

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ACEROS CONVENCIONALES Y ACEROS CON INTERSTICIOS LIBRES (IF)  
PARA ESMALTADO LAMINADO EN FRIO

POR

JUAN GALLEGOS ESCAMILLA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L.

NOVIEMBRE 2006

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis “**ACEROS CONVENCIONALES Y ACEROS CON INTERSTICIOS LIBRES (IF) PARA ESMALTADO LAMINADO EN FRIO**” realizada por el Ing. **Juan Gallegos Escamilla** con número de matrícula **0559265**, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la **Ingeniería Mecánica** con especialidad en **Materiales**.

El comité de Tesis

---

Dr. José Luís Cavazos García  
Asesor

---

Dr. Julio Cesar Morales Chavela  
Revisor  
Revisor

---

M.A.C. Jorge Resendez Flores

Vo. Bo.

---

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Posgrado

Cd. Universitaria, Noviembre del 2006

# INDICE

	Pagina
<b>RESUMEN</b>	4
<b>CAPITULO 1</b>	
INTRODUCCION	5
<b>CAPITULO 2</b>	
SELECCIÓN DEL ACERO PARA ESMALTADO PORCELANIZADO	7
2.1 QUE ES EL ACERO?	7
2.2 QUE ES EL ESMALTE?	8
2.3 PROCESOS MODERNOS PARA LA FABRICACIÓN DE ACERO	8
2.4 INFLUENCIA DEL ACERO EN EL PROCESO DE ESMALTE PORCELANIZADO	10
2.5 TIPOS DE ACERO PARA ESMALTE PORCELANIZADO	15
2.5.1 Aceros tradicionales	15
2.5.2 Nuevos aceros para esmaltado	16
2.6 FORMABILIDAD DE LOS ACEROS ESMALTADOS	17
2.7 ADHERENCIA	20
2.8 ESCAMA DE PESCADO	22
2.9 TRAMPAS DE HIDRÓGENO	23
2.10 DETECCIÓN DE LA ESCAMA DE PESCADO	26

**CAPITULO 3**

DESARROLLO EXPERIMENTAL	28
3.1 SELECCIÓN DE ACERO	28
3.2 COMPOSICION QUIMICA	29
3.3 ENSAYOS DE TENSION Y DUREZA	29
3.4 ANALISIS MICROESTRUCTURAL	30
3.5 RECUBRIMIENTO DE ACERO CON ESMALTE	30

**CAPITULO 4**

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1 COMPOSICION QUIMICA	31
4.2 ENSAYOS DE TENSION Y DUREZA	32
4.3 ANALISIS MICROESTRUCTURAL	33
4.3.1 microestructura interna de los aceros	33
4.3.2 Precipitados de segundas fases	34
4.4 RECUBRIMIENTO DEL ACERO CON ESMALTE	36

**CAPITULO 5**

CONCLUSIONES	37
--------------	----

<b>REFERENCIAS</b>	38
--------------------	----

<b>TABLAS</b>	40
---------------	----

<b>FIGURAS</b>	46
----------------	----

<b>APENDICE</b>	58
-----------------	----

# RESUMEN

Los aceros planos laminados en frío tienen una amplia aplicación en la fabricación de partes para estufas, calentadores, lavadoras, utensilios para cocina, etc. se les denomina aceros para esmaltado los cuales deben tener buena formabilidad y capacidad para ser recubiertos con esmalte el cual los protegerá de la corrosión atmosférica.

En este trabajo se estudian las características de dos lotes de acero para esmaltado, cada lote esta compuesto por diez muestras, el lote C es acero bajo carbono y el lote U es acero ultrabajo carbono con intersticios libres, se determino la composición química de ambos aceros y se encontraron diferencias significativas entre ambos lotes, los elementos que marcan la diferencia son: Carbono, manganeso, azufre, titanio, nitrógeno, los cuales tienen influencia directa en el proceso y usos de ambos aceros.

Se realizaron ensayos mecánicos de tensión en ambos aceros obteniéndose el esfuerzo de Cedencia, el esfuerzo máximo de Tensión, % de Elongación, Dureza, Valor r, Valor n. Los resultados de los ensayos mecánicos de tensión indican que el acero de lote U, tiene mayor capacidad para ser embutido debido a que presenta valor r, valor n y %elongación, mayores que los del lote C, ambos aceros cumplen con la especificación estándar de ASTM A 424.

Se realizó análisis microestructural y caracterización por microscopio de barrido electrónico para ambos aceros, encontrando en los aceros de lote C precipitados de carburo de hierro  $Fe_3C$  y en los aceros de lote U precipitados de Nitruro de titanio  $TiN$ , Carburo de Titanio  $TiC$ , Sulfuros de manganeso  $MnS$ .

Se realizó la prueba de esmaltabilidad con un esmalte sensible que no favorece la adherencia del mismo, tratando de provocar la aparición de escama de pescado, obteniéndose resultados satisfactorios para ambos aceros

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

El acero para esmaltado debe tener propiedades tales, como una buena formabilidad, esmaltabilidad y apto para ser tratado térmicamente. La mayor deficiencia del acero bajo carbonó, es su pobre resistencia a la corrosión atmosférica y oxidación a temperatura alta. Afortunadamente, una capa de esmalte porcelanizado puede ser aplicada al acero, la cual proporciona una excelente barrera para prevenir la oxidación del acero, una vez recubierto, el acero esmaltado viene a ser un material compuesto con una combinación de propiedades convenientes para la agresividad del medio ambiente, el acero esmaltado se usa en parillas, utensilios para cocinar, estufas, calentadores de agua, aplicaciones de lavandería, lavaplatos, bañeras, lavabos y señales.

La capa de esmalte debe ser horneada a una temperatura de alrededor de los 850 C°, esto con el fin de que el esmalte se funda formando una capa vítrea de esmalte fuertemente adherida al metal base. En el proceso de horneado se producen gases y pueden presentarse algunos defectos e imperfecciones que pueden alterar o incluso comprometer la calidad de una pieza esmaltada. El defecto ESCAMA DE PESCADO se presenta como una astilla en forma de media luna ó escama de pescado sobre la superficie de la capa esmaltada siendo uno de los más problemáticos, por ser tan difícil su detección preventiva y por otro lado su reparación en caso de aparecer posteriormente.

La escama de pescado se atribuye a la falta de capacidad del acero para almacenar el hidrógeno absorbido durante el proceso de esmaltado ó en la atmósfera del horno durante el quemado a 850 C°, en el enfriamiento del esmalte, la solubilidad del hidrógeno en el acero disminuye y el hidrógeno que no fue atrapado ó almacenado en sitios propios de la estructura, se esparce en

la interfase acero esmalte. El hidrógeno molecular ejerce una presión tan grande que llega a fracturar el esmalte y aparecerá la escama de pescado.

Para prevenir la escama de pescado se debe tener control sobre el proceso de esmaltado para reducir al mínimo la captación de hidrógeno y el acero debe ser de gran capacidad para almacenar hidrógeno, los sitios para entrapar hidrógeno incluyen inclusiones no metálicas, huecos generados en la laminación en frío por la fractura de carburos de hierro y partículas de segundas fases tales como precipitados de TiN, TiS, TiC, MnS y BN.

Este trabajo esta basado sobre dos tipos de aceros, "Lote C" en el cual los sitios para almacenar hidrógeno están formados por huecos generados por la fractura de carburos de hierro ( $Fe_3C$ ) y "Lote U" donde los sitios son formados por precipitados de segundas fases TiN, TiS, TiC y MnS. Así el **objetivo** de este trabajo es la caracterización y evaluación de dos tipos de acero para ESMALTADO, con el enfoque de reducir la aparición del defecto ESCAMA DE PESCADO en el acero esmaltado.

# CAPITULO 2

## SELECCIÓN DEL ACERO PARA ESMALTADO PORCELANIZADO

### 2.1 QUE ES EL ACERO?

El hierro es el segundo metal más abundante sobre la tierra y menos costoso para extraerlo. Aunque el hierro puro tiene poco uso para las aplicaciones de ingeniería, el hierro y sus aleaciones son en total aproximadamente 90% de la producción mundial de metales. El más grande uso del hierro es en la producción de aceros planos al carbonó, las cuales son aleaciones de hierro y carbonó con pequeñas cantidades de otros elementos. Los aceros planos al carbonó tienen un importante uso en materiales de ingeniería, en la economía mundial por su fuerza, dureza, ductilidad y muy bajo costo comparado con otros metales. El acero puede ser rápidamente manufacturado en partes útiles porque este puede ser vaciado, trabajado, estampado, rolado, maquinado, soldado y tratado térmicamente para un amplio rango de propiedades mecánicas.

Una mayor deficiencia de los aceros planos al carbonó, es la pobre resistencia a la corrosión atmosférica y oxidación a temperatura alta, afortunadamente, una capa de esmalte porcelanizado puede ser aplicada al acero, la cual proporciona una excelente barrera para prevenir la oxidación del metal base, bajo las condiciones más adversas, una vez recubierto, el acero esmaltado viene a ser un material compuesto relativamente barato con una única combinación de propiedades especialmente convenientes para los severos rangos del medio ambiente y es usado en parillas, utensilios para cocinar, estufas, calentadores de agua, aplicaciones de lavandería, lavabos, bañeras y señales. (1)



## 2.2 QUE ES EL ESMALTE?

El esmalte es un compuesto vítreo que se usa para recubrir las piezas fabricadas de acero, evitando con ello la oxidación y la rápida corrosión del acero, generalmente se aplican dos capas de esmalte sobre la superficie de la pieza, ambas capas pueden ser aplicadas por polvo seco con sistema electroestático ó por inmersión en esmalte líquido, en la primer capa se usa una mezcla de esmalte conocida como frita la cual esta constituida por varios componentes como son; óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de boro, óxido de sodio y fluoruro de calcio, para reforzar la adherencia en la interfase metal-esmalte se adicionan pequeñas cantidades de óxidos de cobalto, níquel y cobre.

La segunda capa es formada con esmalte de color, la cual será la responsable del acabado estético de la superficie, una vez aplicadas las dos capas de esmalte, las piezas son horneadas para la fusión del esmalte a una temperatura de 850 C° y luego enfriadas hasta temperatura ambiente, este proceso es conocido como dos capas y una cocción (2C/1C) (2)

## 2.3 PROCESOS MODERNOS PARA LA FABRICACION DE ACERO.

La figura 2.1 muestra un diagrama de flujo de proceso de fabricación de acero y dichos procesos en forma particular son descritos como sigue:

### A. Hornos para Coque.

La planta de coque es donde el proceso de fabricación de acero inicia. El carbón con grado metalúrgico es calentado a temperaturas superiores a 1315 C° en ausencia de aire, al separarse del carbón los gases, aceites, brea y otros contaminantes transforman el carbón en coque, siendo este el

combustible principal en la fabricación de acero por Alto Horno. El proceso entero transcurre en un tiempo de 17.5 a 24 horas.

#### B. Alto Horno

En el alto horno, carbón coque, mineral de hierro y piedra caliza (la cual actúa como un agente limpiador) son continuamente cargados al horno por la parte superior, bajan lentamente y son expuestos al flujo de aire caliente, el cual quema el carbón coque liberando con esto más calor y gas, el gas remueve al oxígeno del mineral de hierro, el hierro fundido es removido del fondo del alto horno.

#### C. Horno Básico de Oxígeno

El Horno Básico al Oxígeno (HBO) es cargado con chatarra de acero y hierro fundido del alto horno, Se inyecta oxígeno dentro del horno, refinando el hierro a un acero de alta calidad.

#### D. Olla Metalúrgica.

La olla de refinar tiene un agitado magnético, calienta por inducción y permite agregar aleaciones al acero, hasta que los expertos en acero encuentran exactamente la temperatura y especificación química.

#### E. Desgasificado al Vacío

En el desgasificado al vacío se remueve el carbonó del acero fundido permitiendo con esto el desarrollo de nuevos grados de acero.

#### F. Colada Continua

En la colada continua el acero fundido es solidificado en un molde de cobre enfriado con agua. Este proceso proporciona mejores propiedades metalúrgicas con pocas impurezas, comparado con el vaciado en lingote.

#### G. Molino de Laminación Caliente.

Aquí es donde los planchones de colada continua son calentados para después pasar por los castillos de laminación donde son reducidos en espesor.

#### H. Decapado

En este proceso se usa ácido clorhídrico para remover la escama de óxido de la superficie del acero.

#### I. Molino de Laminación en Frío.

Este molino reduce el acero a los espesores finales requeridos por los clientes.

#### J. Recocido

El rollo debe ser calentado en un horno de recocido con una atmósfera no oxidante, para mejorar las propiedades mecánicas que habían sido incrementadas en el proceso de rolado en frío del acero.

#### K. Molino Templador

Un molino templador es usado para mejorar la planeza y para impartir una tensión y textura uniforme en la superficie de la lámina.

## **2.4 INFLUENCIA DEL ACERO EN EL PROCESO DE ESMALTE PORCELANIZADO.**

La mayoría de las partes de acero porcelanizado requieren una forma de fabricación, rangos de bordes como en algunos embutidos profundos que se usan para los lavabos ó en las bañeras, esto es dado por las propiedades mecánicas del acero las cuales deben ser conocidas para la fabricación de cada parte específica.

Sin embargo esta inevitable ventaja limita a los compradores en la selección del grado de acero cuando los requerimientos del esmaltado aumentan.

Existen cuatro áreas generales donde la selección del acero juega un papel importante.

- A. Prevenir ó eliminar los gases
- B. Prevenir ó eliminar los defectos relacionados con el hidrógeno del ambiente
- C. Proporcionar una reacción predicable, limpieza y rápido secado de la superficie.
- D. Características físicas después del Horneado.

## **A. PREVENCIÓN Ó ELIMINACIÓN DE GASES**

Varios factores determinan la necesidad de un acero que proporciona un acabado final liso sobre la porcelana “ no gaseada”

Los requerimientos estéticos son los principales, la salida de gases puede conducir a la piel de naranja, pequeños agujeros, manchas negras, etc.

La salida de gases relacionada con la química del acero se centra alrededor del carbonó, por lo tanto este debe ser eliminado virtualmente ó inhibido con elementos estabilizantes, se debe dar atención al tamaño, dispersión y localización de los carburos de hierro.

Dos métodos de descarburizacion son usados en la fabricación de acero, el recocido de rollo abierto y el desgasificado al vacío.

En el método de recocido de rollo abierto un par de alambres torcidos es introducido entre cada vuelta del rollo, después de laminado en frío para exponer la superficie entera del acero a la atmósfera del recocido. Se sopla vapor dentro del horno de recocido en tiempo y temperatura justa para sacar el carbón en forma de CO y CO<sub>2</sub>.

El desgasificado al vacío se lleva a cabo en la olla después de la fabricación básica, el acero fundido es agitado dentro de un vacío para remover los gases, dos de los cuales a esa temperatura son el CO y CO<sub>2</sub>.

Otros grados de acero esmaltado usan elementos estabilizadores tales como el titanio, niobio, vanadio y boro en la química para inhibir el carbón disponible.

## **B. PREVENCIÓN DE LOS DEFECTOS RELACIONADOS CON EL HIDRÓGENO DEL AMBIENTE.**

El hidrógeno es introducido en el acero sustraído de varias fuentes tales como el hidrógeno en forma de humedad en la atmósfera del horno, agua en arcillas ó adiciones al esmalte en el molino, residuos durante la preparación del metal y productos de combustión.

El hidrógeno causa dos problemas. La ebullición del hidrógeno, la cual ocurre en la temperatura de quemado, y la escama de pescado, que ocurre durante el enfriamiento del esmalte ó despues.

La ebullición del hidrógeno da como resultado una superficie esmaltada rugosa, algunas veces llamada piel de naranja, cuando la humedad del horno excede 2 %, la ebullición de hidrógeno puede ser un factor. Un acero con alta capacidad para guardar hidrógeno, dará protección contra altos niveles de humedad en el horno.

La escama de pescado es como astilla retrasada (en una forma que asemeja una escama de pescado) de la cocción y enfriamiento del esmalte final. Durante la cocción, el hidrógeno entra al acero en forma atómica. Cuando incrementa la temperatura, la solubilidad del hidrógeno en el acero incrementa, en realidad, a temperaturas de quemado, la solubilidad del hidrógeno puede ser mucho más que 1000 veces la de temperatura ambiente. Cuando la parte esmaltada enfría, la solubilidad del hidrógeno disminuye. El hidrógeno que ha sido disuelto en alta temperatura ahora se esparce y forma hidrógeno molecular. Si estas moléculas son atrapadas en huecos internos ó precipitados químicos en el acero, entonces la escama de pescado será prevenida, sin embargo si los sitios de hidrógeno son insuficientes, el hidrógeno atómico continua esparciéndose junto a la interfase metal base-esmalte. Si la presión generada es bastante alta sobreviene el levantamiento del esmalte ó la fractura del esmalte mismo, la escama de pescado ha ocurrido, este puede esperar horas, días, ó semanas después del quemado, especialmente donde el choque térmico es un factor.

Los sitios para atrapar hidrógeno se encuentran en dos categorías básicas: físicas y químicas. Los sitios físicos incluyen huecos, grietas, vacancias y dislocaciones. Los sitios químicos incluyen precipitados tales como TiN, TiC, TiS, AlN, Fe<sub>3</sub>C, BN, NbC, NbN, VC or VN, e inclusiones tales como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnS y MnO.

Los aceros para fabricar partes recubiertas con esmalte porcelanizado, son descritos en la especificación estándar de la norma ASTM 424 – 00 (3), de dicha norma se tomo la información de **la Tabla 2.1** en la cual se muestra la composición química típica de los aceros para esmaltado tipo I, tipo II, tipo III y las propiedades mecánicas típicas de los aceros para esmaltado son mostradas en **la Tabla 2.2**, la descripción de los tipos de acero es como sigue:

Los aceros esmaltados tipo I tienen un nivel bajo de carbón, este material es apropiado para la práctica de una capa de esmalte directa y también para cubrir con capa base y capa esmaltada, tiene buena resistencia al flambeo y buena formabilidad, son producidos conteniendo huecos microscópicos, grietas y dislocaciones, estos aceros contienen aproximadamente 0.03 % de carbonó ó más y son enrollados en el molino caliente aproximadamente 705 C° mínimo para permitir la formación de carburos de hierro grandes y endurecidos. Estos carburos causan extensos desgarres y cortaduras en su alrededor dentro del acero en el rolado en frío. (Una reducción de aproximadamente 50 % ó más es requerida) ellos son recocidos por el método de rollo abierto para remover el carbonó a menos de 0.008 %. La acción mecánica en el rolado en frío y la descarburación proporcionan excelentes sitios para atrapar hidrógeno y excelente resistencia a la escama de pescado.

Los aceros esmaltados tipos II y III son apropiados para aplicaciones donde se emplean procesos de base y capa esmaltada, la composición de estos aceros se obtiene en las operaciones de fusión. El acero tipo II es vaciado en colada continua conteniendo bajo carbono y adiciones de boro para prevenir la escama de pescado, se desempeña bien en operaciones de estirado y dobléz, pero tiene limitada la formabilidad en el embutido. El tipo III es un acero intersticial free, tiene buena resistencia al flambeo y excelente formabilidad, ambos usan sitios químicos como trampas de hidrógeno. El hidrógeno tiene fuerte afinidad por varios precipitados y los sitios creados por las inclusiones ofrecen buena resistencia a la escama de pescado.

### **C. PROPORCIONAR UNA REACCIÓN PREDECIBLE, LIMPIEZA Y RÁPIDO SECADO DE LA SUPERFICIE.**

Los aceros para esmaltado deben ser suministrados con una superficie limpia, libres de finos de hierro, óxidos ó manchas del proceso.

Los aceros deben ser proporcionados con una capa protectora de aceite que sea fácilmente removida y que no contenga cloruros ó silicones, los niveles de reacción alta pueden causar manchas en el lavado, dificultan el buen enlace entre el oxido de hierro y la capa de esmalte.

La rugosidad también debe ser considerada en la habilidad del acero para tener un buen embutido en la fabricación de las piezas.

## **D. CARACTERISTICAS FISICAS DEL ACERO DESPUES DE HORNEADO.**

En la selección de acero para esmalte porcelanizado debe considerarse después del horneado los requerimientos de esfuerzos, resistencia al flambeo, resistencia a la torcedura, otras variables que deben también ser consideradas son la geometría de la parte, temperaturas de horneado, el numero de horneadas, espesor del acero y si la capa de esmalte será por uno ó por dos lados.

### **2.5 TIPOS DE ACERO PARA ESMALTE PORCELANIZADO**

#### **2.5.1 ACEROS TRADICIONALES**

El proceso de colada continua en la fabricación de los productos de acero para esmaltado esta cada vez más difundido, pero el problema de escama de pescado está todavía presente, la escama de pescado es causada por el hidrógeno que desarrollando una presión creciente en la interfase acero-esmalte genera una ruptura en el esmalte.



Las especificaciones estandarizadas para la producción de aceros con suficiente resistencia a la escama de pescado son: una temperatura de enrollado en caliente suficientemente elevada ( $>720\text{ C}^\circ$ ) (4).

Esta técnica permite a los carburos crecer (cementita), estos carburos durante la reducción en frío se fracturan y producen microporos en la estructura del acero, estos microporos actúan como trampas que influyen en la difusividad y la solubilidad del hidrógeno en el acero de un modo significativo.

La presencia de estos microporos conduce a una degradación de las propiedades mecánicas del acero, reduciendo con esto la capacidad de embutido del acero, para restablecer las propiedades mecánicas es necesario recurrir a complejos procedimientos de recocido como el de bobina abierta (open coil) en atmósfera decarburante.

## **2.5.2 NUEVOS ACEROS PARA ESMALTADO**

Recientemente, para superar los problemas ligados al proceso de recocido en bobina abierta (por ejemplo: largos tiempos de recocido, falta de homogeneidad de las características mecánicas a lo largo de la banda, etc.) uno de los principales objetivos en el programa de búsqueda es la puesta a punto del proceso de fabricación para un nuevo tipo de acero: una calidad Interstitial Free (IF) dedicada a aplicaciones para esmaltado. Estos aceros tienen un bajo contenido de carbono (30-50 ppm) y de nitrógeno (40-100 ppm) estabilizado por medio de adiciones de titanio o niobio y contenidos variables de azufre.

