



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

“TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA UN ACERO
DUPLEX TIPO 329”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

JOSE ANGEL RAFAEL HERNÁNDEZ FELIPE

ASESOR: DR. HÉCTOR ENRIQUE CURIEL REYNA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
ASUNTO: **VOTO APROBATORIO**

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos **LA TESIS:**

"Tratamientos Térmicos Para un Acero Duplex Tipo 329".

Que presenta el pasante: **JOSÉ ANGEL RAFAEL HERNÁNDEZ FELIPE**
Con número de cuenta: **30121884-7** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Electricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 26 de Junio de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. José Guadalupe Alfonso Ramos Anastasio	
VOCAL	M.I. José Juan Contreras Espinosa	
SECRETARIO	Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna	
1er SUPLENTE	Ing. Enrique Cortés González	
2do SUPLENTE	Dra. Jatzibe Adriana Correa Espinoza	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HHA/Vc

DEDICATORIAS:

POR EL TRABAJO REALIZADO, LA CONSTANCIA, EL ESFUERZO, LA DEDICACIÓN, LA PERSEVERANCIA, LOS SUEÑOS, LA FÉ Y LA DISCIPLINA PARA EL DESARROLLO DE ESTA OBRA DEDICO ESTA TESIS A:

Todas esas personas que en algún momento de mi vida caminaron a mi lado brindándome su amistad, su apoyo y sus palabras que jamás se borrarán. Algunas están aquí presentes otras están viviendo su propio sueño pero sin importar el lugar en donde se encuentren y si alguna vez llegan a leer estas líneas entenderán que formaron gran parte de mi vida y de mis logros.

A DIOS: Te doy gracias por estos momentos que en el tiempo me has brindado, sé que esto es el comienzo de nuestra historia por eso este instante era necesario. Ahora entiendo que era ya el momento de aprender y crecer, ya es tiempo de ser el hombre que esperas. Gracias porque has dado las herramientas para construir la vida que pretendo y gracias sobretodo por permitirme conocer a personas esenciales sin las cuales no hubiese podido alcanzar esta meta.

Tengo un trato contigo Dios, jamás podré engañarte y lo sabes. Solo una oportunidad, un instante, un sueño, una vida, un destino, y finalmente una eternidad... solo eso es necesario, confío en tí y también en mí, así que con las acciones permitidas es inevitable alcanzar las estrellas y tarde o temprano te cumpliré lo prometido.

“Dios, otórgame la serenidad de aceptar las cosas que no puedo cambiar, el valor de cambiar las cosas que pueda y la sabiduría para poder discernir.” -Francisco de Asis.-

A mi mamá Adelaida Felipe. Porque gracias a usted quien me brindó su cariño, su apoyo y su amor he logrado realizar esta gran meta, le doy las gracias por la confianza que en mí depositó, gracias porque solo usted me respaldó desde el inicio de mi educación y no dejó de hacerlo hasta que finalmente lograra este objetivo, espero seguir por el camino que me ha mostrado, gracias también por haber estado presente en este trabajo y por no dejar de sostener mis pasos, por usted ahora mis alas son mas fuertes que cuando era solo un niño y por lo cual siempre viviré eternamente agradecido.

A tí, Lety M. Fiel. Porque hay momentos en la vida en que una sola decisión, en un solo instante cambia irremediabilmente el curso de las cosas, y ese instante mágico que cambió el rumbo para siempre solo tú lo podías brindar, contigo conocí la otra parte de mi vida y lo mejor, también conocí la tuya, me enseñaste a disfrutar los momentos importantes de cada instante, tuviste la confianza en mí que no muchos mostraban y aún así, nunca dudaste de mi capacidad, me diste el aliento que requería para culminar este logro, requería de tu ayuda y la brindaste de esta, una manera imprescindible.

“En esta vida o en la otra...” jamás dudé de estas líneas aunque no fueron mis labios quien las pronunciaron pero siempre estuve seguro de ellas, ahora sé que la vida nos da esa oportunidad de hacer las cosas bien, pero deja que nosotros tengamos el valor de tomar la decisión para emprender la marcha, se requiere valor para eso, tu sabes que siempre te agradeceré esto que haces por mí, directa e indirectamente, pero es grande.

El pensar que las personas jamás podremos cambiar es cierto, pero hay quien se atreve a mejorar, eso si puede cambiar su mundo.

“El error es la otra cara de la excelencia”

—Evoelo—

A mi papá Simón Hernández. Para quien espero que este trabajo represente un símbolo de esfuerzo de mucho tiempo, sabes que con dedicación y empeño todo se puede realizar. Espero mostrarte que a veces los logros mas grandes requieren un poco más de tiempo.

A mis Hermanos. Por que gracias a ustedes estoy en este punto, siempre me apoyaron en especial a ti Olis por tu gran sabiduría, a todos ustedes les aseguro que no los defraudaré, ustedes saben que esto es solo el principio...

A mi amigo Moisés Hernández. Por acompañarme durante este tiempo, mostrarse como un ejemplo enseñarme a su manera que siempre hay que caminar hacia enfrente por difícil que parezca el camino, gracias por tu apoyo en este trabajo y gracias por tu amistad sincera. Siempre juntos...

A mis Amigas. Jocelyn y Angie. Por haber estado cerca en esos momentos los cuales definieron este lugar, sin ustedes, este hoy hubiera tardado mas y esto no hubiera sido posible, por eso les agradezco los instantes prestados al tiempo.

A ustedes Amigos. Alejandro Veloz, Eric Zenil, Diego García, Miguel Ángel Hernández, Fermín Romero, porque sin ustedes el tiempo en la universidad hubiera sido simple, solo un paso mas que dar para alcanzar la meta pero ustedes hicieron posible que la carrera fuera grandiosa.

AGRADECIMIENTOS:

TE AGRADEZCO A TI QUERIDA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO que junto al Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Naucalpan y a la Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán fueron mi casa de estudio, gracias por permitirme adquirir los conocimientos necesarios para la realización de mi carrera como profesional, ustedes formaron con su enseñanza y disciplina no solo al profesionista sino a la persona que soy ahora. Sé que con mi trabajo y dedicación te brindaré el prestigio que mereces, será la única forma de agradecerte.

A MI ASESOR DR. HÉCTOR ENRIQUE CURIEL REYNA: Por el tiempo y dedicación en la realización de esta tesis, por la paciencia que mostró hacia mí, por los consejos, las palabras brindadas, las enseñanzas, el ejemplo y por guiarme a la culminación de este proyecto. Gracias Dr.

AL MAESTRO TOMÁS RANGEL ORTIZ: Por los momentos agradables que se tuvieron en la realización de esta tesis, por su tiempo, sus consejos y su compañía en la elaboración de este trabajo. Gracias Maestro.

AL MAESTRO JOSÉ JUAN CONTRERAS ESPINOSA: Por el apoyo brindado durante toda la carrera y por que finalmente entiendo lo que pretendía lograr al dirigirme esas palabras en cada pasillo donde nos encontrase, sus consejos que me han llevado a lograr grandes cosas.

AL ING. NOÉ ALBERTO CORTÉS GUERRERO: Por todo el apoyo que me brindó para poder realizar toda la parte experimental de este trabajo para no tener ningún error en las pruebas realizadas, Gracias.

*“La libertad de la fantasía
no es ninguna huida a la irrealidad,
es creación y osadía,
porque quien cree en la magia
está condenado a encontrarla”*

-Eugène Ionesco-

forever yours... Raff



**TRATAMIENTOS TÉRMICOS
PARA UN ACERO DUPLEX TIPO 329**

TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA UN ACERO DUPLEX TIPO 329

Autor: José Ángel Rafael Hernández Felipe
Cta. 30121884-7

Asesor: Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna

RESUMEN

El presente trabajo “Tratamientos térmicos para un acero dúplex tipo 329” fue desarrollado en el Centro de Asimilación Tecnológica (CAT) ubicado en Av. Dr. Jorge Jiménez Cantú, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, C.P. 54740 perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este trabajo de Investigación tiene como objetivo principal el estudio del acero Dúplex 329 dado que actualmente es un acero que se está empleando cada vez más en la industria y tiene importancia el conocer el comportamiento de la estructura metalúrgica y de la dureza cuando es sometido a altas temperaturas. En este trabajo este acero fue sometido a una variación de temperatura en forma experimental tomando como referencia una muestra original estabilizada, para así determinar el rango de temperatura al que debe ser tratado para evitar la fragilidad por la aparición de fase sigma.

Se efectuaron ensayos de dureza con el objetivo de estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas después de que el material estuvo sometido a condiciones de temperatura entre los 750°C y 1050°C.

Para el estudio metalúrgico se realizó un ensayo de microscopía óptica a 6 muestras representativas de dicho material tratadas a diferentes temperaturas, así como a la muestra original, para tener una referencia a la hora de comparar los resultados.

De acuerdo a los estudios realizados se observó que el material Dúplex 329 incrementó su dureza un 19% reflejado en la muestra tratada a 900°C, desde el punto de vista metalúrgico presentó carburos intercristalinos y transcristalinos de tipo globular, siendo estos carburos de Cromo, así mismo se pudo observar en esta misma muestra una aparición de fase sigma lo que viene a reafirmar el incremento de la dureza que arrojaron los resultados obtenidos en el ensayo de dureza Vickers. Estos resultados darán oportunidad a que se tenga el conocimiento necesario si en su aplicación debe ser sometido a altas temperaturas ya que es fundamental conservar las propiedades físico-mecánicas de este acero.

INDICE

Resumen.....	I
Introducción	4
Justificación.....	8
Objetivo general.....	9

CAPITULO 1. ACEROS INOXIDABLES

1.1. Qué es un acero inoxidable.....	10
1.2 Tipos y clasificación de los aceros inoxidable.	11
1.3 Composición química de los aceros inoxidable.....	14
1.4 Efecto del Cromo y Níquel sobre los aceros inoxidable.....	16
1.5 Diagrama de Shaeffler.....	16

CAPITULO 2. ACEROS DUPLEX 329

2.1 Qué es un acero dúplex 329	18
2.2 Generalidades de los aceros dúplex 329.	19
2.2.1 Transformaciones en caliente	20
2.2.2 Tipos de aceros dúplex.....	20
2.3 Características de los aceros duplex 329.	21
2.4 Propiedades mecánicas, físicas y químicas.....	21
2.4.1 Resistencia a la tracción	21

2.4.2 Tenacidad	22
2.4.3 Resistencia a la fatiga	22
2.4.4 Composición química del acero duplex 329	24
2.5 Fase sigma en los aceros inoxidable dúplex	24
2.6 Aplicaciones del acero duplex 329.....	25

**CAPITULO 3.
DESARROLLO EXPERIMENTAL**

3.1 Preparacion de las muestras.....	28
3.1.1 Maquinaria y materiales.	29
3.1.2 Obtención de las muestras.....	30
3.1.3 Rectificación	30
3.2 Tratamientos termicos del acero duplex 329.....	31
3.2.1 Procedimiento.....	33
3.3 Ensayo de dureza Vickers.....	34
3.3.1 Maquinaria, materiales e instrumentos de medida	36
3.3.2 Realización del ensayo	37
3.3.3 Resultados de la prueba de dureza vickers.....	39
3.4 Metalografía.....	43
3.4.1 Material, maquinaria y equipo.....	43
3.4.2 Realización del ensayo	45
3.4.2.1 Ataque electrolítico.....	45
3.4.3 Resultados de las metalografías.....	45

CAPITULO 4.
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Dureza.	57
4.2 Metalografía.....	58
4.3 Conclusiones.	60
5. Bibliografía	65

INTRODUCCIÓN:

En toda la historia, el ser humano ha hecho descubrimientos que son relevantes para adaptarse a las nuevas situaciones que se presentan y mejorar las condiciones del entorno en el que vive. En el campo de la industria siderúrgica y metalúrgica este principio también se aplica, puesto que constantemente son llevados a cabo procesos para mejorar materiales que empleados en diversos entornos los mejoran de forma considerable. Los aceros dúplex son uno de esos productos que son elaborados uniendo lo mejor de las propiedades de materiales ya establecidos, para obtener un producto con las propiedades físicas y mecánicas superiores, es como plasmar las mejores características de dos estados del acero en un solo material.

El desarrollo de los aceros inoxidable aconteció en torno a la primera guerra mundial. En forma independiente y casi simultánea, en Inglaterra y en Alemania se descubrieron los aceros inoxidable tal como los conocemos ahora, siendo el metalúrgico inglés Harry Brearley quien durante la guerra se dedicó a investigar cómo mejorar una aleación para proteger los cilindros de los cañones, y encontró que agregando Cromo a los aceros de bajo Carbono, obtenía aceros resistentes a las manchas o resistentes a la oxidación.

Los doctores Strauss y Maurer, de Alemania, patentaron en 1912 dos grupos de aceros inoxidable al Cromo-Níquel de bajo contenido de Carbono; uno de éstos, con la denominación 18-8 que ha sido utilizado desde entonces en numerosas aplicaciones.

Los aceros inoxidable son aleaciones de hierro, cromo y carbono, que en ocasiones se combinan con otros elementos aleantes, fundamentalmente Níquel,

Molibdeno, Manganeso, Silicio, Titanio, Niobio, Nitrógeno, que le confieren una alta resistencia a varios tipos de corrosión. La mínima cantidad de cromo necesaria para proporcionar esta resistencia a la corrosión está entre el 10 y el 12%. La razón por la que estos aceros presentan una alta resistencia a la corrosión es que en la superficie del acero y en presencia de un ambiente oxidante, tiene lugar el crecimiento de una capa muy fina y compacta de óxido de cromo que aísla al material de los ataques corrosivos.

Esta película se llama película pasiva, siendo este sistema de protección el mismo que se consigue en otros productos con un tratamiento superficial como el galvanizado, zincado, cromado, etc., con la diferencia de que en el caso del acero inoxidable es la propia aleación la que genera esta capa pasiva, posibilitando la reconstrucción de dicha capa cada vez que se daña, y manteniendo por lo tanto la protección permanente del acero.

Existen muchos tipos de acero inoxidable y no todos son adecuados para aplicaciones estructurales, particularmente cuando se llevan a cabo operaciones de soldadura. Existen cinco grupos básicos de acero inoxidable clasificados de acuerdo con su estructura metalúrgica: austeníticos, ferríticos, martensíticos, dúplex y de precipitación-endurecimiento (endurecimiento por precipitación).

Los aceros inoxidables que contienen más de un 7% de Níquel se llaman "austeníticos", ya que tienen una estructura metalográfica en estado recocido, formada básicamente por austenita, No son magnéticos en estado recocido, y por tanto no son atraídos por un imán. Estos aceros austeníticos se pueden endurecer por deformación, pasando su estructura metalográfica a contener "martensita". En esta situación se convierten en parcialmente magnéticos.

Los aceros inoxidable austeníticos y dúplex son, en general, los grupos más empleados en aplicaciones estructurales. Los aceros inoxidable austeníticos proporcionan una buena combinación de resistencia a la corrosión y de las propiedades de fabricación. Los aceros inoxidable dúplex tienen una resistencia elevada y también una alta resistencia al desgaste, con una muy buena resistencia a la corrosión bajo tensión.

