



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



**CARACTERIZACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA DE  
COMPONENTES DEL ACERO PARA PRETENSADO CON DIFERENTES  
COMPORTAMIENTOS DE RELAJACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA  
ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (MET).**

**Cuesta Moreno, Juan  
Herrera Fergusson, Mónica**

**Valencia, Octubre 2007**



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



**CARACTERIZACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA DE  
COMPONENTES DEL ACERO PARA PRETENSADO CON DIFERENTES  
COMPORTAMIENTOS DE RELAJACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA  
ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (MET).**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR POR EL TITULO DE  
INGENIERO MECÁNICO.**

**Cuesta Moreno, Juan  
Herrera Fergusson, Mónica**

**Valencia, Octubre 2007**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado, designado para evaluar el Trabajo Especial de grado titulado **“CARACTERIZACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA DE COMPONENTES DEL ACERO PARA PRETENSADO CON DIFERENTES COMPORTAMIENTOS DE RELAJACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (MET).”**, realizado por los bachilleres: **Juan Cuesta** y **Mónica Herrera**, cedula de identidad: **16.407.996** y **15.745.684**, respectivamente, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Sandra Cabello  
Tutor

Ing. Laura Sáenz  
Jurado

Ing. Eleazar Díaz  
Jurado

Valencia, Octubre de 2007

*A DIOS*

*A MI MAMA*

*A MIS HERMANAS*

**JUANCHO**

*A DIOS*

*A MIS PADRES*

*A MI HERMANO*

*A PILY, PACO Y MINO*

**MÓNICA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias y amigos, que nos apoyaron siempre, y a aquellos que nos acogieron fuera y compartieron momentos que nos hicieron sentir como en casa.

A nuestra tutora, Ing. Sandra Cabello, por su tiempo invertido en nosotros, por su apoyo y simpatía que sin duda ayudaron a materializar este trabajo especial de grado.

A la Dra. Gema González por su paciencia, dedicación y apoyo, y por darnos la oportunidad de trabajar junto a ella. A los miembros del departamento de Ingeniería III, del IVIC y en especial a Lisbeth y Antonio por su excelente trato y por estar siempre dispuestos a ayudarnos y guiarnos en este trabajo.

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el de caracterizar la microestructura de componentes del acero 1080 utilizado para concreto pretensado, con diferentes comportamientos de relajación, mediante la técnica de microscopía electrónica de transmisión (MET). Para llevar a cabo este trabajo fue necesaria la preparación de foils, nombre que reciben los especímenes que fueron estudiados mediante la técnica de microscopía electrónica de transmisión (MET), a partir de una población de 40 muestras (20 muestras de relajación baja y 20 muestras de relajación normal) de 4 mm de espesor, luego estos discos fueron desbastados y pulidos, mediante las técnicas pertinentes, hasta llegar a una altura comprendida entre 100 y 50 micras. Después se les realizó el electropulido, técnica mediante la cual se le abre un agujero al foil con la ayuda de un electrolito especial para el tipo de material a atacar (en nuestro caso un acero perlítico), dicho orificio es fundamental para este tipo de estudio. Inmediatamente de haber obtenido los foils, se realizó el estudio microscópico, enfocando las partes de interés de la matriz con distintos tipos de acercamiento y se obtuvieron las fotografías que se analizaron; gracias a estas ampliaciones se pueden observar de mejor manera detalles importantes que se tomaron en cuenta a la hora de concluir. Las principales diferencias encontradas en los resultados obtenidos fueron la distribución de las láminas de ferrita y el espesor de las mismas, siendo de más gruesas para las muestras de relajación normal y de una distribución más uniforme para las de relajación baja; dichas discrepancias están íntimamente relacionadas a el proceso de trefilado a que es sometido el alambre durante su proceso de conformación.

## GLOSARIO

**Alúmina:** Es el óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ).

**Catéter de Jelco:** Es un dispositivo que puede ser introducido dentro de un tejido o vena.

**Cristalografía:** Ciencia que se dedica al estudio y resolución de estructuras cristalinas.

**Electrolito:** Es una sustancia que al disolverse en agua, da lugar a la formación de iones y que permiten que la energía eléctrica pase a través de ellos.

**Electropulido.** Es un tratamiento superficial que pule el material.

**Foils:** Se le llama comúnmente a las muestras o probetas que tienen un espesor de 10 a 50 micras.

**MET:** Microscopio Electrónico de transmisión

**Multi-plug:** Es un enchufe que transmite diferentes señales a la vez.

**Paños de pulido:** Son una especie de tela producida especialmente para pulir piezas de metal, las cuales se instalan sobre el disco de pulido.

**Precipitados:** Es la forma microscópica en que se solidifica un material luego de ser expuesto a altas temperaturas.

**Probetas Volumétricas:** Son aquellas probetas que tienen volumen significativo.

**Tocho:** Se le llama vulgarmente a un cilindro de metal.

**Torón:** Cordones de siete alambres descubiertos y liberados de esfuerzos usados en elementos estructurales pre y postensados

## INDICE GENERAL

DEDICATORIAS .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	VI
RESUMEN .....	VII
GLOSARIO .....	VIII
INDICE DE FIGURAS .....	XII
INDICE DE TABLAS .....	XVI
INTRODUCCION .....	1
CAPITULO I “EL PROBLEMA” .....	3
1.1 TITULO DEL TRABAJO .....	4
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.3 OBJETIVOS .....	6
1.3.1 Objetivo General .....	6
1.3.2 Objetivos Específicos .....	6
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	7
1.5 LIMITACIONES .....	8
1.6 DELIMITACIONES .....	8
1.7 ANTECEDENTES .....	9
CAPITULO II “MARCO TEÓRICO” .....	13

2.1 TORONES DE SIETE HILOS .....	14
2.1.1 Proceso de fabricación de alambres .....	15
2.1.1.1 Materia Prima .....	15
2.1.1.2 Proceso de trefilado y conformación del torón .....	17
2.1.2 Tratamiento del torón conformado .....	19
2.2 APLICACIONES EN LA INGENIERÍA .....	22
2.2.1 El concreto .....	23
2.3 RELAJACIÓN DE ESFUERZOS .....	25
2.4 LA MICROESTRUCTURA .....	28
2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA .....	32
CAPITULO III “MARCO METODOLÓGICO” .....	46
3.1. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN .....	47
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	47
3.2.1. Preparación de “foils” .....	49
3.2.2. Microscopía Electrónica de Transmisión.....	53
3.2.3. Medición de Fotografía .....	53
3.3. MATERIAL UTILIZADO .....	54
3.4. MATERIALES Y EQUIPOS .....	57
CAPITULO IV “RESULTADOS EXPERIMENTALES” .....	63
4.1. FOTOGRAFÍAS DE LA MICROESTRUCTURA EN CAMPO	

CLARO .....	64
4.2. PROMEDIO DE LAS MEDIDAS DE LAS LÁMINAS DE FERRITA Y CEMENTITA .....	68
4.3. PATRONES DE DIFRACCIÓN DE ELECTRONES .....	71
4.4. MEDICION DE LAS DISTANCIAS ENTRE LOS ANILLOS ...	72
CAPITULO V “ANÁLISIS DE RESULTADOS” .....	74
5.1. ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (MET) .....	75
5.2. ANÁLISIS DE PATRONES DE DIFRACCIÓN .....	77
CAPITULO VI “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES” .....	78
6.1. CONCLUSIONES .....	79
6.2. RECOMENDACIONES .....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82
APÉNDICE .....	84

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Torones de Siete Hilos .....	14
Figura 2.2 Relajación vs. Tiempo .....	25
Figura 2.3 Transformación de un acero Eutectoide (1080) en condiciones de enfriamiento lento .....	28
Figura 2.4 Microestructura de: Perlita, Bainita, Esferoidita y Martensita .....	30
Figura 2.5 Microestructura del acero antes y después del trefilado .....	31
Figura 2.6 Comparación del proceso de imagen entre un microscopio óptico y un microscopio electrónico de transmisión .....	33
Figura 2.7 Tipos de señales que se producen durante la interacción del haz electrónico con la muestra .....	36
Figura 2.8 Trayectoria seguida por los electrones para formar una imagen (i) y un patrón de difracción (ii) .....	37
Figura 2.9 Patrón de difracción electrónico .....	37
Figura 2.10 Patrón de difracción de anillos proveniente de una muestra policristalina .....	39
Figura 2.11 Representación esquemática de los parámetros involucrados en la deducción de la constante de cámara .....	40
Figura 2.12 Tres Posibles fuentes de poder para el método de electropulido .....	44
Figura 3.1 Diseño de la investigación .....	48

Figura 3.2 Corte de la probeta con disco abrasivo .....	49
Figura 3.3 Procedimiento para el adelgazamiento con lijas.....	50
Figura 3.4 Obtención del “foil”.....	50
Figura 3.5 Procedimiento para el pulido .....	51
Figura 3.6 Procedimiento para el electrolito .....	53
Figura 3.7 Microscopía óptica de acero 1080 A. de baja relajación B. de relajación normal .....	54
Figura 3.8 Microscopía electrónica de barrido de acero 1080 de A. de baja relajación B. de relajación normal .....	55
Figura 3.9 Microscopía electrónica de barrido de acero 1080 de A. de baja relajación B. de relajación normal .....	55
Figura 3.10 Ensayo de relajación para un acero 1080 de baja relajación y relajación normal .....	57
Figura 3.11 Microscopio óptico .....	57
Figura 3.12 Materiales para el adelgazamiento con lijas .....	58
Figura 3.13 Materiales para pulido .....	58
Figura 3.14 Materiales para el cambio de lado de la muestra.....	59
Figura 3.15 Banco de pulido .....	59
Figura 3.16 Troquel .....	60
Figura 3.17 Máquina de electropulido .....	60
Figura 3.18 Nitrógeno líquido .....	61
Figura 3.19 Lupa con escala .....	61

Figura 3.20 Microscopio Electrónico de Transmisión .....	62
Figura 4.1 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 11570X .....	64
Figura 4.2 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 11570X .....	64
Figura 4.3 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 25810X .....	65
Figura 4.4 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 25810X .....	65
Figura 4.5 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 85500X .....	66
Figura 4.6 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 85500X .....	66
Figura 4.7 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 85500X .....	67
Figura 4.8 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 85500X .....	67
Figura 4.9 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 85500X .....	67
Figura 4.10 Patrón de difracción de electrones para muestra de acero 1080 con baja relajación .....	71

Figura 4.11 Patrón de difracción de electrones para muestra de acero 1080 relajación normal ..... 71

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Condiciones del electrolito utilizado .....	52
Tabla 3.2 Composición química del acero 1080 para las propiedades de relajación baja y normal .....	56
Tabla 3.3 Propiedades mecánicas del acero 1080 .....	56
Tabla 4.1 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.5 .....	68
Tabla 4.2 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.6 .....	68
Tabla 4.3 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.7 .....	69
Tabla 4.4 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.8 .....	69
Tabla 4.5 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.9 .....	70
Tabla 4.6 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografías 4.6 y 4.9 .....	70
Tabla 4.7 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografías 4.5,4.7 y 4.8 .....	73

Tabla 4.8 Distancia entre anillos y distancias interplanares para el acero 1080 A. de baja relajación, B. de relajación normal .....	72
Tabla 4.9 Comparación de las distancias interplanares de los aceros 1080 de relajación baja y normal con los patrones de referencia de ferrita y cementita .....	73
de ferrita y cementita .....	73

## INTRODUCCIÓN

Como es del conocimiento general uno de los materiales más utilizados para el levantamiento de estructuras es el concreto, este sirve para la construcción de puentes, estacionamientos, viaductos, escuelas, entre otros usos; éste a su vez se puede presentar de varias formas como pretensado y postensado. Dada la importancia de este material estructural se deben estudiar sus características, tales como: resistencia a la fatiga, tracción, compresión, torsión y flexión, además de su comportamiento en el tiempo, el cual se denomina relajación.

El fenómeno de relajación es una propiedad mecánica que se refiere al decrecimiento progresivo en esfuerzo de un sólido a través del tiempo, sujeto a una de deformación inicial.

Esta propiedad se determina principalmente a partir de ensayos de tensión a temperatura constante, donde la longitud de la muestra se mantiene constante y se registra el decrecimiento del esfuerzo con el tiempo.

Mediante el ensayo de relajación se obtienen los resultados esperados pero al cabo de 1000 horas de ensayo, es decir 6 semanas aproximadamente, lo que se convierte en una pérdida de tiempo y dinero para las industrias interesadas, es por ello que se busca relacionar la microestructura con el fenómeno de relajación, de manera que con tan solo observar una fotografía de la microestructura del material se pueda

conocer a que tipo de relajación se refiere, con lo que solo se necesitaría el tiempo que lleva la preparación de la muestra para obtener los resultados esperados.

Para poder estudiar un material de una manera más íntima es necesario analizar su microestructura, para así observar de que manera está distribuida y las fases que están presentes en ella; para ello se requiere del microscopio electrónico de transmisión donde se utiliza la longitud de onda de electrones para obtener imágenes, por lo que es mucho más eficiente que el microscopio óptico que utiliza la longitud de onda de la luz, la cual es mucho más grande que la de los electrones, e incluso más eficiente que el microscopio de barrido donde solo se puede estudiar la superficie de la muestra, es por esto que el MET está en capacidad de mostrar con más profundidad y detalle la microestructura del material a estudiar.

La caracterización y el estudio microestructural de los torones mediante la técnica de microscopía electrónica de transmisión (MET), es el propósito de este trabajo de investigación, con la finalidad de buscar relaciones y comparar las características, cuando se estudian torones de baja y relajación normal, puesto que estos presentan grandes diferencias en cuanto al tiempo de vida útil de la estructura realizada.

# **CAPITULO I**

## **“El Problema”**

## 1.1 Título del Trabajo

Caracterización de la microestructura de componentes del acero para pretensado con diferentes comportamientos de relajación mediante microscopía electrónica de transmisión (MET).

## 1.2 Planteamiento del Problema

Para las estructuras de concreto pre-tensado se utilizan cables de acero los cuales son generalmente de alto contenido de carbono, uno de los usados es el SAE 1080. Estos cables están conformados por hilos satélites que rodean al núcleo. Los cables de acero de siete hilos usados para estas estructuras, donde la tensión del refuerzo se realiza antes de colocar el concreto, se denominan torones, los cuales gracias a las propiedades mecánicas del acero presentan buena resistencia a la tracción lo que se une a la buena resistencia a la compresión que da el concreto.

Luego de que la estructura está totalmente conformada queda expuesta al factor tiempo, lo que influye negativamente en la vida útil de la misma, ya que en este caso el torón sufre un fenómeno llamado relajación, donde el acero sufre la pérdida de la tensión en función del tiempo, cuando el torón es tensado a una carga inicial, en un porcentaje preestablecido de la carga nominal de rotura y manteniendo constante la longitud del torón, con lo que la estructura irá perdiendo paulatinamente su eficiencia. Existen aceros de baja relajación y de relajación normal que se utilizan para el concreto pre tensado, siendo mejor el de baja relajación ya que con éste se

evitan pérdidas excesivas de la tensión inicial. La norma ASTM N° A886/A886M-99, clasifica a los torones de baja relajación como aquellos cuyo % de relajación es menor o igual a 3.5%, cuando ese porcentaje está entre 3.5 y 7 se denominan de relajación normal <sup>(1)</sup>.

Buscando algunas causas que expliquen la diferencia entre estos aceros se han encontrado estudios <sup>(2)</sup> donde atribuyen a la microestructura del alambre trefilado una gran influencia sobre el fenómeno de relajación y se ha observado que los alambres trefilados muestran una orientación preferente de fibras en su textura, producidas como consecuencia de la gran reducción de área a la cual es sometido el material durante su manufactura, especialmente cuando no se aplican tratamientos intermedios de recocido. También se ha descubierto la presencia de microgrietas orientadas hacia el centro de alambre. Los torones de baja relajación muestran una menor proporción de grietas comparados con los de alta relajación, cabe destacar que el atribuir a estas microgrietas las diferencias en cuanto al comportamiento de relajación de los aceros no ha sido corroborado en posteriores investigaciones, de allí la importancia de estudiar de una manera más minuciosa la microestructura de los aceros de alta y normal relajación.

Mediante la microscopía electrónica de transmisión (MET) <sup>(3)</sup>, en la cual se irradia una muestra delgada con un haz de electrones de densidad de corriente uniforme, cuya energía está dentro del rango de 100 a 200 kV, parte de esos electrones son transmitidos, otra parte son dispersados y otra parte da lugar a interacciones que producen distintos fenómenos como emisión de luz, electrones secundarios y Auger, rayos X, etc. Todas estas señales se pueden emplear para obtener información sobre la naturaleza de la muestra (morfología, composición, estructura cristalina, estructura electrónica, densidad de dislocación, etc.).

El trabajo abarcará el estudio microscópico mediante microscopía electrónica de transmisión (MET) del alambre central (núcleo) que conforma el torón en busca de diferencias en la microestructura que pueden correlacionarse con el comportamiento de relajación.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Caracterizar la microestructura de componentes del acero para pretensado con diferentes comportamientos de relajación mediante microscopía electrónica de transmisión (MET).