Las calidades (IF) muestran mayores prestaciones de embutido por su bajo contenido en carbono. El bajo contenido en carbono se alcanza desde los primeros pasos del proceso de fabricación por medio de la

desgasificación en vacío, lo que permite utilizar como proceso de recocido final el estático o el continuo.

Un inconveniente en estos tipos de aceros puede ser la menor adhesión superficial del esmalte debido a la presencia de Ti libre residual, las características de resistencia del acero al defecto de escama de pescado dependen del número y de la naturaleza de las trampas que puedan capturar el hidrógeno.

La capacidad de retener el hidrógeno esta determinada por el contenido de inclusiones, de las segundas fases y más en general, de los defectos reticulares. Es conocido que el sistema de trampas puede estar constituido por la precipitación de los compuestos del Ti. En particular compuestos de Ti con C, N, S. ej.  $Ti(C,N)$ ,  $TiS$ ,  $Ti_4C_2S_2$ . Las temperaturas a las que se producen las precipitaciones de estos compuestos son aquellas que contemplan la laminación en caliente y el enrollado del material (intervalo  $750 - 1250C^\circ$ ) la fracción volumétrica y la morfología de los precipitados dependen de la composición química y del tratamiento termomecánico de la banda.

## **2.6 FORMABILIDAD DE LOS ACEROS ESMALTADOS**

Todos los grados de acero vaciados en colada continua muestran una mejor formabilidad que los grados de acero vaciados en lingote. La mejora en formabilidad se debe principalmente a la limpieza interna de los aceros con menores inclusiones de óxidos, lo que proporciona mayor ductilidad.

La primera consideración para un productor de partes esmaltadas es como seleccionar el acero para fabricar la parte con un porcentaje de rompimiento en el estampado aceptable menor a 0.5 %. Las operaciones en el formado de las hojas de acero son muy variadas en tipo, cantidad de deformación y

velocidad de deformación, de manera que una simple prueba no puede proporcionar la predicción exacta de la formabilidad del acero bajo todas las condiciones, existen una variedad de métodos usados para un rango o grado de formabilidad de los aceros, pero el método mas ampliamente usado compara las propiedades mecánicas de los aceros determinadas en el ensayo de tensión uniaxial. La orientación del sentido de rolado de la hoja de acero en el embutido juega un papel importante en el modo de fractura, durante el rolado, las inclusiones y otros defectos son elongados en dirección del rolado, resultando en líneas débiles, si el eje de doblez es paralelo a la dirección de rolado, existe una tendencia de fractura a lo largo de las líneas formadas por la elongación de las inclusiones y otros defectos, un ensayo de tensión transversal puede ser usado para evaluar la probabilidad de fractura durante la operación de doblado; baja elongación de tensión indica un gran riesgo de aparecer fractura en la parte mas esforzada.

En general los aceros esmaltados con alto valor de  $n$  ( coeficiente de endurecimiento por deformación determinado en el ensayo de tensión) pueden distribuir el esfuerzo de deformación mas uniformemente. En materiales con alto valor de  $n$ , los esfuerzos de flujo se incrementan rápidamente con deformación y distribuyen deformación adicional a otras regiones de baja deformación y bajo esfuerzo de flujo, puesto que el valor de  $n$  es el coeficiente de endurecimiento por deformación de la curva de tensión esfuerzo-deformación, un alto valor de  $n$ , resulta de una diferencia grande entre el esfuerzo de cedencia y el esfuerzo de ultima tensión, la relación de Esfuerzo Ultimo de Tensión / Esfuerzo de Cedencia proporciona otro indicador para el estiramiento en la formabilidad.

El embutido de las hojas de metal resulta en elongación en una dirección y compresión en la dirección ortogonal de la hoja, un ejemplo es el embutido del fondo de una copa. Un disco circular es sujetado entre dos dados en forma de anillos circulares, mientras el fondo plano es presionado, el centro del disco esta

dentro del dado, las orillas del disco son arrastradas hacia adentro para formar las paredes de la copa, el metal en las paredes es estirado radialmente por las fuerzas del punzón, pero el metal es comprimido en la dirección circunferencial, con una disminución en el diámetro principalmente las partes esmaltadas tienen alguna región formada por la operación de embutido.

El valor  $r$  (proporción de deformación plástica determinado en el ensayo de tensión) es un indicador fuerte de la embutibilidad de las hojas de acero, el valor  $r$  es definido como la razón de deformación en el ancho con respecto a la deformación en el espesor en un ensayo de tensión, un alto valor de  $r$  indica que un material resistirá el adelgazamiento de la hoja de acero durante la deformación, pero se deformará más en la dirección transversal, entonces la mayoría de las fracturas en la hoja durante el formado son causadas por adelgazamiento localizado, la habilidad para resistir el adelgazamiento es una buena medida de formabilidad. Un alto valor de  $r$  indica un material con buenas propiedades de embutido, frecuentemente el valor  $r$  varía con la dirección de la hoja y para una copa embutida esto conduce a variaciones en la altura de las paredes, formándose orejas. Una mejor medida de embutibilidad que el valor  $r$  es el  $r_m$  (promedio de anisotropía normal), el cual se define como un promedio de valor  $r$  para las tres direcciones relativas a la dirección de rolado de la hoja ( $\{r_0 + 2r_{45} + r_{90}\} / 4$ ).

El valor  $\Delta r$  (anisotropía planar) es definido como  $(r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2$ , y es una medida de la variación del valor  $r$  con la dirección del plano de la hoja, un valor bajo de  $\Delta r$  (aproximado a cero) es deseado para reducir la dimensión de las orejas.

**Los aceros tipo I** (aceros decarburizados por recocido) tienen un excelente comportamiento en las operaciones de estirado y doblado lo cual es evidente del bajo esfuerzo de cedencia, alta elongación y alto valor de  $n$ .

Porque con un bajo valor de  $r$ , los aceros decarburizados por recocido tienen limitada la formabilidad para partes de embutido profundo como lavabos y tinas de baño.

**Los aceros tipo II** (substitutos del hierro esmaltado bajo carbono y típicamente con adiciones de boro para prevenir la escama de pescado) estos aceros tienen formabilidad similar que los aceros del tipo I la mayoría de los aceros del tipo II son fabricados con alto esfuerzo de cedencia, baja elongación y ligeramente más bajo valor  $n$ , que los aceros tipo I. Se desempeñan bien en operaciones de estirado y doblaje, pero por su bajo valor  $r$ , tienen limitada la formabilidad para embutidos profundos.

**Los aceros tipo III** ( interticios libres, estabilizados con titanio ó titanio + niobio) estos aceros son generalmente más reconocidos por su mejor formabilidad que cualquiera de los aceros esmaltados. Estos aceros exhiben bajo punto de cedencia, alta elongación, alto valor  $n$  y muy alto valor  $r$ . Por estas propiedades, los aceros tipo III se desempeñan bien en estirado biaxial, doblaje y embutido extraprofundo.

## 2.7 ADHERENCIA

La adherencia del esmalte es uno de los problemas que se puede encontrar con los aceros tipo III, esta baja adherencia se debe a la presencia del  $TiFe_2O_4$  en la superficie del acero, el cual es poco soluble en el esmalte (5, 6).

Existen varias soluciones para remediar este problema; una temperatura de cocción más elevada, la utilización de precipitación de partículas de níquel puro (flash Níquel) en la superficie de los aceros micro aleados con titanio para asegurar la formación de  $FeNi$  durante el calentamiento y reemplazar

parcialmente los compuestos de  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$  cuya presencia garantiza las reacciones de esmaltado y conduce a veces a una falta de adherencia.

Se a encontrado igualmente un vinculo entre la adherencia del esmalte y un exceso de titanio, en efecto un exceso de Titanio de 0.06% en peso disminuye la adherencia del esmalte, la adherencia del esmalte sobre el acero resulta en parte de la precipitación de partículas metálicas en la interfase de la aleación, a menos de 600 °C cuando el esmalte es todavía poroso en la atmósfera, la superficie está oxidada de Magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y Hematita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la ecuación siguiente se usa para determinar el exceso de titanio.

$$\text{Ti}_{\text{excc.}} = \text{Ti}_{\text{tot.}} - 47.88 \times (\text{N}/14.01 + \text{S}/32.06 + \text{C}/12.01)$$

Cuando el esmalte funde a temperatura más alta, éste se convierte en impermeable en la atmósfera, los óxidos se disuelven entonces en el esmalte, donde el hierro está presente como  $\text{Fe}^{\text{II}}$  y  $\text{Fe}^{\text{III}}$  y el oxígeno como  $\text{O}_2$ , para reforzar la adherencia en la interfase metal-esmalte se adicionan pequeñas cantidades de óxidos de cobalto, níquel y cobre al esmalte y de acuerdo con las leyes de la Termodinámica, se observan en la interfase, la precipitación de  $\text{FeNi}$ ,  $\text{FeCo}$ ,  $\text{FeCu}$ , así como de las partículas metálicas bajo la forma de dendritas, estas son responsables del desarrollo de una adherencia mecánica generada por un nivel elevado de la rugosidad, la cual juega un papel importante en el factor de adherencia.

Además en los aceros estabilizados con titanio, no hay carbono soluble que pueda convertir el acero más reductor y por lo tanto ayudar a la formación de la precipitación de la aleación, por esta razón se puede observar adherencias de mala calidad durante la utilización de estos aceros.

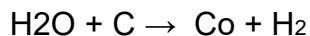
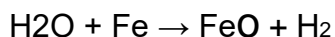
El azufre es otro elemento capaz de convertir el acero más reductor, pero en estos aceros, se fija químicamente con el titanio y manganeso bajo la forma de precipitados más o menos estables, la capa de transición vítrea resulta de una difusión mutua entre el acero y el esmalte, la adherencia entre el acero y la capa de transición vítrea está asegurada por enlaces de tipo metálico, mientras que la adherencia entre la capa de transición vítrea y el esmalte lo es por la existencia de enlaces iónicos y covalentes.

## 2.8 ESCAMA DE PESCADO

Entre la gran diversidad de defectos e imperfecciones que pueden alterar o incluso, comprometer la calidad de una pieza esmaltado, la escama de pescado es uno de los más problemáticos, al ser tan difícil, por un lado su detección preventiva y por otro, su reparación en caso de aparición posterior, los orígenes de este defecto se atribuyen a las técnicas y a las condiciones de esmaltado, así como a las características intrínsecas del acero. Aparece cuando el hidrógeno molecular (proveniente de la recombinación del hidrógeno atómico disuelto en el acero  $\frac{1}{2} H_2 \leftrightarrow H_{at}$ ) se acumula localmente en la interfase acero-esmalte durante el enfriamiento de las piezas esmaltadas.

Existen dos fuentes principales de hidrógeno atómico en el acero; el agua contenida en el esmalte mismo y la atmósfera del horno de cocción, por ejemplo el punto de rocío del horno puede tener una gran importancia en la aparición del defecto escama de pescado.

Durante la cocción, el agua genera hidrógeno molecular de acuerdo a la reacción:



A la temperatura de cocción, el hidrógeno atómico dona su electrón a la capa conductora 3d del hierro y se convierte en un protón, lo que explica su elevado coeficiente de difusión ( $10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/sec a 20°C, es decir  $10^{12}$  veces el del carbono), por lo tanto la solubilidad del hidrógeno en la austenita aumenta fuertemente con relación a la ferrita, siendo esta la razón por la que el acero se carga en H atómico durante la cocción del esmalte, durante el enfriamiento, el H atómico en sobresaturación sale de la red y se acumula en la forma de hidrógeno gaseoso en la interfase acero-esmalte, aumentando así el riesgo de ESCAMA DE PESCADO.

## 2.9 TRAMPAS DE HIDROGENO

Para evitar la aparición de la escama de pescado, los fabricantes de acero han desarrollado aceros de alto poder de absorción del hidrógeno, es decir, portadores de trampas de hidrógeno, otra vía para evitar la aparición de escama de pescado consiste en minimizar la fracción de austenita (y así, la captación de hidrógeno durante la cocción) utilizando los aceros ultra bajo carbono estabilizados con titanio (ULC Ti), Las trampas de hidrógeno pueden clasificarse en tres categorías: trampas atractantes, trampas físicas y trampas mixtas.

En las trampas atractantes, los átomos de hidrógeno están sometidos a fuerzas atractivas que son de cuatro tipos: campo eléctrico (vacancia electrónica unida a los defectos), campos de tensiones (inducidos por las dislocaciones, juntas de granos), gradiente de temperatura y fuerza “termodinámica”.

Las trampas físicas son los lugares energéticos favorables para el hidrógeno, el carácter reversible o irreversible de las trampas de hidrógeno está relacionado con la probabilidad de un eventual retorno de la trampa hacia una situación normal de la red cristalina, hay que destacar que es más



fácil para el átomo de hidrógeno abandonar una trampa atrayente que una trampa física, son numerosas las trampas, desde átomos en solución sólida hasta los precipitados, pasando por vacancias y juntas de granos, las dislocaciones y los huecos.

Las trampas de hidrógeno del tipo precipitados ( $\text{TiN}$ ,  $\text{Ti}_4\text{S}_5$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{MnS}$ ) son formados con el decremento de temperatura de laminación caliente en la secuencia siguiente de precipitación  $\text{TiN}$ ,  $\text{TiS}$  y  $\text{TiC}$ . (7)

Debido a la composición química y al proceso termomecánico,  $\text{TiN}$  se encuentra a menudo en los aceros (ULC Ti) de mayor tamaño (de algunas decenas de nm a varios  $\mu\text{m}$ ), mientras que el  $\text{TiC}$  es el más pequeño (de algunos nm a algunos cientos de nm).

En los aceros laminados en frío del tipo intersticios libres, la escama de pescado se evita más eficazmente utilizando precipitados  $\text{TiN}$  más que  $\text{TiC}$ , sabiendo que los  $\text{TiN}$  contenidos en el acero ultrabajo carbono son de gran tamaño, de forma rectangular (cristal del tipo  $\text{NaCl}$  con un parámetro de red de 0.424 nm (8) y duro, interpretamos lo siguiente; el laminado en frío genera huecos de un importante efecto de existencia de trampas a lo largo de precipitados de  $\text{TiN}$ .

Yoon y Kim (9) trabajaron sobre el acero ULC-Ti+S y descubrieron que el sulfuro de Titanio era más eficaz como almacenamiento de hidrógeno (huecos generados a lo largo de los precipitados) que el nitruro de titanio, además, son más uniformes y de mayor tamaño, que lo que podría esperarse a partir de su composición química. El tamaño de  $\text{TiS}$  fue determinado por TEM, como 240-310 nm.

Los aceros con intersticios libres estabilizados con Ti para esmaltado tienen contenidos de C, N, S y Ti más elevados que los aceros tradicionales

con intersticios libres para estampado profundo, empleados, por ejemplo, en el sector automovilístico, la presencia de estos elementos asegura que en el acero se forme una cantidad de precipitados suficiente para favorecer la formación de trampas para el hidrógeno en la fase de cocción del esmalte, y por consecuencia, reducir el riesgo de que se manifieste el defecto de escama de pescado.

La resistencia a la escama de pescado depende de la baja solubilidad del hidrógeno en  $\alpha - \text{Fe}$ , de la rápida difusión del hidrógeno a temperatura ambiente y de la adherencia del esmalte porcelanizado.

Con mucha frecuencia se calcula la difusión de hidrógeno con el índice de compenetración del hidrógeno

$$H_2 I = \frac{t_0}{d^2}$$

donde:  $t_0$  = tiempo de compenetración de hidrógeno expresado en min.

$d$  = espesor de la muestra de acero expresado en mm.

Para asegurar un bajo riesgo de que se manifieste el defecto de escama de pescado el  $H_2 I$  debe ser al menos 6.67 min./mm<sup>2</sup>. El  $H_2 I$  aumenta cuando aumenta la fracción volumétrica de los precipitados, el peligro de que se manifieste la escama de pescado aumenta cuando disminuye el índice de compenetración de hidrógeno. Sin embargo, es cierto que un número elevado de precipitados influencia negativamente las características de estampado de los aceros con intersticios libres. Además, un contenido más elevado de Ti crea problemas de colada debido a la obstrucción de la lanza.

## 2.10 DETECCION DE LA ESCAMA DE PESCADO

Se han utilizado varios métodos para medir la eficacia de las trampas de hidrógeno o la resistencia a la escama de pescado (10), uno de los métodos consiste en esmaltar muestras de acero; para tratar de provocar la aparición de escamas utilizando esmaltes sensibles, o induciendo choques térmicos.

Estos esmaltes sensibles no contienen óxidos de níquel, cobalto y cobre que favorezcan la adherencia y faciliten la aparición del defecto bajo algunas condiciones de esmaltado, el resultado de esta prueba es doble; porque la muestra presenta un aspecto perfecto, o está recubierto de escama de pescado.

Este método no permite por tanto cuantificar la capacidad de resistencia del acero a la escama de pescado, esta prueba se considera a veces como demasiado estricta, se utiliza para el desarrollo de nuevos productos, métodos de esmaltado que se acercan lo máximo posible a los procesos utilizados por los clientes: 1 capa/1 cocción, 2 capas/1 cocción, 2 capas/2 cocciones.

Un segundo método, utilizando para medir la resistencia a la escama de pescado, se basa en la difusión del hidrógeno a través del acero, en este se mide la permeabilidad (prueba de Ströhlein), producto de la concentración del hidrógeno disuelto y del coeficiente de difusión (estacionario).

La Prueba de Ströhlein. Consiste en medir el tiempo de saturación de las trampas de hidrógeno, primero se coloca la muestra sobre un recipiente que contiene un electrolito que produce hidrógeno y en la parte inferior de la muestra se coloca un dispositivo en forma de embudo lleno de agua, unido a un capilar cuando el hidrogeno se difunde en el acero, se forman unas pequeñas burbujas que hacen que el nivel del agua suba en el capilar, El trazador grafico y la computadora registran el nivel del agua, de esta curva se determina to como punto de intersección entre el eje del tiempo y la tangente en el punto en que el nivel del agua empieza aumentar rápidamente.

La ecuación siguiente se usa para calcular en índice de compenetración del hidrogeno como medida de la susceptibilidad a la escama de pescado.

La penetración (TH) se determina por:

$$TH = t_0/d^2$$

Donde:

$t_0$  es el tiempo de penetración y  $d$  el espesor del acero. La norma europea (EN 10209)(11) recomienda una penetración de 6.67 min./mm<sup>2</sup> para una resistencia mínima a la escama de pescado.

En la figura 2.2 se observa la superficie de una muestra de acero esmaltada, la cual presenta desprendimiento o' saltado del esmalte en forma de media luna, este defecto se conoce como escama de pescado.

En la figura 2.3 se observa la superficie de una muestra de acero esmaltada, la cual tiene un buen acabado en el esmalte y no presenta el defecto de escama de pescado.

# CAPITULO 3

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 SELECCIÓN DE ACERO

Después de leer información concerniente a los tipos de aceros laminados en frío, usados en la industria del esmalte porcelanizado y entendiendo las características mínimas que estos aceros deben reunir para fabricar partes esmaltadas, se seleccionaron dos lotes de acero para estudiar sus características químicas, mecánicas, microestructurales y la capacidad para ser esmaltados, buscando la comparación con las características de los tipos de acero utilizados en la industria del esmalte porcelanizado.

Se le denomina Lote C al acero bajo carbonó calibre 22 y Lote U al acero ultra bajo carbono con intersticios libres (IF) calibre 23, para cada tipo de acero se obtuvieron 10 muestras cada una de diferente rollo a 30 metros del fin del mismo, en la línea de tensionivelado, las muestras del “Lote C” fueron identificadas como C1,C2,,,,C10 y las muestras del “Lote U” fueron identificadas como U1,U2,,,,U10, de cada una de las muestras se preparó:

Una probeta para realizar análisis químico por espectrometría de emisión óptica y una probeta para determinar el porcentaje de carbono y nitrógeno utilizando equipos de combustión interna y detección infrarroja.

Tres probetas en las direcciones  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  con respecto al sentido de rolado, estas fueron usadas para ensayo de tensión y dureza.

Una probeta para estudio metalográfico, más una probeta de cada lote analizada en el microscopio electrónico de barrido.

Una probeta que fue esmaltada con esmalte sensible a la adherencia y escama de pescado.

### **3.2 COMPOSICION QUIMICA**

La composición química tiene un papel muy importante, para lograr las características de funcionalidad del acero, por esa razón en este desarrollo se determinará la composición química para cada muestra utilizando un espectrómetro de emisión óptica marca spectro<sup>(12),(13)</sup> y la determinación de carbono y nitrógeno se hará por combustión y detección infrarroja, utilizando equipos marca eltra<sup>(14)</sup>.

### **3.3 ENSAYOS DE TENSION Y DUREZA**

Los ensayos de tensión y dureza son métodos utilizados para conocer las características mecánicas de los materiales, las cuales son indicativas de la calidad del producto en cuanto a resistencia, formabilidad y embutibilidad de los materiales, para realizar el ensayo de tensión se utilizara una máquina universal electromecánica de 5 toneladas, marca Tinius Olsen serie H50K-S <sup>(15),(16)</sup> y para realizar el ensayo de dureza rockwell B se usa un durómetro de banco marca Instron serie 600<sup>(17)</sup>, en este estudio se realizará el ensayo de tensión y dureza en probetas obtenidas a (0°, 45°, 90°) respecto al sentido de rolado para cada muestra y se determinará:

**Esfuerzo de Cedencia (Ksi)**

**Esfuerzo Último de tensión (Ksi)**

**Porcentaje de Elongación (% Elong)**

**Valor r al 16% (Coeficiente de Anisotropía plástica)<sup>(18)</sup>**

**Valor n del 10 al 20% (Coeficiente de endurecimiento por deformación)<sup>(19)</sup>**

**Dureza Rockwell**

### **3.4 ANALISIS MICROESTRUCTURAL**

En la microestructura interna de los aceros podemos conocer la distribución y tamaño de grano<sup>(20)</sup>, así también la presencia de precipitados de segundas fases<sup>(21)</sup>, la microestructura interna tiene una relación directa con las propiedades mecánicas y en estos aceros usados para ser esmaltados, los precipitados de segundas fases juegan el papel de trampas de hidrógeno por esa razón determinaremos el tamaño de grano y caracterizaremos los precipitados de las segundas fases presentes, utilizando un microscopio óptico marca Zeiss, un analizador de imágenes (MSQ) y un microscopio de barrido electrónico (SEM) marca FEI, Modelo Quanta 200.

