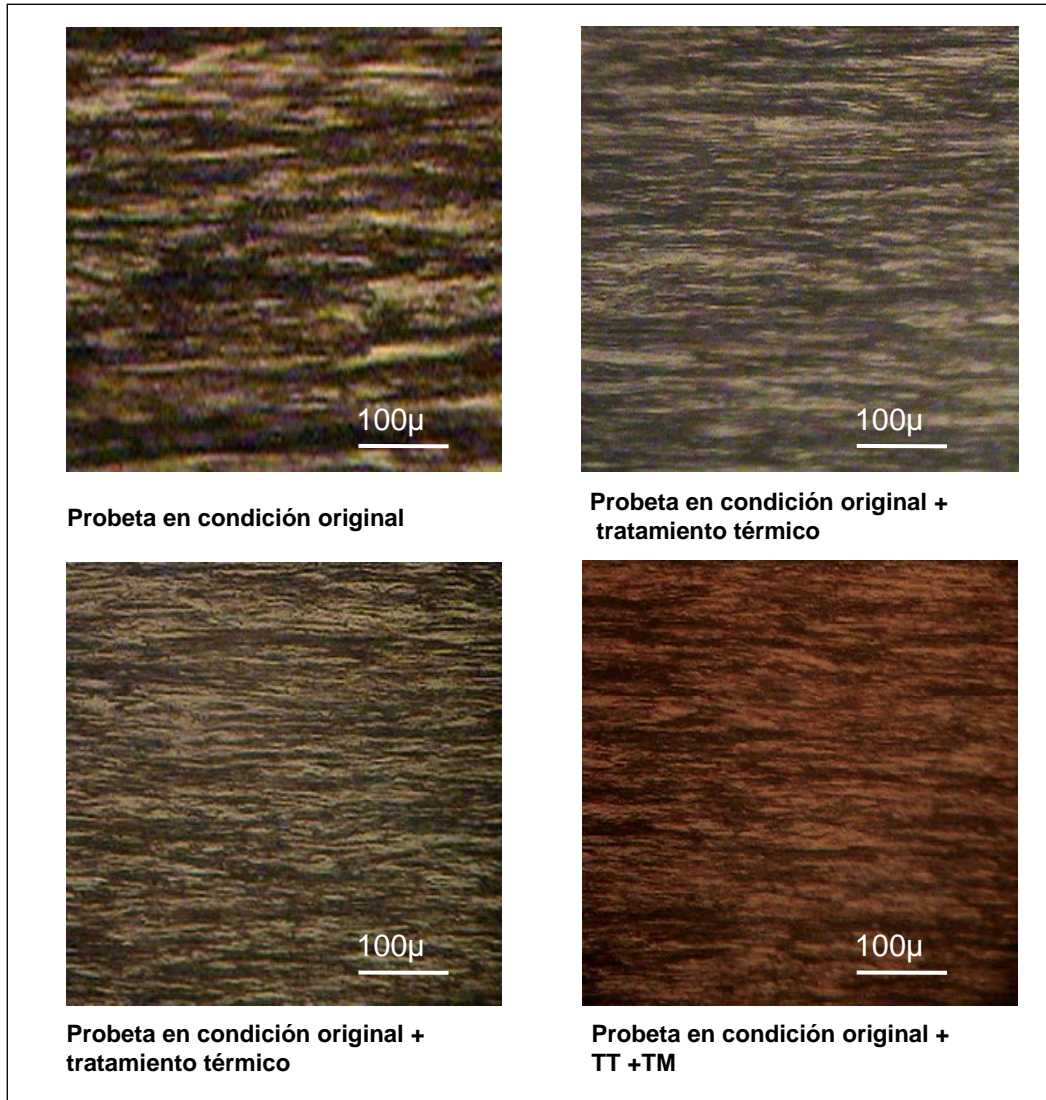


Fig. # 4.21 Vista longitudinal con un aumento de 100X para las condiciones estudiadas