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- ⇒ Preparar los “Foil” de las distintas condiciones a ensayar:
  - Relajación Baja
  - Relajación Normal
  
- ⇒ Determinar las condiciones del electrolito para el electropulido de los “Foil”.

- ⇒ Comparar las microestructuras observadas de las distintas condiciones.
  
- ⇒ Determinar si existe alguna correlación entre las condiciones estudiadas.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

En vista de que cada vez el mercado tanto internacional como nacional se ha vuelto más exigente en materia de calidad y precios, las empresas se han visto en la necesidad de buscar nuevas opciones para mejorar la calidad de sus productos sin que afecten considerablemente el precio de éstos. Tal es el caso de las industrias fabricantes de alambres para el concreto pretensado, las cuales necesitan bajar el nivel de relajación de sus productos para así asegurar que en el tensado inicial del componente no ocurran pérdidas importantes de precarga.

Esta investigación servirá de gran base para aquellas empresas que quieran mejorar la calidad de sus productos mediante procesos que afecten la propiedad de relajación en los alambres pretensados, aportando igualmente una plataforma para futuras investigaciones con el deseo de mejorar la producción de la industria metalúrgica.

## **1.5 LIMITACIONES**

Las sesiones de microscopía electrónica serán realizadas en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC, San Antonio de los Altos) ya que en la Universidad de Carabobo no se cuenta con el equipo necesario para realizar dichas sesiones.

El equipo de electropulido se encuentra ubicado en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC, San Antonio de los Altos) por lo cual será necesario viajar con frecuencia.

Los “Foil” a preparar tendrán un espesor muy delgado (10 micras como mínimo), a pesar de que las características del material no tengan las mejores condiciones por ser un acero de alta densidad, con alto porcentaje de carbono lo cual implica una alta dureza; todo esto trae como consecuencia una gran dedicación de tiempo para adelgazar el espesor final.

## **1.6 DELIMITACIONES**

Para el estudio sólo se utilizará alambre empleado en concreto pretensado (Acero AISI 1080) en dos condiciones: relajación normal y baja relajación.

## 1.7 ANTECEDENTES

Adalet Zeren & Muzaffer Zeren (2001) “*Propiedades de relajación de esfuerzos en alambres de acero para pre-tensado*” Revista tecnología del procesamiento de los materiales, 141, 86–92.

En este estudio, la propiedad de relajación de esfuerzos se ha estudiado de forma general. Se realizaron experimentos en alambres de acero al carbono con un diámetro de 8 mm el cual es usado como compuesto del pre-tensado de concreto. También se llevó a cabo tratamientos termomecánicos con el fin de relevar las tensiones residuales acumuladas después del trabajo en frío. La temperatura del tratamiento térmico y la relación de deformación, los cuales son parámetros de tratamientos termomecánicos, fueron cambiadas. Los experimentos de los tratamientos termomecánicos fueron separados en dos grupos. El primero mantuvo constante en un 40% la relación de deformación mientras se variaba la temperatura del tratamiento térmico. El segundo a una temperatura constante de 350 ° C y se cambió las relaciones de estiramiento. Las condiciones óptimas del tratamiento termomecánico fueron determinadas cambiando tanto la temperatura del tratamiento térmico como la proporción de extensión y observando el efecto de estos cambios de esfuerzo de tracción y el comportamiento de la relajación de tensiones de los alambres de acero estirados en frío. En este estudio los resultados de los experimentos de relajación se enfatizan con formulas empíricas ya que no es posible realizar experimentos de relajación de tensiones de 1000 horas de duración, porque las condiciones generales de los laboratorios no son convenientes para permitir este período de tiempo.

R. Urbaéz, F. Toledo, G. Castro Farinas and E.S. Puchi Cabrera (2000) "*Comportamiento de relajación de los componentes del acero perlítico en alambres estirados*". Universidad Central de Venezuela, Caracas

En este estudio se investigó el comportamiento de relajación en la temperatura ambiente de cables de acero perlítico de siete hilos, empleado para el concreto pretensado. Se determinó que el cambio de la tensión con el tiempo puede ser descrito satisfactoriamente mediante las ecuaciones mecánicas de estado sobre la base de las leyes potencial y exponencial de fluencia lenta. Al contrario, se encontró que la relación empírica por lo general empleada en la ingeniería civil para estimar que la relajación del hilo predice una sobre valoración en la disminución de la tensión con el tiempo. El análisis microestructural de los torones que componen los hilos reveló la presencia de microgrietas orientadas a lo largo del eje de los alambres. Tales grietas tienden a formarse principalmente en el centro del alambre y se observó que la fracción de área de tales defectos es considerablemente más alta en los hilos de relajación normal que en los hilos el baja relajación. Se concluyó que el comportamiento de relajación de torones de siete hilos es sumamente dependiente de la morfología y la fracción de área ocupada por las microgrietas que están presentes a lo largo de la sección de los alambres que componen lo componen.

Michael W. Woodmansee, Richard W. Neu (2002) “*La influencia de la deformación previa en la tensión de relajación en aleaciones soldadas*” Revista materiales, ciencia e Ingeniería, 322, 79–88

Se investigó la dependencia de historia de deformación previa del comportamiento de relajación de tensión de 60Sn-40Pb, 96Sn-4Ag, y 96.2sn-2.5ag-0.8Cu-0.5Sb. En nuevos experimentos, la relajación de tensión fue medida inmediatamente después de tres valores de tasa de deformación diferentes:  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ , y  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Estas pruebas revelaron el resultado inesperado; que los diferentes experimentos de deformación previos realizados afectan el comportamiento de relajación observado, tal que mayores valores de tasas de deformación durante la deformación previa, causan una mayor relajación de tensión total, así como la tensión de relajación más baja.

Atienza, J. M & Elices, M “*Influencia de los esfuerzos residuales en la relajación de esfuerzos de alambres trefilados en frío*”. Revista Materiales y Estructuras, 37, 301-304.

Este estudio demuestra la influencia de la tensión residual en alambres de acero sobre las pérdidas de relajación de los esfuerzos. La prueba de relajación de esfuerzo estándar fue realizada sobre cuatro tipos de alambres, todas con las mismas propiedades mecánicas, pero con diferentes esfuerzos residuales. El esfuerzo residual de la superficie fue medida por difracción con rayos X. Los resultados experimentales muestran que la pérdida de relajación de esfuerzos disminuye así como también el valor de lo esfuerzos residuales en la superficie. El papel, a veces controversial, del pretensado inicial y los tratamientos térmicos en pérdidas de relajación de tensión también puede ser conocido a simple vista como la tensión residual inducida durante el estirado en frío

# **CAPITULO II**

## **“Marco Teórico”**

## 2.1 TORONES DE SIETE HILOS

Los torones de acero son cordones de siete alambres descubiertos y liberados de esfuerzos usados en elementos estructurales pre y postensados. En la disposición de dichos alambres (figura 1) puede notarse que seis de ellos, denominados satélites están enrollados helicoidalmente sobre uno central conocido como alma o núcleo.

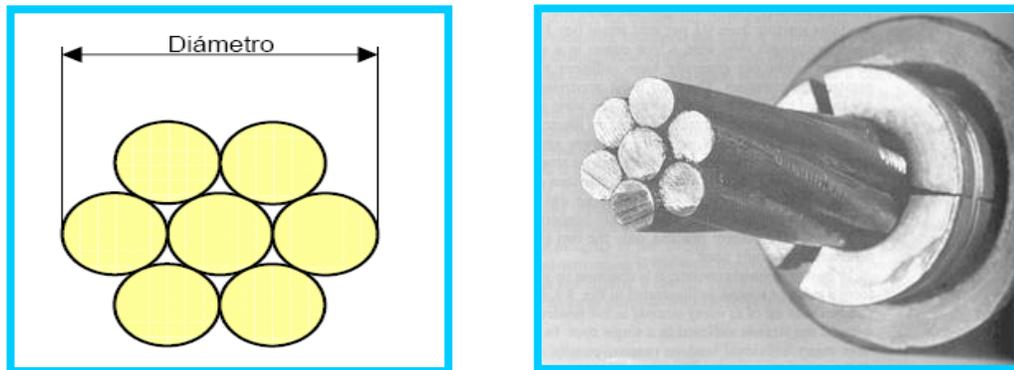


Figura 2.1 Torones de Siete Hilos.

La norma Covenin 1024'79 indica que el diámetro del núcleo del cordón será por lo menos 2 por ciento mayor a los satélites y con un paso enrollado de doce a dieciséis veces del diámetro nominal del cordón, con la finalidad de conseguir un contacto más estrecho entre los alambres.<sup>(4)</sup>

## 2.1.1 Proceso de fabricación de alambrones

### 2.1.1.1 Materia prima

Se fabrican de alambres trefilados a partir de alambrones de acero AISI 1080.

A partir de una colada con la siguiente composición (C: 0.78 – 0.83 %; Mn: 0.5 – 0.7 %; Si: 0.15 – 0.3 %; P y S (máx.): 0.035 %) en moldes (lingoteras) preparados para esta finalidad, se obtienen lingotes cuyas formas son idénticas a la del molde que le dio origen, es decir, rectangulares, poligonales, troncos de pirámide de base cuadrada, con la idea de facilitar el desmoldeado y evitar la aparición de defectos tales como: rechupes, porosidades, grietas, entre otras.

Los grandes lingotes son calentados a 1000 °C antes de ser introducidos a los laminadores desbastadores tipo “blooming” para su reducción de sección transversal hasta obtener barras laminadas que serán cortadas para producir partes más pequeñas de sección cuadrada denominadas tochos <sup>(5)</sup>.

Luego, los tochos se hacen pasar por trenes de laminación de perfiles, los cuales no son más que un conjunto continuo o discontinuo (dependiendo del caso), de cajas que poseen un determinado número de rodillos dispuestos, de tal forma, que transforman dichos tochos primero en palanquillas y luego en barras o varillas redondas (alambrones), cuyo diámetro varía de acuerdo a lo que se requiere <sup>(6)</sup>. Los

alambrones pueden obtenerse también por un proceso de laminación en caliente a partir de palanquillas obtenidas por un proceso de colada continua.

Más tarde, los alambres son sometidos a un enfriamiento controlado (patentado directo o proceso Stelmor) con el fin de alcanzar una microestructura de matriz perlítica con muy poca cementita en los bordes de grano, para favorecer una posterior deformación en frío <sup>(7)</sup>.

Por último y después de la operación de patentado, el alambre es sometido a limpieza y recubrimiento, con el objeto, de eliminar todo tipo de trazas, especialmente cascarillas o escamas de óxido que pueden ocasionar defectos superficiales en el alambre obtenido después de un trefilado posterior y disminuir la fricción externa del desgaste acelerado de las hileras empleadas para una deformación en frío (estirado) ulterior, además de protegerlo contra la oxidación superficial.

La operación inicial de limpieza es convenientemente llevada a cabo por inmersión del alambre en ácido clorhídrico o sulfúrico; y en el último de los casos, puede ser usado un pequeño calentamiento para promover la reacción. Esto es seguido normalmente por un lavado con agua bien por inmersión o rociada a alta presión o ambas formas <sup>(8)</sup>.

El consiguiente proceso de recubrimiento consiste de un tratamiento más sofisticado utilizando un revestimiento de fosfato, posiblemente en conjunto con un segundo resguardo de bórax y cal <sup>(8)</sup>. Después de esto es deseable un material de secado rápido antes de transferir el alambre al departamento de trefilado. Esto es

llevado a cabo, no solamente para asegurar un tapizado seco adecuadamente para el proceso de estirado, si no también para ayudar en la remoción de cualquier fragilidad por hidrógeno que pudiera ser introducido en la limpieza y procesos siguientes <sup>(8)</sup>.

### **2.1.1.2 Proceso de trefilado y conformado del torón**

Las varillas o alambres se apuntan con máquinas de forja rotativa, y se pasa esta punta delgada por la hilera y se le sujeta con la mordaza de la bobina de estirar, esta última con una forma de armazón metálica llamada spider o araña. A continuación se ajustan las variables que controlan el proceso de trefilado para alcanzar el producto deseado y luego se pone a andar la máquina, la cual va pasando el alambre a través de hileras sucesivas hasta alcanzar la reducción final en una operación continua.

En la manufactura del alambre para el cableado del torón, éste es estirado y posteriormente liberado de esfuerzo. El calor generado durante el trefilado puede ser utilizado provechosamente para alcanzar fácilmente las propiedades deseadas; se debe tener cuidado debido a que puede presentarse un fenómeno de envejecimiento, que perjudique las características del alambre durante su conducción y/o manejo en la fase de enderezamiento, más aún cuando una característica muy deseable en el material acabado es el incremento en los valores de tensión y esfuerzo resistente <sup>(8)</sup>.

Una vez obtenidos los alambres para la manufactura de los torones, se procede a la operación de cableado o trenzado. Para ello existen dos tipos de procesos básicos, los cuales se diferencian esencialmente en el tipo de máquina de trenzado usada, la

cual en algunos casos está controlada por el producto deseado. En general, el cableado de los torones es producido en una máquina conocida como cableadora tubular ó serpenteador mientras que los de 7 alambres o más, son producidos en las máquinas tipo planetarias.

Cualquiera que sea el método de cableado, la primera operación es siempre el devanado. El alambre es normalmente removido de una máquina de trefilado en forma de rizo o serpentín y tienen que ser enrollado en bobinas apropiadas para su inserción dentro de la cableadora. Para minimizar los restos o recortes es esencial que estos rizos o serpentines sean coincidentes en longitud. El mejor de los métodos para alcanzar este objetivo es por el pesado de los rizos, encontrándose que en el trenzado de los torones, el alambre principal (núcleo) es más pesado con respecto a un alambre exterior debido a que su diámetro es mayor.

La cuestión del igualamiento de los rizos se hace muy importante en términos de las pérdidas por recorte, particularmente en el trenzado de cables de más de 7 hilos donde los diferentes tipos de construcción de cableado y tamaños de alambre involucrados pueden tener un efecto significativo en los pesos de los rizos requeridos.

Una vez que es producido un apropiado número de bobinas, ellas son cargadas dentro de la máquina cableadora. Esta parte de la operación debe ser llevada a cabo tan rápidamente como sea posible, ya que, el tiempo tomado para el cargado puede presentar un considerable porcentaje del tiempo total de cableado de la máquina. Por lo tanto, la atención debe estar siempre dirigida al decrecimiento del tiempo por debajo del correspondiente al cableado hecho por la máquina, con el fin de mejorar la eficiencia de la operación.

En el cableado de 7 alambres (torones), seis de ellos son hilados ó cerrados helicoidalmente del que queda como alambre principal. Es práctica común insertar el alambre principal delante de la posición de la horquilla o soporte de un trenzador tubular. Utilizando esta posición para el alambre principal, es posible modelar helicoidalmente los otros hacia la configuración del cable mientras se va manteniendo el alambre principal ligeramente recto y libre de cualquier tendencia a doblarse, retorcerse o alabearse. Para facilitar la operación de conformado, son colocadas matrices partidas, de radio y perfil adecuado justo antes del punto de conformado natural del cable. Estas matrices son generalmente fabricadas de hierro fundido o de acero de herramienta endurecido y sirven para consolidar el cable hacia una configuración final.

Después de que ha sido formado el torón, se pasa a través de dos grupos de poleas post-conformadoras colocadas tanto en planos horizontales como verticales. Normalmente, este grupo de poleas consisten de cinco poleas fijas y cuatro ajustables. Es importante notar que el diámetro y espaciamiento de estas poleas son extremadamente críticos para alcanzar satisfactoriamente la rectitud de la máquina.

### **2.1.2 Tratamiento del torón conformado**

Posterior a la operación de cableado, el torón es sometido a un tratamiento térmico. En materiales para ser usados en concreto pretensado los cambios resultantes de un tratamiento térmico a baja temperatura (TTBT) pueden ser utilizados para obtener una máxima ventaja, sobre todo si se quiere conseguir un producto con muy buenas propiedades de relajación y además liberarlos de esfuerzo, claro está, siempre y cuando tales tratamientos sean llevados a cabo como una operación final.

Las condiciones óptimas para la conducción de este tratamiento térmico han sido comprobadas experimentalmente y en la literatura existente <sup>(8)</sup> están dadas todos los detalles de la teoría y resultados de tales investigaciones. Se ha establecido también que pueden ser producidas ventajas adicionales llevando a cabo este tratamiento térmico a baja temperatura, mientras el torón se va manteniendo bajo tensión constante. Dichas mejoras son: ligeros incrementos en los valores de esfuerzo de fluencia y una considerable reducción en las pérdidas por relajación de esfuerzo, particularmente si dicho tratamiento se realiza a temperaturas ligeramente elevadas (es decir, hasta 150 °C).

En la aplicación de un tratamiento térmico a baja temperatura para materiales de pretensado hay dos métodos básicos de llevar a cabo la operación de liberación de esfuerzos. Estos dependen sobretodo de si el proceso es conducido en ausencia de esfuerzo o bajo condiciones de tensión aplicada. En el primer caso el proceso es relativamente simple de ejecutar, pero, requiere de alimentación del torón previamente enderezado en la máquina de cableado y en seguida pasado a través de la etapa de tratamiento térmico para la liberación de esfuerzos.