### **3.5 RECUBRIMIENTO DEL ACERO CON ESMALTE**

Para medir la eficacia de las trampas de hidrógeno ó la resistencia a la escama de pescado se pueden utilizar varios métodos, para este caso usaremos el método considerado algo estricto, el cual consiste en esmaltar muestras de acero; para tratar de provocar la aparición de escamas utilizando esmaltes sensibles que no contienen óxidos de níquel, cobalto o cobre para que no favorezcan la adherencia y faciliten la aparición del defecto, el resultado de esta prueba es doble; porque la muestra presenta un aspecto perfecto, o está recubierto de escama de pescado.

# CAPITULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 COMPOSICION QUIMICA

Los aceros para esmaltado son aleaciones constituidas por elementos químicos, donde la base es el fierro que ocupa mas del 99.0 % en la aleación y el resto son otros elementos que tienen un efecto particular en el proceso de transformación, para lograr las características buscadas de funcionalidad del acero, la especificación ASTM A 424 es la que aplica a los aceros esmaltados y de ella se obtuvo la Tabla 2.1 donde se especifica los porcentajes máximos de los elementos químicos constituyentes de los aceros tipos I, II, III.

En este estudio se obtuvo la composición química de cada una de las 20 muestras de acero, los resultados de composición química individuales del lote C, se encuentran en la Tabla 4.3 y los del lote U se muestran en la Tabla 4.4, para cada lote, formado por diez muestras, se determinó el promedio y la desviación estándar y son los que se muestran en la Tabla 4.5 y Figura 4.1, analizando los resultados de la Tabla 4.5 e interpretando la Figura 4.1 se observan diferencias significativas en algunos elementos entre el lote C y lote U, las cuales son descritas en la Tabla 4.6

El contenido de carbono del lote U confirma que es un acero ultra bajo carbono y además tiene porcentajes mayores de Mn, S, Ti, N, Cu que los aceros del Lote C, los elementos microaleantes anteriores serán los responsables de formar los precipitados de segundas fases como TiN, TiC, TiS, AlN, MnS dejando el acero con intersticios libres y además estas segundas fases servirán de trampas de hidrogeno cuando este difunda en el interior del acero al hornear el esmalte alrededor de 850 C°



Considerando que la especificación ASTM A 424 Tipo II presenta los porcentajes máximos de los 4 elementos químicos y observando que los porcentajes promedio obtenidos en el análisis de los 4 elementos químicos son menores a los de la especificación ASTM A 424, como se observa en la Figura 4.2, entonces la composición química del acero lote C, cumple para ser considerado como un acero Tipo II.

En la comparación del acero ASTM A 424 Tipo III con el acero de lote U, encontramos que ambas composiciones químicas son muy similares, como se observa en la Figura 4.3, por lo tanto el acero de lote U, es similar al acero Tipo III

## **4.2 ENSAYOS DE TENSION Y DUREZA**

Los resultados individuales de los ensayos de tensión de las muestras del “lote C” así como su promedio y desviación estándar están contenidos en las Tablas 4.7, 4.8, 4.9 y los de “lote U” se presentan en las Tablas 4.10, 4.11, 4.12.

Las gráficas de esfuerzo contra deformación de los ensayos de tensión realizados a la muestra 10 C en sentido longitudinal, transversal y diagonal se presentan en las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 en las cuales se observa el esfuerzo de cedencia, esfuerzo último de tensión, % elongación, valor  $r$  y valor  $n$ .

Revisando los valores de la figura 4.7 observamos que el Esfuerzo de cedencia y  $H_{rb}$  de lote U, son menores que los del lote C, considerando que cuando la diferencia entre el Esfuerzo de cedencia y el Esfuerzo último de tensión es grande, se obtiene un alto valor  $n$ , el cual es indicativo que el material distribuye el esfuerzo uniformemente y por lo tanto tiene una alta deformación, por otro lado un valor  $R_m$  alto indica capacidad de buena formabilidad, por lo tanto el acero del lote U tiene mejor deformación y excelente formabilidad ó embutibilidad, que el acero del lote C.

Comparación de los resultados de propiedades mecánicas de los aceros en estudio contra los resultados típicos de aceros A 424 Tipo II y Tipo III, reportadas por el instituto de porcelana esmaltada (PEI).

La Figura 4.8 compara los resultados del lote C contra A 424 Tipo II, Las propiedades mecánicas de ambos aceros son similares, excepto en la dureza y el valor  $R_m$ , el acero del lote C presenta un valor  $R_m$  mayor al del acero Tipo II, por lo tanto el acero de Lote C tiene mayor capacidad de embutibilidad que el acero tipo II

La Figura 4.9 muestra los valores de propiedades mecánicas de los aceros de lote U y los aceros A 424 Tipo III, sobresaliendo las diferencias en dureza y valor  $R_m$  del acero de lote U, por lo tanto ambos aceros son similares, pero una ventaja sobre mayor embutibilidad la presenta el acero de Lote U

### **4.3 ANALISIS MICROESTRUCTURAL**

#### **4.3.1 MICROESTRUCTURA INTERNA DE LOS ACEROS**

La microestructura interna de los aceros, principalmente el tamaño de grano, tiene una relación directa con las propiedades mecánicas, un tamaño de grano grueso es característico de un acero que presenta bajo esfuerzo cedencia, alto porcentaje de elongación y baja dureza, un tamaño de grano fino es característico de un acero con alto esfuerzo de cedencia, bajo porcentaje de elongación y alta dureza, en el estudio de estos dos lotes de acero se determino el tamaño de grano para cada muestra, las microestructuras correspondientes a cada muestra están contenidas en el Apéndice A, A1 a A10

La microestructura mostrada en la figura 4.10a corresponde a la muestra 1C de lote C acero bajo carbono y en la figura 4.10b tenemos la microestructura de la muestra 7U de lote U acero ultrabajo carbono con intersticios libres, en ellas se aprecia diferente textura de la forma de granos, lo cual trae consigo

diferencias en el esfuerzo de cedencia y el porcentaje de elongación de las características mecánicas de los dos lotes de acero, debido a que el tamaño de grano del acero de lote C es más pequeño y las fronteras de grano son ricas en precipitados de carburos de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), la resistencia para que el material sea deformado es mayor en el acero del lote C que en el acero Lote U.

La figura 4.11 presenta el tamaño de grano determinado en cada muestra, donde observamos que los tamaños de grano están contenidos entre ASTM 7.0 a 9.0, de la misma manera no existe un tamaño uniforme para todo el lote y los tamaños de grano se entrelazan en ambos lotes, indicando con esto que entre las muestras del mismo lote existen diferencias significativas, pero no son relevantes para la funcionalidad del acero.

La Figura 4.12 presenta la relación entre esfuerzo de cedencia, %elongación con respecto al tamaño de grano, donde podemos observar que cuando el tamaño de grano es grueso M6, el valor de esfuerzo de cedencia es más bajo que el resto de los otros valores y así mismo el % de elongación es mayor para M6 que para el resto de los valores obtenidos en las otras muestras y el caso donde el tamaño de grano es más fino M7, el valor de esfuerzo de cedencia es más alto y el % de elongación es más bajo que el resto de todos los otros valores, por lo tanto el tamaño de grano es directamente proporcional al valor del esfuerzo de cedencia e inversamente proporcional al % de elongación.

### **4.3.2 PRECIPITADOS DE SEGUNDAS FASES**

Los precipitados de segundas fases son deseados en los aceros esmaltados, dichos precipitados y los huecos que se forman alrededor de ellos cuando son fracturados ó removidos durante la laminación en frío, se convierten en zonas atrayentes de hidrogeno durante la difusión del mismo en el interior del acero, de esta manera se disminuye la cantidad de hidrogeno atómico en la interfase metal-esmalte y por lo tanto las moléculas formadas de  $\text{H}_2$  que pudieran

incrementar la presión en la interfase metal-esmalte durante el enfriamiento son mínimas evitando con esto la formación de la escama de pescado, los precipitados correspondientes a cada muestra están contenidos en el Apéndice A, A11 a A20

Las figuras 4.13a y 4.13b corresponden a los precipitados de los aceros de lote C y lote U, se usó el reactivo químico llamado picral para revelar los precipitados que se aprecian en las figuras, para conocer de que precipitados se trata, se hizo el microanálisis por microscopio de barrido electrónico, los resultados individuales están contenidos en el Apéndice A, A21 a A22.

La Figura 4.14 se refiere al análisis por microscopio de barrido electrónico a 8000 magnificaciones, determinando que en la muestra 1C los precipitados encontrados son carburo de hierro ( $Fe_3C$ ) y óxido de hierro ( $FeO$ ).

Las figuras 4.15 y 4.16 corresponden al análisis por microscopio de barrido electrónico realizado a la muestra 7U, en el análisis se determinó la presencia de precipitados de  $TiN$ ,  $TiC$ ,  $MnS$ ,  $TiS$ .

Los resultados del análisis por microscopio de barrido electrónico nos indican que los precipitados del lote C y los del lote U son diferentes, en el lote C encontramos la presencia de carburo de hierro fragmentado y desgarres en el interior del acero, lo que confirma la teoría de que en la laminación en caliente se busca formar carburos de hierro grandes para que sean fracturados durante la laminación en frío y provocar estos huecos requeridos para atrapar hidrógeno, teniendo la desventaja de propiedades mecánicas limitadas para el embutido extraprofundo del acero, en cuanto a los precipitados encontrados en el lote U, tenemos al nitruro de titanio que es un precipitado duro en forma de cristal y durante la laminación en frío se desprende de la matriz que lo contiene trayendo consigo un despostillamiento de los bordes del nitruro de titanio y un ensanchamiento de la cavidad alrededor del mismo, el otro precipitado es el

carburo de titanio el cual es pequeño comparado con el nitruro de titanio pero esta presente en grandes cantidades formando muchas zonas atrayentes de hidrogeno, el sulfuro de manganeso es el otro precipitado encontrado en el interior del acero del lote U, este en la laminación genera una cavidad en forma alargada en dirección del sentido de rolado y conforme se incrementa la temperatura se fluidifica dejando espacio en la cavidad para que pueda llegar el hidrogeno.

#### **4.4 RECUBRIMIENTO DEL ACERO CON ESMALTE**

Para evaluar la aparición de la escama de pescado se esmaltaron muestras de acero diez de cada lote; para tratar de provocar la aparición de escamas de pescado utilizando esmalte sensible a la adherencia, el cual no contiene óxidos de níquel, cobalto o cobre, para que no favorezcan la adherencia y faciliten la aparición del defecto, el esmalte fue depositado por aspersion, las muestras del lote C fueron identificadas como 1C, 2C, ...,10C y las muestras del lote U fueron identificadas como 1U, 2U, ...,10U.

La Figura 4.17 presenta los paneles esmaltados, todos los paneles están libres del defecto escama de pescado, así que ambos lotes de acero son aptos para ser recubiertos con esmalte porcelanizado.

# CAPITULO 5

## CONCLUSIONES

1. - Los resultados de propiedades mecánicas indican que el acero de lote U, tiene mejor deformación y formabilidad que el acero del lote C.
2. - El tamaño de grano es directamente proporcional al esfuerzo de cedencia e inversamente proporcional al porcentaje de elongación.
3. - El acero del lote C contiene internamente desgarres provocados por los fragmentos de los precipitados de carburo de hierro, los desgarres sirven para atrapar el hidrogeno que difunde cuando el esmalte es horneado.
4. - El acero del lote U contiene internamente cavidades provocadas por los precipitados de nitruro de titanio, carburo de titanio y sulfuro de manganeso, las cavidades sirven para atrapar el hidrogeno que difunde cuando el esmalte es horneado.
5. - Tanto los aceros de lote C y lote U, tienen muy buena capacidad para ser esmaltados, ninguno presento desprendimiento de esmalte.
- 6.- El acero de lote U es apto para construir piezas de formas mas complejas y alta embutibilidad.

## Referencias.

1. Manual for selecting of porcelain enameling steels  
(porcelain enamel institute)
2. Lyudmyla Bragina; Andrey Bondarenko.  
Esmaltes para un nuevo proceso de esmaltado.  
National Technical University "KPI"; Trade House "Emal'zavod" Ucrania
3. ASTM 424-00 Standard specification for steel, sheet for porcelain enameling.
4. Renzo Valentini, Máximo De Sanctus, Adriano solina; Walter Sabba.  
Mauricio Mini  
Desarrollo de los aceros I.F de estampación producidos con ciclo de recocido continuo.  
Departamento de ingeniería Química, Química Industrial – Universidad de Pisa, Italia; ilva, Grupo Riva. Italia.
5. Peggy Guinet, ch. Abeloos, ph. Harlet; P.Cantinieaux.  
Desarrollo de nuevos productos laminados en caliente para esmaltado vitrificado sobre las dos caras.  
RDSCS, R & D; CEDP RDT, Cockerill – Sambre USINOR Belgica.
6. T 17 test for adherence of porcelain enamel to sheet steel  
(porcelain enamel institute)
7. Isabelle Tolleneer, Bruno C. de Cooman, Jan Penning; Arbed Group.  
Franz Hörzenberger.  
Las trampas del hidrógeno en los aceros Ti-IF para esmaltado obtenidas con oxido de titanio.  
Laboratory for Iron and Steelmaking, Ghent University. Chris Rasschaert – Sidmar N.V; Ocas N.V, Research Centre of the Sidmar Group. Belgica
8. Inoue K; Ohnuma I; Ohtani H; Ishida K; Nishizawa T. ISIJ international, vol. 38, 1998,9, pp,991-997
9. Yoon J, Kim S.38<sup>th</sup> MWSP Conf. Proc. ISS, vol. XXXIV 1997, pp 425 – 430

10. Harlet ph. Beco F, Renard L. Dawance J. The Vitreous Enameller, vol. 40  
1990, N° 1, pp 10-21
11. EN 10209: Cold rolled low carbon steel flat products for vitreous  
enamelling – Technical delivery conditions, 1 November 1996
12. ASTM A 751-01 Standar test methods, practices and terminology for  
chemical analysis of steel products
13. ASTM E 415-99a Standar test method for optical emission vacuum  
spectrometric analysis of carbon and low-alloy steel.
14. ASTM E 1019-03 Standard test methods for determination of carbon,  
sulfur, nitrogen and oxygen in steel and in iron, nickel and cobalt alloys.
15. ASTM E 8-04 Standars test methods for tension testing of metallic  
materials.
16. ASTM A 370-03a Standar test methods and definitions for mechanical  
testing of steel products.
17. ASTM E 18-05 Standard test methods for Rockwell superficial hardness  
of metallic materials.
18. ASTM E 517-00 Standar test method for plastic strain ratio  $r$  for sheet  
metal.
19. ASTM E 646-00 Standar test method for tensile strain-hardening  
exponents ( $n$ -values) of metallic sheet materials.
20. ASTM E 112-04 Standard test methods for determining average grain  
size.
21. ASTM E 45-05 Standard test methods for determining the inclusion  
content of steel.
22. ASTM A 568-03 Standard specification for steel, sheet, carbon and  
high-strength, low-alloy, hot-rolled, general requerimiets for.



Tabla 2.1 Química típica de los aceros esmaltados (ASTM A 424)

<b>Elemento</b>	<b>Tipo I</b>	<b>Tipo II</b>	<b>Tipo III</b>
Carbón	0.008 %*	0.05 %	0.02%
Manganeso	0.40 %	0.50 %	0.35 %
Fósforo	0.020 %	0.020 %	0.020 %
Azufre	0.030 %	0.030 %	0.030 %
Aluminio **	0.050 %	0.050 %	0.050 %
Microaleantes	No	Si	Si ***

\* Carbón requerido como rollo frío, No es apropiado como rollo caliente

\*\* El aluminio es usado como desoxidante en los aceros vaciados en colada continua

\*\*\* Los microaleantes son usados para unirse al carbón y al nitrógeno dando como resultado acero con intersticios libres.

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas típicas de los aceros esmaltados.

<b>ASTM A424</b>	<b>P. CED. (Ksi)</b>	<b>R. TEN. (Ksi)</b>	<b>% Elong</b>	<b>HRB</b>	<b>Valor r</b>	<b>Valor n</b>
<b>Tipo I</b>	25	42	45	35	1.2	.24
<b>Tipo II</b>	28	44	43	42	1.1	.23
<b>Tipo III</b>	25	45	45	40	1.85	.24

Tabla 4.3 Composición química en % en peso de acero "LOTE C"

Muestra	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	N
1C	0.038	0.225	0.007	0.007	0.017	0.009	0.017	0.041	0.015	0.0013	0.003
2C	0.034	0.198	0.004	0.010	0.009	0.012	0.014	0.034	0.008	0.0014	0.002
3C	0.037	0.211	0.004	0.005	0.014	0.005	0.011	0.038	0.011	0.0010	0.005
4C	0.042	0.205	0.002	0.010	0.016	0.009	0.014	0.038	0.010	0.0015	0.003
5C	0.035	0.201	0.007	0.012	0.015	0.013	0.017	0.044	0.015	0.0011	0.002
6C	0.038	0.201	0.006	0.008	0.020	0.010	0.014	0.046	0.014	0.0013	0.004
7C	0.038	0.202	0.006	0.011	0.011	0.008	0.013	0.033	0.010	0.0015	0.003
8C	0.038	0.221	0.007	0.008	0.009	0.009	0.013	0.035	0.010	0.0016	0.003
9C	0.039	0.190	0.004	0.007	0.019	0.009	0.013	0.040	0.011	0.0013	0.004
10C	0.034	0.193	0.004	0.008	0.018	0.009	0.014	0.040	0.009	0.0013	0.002
<b>Prom.</b>	<b>0.037</b>	<b>0.205</b>	<b>0.005</b>	<b>0.009</b>	<b>0.015</b>	<b>0.009</b>	<b>0.014</b>	<b>0.039</b>	<b>0.011</b>	<b>0.0013</b>	<b>0.003</b>
<b>STD</b>	<b>0.0025</b>	<b>0.0113</b>	<b>0.0017</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0040</b>	<b>0.0022</b>	<b>0.0018</b>	<b>0.0042</b>	<b>0.0025</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0010</b>

Tabla 4.4 Composición química en % en peso de acero "LOTE U"

Muestra	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	N
1U	0.005	0.45	0.023	0.015	0.007	0.014	0.013	0.031	0.028	0.099	0.011
2U	0.007	0.35	0.021	0.016	0.008	0.016	0.016	0.040	0.027	0.107	0.008
3U	0.006	0.43	0.023	0.014	0.011	0.015	0.013	0.033	0.029	0.099	0.012
4U	0.005	0.44	0.024	0.014	0.008	0.014	0.013	0.030	0.031	0.097	0.012
5U	0.007	0.43	0.019	0.014	0.007	0.014	0.013	0.030	0.029	0.097	0.012
6U	0.005	0.22	0.020	0.011	0.006	0.013	0.016	0.023	0.032	0.094	0.007
7U	0.006	0.44	0.020	0.014	0.008	0.014	0.013	0.031	0.031	0.099	0.012
8U	0.007	0.35	0.021	0.016	0.008	0.016	0.017	0.039	0.029	0.105	0.009
9U	0.007	0.27	0.023	0.011	0.004	0.014	0.013	0.041	0.032	0.104	0.009
10U	0.007	0.23	0.019	0.011	0.005	0.013	0.016	0.023	0.033	0.097	0.007
<b>Prom.</b>	<b>0.006</b>	<b>0.36</b>	<b>0.021</b>	<b>0.014</b>	<b>0.007</b>	<b>0.014</b>	<b>0.014</b>	<b>0.032</b>	<b>0.030</b>	<b>0.100</b>	<b>0.010</b>
<b>STD</b>	<b>0.0009</b>	<b>0.0916</b>	<b>0.0018</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.0019</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0017</b>	<b>0.0064</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.0042</b>	<b>0.0021</b>

Tabla 4.5 comparación de composición química promedio de Lote C vs. Lote U.

Acero	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	N
<b>Lote C</b>	<b>0.037</b>	<b>0.205</b>	<b>0.005</b>	<b>0.009</b>	<b>0.015</b>	<b>0.009</b>	<b>0.014</b>	<b>0.039</b>	<b>0.011</b>	<b>0.0013</b>	<b>0.0030</b>
STD	0.0025	0.0113	0.0017	0.0021	0.0040	0.0022	0.0018	0.0042	0.0025	0.0002	0.0010
<b>Lote U</b>	<b>0.006</b>	<b>0.360</b>	<b>0.021</b>	<b>0.014</b>	<b>0.007</b>	<b>0.014</b>	<b>0.014</b>	<b>0.032</b>	<b>0.030</b>	<b>0.100</b>	<b>0.0100</b>
STD	0.0009	0.0916	0.0018	0.0020	0.0019	0.0011	0.0017	0.0064	0.0020	0.0042	0.0021

Tabla 4.6 Elementos que tienen diferencias significativas en los aceros del lote C vs lote U.