### IV.3.2. Vista longitudinal con un aumento de 500X

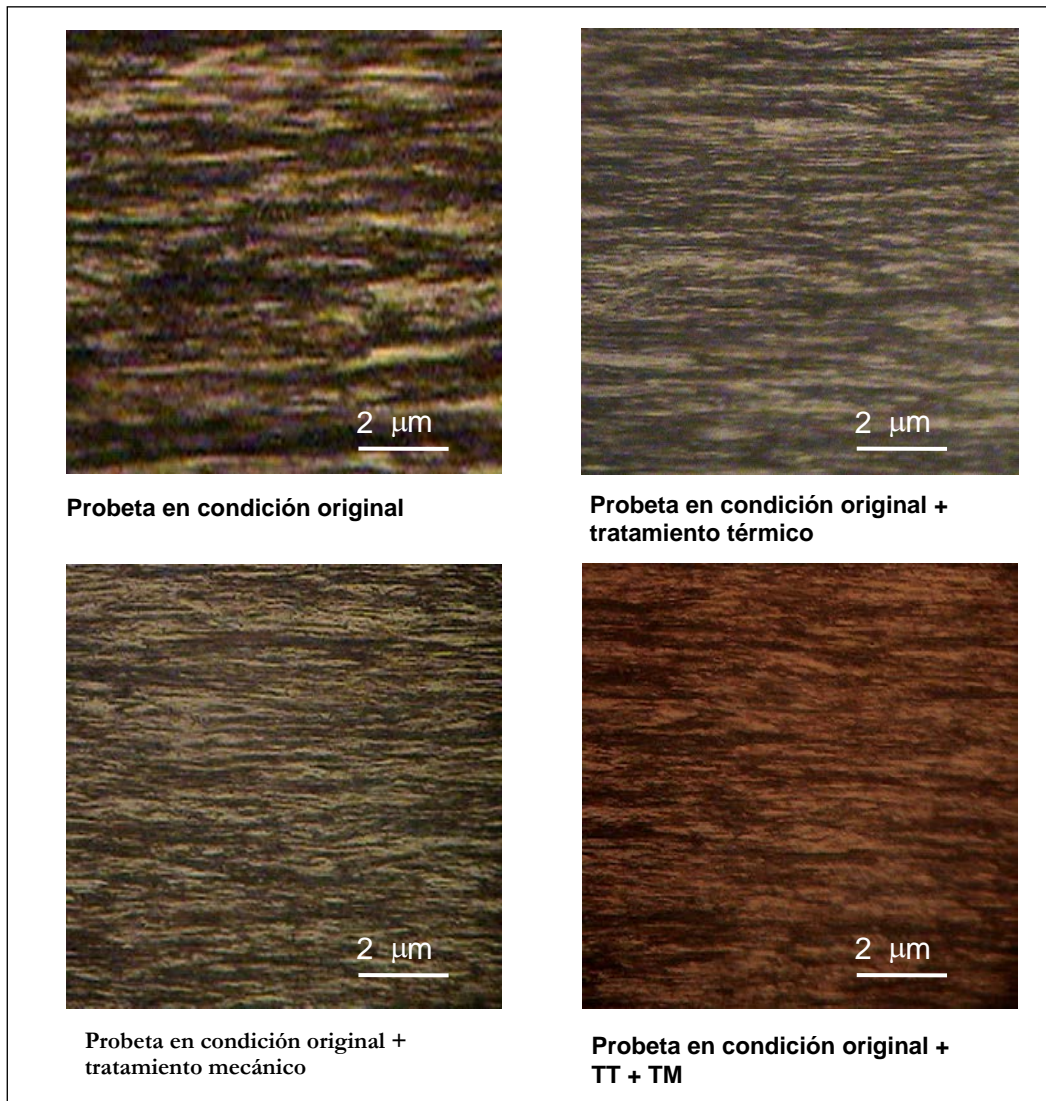


Fig. # 4.22 Vista longitudinal con un aumento de 500X para las condiciones estudiadas

