UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGON

ESTUDIO DEL ACERO INOXIDABLE Y LOS BENEFICIOS QUE OFRECE EN LA PREPARACIÓN DE ALIMENTOS

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA (AREA MECÁNICA)

P R E S E N T A

ORTÍZ LÓPEZ VÍCTOR AARÓN

ASESOR: DOCTOR ALDAMA AVALOS DANIEL

FES Aragón

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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.

INDICE

INDICE _____ *i*

AGRADECIMIENTOS _____ *v*

ABREVIATURAS _____ *vii*

INTRODUCCIÓN _____ *ixx*

CAPÍTULO I LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN AL ACERO INOXIDABLE Y SU PRODUCCIÓN A NIVEL MUNDIAL _____ *1*

I.1.- El Hierro y el Acero (H-A) _____ *2*

I.1.1.- Diagrama Hierro Carbón _____ **2**

I.1.2.- Producción de H-A a Nivel Mundial _____ **6**

I.2.- El Cromo _____ *8*

I.3.- El Acero Inoxidable (AI) _____ *9*

I.4.- Fabricación del AI _____ *14*

I.4.1.- Hornos para Fundir AI _____ **16**

I.4.2.- Colado del AI _____ **17**

I.4.2.1.- Colado Centrífugo _____ 18

I.4.2.2.- Colado con Arena _____ 18

I.4.2.3.- Colado en Arena Revestida (colado Shell) _____ 18

I.4.2.4.- Colado a la Cera Perdida _____ 19

I.4.2.5.- Colado con Molde de Cerámica _____ 19

CAPÍTULO II TIPOS DE ACERO INOXIDABLE _____ *20*

II.1.- AI Ferrítico _____ *21*

II.2.- AI Martensítico _____ *21*

II.3.- AI Austenítico _____ *23*

II.3.1.- Alto y Bajo Contenido de Carbón en Aceros Austeníticos _____ **24**

II.4.- AI Dúplex _____ *25*

II.5.- Transformaciones de Fase en los Diferentes tipos de AI _____ *27*

II.5.1.- Fase Sigma _____ **28**

II.5.2.- La Influencia de otros Elementos en el AI _____ **28**

II.6.- Clasificación SAE del AI _____ *29*

CAPÍTULO III EL ACERO INOXIDABLE EN LOS ALIMENTOS Y LAS NORMAS INTERNACIONALES QUE DICTAMINAN SU USO _____ *31*

III.1.- AI en el Proceso de Elaboración de Alimentos _____ *32*

III.2.- AI en el Embasamiento de Líquidos 32

III.3.- Normas Internacionales que Dictan el uso del AI en la Industria Alimenticia 33

CAPÍTULO IV PRINCIPALES NORMAS PARA EL USO DEL ACERO INOXIDABLE EN MÉXICO 35

IV.1.- Normas en el uso del AI en el sector SALUD 36

IV.2.- Normas en el uso del AI promovidas por la SECOFI 37

IV.3.- Normas en el uso del AI promovidas por la SAGARPA 38

IV.3.1.- Elaboración de Productos Cárnicos 39

IV.3.2.- Elaboración de Quesos 39

IV.3.3.- Elaboración de Embutidos 39

IV.4.- Normas en el uso del AI promovidas por la CANACERO 39

CAPÍTULO V TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS DEL ACERO INOXIDABLE 41

V.1.- Tratamientos Térmicos (TT) 42

V.1.1.- AI Endurecidos por Precipitación 42

V.1.1.1.- ¿Qué es el endurecimiento por precipitación o por envejecimiento? 43

V.1.2.- TT para Aceros Austeníticos 45

V.1.2.1.- TT de Aceros Austeníticos no Estabilizados 45

V.1.2.2.- TT de Aceros Austeníticos Estabilizados 46

V.1.2.3.- TT de Aceros Austeníticos con Bajo Contenido de Carbón 47

V.1.3.- TT de Aceros Ferríticos 47

V.1.4.- TT de Aceros Martensíticos 48

V.1.5.- TT de Aceros Dúplex 49

V.2.- Tratamiento Mecánico (TM) 50

V.2.1.- Laminación 50

V.2.1.1.- Cilindros de Laminación 51

V.2.1.1.1.- Cajas de Laminación 52

V.2.1.2.- Laminación en Caliente del AI 53

V.2.1.3.- Laminación en Frio del AI 54

V.2.1.4.- Acabados del AI por Laminación 55

V.2.2.- Embutido 58

V.2.2.1.- Lubricación para Embutir 59

V.2.2.2.- Embuticiones Sucesivas 60

V.2.2.3.- Fuerza Necesaria para el Embutido 62

V.2.3.- Forja 64

V.2.3.1.- Dados de Forjado 64

V.2.3.2.- Forja de AI 65

V.2.3.2.1.- Forja de Aceros Austeníticos 66

V.2.3.2.2.- Forja de Aceros Martensíticos 67
V.2.3.2.3.- Forja de Aceros Ferríticos 68

CAPÍTULO VI** ELABORACIÓN DE ALGUNOS UTENSILIOS DE COCINA* ***70

VI.1.- Manejo de Alimentos con AI ***71***

VI.1.1.- Reglas para Cocinas **71**

VI.2.-Productos de AI Dentro de la Cocina ***71***

VI.2.1.- Elaboración de Cucharas y Tenedores **72**

VI.2.2.- Elaboración de Cuchillos **73**
VI.2.2.1.- El Filo de los Cuchillos 74
VI.2.2.2.- Afilado de Cuchillos 76

VI.2.3.- Elaboración de Tijeras **77**

VI.2.4.- Elaboración de Ollas **79**
VI.2.4.1.- Proceso para la Elaboración de Ollas 80
VI.2.4.2.- Ejemplo para la Embutición de una Olla a Presión 80

CAPÍTULO VII** LA CAPA PASIVA Y LA CORROSIÓN EN USTENSILIOS DE COCINA FABRICADOS DE ACERO INOXIDABLE* ***84

VII.1.- La Corrosión ***85***

VII.1.1.- Teoría Electroquímica **85**
VII.1.1.1.- Curvas de Polarización 86

VII.1.2.- Corrosión Galvánica **88**

VII.1.3.- Corrosión por Picaduras **89**

VII.1.4.- Corrosión por Contacto **89**

VII.1.5.- Erosión Corrosiva **90**

VII.1.6.- Corrosión por Fatiga del Material **90**

VII.1.7.- Corrosión Intergranular **90**
VII.1.7.1.- Prevención de la Corrosión Intergranular 91
VII.1.7.1.1.- Regeneración 91
VII.1.7.1.2.- Deformación Previa en Frio 92
VII.1.7.1.3.- Medios Metalúrgicos 93
VII.1.7.1.3.1.- Disminución del Carbón 93
VII.1.7.1.3.2.- Adición de Elementos Estabilizadores 94
VII.1.7.1.3.3.- Cambio a Estructura Austenoferrítica 94

VII.2.- Métodos para la Conservación de la Capa Pasiva ***94***

VII.2.1.- Descascarillado **95**

VII.2.2.- Decapado **96**

VII.2.3.- Pasivación con Ácidos **97**

VII.2.4.- Limpieza ____ **98**

CAPÍTULO VIII TRABAJO DE CAMPO ____ ***100***

VIII.1.- Preparación del Equipo ____ ***101***

VIII.2.- Prueba Potencial de Corrosión contra Tiempo ____ ***103***

VIII.2.1.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Contacto con Vinagre ____ **104**

VIII.2.2.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Contacto con Jugo de Limón __ **106**

VIII.2.3.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Agua con Sal (fina) ____ **108**

VIII.2.4.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Agua con Sal (gruesa) ____ **110**

VIII.3.- Calculo de la Velocidad de Corrosión ____ ***112***

VIII.3.1.- VC en Vinagre ____ **116**

VIII.3.2.- VC en Jugo de Limón ____ **119**

VIII.3.3.- VC en Agua con Sal (fina) ____ **122**

VIII.3.4.- VC en Agua con Sal (gruesa) ____ **125**

VIII.3.5.- Tendencia del AI con Respecto a las Curvas de Tafel ____ **128**

CAPÍTULO IX CONCLUSIONES ____ ***132***

Bibliografía ____ ***1344***

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Víctor Artemio Ortiz Gallegos y Angélica López Salvador

Por haberme enseñado las cosas que hoy en día me forjan como ingeniero y como técnico aeronáutico. El haberme apoyado en cada una de mis decisiones que aunque sé que no todas fueron en su momento justo, tuvieron la paciencia y la fe en mí de que concluiría esta segunda carrera, es por eso que no los defraudare, conseguiré y me esforzaré por tener un buen trabajo en el que me desempeñare como tal siguiendo la ética que me enseñaron.

A mi hermana Tania Marina Ortiz López

Por soportarme todos estos años y haberme brindado tú apoyo durante las dos carreras que curse. Tú sabes que tienes mi apoyo incondicional y que siempre estaré allí cuando lo necesites y aun cuando no yo siempre estaré a tu lado.

A mi asesor de Tesis Dr. en Ingeniería Daniel Aldama Avalos

Por permitirme realizar esta tesis bajo su tutela y compartir sus conocimientos dentro de las materias que me impartió.

Ala FES Aragón y Facultad de Química de la UNAM

A mi escuela orgullosamente Aragón le doy las gracias por permitirme estar en tus aulas y conocer la gran cantidad de compañeros y profesores que cada uno de ellos aportaron algo que hoy en día influyen dentro de mi titulación.

A la Facultad de Química de la UNAM por darme la oportunidad de fundamentar la teoría de mi tesis y permitirme concluirla de manera satisfactoria.

ABREVIATURAS

- AOD.- Argon Oxygen Decarburization (Descarburización de Oxigeno-Argón)
- AISI.- American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero)
- bcc.-body center cubic (cubica centrada en el cuerpo)
- CANACERO.- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero.
- DGN.- Dirección General de Normas
- EAF.- Eelctric Arc Furnace (horno de arco eléctrico)
- EN.- European Committee for Standardization (Comité Europeo para la Normalización)
- fcc.- face center cubic (cubico centrada en la cara)
- ISO.- International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Normalización)
- ISSF.- International Stainless Steel Forum (Foro Internacional del Acero Inoxidable).
- HPA.- High Performance Atomizing (Alto rendimiento de atomización)
- NAFTA.- North American Free Trade Agrement (Tratado de Libre Comercio de América del Norte)
- SAGARPA.- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación.
- SAE.- Society Automotive Enginieers (Sociedad de ingenieros automotores)
- SECOFI.- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
- USGS.- United States Geological Survey (Estudio Geológico de los Estados Unidos)

INTRODUCCIÓN

El ser humano en su afán de satisfacer sus necesidades ha recurrido al uso de diferentes materiales siendo los metales el de mayor uso. Sin embargo estos conforme pasa el tiempo pueden llegar a corroerse, que en algunos puede ser de gran intensidad y en otros puede ni presentarse. Por desgracia existe una gran desventaja en cuanto a aquellos metales que son resistentes a la corrosión como su alto precio, sus reservas son escasas, y su higiene sea deficiente limitando su uso en ciertas zonas de trabajo. Es por estas razones que el uso del acero inoxidable esta normalizado para la preparación de los alimentos, además de que los grandes chefs recomiendan su uso por la nula reacción que estos tienen con los jugos que desprenden algunos productos alimenticios.

Hoy en día existen varias familias de acero inoxidable y de cada una de ellas se manufacturan utensilios de cocina. Como veremos durante este tema de tesis los aceros inoxidables de mayor uso para la cocción de los alimentos son los martensíticos, los cuales se emplean para el corte de alimentos y los austeníticos para manufacturar sartenes u ollas. Durante el capítulo veremos el porqué de cada familia y los beneficios que ofrece cada uno, explicando por qué algunos son destinados a realizar un trabajo determinado.

Debido a que el tema de los aceros inoxidables es bastante extenso, este tema de tesis se dividió en 8 capítulos y una conclusión, por lo que a continuación mencionaremos una breve descripción de cada capítulo presente en este trabajo de tesis:

En el capítulo I podrá conocer los elementos que componen al acero inoxidable, las reservas existentes de cada elemento, su distribución a nivel mundial y los mayores productores. Abarcando también los procesos necesarios para la fundición del acero inoxidable y los distintos métodos que se siguen para la elaboración de algunas piezas.

El capítulo II abarca con más detalle las familias del acero inoxidable, dando a conocer el porqué de la diferencia entre cada uno de ellos, su clasificación y las ventajas que ofrecen.