Elemento	Lote C	Lote U	% de Diferencia
C	0.037	0.006	-0.031
Mn	0.205	0.36	0.155
S	0.005	0.021	0.016
Cu	0.011	0.030	0.019
Ti	0.0013	0.100	0.0987
N	0.0030	0.0100	0.0070

Tabla 4.7 Propiedades mecánicas de "LOTE C" (En sentido de 0° al rolado)

Muestra	P. Ced (Ksi)	R. Ten(Ksi)	% Elong	Hrb	Valor r	Valor n
1C	29.0	47.4	44.1	38	1.43	0.223
2C	28.2	46.0	43.5	40	1.42	0.228
3C	27.3	43.6	45.0	36	1.39	0.228
4C	26.6	44.9	44.3	36	1.43	0.234
5C	28.9	47.2	43.7	36	1.54	0.235
6C	25.7	44.7	46.6	37	1.81	0.232
7C	30.6	49.2	45.0	42	1.32	0.227
8C	28.2	46.3	44.7	38	1.35	0.226
9C	28.8	46.2	42.5	38	1.63	0.217
10C	27.4	46.0	46.5	39	1.52	0.225
Prom	<b>28.1</b>	<b>46.2</b>	<b>44.6</b>	<b>38</b>	<b>1.48</b>	<b>0.228</b>
STD	<b>1.39</b>	<b>1.57</b>	<b>1.27</b>	<b>1.94</b>	<b>0.147</b>	<b>0.005</b>

Tabla 4.8 Propiedades mecánicas de “LOTE C” (En sentido de 90° al rolado)

Muestra	P. Ced (Ksi)	R. Ten(Ksi)	% Elong	Hrb	Valor r	Valor n
1C	29.6	46.4	45.0	37	1.76	0.221
2C	29.7	45.7	43.3	42	1.83	0.233
3C	29.2	44.1	42.5	39	2.07	0.225
4C	29.2	45.8	41.6	39	1.89	0.232
5C	32.9	47.1	43.5	36	1.94	0.187
6C	26.5	45.1	46.7	34	2.36	0.224
7C	31.5	48.6	39.7	43	1.74	0.227
8C	28.6	46.0	42.5	42	1.77	0.228
9C	30.0	45.6	44.7	40	1.81	0.223
10C	29.0	45.3	41.9	36	2.08	0.223
Prom	<b>29.6</b>	<b>46.0</b>	<b>43.1</b>	<b>38.8</b>	<b>1.93</b>	<b>0.222</b>
STD	<b>1.70</b>	<b>1.22</b>	<b>1.98</b>	<b>3.01</b>	<b>0.195</b>	<b>0.013</b>

Tabla 4.9 Propiedades mecánicas de “LOTE C” (En sentido de 45° al rolado)

Muestra	P. Ced (Ksi)	R. Ten(Ksi)	% Elong	Hrb	Valor r	Valor n
1C	30.2	48.0	39.7	35	1.37	0.217
2C	29.4	46.2	42.2	39	1.29	0.229
3C	29.4	44.8	41.5	38	1.38	0.225
4C	28.5	45.8	37.8	39	1.39	0.230
5C	31.9	47.2	40.7	35	1.27	0.236
6C	27.4	46.1	41.2	36	1.65	0.224
7C	32.0	49.6	41.5	44	1.28	0.224
8C	29.7	46.8	43.1	36	1.34	0.223
9C	30.0	46.3	47.0	37	1.21	0.221
10C	29.7	46.7	41.0	38	1.41	0.221
Prom	<b>29.8</b>	<b>46.8</b>	<b>41.6</b>	<b>37.7</b>	<b>1.36</b>	<b>0.225</b>
STD	<b>1.38</b>	<b>1.31</b>	<b>2.38</b>	<b>2.67</b>	<b>0.120</b>	<b>0.005</b>

Tabla 4.10 Propiedades mecánicas de “LOTE U” (En sentido de 0° al rolado)

Muestra	P. Ced (Ksi)	R. Ten(Ksi)	% Elong	Hrb	Valor r	Valor n
1U	24.3	46.1	41.6	35	2.13	0.239
2U	26.3	45.7	44.8	36	2.13	0.230
3U	25.7	45.1	44.9	36	2.31	0.236
4U	26.3	45.2	45.3	34	2.09	0.231
5U	23.8	45.3	45.3	32	2.30	0.241
6U	27.2	44.9	44.7	35	2.38	0.225
7U	22.1	44.2	47.4	33	2.23	0.244
8U	23.9	45.5	44.0	34	2.02	0.238
9U	24.5	45.0	46.1	34	2.34	0.237
10U	24.1	43.8	47.6	33	2.45	0.238
Prom	<b>24.8</b>	<b>45.1</b>	<b>45.2</b>	<b>34.2</b>	<b>2.24</b>	<b>0.236</b>
STD	<b>1.53</b>	<b>0.68</b>	<b>1.71</b>	<b>1.32</b>	<b>0.140</b>	<b>0.006</b>

Tabla 4.11 Propiedades mecánicas de “LOTE U” (En sentido de 90° al rolado)

Muestra	P. Ced (Ksi)	R. Ten(Ksi)	% Elong	Hrb	Valor r	Valor n
1U	24.1	45.1	44.8	35	2.73	0.238
2U	26.0	44.9	46.6	34	2.90	0.233
3U	26.4	45.3	46.5	36	2.82	0.235
4U	27.2	45.1	45.0	34	2.90	0.230
5U	23.7	44.9	44.0	35	2.93	0.242
6U	27.7	44.3	45.0	36	3.06	0.226
7U	22.2	43.7	45.6	31	2.89	0.244
8U	23.5	45.0	46.2	34	2.92	0.239
9U	24.8	44.4	44.8	33	2.98	0.237
10U	24.2	43.0	48.1	33	3.05	0.238
Prom	<b>25.0</b>	<b>44.6</b>	<b>45.7</b>	<b>34.1</b>	<b>2.92</b>	<b>0.236</b>
STD	<b>1.78</b>	<b>0.73</b>	<b>1.20</b>	<b>1.52</b>	<b>0.099</b>	<b>0.005</b>

Tabla 4.12 Propiedades mecánicas de “LOTE U” (En sentido de 45° al rolado)

Muestra	P. Ced (Ksi)	R. Ten(Ksi)	% Elong	Hrb	Valor r	Valor n
1U	25.3	46.8	41.9	35	2.01	0.233
2U	26.9	46.4	43.3	37	2.04	0.227
3U	26.7	46.1	43.6	37	2.01	0.231
4U	26.8	45.4	44.3	35	1.96	0.226
5U	24.7	46.2	44.3	32	1.87	0.236
6U	28.1	44.6	46.2	36	2.10	0.220
7U	23.3	45.8	46.4	31	1.92	0.237
8U	24.7	46.3	42.9	34	1.87	0.234
9U	25.1	45.4	43.8	36	2.12	0.230
10U	25.8	44.8	41.0	33	2.1	0.230
Prom	<b>25.7</b>	<b>45.8</b>	<b>43.8</b>	<b>34.6</b>	<b>2.00</b>	<b>0.230</b>
STD	<b>1.40</b>	<b>0.72</b>	<b>1.68</b>	<b>2.07</b>	<b>0.093</b>	<b>0.005</b>

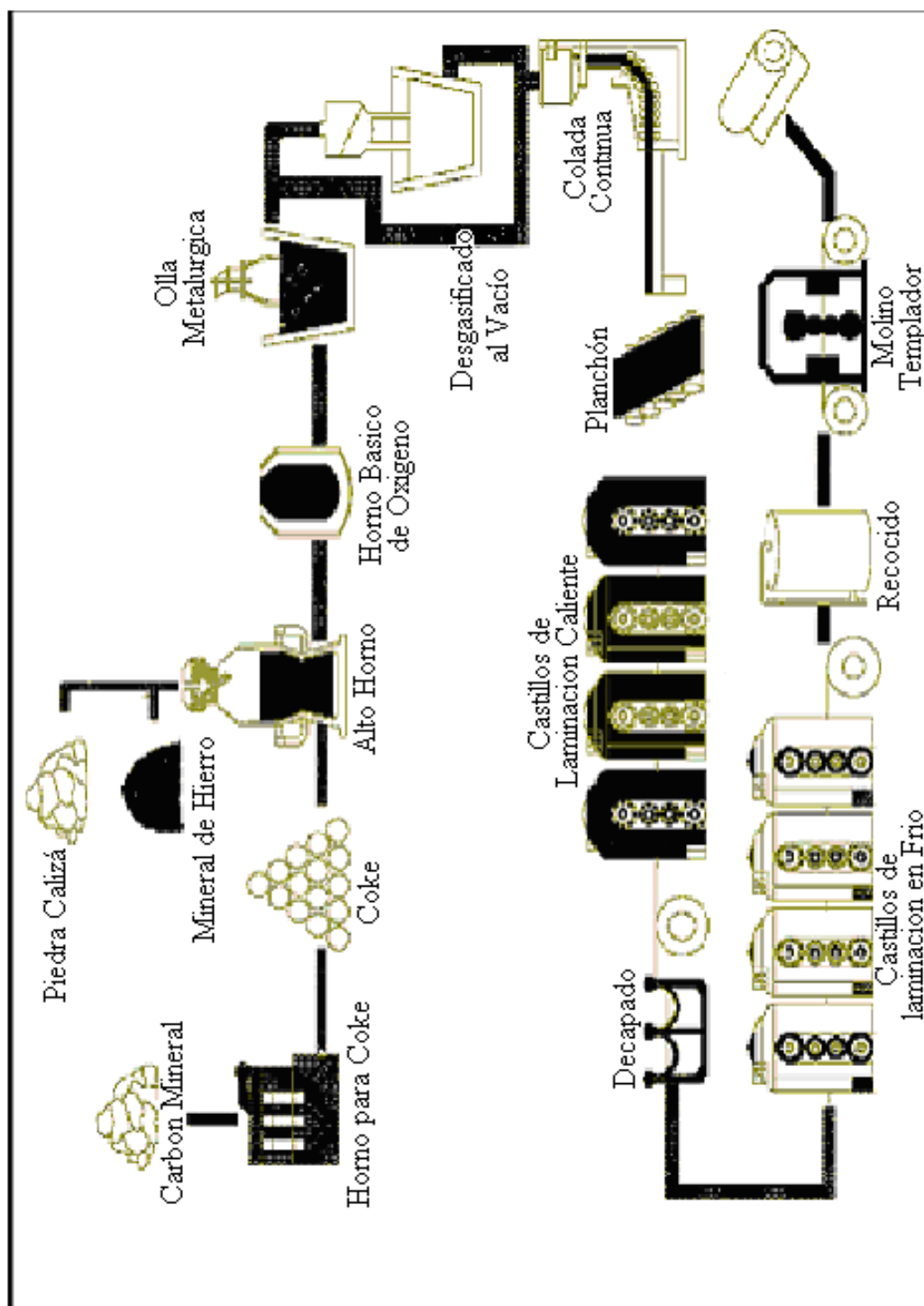


Figura 2.1 Diagrama de flujo de fabricación de acero

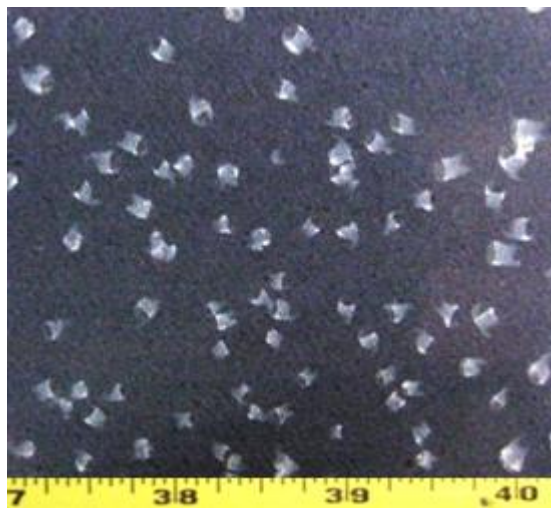


Figura 2.2 Superficie de acero esmaltada  
Donde se aprecia el defecto escama de pescado



Figura 2.3 Superficie de acero esmaltada  
de aspecto perfecto



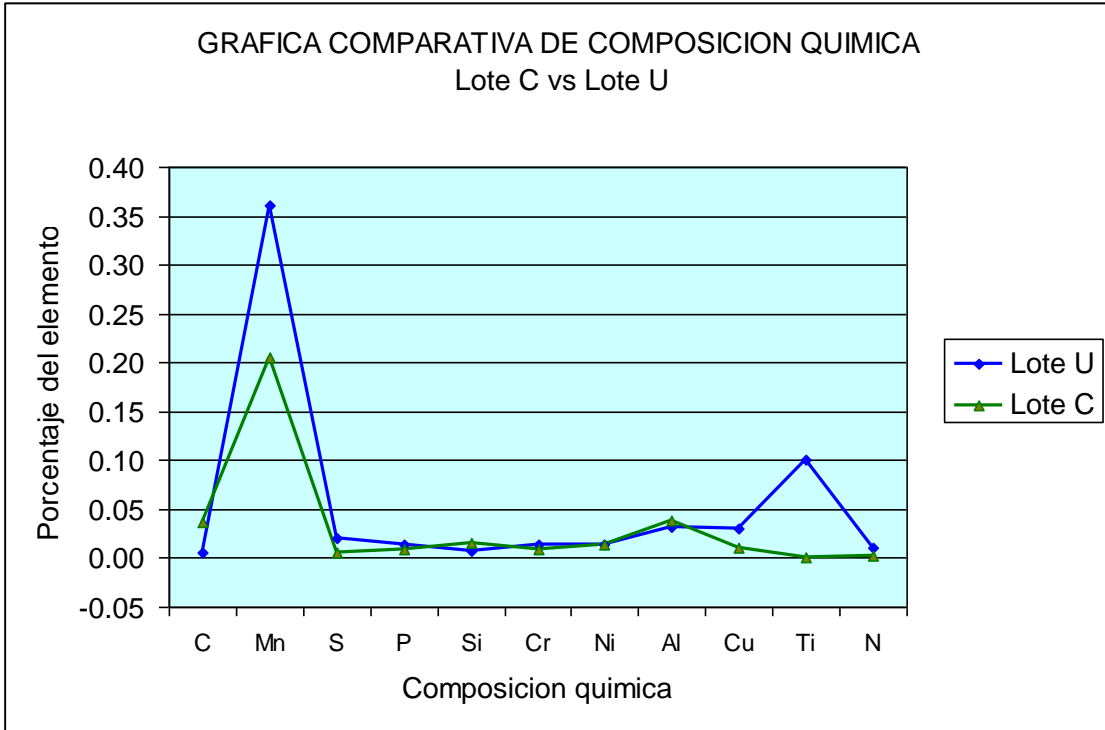


Figura 4.1 comparación de la composición química promedio de los aceros del lote C vs lote U.

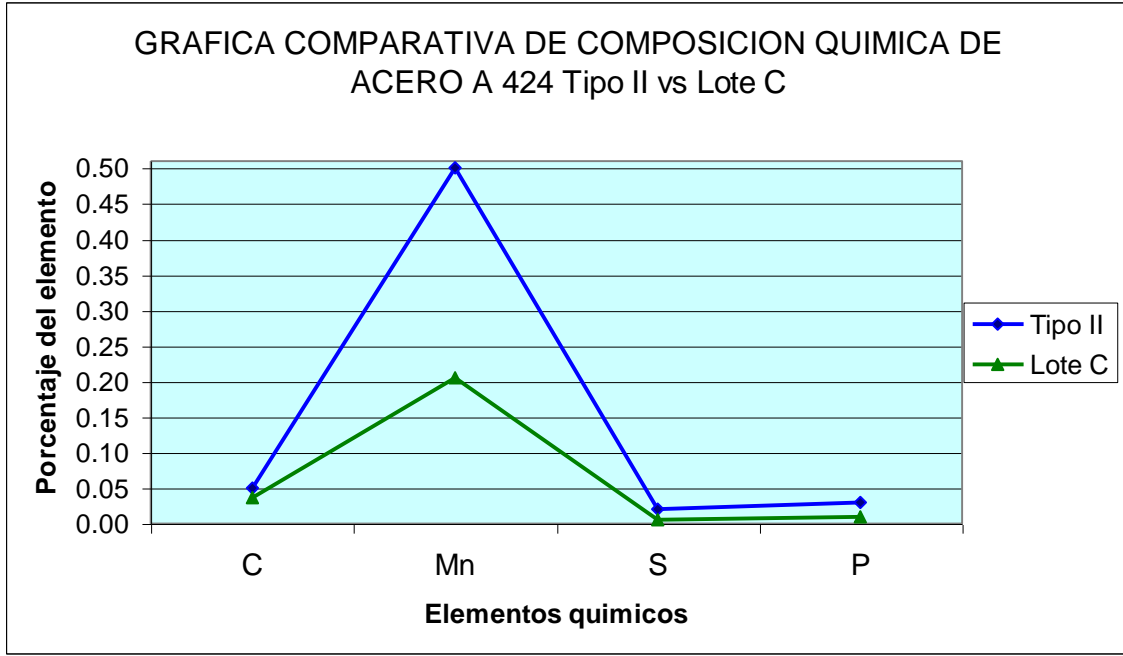


Figura 4.2 comparación de composición química ASTM A 424 Tipo II vs Lote C.

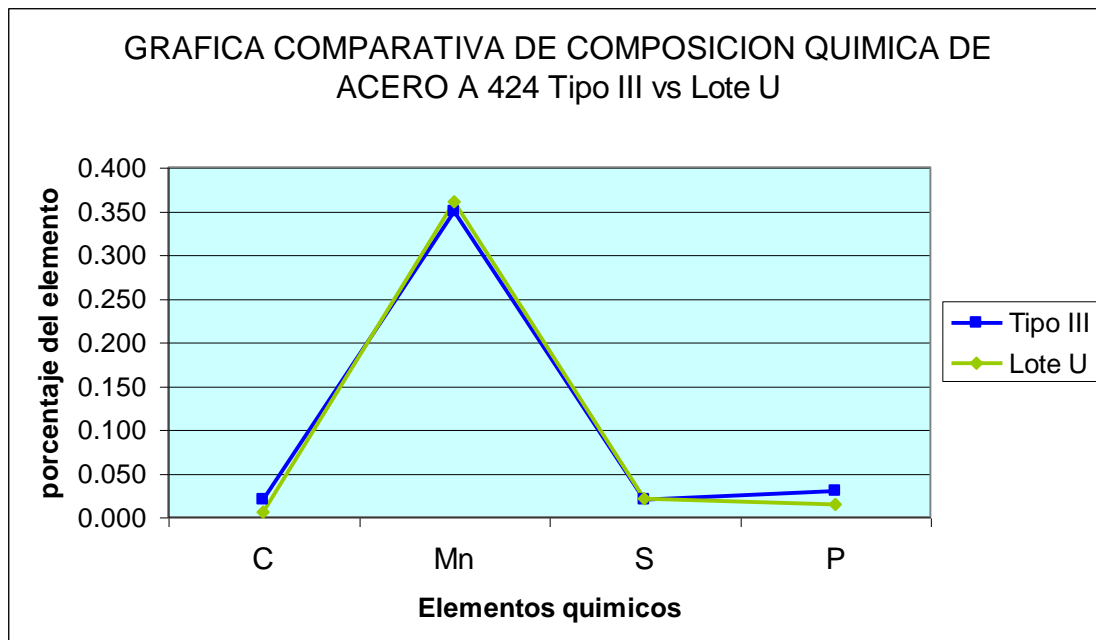


Figura 4.3 comparación de composición química ASTM A 424 Tipo III vs Lote U.

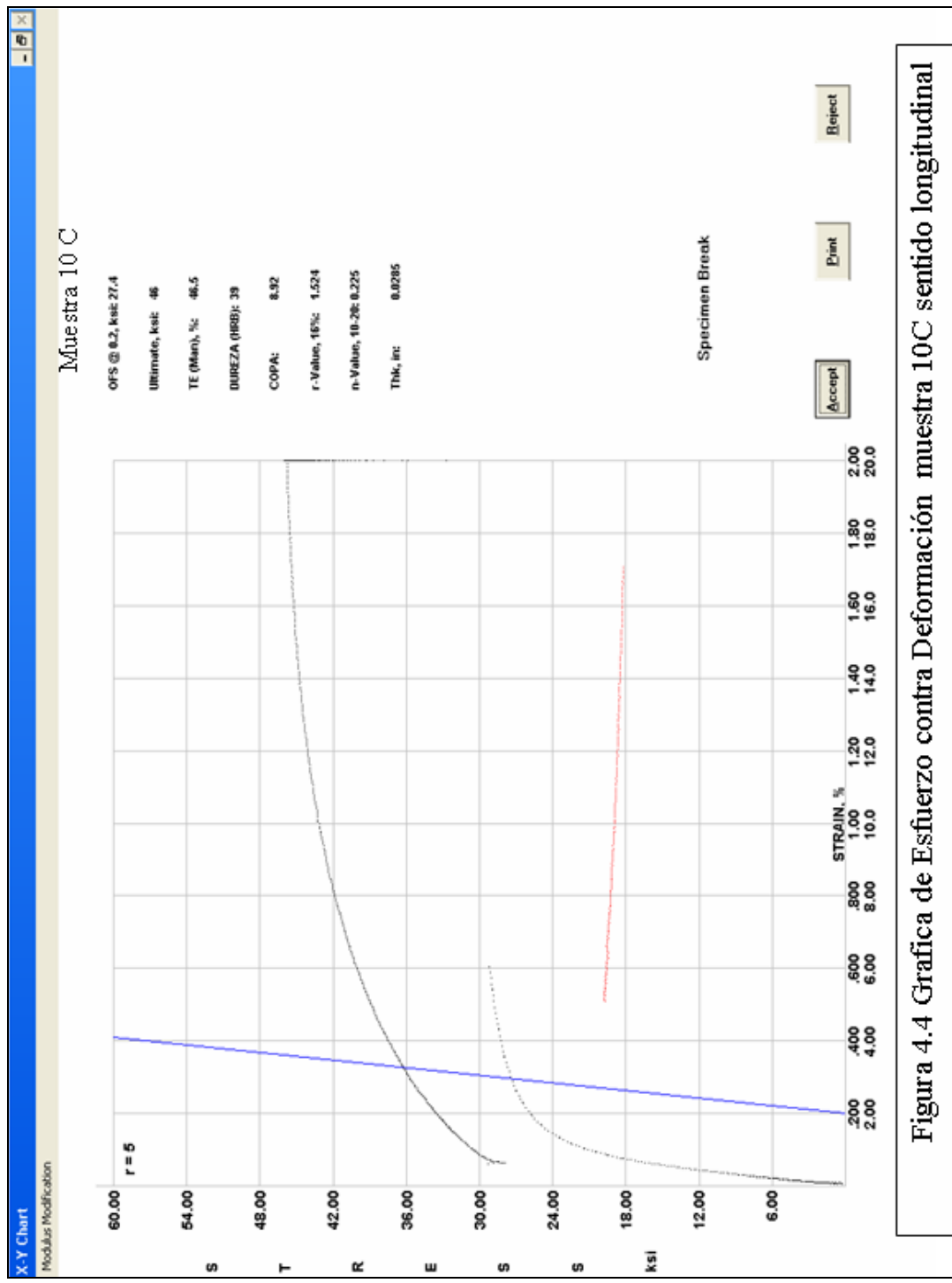


Figura 4.4 Grafica de Esfuerzo contra Deformación muestra 10C sentido longitudinal