Normalmente, son empleados hornos tubulares de 9 metros de longitud y con quemadores de gas a una temperatura de 800 °C y la rapidez del torón pasante a través del mismo es tal que dicho torón alcanza aproximadamente 300 – 350 °C por el tiempo que dura hasta la salida del horno. No obstante, también han sido empleados con considerable éxito baños de sales y plomo. Aunque, el tratamiento térmico es llevado a cabo en una línea de operación a continuación del cableado, puede ser

usado el calentamiento por inducción para acomodar las inevitables fluctuaciones de rapidez durante la aceleración y desaceleración de la máquina de cableado.

En el segundo caso, el proceso combina la liberación de esfuerzo térmicamente con el enderezamiento, es decir un tratamiento térmico bajo tensión y que comúnmente es conocido como estabilización. Para ello se emplea una pluralidad de poleas que van aumentando de diámetro gradualmente, destinadas a aplicar tensión, introduciendo por este medio un alargamiento constante. Otra variante de este método es usar alternativamente medios de calentamiento (hornos de inducción o baños de plomo) y aplicación de tensión, bien con poleas, engranajes diferenciales entre dos cabestrantes remolcadores (elongación constante) ó cabestrante remolcador de retrotracción (carga constante).

Posteriormente al tratamiento térmico, el torón es enrollado en carretes de acero o madera fuerte, con diámetro interior suficientemente grande para asegurar una rectitud razonable. El diámetro interior en ningún momento deberá ser menor de 600 mm. La masa nominal o longitud nominal de los rollos o bobinas así como las tolerancias correspondientes se establecerán de acuerdo con lo requerido. El torón será protegido contra daños mecánicos en el transporte. Cada carrete, rollo o empaque tendrá una etiqueta fuerte sujeta en forma segura para mostrar la longitudes, el tamaño, tipo designación ASTA A416<sup>(4)</sup> y el nombre o marca del fabricante.

## 2.2 APLICACIONES EN LA INGENIERÍA

La función principal de los torones al ser empleados en la industria de la construcción es la de aumentar la resistencia de los elementos estructurales de concreto y reducir los consumos de cemento.

El concreto obtenido es llamado concreto pretensado y ofrece: grandes luces y pocas alturas, reduce considerablemente el tiempo de construcción, apariencia estéticamente satisfactoria, resistencia a la corrosión, mayor resistencia al fuego, bajos costos, economía en peso muerto, no requiere mantenimiento

Los torones se usan básicamente en la industria de la construcción, especialmente en la ejecución de obras con elementos estructurales pretensados y o postensados tales como: losas, tubos pilotes de concreto pretensado, entre otros.

En obras de vialidad a saber: puentes, viaductos, durmientes de ferrocarril etc.

En estructuras como estacionamientos, terminales de pasajeros, estadios, escuelas, iglesias, silos, centros comerciales, tanques de agua, plantas industriales, poderosas estaciones nucleares, etc.

### **2.2.1 El concreto**

El concreto es un material estructural de construcción que se obtiene mezclando cemento, un agregado mineral, y agua, en proporción adecuada, de tal modo que se produzca una masa laborable y plástica que se pueda moldear en la forma deseada.. A pesar de sus ventajas como material de construcción, el concreto también tiene sus limitaciones y desventajas.

Estas consisten en su baja resistencia a la tensión, la cual es diez a quince veces menor que la resistencia a la compresión, expansión, cambios de volumen con la temperatura y permeabilidad. Estas deficiencias se pueden evitar o reducir en forma considerable al utilizar concreto reforzado, preesforzado o aditivos especiales (un polímero como el látex, un monómero fluido, etc.)

El concreto reforzado suele agrietarse en las zonas a tensión cuando es sometido a fracciones relativamente pequeñas de la carga de trabajo. Para hacer un mejor uso de los elementos estructurales, se ha diseñado el concreto presforzado, que se fabrica al introducir un esfuerzo de compresión interno en una estructura.

La precompresión suele lograrse por dos métodos principales: pretensado y postensado. En el pretensado, la fuerza de preesforzado se aplica mediante cables de acero sumamente resistentes conocidos como tendones, cordones o torones, los cuales se disponen de extremo a extremo entre dos anclajes fijos. Entonces, los cordones son tensados hasta un determinado estado de esfuerzo, y se llenan los moldes con concreto fresco. Después que el concreto se endurece, los cordones o torones se

liberan de sus anclajes y el concreto sufre compresión debido a que se contraen los torones. Los esfuerzos de los torones se transfieren al concreto por medio de los esfuerzos de enlace; sin embargo, el efecto total del presforzado se manifiesta y observa sólo a ciertas distancias de los extremos de cada elemento, conocidas como zonas de transmisión.

En el postensado, se colocan ductos metálicos o de caucho en la estructura y el concreto se cuele alrededor de estos. Después que se ha endurecido el concreto, se introducen los torones a través de las cavidades (en el caso de los cauchos, se eliminan), y se tensa utilizando gatos especiales fijados contra los extremos del elemento de concreto, que en sí mismo constituye un contrafuerte. Los vacíos entre los cordones y los ductos de metal o caucho se llenan con una lechada (mezcla de cemento y agua), para proteger contra la corrosión y controlar el agrietamiento en el caso de una sobrecarga, e incrementar la resistencia del elemento al unir el tensor al elemento, en toda su longitud.

Los torones de acero son los más utilizados para el preesforzado, estos deben ser de acero de alta resistencia. Dichos aceros son sumamente elásticos, la deformación elástica durante el esforzado es seis veces mayor o más que la del acero dulce. Los torones suelen tensarse hasta un 70 por ciento de su resistencia a la rotura durante la operación de preesforzado. El concreto utilizado para el preesforzado debe ser de gran calidad, con resistencia a la compresión entre 6.000 y 8.000 psi.

El concreto preesforzado se utiliza ampliamente en carreteras y en puentes para vías de ferrocarril, con empleo de unidades pretensadas precoladas para tramos de hasta 15 m de longitud; en tramos más grandes se utilizan los postensados.

Muchos recipientes y tanques se han preesforzado al pasar torones alrededor de ellos, con lo que se aplica una precompresión uniforme en las paredes del vaso. Los cables que se localizan en el exterior de las paredes del tanque se revisten para su protección. También se utiliza el preesforzado vertical en tuberías de concreto preesforzadas.

### 2.3 RELAJACIÓN DE ESFUERZOS

La relajación de esfuerzos es el decrecimiento en esfuerzo con el tiempo de un sólido sujeto a una deformación inicial y temperatura constante <sup>(9,10)</sup>.

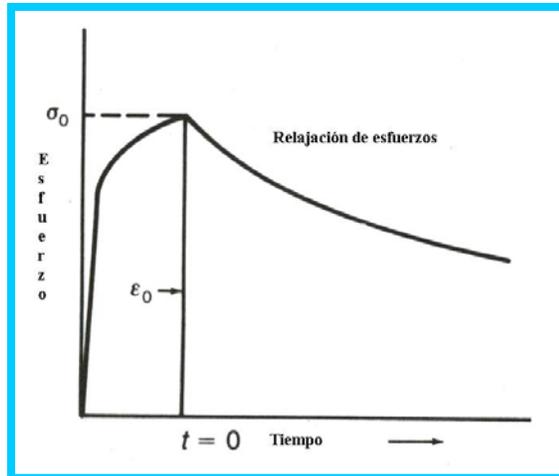


Figura 2.2 Relajación vs. Tiempo

Las propiedades de relajación de esfuerzo de un material pueden ser determinadas principalmente a partir de ensayos de tensión a temperatura constante, donde la longitud de la muestra es mantenida constante y se registra el decrecimiento

del esfuerzo con el tiempo. Aunque también podemos obtenerlas a partir de ensayos de compresión, doblado y torsión <sup>(10)</sup>, denominados por ende, ensayos de relajación de esfuerzo.

Medrano y Gillis <sup>(13)</sup>, Penna y Medrano <sup>(14)</sup> y Dotsenko <sup>(15)</sup> han expresado que la técnica de relajación de esfuerzo ha contribuido a la comprensión de la relación esfuerzo deformación durante el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales. Es decir, por medio de ella se pueden obtener parámetros fundamentales que describen modos de micro deformación en metales los cuales permiten hacer un análisis de los mecanismos de deformación plástica; dichos parámetros son: los componentes del esfuerzo de fluencia (esfuerzo interno y efectivo), el volumen y la entalpía de activación, los parámetros de las relaciones empíricas para la movilidad de dislocaciones o mejor conocidos como exponentes de esfuerzo, velocidad de dislocación.

Los ensayos de relajación de esfuerzos permiten predecir como se relajará el esfuerzo en estructuras en la cual la longitud del componente es mantenida constante. En concreto pretensado, es aplicada una tensión inicial a los cordones de acero, produciendo en el agregado un estado de esfuerzos compresivos. Si el esfuerzo de tensión en el acero se relaja con el tiempo, el concreto pretensado perderá sus propiedades únicas. Es bien conocido que el agregado tiene una baja resistencia a la tensión y que la función del acero es colocarlo bajo un estado de compresión <sup>(9)</sup>.

El ensayo de relajación se rige bajo la norma ASTM E 328-86, la cual indica que éste cubre la determinación del decrecimiento de la tensión a través del tiempo de una muestra sometida a un esfuerzo de compresión uniaxial de larga duración. Para

realizar este ensayo se coloca la muestra en un dispositivo de alineación para luego aplicarle una carga axial, después, se aplica la carga inicial de prueba sin choque y en el instante en que esta es alcanzada, se considera como el tiempo cero; se mantiene la tensión total constante dentro de los límites e inmediatamente que el tiempo especificado ha transcurrido, se determinan los cambios de la carga o la tensión.

De lo anterior se desprende lo importante que es para la industria de la construcción el uso de aceros de baja relajación, sobretodo en la fabricación de elementos estructurales de concreto pre y postensado. Es la necesidad lo que condujo al desarrollo de composiciones especiales y tratamientos térmicos. Una aplicación práctica de este proceso es alambre o guaya estabilizada. Los esfuerzos en guayas estabilizadas solamente son relajadas una quinta parte de lo que las guayas tratadas convencionalmente. El proceso “estabilizante” consiste en el pretensado de guaya a una temperatura ambiente <sup>(9)</sup>.

Los torones de baja relajación cumplirán con los requisitos físicos descritos en la norma ASTM E328-02 <sup>(15)</sup>, para torones relevados de esfuerzos, además de que la relajación, es decir, la pérdida de tensión después de mil (1 000) horas a una temperatura de veinte más menos dos ( $20 \pm 2$ ) °C, no será mayor de dos coma cinco (2,5%) por ciento, cuando la carga inicial sea del setenta (70) por ciento de la carga de ruptura mínima especificada del torón, o no mayor de tres coma cinco (3,5) por ciento, cuando se cargue al ochenta (80) por ciento de la carga de ruptura mínima especificada; mientras que el porcentaje para los torones de relajación normal debe estar entre un tres coma cinco (3,5 %) y siete (7%) por ciento.

## 2.4 LA MICROESTRUCTURA

Para el acero 1080 el diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C contiene las siguientes fases sólidas: Ferrita –  $\alpha$ , Cementita (Fe<sub>3</sub>C) y Austenita ( $\gamma$ ). En el punto de la reacción eutectoide, la austenita sólida produce la ferrita- $\alpha$  con 0,02 % C y Fe<sub>3</sub>C (cementita) que contiene 6,67 % C, el resultado de estas dos fases recibe el nombre de perlita. Esta reacción, que tiene lugar a 723°C, se puede escribir del siguiente modo:



Un acero ordinario al carbono que contiene un 0,8 % C se denomina *acero eutectoide*, puesto que se forma una estructura completamente eutectoide de ferrita- $\alpha$  y Fe<sub>3</sub>C cuando se enfría lentamente la austenita de esta composición por debajo de la temperatura eutectoide.

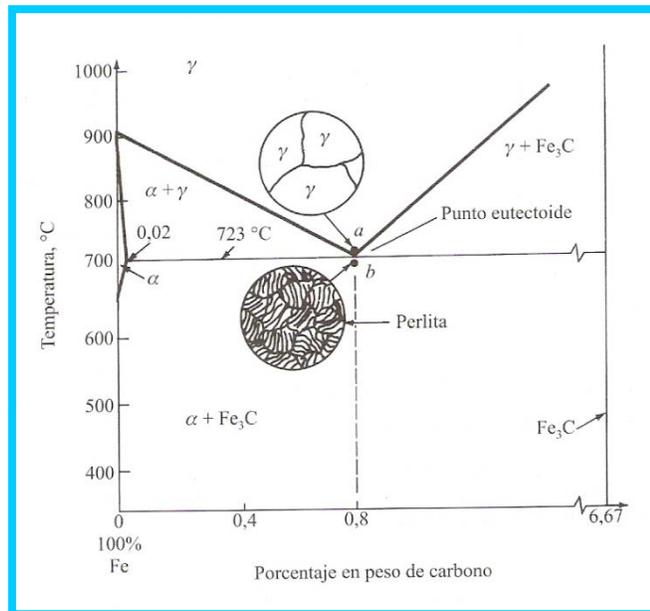


Figura 2.3 Transformación de un acero Eutectoide (1080) en condiciones de enfriamiento lento.

Pero el producto descrito de la reacción de la descomposición de la austenita del acero eutectoide para condiciones de enfriamiento a una velocidad normal no es el único ya que existen otros productos de reacción que dependen de la velocidad de enfriamiento. La forma general de representación que incluye el factor tiempo son los diagramas TTT: Temperatura-Tiempo-Transformación, también conocidos como diagramas de transformación isotérmica. Entre los productos resultantes pueden estar:

- Perlita gruesa.- Se forma para enfriamientos suficientemente lentos, a temp. próximas al eutectoide ( $727^{\circ}\text{C}$ ), y se corresponde con la descrita en el DF Fe-C, con una relación 8:1 entre las láminas de ferrita y cementita.
- Perlita fina.- A medida de la transformación ocurre a temperaturas más bajas, las láminas de la perlita se hacen más delgadas, pasando a denominarse perlita fina para  $T_{600-540^{\circ}\text{C}}$
- Bainita.- A temperaturas inferiores a  $540^{\circ}\text{C}$ , la ferrita y cementita aparecen en forma de agujas extremadamente finas, microestructura conocida como bainita.
- Esferoidita.- Se forma cuando un acero con microestructura perlítica o bainítica se calienta a temperatura inferior al eutectoide durante un periodo de tiempo suficientemente largo ( $700^{\circ}\text{C}$ , 18-14h por ej.). La cementita aparece como pequeñas partículas esféricas embebidas en una matriz continua de ferrita  $\alpha$ , que se forman para reducir la interfase  $\text{Fe}_3\text{C-Fe}$ .

- Martensita.-Se forma a bajas temperaturas ( $< 215^{\circ}\text{C}$ ) resultado de una transformación sin difusión de la austenita. En lugar de la migración por difusión de los átomos de C para dar lugar a las fases Fe y  $\text{Fe}_3\text{C}$ , se produce una reordenación colectiva de los átomos de Fe y C, pasando de la estructura FCC de la austenita a una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), correspondiente a la martensita

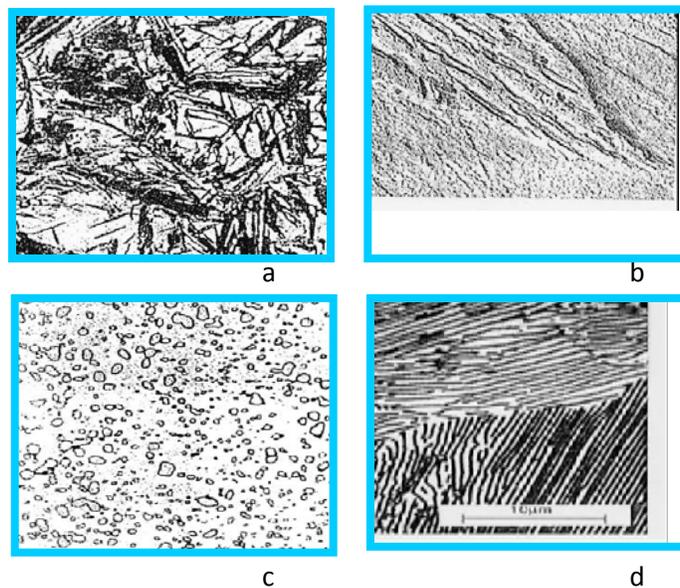


Figura 2.4 Microestructura de: (a) Martensita, (b) Bainita, (c) Esferoidita y (d) Perlita

La fabricación de aceros perlíticos para ser usados en estructuras para concreto pretensado es hecha con trefilado en frío que al hacer pasar en diversas ocasiones produce fuertes deformaciones plásticas en el material (la tensión que endurece el mecanismo), esto produce cambios importantes microestructurales <sup>(16)</sup>.

Un cambio significativo en la microestructura de un material son las dislocaciones ya que en éstas los átomos se desplazan unos respecto de otros de

manera que su coordinación puede ser totalmente distinta de la encontrada en el cristal perfecto. Cuando se aplica un esfuerzo superior al límite elástico, las dislocaciones comienzan a deslizarse. Finalmente, una dislocación moviéndose sobre su plano de deslizamiento encontrará un obstáculo que sujeta los extremos de la línea de dislocación. Si se continúa aplicando esfuerzo, la dislocación tratará de moverse arqueándose por el centro, hasta formar un lazo y en el momento en que éste se toque a sí mismo, se ha creado una dislocación nueva.