En los capítulos III y IV nos enfocaremos en la normalización que se sigue para su uso. En el capítulo III veremos las normas que se dictaminan para su empleo en la industria alimenticia, haciendo una breve mención de algunas de ellas y en el capítulo IV nos enfocaremos en las normas mexicanas expedidas por los diferentes sectores donde su uso es imprescindible. En estos 2 capítulos veremos la gran importancia del acero inoxidable tanto a nivel internacional como en México.

El capítulo V abarca los tratamientos térmicos y mecánicos que se le pueden dar a los aceros inoxidables, resaltando las diferencias entre cada familia, debido a que los tratamientos sean

térmicos o mecánicos, no son los mismos, pero si tiene un objetivo en común el cual es incrementar sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión.

En el capítulo VI conoceremos como se manufacturan algunos utensilios de cocina, y el porqué de los tratamientos vistos en el capítulo V, además se dará un ejemplo del cómo se manufactura una olla a presión.

El capítulo VII nos permitirá a conocer que el acero inoxidable no es del todo resistente a al corrosión, conociendo los diferentes tipos a los que está expuesto, los cuales algunos de ellos pueden presentarse con el uso dentro de la elaboración de la cocción de los alimentos.

En el capítulo VIII se verá la prueba de campo realizada para esta tesis, las cuales consisten en pruebas de corrosión con líquidos que normalmente se emplean para la cocción de alimentos dentro de los hogares mexicanos. Estas pruebas no generaron corrosión en los metales de prueba, ya que para eso se necesita un tiempo mucho mayor que el realizado en estas pruebas, sin embargo nos permite conocer si entre aceros inoxidables hay diferencias al estar expuestos a estas soluciones. Los resultados que verá no indican que el metal empezará a corroerse cuando entre en contacto con la solución, si no que permite ver y corroborar la resistencia que cada uno ofrece.

CAPÍTULO I

LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN AL ACERO INOXIDABLE Y SU PRODUCCIÓN A NIVEL MUNDIAL

El descubrimiento del acero inoxidable fue un gran salto para combatir la corrosión y es debido a esta gran particularidad que lo hace un metal de uso común en muchos lugares, siendo uno de los más relevantes su uso dentro del hogar, específicamente en el consumo de alimentos. Se tiene que recalcar que los aceros inoxidables no tienen un metal de recubrimiento, es su propia característica de resistir la corrosión al alear hierro y cromo (este último con un mínimo del 11%).

Conforme se ha ido avanzado la tecnología, así también lo han hecho los aceros inoxidables, con el fin de utilizarse de forma más eficiente dependiendo del ambiente o del trabajo al que puedan llegar a someterse, para esto existen más de 100 tipos diferentes de aceros inoxidables en el mundo cada uno con características especiales para un trabajo determinado, pero todos con un solo propósito reducir la corrosión.

I.1.- El Hierro y el Acero (H-A)

La corteza terrestre aproximadamente un 99% de ella está compuesta de 8 elementos principales siendo los más abundantes el oxígeno (47%), el silicio (29%), el aluminio (8%) y el hierro (4%) (este último es uno de los elementos que al alearse con el cromo puede dar origen al acero inoxidable).

Una gran desventaja del hierro es que al extraerse de la corteza lo hace en forma de mineral de hierro al venir mezclado con minerales, óxidos, silicatos y otros elementos, por lo que es necesario realizar un proceso de separación para obtener hierro puro.

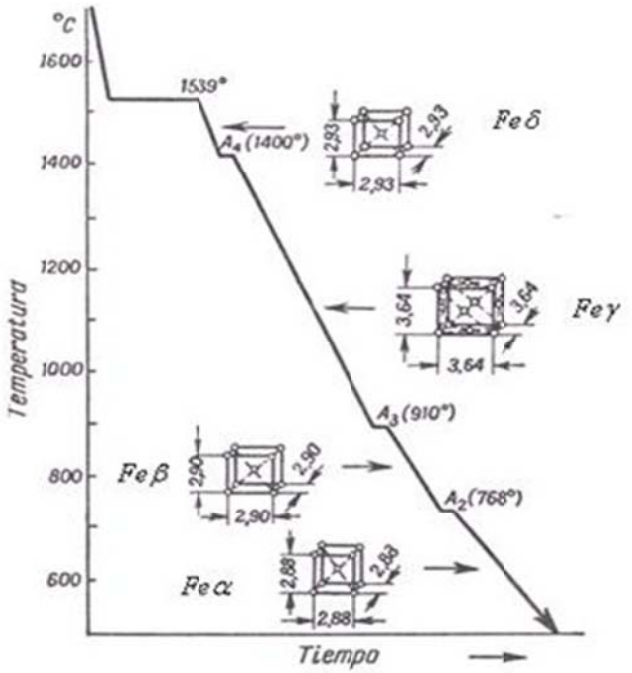
De acuerdo a la USGS las reservas de hierro a nivel mundial se estiman alrededor de 230 billones de toneladas de hierro puro, sin contar con los demás minerales que presentes en el mineral de hierro, las cuales tiene un total de 800 billones de toneladas.

I.1.1.- Diagrama Hierro Carbón

El hierro es el cuarto elemento que más abunda en la corteza terrestre (por debajo del aluminio) y con él se pueden manufacturar la mayoría de los metales que más se utilizan dentro de la ingeniería.

El hierro puro es un metal alotrópico, esto significa que puede tener una estructura diferente dependiendo la temperatura a la que está expuesto. La figura I.1 muestra las diferentes estructuras del hierro que puede tener dependiendo la temperatura de exposición.

Figura I.1 Estructura cristalina del hierro



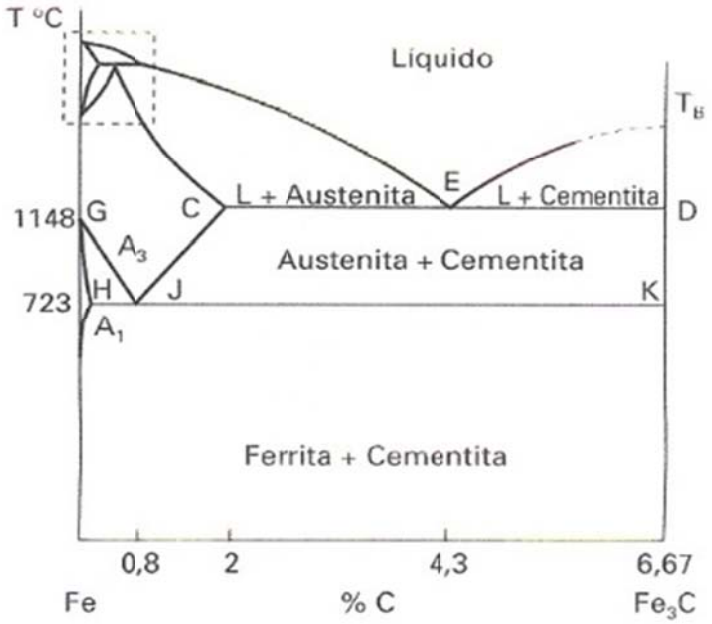
Fuente: Avner Sydney H. Introducción a la Metalurgia Física 12 de Julio de 1989

Como se observa en la figura I.1 el hierro mantiene una estructura cristalina bcc en forma δ (delta) hasta los 1539°C. A los 1400°C tiene un cambio en su estructura y pasa a ser del tipo fcc en forma γ (gama) la cual no es magnética. Al alcanzar los 910°C cambia a una estructura bcc en forma β (beta) que no es magnética; aun cuando alcanza los 768°C continua sin sufrir cambios en su estructura cristalina pero adquiere propiedades magnéticas ya que su forma cambia a α (alfa).

El hierro puro no tiene mucha aplicación dentro de la ingeniería, aunque al alearse con otros materiales forma nuevos metales que son de mucha utilidad dentro de este campo. El carbón al alearse con el hierro origina al acero.

Como se observó anteriormente existen cambios alotrópicos en el hierro cuando está bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento. Estos cambios se ven afectados cuando el hierro se ve aleado con otros elementos de aleación. En el caso de la aleación hierro-carbón se genera un nuevo diagrama; con temperatura, cantidad de carbón y hierro como parámetros (a diferencia del diagrama del hierro en que los parámetros eran temperatura y tiempo de enfriamiento).

Figura I.2 Diagrama Hierro-Carbono



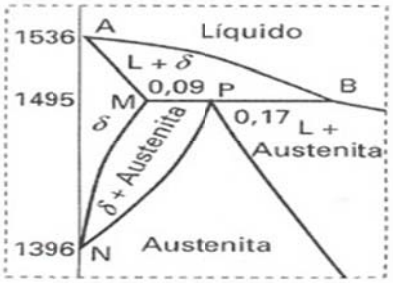
Fuente: Avner Sydney H. Introducción a la Metalurgia Física 12 de Julio de 1989

El diagrama de la figura I.2 tiene tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas; es dentro de estas líneas que ocurren reacciones importantes dependiendo de la cantidad de carbono que se tenga, dichas reacciones son:

- Reacción peritéctica
- Reacción eutectoide
- Reacción eutéctica

En la figura I.3 la línea MPB está presente a una temperatura de 1495°C y representa la reacción peritéctica en la que el líquido y el hierro δ (delta) forman un nuevo sólido, en este caso la fase austenítica (γ).

Figura I.3 Reacción peritéctica



Fuente: Avner Sydney H. Introducción a la Metalurgia Física 12 de Julio de 1989

La línea denotada por las letras MN representa el principio del cambio alotrópico del hierro δ al γ, esto solo para aleaciones que contienen como máximo 0.09% de carbono. La línea NP representa el fin del cambio de estructura cristalina cuando se tiene una cantidad menor al 0.17% de carbono. La línea MP es el inicio del cambio de estructura por reacción peritéctica, cuando se tiene carbono entre el 0.09 y 0.17%. La línea PB es el fin del cambio de estructura por reacción peritéctica, comprendido entre el 0.17 y 0.50 % de carbono. El punto peritéctico se da con una concentración del 0.17% de carbono (punto P), y es aquí donde la solución líquido y hierro δ (delta) pasan directamente a la estructura austenítica sin tener liquido o hierro δ (delta).

La siguiente reacción ocurre en la línea CED a una temperatura de 1148°C (ver figura I.2), esta reacción recibe el nombre de eutéctica. En esta sección el líquido que está por encima de la temperatura mencionada solidifica y forma un sólido llamado ledeburita. El nuevo solido está formado de dos fases austenita y cementita (γ+Fe_3C). La línea CE comprende el inicio de la reacción eutéctica al tener una concentración entre el 2 y el 4.3% de carbono. En el punto E se tiene el punto eutéctico, y se da solamente al tener un 4.3% de carbono. La línea ED es el final de la reacción eutéctica y se presenta al tener entre un 4.3 y un 6.67% de carbono.

La ultima reacción del diagrama hierro-carbono (ver figura I.2) ocurre a una temperatura de 723°C y comprende la línea HJK; a esta reacción se le llama eutectoide, aquí la fase austenítica sufre un cambio a una mezcla de 2 fases ferrita y cementita (α+Fe3C) llamada perlita. Esta reacción se presenta cuando el contenido de carbono está entre el 0.025 y el 2%. La línea HJ representa el inicio de la reacción eutectoide a partir del 0.025% de carbono hasta el 0.8%.

El punto eutectoide se encuentra denominada por la letra J al tener 0.8% de carbono. La línea JK indica el fin de la reacción eutectoide y comprende desde el 0.8% hasta el 6.67% de carbono.

Los puntos eutectoide y eutéctico están definidos por la cantidad de carbono que existe en ellos, en el caso del eutéctico es a 4.3% generando ledeburita, y para el eutectoide es a 0.8% y genera perlita.

En la reacción eutectoide, las aleaciones que tienen una cantidad de carbono menor al 0.8% presentan una mezcla entre la ferrita y la perlita, conociéndolos como aceros hipoeutectoides. Las aleaciones que están entre el 0.8 y el 2% de carbono tienen una mezcla entre perlita y cementita, conociéndolos como aceros hipereutectoides.

En la reacción eutéctica, las aleaciones que contienen del 2 al 4.3% de carbono tienen una mezcla entre ledeburita y austenita, conociéndolos como hierros fundidos hipoeutécticos. Las aleaciones que contienen del 4.3 al 6.67% de carbono tiene una mezcla entre ledeburita y cementita, conociéndolos como hierros fundidos hipereutécticos.

I.1.2.- Producción de H-A a Nivel Mundial

Antes de poder continuar hacia el tema de aceros inoxidables, será necesario dar a conocer que países, son los mayores productores de hierro y acero.