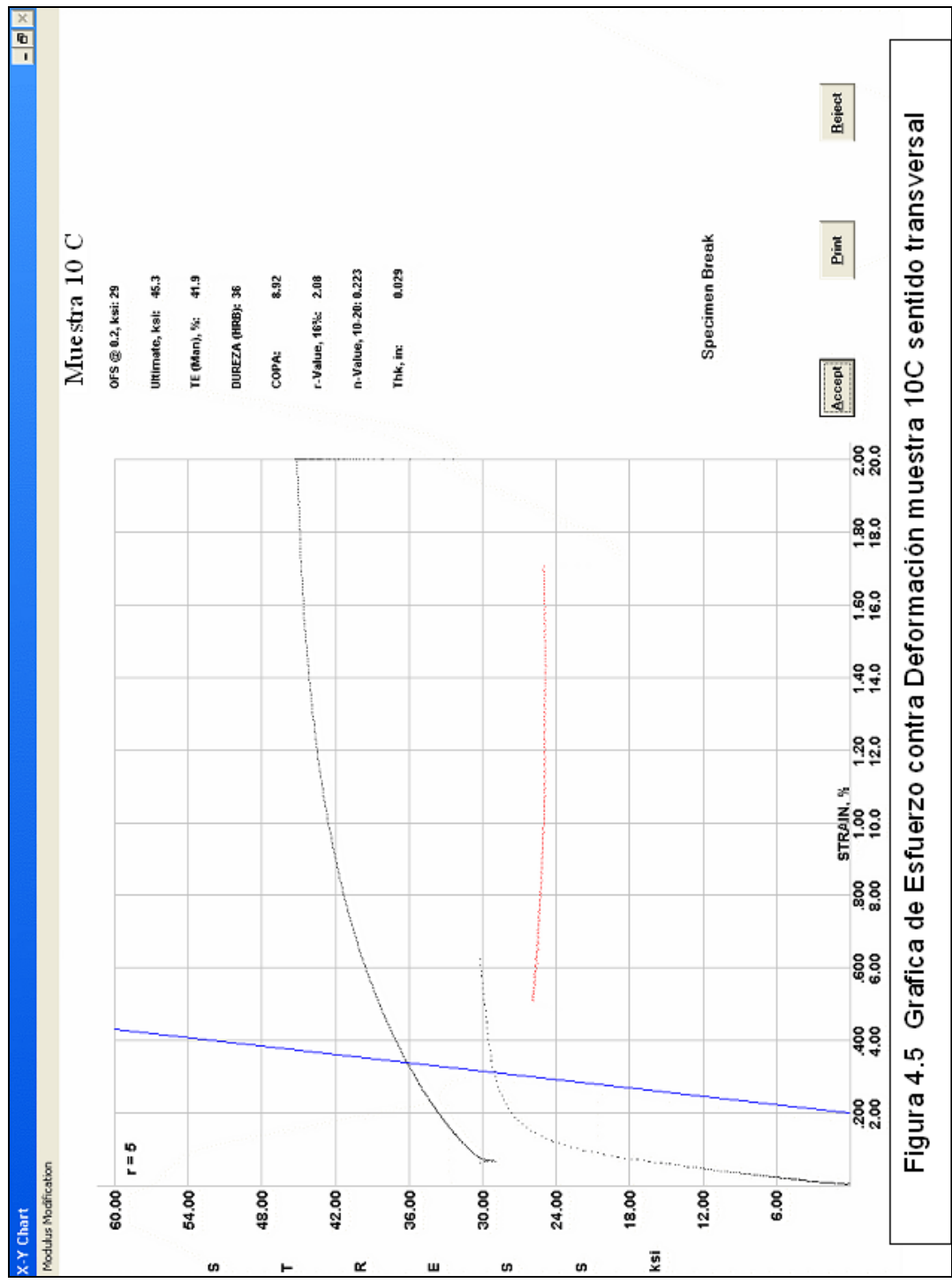


Figura 4.5 Grafica de Esfuerzo contra Deformación muestra 10C sentido transversal

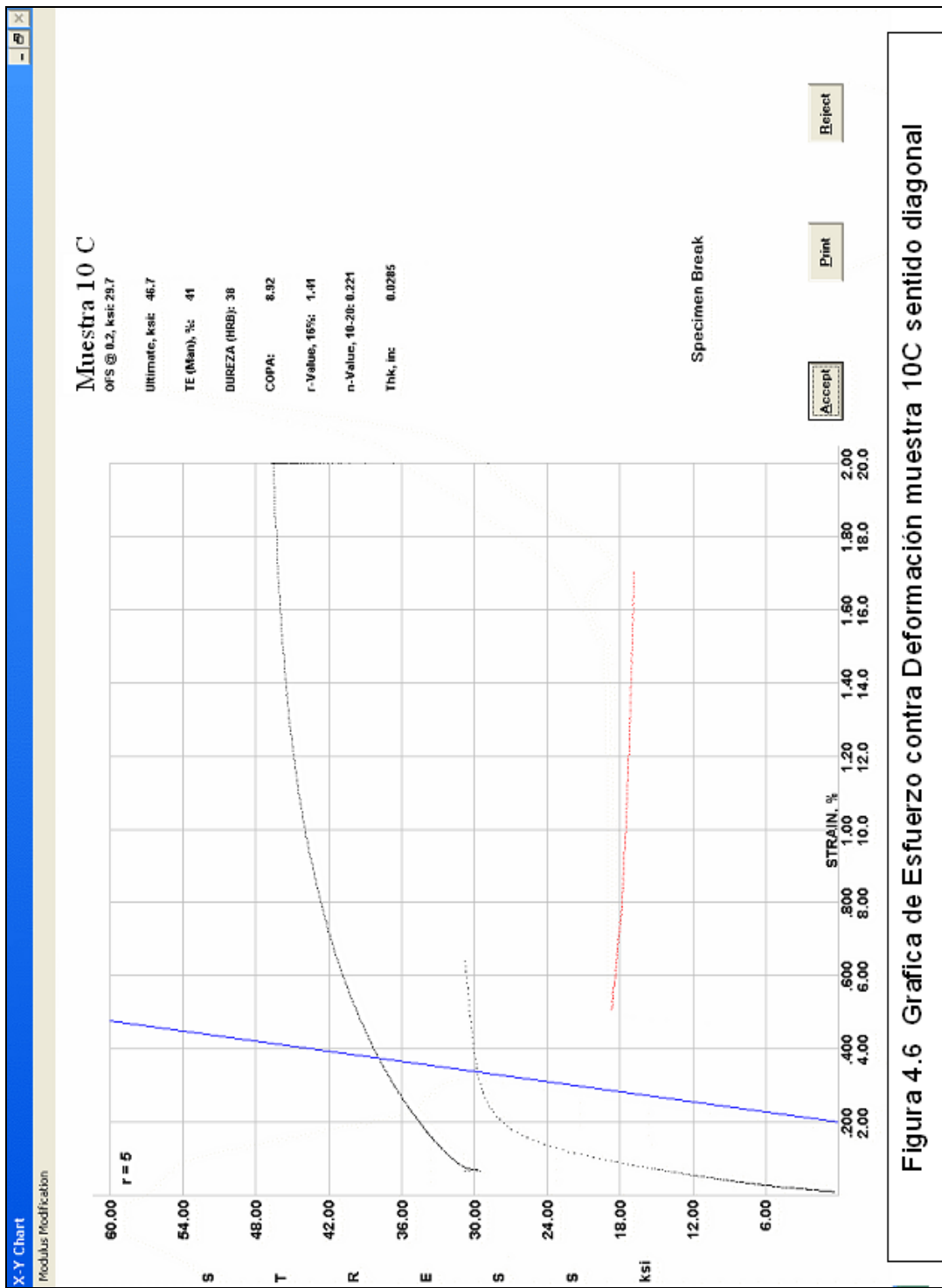


Figura 4.6 Grafica de Esfuerzo contra Deformación muestra 10C sentido diagonal

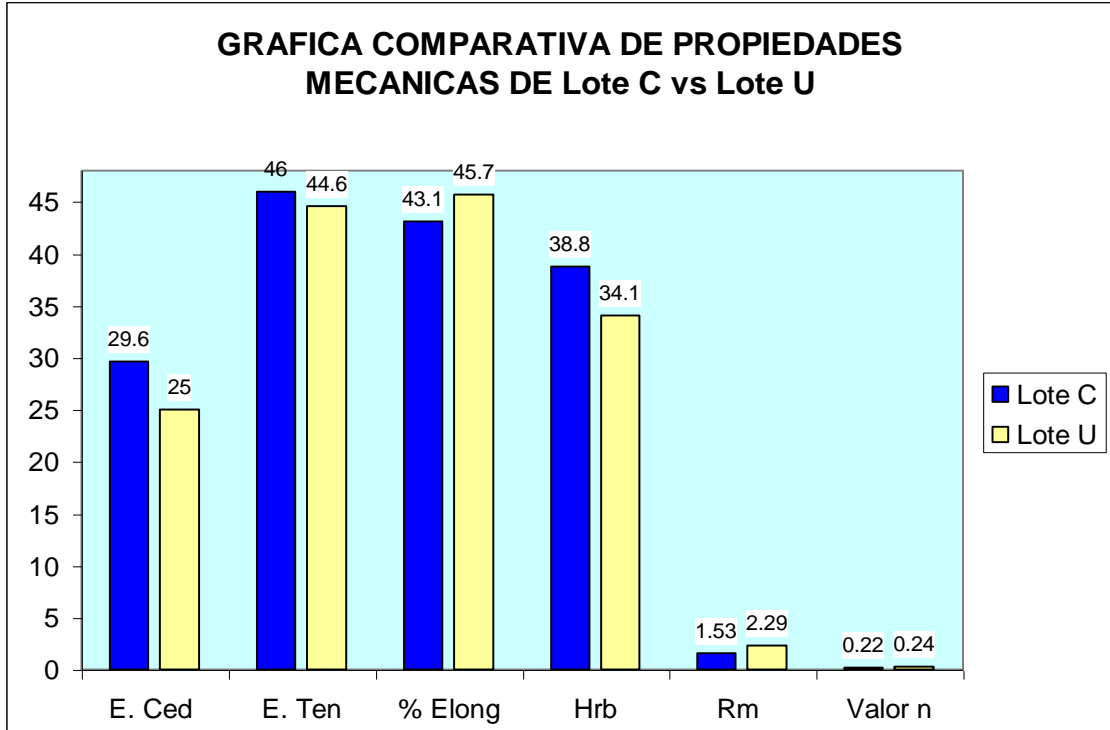


Figura 4.7 propiedades mecánicas de aceros lote C y lote U, el E. Ced, E. Ten están en Ksi, la elongación en porciento, valor Rm y valor n son adimensionales.

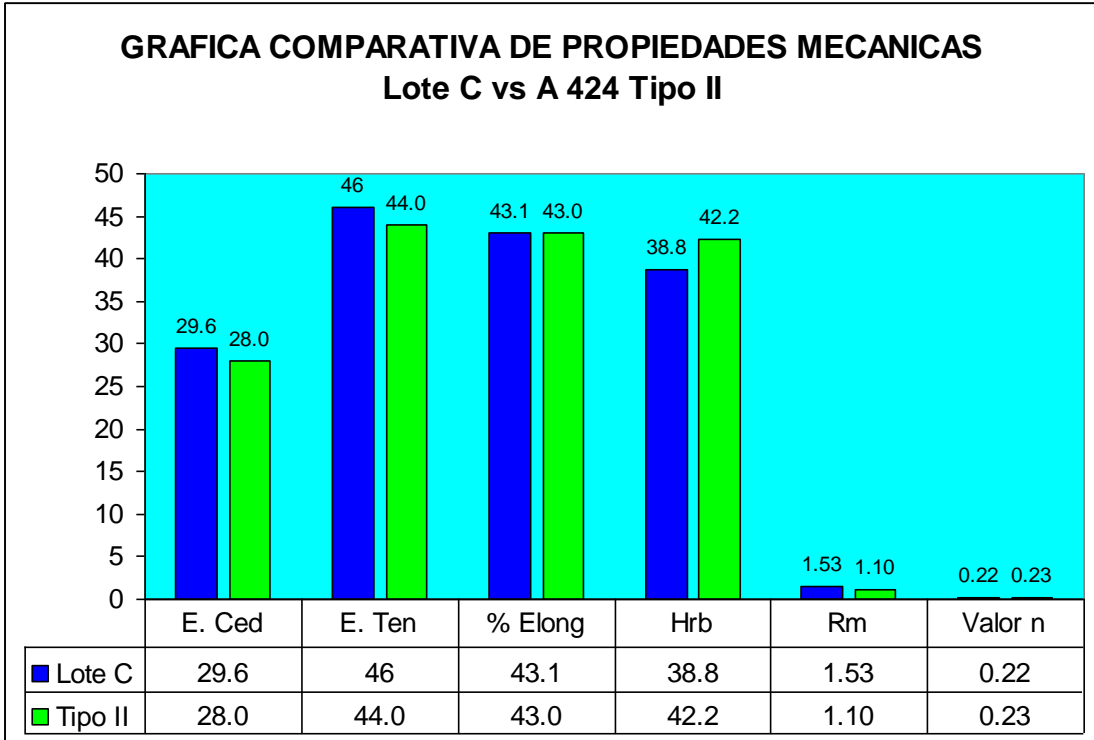


Figura 4.8 Propiedades mecánicas de Lote C y A 424 Tipo II

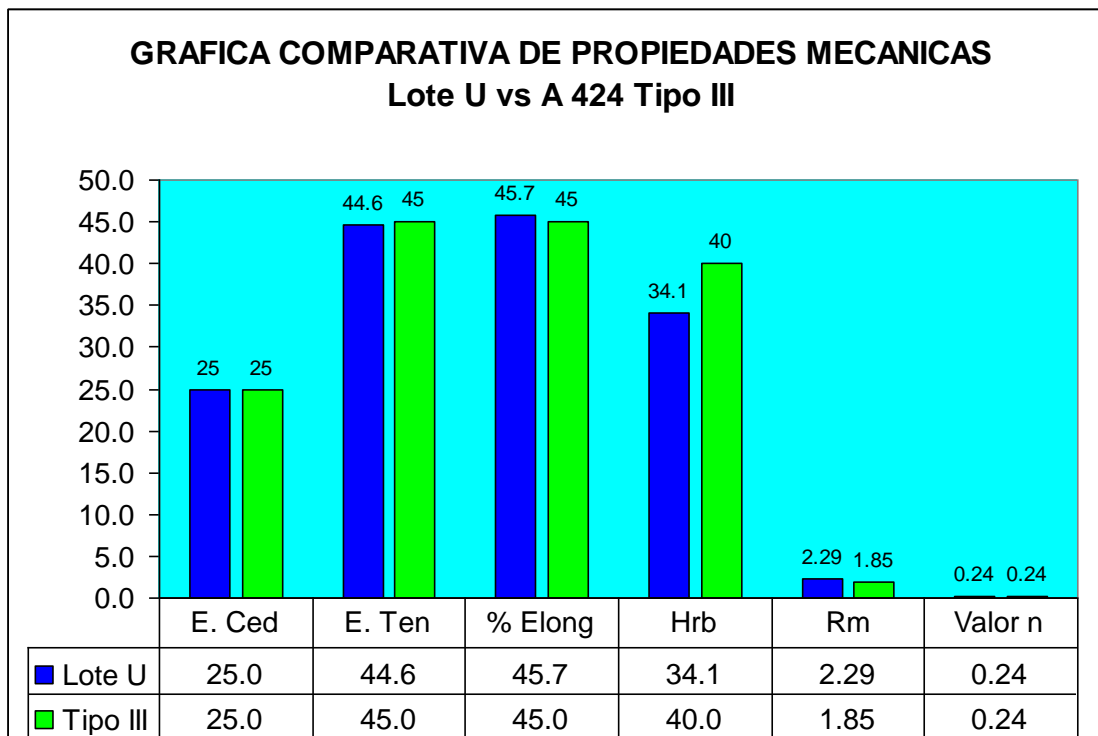


Figura 4.9 Propiedades mecánicas de Lote U y A 424 Tipo III

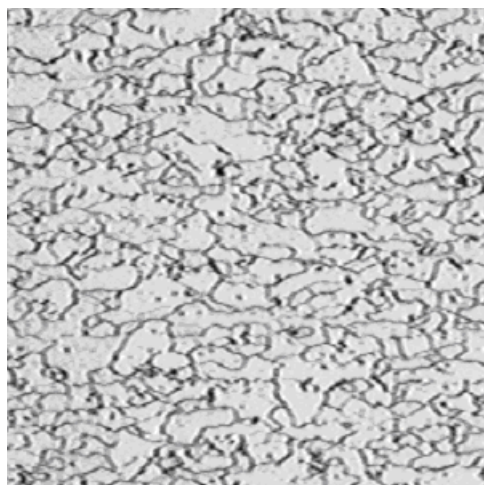


Figura 4.10a microestructura de muestra 1C a 200X atacada con nital 3 %

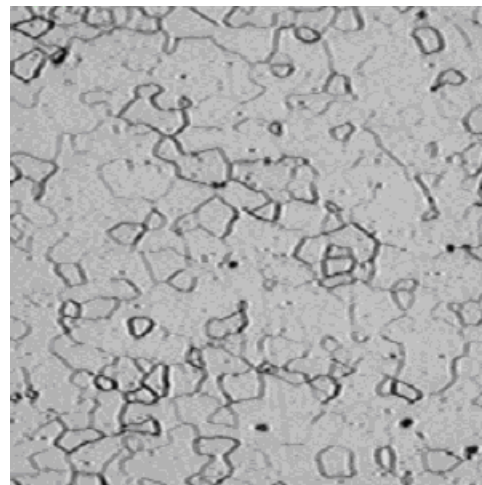


Figura 4.10b microestructura de muestra 7U a 200 X atacada con nital 3 %

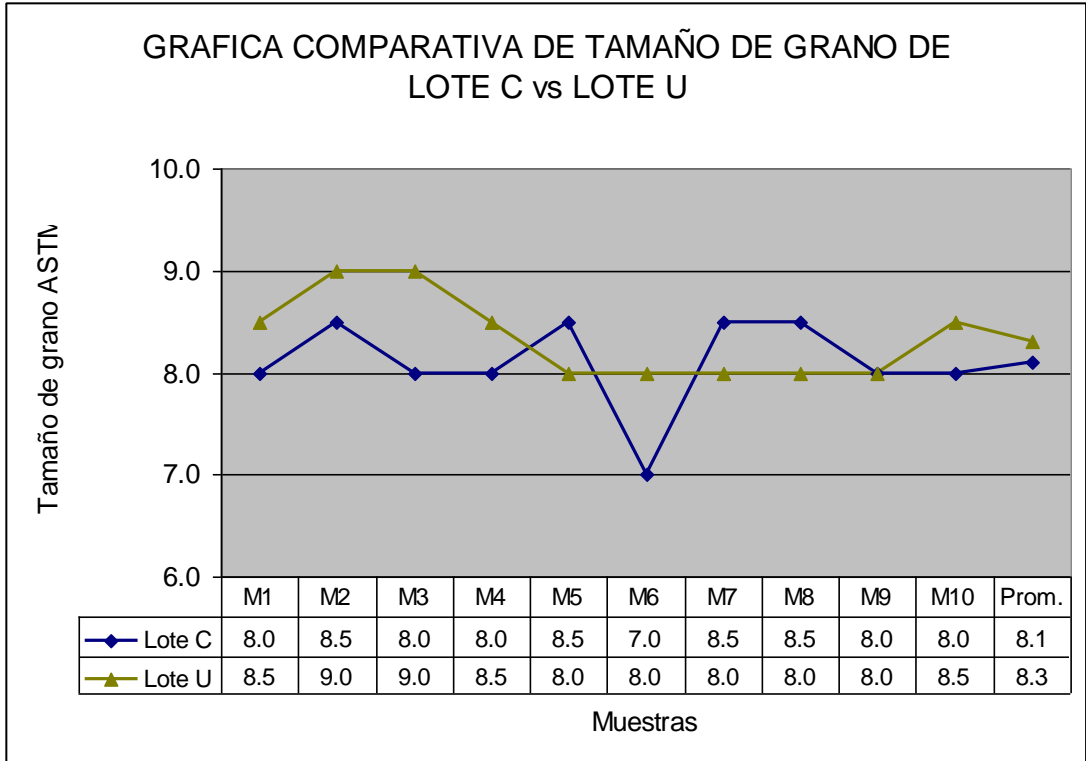


Figura 4.11 tamaño de grano de lote C y lote U

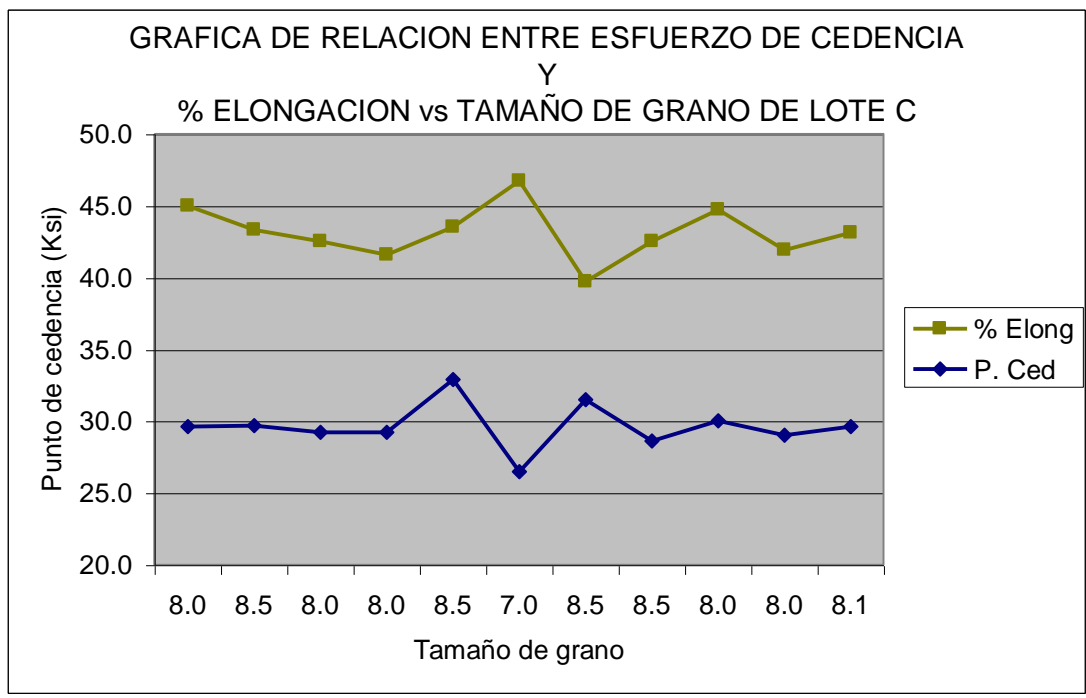


Figura 4.12 Relación directa entre Esfuerzo de Cedencia y %elongacion contra Tamaño de grano.