La denominación Dúplex se aplica a un tipo de acero inoxidable cuya composición química ha sido cuidadosamente ajustada para lograr una estructura cristalina mixta de aproximadamente mitad de fase Ferrita y mitad de fase Austenita, esto se logra incorporando a un acero ferrítico, una cantidad pequeña y controlada de Níquel (a veces Molibdeno y Nitrógeno)

La Familia de los aceros inoxidable dúplex se puede dividir en tres grandes categorías:

Aceros Dúplex sin Mo (Molibdeno)

Aceros Dúplex 22 Cr (22 % Cromo)

Aceros Dúplex 25 Cr (22 % Cromo)

Los dúplex 22 Cr han sido utilizados desde 1970 en las plataformas marinas en la industria del petróleo. Desde fines de la década de los 80 los dúplex 25 Cr, llamados también súper dúplex, de mayor resistencia mecánica, se han ido introduciendo gradualmente en este campo.

La principal razón para evolucionar hacia los aceros dúplex es el costo. Su menor porcentaje de Níquel (un elemento caro) y una mayor resistencia mecánica, que permiten ahorrar hasta un 25 % en peso reducen el costo de una instalación. Otra razón es su superior resistencia a la corrosión localizada.

Las propiedades de los aceros dúplex son muy sensibles a variaciones en la composición química especialmente de Cromo, Molibdeno, Níquel, y Nitrógeno. El Molibdeno y el Nitrógeno son importantes en determinar la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas, mientras que el Níquel es fundamental para mantener el equilibrio ferrita/austenita de la aleación. Tal es así que el 2205(S31803), que inicialmente apareció con 22%Cromo y 3% Molibdeno y luego fue disminuyendo hasta los valores límite permitidos (perdiendo en propiedades), fue reemplazado por el 2205(S32205) con un mínimo de 22%Cromo y 3%Molibdeno subiendo también el valor mínimo de nitrógeno de 0.08% a 0.14%Nitrogeno.

JUSTIFICACIÓN

Hoy en día el uso de los aceros inoxidable dúplex va incrementándose considerablemente debido a propiedades que mejoran las carencias de los aceros inoxidable austeníticos y los ferríticos; en el caso de los primeros su fragilidad frente a la corrosión por fatiga causada por cloruros, y en los segundos sus complicaciones para fabricarlos y soldarlos.

Sin embargo también son susceptibles a un fenómeno conocido como límite de grano de fragilización por la fase sigma, se ha demostrado que causa una severa pérdida de ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión resultante en el fracaso de sus componentes, especialmente si son sometidos a cargas de impacto o el estrés excesivo. Al ser sometido a un tratamiento térmico el material va a cambiar algunas de sus propiedades que mejorarán la estructura del material, así que necesitamos saber más acerca de la fragilización por esta fase, como es y cómo evitar su ocurrencia.

Es por eso que en este trabajo de investigación se pretende mostrar el comportamiento del material al ser sometido a un rango de temperaturas que oscilan entre los 800°C hasta los 1050°C, en intervalos de 50°C para así poder conocer las temperaturas donde se refleje la aparición de esta fase y el mayor incremento, es decir, determinar en qué rango de temperaturas es posible aplicar algún tratamiento térmico sin que esta fase afecte de manera directa al material.

OBJETIVO GENERAL

Conocer el comportamiento de la estructura metalúrgica y de la dureza del acero Dúplex tipo 329 al ser sometido a una variación de temperatura en forma experimental tomando como referencia una muestra original estabilizada. Del mismo modo tener un panorama sobre el comportamiento de la fase sigma en este tipo de acero para evitar la fragilidad del material.

CAPÍTULO 1

ACEROS INOXIDABLES

1. 1 QUÉ ES UN ACERO INOXIDABLE.

Los Aceros Inoxidables contienen Cromo, en una cantidad superior a 10%, hasta valores del orden de 30%. Son aleaciones a base de Hierro, Cromo, Carbono y otros elementos, principalmente, Níquel, Molibdeno, Manganeso, Silicio y Titanio. El Cromo es un metal reactivo y se combina con el Oxígeno del aire o en cualquier otra condición oxidante para formar una película sobre el acero inoxidable que lo aísla del medio agresivo.

A los aceros inoxidable, entre otros, se les confieren una resistencia particular a algunos tipos de corrosión en determinadas aplicaciones industriales. De ahí que, la presencia de cada elemento en determinadas porcentajes produce variaciones distintas de las características intrínsecas de los diversos tipos.

Según la norma EN10088 se define a los aceros inoxidable como aquellas aleaciones férricas que contienen Cromo en una proporción mínima del 10.5 %. Se cree, que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es el resultado de la presencia de esta fina capa de óxido hidratado de Cromo en la superficie de estos aceros que impide, una vez formada esta, el contacto del acero con el medio oxidante.

La composición de esta película varía con el tipo de acero y con los diferentes tratamientos tales como laminado, decapado (picking) o tratamiento térmico. A esta situación se la denomina pasivación y la película formada es inerte frente a las condiciones oxidantes de la atmósfera terrestre. Esta película es transparente y

brillante y confiere al acero inoxidable la habilidad de retener su apariencia agradable a la vista.

El rango de condiciones bajo las cuales un Acero Inoxidable desarrolla pasivación puede ser amplio o reducido, la pasividad puede ser destruida por pequeños cambios de las condiciones. En condiciones favorables a la pasivación el metal adquiere potenciales de disolución cercanos al de los metales nobles.

La formación de esta película superficial de óxido de cromo sirve para la protección del acero inoxidable. Dicha película pasiva se vuelve a reconstruir cuando se la daña si el ambiente es suficientemente oxidante manteniendo una protección permanente del acero.

La importancia de este tipo de aceros, además de sus características mecánicas y su amplio uso en diferentes ramas de la industria que se extiende desde aplicaciones de la vida cotidiana hasta industrias muy complejas (química, petrolífera, nuclear, etc.), se debe a su alta producción a nivel mundial aparejado al desarrollo industrial después de la segunda guerra mundial. Es por eso que hoy en día los aceros inoxidables forman ahora parte imprescindible en la vida cotidiana moderna en todos sus aspectos.

1.2 TIPOS Y CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

Sabemos que los aceros inoxidables son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos. Como ya se ha comentado los principales elementos después del hierro son el cromo, el carbono y el níquel.

El porcentaje de dichos elementos y su variación cambia la porción de las fases presentes, lo cual da lugar a diferentes tipos de Aceros inoxidables quedando divididos en cinco familias, cada una con una microestructura única, elementos aleantes específicos y valores de propiedades mecánicas también específicos. Sobre la base de su microestructura, estos aceros se clasifican en:

- Ferríticos
- Austeníticos
- Martensíticos
- Dúplex
- Endurecidos por precipitación

La figura 1 muestra la clasificación de los aceros inoxidables, los cuales se encuentran al final de dicha estructura como consecuencia de su alto grado de aleación.



Figura 1. Árbol genealógico de los aceros inoxidables. Fuente: (Di Caprio 1999)

El acero inoxidable más simple contiene solamente Hierro y Cromo. En la figura 2 se muestra el diagrama de equilibrio estable Fierro–Cromo, una manera apropiada de introducirnos en la Metalurgia de esta aleación.

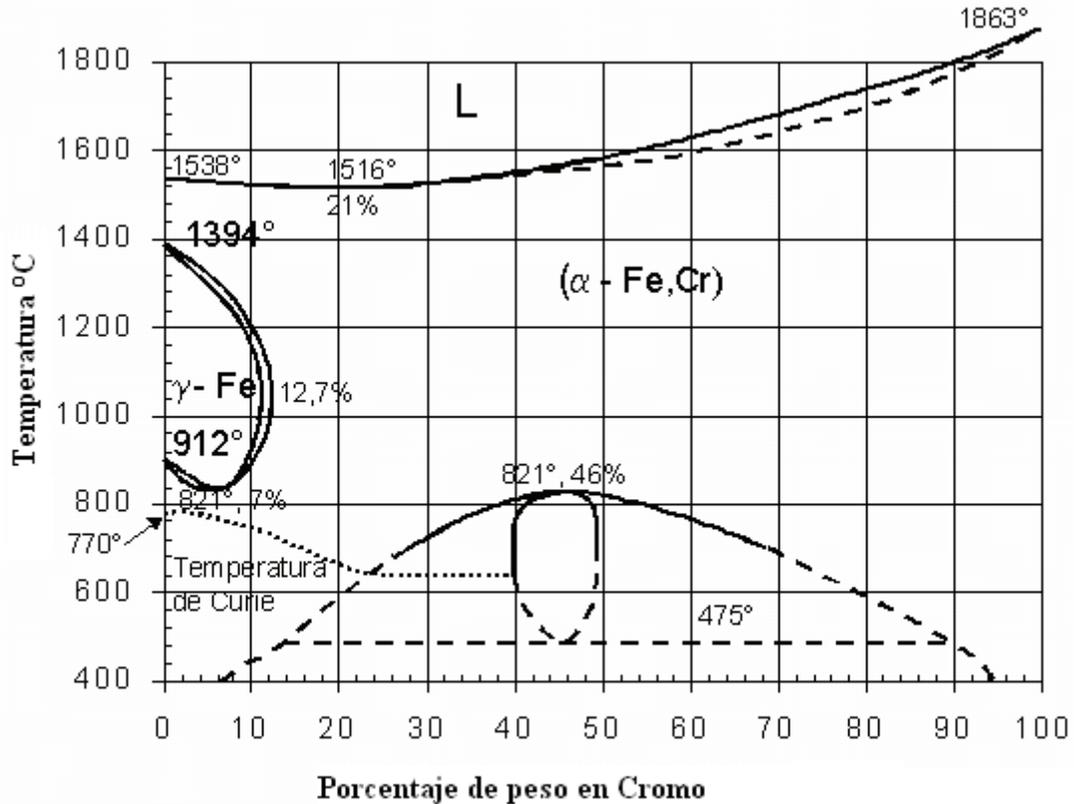


Figura 2. Diagrama de equilibrio estable de la aleación Hierro-Cromo.

Los aceros inoxidables Ferríticos son aceros aleados solo con Cromo y a veces también con Molibdeno. El Cromo es un elemento estabilizador de Ferrita que retiene la estructura cúbica centrada en el cuerpo del Hierro alfa, tienen como mínimo 10,5% de Cromo, con este rango de porcentaje de Cromo su resistencia a la corrosión es mínima, a algunos se los suele denominar Inoxidables al agua, pues no resisten medios más agresivos y son en general los más baratos por tener poco Cromo. Su ductilidad es menor que la de los aceros inoxidables austeníticos debido a la inherente menor plasticidad de la estructura cúbica centrada en el cuerpo del Hierro alfa, más el efecto endurecedor que proporciona la gran cantidad de Cromo en solución sólida.

Los aceros inoxidables martensíticos son similares a los aceros al carbono, ya que son calentados hasta austenitización por un tratamiento de envejecimiento, y luego revenidos para aumentar la tenacidad y ductilidad.

Los aceros austeníticos constituyen la familia más grande de los aceros inoxidables, en términos del número de la aleación y aplicaciones. No pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, no son magnéticos y sus estructuras son cúbicas de cara centrada, poseen excelente ductilidad y buena soldabilidad a temperaturas criogénicas.

Los aceros inoxidables bifásicos o Dúplex, son aleaciones al Cromo-Níquel-Molibdeno que están balanceados para formar una mezcla de austenita y ferrita. La estructura bifásica da como resultado un incremento de la resistencia al agrietamiento bajo carga.

1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

Los aceros inoxidables están compuestos por elementos tales como Cromo (Cr), Níquel (Ni) y Molibdeno en su principal estructura, sin embargo también contienen Carbono (C), Manganeso (Mn), Fosforo (P), Azufre (S), Silicio (Si), en pequeñas cantidades. En la figura N. 3 se representa con mayor exactitud la composición química expresada en porcentaje de los aceros inoxidables austeníticos, martensíticos y dúplex más empleados en el mercado.

GRADO	304	304L	316	316L	316 Ti	310	301	321	201	202	430	410
CARBONO (C) max.	0.08	0.035*	0.08	0.035*	0.08	0.25	0.08	0.08	0.10	0.07	0.12	0.15
MANGANESO (Mn) max.	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	9.25	7.2	1.00	1.00
FOSFORO (P) max.	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.045	0.04	0.045	0.085	0.05	0.04	0.04
AZUFRE (S) max.	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.07	0.03	0.03
SILICIO (Si) max.	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	1.50	0.75	1.00	0.38	0.35	1.00	1
CROMO (Cr) max.	18.0 a 20.0	18.0 a 20.0	16.0 a 18.0	16.0 a 18.0	18.0 a 20.0	24 a 26	17.0 a 20.0	17 a 19	15 a 17	16 a 18	16 a 18	11.5 a 13,5
NIQUEL (Ni)	8.0 a 11.0	8.0 a 13.0	10.0 a 14.0	10.0 a 15.0	11.0 a 14.0	19.0 a 22.0	9.0 a 13.0	9 a 12	1.0 a 1.50	4a6	----	----
MOLIBDENO (Mo)	----	----	2.0 a 3.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	----	----	----	----	----	----	----
OTROS ELEMENTOS	----	----	----	----	----	----	Ti = 5xC min. y 0.70 max.	Ti=5x %c	Cu=1.7 N=0.13	Cu=1.7 N=0.08	----	--

Figura 3. Composición química (%) de los aceros inoxidables más utilizados en el mercado.

1.4 EFECTO DEL CROMO Y NÍQUEL SOBRE LOS ACEROS INOXIDABLES.

Como la definición de acero inoxidable viene dada por el porcentaje de Cromo, que tiene que superar el 10.5 %, el aumento de este porcentaje y la combinación con el Níquel (figura 4a) y el Carbono (figura 4b) determina la naturaleza y la proporción de las fases presentes y en consecuencia define el tipo del acero inoxidable.

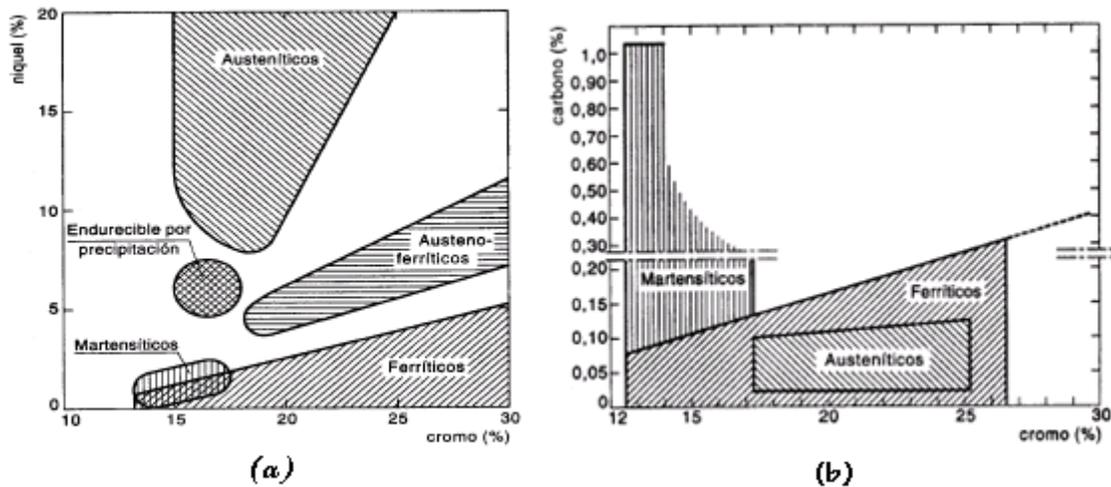


Figura 4. Tipos de familias de aceros inoxidables en función del contenido de Cromo-Níquel (a) y Cromo - Carbono (b).