De acuerdo a la USGS (2009) sabemos que los mayores productores de hierro son Australia, Brasil, China, Ucrania, India y Rusia. Sin embargo en el 2009 China importo casi las dos terceras partes del mineral de hierro, produciendo el 60% de arrabio a nivel mundial.

Como se observa en la tabla I.1 México no fue capaz de abrir una nueva mina de hierro, quedándose con la misma cantidad de producción de hierro en los años 2009 y 2010.

Tabla I.1 Producción del mineral de hierro

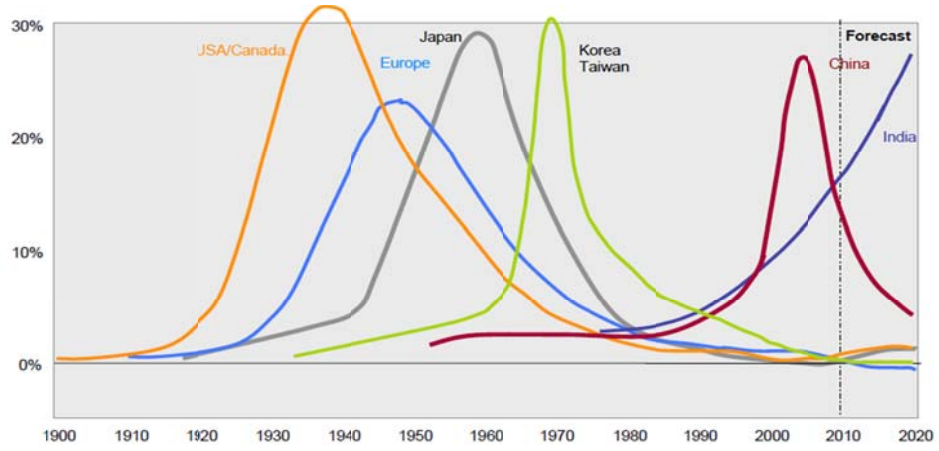
	Producción minera		**Reservas**	
	2009	**2010**	**Mineral de hierro**	**Hierro puro**
Estados Unidos	27	49	6900	2100
Australia	394	420	24000	15000
Brasil	300	370	29000	16000
Canadá	32	35	6300	2300
China	880	900	23000	7200
India	245	260	7000	4500
Irán	33	33	2500	1400

Tabla I.1(cont) Producción del mineral de hierro				
	Producción minera		**Reservas**	
	2009	**2010**	**Mineral de hierro**	**Hierro puro**
Kazakstán	22	22	8300	3300
Mauritania	10	11	1100	700
México	12	12	700	400
Rusia	92	100	25000	14000
Sur África	55	55	1000	650
Suecia	18	25	3500	2200
Ucrania	66	72	30000	9000
Venezuela	15	16	4000	2400
Otros países	43	50	11000	6200
Total	2240	2400	180000	87000

Fuente: USGS resumen de productos de hierro Enero 2011

La producción de acero tiene picos de gran actividad. Uno de estos fue durante el periodo comprendido entre las dos guerras mundiales, yendo en ascenso durante la primera y teniendo su auge en la segunda, siendo Canadá y Estados Unidos los principales productores de acero en aquella época (ver figura I.4). Sin embargo y de acuerdo a la conferencia del ISSF (2010) China es el país con la mayor producción de acero, siendo el pico más alto en el siglo XXI.

Figura I.4 Picos de productividad del acero



Fuente: ISSF conferencia COMC Paris Francia 13 de octubre del 2010

China es el mayor productor de acero a nivel mundial, pero debemos de conocer en que qué cantidad se produce en el resto del mundo y en fechas actuales. La tabla I.2 muestra la producción de acero por trimestre de distintos conjuntos de países, destacando China como el principal productor durante el 2010.

Tabla I.2 Producción de acero en millares de toneladas métricas entre el año 2010

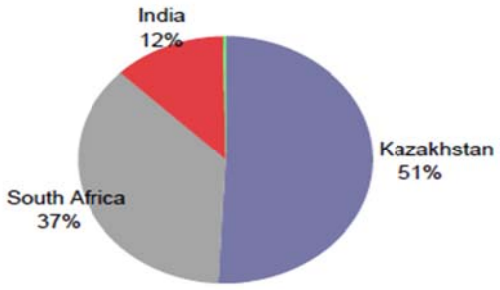
Región	Primer cuarto del año	Segundo cuarto del año	Tercer cuarto del año	Cuarto cuarto del año	Por año
Europa occidental y África	2081	2222	1715	1857	7875
Europa central y oriental	73	89	89	88	340
América	728	671	641	568	2609
Asia excluyendo China	2235	2278	2205	2293	9011
China	2607	2862	2844	2943	11256
En el mundo	7724	8122	7494	7749	31090

Fuente: ISSF crude steel production 01/07/11

I.2.- El Cromo

El siguiente elemento de mayor importancia dentro de los aceros inoxidables es el cromo, pero a diferencia del hierro es más difícil de extraer debido a las pocas reservas que existen, teniendo como desventaja su alto precio por kilogramo. La ISSF durante el 2010 dio a conocer las reservas más grandes de cromo, las cuales se encuentran en India, Sudáfrica y Kazakstán y debido a esto su precio estimado por kilogramo hasta el 13 de octubre del 2010 era de 10 dólares.

Figura I.5 Reservas de cromo



Fuente: ISSF conferencia COMC 13 de Octubre del 2010

I.3.- El Acero Inoxidable (AI)

Para poder producir acero inoxidable se necesitan por lo menos tres elementos básicos que son el hierro, el cromo y el carbón.

Existen diferentes familias de acero inoxidable, que dependen de la estructura que posean, siendo:

- Martensíticas
- Ferríticas
- Austeníticas
- Dúplex

Cuando se agrega una mayor cantidad de carbón a una aleación hierro-cromo y se enfría de forma rápida propiciamos la formación de martensita obteniendo un acero inoxidable martensítico que es duro con buenas propiedades mecánicas y es endurecible por tratamiento térmico, pero si añadimos poco carbón, fomentamos la ferrita dándonos un AI ferrítico al cual no podemos dar un endurecimiento por tratamiento térmico, sin embargo posee otras características que lo hacen útil como una mejor resistencia a la corrosión que los martensíticos (sin olvidar que el propósito de los aceros inoxidables es resistir la corrosión).

El níquel dentro de los aceros inoxidables tiene la función de fomentar la fase austenita y con ello obtenemos un acero austenítico que como propiedades importantes son su embutibilidad y posee la mayor resistencia a la corrosión.

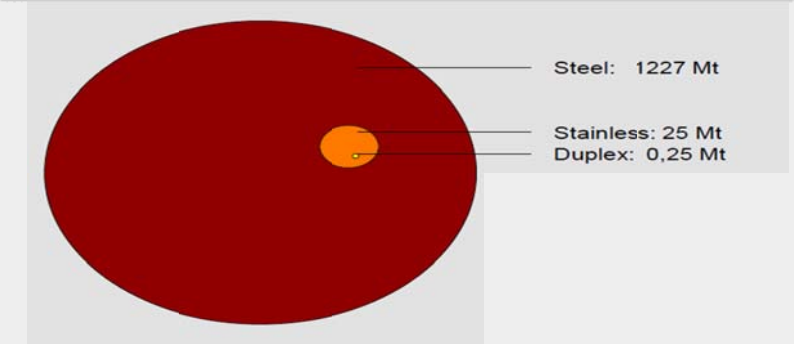
Dentro de los AI tenemos una familia que presenta dos fases balanceadas siendo estas la austenítica y la fase ferrítica, esto se da cuando tenemos altos contenidos de cromo y níquel es decir es una aleación hierro-cromo-níquel y gracias a estas estructuras balanceadas obtenemos buenas

propiedades como bajo coeficiente de expansión, alta conductividad térmica y buen rendimiento mecánico.

Aparte de las familias mencionadas, existe una quinta la cual se caracteriza no por la estructura si no por el endurecimiento que se le proporciona, conocidos como aceros endurecidos por precipitación, tema que se tratara más adelante.

Conociendo que existen diferentes tipos de AI, y que dependen del tipo de aleación que se haga y la función que vayan a desempeñar; su mercado en comparación con el acero es aun pequeño dejándolos con tan solo un 3% de comercialización a nivel global.

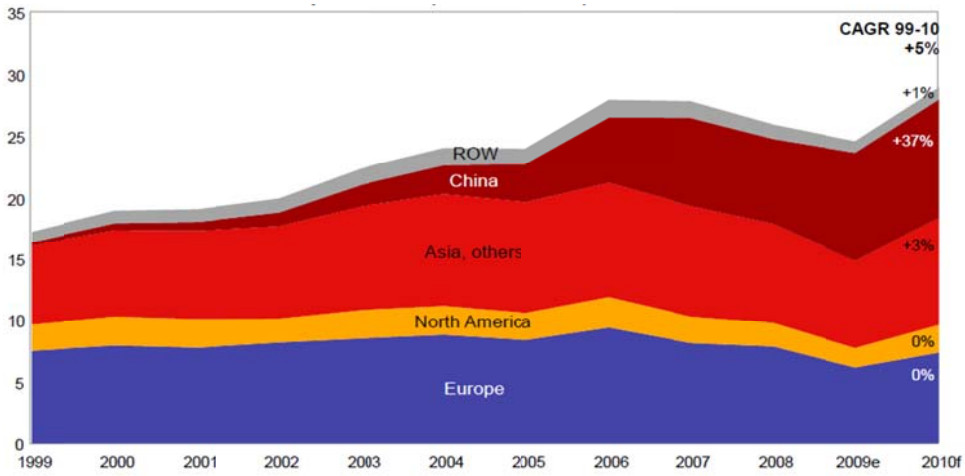
Figura I.6 Comparación de ventas entre el acero y el acero inoxidable



Fuente: ISSF conferencia COMC Paris Francia 13 de octubre del 2010

Con la crisis presentada en el año 2009 la producción de AI se vio alterada, sin embargo China el principal productor en los últimos años fue el único país que pudo mantener sin alteración alguna su producción de AI, a comparación de los demás países que tuvieron pérdidas (ver figura I.7).

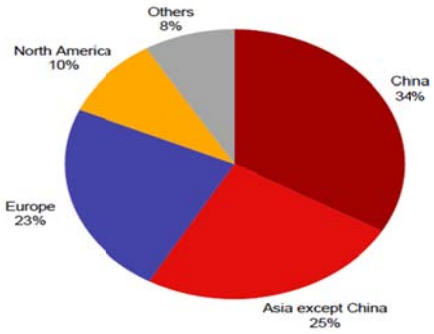
Figura I.7 Producción de acero inoxidable



Fuente: ISSF conferencia COMC Paris Francia 13 de octubre del 2010

Conocemos quiénes son los mayores productores de AI, sin embargo ¿Quiénes son los mayores consumidores? La ISSF nos muestra en la siguiente figura a los mayores consumidores.

Figura I.8 Mayores consumidores de inoxidable



Fuente: ISSF conferencia COMC Paris Francia 13 de octubre del 2010

Hoy en día la importación y exportación de AI es muy común. En el caso de la importación son un conjunto de países que adquieren chatarra de acero inoxidable para su reciclaje, siendo los países de Europa occidental y todo el continente Asiático los mayores recicladores de AI.

Tabla I.3 Exportación de chatarra de acero inoxidable en el 2010 (unidades en miles de toneladas métricas)									
Origen	**Destino**								
	NAFTA	**Latino américa**	**Europa occidental**	**Europa oriental**	**Medio oriente**	**África**	**Asia**	**Otros**	**Total**
NAFTA	185.1	1.1	127.8	0.0	0.6	0.7	852.9	1.1	1169.3
Latino américa	0.6	0.0	27.3	-	-	-	9.5	-	37.4
Europa occidental	1.0	0.4	2064.5	70.5	3.9	.06	499.8	0.4	2641.1
Europa oriental	-	-	292.4	61.7	0.0	0.5	16.9	0.0	371.5
Medio oriente	0.4	-	45.5	0.0	0.5	2.3	21.6	1.5	71.7
África	-	-	48.6	-	0.2	0.6	20.1	-	69.5
Asia	5.1	0.1	59.5	-	1.4	0.4	651.6	-	718.1
Otros	0.0	-	35.2	0.1	0.1	-	83.6	0.1	119.0
Total	192.1	1.6	2700.7	132.3	6.7	5.0	2156.1	3.1	5197.6

Fuente: ISSF stainless steel scrap 20/07/11

Como se observa en la tabla I.3, Europa occidental exporta la mayor cantidad de chatarra de AI, haciendo entre ellos mismos su reciclaje. Asia por otro lado no exporta mucha chatarra de AI pero sí importa una gran cantidad de otros países para poder reciclarla.