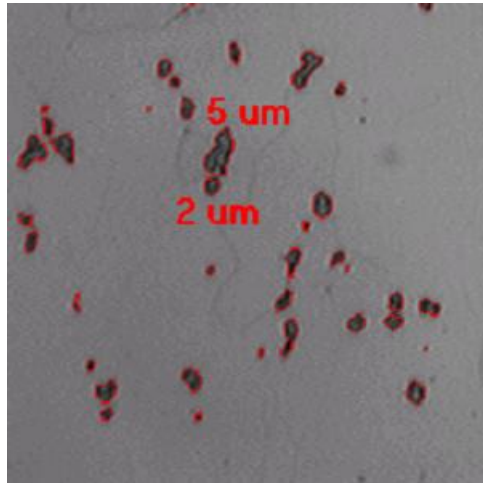


Figura 4.13a muestra 1C a 1000X atacada con picral, se observan  $(Fe_3C)$  fragmentados

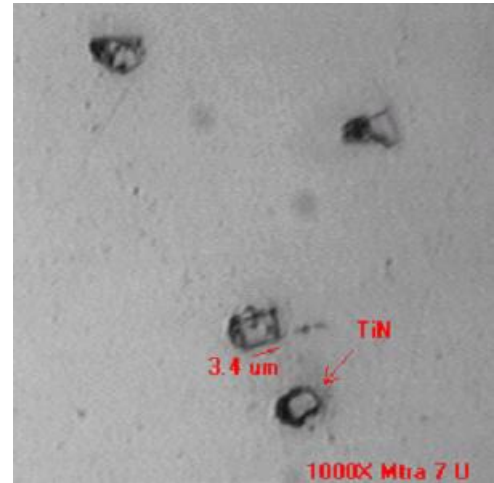


Figura 4.13b muestra 7U a 1000X atacada con picral, se observa  $(TiN)$  y huecos.

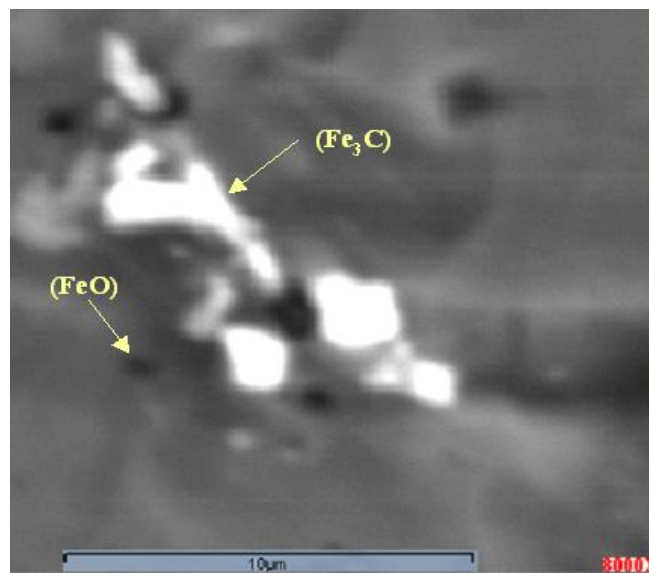


Figura 4.14 Precipitados de  $(Fe_3C)$  encontrados en la muestra 1C a 8000X

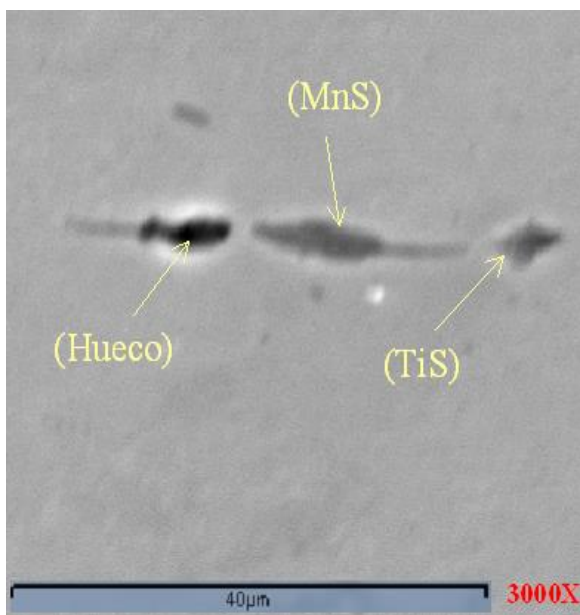


Figura 4.15 muestra 7U, a 3000X

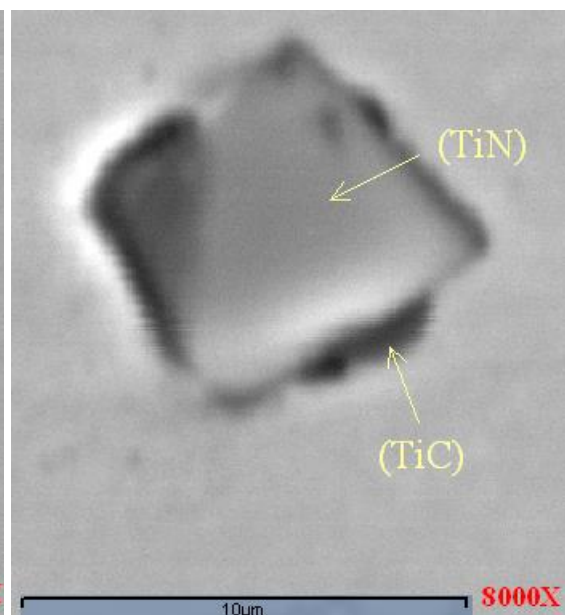


Figura 4.16 muestra 7U, a 8000X



Lote C



Lote U

Figura 4.17 presenta los 10 paneles esmaltados de cada lote.