### IV.3.3. Vista longitudinal vista con un aumento de 1000X

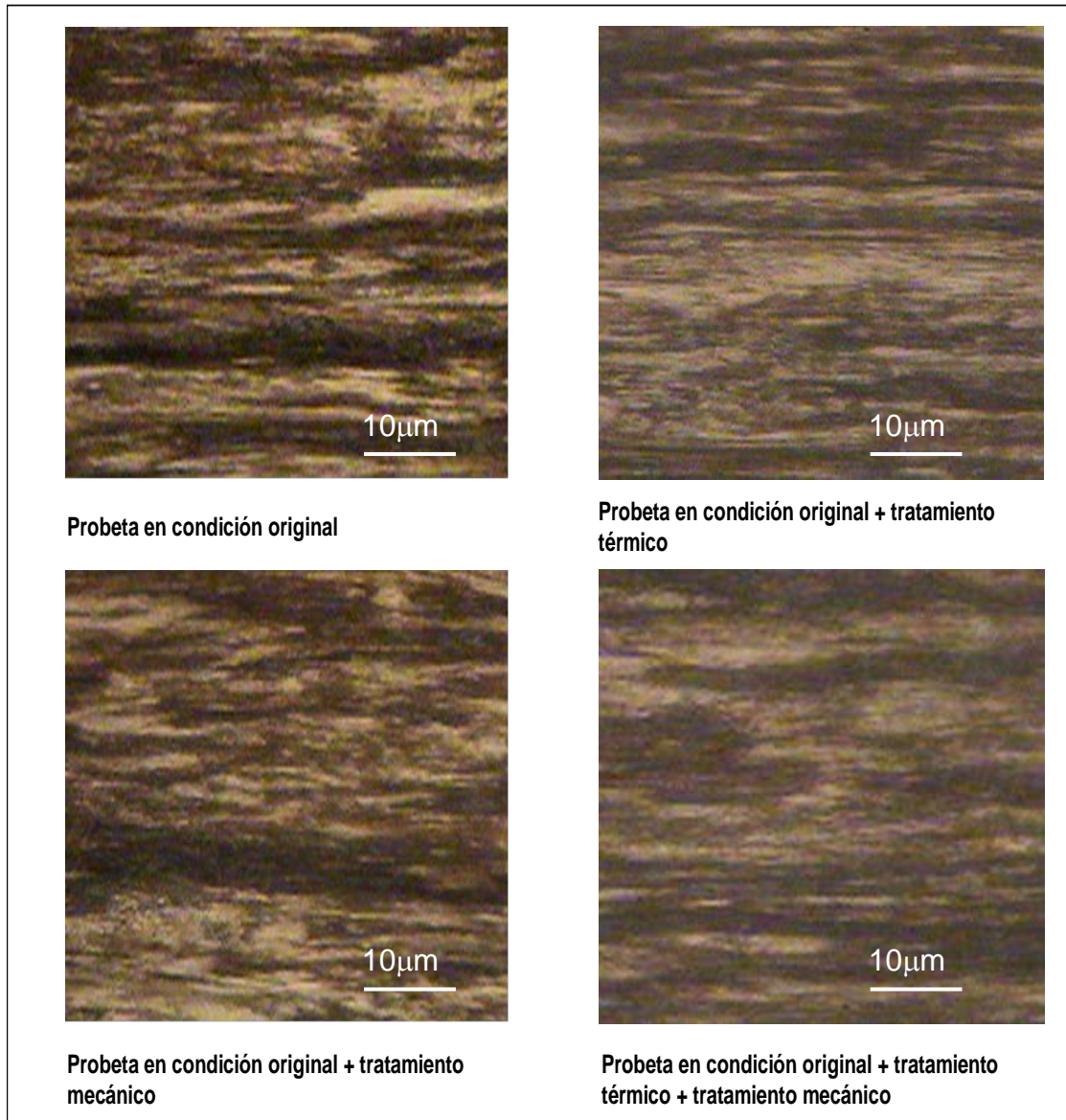


Fig. # 4.23 Vista longitudinal con un aumento de 1000X para las condiciones estudiadas





## **V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **V.1. Ensayo de tracción.**

#### **V.1.1 Condición original**

Se realizaron tres ensayos a esta condición, para minimizar el margen de error, la fig. # 4.12 muestra las curvas de las tres probetas ensayadas, todas partieron en la zona calibrada, por lo se validaron los tres ensayos. A partir de la fig. # 4.12 se obtuvieron las propiedades mecánicas para la condición original, tabla # 4.5, donde no se observan variaciones considerables entre las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas y se obtiene como valor promedio de esfuerzo de fluencia 1642 Mpa y de esfuerzo máximo 2011 Mpa.

#### **V.1.2 Condición original + tratamiento mecánico**

Una vez realizados los ensayos de tracción a las probetas en condición original, se obtuvo la carga inicial para el tratamiento de estirado de 1842,98 Kgf, la cual se aplicó por 10 minutos a tres probetas en condición original, luego se realizaron ensayos de tracción a estas probetas, la fig. # 4.13 muestra las curvas de las probetas ensayadas, todas partieron en la zona calibrada, por lo se validaron los tres ensayos. A partir de la fig. # 4.13 se obtuvieron las propiedades mecánicas para la condición original + tratamiento mecánico, tabla # 4.6 en la cual no se observan variaciones importantes de las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas, y se obtiene como valor promedio del esfuerzo máximo 2075 Mpa.