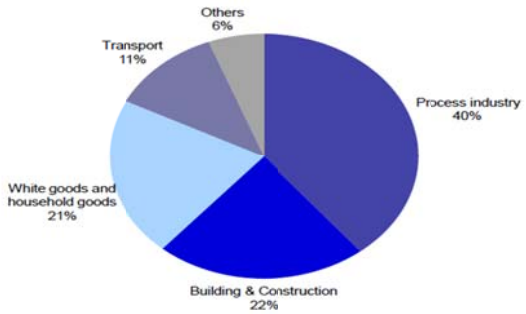
El AI en el siglo XXI ha tenido una gran demanda en diferentes tipos de productos desde utensilios de cocina, hasta los necesarios para la industria. Esto origina una gran cantidad de importación para algunos países y exportación para otros.

Tabla I.4 Exportación de productos de acero inoxidable en el 2010 (unidades en miles de toneladas métricas)									
Origen	**Destino**								
	NAFTA	**Latino américa**	**Europa occidental**	**Europa oriental**	**Medio oriente**	**África**	**Asia**	**Otros**	**Total**
NAFTA	335.8	51.8	148.3	1.3	2.3	1.4	103.2	0.7	644.9
Latino américa	19.9	47.2	17.7	0.9	1.4	2.0	17.6	0.1	106.8
Europa occidental	620.2	87.5	5189.1	567.2	67.7	64.9	567.5	29.9	7193.9
Europa oriental	8.3	0.6	184.9	99.9	0.6	1.3	7.0	0.0	302.6
Medio oriente	3.4	-	13.4	0.5	52.1	0.9	8.3	0.6	79.2
África	45.1	26.8	118.2	3.8	20.3	9.3	91.3	0.7	315.6
Asia	342.5	119.5	774.5	157.0	191.4	68.6	3971.8	87.5	5712.7
Otros	0.2	0.6	8.5	0.9	0.2	0.1	4.9	1.0	16.4
Total	1375.6	334.0	6454.6	831.5	336.0	148.4	4771.6	120.5	14372.1

Fuente: ISSF stainless steel products 20/07/11

Con la tabla I.4 conocemos que Europa occidental y Asia son los principales exportadores de acero inoxidable; pero ¿en que se usa todo este acero inoxidable? ¿Cuáles son los servicios en los que más se utiliza? Las respuestas a estas preguntas se observa en la figura I.9 indicando que el mayor uso es para el sector industrial, seguido por la construcción de edificios y por último en la industria alimenticia.

Figura I.9 Sectores que utilizan acero inoxidable



Fuente: ISSF conferencia COMC Paris Francia 13 de octubre del 2010

I.4.- Fabricación del AI

La fabricación de acero inoxidable antes del año de 1940 se realizaba en hornos de arco eléctrico al fundir chatarra de acero al carbón y mineral de hierro; además de añadir ferrosilicio y ferrocromo de bajo carbón (este último para obtener la cantidad de cromo requerida). Este proceso de fabricación Choulet J. Richard (1999) lo denomina como "el proceso rustico" y se daban aceros inoxidables que contenían carbón en un 0.08%. A finales del año 1940 se introdujo la capacidad del oxígeno en toda la industria acerera, evolucionando las prácticas con hornos de arco eléctrico y permitiendo fundir chatarra de acero inoxidable, ferrocromo con alto contenido de carbón, níquel y cal. Este nuevo método permite ahorrar energía, tiempo, reducción de ferrocromo de bajo carbón (que tenía un alto costo), disminución del contenido de hidrógeno y el aumento de cromo.

En 1954 W. Krivsky estudio la temperatura del carbón-cromo y la relación de la fundición del ferrocromo en laboratorios. Estos experimentos se basaron en el soplado de oxigeno hacia la superficie de la aleación de cromo, fundida en condiciones isotérmicas. Krivsky añadió argón con el fin de descarburizar cuando se tienen bajos niveles de carbón y sin tener excesiva oxidación de cromo. Eventualmente se concluyó que se necesitaba un proceso separado llamado descarburización de oxigeno-argón (AOD por sus siglas en ingles); este equipo entro en operación por primera vez en Octubre de 1967.

Durante los 50´s se desarrolló un proceso de desgasificación por vacío para la producción de aceros, que posteriormente a mediados de los 60´s se adoptó un proceso similar pero con el fin de descarburizar a los aceros inoxidables (VOD por sus siglas en ingles), proceso desarrollado por Witten en Alemania entre 1962 y 1967.

La fundición de AI hoy en 1940 solamente permitía que se fundiesen aceros, minerales de hierro y ferrocromo de bajo carbón produciendo entre 1 a 2 toneladas de AI. Después de la década de los 40´s la demanda de acero inoxidable sufrió un incremento y con esto empezó la evolución del proceso de su fabricación, dando origen a varias etapas que garantizan un acero inoxidable sin contaminantes, con buena resistencia a la corrosión y alto tonelaje de producción.

Los procesos que actualmente se siguen para la fabricación del acero inoxidable son (ver figura I.10):

1. Horno de arco eléctrico (EAF)
2. Descarburizador de oxigeno-argón (AOD)
3. Alto rendimiento de atomización (HPA)
4. Recocido con hidrogeno

1 El horno de arco eléctrico vino a revolucionar la cantidad de material que se fundía (20400 Kg en solo un proceso de fundición) con respecto a otros hornos, que solo fundía entre 450 a 1800 kg. Otras ventajas del uso del horno de arco eléctrico son la densidad aparente del metal fundido, la fluidez, y la combinación entre el horno y el descarburizador de oxigeno-argón.

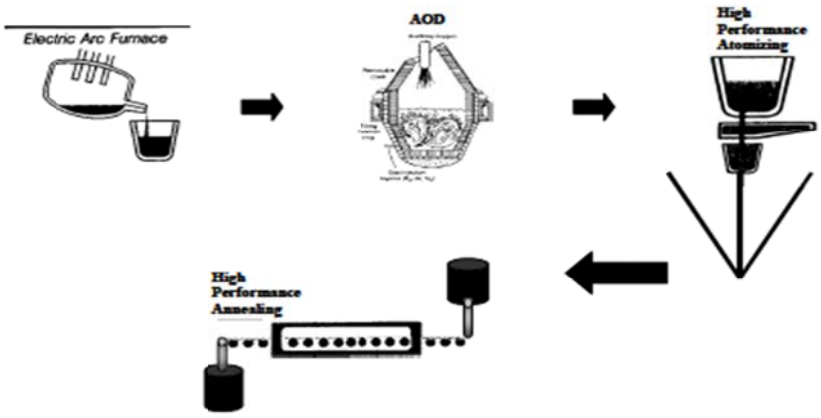
2 El descarburizador (AOD), tiene la función de oxidar el carbón sobre el cromo y permite utilizar una gran variedad de materiales ferrocrómicos con altos contenidos de carbón.

El proceso de descarburización se da al oxidar el carbón en el metal líquido, que escapa en forma de monóxido de carbono de la fundición. El argón y nitrógeno se inyectan simultáneamente y estos burbujean a través de las toberas desde el fondo del recipiente, junto con el oxígeno. Este se llega a combinar mejor con el carbón que con el cromo, dando así la descarburización de la fundición. Después de la descarburización se le añade silicón para reducir cualquier cantidad de cromo que se llegara a oxidar durante esta etapa. Simultáneamente sulfuros y otras impurezas son removidas del metal líquido y se depositan en la escoria, y una vez retirada del AOD los niveles de sulfuro son menores a un 0.01%.

3 Anteriormente se utilizaba un atomizador de agua en “V” en la producción de acero inoxidable. El HPA revoluciono el método anterior, debido a que existe una mejor transferencia de energía del chorro de agua hasta el molde donde fluye el metal; además de tener la habilidad de manejar altos tonelajes (20 tons ó 45000 lbm).

4 El recocido con hidrogeno se realiza al someter al AI dentro de una atmosfera de hidrogeno; los beneficios que se han mostrado en este proceso son la reducción del contenido de oxígeno y carbón así como un crecimiento de grano en acero ferríticos.

Figura I.10 Proceso de fabricación del acero inoxidable



Fuente: Shade Chris Hoeganes Corporation NJ

I.4.1.- Hornos para Fundir AI

Para la elaboración del AI principalmente se usan los hornos de tipo eléctrico, ya sea de arco o de inducción, sin embargo Di Caprio Gabriel (1987) realizo una distinción de las maneras de fundir AI en el horno de arco eléctrico:

- El primer método empleado consiste en utilizar cargas vírgenes y sin chatarra de AI. El proceso consiste en diluir hierro líquido mediante la adición de ferrocromo de bajo contenido de carbón, para así de esta manera alcanzar la proporción de cromo adecuada.
- La segunda forma de producir AI mediante el horno de arco eléctrico consiste en emplear altas cargas de cromo llegando a usar chatarra de acero inoxidable. Esta forma de producción permite la oxidación del carbono a altas temperaturas, empleado baños fundidos de óxido de hierro ricos en cromo.

Como el horno de arco eléctrico se puede emplear tanto para fundir AI y acero al carbón, hablaremos de los pasos que se deben de emplear para poder utilizar el horno de arco eléctrico en la fundición de AI.

Carga del horno.- La carga del horno se realiza una vez que se realizó un precalentamiento. La carga será entonces introducida, siendo esta si es para un acero virgen las descritas en el primer método. Sin embargo para el segundo se emplea una combinación entre AI, ferrocromo de alto contenido de carbón, níquel, molibdeno y chatarra de acero al carbón el cual se añade hasta el último para que este absorba la radiación y ayude a proteger las paredes del horno.

Durante todo el proceso de fundición por arco eléctrico, es necesario realizar una recarga de material, la cual se realizara cuando la primera se haya fundido en un 75%, siendo por lo general las aleaciones ferrocromo el material a añadir durante la recarga.

- Fundición.- La fundición es el siguiente paso cuando se tiene la carga apropiada, la cual debe de realizarse de manera rápida.
- Descarburización.- Dentro de los AI esta operación es indispensable, ya que involucra la inyección de oxígeno en la fundición para oxidar y remover el carbón. Para la descarburización se emplean dos métodos, el primero y el más antiguo era utilizar una tubería consumible, cuya punta se posicionaba en la escoria y la inyección de oxigeno se hacía a mano. El segundo método es atreves de un inyector de oxigeno enfriado por agua.
- Reducción.- La reducción consiste en recuperar al cromo, ya que debido al proceso de descarburización al inyectar oxígeno, removemos carbón pero también oxidamos al cromo. Para poder recuperar al cromo se añade a la escoria un agente reductor, siendo por lo general una aleación de silicón acompañada con cal. Esta acción se realiza de manera inmediata una vez terminada la descarburización.
- Acabado.- Es la adición de últimos elementos hacia la escoria, las cuales permiten realizar muestreos, aleaciones, desulfuración, y un ajuste a la temperatura. Estos últimos elementos que se añaden son aleaciones de hierro sillico o calcio de silicio.
- Desoxidación.- Debido a que ahora en el AI existe una gran cantidad de silicio, manganeso y cromo, el AI se desoxida de manera automática, pero para el control de impurezas, se emplea aluminio para los AI del tipo ferrítico y martensítico, en el caso de los austenítico el uso del aluminio rara vez se emplea ya que perjudica la apariencia y su pulido.

En cuanto a la fabricación del AI en el horno por inducción, este se basa únicamente en fundir chatarra de acero inoxidable, la cual es seleccionada para dicho proceso.

I.4.2.- Colado del AI

El colado del acero inoxidable se realiza de forma centrifuga, moldeado en arena, en shell, en cerámica, y a la cera perdida. Las formas de fundición de AI antes mencionadas son las más utilizadas, pero existen otras que no son del todo empleadas para fundir AI como es el método de contra gravedad, fundición a baja presión utilizando fusión en vacío (CLV) y el método de aleación por fusión de aire (CLAS).

I.4.2.1.- Colado Centrífugo

La fundición centrifuga permite fundir cualquier grado de acero inoxidable que sea fundida estáticamente; además de que se destacan dos maneras de fundición centrifuga siendo la vertical y la horizontal. La fundición centrifuga vertical puede darnos piezas cilíndricas, no cilíndricas y piezas de forma asimétrica. La fundición centrifuga horizontal nos proporciona, mangas cilíndricas, cojinetes y una gran variedad de piezas donde se necesiten formas cilíndricas o tuberías. La fuerza centrífuga y la dirección de la fundición permiten producir piezas con mejor limpieza y densidad que si se hiciera con una fundición estática.