1.5 DIAGRAMA DE SCHAEFFLER.

Schaeffler ha establecido en un diagrama que lleva su nombre la influencia de los elementos estabilizadores de ferrita y estabilizador de Austenita en la formación de los diversos tipos de aceros inoxidables. Este diagrama representado en la figura 5, considera los elementos estabilizadores de ferrita expresados en cromo equivalente Cr_{eq}^1 y lo mismo para los elementos estabilizadores de Austenita en níquel equivalente Ni_{eq}^1 . Estos valores se calculan así:

$$\%Cr_{eq} = \%Cr + 5,5(\%Al) + 2(\%Si) + 1,75(\%Nb) + 1,5(\%Mo) + 1,5(\%Ti)$$

$$\%Ni_{eq} = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0,3(\%Cu) + 0,5(\%Mn)$$

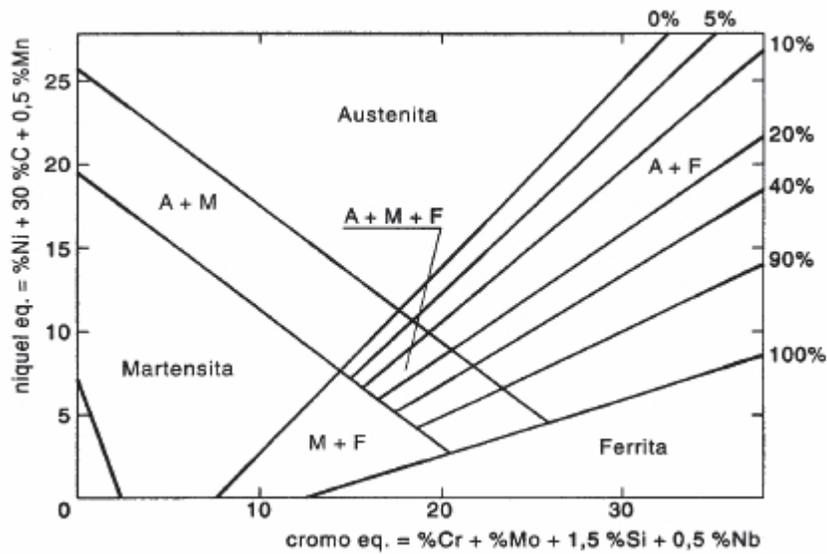


Figura 5. Representación esquemática del diagrama de Schaeffler.

Se observa que en el diagrama de Schaeffler no se indica la presencia de un elemento estabilizador de ferrita como el Titanio, ni el Nitrógeno como un elemento estabilizador de Austenita. El Nitrógeno ha sido introducido posteriormente en el diagrama De Long (o Schaeffler modificado) y tiene como efecto reducir el intervalo del ${}^1\text{Cr}_{\text{eq}}$ a 18-26% y del ${}^1\text{Ni}_{\text{eq}}$ a 12-24%.

Hay que recordar que existen también aceros de estructura dúplex, denominados austenoferríticos o dual-fase (en los que la composición está equilibrada para que junto a la austenita exista también una cierta cantidad de ferrita) y aceros de endurecimiento por precipitación.

¹Cr_{eq}: Cromo equivalente, ¹Ni_{eq}: Níquel equivalente

CAPITULO 2

ACEROS DÚPLEX

2.1 QUE ES UN ACERO DUPLEX 329.

El acero dúplex es un tipo de acero inoxidable cuya estructura está formada por Austenita y Ferrita, en los que el contenido de Cromo es elevado para mantener la resistencia a la corrosión de los aceros Austeníticos y el Níquel relativamente bajo para aumentar el contenido de ferrita con el objeto de aumentar la resistencia a SCC ² en medios con cloruros a alta temperatura. La proporción de Austenita y ferrita no depende solamente de la composición, ya que para un mismo acero la proporción de Ferrita es tanto mayor cuanto más elevada sea la temperatura del tratamiento y más rápido el enfriamiento.

Para conseguir estas estructuras que mejoran en ciertos reactivos la resistencia a la corrosión con respecto a los otros aceros inoxidables. Necesitamos un equilibrio determinado entre elementos estabilizadores de Ferrita (Silicio, Cromo, Molibdeno, Titanio, Aluminio o Vanadio) y estabilizadores de Austenita (carbono Manganeso Nitrógeno y Níquel).

Estos aceros aunque no toman el temple si les calentamos a temperaturas comprendidas entre 950°C y 1050°C y los enfriamos rápidamente adquieren las mejores propiedades físicas y químicas y la máxima ductilidad.

²SCC: Stress corrosion cracking (corrosión bajo tensión)

2.2 GENERALIDADES DE LOS ACEROS DÚPLEX 329.

Debido fundamentalmente a su composición la estructura de este acero es bifásica formada por Austenita y Ferrita (Matriz austenítica con islotes de Ferrita), de todos los aceros austenítico-ferríticos estos son los mas empleados.

Con calentamientos a 800°C provocamos la formación de la fase sigma que lo transforma en duro y frágil, es mucho menos sensible a la corrosión intergranular y bajo tensión que los aceros inoxidable austeníticos, pero ante ciertos agentes corrosivos muy severos (soluciones de cloruros en ebullición) es menos resistente.

Su límite elástico es superior al de los inoxidable austeníticos y puede ser mejorado con un tratamiento a 400°C y la soldadura es posible con todos los procedimientos. Es menos propensa a la formación de grietas que en el caso de los aceros austeníticos puros.

Este acero es muy adecuado para ser moldeado, consiguiéndose piezas muy sanas. Es ferromagnético (le atrae el imán, pero en menos intensidad que a los aceros Martensíticos y ferríticos)

Estos Aceros son magnéticos, presentan dificultades en su transformación en caliente, algunos aceros de esta familia son insensibles a la corrosión intergranular y pueden ser endurecidos por precipitación. Son menos dúctiles que los austeníticos y por el contrario poseen un límite elástico más elevado, que permite reducir las dimensiones de las piezas sometidas a esfuerzos mecánicos.

2.2.1 TRANSFORMACIONES EN CALIENTE.

De 1100 a 900°C con enfriamiento en Aire.

Las reducciones deberán ser moderadas que en el caso de los aceros austeníticos y la temperatura final nunca inferior a 900°C ya que puede aparecer fase sigma en los islotes de Ferrita dificultando la transformación en Caliente.

2.2.2 TIPOS DE ACEROS DÚPLEX.

La serie de aceros Dúplex 312, 315, 318 325 y 329. Son aleaciones base Hierro con Cromo y Molibdeno, con suficiente cantidad de estabilizadores de la Austenita, Níquel y Nitrógeno para lograr el balance entre Ferrita y Austenita. El resultado es una adecuada combinación de estas dos fases, la Austenita confiere ductilidad y la Ferrita resistencia a la corrosión bajo tensión. El Molibdeno hace más resistente a la capa pasivante y mejora la resistencia a picaduras.

Los carburos de Cromo tienden a precipitar en la interfase Ferrita-Austenita pero obteniendo el Cromo de la Ferrita en donde la difusión es más rápida y la homogeneización del Cromo en la misma es mayor que si fuese Austenita y por lo tanto la disminución de la concentración de Cromo en el borde de grano no es tan pronunciada impidiendo la Corrosión Intergranular.

Consecuentemente los Aceros Dúplex son usados en las más severas condiciones de temperatura y contenido de cloruros donde los Inoxidables Austeníticos sufren Pitting y Crevice Corrosión³.

³Pitting y Crevice Corrosión (picadura y corrosión de rendija)

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS DUPLEX 329.

- Muy buena resistencia a la corrosión uniforme
- Muy buena resistencia a la picadura y corrosión de rendija
- Alta resistencia a la fractura por corrosión de estrés y la corrosión por fatiga
- Buena resistencia a la corrosión de estrés por sulfuro
- Buena resistencia a la abrasión y a la erosión
- Buena resistencia a fatiga de absorción de alta energía
- Baja expansión termal
- Fácilmente soldable

2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS.

2.4.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.

La tensión a rotura de los Aceros Inoxidables Dúplex se sitúa entre dos y tres veces la del austenítico grado AISI 304. La ferrita generalmente es más resistente que la austenita pero menos dúctil, esto es verdad para el mismo contenido intersticial. No es necesariamente el caso en todos los aceros dúplex, por ejemplo en los dúplex con nitrógeno, este último se dispersa en la austenita de manera tal que, al final la austenita resulta más resistente que la ferrita. Ya que el acero contiene ferrita y austenita se podría esperar que las propiedades sigan una ley lineal de mezcla. Es aproximadamente el caso para la elongación pero cuando se trata de resistencia a la tracción, la ley es mucho más complicada ya que depende fuertemente del tamaño del grano, el cual es más pequeño en los Aceros Inoxidables dúplex.

Una serie de aleaciones de 100% ferrita a 100% austenita han sido producidos y investigados mecánicamente. Cuando el efecto del tamaño del grano fue compensado, se podía concluir que la resistencia de la aleación 60% ferrita / 40 % austenita era controlada esencialmente por la ferrita, sin embargo, había una contribución nada despreciable del tamaño del grano. Eso implica que en práctica, la aleación dúplex tiene más resistencia que sus constituyentes.

2.4.2 TENACIDAD.

Se debe destacar que la transición dúctil-frágil para los AID en el estado templado del material ocurre a -60°C o menos, lo que es satisfactorio para la mayoría de las aplicaciones. Cuando han sufrido deformación en frío, los AID suelen presentar anisotropía de propiedades mecánicas. En una chapa de 22Cr-5Ni-3Mo de acero la textura era en (100) [001] en ferrita y $\{110\} \langle 112 \rangle$ en austenita, siendo este el factor determinante por el cual los valores de tenacidad al impacto y tenacidad a la fractura son más elevadas en la dirección transversal que en la dirección longitudinal.

2.4.3 RESISTENCIA A LA FATIGA.

Los aceros dúplex tienen mayor resistencia a la fatiga que los aceros austeníticos, por otra parte, sin tener en consideración los mecanismos de corrosión, los dúplex muestran un límite de fatiga bien definido cuando son sometidos a ensayos de corrosión bajo tensión. Hay que destacar que el valor de resistencia a la fatiga depende directamente del límite elástico. Eso se explica de la siguiente manera: en muchos casos la tensión máxima en cada ciclo de fatiga será aproximadamente igual al límite elástico. A este nivel de tensión, la deformación plástica es suficiente para causar la iniciación de pequeñas fisuras por fatiga en inclusiones, bandas de deslizamiento persistentes, o bordes de granos.

Propiedades mecánicas orientativas a temperatura ambiente de diferentes perfiles recocidos.

Perfil	Resistencia a la tracción (Rm) N/mm ² (kgf/mm ²)	Limite elástico del 0.2% (Rp) N/mm ² (kgf/mm ²)	Alargamiento (A) (L=50mm)%	Estricción %	Resistencia Charpy (J)
Fleje y Barras	715(73)	550(56)	25	50	54

- Masa (densidad) a 20°C = 7.70g/cm³

- Coeficiente medio de dilatación térmica:

De 20 a 100 °C = 12,00 x10⁻⁶ mm/mm. °C

De 20 a 400 °C = 12,50 x10⁻⁶ mm/mm. °C

De 20 a 600 °C = 13,00 x10⁻⁶ mm/mm. °C

De 20 a 800 °C = 13,50 x10⁻⁶ mm/mm. °C

- Conductividad Térmica:

A 20 °C = 0.188 W/cm. °C (0.045 cal/cm²-seg. °C /cm)

A 400 °C = 0.251 W/cm. °C (0.060 cal/cm²-seg °C /cm)

- Resistividad eléctrica a 20 °C = 75μΩ . cm

- Calor específico a 20 °C = 0.46J/g. °C(0.11cal/g. °C)

- Modulo de elasticidad a 20°C:

A tracción = 201kN/mm² (20500 kgf/mm²)

2.4.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO DUPLEX 329.

Carbono (C) %	Silicio (Si) %	Manganeso (Mn) %	Fosforo (P) %	Azufre (S) %	Cromo (Cr) %	Molibdeno (Mo) %	Niquel (Ni) %
0.1	1	2	0.04	0.03	25	1	3
máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	30	2	6

2.5 FASE SIGMA EN LOS ACEROS INOXIDABLES DUPLEX.

Los aceros inoxidable dúplex al ser tratados térmicamente a altas temperaturas presentan cambios microestructurales originados por la formación de carburos, nitruros y una serie de fases intermetálicas, entre ellas se encuentra la llamada fase sigma(σ).

La fase sigma (σ) es la que demanda mayor atención en aceros dúplex y superdúplex, porque la presencia de ésta afecta drásticamente las propiedades mecánicas, originando un excesivo endurecimiento y fragilización.

Esta fase sigma (σ) es básicamente un compuesto intermetálico Fe-Cr-Mo con estructura cristalina tetragonal y termodinámicamente estable en aceros inoxidable dúplex a temperaturas entre 600°C y 1100°C dependiendo de la aleación. Esta fase presenta altos contenidos de elementos como Cr, Mo, Si y W, y bajas fracciones de Ni y Mn. La composición típica en aceros inoxidable dúplex varía en los rangos de 20-28% Cr; 3-5% Ni; 3-9% Mo; 0-7% W, dependiendo de la composición del acero y la temperatura de formación.

Dicha fase se forma preferentemente en las interfases ferrita/austenita y se desarrolla hacia el interior de los granos de ferrita, debido principalmente a dos

motivos: los granos ferríticos tienen una menor compacidad y como consecuencia la difusión de los átomos es más fácil y además, la ferrita es más rica en elementos sigmágenos como son el cromo y el molibdeno.

El tanto por ciento de fase sigma que se forma en un acero dúplex depende principalmente, a parte de la temperatura, de la composición química del acero y del grado de deformación que se aplica al material.

La precipitación de la fase σ reviste gran importancia en los aceros dúplex debido a su fácil formación respecto al resto de las fases secundarias que pueden formarse durante los tratamientos térmicos y a su eventual influencia en las propiedades químicas y mecánicas de estos aceros. La presencia de la fase σ afecta en gran medida la tenacidad y ductilidad.

2.6 APLICACIONES DEL ACERO DUPLEX 329.

Los aceros inoxidable dúplex en general tienen diversas aplicaciones en toda la industria debido principalmente a las propiedades de resistencia a la corrosión y a temperaturas extremas que presentan.

Los aceros dúplex son utilizados en la industria química porque tienen muy buenas propiedades de resistencia a la corrosión junto con sus propiedades mecánicas. Problemas de procesos a temperaturas altas en medios con cloruros se pueden resolver usando aceros dúplex. En los últimos años, el uso de los aceros inoxidable dúplex ha crecido de manera significativa, unas aplicaciones en servicios bien conocidas siguen:

- Se usan en medios con cloruros y en soluciones alcalinas también con cloruros ya que son más resistentes que los aceros inoxidable austeníticos.

- Se usan en medio con ácidos a temperaturas altas (200°C) por ejemplo en la industria Química, debido a la amplia gama de materiales utilizados, a la diversidad de productos químicos (y mezclas) que se manejan y al amplio espectro de condiciones experimentales que nos podemos encontrar.
- Se usan para evitar lo más posible, roturas por SCC (Stress Corrosion Cracking).

En la industria Alimenticia también son requeridos ya que dentro de esta industria necesitan usar materiales que no contaminen; los cuales puedan ser limpiados profundamente sin sufrir alteraciones, debido a que las bacterias aparecen en gran parte por el contacto de los alimentos con la maquinaria y más aun cuando esta no es fabricada en algún tipo de material higiénico. Se necesita de una elevada resistencia a la corrosión producto de diversos factores, que muestre una superficie totalmente compacta y poco porosa o rugosa, un material que sea capaz de tener resistencia elevada a las variaciones térmicas y con muy buena resistencia a tensiones mecánicas.