Al analizar la evolución de una colonia perlítica en un acero eutectoide sujeto a repetidos trefilados en frío mediante metalografía cuantitativa, se observa que el primer efecto es la progresiva orientación de la perlita con el eje longitudinal a diferencia del transversal que se observa muy similar a la microestructura original.

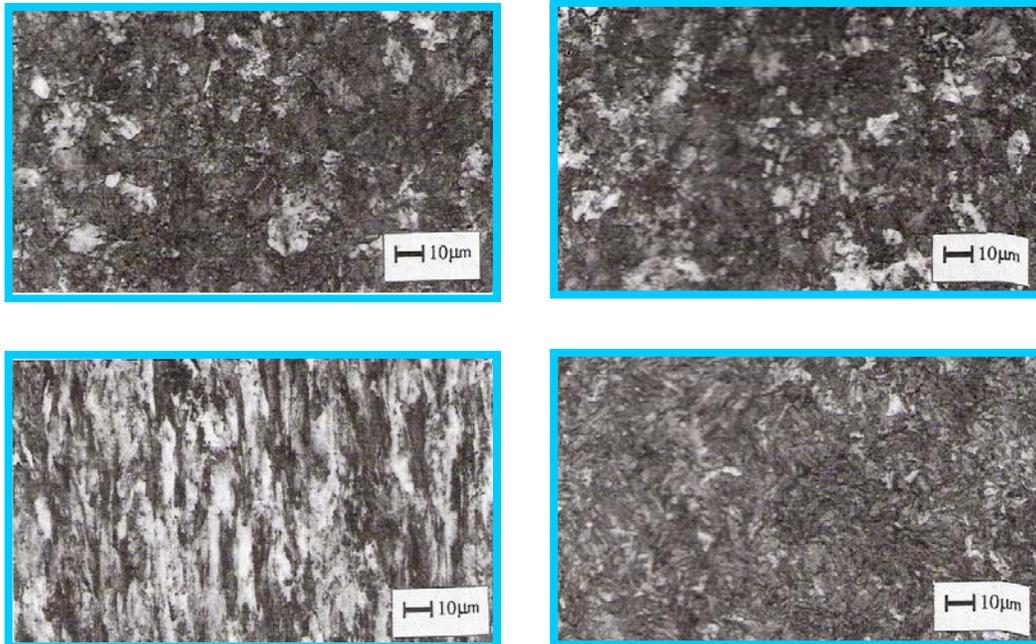


Figura 2.5 Eje longitudinal (izq.), eje transversal (der.). Sin trefilado (arriba), después del trefilado (abajo)

## 2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

La potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. El microscopio electrónico utiliza electrones para iluminar un objeto. Dado que los electrones tienen una longitud de onda mucho menor que la de la luz pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas. La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4.000 Ångstrom. La longitud de onda de los electrones que se utilizan en los microscopios electrónicos es de alrededor de 0,5 Ångstrom.

Todos los microscopios electrónicos cuentan con varios elementos básicos. Consiste fundamentalmente de un cañón de electrones (su fuente de iluminación), lentes condensadoras, lente objetiva, lentes intermedias y lente proyectora. El cañón electrónico es la única lente electrostática que tiene el microscopio electrónico; las demás son lentes electromagnéticas, las cuales crean campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que los lentes convencionales utilizados en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones. El sistema de vacío es una parte relevante del microscopio electrónico, los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, de forma que tiene que hacerse un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características. La ampliación de la imagen es llevada a cabo de la siguiente manera (Figura 2.6): la imagen producida por la lente objetiva sirve como objeto para la lente intermedia, la cual producirá una segunda imagen, que a su vez es amplificada por la lente proyectora para producir la imagen final en la pantalla o en una placa fotográfica.

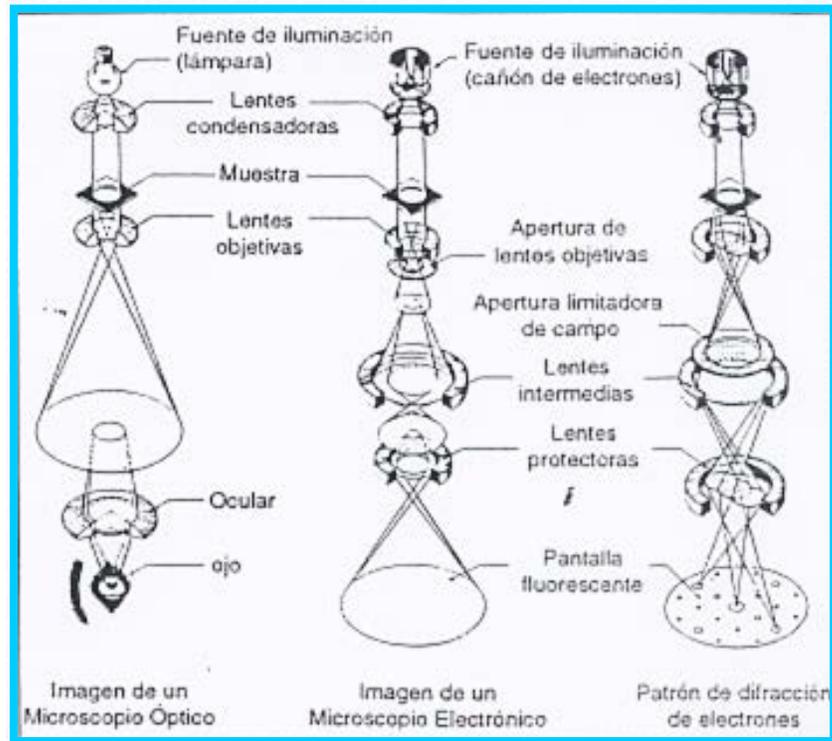


Figura 2.6 Comparación del proceso de imagen entre un microscopio óptico y un microscopio electrónico de transmisión

Hay dos tipos básicos de microscopios electrónicos: el **microscopio electrónico de transmisión** (Transmission Electron Microscope, TEM) y el **microscopio electrónico de barrido** (Scanning Electron Microscope, SEM).

El sistema óptico-electrónico del microscopio electrónico de transmisión está constituido por las siguientes partes:

1. Cañón de electrones
2. Sistema de lentes
3. Pantalla fluorescente

Estos componentes están ensamblados en una columna vertical la cual se encuentra en alto vacío.

El cañón de electrones, es la fuente emisora del haz de electrones. Se encuentra ubicado en la parte superior de la columna. Está constituido por un filamento (cátodo), un cilindro con una apertura central, llamado cilindro de Wehnelt que rodea al filamento y tiene un potencial ligeramente más negativo que éste. El ánodo se encuentra por debajo del cilindro de Wehnelt.

El filamento es calentado por el pase de corriente (alrededor de 2800 K). Los electrones emitidos termoiónicamente por el cátodo son acelerados hacia el ánodo, pasan por la apertura circular central de éste y un haz de alta energía es emitido hacia la columna del microscopio.

El sistema de lentes está formado por aperturas y lentes: condensadores, objetivo, intermedia y proyectora. Las lentes condensadoras, en los microscopios más modernos son dos. La primera, proyecta la imagen punto de entrecruzamiento demagnificada (spot size), mientras que la segunda controla su diámetro y el ángulo de convergencia en que incide sobre la muestra limita al haz que incide sobre la muestra.

La lente objetivo forma la primera imagen, localizada debajo del espécimen. Es considerada el componente más importante del microscopio electrónico. Cualquier defecto en ésta, será magnificado y transmitido al resto del sistema óptico. Por lo tanto, de ella dependen, en gran medida, la resolución final y la corrección de las aberraciones.

Las lentes intermedia y proyectora son las encargadas de amplificar la imagen dada por la lente objetivo y proyectarla sobre la pantalla fluorescente.

El MET cuenta con tres aperturas, las cuales realizan distintas funciones (figura 2.6). La apertura condensadora nos permite obtener un haz electrónico más homogéneo, puesto que al no permitir el paso de los electrones que se han desviado bastante del eje óptico, reduce en gran medida la aberración cromática. La apertura colocada después de la lente objetiva es utilizada para permitir el paso de un solo haz, del conjunto de haces difractados, y el haz transmitido. La apertura localizada en el plano imagen de la lente objetiva se conoce como apertura de área selecta, como su nombre lo indica, nos permite seleccionar con alta precisión el área de donde proviene el patrón de difracción; es de bastante utilidad en el análisis de muestras con varias fases.

La pantalla del microscopio electrónico de transmisión está recubierta por una pintura de fluoruros de Zn y Cd, que fluoresce cuando es bombardeada por electrones, generando una imagen en el rango de las longitudes de onda del visible.

Mediante el microscopio electrónico de transmisión podemos estudiar la microestructura de un material orgánico o inorgánico. Para esto, existen diferentes formas de operación que posibilitan el estudio de una característica en particular.

El MET permite la observación de muestra en cortes ultrafinos. Cuando un microscopio electrónico dirige el haz de electrones hacia el objeto que se

desea observar, estos interactúan con la muestra y se producen varios tipos de señales las cuales nos permiten hacer la caracterización estructural de ésta. Estas señales son: electrones retrodispersados, secundarios, absorbidos, Auger, transmitidos y rayos X. La figura 2.7 muestra esquemáticamente la interacción haz electrónico-muestra y las señales que se originan.

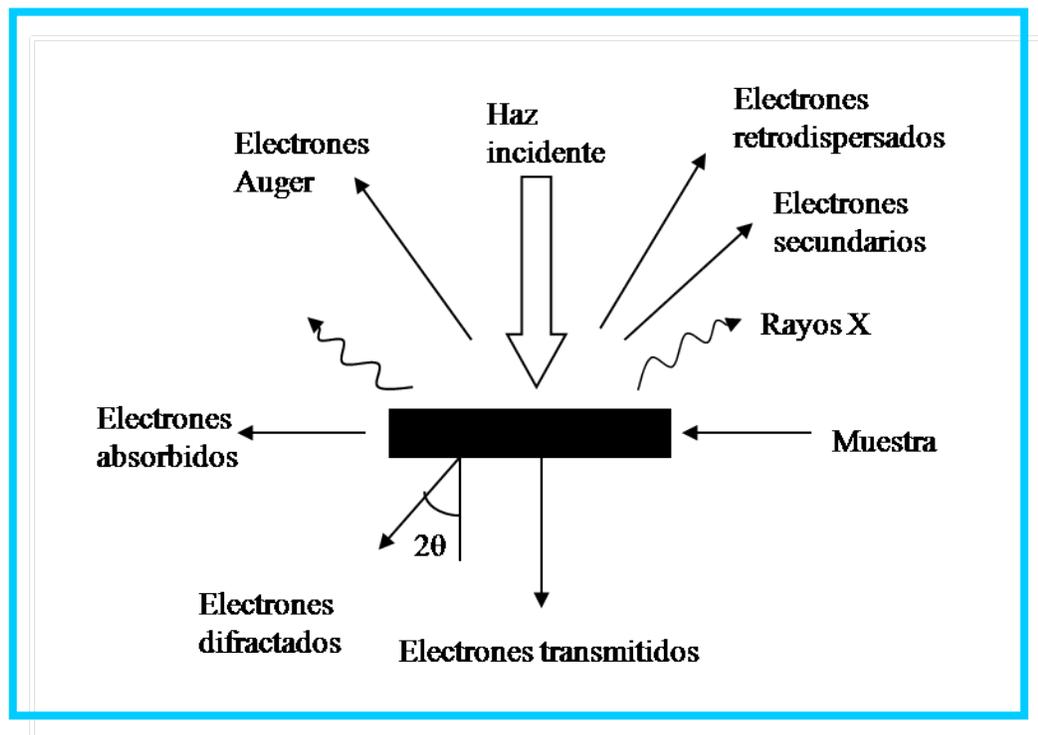


Figura 2.7. Tipos de señales que se producen durante la interacción del haz electrónico con la muestra.

Entre los electrones que atraviesan la muestra los podemos clasificar en dos tipos: transmitidos, es decir aquellos que pasan la muestra sin ser desviados de su dirección incidente; y difractados, que son aquellos que si son desviados de su dirección de incidencia. Los haces transmitidos y difractados son los que usa la lente objetiva para formar la imagen de la muestra en un microscopio electrónico de transmisión. Como ellos pasan a través de la muestra, portan información sobre las características estructurales de esta.

Si en lugar de enfocar el plano-imagen de la lente objetiva para observar la imagen de la muestra, enfocamos el plano focal de ésta, lo que se observa es un arreglo de puntos luminosos que no son más que el arreglo de los haces difractados transmitidos (figura 2.6 y 2.8). Este arreglo recibe el nombre de patrón de difracción y como un ejemplo de este es mostrado en la figura 2.9.

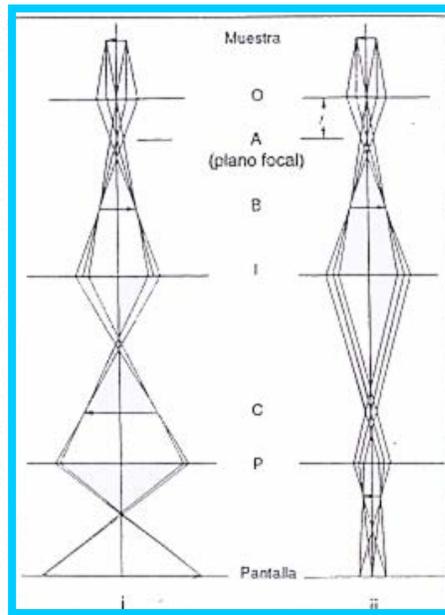


Figura 2.8 Trayectoria seguida por los electrones para formar una imagen (i) y un patrón de difracción (ii)

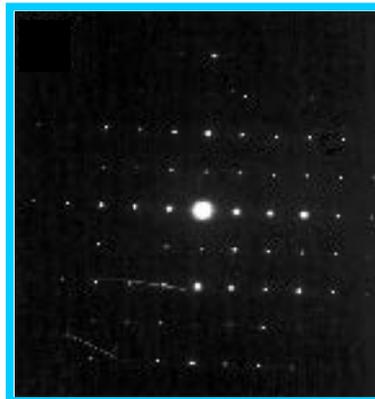


Figura 2.9. Patrón de difracción electrónico. Nótese la alta simetría que presenta con respecto al haz más intenso (el haz transmitido)

Como se puede observar en la figura, el patrón de difracción presenta un punto muy intenso (el haz transmitido) rodeado de varios puntos (los haces difractados), presentando un arreglo geométrico (en este caso cuadrulado), el cual es característico de la muestra. Por lo tanto, el análisis del patrón de difracción nos permitirá hacer un estudio de la estructura atómica de la muestra. De hecho, los patrones de difracción son la huella digital de ésta.

Debido a la apertura colocada después de la lente objetiva la imagen tendrá diferentes contrastes. Si la imagen es producida dejando pasar solo el haz transmitido, se dice que se observa una imagen de campo claro. El contraste de este tipo de imágenes es producido por diferencias de intensidades, ya que, se han excluido los haces difractados: las regiones en las cuales se producen los haces difractados se observarán oscuras en una imagen de campo claro. Por otro lado, si la imagen es formada dejando pasar uno de los haces difractados se produce una imagen de campo oscuro. En este tipo de imágenes solo la región de donde proviene el haz difractado seleccionado se mostrará brillante; el resto de la imagen será oscura y de ahí su nombre. Considerando que la intensidad que incide sobre la muestra debe ser igual a la suma de las intensidades de los haces transmitidos y difractados entre otros, es de esperar que la intensidad de la imagen de campo oscuro disminuya considerablemente. Esto representa un mayor tiempo de exposición al momento de fotografiarlas, la necesidad de una mayor estabilidad de la imagen y la eliminación de fuentes de vibración.

Los patrones de difracción, que constan de un arreglo de puntos luminosos, son típicos de monocristales. Esto significa que solo un cristal difracta el haz. Si el haz electrónico es bastante ancho o la muestra está formada por varios cristales pequeños orientados aleatoriamente, es decir una muestra policristalina,

el patrón de difracción estará formado por anillos concéntricos (figura 2.10), cuyos diámetros corresponden a los espacios existentes entre los planos atómicos del cristal.