Los moldes que se emplean dependen de la calidad y de la cantidad de fundiciones a realizar, siendo estos los de arena, semipermeables o moldes permanentes.

I.4.2.2.- Colado con Arena

Dentro de la fundición con arena solamente se destacan los tipos de arena que se emplean siendo la arena verde, la cual es alterada químicamente y la de cascara.

I.4.2.3.- Colado en Arena Revestida (colado Shell)

Este tipo de colado permite obtener piezas de formas sencillas o complicadas con gran exactitud dimensional, permitiendo realizar una gran cantidad de piezas de manera rápida, tiene la ventaja de ser mucho más barato que la colada con arena verde.

La diferencia entre el colado en arena verde y la revestida, radica en que en la segunda se le realiza un proceso de preparación a la arena, agregando resinas. Para su preparación existen dos formas:

- Aire caliente.- Se le colocan catalizadores y resinas liquidas, el alcohol o el agua agregada es removida con aire caliente
- Revestimiento en caliente.- La arena se calienta entre 125-150°C , se agregan lubricantes además de la preparación se le agregan los siguientes materiales:
  - Arena silica
  - Arena zirconita
  - Arena cromita
  - Arena con silicatos de aluminio
  - Resinas de fenol formaldehido
  - Catalizadores y lubricantes

- Aditivos.

I.4.2.4.- Colado a la Cera Perdida

En este método se emplea cera, la cual es manipulada para que adquiera la forma de la pieza. Una vez que se tiene dicha forma la cera es recubierta con material cerámico, la cual endurece y adquiere la forma de la cera, que antes de la colada del metal se retira añadiendo calor teniéndose entonces el molde cerámico de la pieza lista para poder realizar el proceso de colación.

El acero inoxidable al ser fundido con este método obtenemos piezas como válvulas, bombas, artículos deportivos, motores y turbinas, pequeñas armas de fuego, herramientas, equipo médico y máquinas para oficinas. La elección de este método da como ventaja la poca maquinabilidad que se le da a la pieza una vez fundida.

I.4.2.5.- Colado con Molde de Cerámica

Este método es muy similar que el de la cera perdida, pero se utiliza para piezas que son demasiado grandes para utilizar cera o donde la cantidad es limitada. Al igual que la cera perdida también este método ofrece un buen acabado superficial, buen detalle de la pieza y alta precisión dimensional. Las piezas que se realizan con este método son componentes para maquinas procesadoras de alimentos, válvulas para uso químico, en la industria petrolera, estructuras para la aeronáutica y reactores nucleares.

CAPÍTULO II

TIPOS DE ACERO INOXIDABLE

Los AI al igual que el acero al carbón, posee cambios de su estructura cristalina conforme al aumento de temperatura y a la cantidad añadida de los metales a alear. Estos cambios pueden determinar las propiedades mecánicas necesarias para un trabajo específico.

En los AI tenemos 5 familias, de las cuales 4 son clasificados por el tipo de estructura cristalina que está presente en ellos y la última familia por el tipo de endurecimiento que tiene. Dichas familias son las siguientes:

1. Ferrítico
2. Martensítico
3. Austenítico
4. Dúplex
5. Endurecidos por precipitación

Los primeros 4 se trataran durante todo este capítulo mientras que los aceros endurecidos por precipitación se verán más adelante.

II.1.- AI Ferrítico

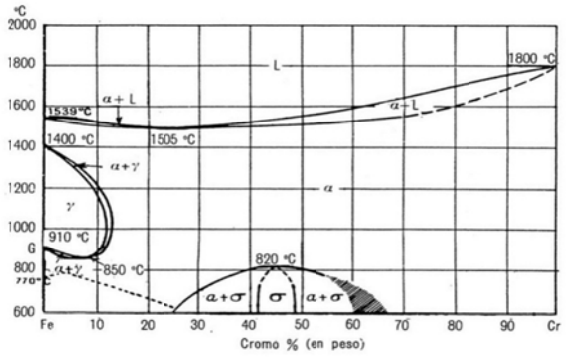
El cromo es el elemento principal de los AI; esta característica de inoxidable se adquiere cuando se tiene una proporción mínima de cromo en un 11%.

El cromo por ser un elemento alfágeno tiene la propiedad de fomentar la fase ferrítica (alfa) y suprime la formación de la fase austenítica (gamma). A causa de esta propiedad, en el diagrama hierro-cromo de la figura II.1 se forma una pequeña zona austenitica (gamma), siempre y cuando se tenga una cantidad de cromo máxima de un 13% y este entre 910 a 1400°C.

El hierro puro al tener una temperatura de 910°C cambia su estructura de un hierro β (beta) al hierro γ (gamma). Al añadirse cromo la temperatura de cambio de fase comienza a descender, hasta llegar a los 850°C; cuando se alcanza dicha temperatura la cantidad de cromo ascendió al 8%, a partir del porcentaje anterior y hasta llegar al 13% se sufre un aumento de la temperatura para realizar el cambio de fase. Más allá del 13% de cromo la fase γ (gamma) desaparece, permaneciendo la fase α (alfa).

En la figura II.1 se puede observar que además de la zona donde existe la fase γ (gamma), existe otra que aparece con altos contenidos de cromo. En la nueva zona formada tenemos la fase α (alfa) que interactúa con una nueva fase llamada sigma (σ), tema que se tratara más adelante.

Figura II.1 Diagrama Hierro-Cromo



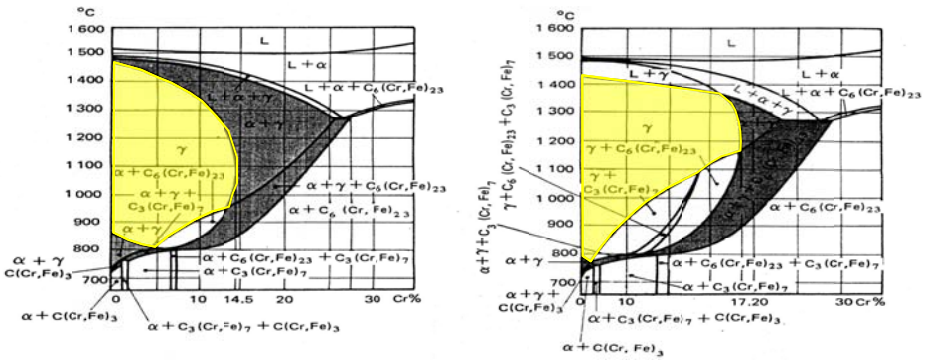
Fuente: Colombier Louis Aceros inoxidables: aceros refractarios 1968

II.2.- AI Martensítico

En las aleaciones hierro-cromo la zona de la fase austenítica es muy pequeña debido a que el cromo es un elemento alfágeno y fomenta la producción de la fase ferrítica (alfa), por lo tanto la

función del carbón es extender hacia la derecha la zona austenítica y tener la oportunidad de hacer AI del tipo martensíticos los cuales tiene buenas propiedades mecánicas y son resistentes a la corrosión. El desplazamiento de la curva dependerá del contenido de carbón que se añada. En la figura II.2 tenemos dos diagramas de hierro-cromo, cada una con diferentes cantidades de carbón. El diagrama de la izquierda contiene 0.2% de carbono, extendiendo la curva de la zona austenítica y generando zonas bifásicas austenoferríticas. En el diagrama de la derecha la cantidad de carbono aumento hasta 0.4%, teniendo la extensión de la curva y generando las zonas bifásicas. En ambos diagramas el límite de la curva austenítica se extendió, pasando la cantidad máxima de cromo que se tenía antes que era de un 13%.

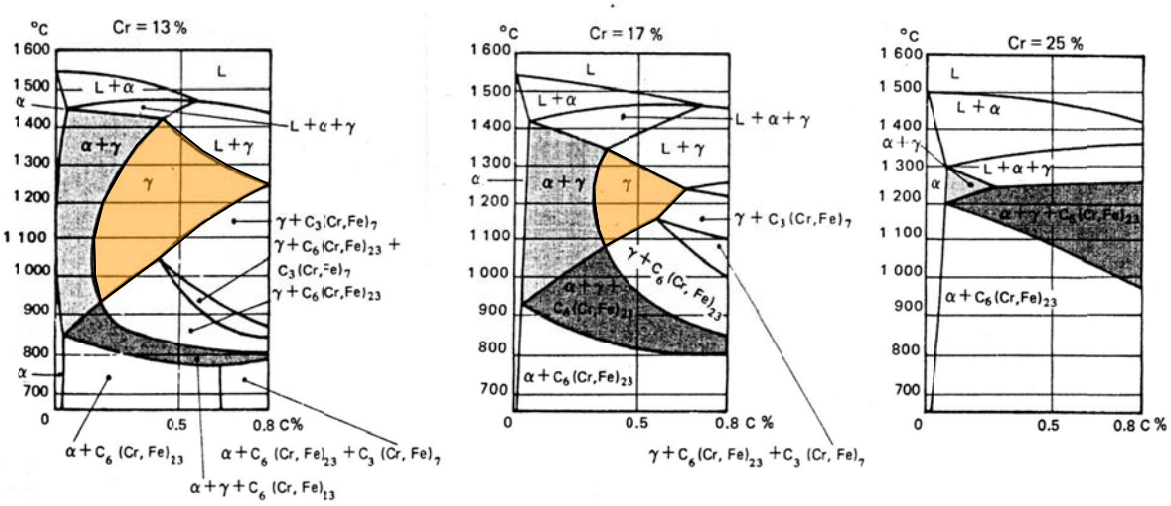
Figura II.2 Diagrama Hierro-Cromo con adición de carbón



Fuente: Inchaurza Zabala Adrián Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor

Existe un caso contrario al diagrama hierro-cromo con adición de carbón, que en vez de fomentar la fase austenítica (gamma) la disminuye, fomentado las zonas ferríticas (alfa). Para este caso es el diagrama hierro-carbono que se ve afectado al añadir cromo. En la figura II.3 se puede apreciar la disminución de la fase austenítica (gamma) conforme el porcentaje de cromo va en aumento, hasta llegar a un punto en que la zona austenítica deja de existir.

Figura II.3 Diagrama Hierro-Carbón adicionando cromo

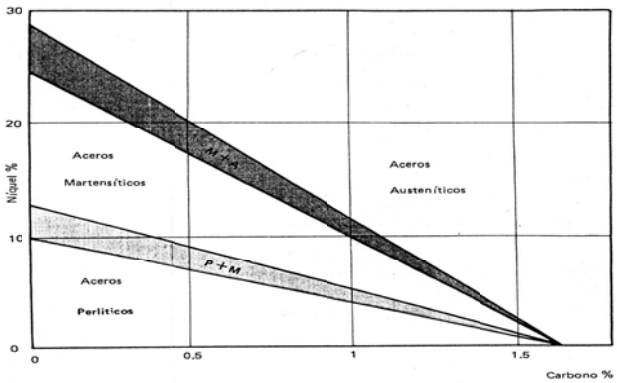


Fuente: Inchaurza Zabala Adrián Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor

II.3.- AI Austenítico

El níquel a diferencia del cromo es un elemento gammágeno por lo tanto amplia la estabilidad de la fase gamma (γ). En aceros de bajo contenido de carbón, la adición de níquel hasta un 24% propicia que dicho acero tenga una estructura austenítica (γ) a temperatura ambiente. Otra ventaja de añadir níquel es el aumento del temple al reducir la velocidad crítica de enfriamiento. El diagrama de Gulliet (figura II.4) nos permite saber las cantidades necesarias de níquel para conseguir aleaciones con fases austeníticas o martensíticas.

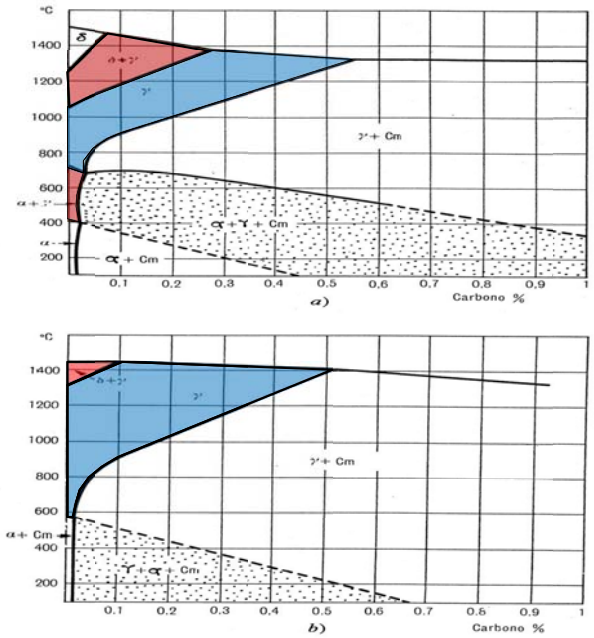
Figura II.4 Diagrama de Gulliet



Fuente: Inchaurza Zabala Adrián Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor

Como el níquel disminuye la fase alfa (ferrita), aumenta la estabilidad de la austenita (γ), además debido a la preferencia por formar austenita (γ), las zonas ferríticas y bifásicas austenoferríticas se van eliminando (Ver figura II.5).