El entorno de trabajo de la industria de producción de pulpa y papel es muy corrosivo y a menudo causa graves daños de corrosión a los dispositivos de proceso. Según las estadísticas, las pérdidas causadas por la corrosión son considerables por cada tonelada de pulpa. Para mantener la producción sin problemas y reducir el costo de producción, el acero inoxidable y la aleación resistente a la corrosión son ampliamente utilizados en la pulpa, y han sido los materiales estructurales indispensables e irremplazables en esta industria.

En Tanques de almacenamiento también se utilizan ya que el acero dúplex alcanza un límite elástico entre 700 y 900 MPa el doble de los aceros austeníticos lo cual ocasiona una reducción de costos y peso de la estructura en buques.

Equipo de petróleo y gas: Este acero se utiliza ampliamente para proyectos en la industria del petróleo y gas encontrándose en las líneas de flujo, recipientes de

proceso, separadores, enfriadores, colectores, tuberías. También en plantas de procesos químicos. Por su alta resistencia a la corrosión

Un ejemplo claro de la aplicación de estos aceros dúplex es la estatua de la Libertad la cual fue reparada en el año de 1986 con este tipo de acero, por lo que mejoró notablemente su resistencia mecánica a la corrosión.

En el campo de la construcción son muy utilizados en los puntos críticos de las estructuras como esquinas y uniones, por ejemplo es muy utilizado en puentes o zonas de marea expuestas a ambientes más agresivos que tienden a generar alta corrosión.

Las piezas que son utilizadas en aplicaciones exigentes también suelen ser elaboradas con este tipo de aceros tales como los intercambiadores de calor, las hélices, ejes, equipos de producción de pulpa y papel, tanques de carga en cargueros químicos, plantas de desalinización, sistemas de agua marina, entre otros.

Entre otras aplicaciones se encuentran también:

- Tecnología en aplicaciones en mar
- Plantas de desalinización de agua salada
- Industrias químicas, especialmente cuando en aplicaciones de cloruros
- Limpieza de tanques de gas de combustión
- Tanques de carga y sistemas de tubería en tanques químicos
- Tanques de presión, reactores e intercambiadores de calor
- Ejes, impulsadores y rotores

CAPITULO 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los materiales al ser sometidos a la acción del calor van a modificar sus propiedades internas como son: resistencia a la tensión, dureza y fases presentes. La acción del calor afectará fácilmente al metal, con una transformación en estado sólido en su estructura metalúrgica en función a su composición química, este cambio se conoce como “respuesta al fenómeno térmico”.

Las fisuras, fracturas y carburos intergranulares están presentes en el material y con el calor aplicado se modifican las propiedades mecánicas del material. La presencia de grietas, fisuras, microfisuras y precipitación de carburos intercrystalinos es más abundante cuando la velocidad de enfriamiento es alta.

La ruptura del material es debida a la contracción heterogénea del material por el calor al que es sometido. Sin embargo, hay que considerar la presencia y coexistencia de discontinuidades como huecos u oquedades de diferentes tamaños intergranulares, que también interaccionan con ellos, o sea, que la presencia de huecos grandes relacionados con otros pequeños generan tensiones que se pueden considerar como indicadores de fractura o concentradores de esfuerzos.

3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Corte del material: Esta parte es fundamental, para la elaboración de los ensayos, el método para cortar deberá ser aquel que minimice la deformación por el calentamiento del área de corte, puesto que, podría afectar la superficie que se examina. El corte de este material dúplex 329 se realizó por medio de una cortadora de disco ya que el material es blando, y no requiere de un corte especializado.

Las muestras se esmerilaron para remover las imperfecciones del material que quedan sobre el corte, esto con el fin de obtener un área totalmente plana, así el manejo de las mismas sería el óptimo. En este trabajo las muestras se obtuvieron de una barra de acero Dúplex tipo 329 y fueron preparadas para ser estudiadas con:

- Microscopia óptica.
- Ensayo de dureza en la escala Vickers.

3.1.1 MAQUINARIA Y MATERIALES.

Para el corte del material se utiliza una cortadora de disco Marca LECO CM 20 número de inventario 988653 (figura 6) y al rectificar las muestras para obtener caras planas del material se emplea una rectificadora Fanamher (figura 7).



Figura 6. Cortadora abrasiva de disco LECO.



Figura 7. Rectificadora FANAMHER.

3.1.2 OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS.

Para el corte del material Dúplex 329 se emplea la cortadora de disco LECO CM 20, Aquí, el material se sujeta bien a las prensas que contiene la cortadora las cuales están bien alineadas y calibradas para que su efecto en el material no afecte los ensayos posteriores. Así es que se obtienen 7 probetas de acero Dúplex 329 de dimensiones 1.5 x 1.0 x 3 cm, como se muestra en la figura 8, para que el trabajo con ellas resultara más práctico.

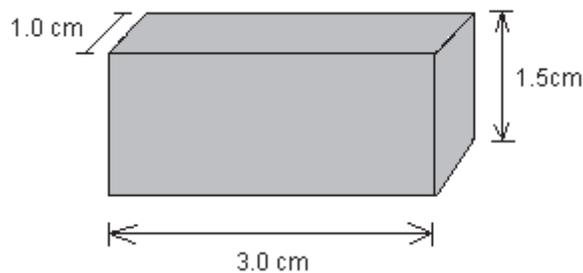


Figura 8. Dimensiones de la muestra del acero Dúplex 329.

3.1.3 RECTIFICACIÓN.

Al cortar el material se obtienen muestras con una figura propia, es necesario rectificar sus caras (obtener caras totalmente planas), esto se logra utilizando una rectificadora marca *FANAMHER* mostrada en la figura 7, en ella se encuentra fijo un disco de esmerilado que se encarga de desbastar el material poco a poco en medidas de micras para evitar el calentamiento del material, eliminando las pendientes que se pudieron haber generado durante el corte (figura 9).

Por debajo del disco la rectificadora cuenta con una barra de acero imantada en forma horizontal en donde se fija el material (Acero dúplex 329), dicha barra tiene

movimiento en el plano X, Y para tener el control y lograr la óptima rectificación de este acero, logrando así el objetivo deseado... Obtener los mejores resultados en los ensayos.



Figura 9. Fijado de las muestras para su rectificación.

De esta manera se obtuvieron las muestras que se emplearon en este trabajo, una a una fueron cortadas y rectificadas del modo descrito, siendo este el primer punto de la base del trabajo y de los ensayos aquí presentados.

3.2 TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO DUPLEX 329.

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas deseadas. Este tipo de procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las

aleaciones no férreas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecidos.

Los principales tratamientos térmicos son:

Temple: Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior A_c (entre 900-950°C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etcétera.

Revenido: Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad. Disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.

Recocido: Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenitización (800-925°C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas.

Normalizado: Tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

3.2.1 PROCEDIMIENTO.

Las siete probetas utilizadas se clasificaron por números del número 1 a la número 6 únicamente para identificarlas al realizar los ensayos correspondientes y tener un seguimiento en cuanto a la temperatura del tratamiento térmico al que fueron sometidas, la número 7 se reservó a los tratamientos para tener una comparación funcionando como muestra original.

Se ingresaron de forma independiente cada muestra del número 1 a la 6 dentro del horno mufla que se muestra en la figura 10, siguiendo las normas de seguridad para la manipulación del material ya que el horno al ser sometido a temperaturas tan altas genera radiación.

Cada prueba se sustrajo con cuidado utilizando unas pinzas, guantes y goggles para precaución personal. Previamente se preparó un recipiente de acero con agua para el temple del material. En la siguiente tabla se puede ver la relación de temperatura a la que fueron sometidas.

Muestra	Temperatura [°C]	Tiempo [minutos]	Solución de Enfriamiento
1	800	60	Agua
2	850	60	Agua
3	900	60	Agua
4	950	60	Agua
5	1000	60	Agua
6	1050	60	Agua

Para aplicar este tratamiento térmico se utilizó un Horno Mufla con las siguientes especificaciones.



Figura 10. Horno Mufla.

Horno Mufla

- Marca Lindberg
- Núm. inv. 1039369
- Tipo 51848
- Watts1900, Volts 127
- Fases 1, Ciclos 60
- Temp. máxima. 1100°C

De este modo las muestras se sometieron a estos tratamientos térmicos a diferentes temperaturas dejándose enfriar en agua, quedando ya preparadas para las siguientes pruebas.

3.3 ENSAYO DE DUREZA VICKERS.

La dureza se define como la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (penetrador), de determinada forma y dimensiones.

El estándar ASTM E 92-82 define la dureza Vickers como un método de ensayo por indentación por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza un indentador piramidal de base cuadrada que tiene un ángulo entre caras específico, bajo una carga

predeterminada, contra la superficie del material a ser ensayado y se mide la diagonal resultante de la impresión luego de remover la carga.

Durante las mediciones estandarizadas de dureza Vickers se hace penetrar un indentador de diamante en forma de pirámide de cuatro caras como se muestra en la figura 11a con un ángulo determinado en el vértice. La utilización de una pirámide de diamante tiene las siguientes ventajas:

- 1) Las marcas resultan bien perfiladas, cómodas para la medición;
- 2) La forma de las marcas es geoméricamente semejante (figura 11b), por lo cual la dureza para un mismo material es constante, independientemente de la magnitud de la carga;
- 3) La dureza con la pirámide coincide con la dureza Brinell para los materiales de dureza media;
- 4) Este método es aplicable con igual éxito para los materiales blandos y duros, y sobre todo para los ensayos de probetas delgadas y las capas superficiales.



Figura 11a. Indentador Piramidal Vickers

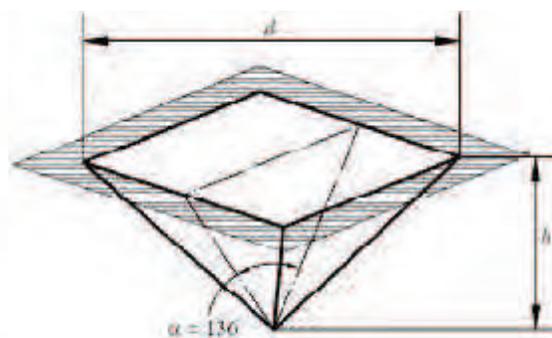


Figura 11b. Marca piramidal de la dureza Vickers

Los números HV y HB son cercanos en su valor absoluto debido a la igualdad del ángulo del vértice de la pirámide al ángulo entre las tangentes a la bola para el caso de una huella “ideal” cuando $d = 0,375 D$. Esta consideración sirve de base para determinar el valor del ángulo del vértice de la pirámide estándar $\alpha = 136^\circ$. Se calcula conforme a la siguiente ecuación.

$$HV = \frac{2P \operatorname{Sen}(\alpha/2)}{d^2} = \frac{0.18909 P}{d^2}$$

Donde:

HV: Dureza Vickers

P: carga aplicada en N

d: Diagonal media de la huella en mm.

α : Angulo formado por las caras del penetrador de diamante = 136° .

El número de dureza vickers se denota como HV. Por ejemplo

440 HV 30

3.3.1 MAQUINARIA, MATERIALES E INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

Para los ensayos Vickers se usa el escleroscopio Dia Testor 2 RC Modelo D6700, marca AMSLER OTTO WOLPERT fabricado en Alemania maneja un Voltaje de 220volts, su aspecto general se muestra en la figura 12. Este aparato sirve para la medición tanto de dureza Brinell como Vickers. Aplica cargas hasta de 250 kgf y tiene incorporado un microscopio de medición, el cual posee una resolución de 0,001 mm.

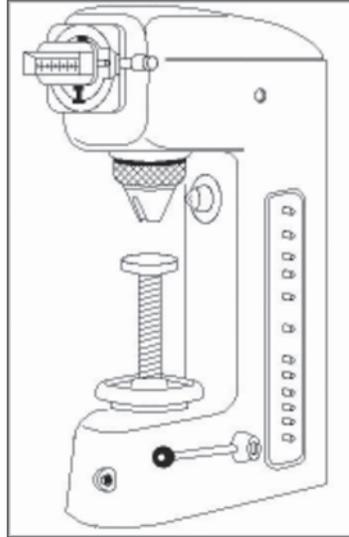


Figura 12. Escleroscopio.

En este ensayo las probetas ya rectificadas y tratadas se desbastan con una lija de agua número 180 hasta llegar a 1200, siendo pulidas cuidadosamente hasta lograr el brillo de alguna de sus caras donde se realizaron las mediciones, se tuvo un esencial cuidado de no calentar la superficie durante el pulimento del material.

3.3.2 REALIZACIÓN DEL ENSAYO.

Se ensayaron 7 probetas de Acero Dúplex AISI 329 las cuales fueron sometidas a distintos tratamientos térmicos.

Se selecciona en la máquina una carga de 2 kgf⁴, para todas las probetas.

Realizando 10 indentaciones por probeta, teniendo en cuenta que la separación del borde de la probeta y de una huella al borde de la otra debe ser mayor a 2,5 veces la diagonal de la huella, el procedimiento es ilustrado en la figura 13 y 14.

⁴Kgf: kilogramo fuerza.

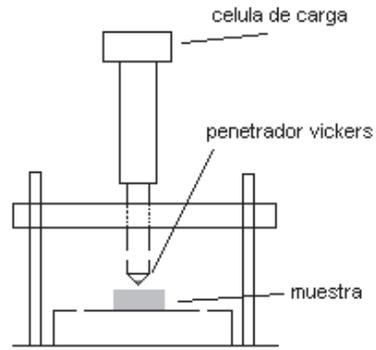


Figura 13. Esquema del Ensayo de Dureza Vickers.



Figura 14. Fotografía del Ensayo real de Dureza Vickers con una carga aplicada de 2kg.

Este mismo procedimiento se aplicó a las siete muestras de Acero Dúplex 329 para comparar y analizar los resultados obtenidos, los cuales se presentan en las siguientes tablas.