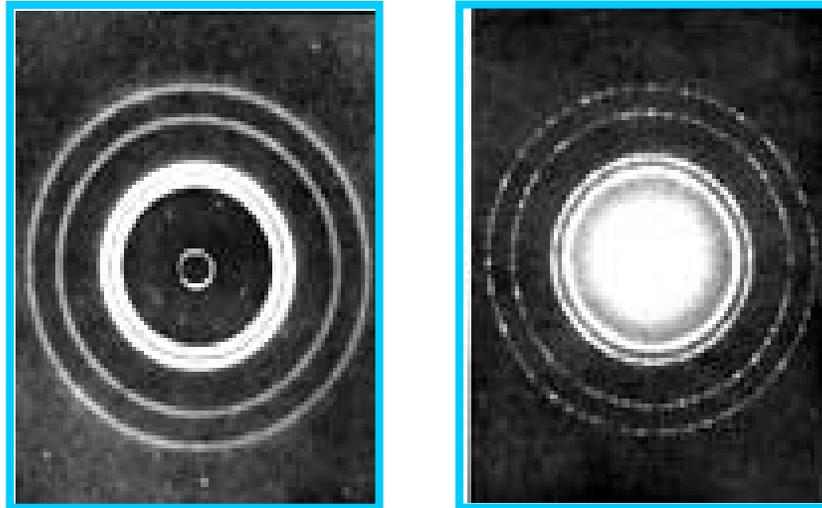


Figura 2.10 Patrón de difracción de anillos proveniente de una muestra policristalina

Un patrón de difracción contiene básicamente dos tipos de información:

1. El arreglo espacial, definido en función de la simetría que presenta el patrón, de los valores de las distancias que existen entre los puntos de difracción y el punto central, y los ángulos que se forman entre las líneas que van del centro a cada uno de los puntos.
2. La cristalografía, a partir de un conjunto de patrones de difracción obtenido en diferentes orientaciones de la muestra y las intensidades de los puntos de éstos. Así, al hacer una

comparación entre las intensidades de diferentes puntos difractados, y los diferentes patrones de difracción, es posible obtener el tipo de la celda unitaria que presenta el cristal en estudio.

Luego de que se obtiene este tipo de información, ésta se analiza mediante un método conocido como indexación. La obtención de un patrón de difracción en un microscopio electrónico en primera observación es como se muestra en la figura 2.11

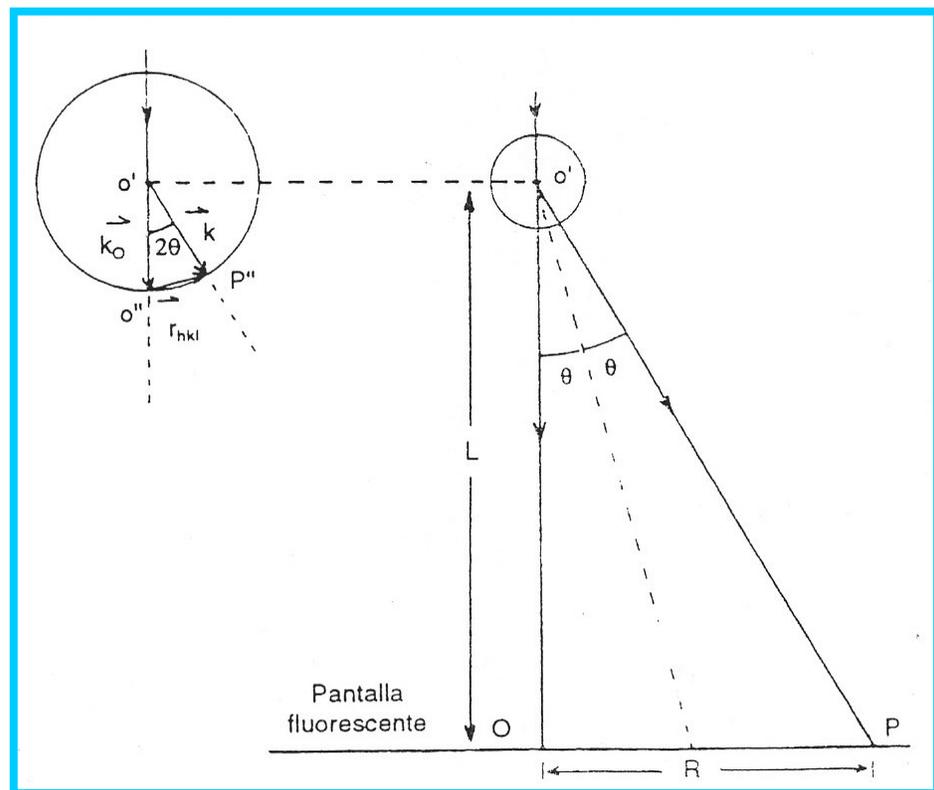


Figura 2.11. Representación esquemática de los parámetros involucrados en la deducción de la constante de cámara.

Aquí R es la distancia entre el haz más intenso del patrón, es decir el haz transmitido, y un punto de difracción. De la figura 2.11 tenemos:

$$\text{Tang}2\theta = R/L \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

Puesto que la ley de Bragg, con  $n= 1$  y para ángulos pequeños, es  $2\theta d= \lambda$ , y en este caso  $\text{Tang}2\theta=2\theta$

$$Rd=\lambda L \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Esta ecuación relaciona las distancias interplanares “d” en el cristal con distancias “R” en el patrón de difracción. La cantidad  $\lambda L$  es llamada “constante de cámara” la cual es fácil de calcular puesto que L es generalmente dada por el instrumento. Al conocer el voltaje de aceleración  $\lambda$ , queda fija. Por lo tanto, podemos obtener una lista de distancias interplanares del cristal y comparar sus valores con tablas de distancias para diferentes cristales y encontrar el tipo de cristal que se trata.

Las muestras para que puedan ser observadas en un microscopio electrónico de transmisión deben ser lo suficientemente delgadas en la dirección de movimiento del haz electrónico para ser “transparentes” a los electrones. Las muestras son transparentes a los electrones cuando tienen un espesor de orden de 50 a 100 nanómetros. Para correlacionar las propiedades de las muestras volumétricas con las muestras que pueden observarse en el microscopio, es necesario llevarlas hasta estos espesores sin modificar o destruir su estructura.

Para esto es necesario implementar técnicas adecuadas compuestas por diferentes etapas o fases: corte, adelgazamiento con lijas, pulido y electropulido.

El corte puede realizarse con seguetas, cortadora de sierra o disco abrasivo, teniendo la precaución de evitar el calentamiento que puede ocasionar alteraciones estructurales de la muestra. Aunque el corte por sierra produce severas condiciones de trabajo en frío, no es ventajoso; ya que éste ocasiona superficies irregulares con valles excesivamente altos, dando como efecto más tiempo de aplicación de las técnicas de preparación de las muestras. A diferencia del anterior en el corte por disco abrasivo la superficie resultante es suave, y el corte se realiza rápidamente. Los discos para los cortes abrasivos, están formados por granos abrasivos (tales como óxido de aluminio o carburo de silicio), aglutinados con goma u otros materiales. Los discos con aglutinantes de goma son los más usados para corte húmedo; los de resina son para corte en seco.

El adelgazamiento con lijas se divide en 3 fases: Desbaste grosero, Desbaste intermedio y Desbaste final. Cada etapa de preparación de probetas metalográficas debe realizarse muy cuidadosamente para obtener al final una superficie exenta de rayas.

1. Desbaste Grosero: Es el desbaste inicial, que tiene como objetivo planear la probeta, lo cual puede hacerse a mano y aun mejor con ayuda de una lijadora de banda. El papel de lija utilizado es de carburo de silicio con granos de 80 y 120. En cualquier caso, la presión de la probeta sobre la lija o papel de esmeril debe ser suave, para evitar la distorsión y rayado excesivo del metal.

2. Desbaste Intermedio: Se realiza apoyando la probeta sobre el papel de lija o de esmeril, colocado sobre una mesa plana o esmeriladora de banda fija. En esta fase se utilizan los papeles de lija No. 240, 320 y 400.
3. Desbaste Final: Se realiza de la misma forma que los anteriores, con papel de lija No. 600, 1200 y hasta 1500. En todo caso, en cada fase del desbaste debe tomarse siempre en cuenta el sistema refrigerante.

Se avanza y se facilita mucho las operaciones descritas utilizando una pulidora de discos, a las que se fija los papeles de lija adecuado en cada fase de la operación. Las velocidades empleadas varían de 150 a 250 rpm. En otro caso se pueden utilizar desbastadoras fijas o de bandas giratorias.

El pulido se realiza en dos etapas generales, pulido fino y electropulido.

1. Pulido Fino: La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas seleccionadas en su tamaño (1; 0,5; 0,3; 0,05; 0,03 micras). En éste sentido, existen muchos abrasivos, prefiriendo a gamma del oxido de aluminio para pulir metales ferrosos, los basados en cobre u óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. La selección del paño para pulir depende del material que se va a pulir y el propósito del estudio metalográfico.
2. Electropulido: El electropulido es un tratamiento superficial en el cual la muestra es colocada en el ánodo de una celda electrolítica, de tal forma que el material es removido cuando se aplica una corriente (figura 2.12). El problema que se presenta es que la velocidad de remoción del material es más rapido donde es alta la densidad de líneas de campo eléctrico, por ejemplo en las orillas de la muestra. Por lo tanto, para logra un removimiento uniforme

del material, la densidad de corriente en todos los puntos de ésta, debe ser la misma.

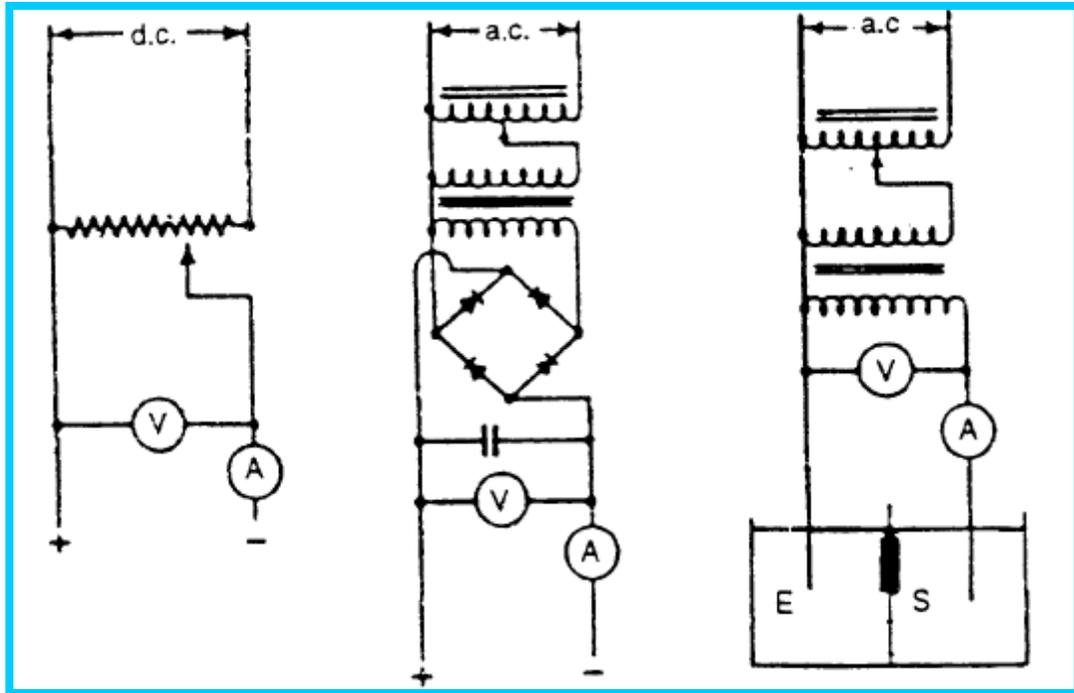


Figura 2.12. Tres Posibles fuentes de poder para el método de electropulido. V = voltímetro.

La decisión de en qué momento se debe parar el proceso de electropulido se conoce usualmente con la experiencia de este método, ya que es difícil medir un espesor de 20 a 200 nm. El criterio usualmente empleado es detener el proceso cuando aparece un pequeño orificio en el centro de la muestra. Tan pronto como éste orificio es hecho en la muestra, aparece un ataque preferencial debido a las concentraciones de las líneas de campo que ocurren en los bordes del orificio y lo cual remueve rápidamente las zonas delgadas, por lo que éste es el momento en el que la corriente debe ser cortada. Existe

una gran gama de electrolitos utilizados para este proceso, estos deben ser escogidos según el material que se quiere electropulir, la mezcla del ácido acético con el ácido perclórico es la más común para atacar aceros perlíticos. Para establecer las condiciones del electropulido es necesario obtener la relación corriente-voltaje para el electrolito empleado y la muestra que se desea pulir.

# **CAPITULO III**

## **“Marco Metodológico”**

### **3.1.NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente Trabajo Especial de Grado constituye una investigación confinada de tipo exploratoria-descriptiva, ya que se efectúa en base a un tema poco estudiado para cualquier estudiante de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, y a la vez con el fin de caracterizar la microestructura del acero 1080; para la misma propiedad mecánica a dos distintos niveles, relajación baja y relajación normal.

### **3.2.DISEÑO DE LA INVESTIGACION**

Se crearon 20 probetas del acero 1080 con relajación baja y 20 probetas para el acero con relajación normal, siendo un total de 40 probetas preparadas.

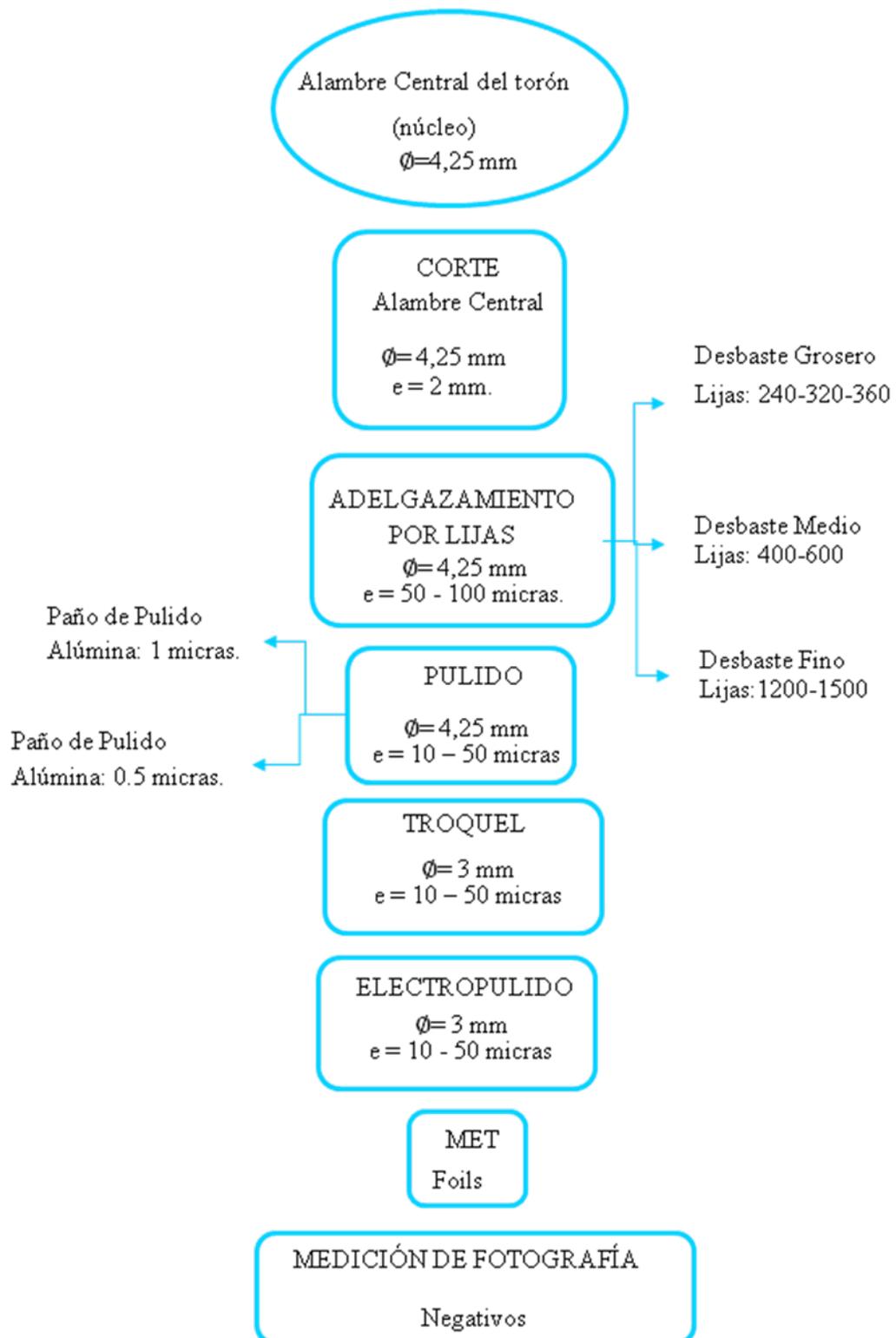


Figura 3.1 Diseño de la investigación

### 3.2.1. Preparación de “Foil”

La técnica para crear un foil por pulido electrolítico, requiere como producto inicial una lámina de metal de 50 a 10 micras de espesor.

- Corte: El núcleo del torón de 4.25 mm de diámetro, fue cortado con un disco abrasivo, para lograr un espesor de 2 mm.



Figura 3.2. Corte de la probeta con disco abrasivo

- Adelgazamiento con lijas: El disco se llevó minuciosamente hasta un espesor entre 10 y 50 micras aproximadamente, cuidando siempre que ambos lados sean absolutamente planos y paralelos. Para ellos el disco se fijó con pegamento en el dispositivo de agarre y se procedió a lijar desde lija N° 240 hasta la N° 1500, pasando por 320, 360, 400, 600 y 1200, girando 90° la probeta cada vez que se realizó un cambio de lija,

de esta forma se fue eliminando la orientación de las rayas y se logró una superficie pulida y lisa. Este proceso se realizó por ambas caras del disco (figura 3.4), para así obtener una muestra de la zona central de la probeta evitando así que existieran deformaciones provenientes del corte.