Figura II.5 Hierro-Cromo con adición de níquel



Fuente: Colombier Louis Aceros inoxidables: aceros refractarios 1968

II.3.1.- Alto y Bajo Contenido de Carbón en Aceros Austeníticos

Los aceros austeníticos tienen diferentes temperaturas de trabajo, algunas de ellas permiten que los aceros austeníticos sean susceptibles a la corrosión intergranular, es por esta razón por la que existen ciertos subgrados, ejemplo de estos son aquellos que tiene diferentes contenidos de carbón.

Aquellos aceros con bajo contenido de carbón se emplean donde haya una alta temperatura o donde se requiera de bastante soldadura. El bajo contenido de carbón en estos aceros previene la precipitación de los carburos de cromo hacia los límites de grano, evitando la corrosión intergranular (tema que se tratará más adelante).

El alto contenido de carbono, propicia que estos sean más resistentes a esfuerzos a temperaturas mayores (cercano a los 500°C) siendo mejores que los aceros estándares. Es decir si tenemos un acero austenítico formado por la aleación hierro-cromo-níquel, este será menos

resistente cuando sea sometido a esfuerzos en temperaturas elevadas que un acero austenítico pero con alto contenido de carbón.

II.4.- AI Dúplex

Como se ha podido observar a lo largo de este capítulo, existen varios tipos de aceros inoxidables, y cada uno de es representado por la fase que predomina en ellos (dependiendo la aleación de la que se hable), así existen los ferríticos, los austeníticos y los martensíticos. Sin embargo, existe un cuarto grupo de AI conocidos como dúplex, ya que en ellos predominan dos fases equilibradas en cantidades iguales, la ferrítica y la austenítica. Este tipo de acero aprovecha las ventajas de las dos fases, la ferrita da resistencia mecánica, mientras que la austenita aporta resistencia a la corrosión.

Dentro del diagrama de cambio de fase de los aceros dúplex (figura II.6), se puede observar que estos aceros solidifican cuando la ferrita es del tipo α, además es apreciable como el equilibrio entre la austenita y la ferrita es estrecho en comparación a las zonas donde solamente existirá una sola fase, ya sea ferrita o austenita. Para poder mantener un balance adecuado entre las dos fases se prosigue de acuerdo a las siguientes variables:

Ecuación II.1 Balance para aceros dúplex

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.73\%Si + 0.88\%Mo$$

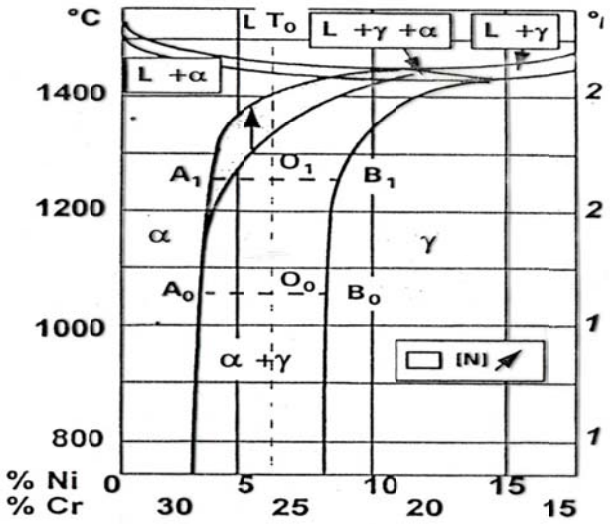
$$Ni_{eq} = \%Ni + 24.55\%C + 21.75\%N + 0.4\%Cu$$

$$\%Ferrita = -20.93 + 4.01Cr_{eq} - 5.6Ni_{eq} + 0.016T$$

Practical Guidelines for the fabrication of duplex stainless steel Segunda edición 2009

De acuerdo a las ecuaciones anteriores, el balance adecuado para un acero dúplex se da al ajustar las cantidades de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno, para posteriormente someter al acero a un recocido a temperaturas entre los 1050 a 1150°C y por último es la velocidad de enfriamiento, ya que esta controla la cantidad de ferrita existente dentro de la aleación, debido a que parte de la ferrita podría convertirse en austenita.

Figura II.6 Diagrama AI dúplex



Fuente: Practical Guidelines for the fabrication of duplex stainless steel Segunda edición 2009

El ajuste de cada uno de los elementos determinara el balance entre las dos fases de los aceros dúplex, y cada uno de estos elementos tiene una función concreta dentro de estos:

- Cromo.- Se necesita cerca de un 10.5% de este elemento para que se pueda crear una capa pasiva protectora contra la corrosión. Además este elemento promueve la ferrita, por lo que tiene que ser controlado con níquel para poder tener austenita.
- Molibdeno.- Aumenta la resistencia ante la corrosión por picaduras, al actuar sobre el cromo. El uso del molibdeno en los aceros dúplex está restringido a un 4% debido a que también fomenta la creación de la ferrita.
- Nitrógeno.-Mejora la resistencia ante la corrosión por picaduras y aumenta la resistencia mecánica del acero dúplex. El nitrógeno fomenta la formación de austenita y además inhibe la formación de la fase sigma si se tienen aceros con altos contenidos de cromo o de molibdeno.
- Níquel.-Es un estabilizador de la austenita, inhibe la formación de ciertos carburos en los aceros dúplex, aunque no es tan efectivo como el nitrógeno.

La presencia de las dos fases en los aceros dúplex trae consigo grandes ventajas, pero la presencia de la ferrita en la austenita puede causar ciertas desventajas, como la formación de otras fases dentro de la aleación, las cuales afectan de manera significativa su resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas. Estas nuevas fases se forman cuando la ferrita actúa con el wolframio, el molibdeno y el cromo y se presentan en un rango de temperatura entre los 300°C a los 1000°C. Las nuevas fases que se forman son las siguientes.

- Fase sigma.- Es la fase más común que se presentan en los aceros dúplex cuando el contenido de cromo o de molibdeno son muy altos y la temperatura se encuentra entre los 600 y los 1000°C. Reduce la resistencia a la corrosión, ductilidad, y propiedades mecánicas.
- Fase chi (χ).- Es una fase que al igual que la fase sigma es muy común que esté presente en los aceros dúplex, pero a diferencia de la sigma esta en menores cantidades. Causa los mismos defectos que la fase sigma pero con una tendencia a reducir la resistencia a la corrosión por picaduras. La fase chi se precipita cuando la temperatura de la aleación ronda entre los 700 y los 900°C, pero si esta temperatura es demasiado prolongada, puede llegar a pasar de fase chi a sigma.
- Fase R.- Se precipita entre los 500 y 800°C su fórmula química es 30Fe-25Cr-35Mo-6Ni-4Si; reduce la resistencia a la corrosión por picaduras y la resistencia mecánica.
- Fase π.- Esta fase se forma cuando se tiene un contenido de 28% Fe, 35% Cr, 3% Ni y 34% Mo; se forma a una temperatura cercana a los 600°C, reduce la resistencia mecánica del material y la resistencia a la corrosión por picaduras.
- Austenita secundaria.-Es una transformación de la ferrita que contiene una estructura del tipo FCC (ver figura I.1), y que se llegan a localizar cerca del límite del grano o en el interior de este. La diferencia entre la austenita y la secundaria radica solamente en la composición química de cada uno de ellos.
- Cr_2N.-Esta fase se forma con el rápido enfriamiento de la aleación, dando una supersaturación de nitrógeno en la ferrita.
- α prima.-Es una fase con una precipitación rica en cromo, se forma entre los 350 y los 510°C. Esta fase se forma en tan solo 10 horas pero desaparece dentro de 25 años, dando la mayor durabilidad del acero dúplex.

II.5.- Transformaciones de Fase en los Diferentes tipos de AI

Para los AI algunos elementos extra pueden ayudar a mejorar sus características, principalmente aumentar su resistencia a la corrosión. Para esto se buscan elementos que fomenten alguna de las fases (en especial la austenitica) o elementos que reaccionen con el carbón y no con el cromo para de esta manera evitar la descarburización y reducir las probabilidades de que los AI sufran un ataque por corrosión intergranular (tema que se tratara más adelante).

II.5.1.- Fase Sigma

La fase sigma es un compuesto intermetálico, que en las aleaciones hierro-cromo se presenta cuando se tienen altos contenidos de cromo (cerca de un 25%). Esta fase se presenta normalmente en aceros ferríticos, dúplex y en algunos casos en los austeníticos.

La fase sigma es un componente duro, quebradizo, de baja resistencia a la corrosión y de poca ductilidad. Aunque esta fase presenta dichos defectos, si se distribuye uniformemente y en forma de cristales en la microestructura de los aceros, puede tener efectos benéficos como mayor resistencia mecánica a temperaturas mayores a los 150°C, aumento del límite elástico, y mayor resistencia a la rotura a altas temperaturas.

II.5.2.- La Influencia de otros Elementos en el AI

El silicio aumenta la resistencia de los aceros frente al oxígeno, el aire y los gases oxidantes calientes. Se emplea en aleaciones resistentes al calor, disminuye la fase austenítica (gammágeno) y fomenta la fase ferrítica (alfágeno).

El aluminio se emplea en aceros resistentes al calor pero en combinación al níquel da endurecimientos estructurales.

El molibdeno influye sobre la pasividad y la resistencia química de los aceros inoxidables en los ácidos reductores y en presencia de iones CL.

El volframio no influye sobre la resistencia a la corrosión pero mejora las características mecánicas en caliente o en frio de aceros austeníticos favoreciendo la fase ferrítica (alfágeno).

El manganeso aumenta la estabilidad de la austenita (gammágeno) después del enfriamiento, pero al añadir 10% se aumenta la cantidad de austenita pero sin llegar a obtenerse un acero completamente austenítico.

El cobre mejora su resistencia a la corrosión en ciertos reactivos y ayuda al níquel a la formación de austenita aunque por sí solo no podría hacerlo.

El titanio y el novio evitan la precipitación de carburo de cromo en aceros austeníticos durante el enfriamiento lento, calentamientos de larga duración impidiendo la disminución de cromo.

El cobalto se emplea en aceros resistentes al calor modificando los procesos de transformación y precipitación.

El azufre, selenio y el fosforo facilitan el mecanizado y permiten la obtención de aceros inoxidables de buena maquinabilidad.

El vanadio se emplea en aceros martensíticos para aumentar su templabilidad y controlar el tamaño del grano.

II.6.- Clasificación SAE del AI

Hoy en día existe una gran diversidad de ambientes de trabajo, donde no es posible emplear cualquier metal o aleación, ya que pueden existir condiciones que generarían corrosión a dicho metal. Para estos ambientes donde es posible encontrar corrosión, se emplea el acero inoxidable, y es debido a su gran resistencia a la corrosión que su uso esta impuesto en normas ya que en ciertos ambientes su uso es indispensable. Pero a pesar de este hecho tan importante, existen alrededor de más de 100 tipos de acero inoxidable, y es por esta razón por lo que la SAE realizo una clasificación del AI:

- Serie 200 corresponde a los aceros austeníticos que representan a la aleación cromo-níquel-manganeso. Se caracteriza para uso general del acero inoxidable, no es recomendable para trabajos en específico.
- Serie 300 corresponde a los aceros austeníticos
  1. 301, 301L y 301LN.- Son empleados para equipos de procesamiento de alimentos, equipo de laboratorio, paneles arquitectónicos, contenedores químicos, e intercambiadores de calor. La L alado del numero indica bajo contenido de carbón y la N significa que esta endurecido con nitrógeno.
  2. 303.- Se emplean para tuercas pernos, flechas, componentes eléctricos, y engranes.
  3. 304, 304L y 304H.- Son empleados para el procesamiento de alimentos, transporte y almacenaje de brebajes, procesamiento de lácteos, contenedores químicos, intercambiadores de calor y bancos de cocina. La H significa que contiene alto carbón.
  4. 310, 310H.- Son empleados como partes de hornos y quemadores de aceites, intercambiadores de calor y como filtros y electrodos para soldar.
- Serie 400 que representan a los aceros ferríticos y martensíticos.
  1. 409.- Acero del tipo ferrítico empleado, para escapes de automóviles, mufles y convertidores catalíticos.
  2. 430.- Acero del tipo ferrítico empleado, como revestimientos en lava vajillas decoración de cocinas, gabinetes de refrigeradores y ajustadores de automóviles.
  3. 410.- Acero del tipo martensíticos, empleados en tuercas, pernos, tornillos, bujes, válvulas, flechas, y partes empleadas en motores aeronáuticos.