#### **V.1.3 Condición original + tratamiento térmico**

Una vez realizado el tratamiento térmico de alivio de tensiones, se realizaron tres ensayos de tracción, la fig. # 4.14 muestra las curvas de las probetas ensayadas, las probetas 1 y 3 partieron en la zona calibrada y la probeta 2 rompió antes de alcanzar el esfuerzo de fluencia, por lo que se descarta y se validan los ensayos 1 y 3. A partir de la fig. # 4.14 se obtuvieron las propiedades mecánicas para la condición original +



tratamiento térmico, tabla # 4.7, en la cual no se observan variaciones considerables entre las propiedades mecánicas obtenidas, y donde se obtuvo un valor promedio de esfuerzo máximo de 2038 Mpa.

#### **V.1.4 Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico**

Una vez realizado el tratamiento térmico y luego el tratamiento mecánico, se realizaron los ensayos de tracción a las tres probetas, la fig. # 4.15 muestra las curvas de las probetas ensayadas, todas ellas partieron en la zona calibrada, por lo que se validaron los tres ensayos. En la tabla # 4.8 se observan las propiedades mecánicas, las cuales no presentan variaciones considerables entre ellas, y donde se obtiene como valor promedio de esfuerzo máximo 2000 Mpa.

La tabla # 4.9 muestra los valores promedios de cada uno de las condiciones estudiadas, en estos resultados se observa claramente como las propiedades mecánicas como el esfuerzo de fluencia, esfuerzo de fractura, esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad, el alargamiento y la tenacidad, no varían considerablemente, lo cual indica que no se produjeron cambios importantes en las propiedades mecánicas del material, con los tratamientos mecánicos y térmicos aplicados, por lo que las propiedades mecánicas se mantienen constantes.

Para realizar los ensayos de relajación, la carga inicial, se definió basado en la NORMA COVENIN 1024, como el 70% del esfuerzo máximo, por lo que se promediaron los promedios de esfuerzo máximo, obteniéndose como valor promedio de esfuerzo máximo 2031 Mpa.

### **V.2. Ensayo de Relajación.**

#### **V.2.1 Condición original**

En la figura # 4.16, observamos los patrones de relajación de las tres probetas ensayadas en condición original, y se incluye tanto la data experimental como el ajuste de tipo polinómico de grado 5, por lo que se observa en los patrones obtenidos, el



ensayo (1) muestra una tendencia que claramente refleja una muestra relajada en el tiempo y además su factor de correlación  $R^{2=} = 0,9419$ , lo que sustenta al ensayo (1) como el patrón representativo de la condición original.

#### **IV.2.2 Condición original + tratamiento mecánico**

En la fig. # 4.17, observamos los patrones de relajación de las tres probetas ensayadas en condición original + tratamiento térmico, se incluye tanto la data experimental como el ajuste de tipo polinómico de grado 5, el ensayo (2) muestra una tendencia que claramente refleja una muestra relajada, en donde se observan tres zonas importantes, la relajación acelerada, la relajación intermedia y la estabilización, y además su factor de correlación se ubica en  $R^{2=} = 0,9178$ . A pesar de que el factor de correlación del ensayo (3) es  $R^{2=} = 0,9093$ , su tendencia no es representativa de una muestra relajada en el tiempo ya que el ensayo no nos permite apreciar las tres zonas de interés como lo son la relajación acelerada, la intermedia y la estabilización.

#### **V.2.3 Condición original + tratamiento térmico**

En la figura # 4.18, observamos los patrones de relajación de las tres probetas ensayadas en condición original + tratamiento térmico, se incluye tanto la data experimental como el ajuste de tipo polinómico de grado 5, por lo que se observa en los patrones obtenidos, el ensayo (2) muestra una tendencia que claramente refleja una muestra relajada en el tiempo donde se observan la relajación acelerada, la relajación intermedia y la estabilización, y además su factor de correlación  $R^{2=} = 0,8619$ , lo que sustenta al ensayo (2) como el patrón representativo de la condición original + tratamiento térmico.

#### **V.2.4 Condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico**

En la fig. # 4.19, observamos los patrones de relajación de las tres probetas ensayadas en condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico, se incluye tanto la data experimental como el ajuste de tipo polinómico de grado 5, por lo



que se observa en los patrones obtenidos , el ensayo (1) muestra una tendencia que claramente refleja las zonas de relajación acelerada, intermedia y la estabilización y donde se obtiene un factor de correlación  $R^{2=} = 0,9034$ , lo que valida al ensayo (1) como el patrón representativo de la condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico.