Figura 3.3. A. Fijación de la probeta y el dispositivo de agarre. B. Lijado de la probeta en el disco de pulido.

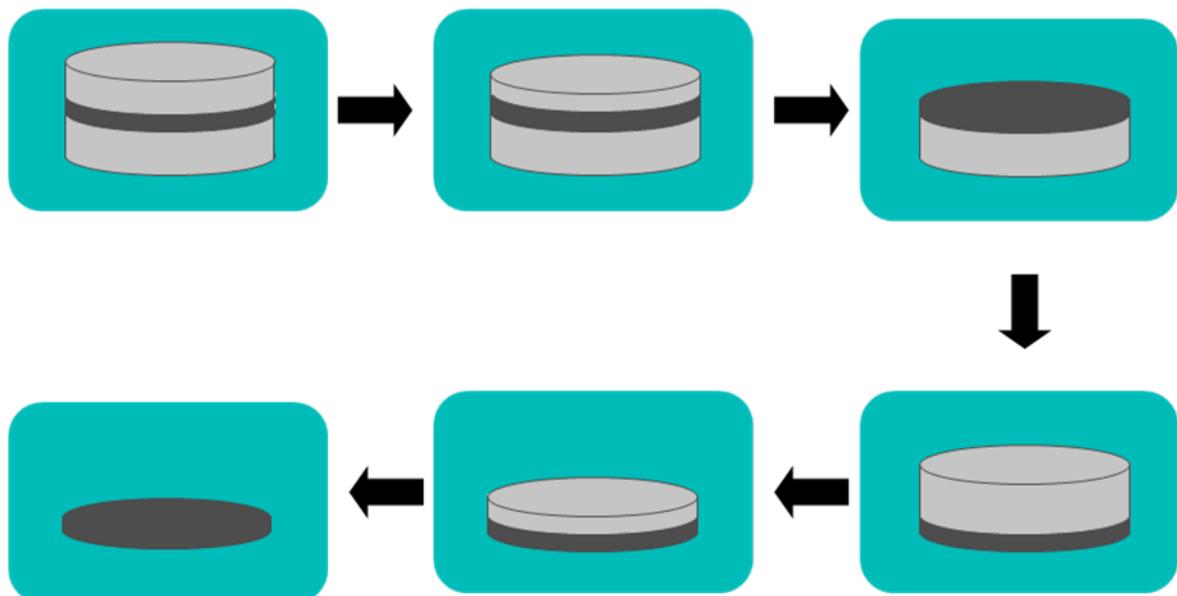


Figura 3.4. Obtención del foil

- Pulido: Se pulió cada una de las probetas con dos paños de pulido; utilizándose como elemento abrasivo alúmina de distintos tamaños de grano (1 micra y 0.5 micras). El pulido se realizó siguiendo el mismo método que el adelgazamiento por lijas, por ambos lados, girando 90° la probeta al cambiar de paño y verificando en el microscopio óptico que todas las rayas lleven la misma orientación; obteniéndose caras exentas de rayas y un excelente acabado superficial.



Figura 3.5. A. Paño en el disco de pulido. B. Pulido de probeta.  
C. Observación del microscopio.

- Electropulido: Con la máquina de electropulido STRUERS modelo TENUPO-3, ubicada en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), se realizó el método de pulido Jet con un electrolito a base de ácido acético; el ataque se llevó a cabo con las siguientes condiciones:

<b>Electrolito</b>	<b>HClO<sub>4</sub>(ácido perclórico) + CH<sub>3</sub>COOH(ácido acético)</b>
<b>Temperatura del electrolito</b>	13 °C
<b>Voltaje</b>	15 V
<b>Amperaje</b>	0.05 A
<b>Fotosensibilidad*</b>	7
<b>Caudal*</b>	5
<b>Tiempo**</b>	Hasta que la máquina se detuvo automáticamente.

Tabla 3.1. Condiciones del electrolito utilizado

\*Variable dada por la máquina en una escala propia y adimensional de 0-10.

\*\* La máquina indica mediante un pito que ya el orificio se obtuvo y se detiene, este tiempo depende directamente del espesor de la muestra.

Luego de realizar el electropulido y obtener los foils, éstos fueron guardados cuidadosamente en una cámara de vacío ubicada en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), para evitar la contaminación y corrosión de las muestras, en espera de la sesión de microscopía electrónica de transmisión (MET).

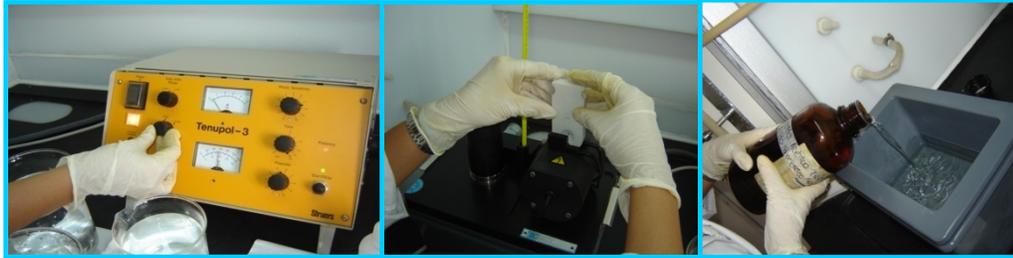


Figura 3.6. A. Panel de condiciones. B. Colocación de probetas para ejecución de electropulido. C. Vertimiento del electrolito.

### 3.2.2. Microscopía Electrónica de Transmisión

Con el microscopio electrónico de transmisión ubicado en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), se observaron dos foils, correspondiendo cada uno a una propiedad de relajación distinta (baja relación y relajación normal); obteniendo así patrones de difracción de la matriz con una constante de cámara de 16,1 y 27 para los aceros de relajación baja y normal respectivamente y mediante diferentes grados de ampliación (8900 X y 28500 X) en distintas zonas de la muestra, se obtuvieron las fotografías de la microestructura en campo claro.

### 3.2.3. Medición de Fotografía

Con la ayuda de una lupa especial que posee una escala milimétrica y sobre una mesa de acrílico con una lámpara de luz blanca incorporada ubicadas ambas en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), se procedió a medir:

- A. Directamente sobre el negativo, para evitar errores apreciativos de escala, los diámetros de los anillos resultantes del patrón de difracción.
- B. Sobre todas las fotografías con mayor factor de ampliación se tomaron 10 medidas de las láminas de cementita y el mismo número para las laminillas de ferrita, con el fin de obtener un promedio de espesor de láminas para ambas condiciones de relajación.

### 3.3 MATERIAL UTILIZADO

En este proyecto de grado el material a utilizar es acero al carbono perlítico 1080 en forma de alambre, proveniente del hilo central de un torón 270K empleado para concreto presentado presentado en muestras de 2 mm de espesor por 4,25 mm de diámetro; cuyas propiedades iniciales se presentan a continuación:

Microscopía Óptica:

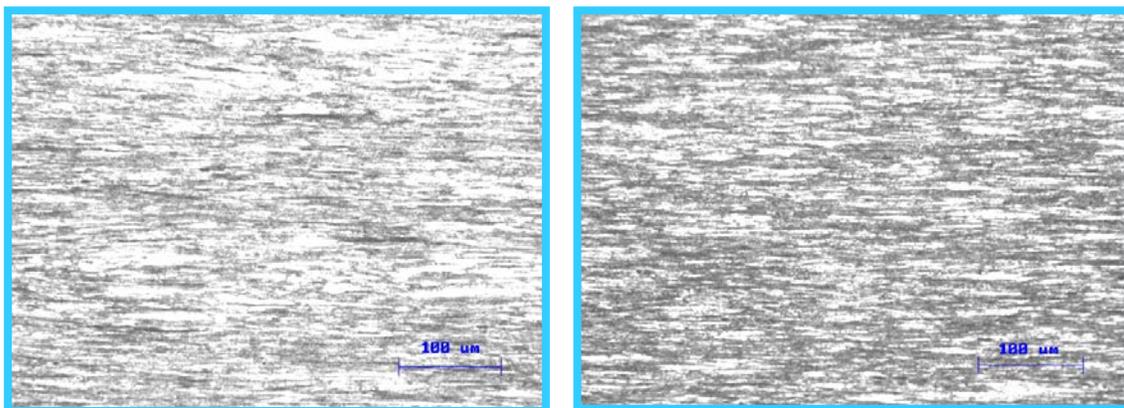


Figura 3.7 Microscopía óptica de acero 1080 A. de baja relajación B. de relajación normal

### Microscopía de Barrido:

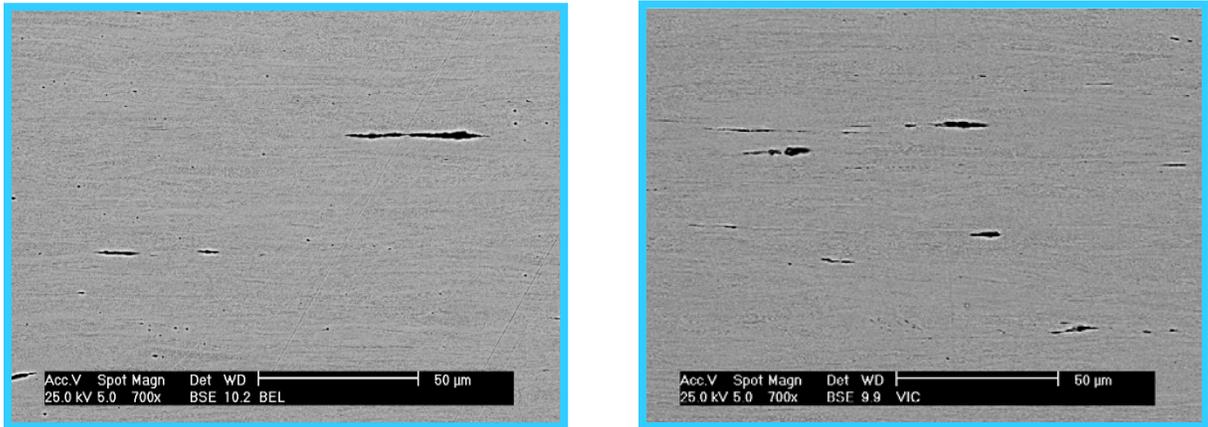


Figura 3.8 Microscopía electrónica de barrido de acero 1080 de A. de baja relajación B. de relajación normal

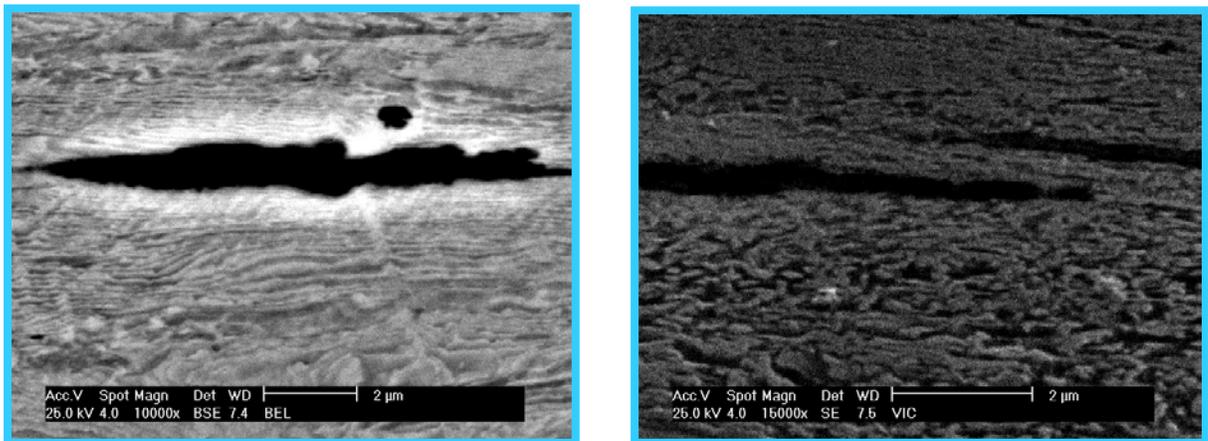


Figura 3.9 Microscopía electrónica de barrido de acero 1080 de A. de baja relajación B. de relajación normal

Composición química:

<b>Acero 1080</b>	<b>Relajación baja</b>	<b>Relajación normal</b>
<b>%S</b>	0.01	0.006
<b>%C</b>	0.87	0.85
<b>%Mn</b>	0.74	0.79
<b>%P</b>	0.012	0.011
<b>%Si</b>	0.23	0.28
<b>%Al</b>	0.002	0.002

Tabla 3.2 Composición química del acero 1080 para de baja relajación y relajación normal

Propiedades Mecánicas:

<b>Acero 1080</b>	<b>Relajación baja</b>	<b>Relajación normal</b>
<b>Alargamiento (%)</b>	3.5	3.7
<b>Carga 1 % (kN)</b>	168.6	162.56
<b>Carga Rotura (kN)</b>	187.34	182.47

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas del acero 1080

Ensayo de relajación:

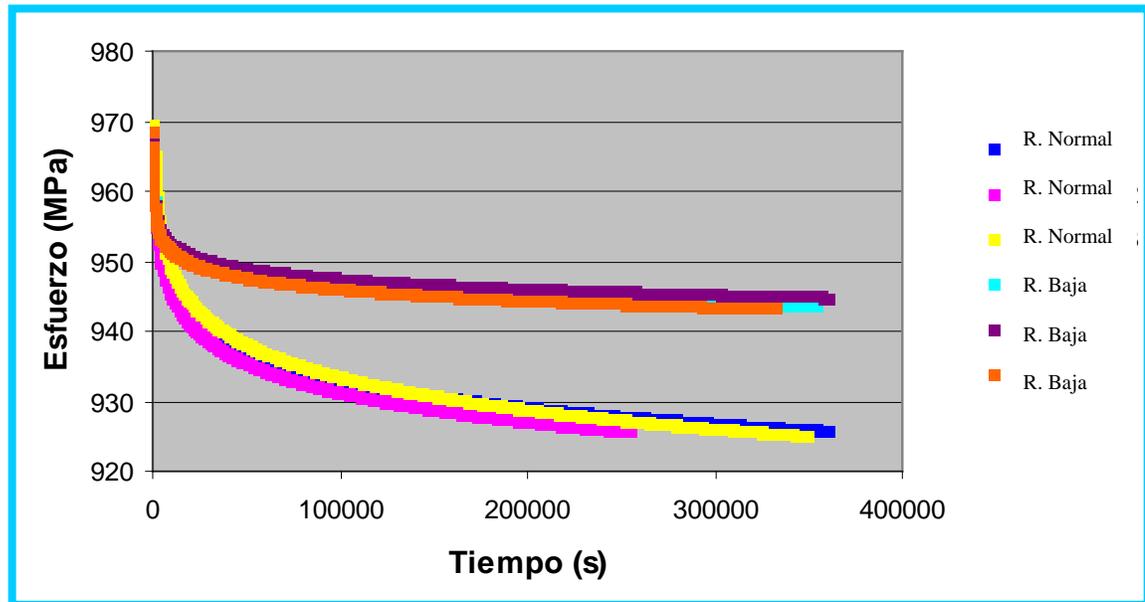


Figura 3.10. Ensayo de relajación para un acero 1080 de baja relajación y relajación normal

### 3.4 MATERIALES Y EQUIPOS

- Microscopio óptico (IVIC)

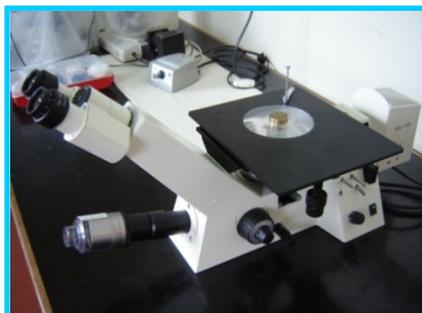


Figura 3.11. Microscopio óptico

- Materiales para adelgazamiento con lijas: lijas (desde N° 80 hasta N° 1500), tijera, papel, lápiz, calculadora, vernier, tornillo micrométrico, dispositivo de agarre, pegamento.



Figura 3.12 Materiales para el adelgazamiento con lijas

- Materiales para el pulido: destornillador, agua destilada, jabón líquido, papel absorbente, alúmina (1 micra y 0.5 micras), paños de pulido (2, uno para cada tipo de alúmina), pizetas.



Figura 3.13 Materiales para pulido

- Materiales para realizar el cambio de lado de las probetas: acetona, algodón, hojilla, vaso de precipitado, hisopos, pinza



Figura 3.14 Materiales para el cambio de lado de la muestra

- Banco de pulido



Figura 3.15 Banco de pulido

- Troquel



Figura 3.16 Troquel

- Máquina de electropulido marca STRUERS, modelo TENUPOL-3



Figura 3.17 Máquina de electropulido

- Nitrógeno líquido



Figura 3.18 Nitrógeno líquido

- Lupa especial con escala milimétrica



Figura 3.19. Lupa con escala

- Microscopio electrónico de transmisión marca PHILLIPS modelo MC-110.