4. 416.- Acero del tipo martensítico, empleado como partes de válvulas, flechas de bombas, flechas de motores, pernos, tuercas y engranes.
5. 420.- Acero del tipo martensítico, empleado para cuchillos, instrumentos quirúrgicos, y agujas para jeringas.

- Serie 600 Representan a los aceros martensíticos endurecidos por precipitación.

1. 630.- Acero endurecido por precipitación, mayormente empleados como engranes, pernos, matrices para plásticos, piezas de motores, flechas de bombas y propelas de botes acuáticos.

- Serie 2000 representan a los aceros dúplex (ferrita y austenita).

1. 2101.- Acero del tipo dúplex empleado para procesamiento de químicos, y estructuras donde se requiera aplicaciones bajo presión.
2. 2205.- Empleados para la extracción de petróleo y gas, y exploración marina

CAPÍTULO III

EL ACERO INOXIDABLE EN LOS ALIMENTOS Y LAS NORMAS INTERNACIONALES QUE DICTAMINAN SU USO

El acero inoxidable es el metal de mayor consumo dentro de la industria alimenticia debido a sus propiedades higiénicas, y su resistencia a la corrosión lo hacen el metal ideal para su uso dentro de la preparación de alimentos, para utensilios de cocina y para las industrias que elaboran alimentos envasados o conservados.

Para cada tipo de uso dentro de la industria alimenticia existen diversos tipos de acero inoxidable siendo estos los ferríticos, los austeníticos, los martensíticos y los dúplex.

Los aceros ferríticos son utilizados en lavatrastos, refrigeradores, utensilios de cocina, sartenes y mesas de cocina debido a que tienen una muy buena resistencia a la corrosión bajo esfuerzo.

Los aceros austeníticos debido a su facilidad de embutibilidad son los más usados para la elaboración de envases y tarjas de cocina.

Los aceros martensíticos debido a su dureza y gran resistencia al desgaste son usados para las herramientas de corte dentro de los alimentos como son cuchillos y ralladores.

Los aceros dúplex debido a su gran resistencia a la corrosión bajo esfuerzo son más utilizados no dentro de los hogares, si no en las industrias donde los procesos en la elaboración de alimentos someten al metal o a la maquina en cuestión a un gran esfuerzo. Es tal su resistencia que las maquinas que utilizan acero dúplex pueden reducir el espesor que si se tuviera la misma máquina elaborada de otro metal.

III.1.- AI en el Proceso de Elaboración de Alimentos

Dentro del procesamiento de alimentos existen muchos compuestos que son capaces de provocar la corrosión en los AI durante los ciclos en los que se elaboran estos productos, por eso es esencial realizar una pequeña limpieza en cada ciclo.

Por lo general en estos procesos la corrosión por picaduras y la corrosión bajo esfuerzo son las más comunes que pueden aparecer. Para poder evitar la corrosión se elaboran pruebas donde el acero se pone en contacto con los alimentos que fomenten más rápido la corrosión, Euroinox (2006) dio a conocer que alimentos son los que propician un ataque corrosivo, teniendo entre estos a la salsa de tomate (cátsup), la mostaza, alimentos derivados del vinagre (escabeche) y los productos derivados del azúcar (melaza).

Tabla III.1 Alimentos que originan corrosión por su contenido de cloruros

Alimento	Ph	Cl ppm	Contenido
Mostaza	3.7	300	Vinagre, azúcar, especies, ácido acético
Cátsup	3.7	25300	Vinagre, azúcar, especies, agua
Escabeche	2.9	17300	Vinagre, azúcar, especies, agua
Melaza	5.0	13000	Azúcar con un 13-25% de agua

Fuente: Stainless Steel for food processing

III.2.- AI en el Embasamiento de Líquidos

En la industria de los brebajes el material que se debe de utilizar como regla es el acero inoxidable debido a su higiene y a su resistencia a la corrosión. Para poder evitar la corrosión en esta industria se realizan pruebas donde los parámetros fundamentales son el Ph y la temperatura del brebaje o líquido que se hace circular por tuberías. Dentro de los aceros utilizados para esta

industria están: 304L, 316L, 301LN, 4307 y el 4436, estos dos últimos son clasificados por las normas europeas (EN).

III.3.- Normas Internacionales que Dictan el uso del AI en la Industria Alimenticia

A nivel mundial existen normas que dictan el uso del AI dentro de la industria alimenticia, es por esta razón que en este capítulo mencionaremos algunas normas ISO y EN, sin embargo si el lector quisiera saber más acerca de cada norma debe dirigirse directamente a la página http://www.iso.org/iso/home.html para encontrar las normas ISO y dirigirse a la página http://www.cen.eu/cen/products/en/pages/default.aspx para las normas EN:

ISO 2851

Esta norma específica las dimensiones, tolerancias, rugosidad de la superficie y necesidades de higiene para tubería y codos de acero inoxidable para la industria alimenticia.

ISO 2852

Esta norma específica dimensiones, tolerancias, rugosidad de la superficie e higiene para abrazaderas, juntas, revestimientos y uniones de acero inoxidable que se tiene que usar en el procesamiento de alimentos.

ISO 2853

Dicta las tolerancias de rugosidad, dimensiones para tuercas y abrazaderas de acero inoxidable, además de soldadura que se aplica a materiales recubiertos.

ISO-8442

Esta norma nos indica los requisitos que debe de tener el acero inoxidable para toda la cuchillería y cubiertos de mesa (ver tabla III.2):

Tabla III.2 Aceros inoxidables para el corte de alimentos

Aplicación	Nombre	Numero de materiales	Estructura
Herramientas de tallado	X6CrMo 17-1	1.4113	Ferrítica
Cuchillos	X2OCr 13	1.4021	Martensítica

Fuente Norma ISO 8442-7 primera edición 01/12/2000

EN10312

Esta norma Europea especifica las condiciones en que se deben de entregar las tuberías que van a ser usadas para transportar agua para consumo humano y es aplicable para diámetros exteriores desde 6 mm a 27 mm. Se debe tener en cuenta que no se puede usar acero inoxidable martensítica u otro acero endurecido por precipitación.

CAPÍTULO IV

PRINCIPALES NORMAS PARA EL USO DEL ACERO INOXIDABLE EN MÉXICO

El descubrimiento del acero inoxidable marco una pauta para poder utilizar aceros en medios que otro metal seria atacado por la oxidación o la corrosión. Su uso en México está regido por normas de acuerdo al sector en el que se tenga que utilizar y las condiciones de trabajo presentes.

Las secretarias en México son quienes dictan estas normas para el uso del AI siendo las más importantes:

1. Secretaria de Salud
2. SECOFI
3. SAGARPA
4. CANACERO

Cabe destacar que en este trabajo solo se mencionan algunas normas para que conozca la importancia del AI, pero si el lector quisiera saber más acerca de las normas en las que es indispensable el uso del AI, debe dirigirse a la DGN y más en específico a cada secretaria del que se quiera consultar la norma.

IV.1.- Normas en el uso del AI en el sector SALUD

En el sector salud es indispensable el uso del acero inoxidable para el tratamiento de enfermedades y el cuidado de la salud humana, por estos motivos es necesario dictaminar cuando, en qué situación y en qué equipo es necesario su uso. Para este sector solamente se citaran algunas normas para comprender la importancia del acero inoxidable en la salud humana.

NOM-051-SSA1-1993

a) Objetivo: determinar las especificaciones mínimas de funcionamiento y seguridad que deben de tener las jeringas de plástico, estériles y desechables, además de señalar los métodos de prueba para la verificación de las especificaciones.
b) Campo de aplicación: industrias, laboratorios y establecimientos en el proceso del producto.
c) Es indispensable el uso de acero inoxidable en pinzas como material para el contenido de partículas de las jeringas.

NOM-068-SSA1-1993

a) Objetivo: selección de aceros inoxidables en la fabricación instrumental para cirugía general y especializada.
b) Campo de aplicación: industrias, laboratorios y establecimientos en el proceso del producto. El uso del acero inoxidable en esta norma depende de la composición química (en porcientos) que se pueden utilizar en la fabricación del instrumental quirúrgico.

NOM-093-SSA1-1994

a) Objetivo: Disposición sanitaria que deben de presentar los prestadores de servicio alimenticio fijo, con el fin de proporcionar alimentos inocuos al consumidor.
b) Campo de aplicación: Personas físicas o morales que se dedican a la preparación de alimentos.
c) El acero inoxidable así como otros elementos utilizados en la preparación de alimentos deben tener una superficie lisa, continua sin porosidad, sin revestimientos, no deben de modificar el olor de los alimentos, color y sabor, no ser tóxicos y no deben de reaccionar con los alimentos.

NOM-133-SSA1-1995

a) Objetivo Especificaciones sanitarias para las agujas hipodérmicas desechables.
b) Campo de aplicación: industrias, laboratorios y establecimientos en el proceso del producto.
c) El uso del acero inoxidable se da en la cánula de la aguja que debe de ser de tipo austenítico

NOM-142-SSA1-1995

a) Objetivo: Establecer las especificaciones sanitarias en el embasamiento de bebidas alcohólicas.
b) Campo de aplicación: personas físicas o morales que se dedican en el proceso del producto.
c) El uso del acero inoxidable es solamente para el envasado de la bebida alcohólica.

NOM-153-SSA1-1996

a) Objetivo: Especificaciones sanitarias en implantes para cirugía ósea de acero inoxidable y sus métodos de prueba.
b) Campo de aplicación: Industrias, laboratorios y establecimientos dedicados a la importación, fabricación y distribución de estos productos.
c) El acero inoxidable en esta norma debe ser austenítico, antimagnético y biocompatibles con el cuerpo humano, el tamaño de grano debe de ser de 5 o más fino.

NOM-162-SSA1-2000

a) Objetivo: Especificaciones mínimas que deben de cumplir las hojas de bisturí de acero inoxidable.
b) Campo de aplicación: Industrias, laboratorios y establecimientos dedicados a la importación, fabricación y distribución de estos productos.
c) El acero inoxidable para esta norma debe de ser del tipo BSI

NOM-188-SSA1-2002

a) Objetivo: Establecimiento del límite máximo permisible de aflatoxinas en los cereales destinados al consumo humano.
b) Campo de aplicación: Personas físicas o morales dedicadas a la elaboración del producto.
c) Para determinar este contenido de aflatoxinas es necesario un una licuadora de AI

IV.2.- Normas en el uso del AI promovidas por la SECOFI

La SECOFI se encarga de coordinar a otros organismos como la Comisión Federal de Competencia (CFC), Dirección General de Normas (DGN), Comisión Nacional de Normalización (CNN). Al tener este cargo, la secretaria promueve normas para el sector industrial, las cuales se citan a continuación. Cabe destacar que son solo algunas en las que se indica el uso del acero inoxidable.

NMX-B-077-1987

a) Objetivo: Requisitos que deben de cumplir piezas coladas de hierro-cromo-níquel para servicio a alta temperatura o temperaturas cercanas a los 1368ºK (1095ºC).
b) Campo de aplicación: Emplearse en elementos estructurales, contenedores, y soportes de hornos eléctricos, soportes de tubos para destilar petróleo.

NMX-B-087-1988

a) Objetivo: Establecimiento de requisitos que deben cumplir piezas coladas de una aleación de hierro-cromo, hierro-cromo-níquel resistentes a la corrosión para aplicaciones generales.
b) Campo de aplicación: General donde exista un ambiente propicio a la corrosión.

NMX-B-091-1988

a) Objetivo: Requisitos que deben de cumplir las aleaciones hierro-cromo-níquel resistentes a la corrosión para servicio severo.

NMX-B-172-1988

a) Objetivo: Procedimientos para pruebas mecánicas de productos de acero forjado y vaciados.

NMX-B-229-1988

a) Objetivo: Establece los requisitos que deben de cumplir los tubos de acero inoxidable de diámetro y espesor nominal para servicio general para temperaturas altas o bajas.