### V.2.5 Patrones de relajación seleccionados

A partir de los resultados obtenidos en las fig. # 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, se seleccionó de cada una de las condiciones, el patrón representativo de una muestra relajada, tomando en consideración la tendencia de los puntos y el factor de correlación  $R^2$  mas alto, en una muestra relajada se debe observar claramente zonas de interés como: relajación acelerada, relajación intermedia y estabilización [5], lo cual es visible en las muestras seleccionadas de cada condición estudiada.

Los patrones de relajación seleccionados se observan en la fig. # 4.20, para establecer diferencias entre las condiciones estudiadas, la muestra de la data experimental que presenta mayor perdida de tensión en una hora, es la probeta que en condición original y la probeta que presenta menor perdida de tensión en una hora es la probeta en condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico. La disminución de la tensión, inicialmente aplicada, se aprecia en esta figura, para las condiciones sometidas a tratamiento térmico y/o mecánico, la disminución de esfuerzos es más sensible, en comparación a la condición original, donde la magnitud de relajación es mayor, ya que su perfil de esfuerzos residuales es mayor al de las demás condiciones estudiadas.

En la tabla # 4.10, observamos que de las condiciones estudiadas, la muestra que tiene mayor porcentaje de relajación es la probeta en condición original y la probeta que presenta menor porcentaje de relajación es la probeta en condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico, lo que muestra la influencia de dichos tratamientos en la disminución de los esfuerzos residuales. El mayor porcentaje de relajación, se consigue en la condición original del material, sin tratamiento térmico o mecánico de ningún tipo, el valor obtenido para esta condición fue de 3.75%. Al



someter las probetas a un tratamiento mecánico de estirado, se observa como disminuye la relajación, lo que indica que el estirado por debajo del esfuerzo de fluencia es capaz de modificar los niveles de tensión, en alambres con un perfil alto de esfuerzos residuales generados por el estirado en frío.

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se definió que la condición que presenta menor pérdida de tensión en una hora, es la probeta en condición original + tratamiento térmico + tratamiento mecánico, a la cual se le aplicó un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 400°C y un tratamiento mecánico de estirado, disminuyen los esfuerzos residuales presentes en el alambre, por lo que es directamente proporcional la disminución de los esfuerzos residuales y la reducción de pérdida de tensión en el tiempo.

Al aplicar un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 400°C, se observa como el material disminuye aun más la relajación, lo que indica que el calentamiento provoca una reducción sensible en el tensado inicial del material, gracias a la disminución de las tensiones residuales luego del tratamiento. La diferencia entre los perfiles de relajación de las muestras sometidas al tratamiento mecánico y al tratamiento térmico por separado, se aprecia en la fig. # 4.20, donde se obtienen resultados experimentales más favorables, en las probetas sometidas a un tratamiento térmico de alivio tensiones ya que la magnitud de relajación es mayor a la sometida sólo al tratamiento mecánico de estirado, esta diferencia se aprecia también en la tabla # 4.10 donde el porcentaje de relajación de la muestra tratada térmicamente es 2,32% y el porcentaje de la muestra sometida al estirado es 2,72%.

En los perfiles de relajación mostrados en la fig. # 4.20, se identifican claramente tres zonas de interés, que son particulares en los aceros deformados por encima de la zona elástica, la relajación acelerada, la relajación media y la estabilización. A medida que se aplican los tratamientos, que favorezcan la disminución de los esfuerzos residuales la magnitud del esfuerzo de relajación es mayor, y la estabilización ocurre en menor tiempo.



Tanto en la fig. # 4.20 como la tabla # 4.10, indican que al aplicar un tratamiento térmico de alivio de tensiones más un tratamiento mecánico de estirado a probetas en condición original que fueron trabajadas en frío, la relajación disminuye favorablemente con respecto a la condición original y las tratadas mecánica y térmicamente por separado, ya que aplicar un calentamiento que sólo disminuya las tensiones internas, sin alternar la composición del material, mas un estirado por debajo de la zona elástica, contribuyen eficazmente en el desempeño del material sometido a una carga inicial, mantenido constante su deformación por un limite de tiempo.

Este comportamiento del material indica que es favorable la aplicación de tratamientos que disminuyan tensiones residuales, en toda la sección del alambre ya que un perfil elevado de tensiones residuales perjudica el desempeño del material cuando es sometido a tracción o relajación.

### **V.3 Metalografía.**

#### **V.3.1 Vista longitudinal con un aumento de 100X**

La fig. # 4.21 muestra las cuatro condiciones estudiadas, vistas con un aumento de 100X, debido a que es una mezcla eutectoide se aprecia la ferrita (región clara) y la cementita (región oscura), se observa un alargamiento del grano en sentido horizontal, sin embargo no se aprecian inclusiones.