Figura 3.20 Microscopio Electrónico de Transmisión

# **CAPITULO IV**

## **“Resultados Experimentales”**

## 4.1 FOTOGRAFÍAS DE LA MICROESTRUCTURA EN CAMPO CLARO.

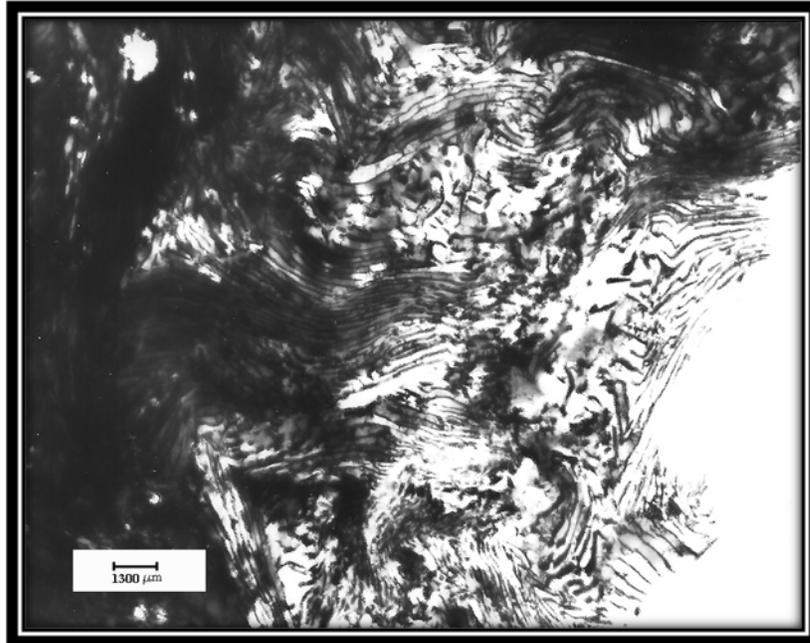


Figura 4.1 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 11570X

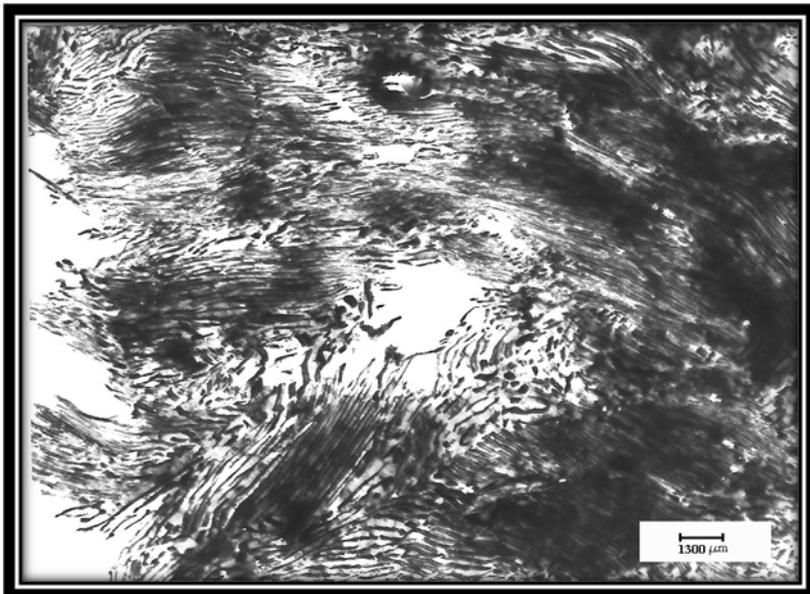


Figura 4.2 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 11570X

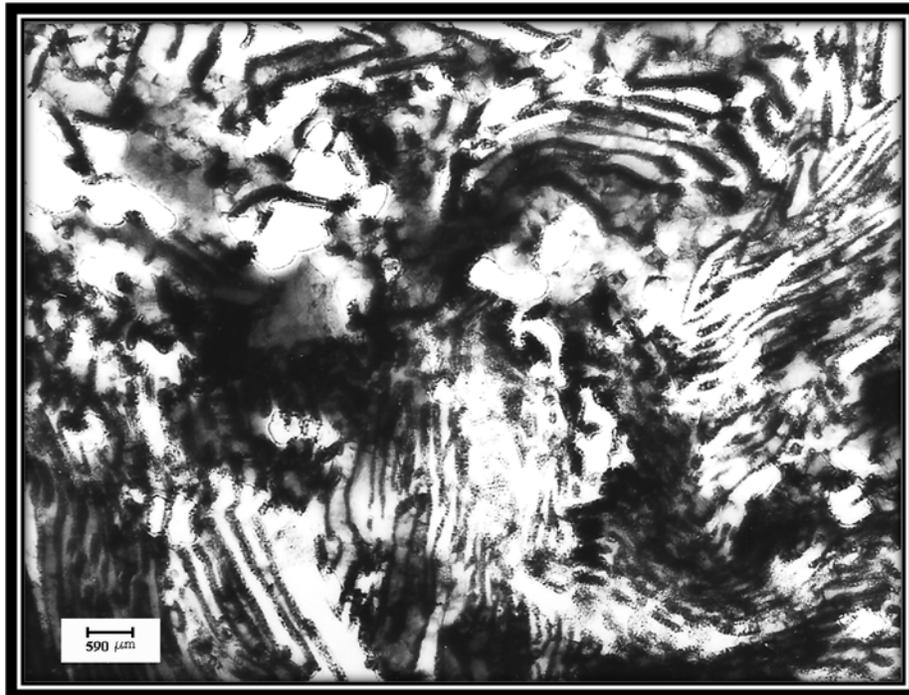


Figura 4.3 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 25810X

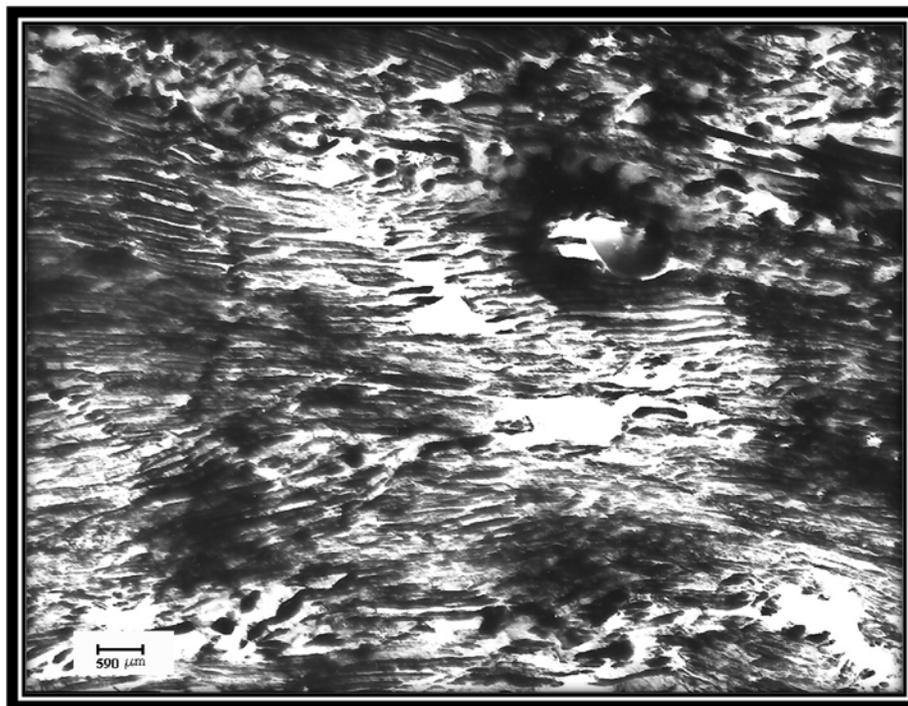


Figura 4.4 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 25810X

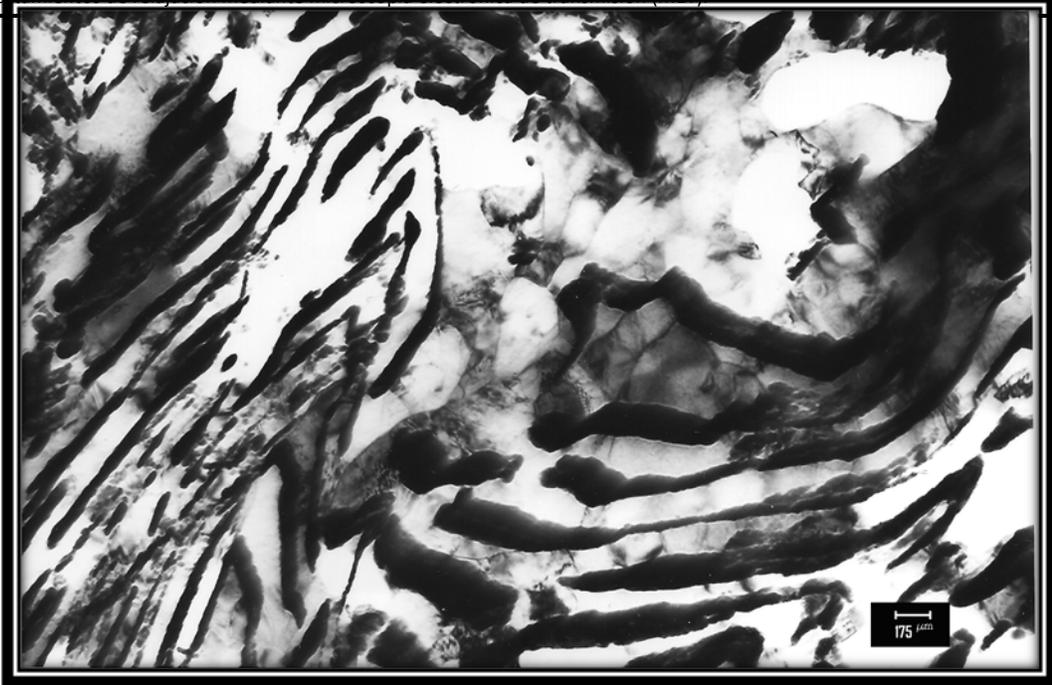


Figura 4.5 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 85500X

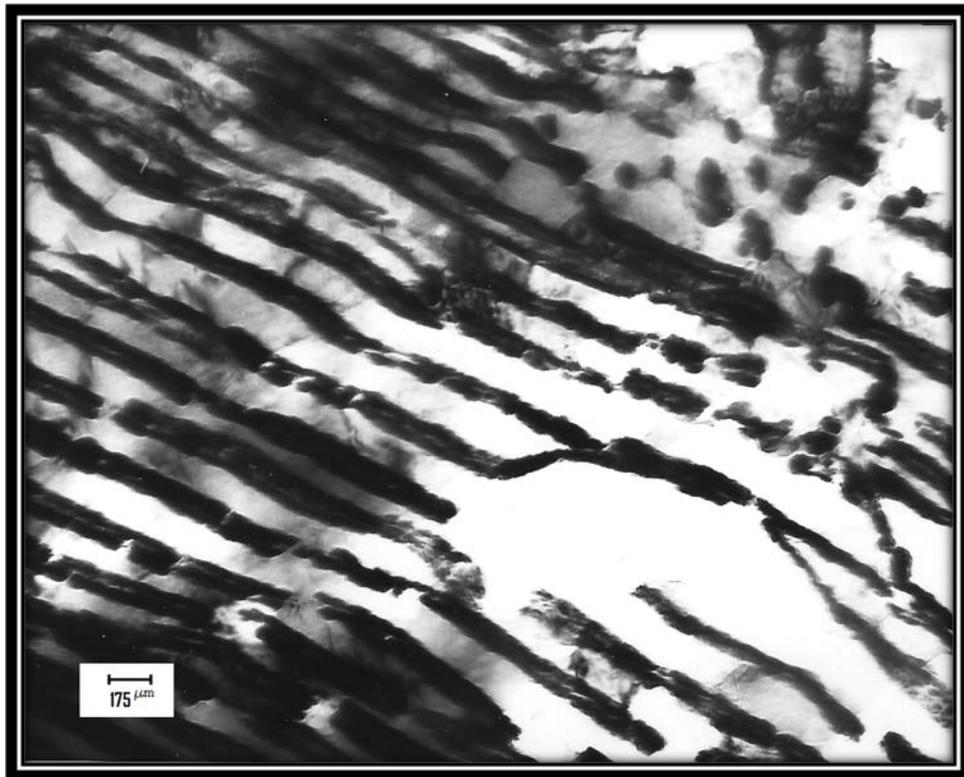


Figura 4.6 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 85500X

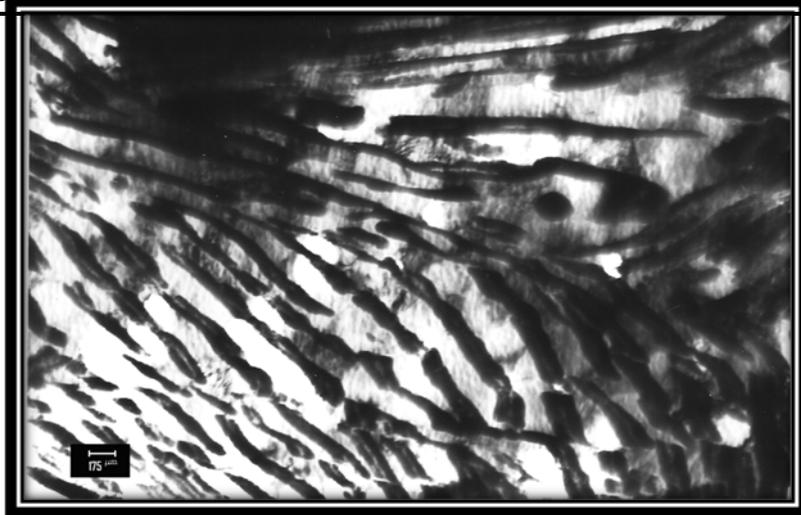


Figura 4.7 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 85500X



Figura 4.8 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación normal a 85500X.

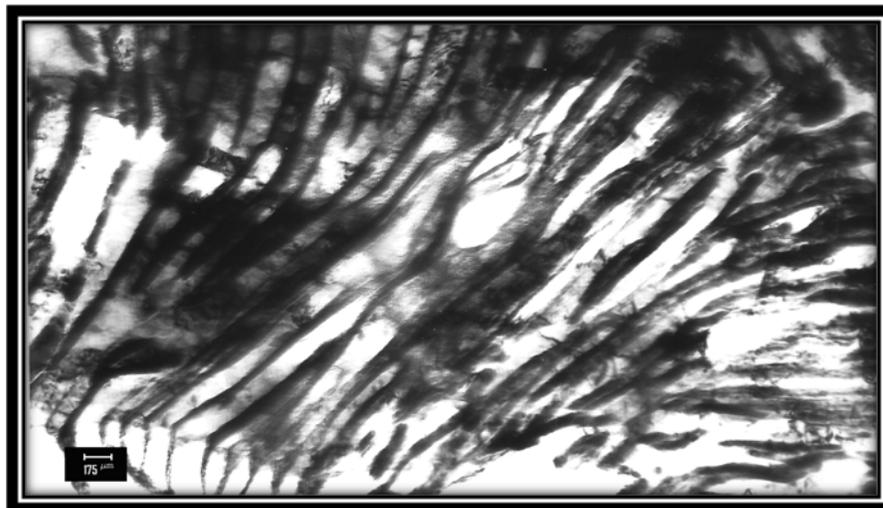


Figura 4.9 Micrografía en campo claro de un acero 1080 con propiedad de relajación baja a 85500X

## 4.2 PROMEDIO DE LAS MEDIDAS DE LAS LÁMINAS DE FERRITA Y CEMENTITA PARA LAS FOTOGRAFÍAS 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9.