3.3.3 RESULTADOS DE PRUEBA DE DUREZA VICKERS.

- Probeta 1 Tratamiento a 800°C

Prueba	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro promedio	Dureza Vickers(HV)
1	0.115	0.115	0.115	280
2	0.115	0.115	0.115	280
3	0.120	0.120	0.120	258
4	0.115	0.115	0.115	280
5	0.120	0.120	0.120	258
6	0.115	0.115	0.115	280
7	0.110	0.115	0.1125	293
8	0.120	0.120	0.120	258
9	0.115	0.115	0.115	280
10	0.115	0.115	0.115	280

274.7 HV 2 promedio

- Probeta 2 Tratamiento a 850°C

Prueba	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro promedio	Dureza Vickers(HV)
1	0.110	0.115	0.1125	293
2	0.110	0.120	0.115	280
3	0.110	0.115	0.1125	293
4	0.120	0.125	0.1225	247
5	0.110	0.120	0.115	280
6	0.120	0.125	0.1225	247
7	0.110	0.115	0.1125	293
8	0.110	0.120	0.115	280
9	0.110	0.115	0.1125	293
10	0.115	0.115	0.115	280

276.2 HV 2 Promedio

- Probeta 3 Tratamiento a 900°C

Prueba	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro promedio	Dureza Vickers(HV)
1	0.115	0.115	0.115	280
2	0.115	0.115	0.115	280
3	0.110	0.115	0.1125	293
4	0.110	0.115	0.1125	293
5	0.115	0.115	0.115	280
6	0.110	0.115	0.1125	293
7	0.110	0.115	0.1125	293
8	0.115	0.115	0.115	280
9	0.110	0.110	0.110	307
10	0.115	0.115	0.115	280

287.9 HV 2 Promedio

- Probeta 4 Tratamiento a 950°C

Prueba	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro promedio	Dureza Vickers(HV)
1	0.120	0.115	0.1175	269
2	0.120	0.115	0.1175	269
3	0.120	0.120	0.120	258
4	0.120	0.120	0.120	258
5	0.120	0.120	0.120	258
6	0.120	0.120	0.120	258
7	0.120	0.120	0.120	258
8	0.120	0.120	0.120	258
9	0.115	0.120	0.1175	269
10	0.120	0.115	0.1175	269

262.4 HV 2 Promedio

- Probeta 5 Tratamiento a 1000°C

Prueba	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro promedio	Dureza Vickers(HV)
1	0.120	0.120	0.120	255
2	0.120	0.120	0.120	258
3	0.125	0.120	0.1225	247
4	0.120	0.120	0.120	255
5	0.120	0.125	0.1225	247
6	0.120	0.125	0.1225	247
7	0.120	0.120	0.120	255
8	0.120	0.125	0.1225	247
9	0.120	0.120	0.120	258
10	0.120	0.125	0.1225	247

251.6 HV 2 Promedio

- Probeta 6 Tratamiento a 1050°C

Prueba	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro promedio	Dureza Vickers(HV)
1	0.120	0.120	0.120	255
2	0.120	0.120	0.120	258
3	0.120	0.120	0.120	258
4	0.120	0.115	0.1175	269
5	0.120	0.120	0.120	255
6	0.120	0.115	0.1175	269
7	0.120	0.120	0.120	258
8	0.120	0.120	0.120	258
9	0.120	0.120	0.120	255
10	0.120	0.115	0.1175	269

260.4 HV 2 Promedio

- Probeta 7 Muestra Original

Prueba	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro promedio	Dureza Vickers(HV)
1	0.125	0.125	0.125	237
2	0.125	0.125	0.125	237
3	0.125	0.125	0.125	237
4	0.120	0.120	0.120	258
5	0.125	0.120	0.1225	247
6	0.125	0.125	0.125	237
7	0.125	0.120	0.1225	247
8	0.130	0.125	0.1275	228
9	0.120	0.120	0.120	258
10	0.125	0.125	0.125	237

242.3 HV 2 Promedio

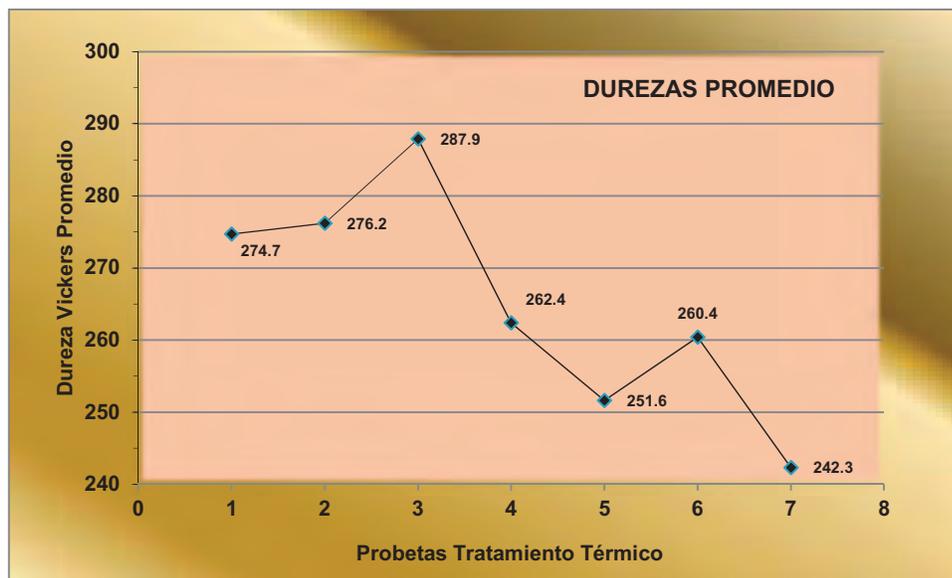


Figura 15. Gráfica de las durezas promedio de cada una de las muestras tratadas térmicamente.

3.4 METALOGRAFÍA.

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación. Sin duda el Microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto del punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño del grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y bajo un conjunto de condiciones dadas podrá predecirse su comportamiento esperado.

Una metalografía consiste en realizar un estudio de la microestructura del material, además que una vez realizada conoceremos diversas características de la aleación como lo es: el tamaño del grano, los granos de la frontera, la fase o fases características de la aleación, etc.

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho, del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El microscopio más costoso no revelará la estructura de una muestra que haya sido preparada de una forma deficiente. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es comparativamente sencillo y requiere de una técnica desarrollada.

3.4.1 MATERIAL MAQUINARIA Y EQUIPO.

Los granos y otras características de los metales no pueden verse al menos que la muestra se desbaste y se pule para eliminar las ralladuras, hasta lograr un acabado espejo para su análisis metalográfico, el cual es el objetivo de este pulido.

Para el pulido así como para el ataque de las muestras se utilizó el siguiente equipo con sus especificaciones correspondientes.

Pulidora Rotatoria

Marca Vari Pol VP50 utiliza un voltaje de 220 volts, el rango de velocidad de sus dos discos oscila entre 0 y 500 rpm



Microscopio óptico

Marca MG Olympus

#inv. . 1044274, voltaje de 127 volts a 2 amperes alcanza un incremento desde 5x, 10x, 40x, 100x mas el lente principal con una medida de 10 x.



Fuente de poder

LODESTAR PS- 305D

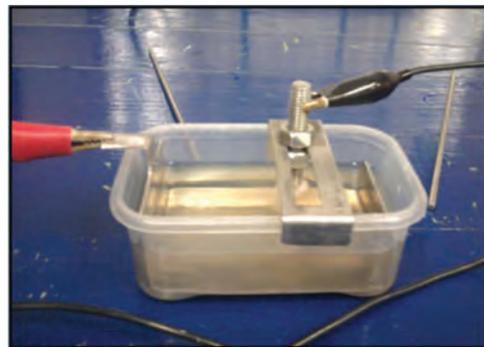
Volts D.C 0-30

Amperes 0-6



Celda electrolitica

Fabricada con una lamina de acero inoxidable como base que funciona como ánodo, y el tampon funciona como cátodo



3.4.2 REALIZACIÓN DEL ENSAYO.

Las muestras aquí presentadas tuvieron que ser pulidas utilizando el método rotatorio, es decir, utilizando la maquina rotatoria de disco, el cual consiste en desbastar la superficie de la muestra colocando lijas de distintos tamaños de grano del más grueso al más fino respectivamente, la primera hoja que empleada fue del número 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 y por ultimo 2400, utilizando agua como refrigerante para no alterar las propiedades del material si se calienta por la fricción generada.

El tiempo y el éxito del pulido dependen del cuidado durante los pasos de cada hoja utilizada, ya que a la hora de manipular el material, éste debe de permanecer de forma totalmente horizontal, es decir a 180° debido a que si el material se manejara con una pendiente mínima se formarían varias caras en la superficie, lo que ocasionaría que la metalografía no brindara un enfoque correcto en la micro estructura de este acero.

El siguiente procedimiento al ya tener las muestras desbastadas por la lija de grano más fino (N 2400), fue seleccionar un paño para el pulido de las muestras de acero dúplex 329 al cual se le agregó Alúmina para eliminar las imperfecciones sobre la superficie del material hasta lograr el acabado final, el *Acabado Espejo*.

3.4.2.1 ATAQUE ELECTROLÍTICO.

Una vez que se logra el acabado espejo, se atacó el material para revelar su micro estructura, el ataque por este método es de particular utilidad para poner de manifiesto la estructura en materiales tales como las aleaciones resistentes a la corrosión y al calor y aleaciones que presentan pasividad superficial durante los ataque usuales, tal es el caso de este acero dúplex 329.

El ataque electrofítico consistió en hacer pasar una corriente continua de 2 amperes de intensidad, a través de la celda electrofítica que contiene un electrolito apropiado, en este caso se utilizó Acido Oxálico, la probeta de acero dúplex funcionó como ánodo, siendo el cátodo el tampón de la celda. Este procedimiento se manifiesta en la Figura 16.

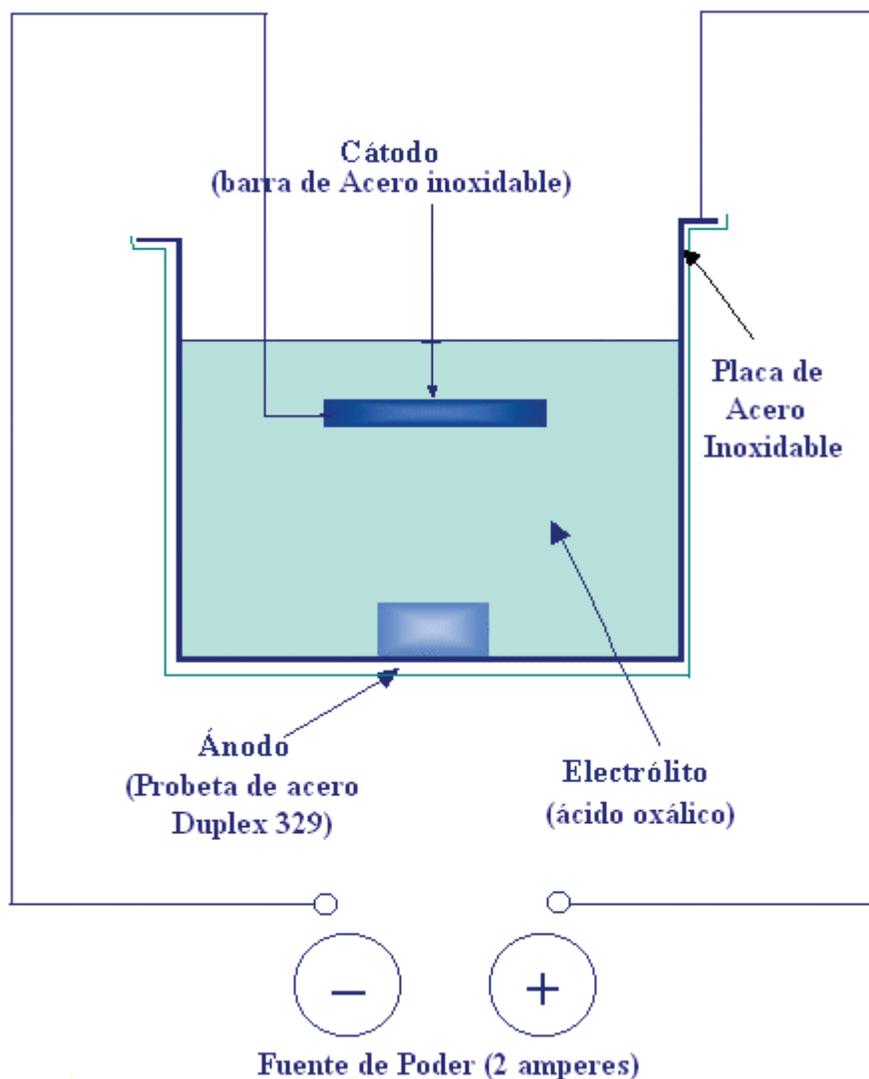


Figura 16. Representación esquemática del ataque electrofítico, la celda se compone de una lámina de acero inoxidable moldeada al tamaño de la celda para funcionar como ánodo junto con la probeta.

La elección del electrólito depende del metal o aleación que ha de atacarse y de los constituyentes de estructura que el ataque haya de poner de manifiesto, este es el paso de mayor relevancia de la metalografía, ya que si el agente no es el indicado, no se podrán observar las características deseadas sobre la pieza. En este trabajo el electrolito utilizado fue una solución de ácido oxálico.

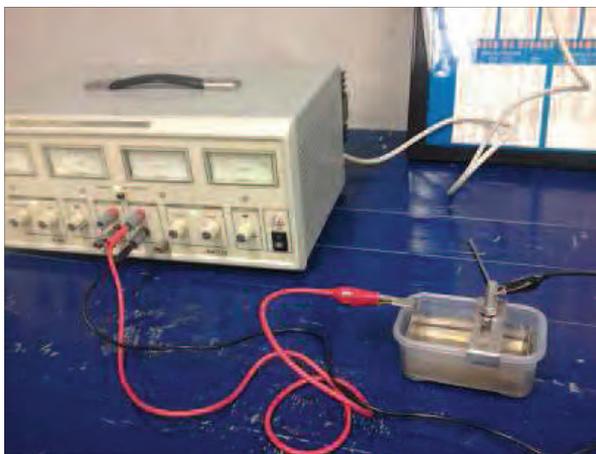


Figura 17. Fotografía real del ataque electrolítico del acero dúplex 329. Se muestra la fuente de poder conectada a través de cables banana caimán hacia la celda electrolítica que contiene dentro la muestra de acero dúplex que se va a atacar.

Este procedimiento se realizó para cada una de las muestras de acero dúplex 329, posteriormente se procede a observar las características metalográficas de la estructura del material con el microscopio óptico a diferentes aumentos.

3.4.3 RESULTADOS DE LAS METALOGRAFÍAS.

Para la realización de las metalografías se utilizaron las probetas donde se le realizaron las preparaciones ya mencionadas, para realizar las observaciones del material base; obteniéndose las siguientes fotografías.

La figura 18 muestra la fotografía tomada a 600X de la muestra tratada térmicamente a 800°C y templada en agua la que presenta una mezcla de estructuras de Austenita y Ferrita típicas de un acero inoxidable dúplex, en la Ferrita se observan pequeños carburos globulares, sin embargo, existen islas de carburos más grandes intercristalinos entre la Austenita y Ferrita. Asociados a estos carburos existen unas manchas oscuras que podríamos pensar que son núcleos muy pequeños de posible Perlita o los inicios de la formación de la fase sigma.

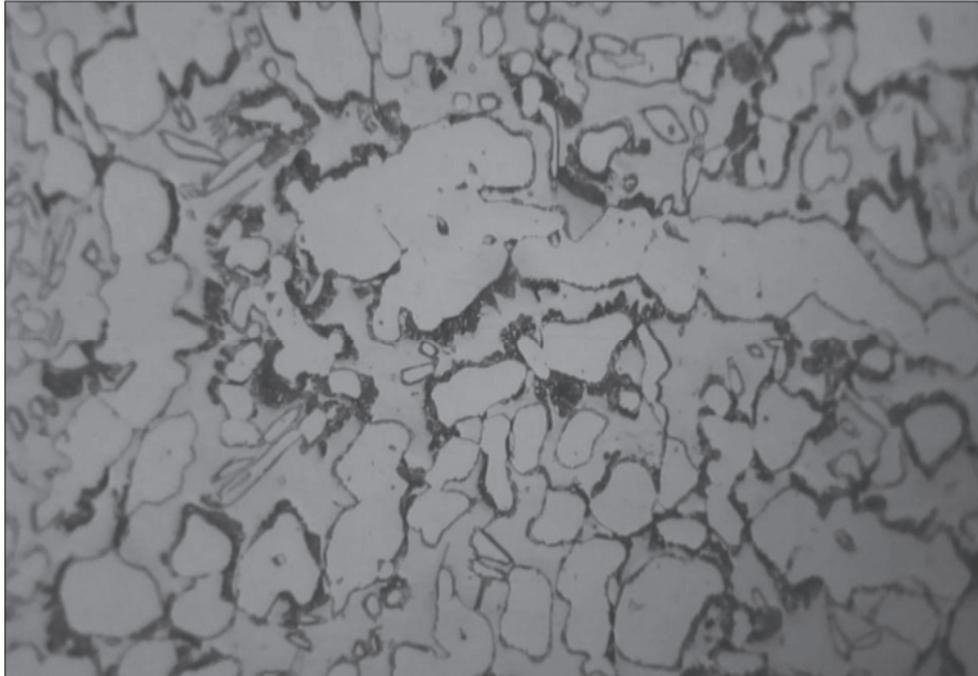


Figura 18. Fotografía de la muestra tratada a 800°C y templada en agua presenta Austenita Y Ferrita, con carburos inter y transcristalinos. Tomada a 600X.