#### **V.3.2 Vista longitudinal con un aumento de 500X**

La fig. # 4.22 muestra cuatro probetas de las condiciones estudiadas, vistas con un aumento de 500X, debido al aumento se aprecian mejor las dos fases tanto la ferrita como la cementita, el alargamiento del grano se muestra en láminas con sentido horizontal, no se aprecian inclusiones.



### V.3.3 Vista longitudinal vista con un aumento de 1000X

La fig. # 4.23 muestra cuatro probetas para las condiciones estudiadas, vistas con un aumento de 1000X, se aprecian claramente la ferrita y la cementita constituyentes de la perlita, y el alargamiento del grano se muestra en laminas horizontales, no se observan inclusiones.



## VI. CONCLUSIÓN

1. Los tratamientos térmicos que disminuyen las tensiones residuales causadas por el trefilado son los tratamientos térmicos de relevado de tensiones, y los tratamientos mecánicos que no contribuyen a cambiar las propiedades mecánicas son los que se efectúan en la zona elástica.
2. El ajuste de la data experimental, se basó en el modelo polinómico, y el factor de correlación del ajuste en promedio superó el 90%, ofreciendo así resultados confiables.
3. En los perfiles de relajación se identifican claramente tres zonas de interés: la relajación acelerada, que ocurre los primeros minutos de la prueba, la relajación intermedia y la estabilización, donde no ocurre una variación importante de los esfuerzos en el tiempo.
4. Los tratamientos térmicos y mecánicos aplicados influyen en los patrones de relajación.
5. El tratamiento óptimo para disminuir la relajación del material, es aplicar al material en condición original un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 400°C más un tratamiento mecánico de estirado de 80% el esfuerzo de fluencia por 10 minutos.
6. No se encontró correlación entre la observación microscópica y la relajación del material, ya que no se observaron cambios en la microestructura asociados a los distintos comportamientos de relajación de las muestras estudiadas.





## RECOMENDACIONES

Los tratamientos térmicos y mecánicos aplicados durante la investigación influyen considerablemente en los patrones de relajación de los alambres utilizados en el área de la construcción, sin embargo un proceso de estabilizado de alambres, que consiste en dar un tratamiento térmico al alambre durante un tiempo muy corto (del orden de segundos) manteniendo aplicada, simultáneamente, una carga de tracción importante, influye en el comportamiento del material, por lo que invitamos a realizar en futuros trabajos de investigación donde se pueda reforzar esta hipótesis.

Profundizar la microscopia empleando métodos que ofrezcan mejor resolución, tal como MET (microscopia electrónica de transmisión), buscando diferenciar las distintas condiciones de relajación.



## BIBLIOGRAFÍA

[1]

Adalet Zeren & Muzaffer Zeren (2001) “Propiedades de relajación de esfuerzos en alambres de acero para pretensado”

[2]

Atienza, J. M & Elices, M (2004) “Influencia de los esfuerzos residuales en la relajación de esfuerzos de alambres trefilados en frío”

[3]

Grippi, Luis & Ocando, Angel (2005) “Evaluación de la tenacidad de impacto de un acero inoxidable duplex SAF 2250 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °C, con unos tiempos de 48,54 y 60 minutos”

[4]

Michael W. Woodmansee & Richard W. Neu (2002) “Influencia de la tasa de tensión previa en la relajación de tensión de aleaciones de soldadura”

[5]

Sandra Cabello & Eli Saúl Puchi C. & Engels Ochoa (2006) “Comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros al carbono sometidos a distintos niveles de esfuerzo en zonas de deformación elástica y plástica”

[6]

J. M. Atienza & J. Ruiz-hervías & L. Caballero & M. Elices (2005) “Mejora del comportamiento a corrosión bajo tensión de los alambres de pretensado”

[7]

Norma COVENIN 1024:1995 “Cordón de acero de siete alambres relevado de tensiones para miembros estructurales de pretensados y postensados”



[8]

<http://www.monografias.com/trabajos10/coma/coma.shtml>

[9]

<http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20de%20el%20acero.htm>

[10]

<http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/diagrama.html>

[11]

<http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/x-20.html>

[12]

<http://es.wikipedia.org/wiki/Trefilado>

[13]

<http://html.2materieles.com/aleaciones-metalicas.html>

[14]

<http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/tabla2-2.html>