FOTOGRAFÍA 4.5	
Ferrita (nm)	Cementita m (nm)
46,78	70,18
29,24	64,33
93,57	23,39
93,57	17,54
52,63	58,48
52,63	35,09
40,94	23,39
58,48	23,39
81,87	17,54
81,87	11,70
35,09	29,24
<b>Promedio</b>	<b>60,61</b>
	<b>34,02</b>

Tabla 4.1 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.5

FOTOGRAFÍA 4.6	
Ferrita (nm)	Cementita (nm)
29,24	46,78
40,94	35,09
46,78	46,78
14,04	46,78
35,09	35,09
35,09	35,09
26,90	23,39
23,39	40,94
46,78	23,39
29,24	35,09
29,24	46,78
<b>Promedio</b>	<b>32,43</b>
	<b>37,75</b>

Tabla 4.2 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.6

<b>FOTOGRAFÍA 4.7</b>		
	<b>Ferrita (nm)</b>	<b>Cementita (nm)</b>
	35,09	46,78
	46,78	64,33
	46,78	29,24
	28,07	46,78
	52,63	35,09
	35,09	46,78
	81,87	35,09
	87,72	40,94
	52,63	35,09
	70,18	35,09
	52,63	40,94
<b>Promedio</b>	<b>53,59</b>	<b>41,47</b>

Tabla 4.3 Promedio de espesores de las láminas de ferrita y cementita para la fotografía #4.7

<b>FOTOGRAFÍA 4.8</b>		
	<b>Ferrita (nm)</b>	<b>Cementita (nm)</b>
	46,78	29,24
	52,63	30,41
	29,24	31,58
	40,94	28,07
	40,94	28,07
	29,24	29,24
	58,48	23,39
	38,60	29,24
	46,78	23,39
	46,78	35,09
	46,78	23,39
<b>Promedio</b>	<b>43,38</b>	<b>28,28</b>

Tabla 4.4 Promedio de espesores de las láminas de ferrita y cementita para la fotografía #4.8

<b>FOTOGRAFÍA 4.9</b>		
	<b>Ferrita (nm)</b>	<b>Cementita (nm)</b>
	35,09	35,09
	35,09	46,78
	35,09	17,54
	11,70	46,78
	17,54	58,48
	29,24	35,09
	17,54	23,39
	52,63	46,78
	11,70	35,09
	5,85	35,09
	11,70	58,48
<b>Promedio</b>	<b>23,92</b>	<b>39,87</b>

Tabla 4.5 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografía #4.9

<b>Relajacion Baja</b>		
	<b>Ferrita (nm)</b>	<b>Cementita (nm)</b>
	32,43	37,75
	23,92	39,87
<b>Promedio</b>	<b>28,18±6,01</b>	<b>38,81±1.5</b>

Tabla 4.6 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografías 4.6 y 4.9

<b>Relajacion Baja</b>		
	<b>Ferrita (nm)</b>	<b>Cementita (nm)</b>
	60,61	34,42
	53,59	41,47
	43,38	28,28
	52,53±8,61	34,59±6,61

Tabla 4.7 Promedio de espesores de las láminas de ferita y cementita para la fotografías 4.5,4.7 y 4.8

### 4.3 PATRONES DE DIFRACCION DE ELECTRONES

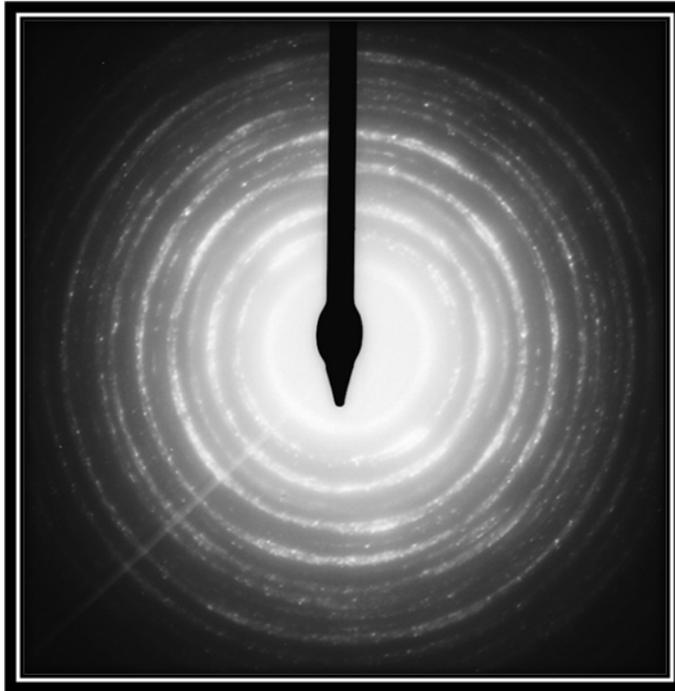


Figura 4.10 Patrón de difracción de electrones para muestra de acero 1080 con relajación baja y longitud de cámara 16,1.

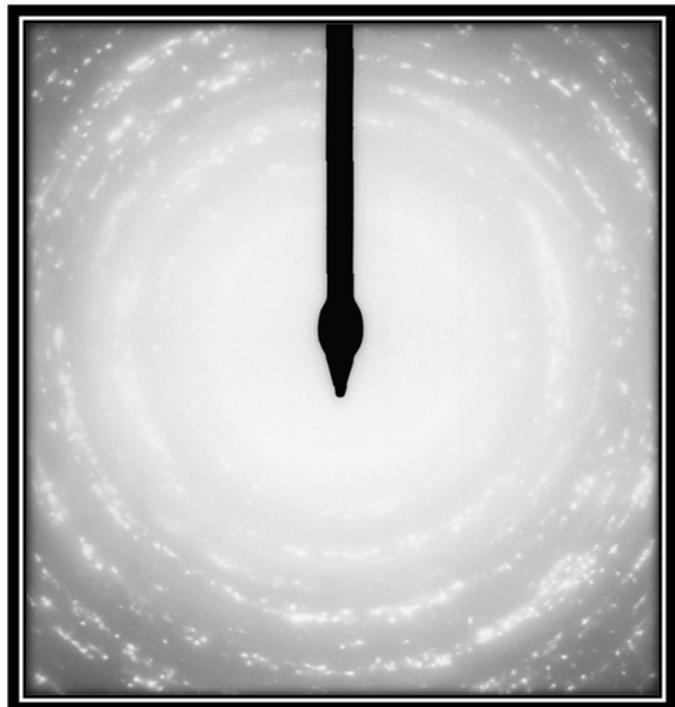


Figura 4.11 Patrón de difracción de electrones para muestra de acero 1080 con relajación normal y longitud de cámara 27.

#### 4.4 MEDICIÓN DE LAS DISTANCIAS ENTRE LOS ANILLOS

Distancia entre anillos (mm.)	d (Å)	Distancia entre anillos (mm.)	d (Å)
7,65	2,10	12,86	2,10
7,8	2,06	13,04	2,07
7,9	2,04	13,24	2,04
7,9	2,04	13,24	2,04
8,05	2,00	13,57	1,99
8,45	1,91	14,14	1,91
8,55	1,88	14,36	1,88
11	1,46	18,49	1,46
11,15	1,44	18,75	1,44
11,15	1,44	18,75	1,44
11,24	1,43	18,88	1,43
11,39	1,41	19,15	1,41
11,49	1,40	19,39	1,4
13,19	1,22	22,13	1,22
13,29	1,21	22,31	1,21
13,39	1,20	22,50	1,20
13,59	1,18	22,88	1,18
13,59	1,18	22,88	1,18
13,75	1,17	23,08	1,17

Tabla 4.8. Distancia entre anillos y distancias interplanares para el acero 1080 A. de relajación baja, B. de relajación normal.

A

B

Ejemplo de cálculo para la tabla A (primer anillo):

Según la ecuación 2:

$$Rd = \lambda L ;$$

con  $\lambda L = 16,1$  y  $R = 7,65$  mm



$d = 2,10 \text{ \AA}$

Ejemplo de cálculo para la tabla B (primer anillo):

Según la ecuación 2:

$$Rd = \lambda L ;$$



con  $\lambda L = 27$  y  $R = 12,86$  mm  $\longrightarrow$   $d = 2,10 \text{ \AA}$

Comparando la tabla 4.6 con el apéndice I y II se obtiene:

<b>d ( Å )</b> <b>Acero1080</b> <b>relajación</b> <b>baja</b>	<b>d ( Å )</b> <b>Acero1080</b> <b>relajación</b> <b>normal</b>	<b>d ( Å )</b> <b>Ferrita* y</b> <b>cementita</b>	<b>Int.</b>
2,10	2,10	2,1002	543
2,06	2,07	2,0630	515
2,04	2,04	2,0300	100
2,04	2,04	2,0247	495
2,00	1,99	2,0091	999
1,91	1,91	1,9724	476
1,88	1,88	1,8752	22
1,46	1,46	1,4693	1
1,44	1,44	1,4433	1
1,44	1,44	1,4400	50
1,43	1,43	1,4323	4
1,41	1,41	1,4112	18
1,40	1,40	1,4018	32
1,22	1,22	1,2203	105
1,21	1,21	1,2138	132
1,20	1,20	1,2007	19
1,18	1,18	1,1888	54
1,18	1,18	1,1861	36
1,17	1,17	1,1700	80

\*Ferrita: Verde.  
Cementita: Blanco y Azul

Tabla 4.9 Comparación de las distancias interplanares de los aceros 1080 de relajación baja y normal con las matrices de ferrita y cementita

# **CAPITULO V**

## **“Análisis de Resultados”**

## **Análisis de microscopía electrónica de transmisión (MET).**

Al observar las distintas fotografías realizadas mediante el microscopio electrónico de transmisión se pudo notar la presencia de las laminillas de ferrita y cementita en diferentes grosores y direcciones. Las orientaciones preferenciales que presentaron éstas láminas se dan a causa del trefilado a que fueron sometidos los componentes del torón en el proceso de fabricación; en este proceso se produce lo que se denomina una textura fibrosa, que es característica de aquellos metales que han sufrido una gran deformación, en este caso, los alambres en cuestión han experimentado una reducción del 62% (de 11 mm. a 4.25 mm.) de su sección transversal.

En la fotografías de menor aumento (Figura 4.1 y Figura 4.2) se pudo apreciar la diferencia en cuanto a la concentración de laminillas de la matriz, siendo la muestra de relajación normal menos densa que la de baja relajación, ya que en la primera se logró observar que los espacios interlaminares de perlita son mucho mayores. También, se apreció claramente que en la muestra de relajación normal las placas de cementita son más cortas, esto se debe a que estas láminas a la hora de tomar la orientación preferencial que asumen durante el trefilado, en dirección a la deformación máxima, no lograron agruparse con las laminillas que tenían en sus adyacencias de manera que tomaron la forma allí observada, mientras que en la otra muestra se apreció como estas laminillas lograron agruparse y formar láminas de cementita más largas.

En la Figura 4.5 se pudo observar los cambios de direcciones y las pequeñas

longitudes de las láminas de cementita en la parte superior, además de grandes zonas claras que se distribuyen a lo largo de toda la figura; a diferencia de ésta, en la figura 4.6 se observaron largas láminas de cementita y ferrita que se encuentran agrupadas de una forma más homogénea.

En el grupo de fotografías con mayor aumento (Figura 4.7, 4.8 y 4.9), se pudo apreciar que existe una gran diferencia entre los espesores, tanto en las láminas de ferrita, como en las de cementita; se puede observar en las tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, que las láminas de ferrita del acero de relajación normal son casi el doble que las de relajación baja, aunque para las laminillas de cementita se encontró una diferencia menor, es importante recalcar que el acero de relajación baja cuenta con más espesor en las láminas de cementita que en el de relajación normal.

De la muestra del acero de relajación normal, se encontró en las figuras 4.7 y 4.8 la presencia de dislocaciones, éstas son debido a los esfuerzos a que fue sometido el alambre durante el proceso de trefilado; aunque éstas no se hagan visibles en las fotografías del acero de baja relajación, no significa que en esa muestra no existan, puesto que vale la pena recordar que éstas fotos poseen un factor de ampliación importante, lo pudo haber implicado que las dislocaciones no hayan sido incluidas en la zona captada.

Los límites de grano observados en las distintas fotomicrografías son debido a que durante el proceso de conformación del torón, los granos se desplazan y al mismo tiempo se alargan haciendo que ciertas direcciones y planos metalográficos queden alineados; en consecuencia se desarrollan orientaciones, lo que conlleva a que cuando granos que no llevan la misma dirección se encuentran, se produzca el límite de grano.

## **Análisis de Patrones de difracción.**

El acero utilizado para la conformación de los torones corresponde a un material policristalino y como ya se mencionó con anterioridad, presentan en su microestructura una matriz perlítica.

Como es de saber, en esta investigación se trató con muestras de acero 1080 con dos distintas condiciones en cuanto a su propiedad de relajación, siendo una de ellas de relajación normal y la otra de baja relajación según la norma ASTM (\*). A cada una de ellas se le aplicó un patrón de difracción, y se obtuvo que en ambos casos las distancias entre los anillos resultantes fueron iguales, debido, a que los dos tienen la misma microestructura de matriz perlítica. Con estos anillos se pudo analizar cómo se presentan las dos fases resultantes de una matriz perlítica.

Cada anillo en un patrón de difracción posee una intensidad distinta, siendo los de mayor intensidad los más importantes de encontrar a la hora de obtener las distancias entre cada uno de ellos, ya que estos son los indicadores principales de cualquier fase que se haga presente.

Al observar la muestra en el microscopio electrónico de transmisión mediante imágenes en campo claro, se observó que no existían ningún tipo de precipitados.

# **CAPITULO VI**

## **“Conclusiones y Recomendaciones”**

## CONCLUSIONES

Se caracterizó cada una de las muestras estudiadas para cada propiedad de relajación distinta, y se obtuvo en ambos casos una microestructura de matriz perlítica, presentando sus dos fases principales como lo son la ferrita y la cementita.

Se determinó las condiciones del electrolito utilizado para atacar muestras de acero perlítico, la cuales resultaron ser para el electrolito  $\text{HClO}_4$  (Ácido perclórico) +  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (Ácido Acético), una temperatura de  $13\text{ }^\circ\text{C}$ , un voltaje de  $15\text{ V}$  y  $0.05\text{ A}$  de amperaje.

Se comparó las fotografías obtenidas de la microscopía electrónica de transmisión (MET), obteniendo diferencias tanto en la forma en que las láminas de perlita se distribuían por toda la matriz, como en los espesores de éstas, teniendo para los aceros de baja relajación una distribución más uniforme y mayor espesor en las laminillas de cementita que de ferrita, mientras que en los aceros de relajación normal cuentan con una distribución desordenada a lo largo de la matriz, y contiene mayores espesores de láminas de ferrita que de cementita.

Se obtuvo para los distintos comportamientos de relajación, una microestructura de matriz perlítica sin ningún tipo de precipitado, pero con diferencias entre ellas, sin embargo no es posible establecer límites en cuanto al espesor de las laminillas de ferrita y cementita, como para referirse de manera precisa

si se trata de un acero de baja relajación o de uno relajación normal; dichas diferencias es posible que se puedan obtener mediante algún tratamiento termomecánico, los cuales crean cambios en los esfuerzos residuales quienes a su vez generan cambios en los comportamientos de la relajación; aunque cabe destacar que no existe ninguna referencia en la cual se atribuya algún cambio en la microestructura a la modificación de los esfuerzos residuales.

## RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos y los análisis de estos en el presente trabajo de grado, se desprenden las siguientes recomendaciones:

- Hacer investigaciones mediante las cuales se puedan obtener tratamientos térmicos, que lleven la perlita a láminas delgadas y a una distribución uniforme de su matriz para obtener mejores propiedades en cuanto a la relajación.
- Trabajar con sumo cuidado, paciencia y haciendo énfasis en cada uno de los pasos que se deben llevar a cabo, para la preparación de las muestras destinadas al estudio mediante la microscopía electrónica de transmisión (MET), con el fin de obtener resultados satisfactorios.
- Realizar un trabajo donde se alteren los perfiles de esfuerzos residuales, mediante tratamientos termomecánicos y verificar la correlación que existe con la microestructura obtenida en MET.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

<sup>(1)</sup> ASTM Internacional. Standards Worldwide.

Disponible en: [www.astm.org](http://www.astm.org)

<sup>(2)</sup> R. Urbaéz, F. Toledo, G. Castro Farinas and E.S. Puchi Cabrera (2000) “Comportamiento de relajación de los componentes del acero perlítico en alambres estirados”

<sup>(3)</sup> Secretariado de Instrumentación Científica y Apoyo a la Investigación.

Disponible en: <http://www.ua.es/es/investigacion/sti/tem.htm>

<sup>(4)</sup> Norma ASTM A 416, Comité A-1, Subcomité A01-05., p. 1.,1974

<sup>(5)</sup> A Malishev, G.Nikolaiev y Yu. Shuvalov, Tecnología los metales, 6ta edición, editorial MIR, Moscú, p.p 262 (1983)

<sup>(6)</sup> Dieter, George., Metalurgia Mecánica, Aguilar, Madrid, p.p 568-570 (1967)

<sup>(7)</sup> Dove, Allen B., Carleton W. Garret., Howard J. Godfrey, Steel Wire Handbook, pp 168, 169, 170, 171, 172.

<sup>(8)</sup> Meyers, Marc André y Chawla, Krishan Kumar., Mechanical Metallurgy Principles and applications. USA, 1984, p.p 570-572, 586-590.

<sup>(9)</sup> Norma ASTM E 328, año 1986

<sup>(10)</sup> Harvey, John F., Theory and Design of Modern Pressure Vessels, Litton Educational Publishing, Inc, USA, 1974, p.p 405, 418 – 419

<sup>(11)</sup> Frank A. Mc Clintock and Ali S. Argon, Mechanical behavior of materials, Addison – Wesley Publishing Company, Inc, USA, 1966 p.p 640-641-642

<sup>(12)</sup> Ricardo E. Medrano and Peter Gillis., Stress Relaxation of an AISI 1080 steel, Metallurgical Transactions A, vol 20A, 1989, p.p 2011-20114

<sup>(13)</sup> Thereza C.R Penna and R.E. Medrano., On stress Relaxation, physics Status Solidi (A), vol 74, 1982, p.p 265

<sup>(14)</sup> V.I. Dotsenko., Stress Relaxation in crystals, Physic status solidi (B), vol 13, 1979 p.p 12-13-14-15-16-17.

<sup>(15)</sup> Standard Test Methods for Stress Relaxation Tests for Materials and Structures.

Yacamán, Miguel José y Reyes José, Microscopía Electrónica, Una visión del microcosmos. Consejo nacional de ciencia y tecnología. Mexico

# Apéndice