## ***APENDICE “A”***



1C 200X

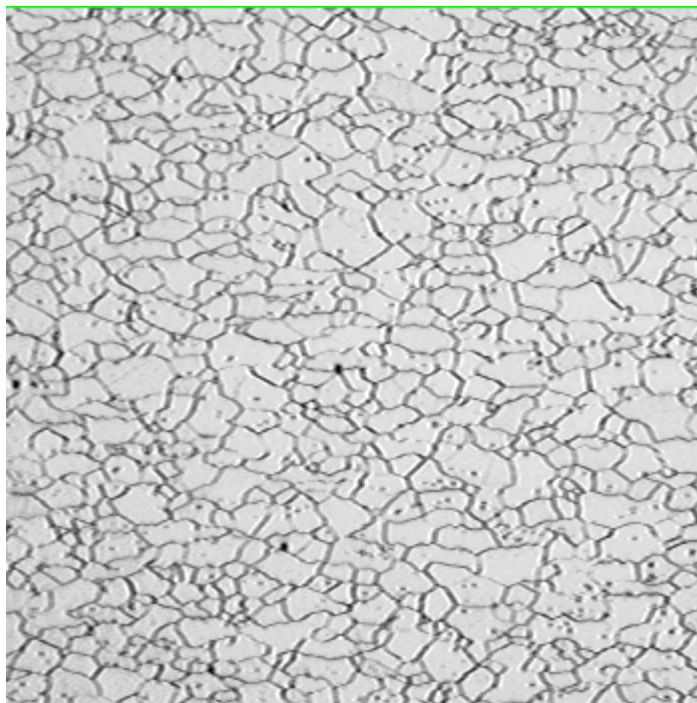


2C 200X

A.1 microestructura de las muestras 1C y 2C a 200X

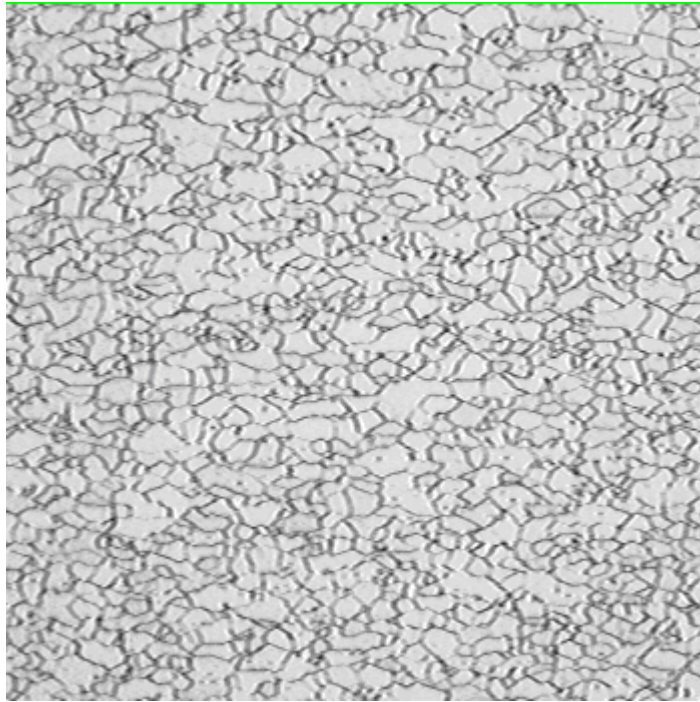


3C 200X



4C 200X

A.2 microestructura de las muestras 3C y 4C a 200X

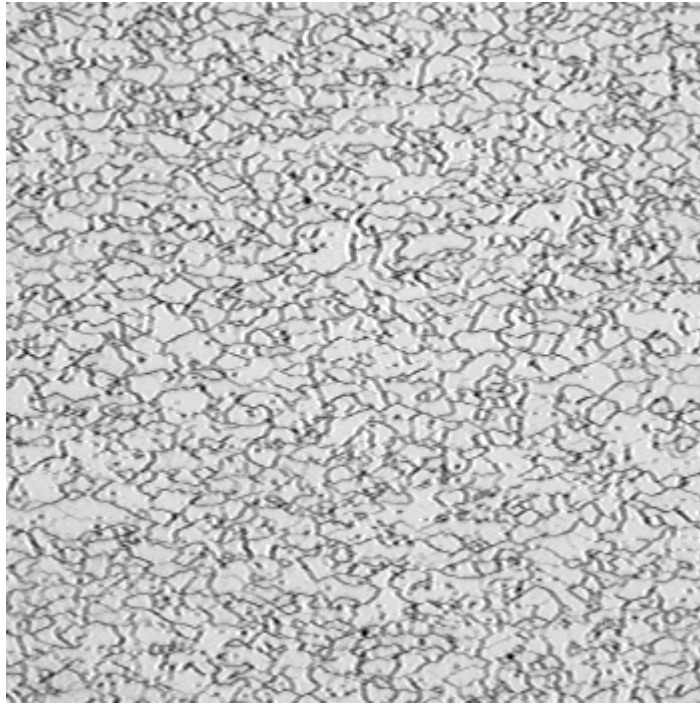


5C 200X



6C 200X

A.3 microestructura de las muestras 5C y 6C a 200X



7C 200X



8C 200X

A.4 microestructura de las muestras 7C y 8C a 200X



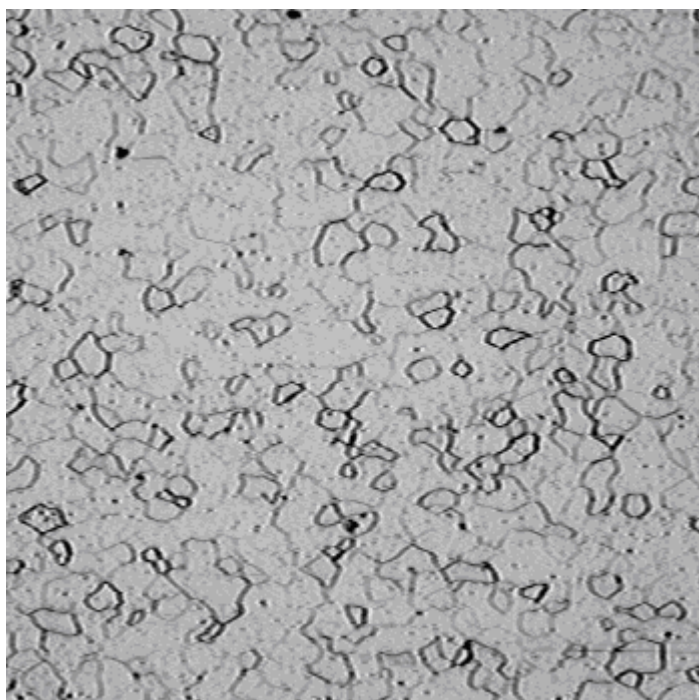
9C 200X



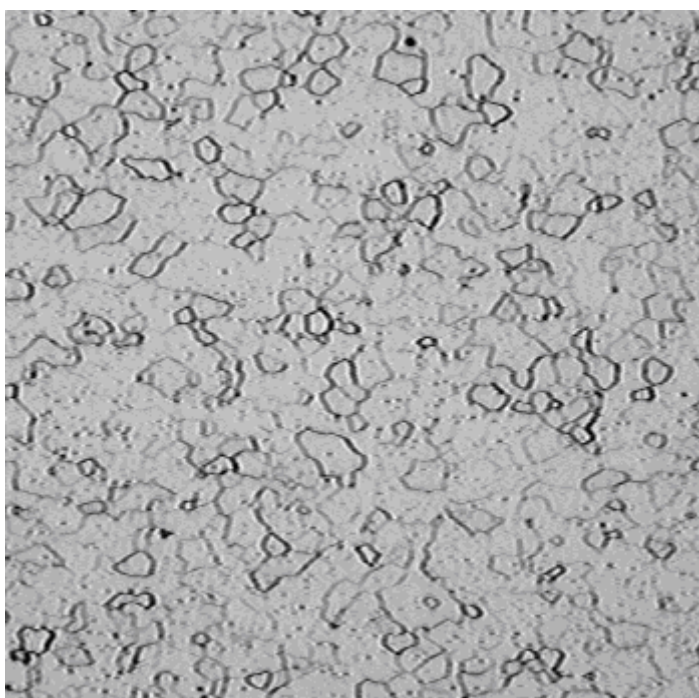
10C 200X

A.5 microestructura de las muestras 9C y 10C a 200X



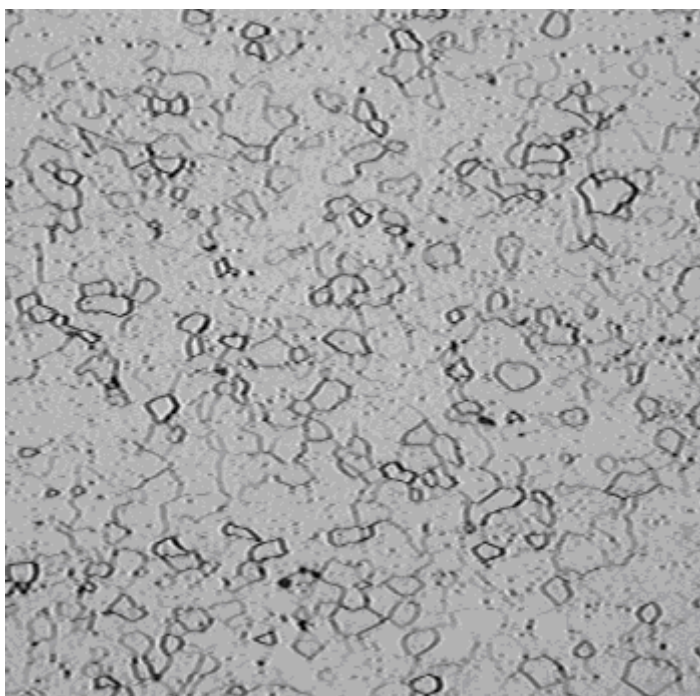


1U 200X

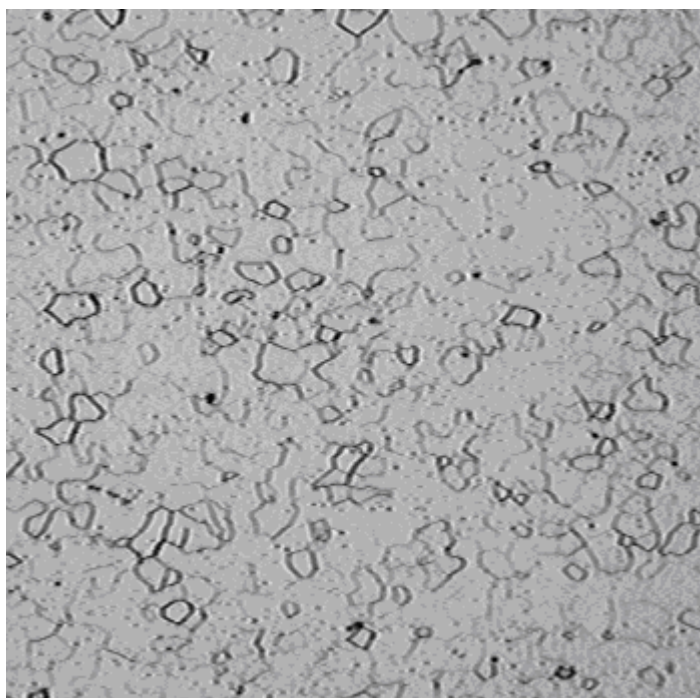


2U 200X

A.6 microestructura de las muestras 1U y 2U a 200X

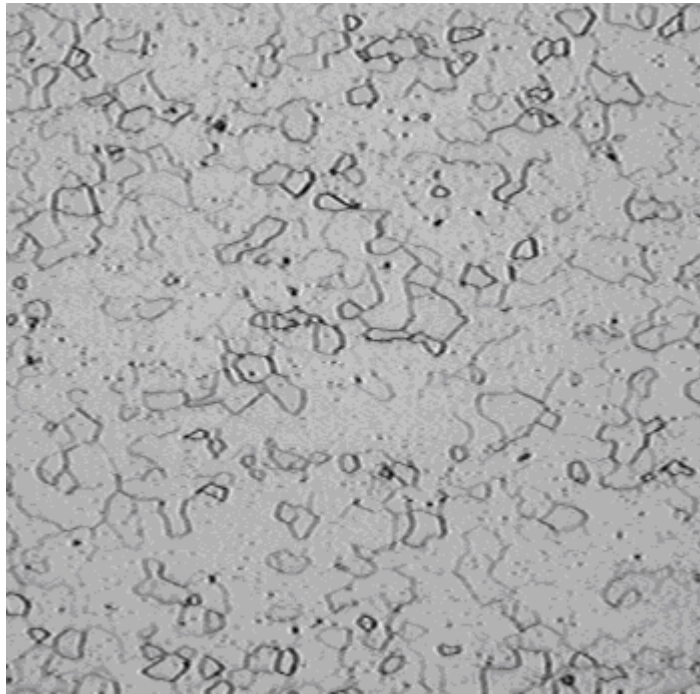


3U 200X

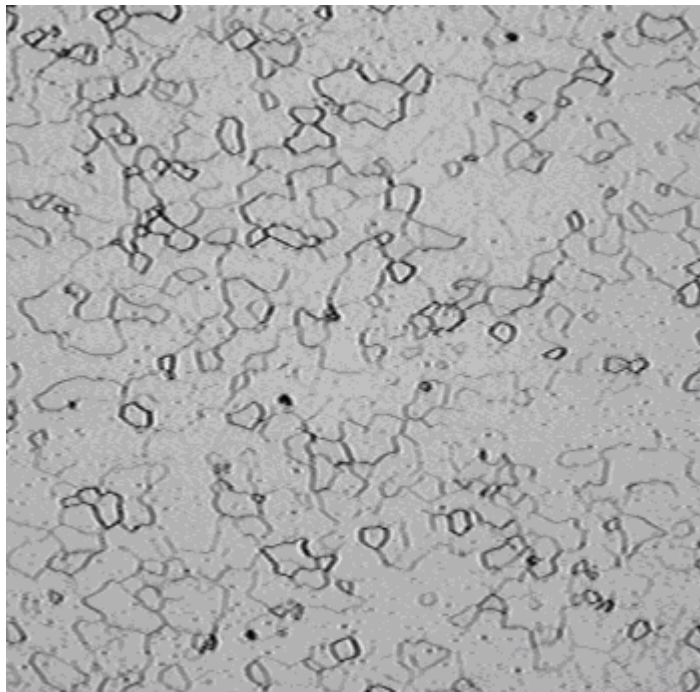


4U 200X

A.7 microestructura de las muestras 3U y 4U a 200X

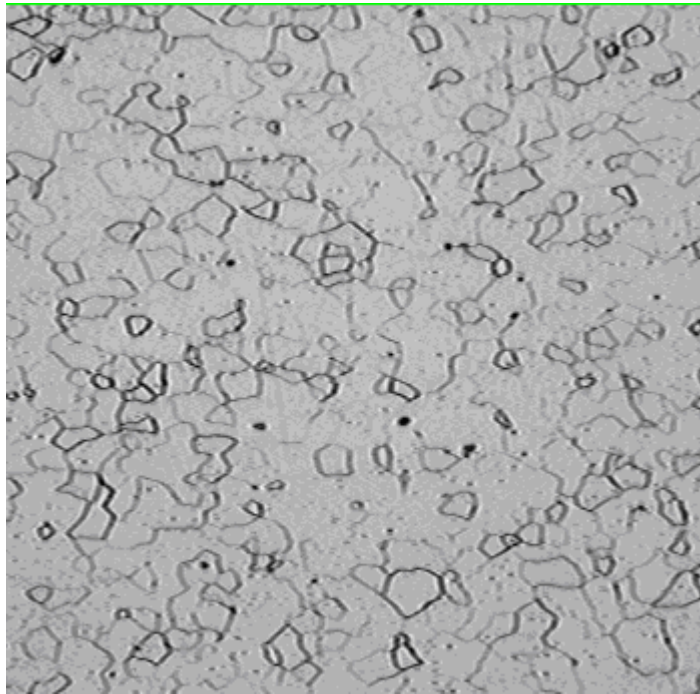


5U 200X

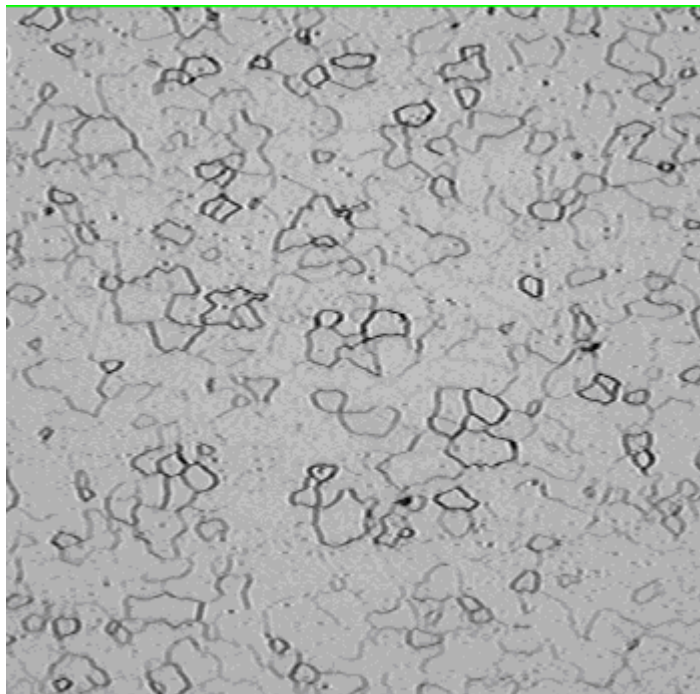


6U 200X

A.8 microestructura de las muestras 5U y 6U a 200X

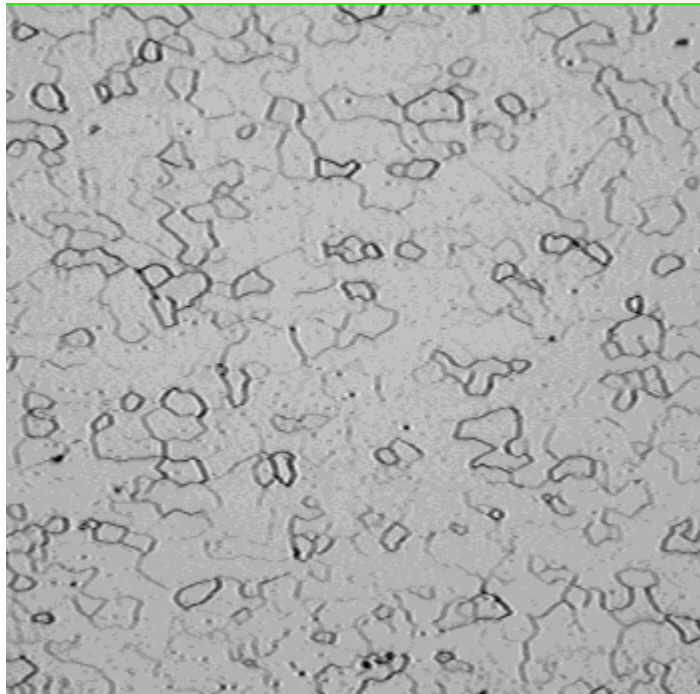


7U 200X

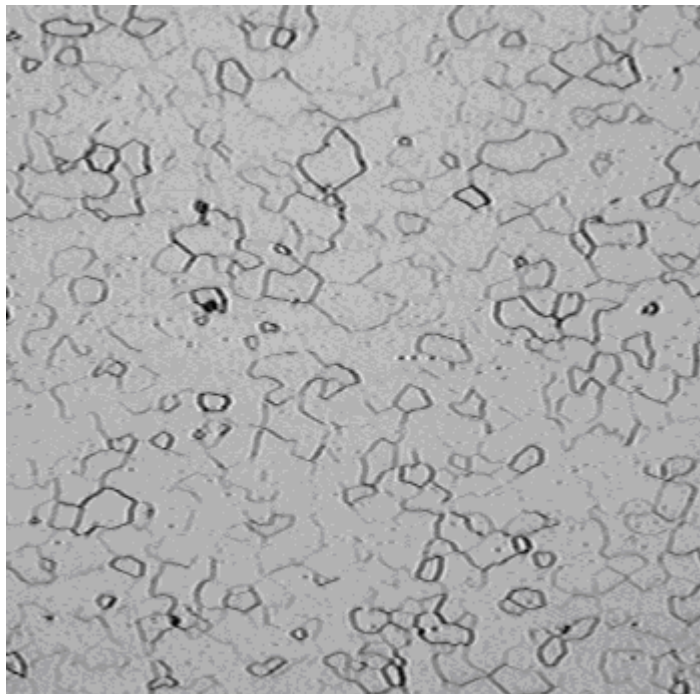


8U 200X

A.9 microestructura de las muestras 7U y 8U a 200X

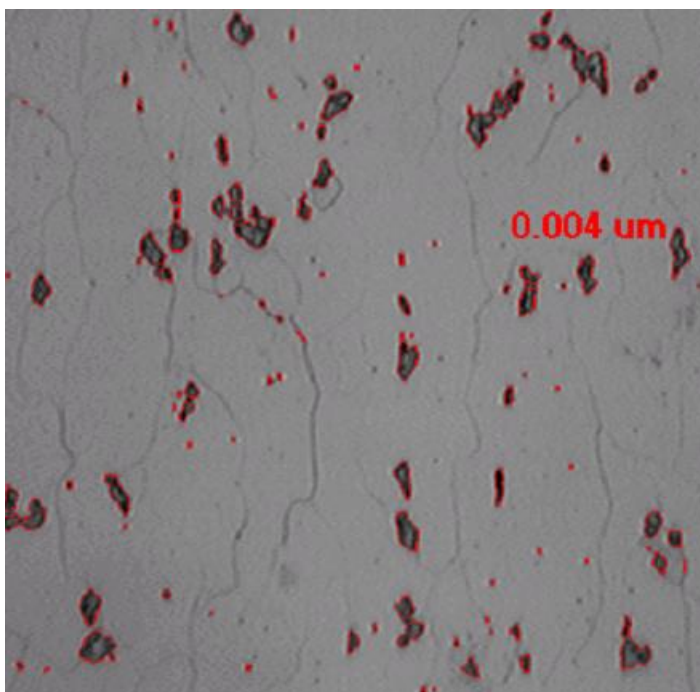


9U 200X

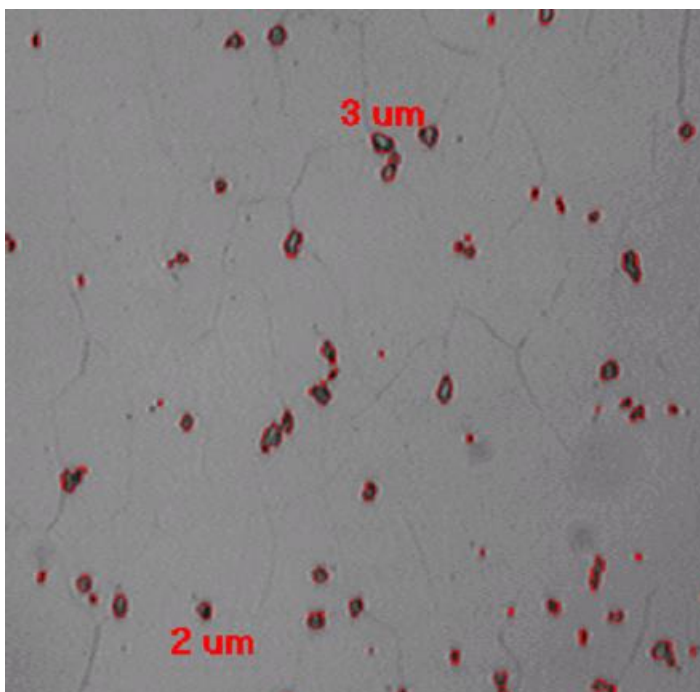


10U 200X

A.10 microestructura de las muestras 9U y 10U a 200X

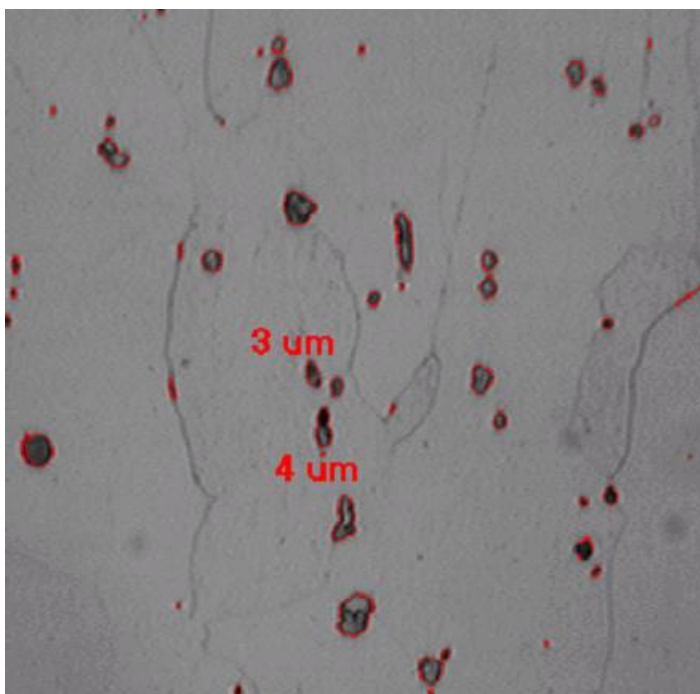


Muestra 1C a 1000X

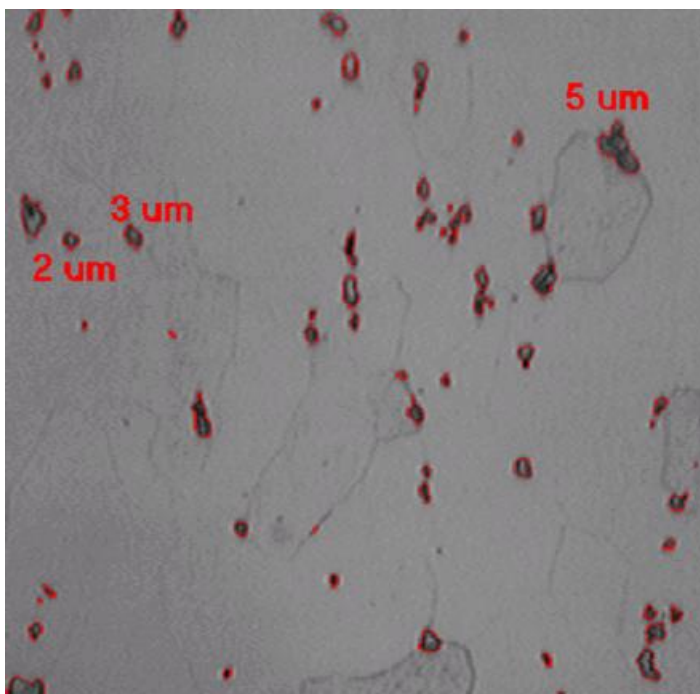


Muestra 2C a 1000X

A.11 Precipitados de las muestras 1C y 2C a 1000X

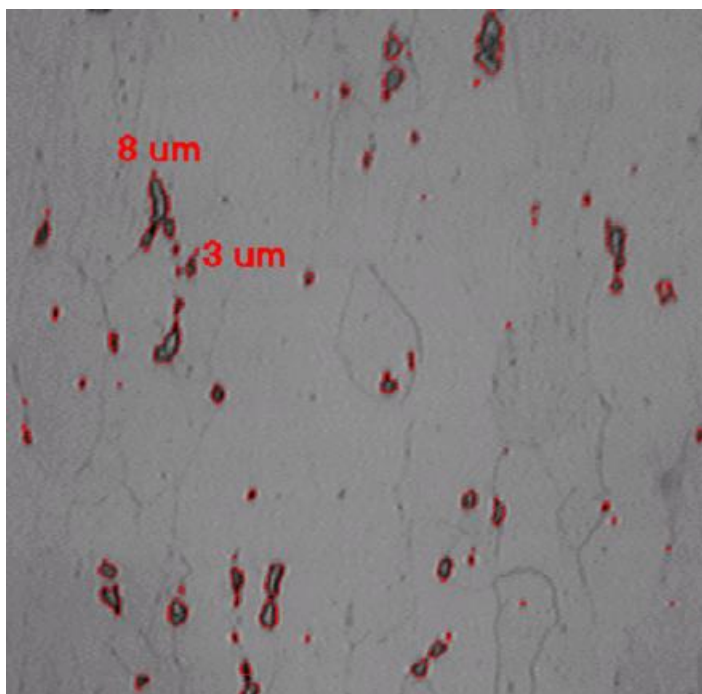


Muestra 3C a 1000X

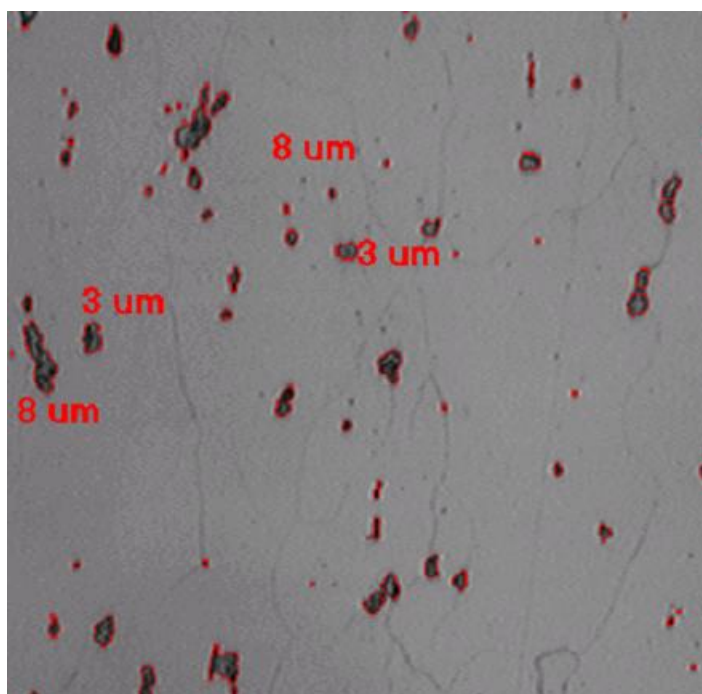


Muestra 4C a 1000X

## A.12 Precipitados de las muestras 3C y 4C a 1000X



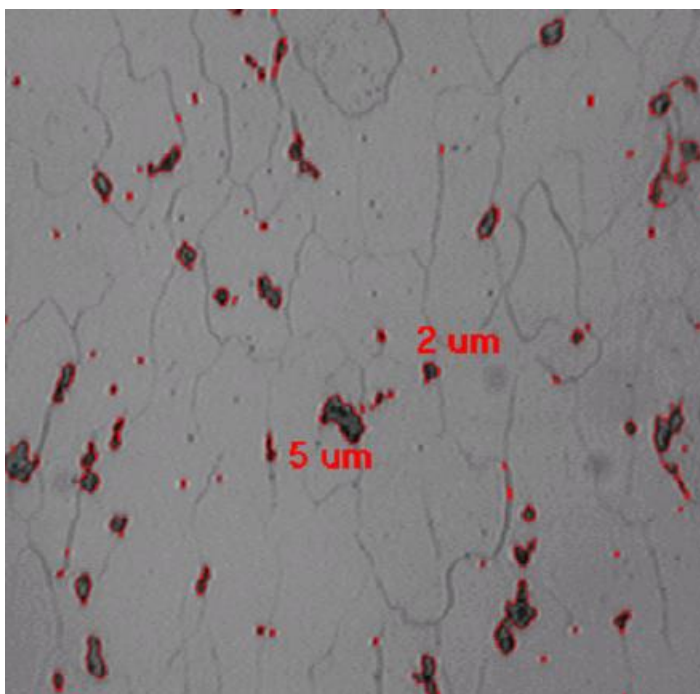
Muestra 5C a 1000X