La figura 19 muestra la fotografía tomada a 800X de la muestra de 800°C, que presenta las estructuras de Austenita y Ferrita bien definidas típicas de un acero inoxidable dúplex, en la Ferrita se observan los pequeños carburos globulares. Los carburos intercristalinos entre la Austenita y Ferrita, se observan bien definidos. Asociados a estos carburos existen unas manchas oscuras que podríamos pensar que son núcleos de la formación de la fase sigma.

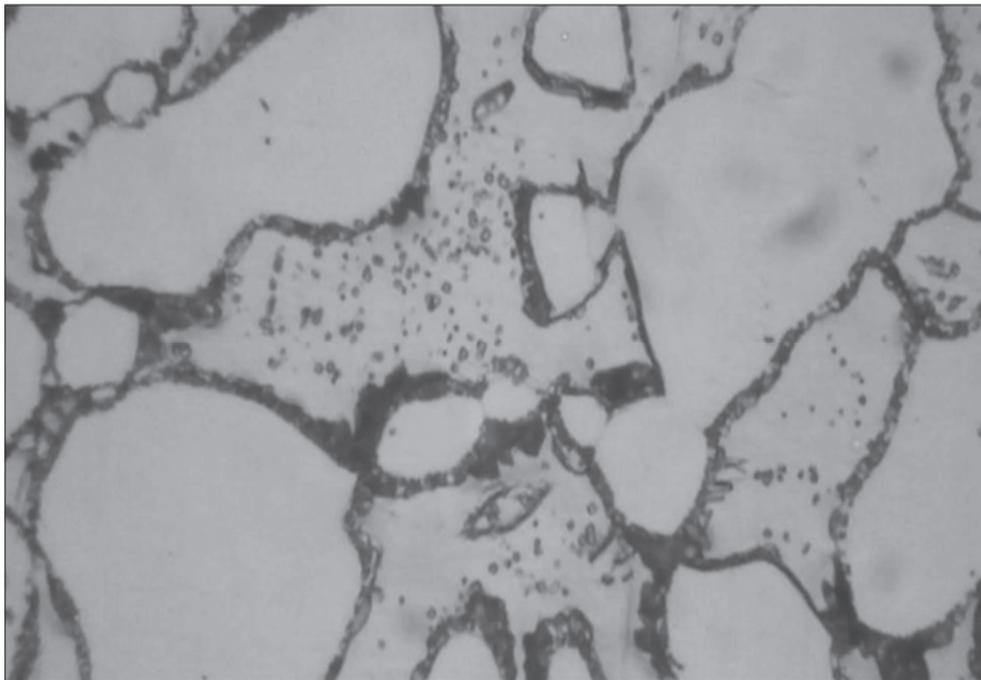


Figura 19. Fotografía de la muestra tratada a 800°C y templada en agua presenta Austenita Y Ferrita, con carburos inter y transcristalinos. Tomada a 800X.

La figura 20 muestra la fotografía tomada a la muestra de 850°C a 600X que presenta una mezcla de estructuras de Austenita y Ferrita típicas de un acero inoxidable dúplex, existen carburos intercristalinos entre la Austenita y Ferrita. Asociados a estos carburos existe un incremento de las manchas oscuras, con respecto a la muestra de 800°C, lo que pensamos que son núcleos muy pequeños de la formación de la fase sigma.

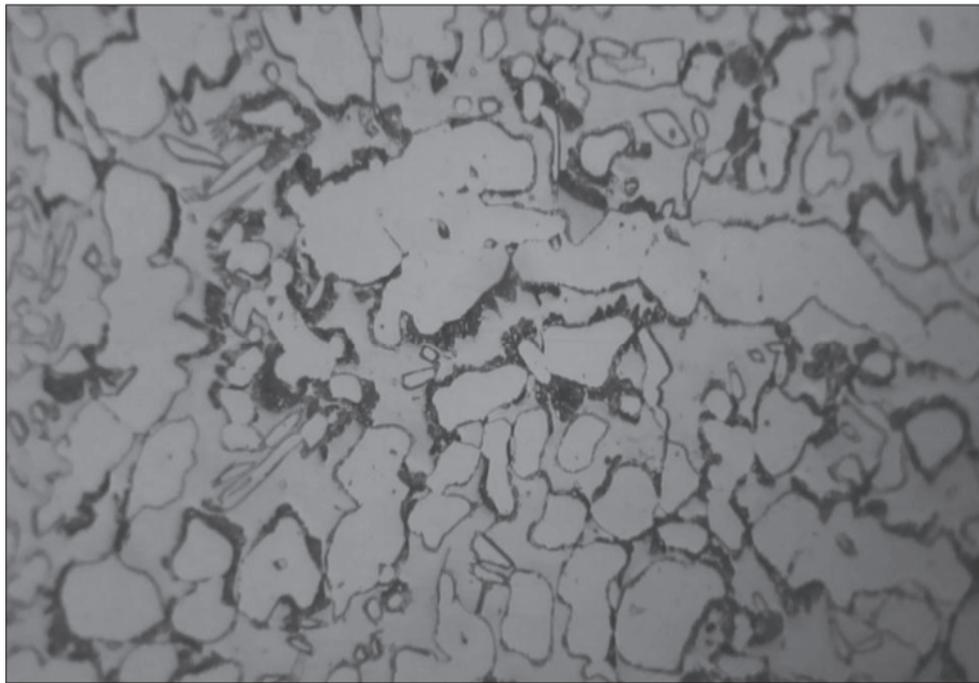


Figura 20. Fotografía de la muestra tratada a 850°C y templada en agua presenta Austenita Y Ferrita, con carburos inter y transcristalinos. Tomada a 600X.

La figura 21 muestra la fotografía tomada a 800X de la muestra de 850°C, que presenta las estructuras de Austenita y Ferrita bien definidas típicas de un acero inoxidable dúplex, en la Ferrita se observa que los núcleos oscuros se introducen en ella. Los carburos intercristalinos entre la Austenita y Ferrita, se observan bien definidos. Asociados a estos carburos existen las manchas oscuras en menor cantidad con respecto a la muestra de 850°C, que podemos pensar que son los núcleos de la formación de la fase sigma.

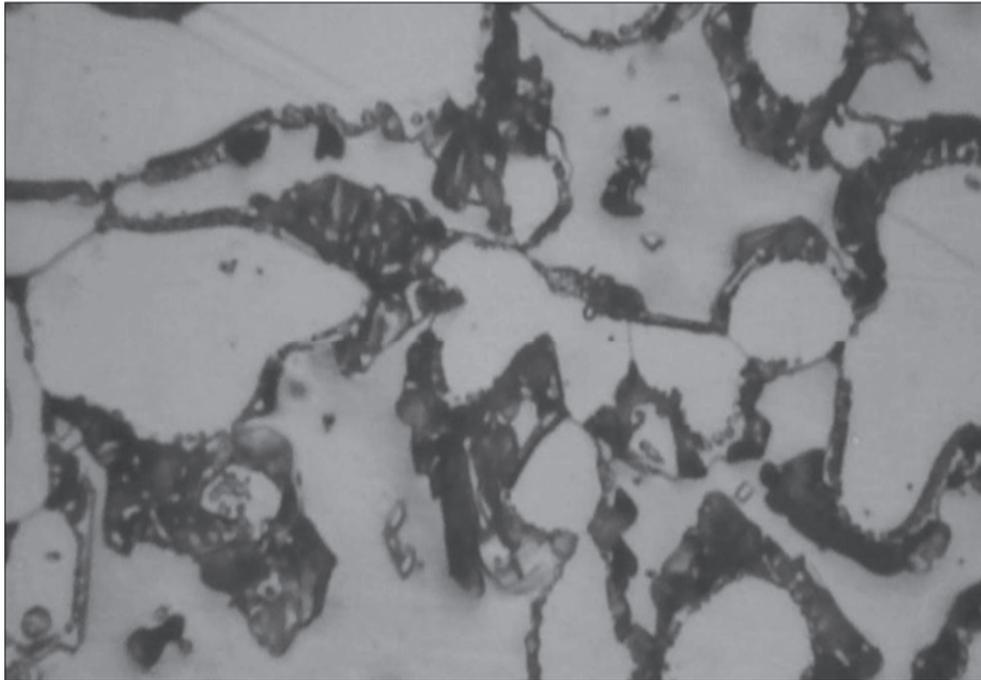


Figura 21. Fotografía de la muestra tratada a 850°C y templada en agua presenta Austenita Y Ferrita, con carburos inter y transcristalinos. Tomada a 800X.

La figura 22 muestra la fotografía tomada a la muestra de 900°C a 600X que presenta una las estructuras de Austenita y Ferrita del acero inoxidable dúplex, existen carburos intercristalinos entre la Austenita y Ferrita. Asociados a estos carburos existe un incremento de las manchas oscuras, con respecto a la muestra de 800°C, lo que pensamos que son núcleos muy pequeños de la formación de la fase sigma.

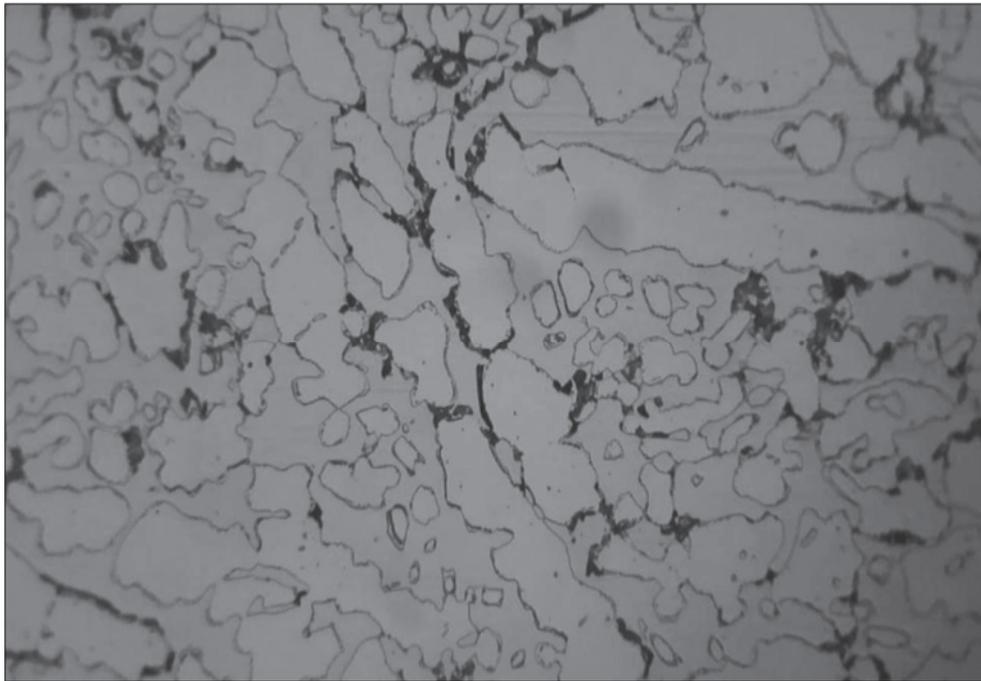


Figura 22. Fotografía de la muestra tratada a 900°C y templada en agua presenta Austenita Y Ferrita, con carburos inter y transcristalinos. Tomada a 600X.

La figura 23 muestra la fotografía tomada a 800X de la muestra de 900°C, que presenta las estructuras de Austenita y Ferrita bien definidas del acero dúplex, en la zona intergranular se observan indicios de que en los núcleos oscuros se empieza apreciar la presencia de la fase sigma. Los carburos intercristalinos entre la Austenita y Ferrita, se observan bien definidos. En la estructura de la Ferrita se nota la presencia de pequeños nódulos cerca del borde del grano que son los núcleos de la futura fase sigma en formación.

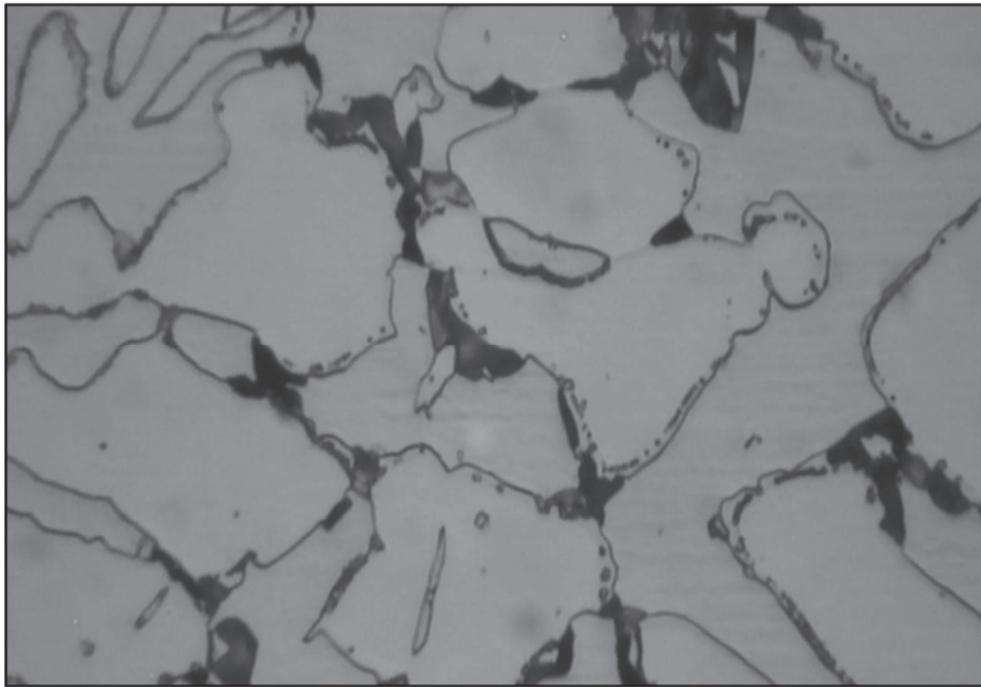


Figura 23. Fotografía de la muestra tratada a 900°C y templada en agua presenta Austenita Y Ferrita, con carburos inter y transcristalinos a la orilla del grano de Ferrita, también se ven algunos cristales pequeños de fase sigma. Tomada a 800X.

La figura 24 muestra la fotografía tomada a la muestra de 950°C a 600X que presenta una las estructuras de Austenita y Ferrita del acero dúplex, En ella ya se puede observar la formación de la fase sigma entre los cristales de Ferrita y Austenita y que da la apariencia de que la fase sigma rodea los cristales de Austenita, también se observa la presencia de maclas que se pueden considerar de origen térmico. También, existen escasos nódulos pequeños transcristalinos en las fases de Austenita y Ferrita que se pueden considerar como carburos globulares.