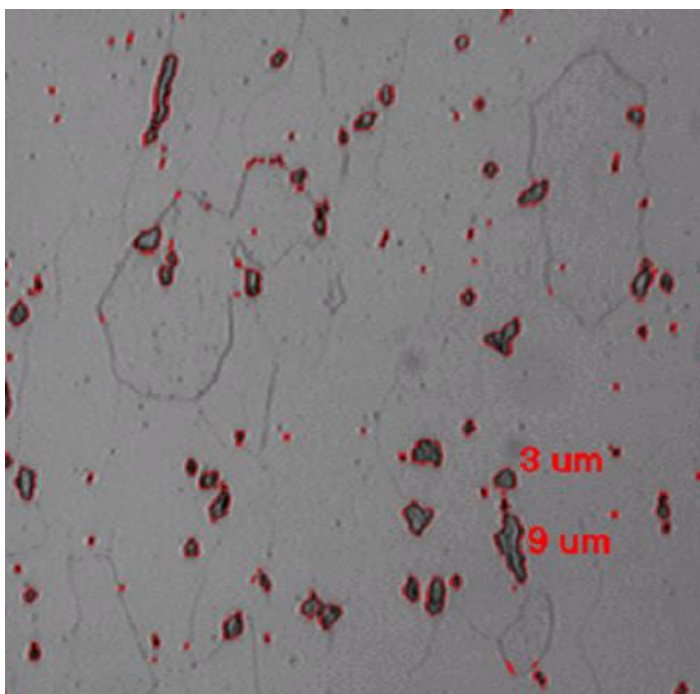
Muestra 6C a 1000X

A.13 Precipitados de las muestras 5C y 6C a 1000X



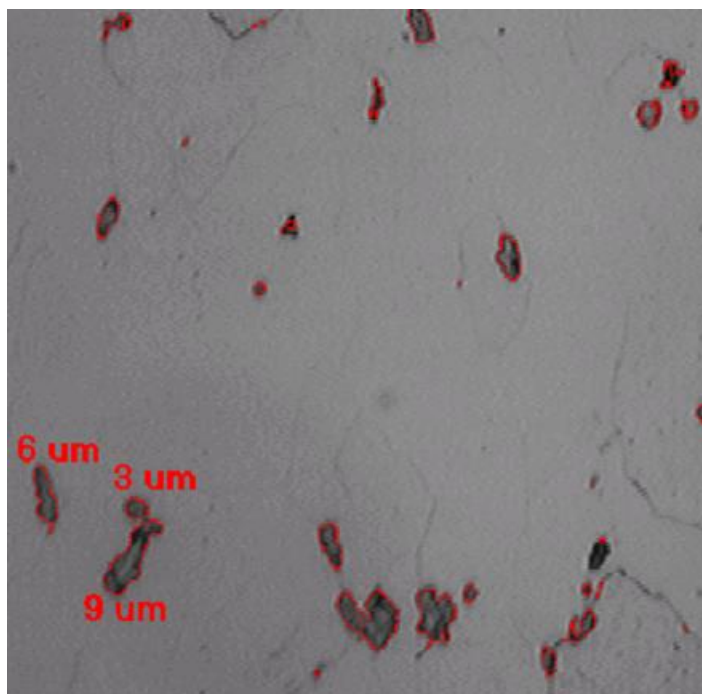


Muestra 7C a 1000X

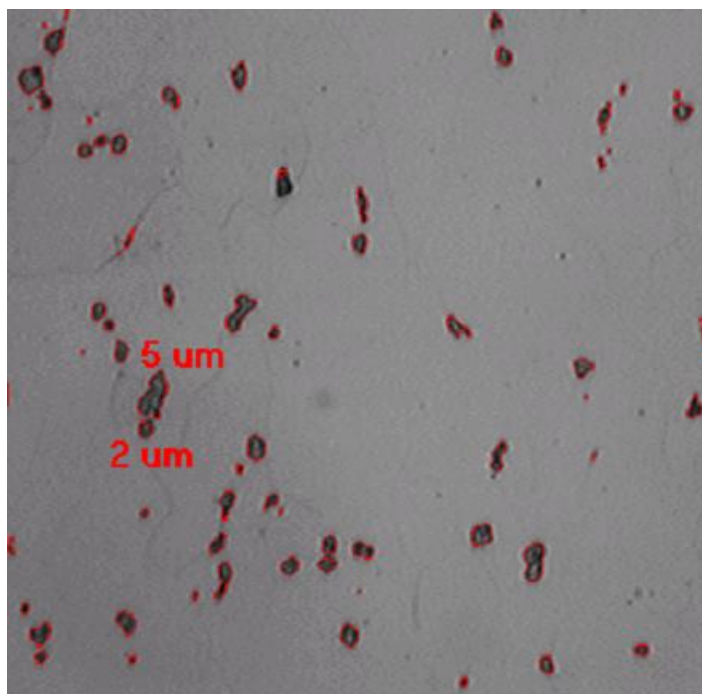


Muestra 8C a 1000X

A.14 Precipitados de las muestras 7C y 8C a 1000X

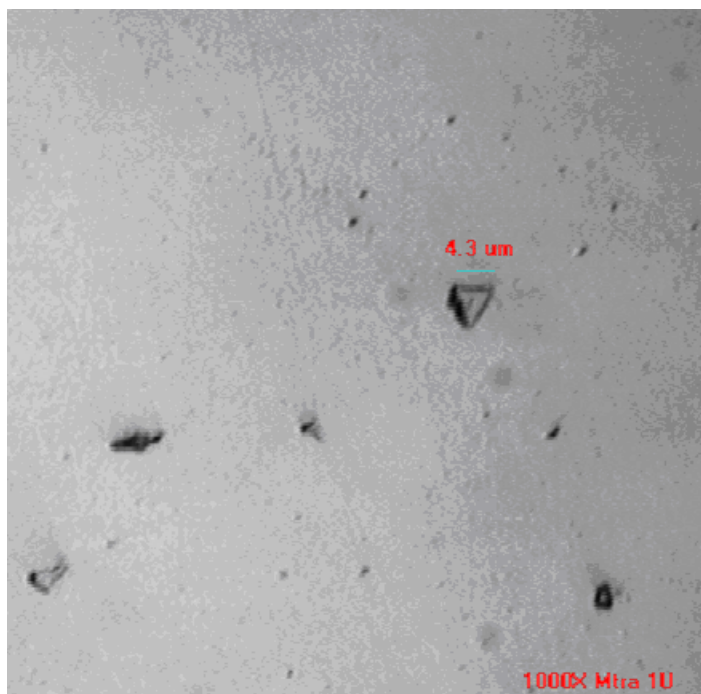


Muestra 9C a 1000X

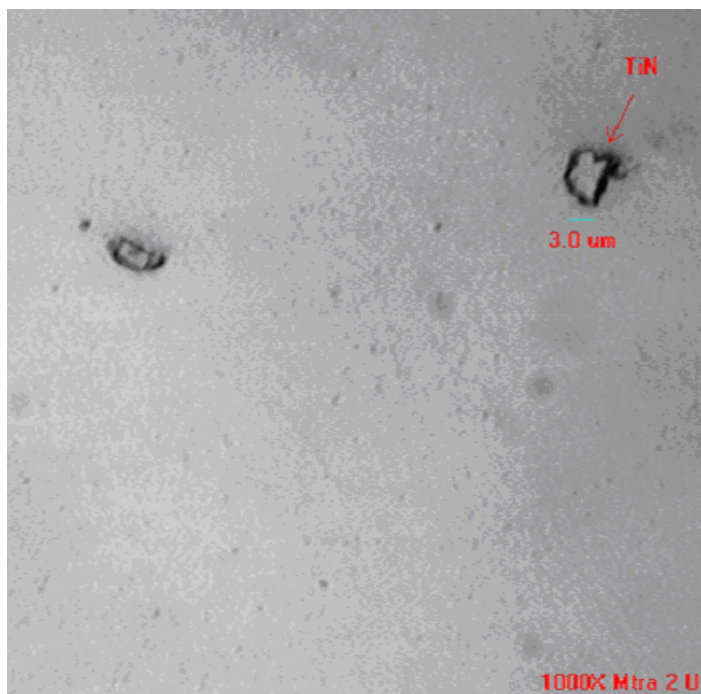


Muestra 10C a 1000X

A.15 Precipitados de las muestras 9C y 10C a 1000X

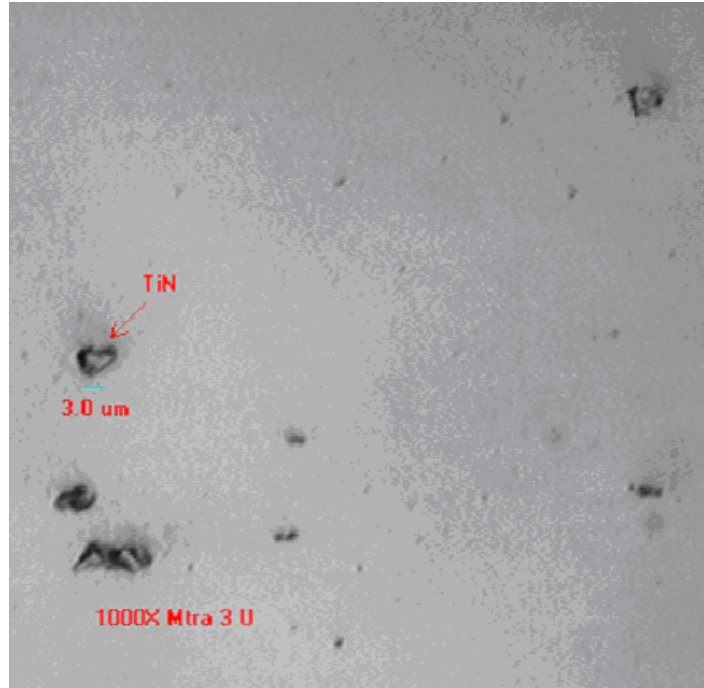


Muestra 1U a 1000X

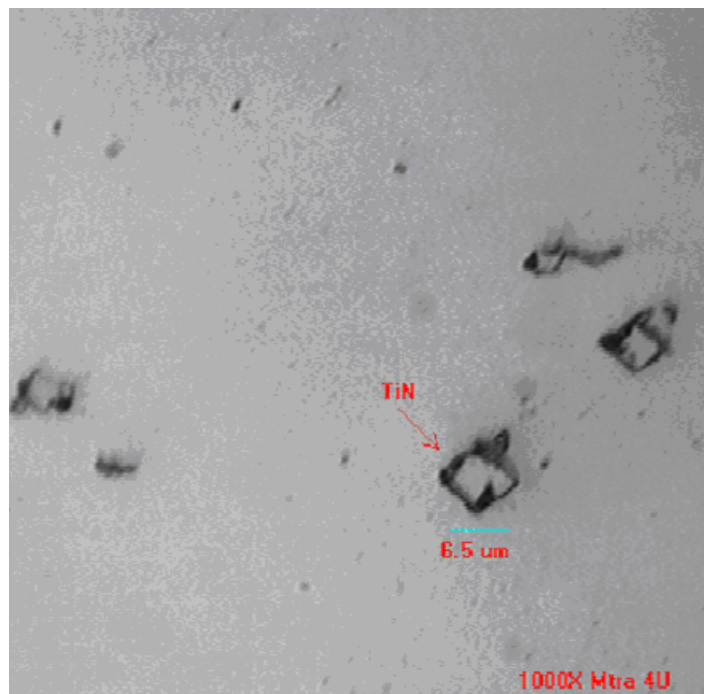


Muestra 2U a 1000X

A.16 Precipitados de las muestras 1U y 2U a 1000X

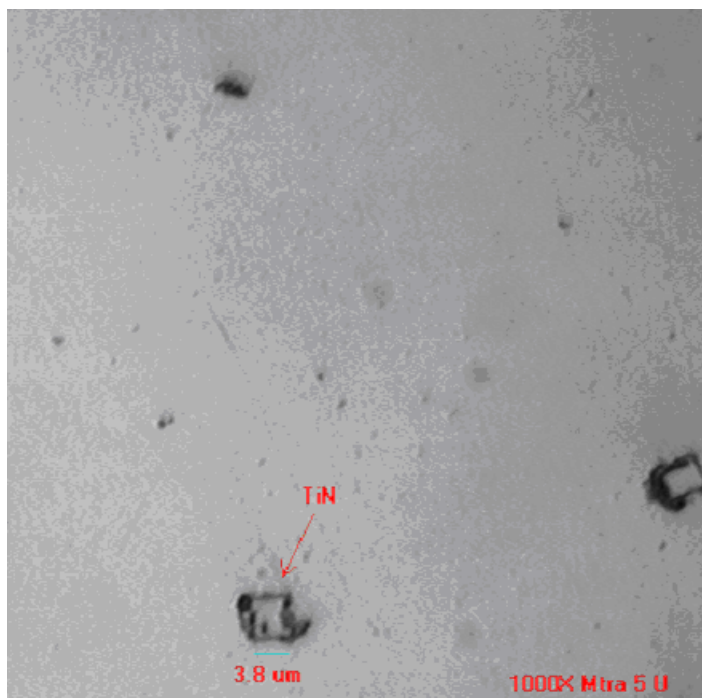


Muestra 3U a 1000X

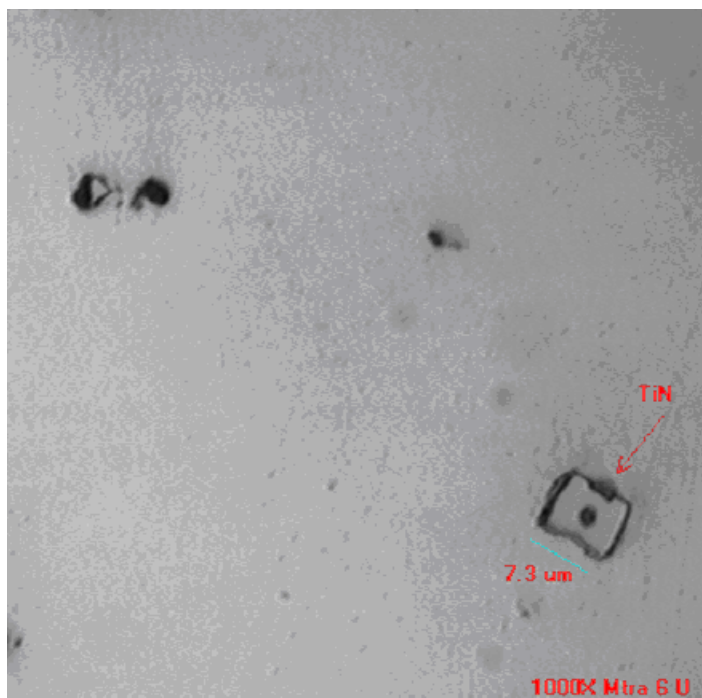


Muestra a 4U a 1000X

A.17 Precipitados de las muestras 3U y 4U a 1000X

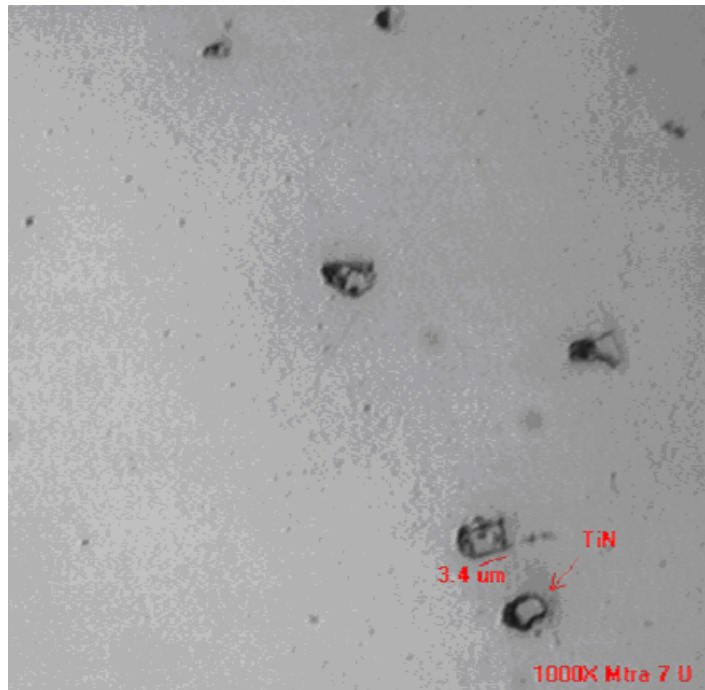


Muestra 5U a 1000X

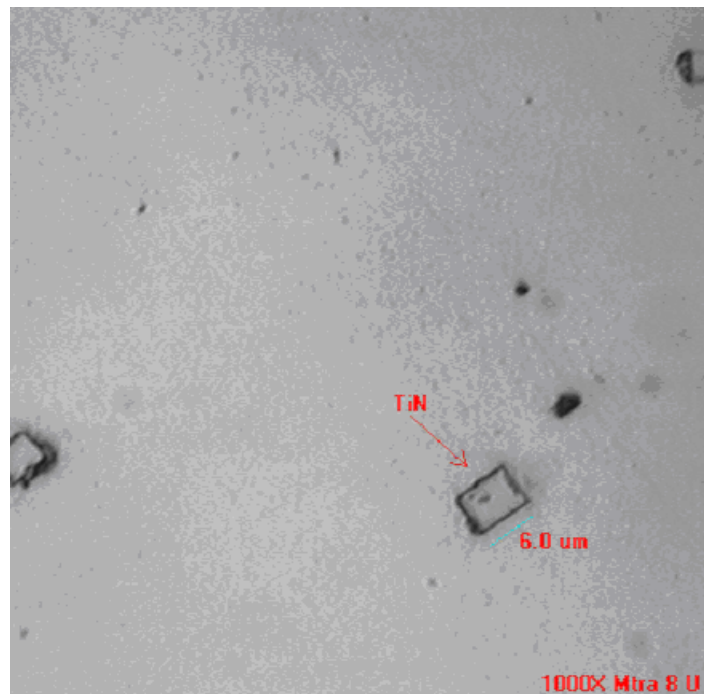


Muestra 6U a 1000X

A.18 Precipitados de las muestras 5U y 6U a 1000X

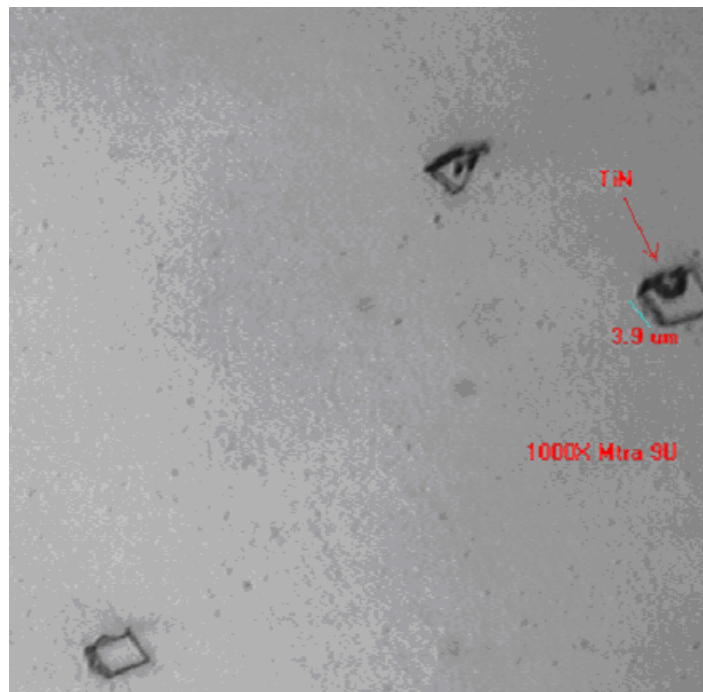


Muestra 7U a 1000X

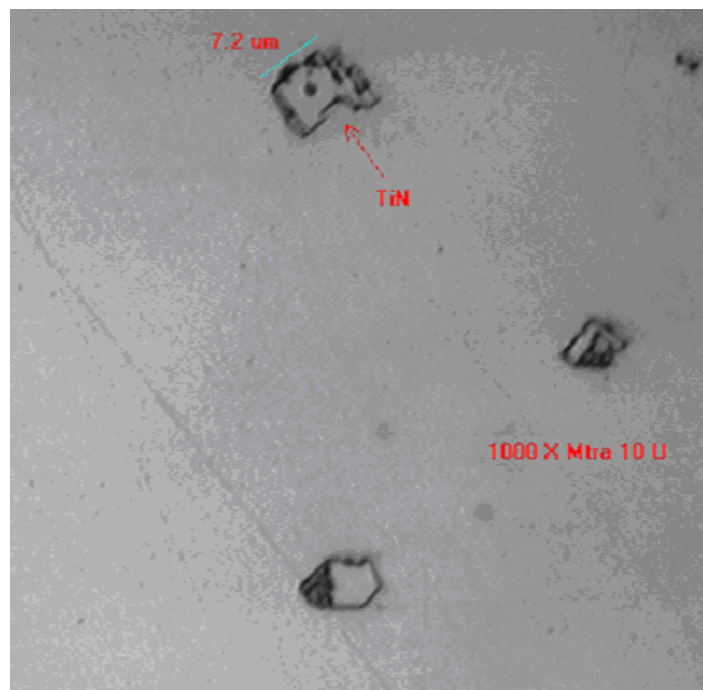


Muestra 8U a 1000X

A.19 Precipitados de las muestras 7U y 8U a 1000X

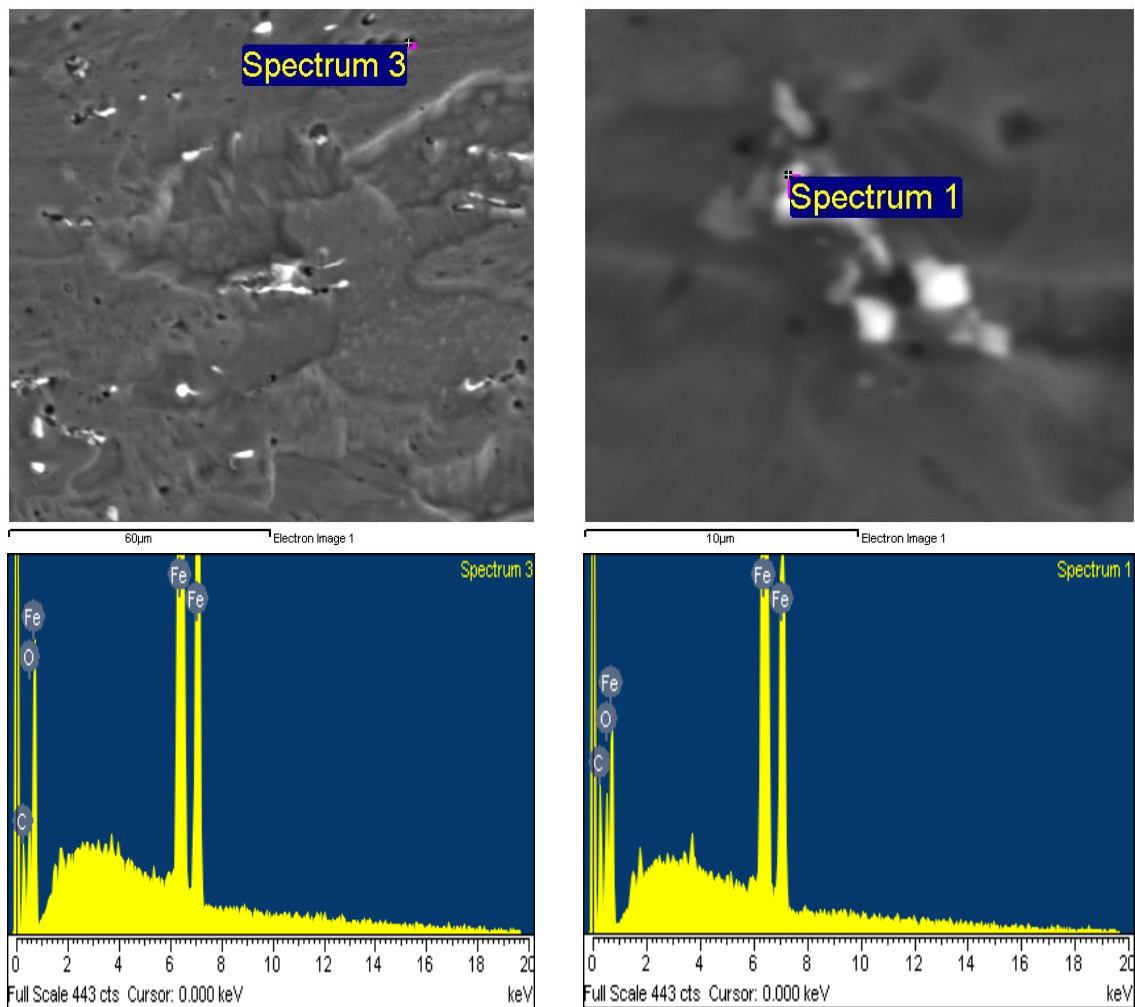


Muestra 9U a 1000X



Muestra 10U a 1000X

## A.20 Precipitados de las muestras 9U y 10U a 1000X

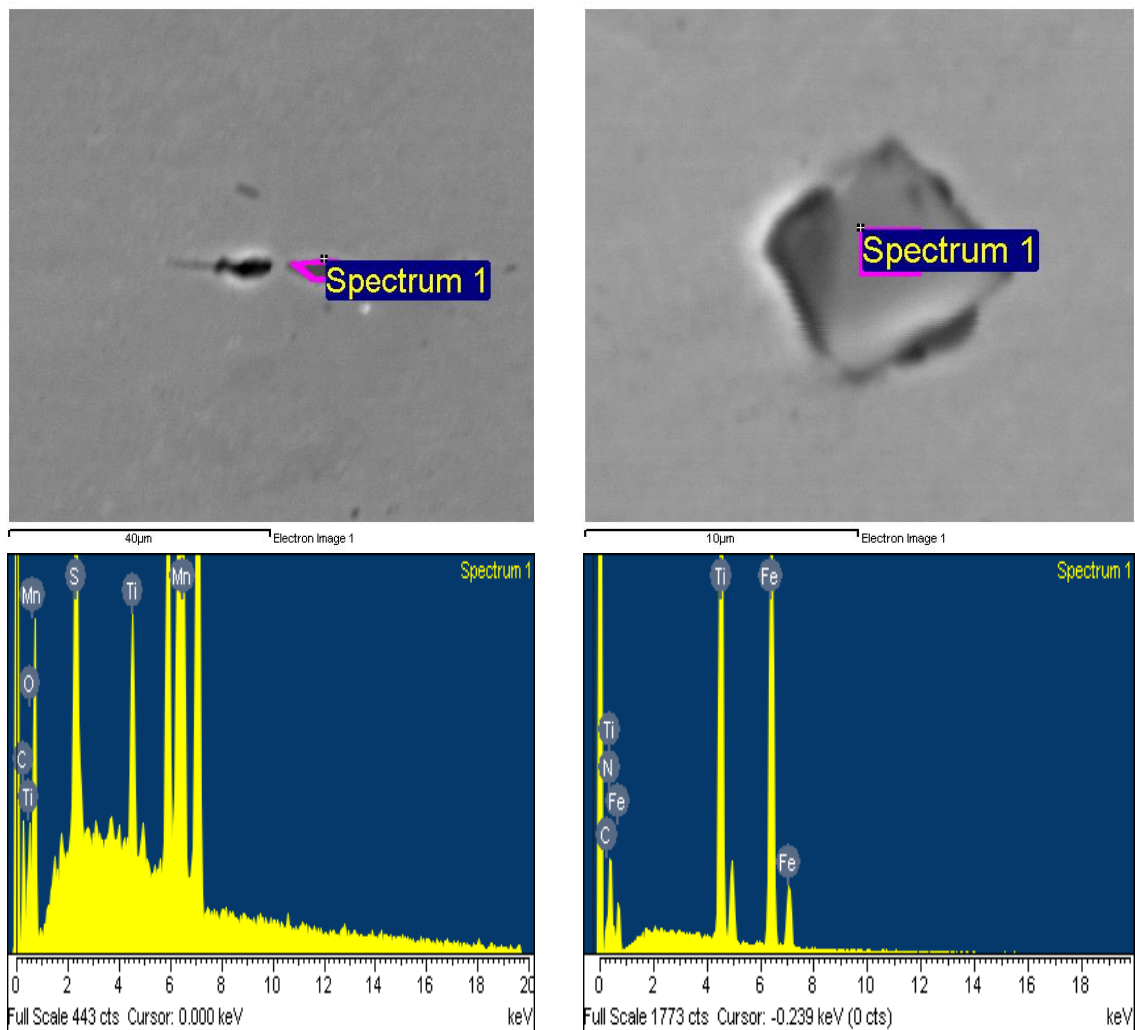


Muestra 1C, Imagen a 2000X

Muestra 1C, Imagen a 8000X

A 21 Imagen y espectros de los microanálisis por SEM de la muestra 1C, los cuales nos indican la presencia de oxido de hierro y oxido de carbono





Muestra 7U, Imagen a 3000X

Muestra 7U, Imagen a 8000X

A 22 Imagen y espectros de los microanálisis por SEM de la muestra 7U, el espectro a 3000X nos indica la presencia de carburo de titanio, sulfuro de manganeso y el de 8000X nos indica la presencia de nitruro de titanio.