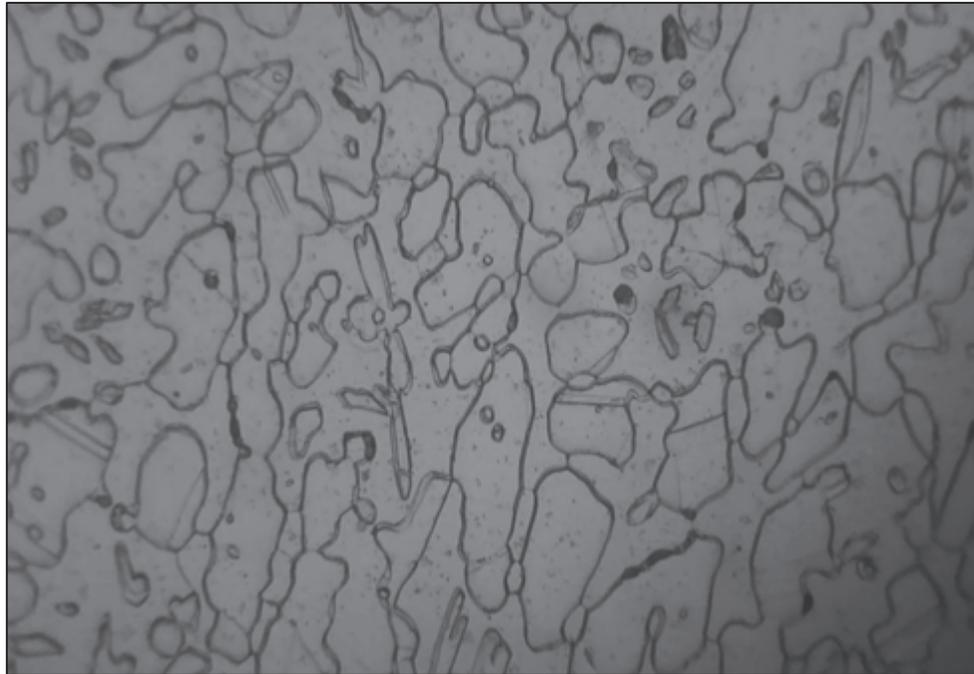


Figura 24. Muestra la presencia de fase sigma entre los cristales de Ferrita y Austenita, además de la presencia de maclas en la fase austenítica, así como la presencia de carburos globulares pequeños. Tomada a 600X.

La figura 25 muestra la fotografía tomada a la muestra de 950°C a 800X que presenta las estructuras de Austenita y Ferrita del acero dúplex bien definidas, En ella ya se puede observar la formación de la fase sigma entre los cristales de Ferrita y Austenita y que la fase sigma rodea los cristales de Ferrita y Austenita, también se observa la presencia de una macla de origen térmico. También, existen nódulos pequeños transcristalinos en las fases de Austenita y Ferrita que se son carburos globulares.

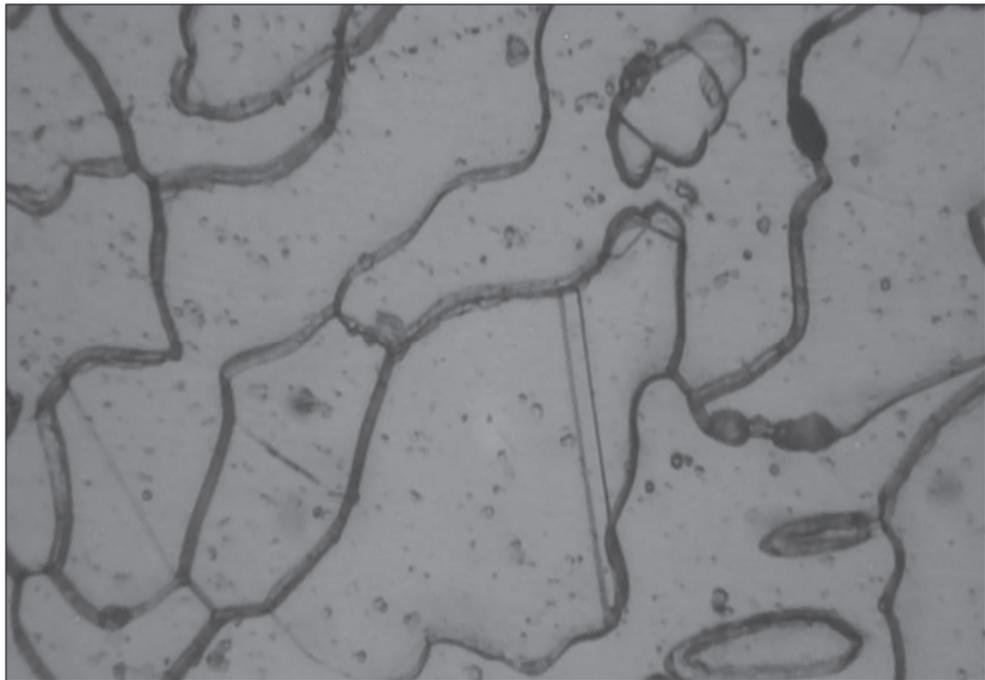


Figura 25. Muestra claramente la presencia de la fase sigma que rodea a los cristales de Ferrita y Austenita, así como la presencia de pequeños carburos transcristalinos del tipo globular. Tomada a 800X.

Las figuras 26, 27 y 28 que son de las muestras tratadas a 1000°C, 1050°C y original tomadas a 600X, se pueden considerar como semejante o iguales, ya que se observan las estructuras de Ferrita y Austenita de un acero inoxidable del tipo dúplex con un tratamiento térmico de homogeneización con un enfriamiento rápido.

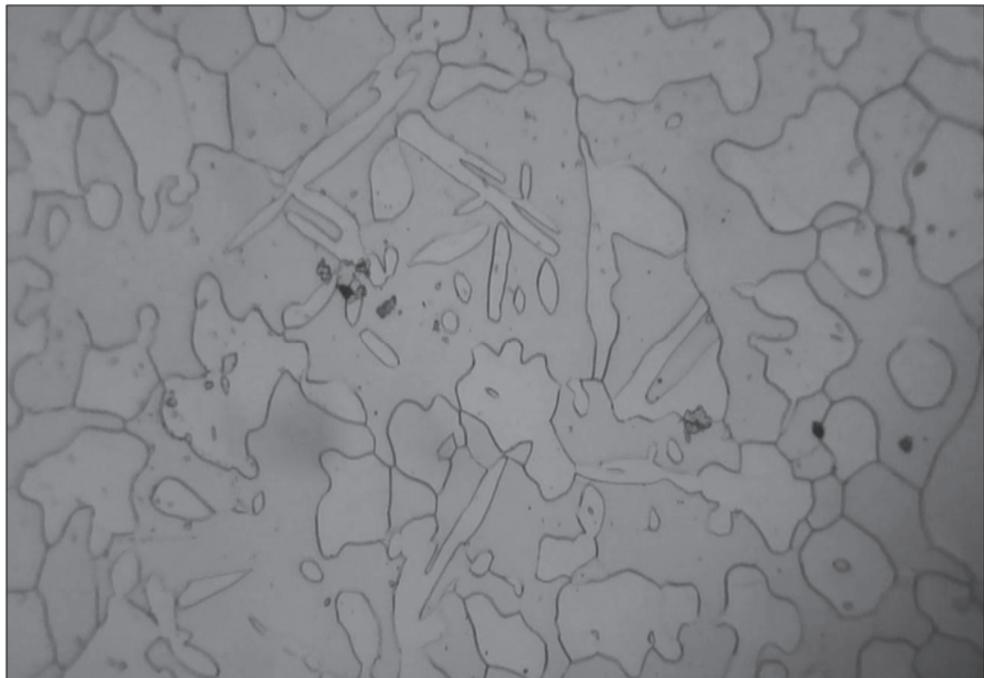


Figura 26. Estructura de la muestra tratada a 1000°C.

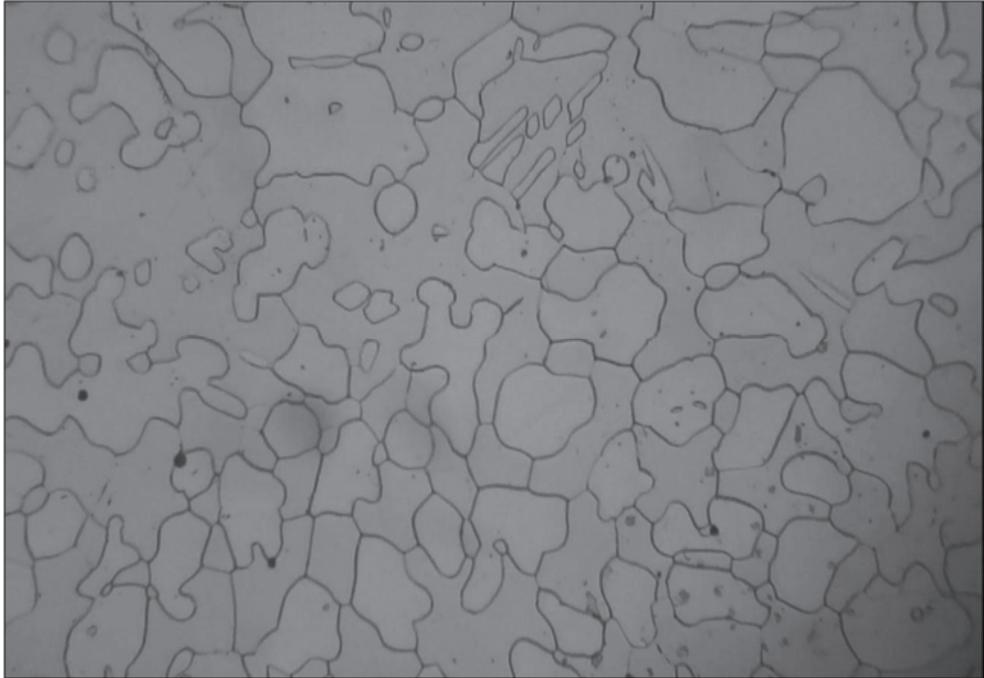


Figura 27. Estructura de la muestra tratada a 1050°C.

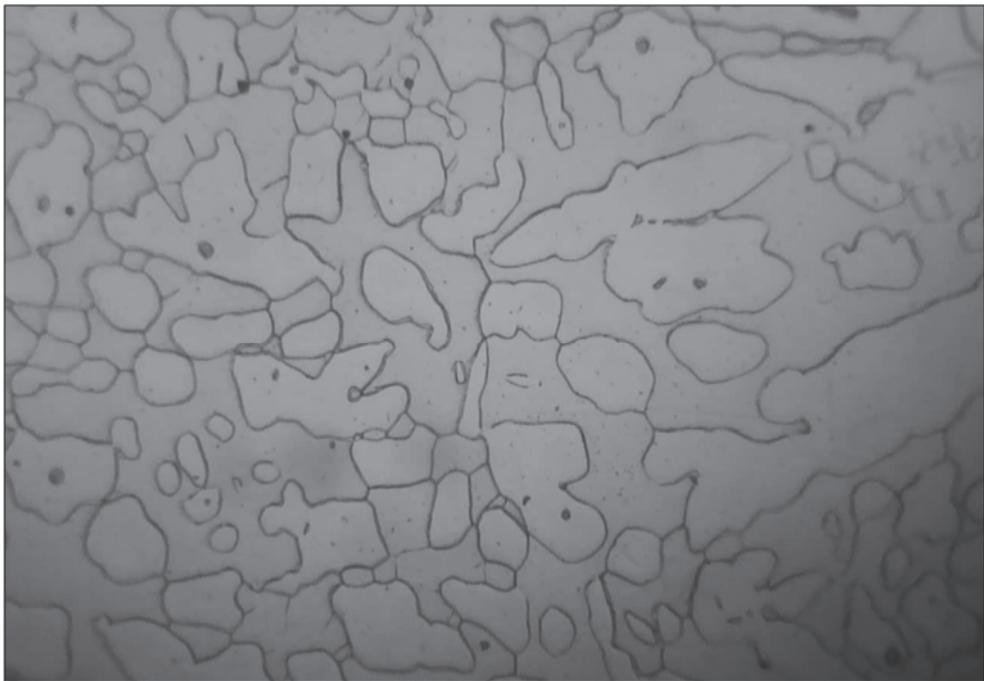


Figura 28. Estructura de la muestra original del acero Dúplex.

Las figuras 29, 30 y 31 que son de las muestras tratadas a 1000°C, 1050°C y original respectivamente, tomadas a 800X, se pueden considerar como semejante o iguales, ya que se observan las estructuras de Ferrita y Austenita de un acero inoxidable del tipo dúplex con un tratamiento térmico de homogeneización con un enfriamiento rápido.

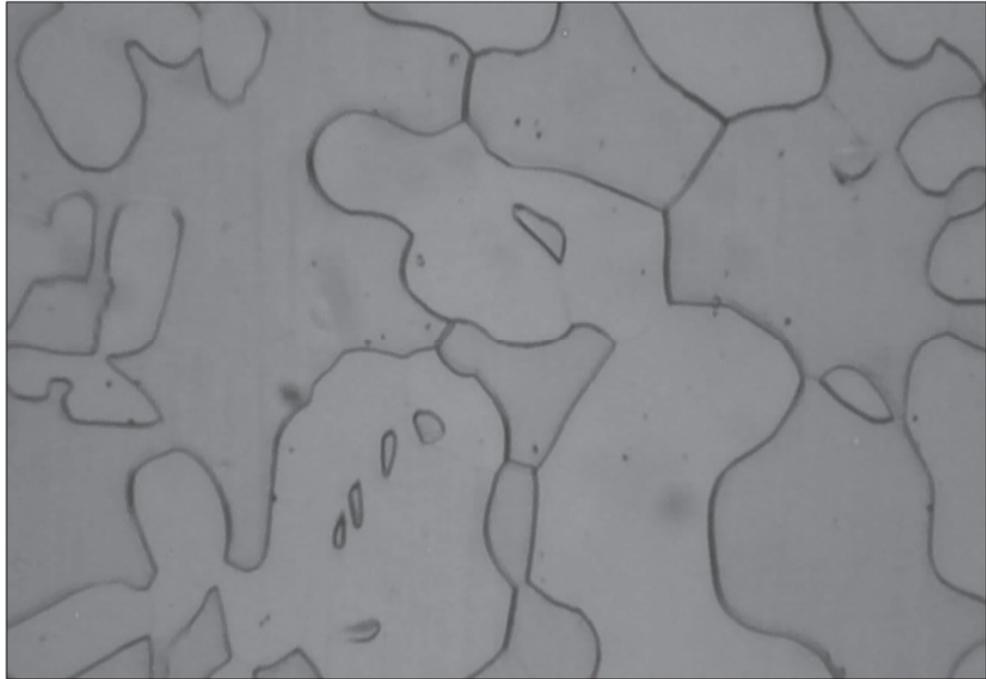


Figura 29. Estructura de la muestra tratada a 1000°C.

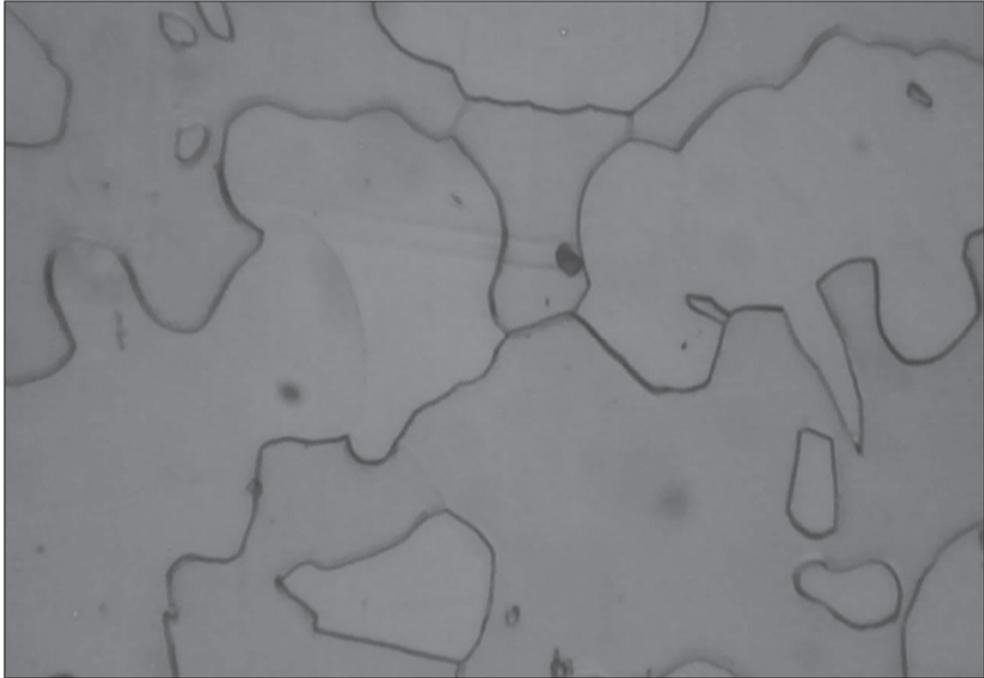


Figura 30. Estructura de la muestra tratada a 1050°C.

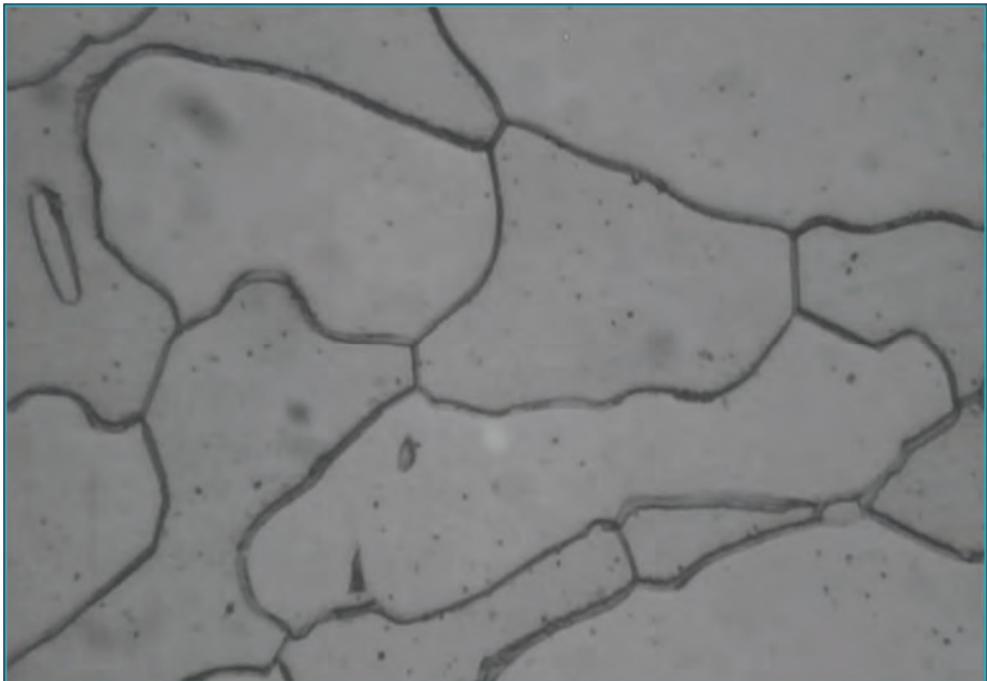


Figura 31. Estructura de la muestra original.

CAPITULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En esta parte se tiene un resumen general de todos los datos que fueron obtenidos para cada ensayo.

4.1 DUREZA.

En cuanto a los resultados de dureza obtenidos en el ensayo Vickers se evidenció un incremento máximo del 19%, con respecto a la dureza de la muestra original, la cual fue de la muestra tratada térmicamente a 900°C, esto es, al someter la muestra en el rango de 800°C hasta 900°C se registraron incrementos del 13% al 19%, tomando como base la dureza de la muestra del acero original tal como se puede observar en la gráfica de dureza de la página 42.

A partir del tratamiento térmico a las temperaturas de 950°C, 1000°C y 1050°C, se observa una disminución de la dureza Vickers, en base a la muestra de 900°C, las durezas de dichas muestras (950°C, 1000°C y 1050°C), se incrementaron del 4% al 8% respecto a la dureza obtenida en la muestra original.

Se puede considerar que existen dos grupos en el comportamiento del acero 329 dúplex; el primero comprende a las muestras tratadas térmicamente a 800°C, 850°C y 900°C, entre las cuales existe una diferencia en las durezas de no más del 4%. El segundo grupo, la comprenden las muestras tratadas a 1000°C, 1050°C y original, cuya variación en la dureza es de aproximadamente a 3.6%.

Existe una muestra intermedia que es la muestra tratada a 950°C, en la cual la dureza se sitúa entre la máxima y mínima obtenidas (900°C y original) en un $\pm 8\%$ aproximadamente.

4.2 METALOGRAFIA.

Las figuras de las metalografías ópticas, muestran una clara diferencia de las muestras de 800°C, 850°C y 900°C con respecto a las de 950°C y las de 1000°C, 1050°C y original, esto permitió ver que existían tres grupos de resultados de los tratamientos térmicos aplicados a las muestras del acero dúplex 329. En la figura 32 se puede observar este fenómeno.

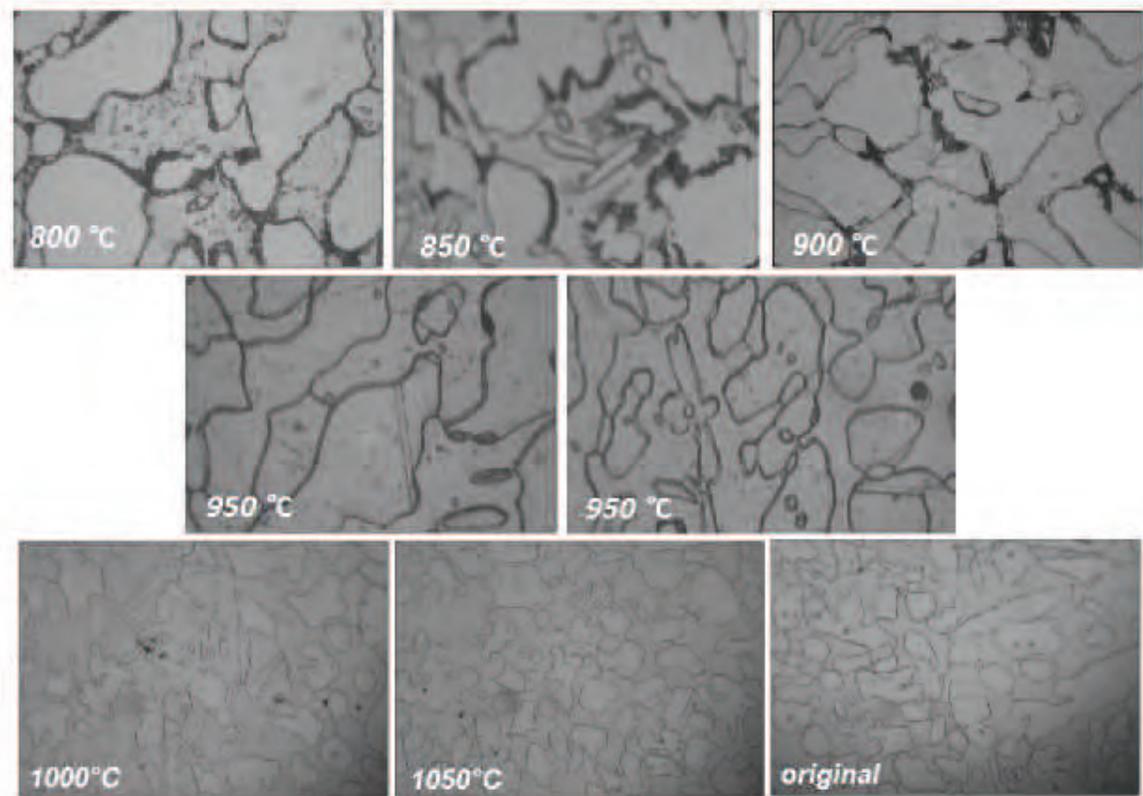


Figura 32. Se muestra los grupos que se llegaron a apreciar de acuerdo a la metalografía del material.

El primer grupo que comprende a las muestras obtenidas de los tratamientos térmicos de 800°C hasta la de 900°C, presenta una estructura dúplex de Austenita y Ferrita con carburos intercrystalinos y transcrystalinos de tipo globular. Según la literatura se puede suponer que son del tipo $M_{23}C_6$ ya que coinciden con la morfología de dichos carburos; también hay que tomar en cuenta que dichos carburos en este caso son de Cromo y por consiguiente, los carburos de Cromo sus temperaturas de

formación se encuentra entre los 400°C y 850°C, por esta razón, los carburos se presentan a 800°C en gran cantidad y de tamaño pequeño, pero conforme aumentó la temperatura la presencia de los carburos se hace en menor cantidad, pero de mayor tamaño y más esféricos.

La muestra de 950°C, presenta un cambio significativo en la estructura y morfología ya que en ella se presenta la formación de fase sigma (σ), esta estructura es característica de las aleaciones de alto Cromo, hay que recordar que los aceros dúplex tienen entre 24% y 35% de Cromo. Esta fase rodea los cristales tanto de Austenita como de Ferrita, es una estructura dura, que se considera como una fase cristalina básica del tipo tetragonal compleja. Esta estructura se presenta en este tipo de aleaciones entre los 850°C y 1000°C, en esta experimentación se vio favorecida a la temperatura de 950°C, este resultado se ve respaldado por el ensayo Vickers ya que en esta muestra se ve reflejado un mayor incremento de la dureza de este acero.

Por último, las muestras de 1000°C, 1050°C y original, presenta las estructuras metalúrgicas típicas de los aceros dúplex, los cuales presenta las estructuras de Austenita y Ferrita en la misma aleación; esto también indica, que las muestras que fueron tratadas a esas temperaturas, son las temperaturas de homogenización o solubilización en este acero, las cuales son de 1000°C o mayores.

4.3 CONCLUSIONES.

En esta investigación experimental las conclusiones generales fueron las siguientes:

1.- En lo que se refiere a la dureza del Acero dúplex 329, ésta, se incrementó en cuanto las temperaturas fueron las menores aplicadas en estos tratamientos térmicos, en los ensayos experimentales de dureza vickers, es decir, a temperaturas de 800°C, 850°C, 900°C alcanzando su valor máximo en 950°C.

2.- En las temperaturas mayores a 950°C se logró observar que la dureza fue la menor de los resultados que arrojaron las muestras tratadas a temperaturas inferiores y tendió a ser parecida a la dureza del material original que se uso en el experimento.

3.- Existió una dureza intermedia que fue la de la muestra tratada a 950°C, lo cual nos indica que fue la de mayor incremento ya que en esta se pudo observar la aparición de fase sigma en cantidades mayores.

4.- A raíz de este trabajo realizado y de los resultados obtenidos podemos mencionar entonces que la temperatura sí tiene una influencia en el comportamiento de la dureza del acero dúplex 329 y por consiguiente una generación e incremento de la fase sigma que en este tipo de aceros los vuelve frágiles.

5.- La temperatura de homogenización o solubilización es de 1000°C y superiores.

6.- La presencia de carburos se obtuvo entre las temperaturas de 800°C y 900°C.

7.- El acero 329 tipo Dúplex es sensible significativamente entre los rangos de temperatura de 800°C y 950°C, a través de la presencia de fases duras y frágiles como son los carburos de Cromo y las fases Sigma (σ) y Chi (χ).

8.- En las muestras tratadas térmicamente a la temperatura de 800°C se pudo observar manchas negras las cuales eran indicios de fase sigma. En las muestras

sometidas a 850°C y 900°C ya era evidente que esas manchas oscuras pertenecían a la formación de fase sigma, lo cual posteriormente en el tratamiento a 950°C se observó con más claridad la fase sigma de este acero.

Este trabajo de investigación pudo cubrir su objetivo principal, ya que por las conclusiones mencionadas obtenidas de los resultados obtenidos en el ensayo de dureza Vickers y el ensayo metalográfico de las muestras podemos conocer el comportamiento de este material cuando es sometido a temperaturas de 800°C hasta 1050°C.

La fase sigma se produce más rápido en los intervalos de 850-950°C en este rango el Acero Dúplex tipo 329 se vuelve duro y frágil, lo que pudimos confirmar con los datos que arrojó el ensayo de dureza, también se pudo mostrar que si se eleva la temperatura del tratamiento a 1000°C ó en este caso hasta 1050°C la cual fue la más alta registrada en este trabajo, la fase sigma va disminuyendo así como la dureza del material, es decir, va tendiendo a el valor de dureza de la probeta muestra. Por lo que puedo decir, respaldado por los ensayos anteriores que al acero dúplex 329 no es recomendable ser tratado a temperaturas de 800°C hasta 950°C ya que se vuelve duro y frágil, pero si podemos alcanzar temperaturas mayores como los 1050°C y aprovechar las mejoras que otorga un tratamiento térmico a estas temperaturas.

5. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

[1] **BARREIRO APRAIZ José.** *Tratamientos térmicos de los Aceros.* 8ª Ed Editorial Dossat, S. A. Madrid España 1985, 737 pp.

[2] **INCHAURZA ZAVALA, Adrian.** *Aceros inoxidable y aceros resistentes al calor.* 1ª Ed, Editorial LIMUSA, Año 1981 México, DF. 410pp.

[3] **ADLER P. H., OLSON G. B. AND OLSON W. S.,.** *Strain Hardening of Hadfield manganese steel.* Metallurgical transition A., Vol. 17A, 1986 pp 1725 -1737.

[4] **BALDEV RAJ, Bhanu, Sancara Rao, Jaya Kumar, Sivaprasad.** *Advances in stainless steels.* Edit Graphic Printers Hyderabad, India año 2009, 679pp.

[5] **LAJTIN, Yu M.** *Metalografia y tratamientos térmicos de los metales.* 3ª edición Editorial Mir Moscu, URSS Ikon.

[6] **HERNIA S. S., LEVIN B. M. and IVAKIN V. L.,.** *Structure and properties of unstable austenitic high manganese steels.* Izvestiya VUZ Chernaya Metallurgy, pp 77 – 81. 1987

[7] **NOSTROM, L.A., Pettersson, S. and Nordin,** *Sigmaphase embrittlement in some ferritic-austenitic stainless steels,* S. Z. Wekstofftech, Vol.12, 1981. p. 229-234.

[8] *Metals Hand Book* vol 1. 2 y 3 9ª ed. *American Society For metals,* 1983.

[9] **SYDNEY H. Auner.** *Introducción a la metalurgia.* Física 2ª edición.

[10] **R. M. Brick, R. B. Gordon, A. Phillips.** *Structure and properties of alloys*, Mc Graw Hill Company 3a ed New York, 1965.

[11] **DI CAPRIO G.** *Los Aceros Inoxidables*, ed. Grupinox, Milano, 1999.

[12] **BAYRAKTAR EMIN, Khalid A. Fazar A. and Levillant Christopher.** Deformation and fracture behavior of high manganese austenitic steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. 147 pp.

[13] **GONZALEZ ARIAS, Antonio.** *Laboratorio de Ensayos Industriales: Metales*. 14ª edición, Editorial Nueva Librería, Buenos Aires Argentina, 542pp Mayo 2008.