NMX-B-323-1968

a) Objetivo: Establecimiento de un sistema de designación de los aceros basada en su composición química.

NMX-B-496-1996

a) Objetivo: Establece las características que deben de cumplir las barras terminadas en caliente y en frio para aceros inoxidables.

IV.3.- Normas en el uso del AI promovidas por la SAGARPA

La SAGARPA a diferencia de las demás secretarias no propone normas para el uso del AI, sino que proporciona manuales que indican cómo deben ser tratados los productos que se destinan al consumo humano; especificando el material que deben de emplear para el manejo de los mismos.

IV.3.1.- Elaboración de Productos Cárnicos

Para la preparación de productos cárnicos como el jamón la carne debe limpiarse, una vez que esté limpia se pone en un recipiente de acero inoxidable para agregar la salmuera, y pasa a refrigeración durante 24 horas. Concluido este tiempo la mezcla se introduce en recipientes de plástico o se pueden adaptar tuberías de acero inoxidable en tramos de 30-40 cm.

En la elaboración de la chuleta ahumada también es necesario el uso del acero inoxidable ya que la chuleta en un punto de su elaboración se pone a cocer con agua y este recipiente es de acero inoxidable o de aluminio.

IV.3.2.- Elaboración de Quesos

En la elaboración de quesos la leche que se utiliza debe ser transportada en envases de plástico o envases de acero inoxidable.

Para la pasteurización de la leche en caso de que la empresa no tenga el capital suficiente para un sistema de pasteurización se utilizara un baño maría con un bote tamalero de acero inoxidable para este proceso.

Para cortar la cuajada del queso se necesita una cortadora con iras de acero inoxidable.

Para la acidificación de forma natural de la leche en un queso de tipo Oaxaca se hace en un recipiente de acero inoxidable.

IV.3.3.- Elaboración de Embutidos

En la elaboración de embutidos la SAGARPA nos indica el material que se tiene que utilizar, y entre este material tenemos las planchas de corte que tienen que ser de plástico o de acero inoxidable.

IV.4.- Normas en el uso del AI promovidas por la CANACERO

A diferencia de las normas de las secretarias anteriores la CANACERO expide normas que van dirigidas a toda aquella fábrica o empresa que elabora algún producto de acero inoxidable.

- NMX-B-065-1990 equivalente ASTM E-426.-Esta norma proporciona un método de inspección no destructiva por corrientes parasitas (corriente Eddy) para tubería con o sin costura de acero inoxidable o aleaciones similares.

- NMX-B-083-1988 equivalente ASTM A-484 Su objetivo es indicar los requisitos generales que se deben de aplicar para la barra de acero inoxidable forjada, varillas y otras presentaciones exceptuando el alambre. Se mencionan las maneras de cubrir esos requisitos:
  a) Trabajo en caliente.
  b) Trabajo en caliente y recosido.
  c) Trabajo en caliente, recocido y trabajo en frío.
  d) Trabajo en caliente, recocido y tratamiento térmico.
- NMX-B-088-1987 equivalente ASTM A-747 Especifica que los aceros inoxidables pueden ser reforzados para resistir a la corrosión por precipitación y darles un endurecimiento por tratamiento térmico. Indica que para esta operación se debe de utilizar un horno de arco eléctrico, después se tiene que homogenizar y darle un tratamiento térmico de recocido, y por último el endurecimiento por precipitación.
- NMX-B-171-1991 equivalente ASTM A-511 Especifica el uso de tubería de acero inoxidable sin costura en aplicaciones mecánicas donde la resistencia a la corrosión por alta temperatura es necesaria.
- NMX-B-216-1988 equivalente ASTM A-268 Establece la especificación del grosor nominal de tuberías de acero inoxidable, soldadura ferrítica y martensítica en aceros inoxidables para una resistencia general a la corrosión y servicio a alta temperatura.
- NMX-B-229-1988 equivalente ASTM A-269 Especifica el espesor nominal de tubería de acero inoxidable así como soldadura austenítica para una resistencia general a la corrosión y servicio a baja o alta temperatura.
- NMX-B-326-1968 equivalente SAE J-405 Establece la composición química de cualquier tipo de acero inoxidable forjado.
- NMX-B-496-1996 equivalente ASTM A-479 Especifica el acabado en caliente o en frío de barras de acero inoxidable incluyendo formas cuadradas o hexagonales, trabajo en caliente o extrucción de ángulos y canales para calefactores.

CAPÍTULO V

TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS DEL ACERO INOXIDABLE

Debido a los diversos ambientes de trabajo a los que está expuesto el AI, es necesario realizar ciertos cambios que los vuelvan más eficientes en ciertas condiciones de trabajo. Es por esta razón que son sometidos a tratamientos térmicos y mecánicos que mejoran sus propiedades como mayor tenacidad (aunque no todos son endurecibles por tratamiento térmico, más bien por trabajo en frio), aumento de la resistencia a la corrosión.

La deformación plástica de los metales es una forma de mejorar su propiedades, es por eso que algunas métodos de conformado de metales se les puede considerar como tratamientos mecánicos, los cuales tendrán diferentes efectos dependiendo su forma de efectuarse. Si es un trabajo en caliente, tenemos la ventaja de emplear menos esfuerzo para deformar el material, tenemos recristalización continua, la deformación es mucho mayor y nos permite obtener una mayor cantidad de formas para acoplar al metal. Su desventaja radica en la pronta oxidación y un mal acabado superficial. En cuanto al trabajo en frio ofrece un buen acabado superficial y mejora mecánicamente a la pieza, sus desventajas son que no podemos realizar grandes variedades de formas, se emplea una mayor fuerza para deformar y limita la cantidad de deformación.

V.1.- Tratamientos Térmicos (TT)

El tratamiento térmico, tiene como fin de producir cambios físicos en los metales, mejorar sus propiedades mecánicas, eliminar tensiones residuales (como las producidas en la manufactura de algunos productos), y mejorar su resistencia a la corrosión.

Normalmente los tratamientos térmicos que se emplean para el acero (aleación hierro-carbono) son los siguientes:

- Temple.-Endurecimiento, homogenización y dureza superficial
- Recocido.- Revenido, normalizado, relevado de esfuerzos

Sin embargo el endurecimiento por tratamiento térmico no es igual para cada una de las familias de AI, porque algunos no son endurecibles por TT. Esto se debe a la estructura que poseen y sobre todo a la cantidad de carbono (quien proporciona la dureza de un metal), limitando el TT a solamente recocidos, como es el caso de los AI ferríticos, austeníticos y dúplex. Los martensíticos por la cantidad de carbono que manejan son los únicos endurecibles por TT.

V.1.1.- AI Endurecidos por Precipitación

Como se ha visto en este trabajo, existen 5 clases de aceros inoxidables, los primeros 4 son clasificados de acuerdo a la estructura que manejan siendo estos:

- Austeníticos
- Ferríticos
- Martensíticos
- Dúplex

Sin embargo existe una quinta clase, que a diferencia de los otros no se clasifica por el tipo de estructura que maneja, sino por la dureza que adquiere este al darles un TT por envejecimiento, siendo estos los AI endurecidos por precipitación.

Los AI endurecidos por precipitación corresponden a una aleación de hierro-cromo-níquel-carbono, pero a diferencia de los demás AI, estos se separan de los 4 anteriores, debido a que no son definidos por la microestructura que manejan, si no por el endurecimiento que poseen.

Para estos aceros existen 3 tipos:

1. Austeníticos
2. Semiausteníticos

3. Martensíticos

Estos 3 tipos de aceros endurecidos por precipitación presentan ciertas diferencias en su resistencia a la corrosión, siendo el más resistente el austenítico que el martensítico. Dichas estructuras dependen de la adición de otros elementos como son:

a) Aluminio
b) Titanio
c) Molibdeno
d) Cobre

Estos elementos nos permiten controlar los compuestos intermetálicos, y por lo tanto el endurecimiento por precipitación es atreves de una matriz martensítica.

Estos aceros adquieren las ventajas de los martensíticos y de los austeníticos, ya que son resistentes a la corrosión tanto a elevadas como a bajas temperaturas y además poseen una gran resistencia mecánica. Estas propiedades los vuelven de gran utilidad en la aeronáutica para crear alabes de turbina, flechas de motores, propelas, válvulas y en medios donde existe alta temperatura y gran esfuerzo mecánico.

Para la clasificación de estos aceros la AISI emplea la numeración 600, aunque son comúnmente nombrados por una serie de números con letras como el acero 17-4PH donde el primer número indica la cantidad ce cromo, el segundo la cantidad de níquel y las letras PH afirman que su endurecimiento es por precipitación.

V.1.1.1.- ¿Qué es el endurecimiento por precipitación o por envejecimiento?

Existen algunos metales que no pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos convencionales, como es el caso de las aleaciones no ferrosas, es por esta razón que existe el tratamiento de endurecimiento por precipitación.

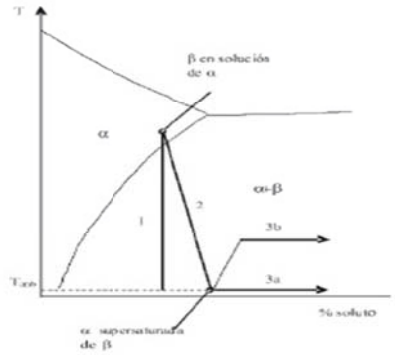
Para poder realizar este endurecimiento a un metal es necesario que en su diagrama de cambio de fase exista una pendiente de solvus y que la aleación a tratar contenga los porcentajes apropiados de cada metal que exactamente en su diagrama nos sitúe por debajo de dicha línea, la cual permitirá que una fase se disuelva en otra o que exista mayor solubilidad a mayor temperatura. Existiendo está pendiente podemos realizar un endurecimiento al precipitar una solución sólida.

El proceso de este tratamiento se realiza en 3 etapas (ver figura V.1):

1. Solubilización.- consiste en elevar la temperatura de la aleación a tal grado que una fase solida se disuelva en la otra debido al aumento de temperatura, por lo tanto por debajo de la línea solvus tendremos una zona bifásica de sólidos distintos, y por encima tendremos una sola fase sólida.
2. Templado.- este paso consiste en enfriar rápidamente la aleación para conservar una sola fase sobresaturada (el sólido presente por encima de la línea solvus) la cual retendrá a la otra fase solida dejando cierto número de vacancias en su red.
3. Envejecimiento.- una vez realizado el temple se vuelve a calentar la aleación (sin sobrepasar la línea solvus) para que los átomos de la fase sólida que se encuentra retenida se puede difundir por toda la aleación formando precipitados endurecibles. Este proceso se puede realizar de dos formas

a) Envejecimiento natural.- se realiza cuando se procede al enfriar el metal a temperatura ambiente, dando como inconveniente largas horas de espera para realizar el envejecimiento.
b) Envejecimiento artificial.- se realiza cuando se emplean temperaturas superiores a las de la ambiente; como ventaja sobre la natural es el tiempo en que tarda en envejecer siendo estos tiempos entre 5 y 48 horas.
c)

Figura V.1 Línea solvus y envejecimiento



Fuente: Narvaes Carlos, 2009, Modelamiento del endurecimiento por precipitación

Sin embargo los pasos mencionados para realizar un endurecimiento por precipitación, se aplican para aleaciones no ferrosas, mientras que para los aceros inoxidables se añade un paso extra que se localiza entre el 2 y 3, la cual consiste en fortalecer al acero con trabajo enfrió para obtener la dureza requerida.

V.1.2.- TT para Aceros Austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos son una aleación de hierro-cromo-níquel, y debido al último elemento es que está presente en su estructura la austenita. Como se observa en la figura II:5 la austenita está presente a cualquier temperatura mientras más níquel se añade, y la baja cantidad de carbono dentro de esta aleación les impide endurecerse por tratamiento térmico, sin embargo si pueden tratarse térmicamente con el fin de mejorar algunas de sus propiedades y para su endurecimiento solamente si se les realiza un trabajo en frio.

Para tratar térmicamente los aceros austeníticos, es necesario dividirlos en 3 grupos:

1. No estabilizados
2. Estabilizados
3. De bajo contenido de carbono

V.1.2.1.- TT de Aceros Austeníticos no Estabilizados

Se les denomina no estabilizados ya que son propensos a tener precipitación del carburo de cromo hacia los límites de grano, originando la corrosión intergranular.

Como se mencionó estos aceros (austeníticos) no son endurecidos por tratamiento térmico, pero se les somete a un tratamiento de recocido para mejorar la resistencia a la corrosión, y restaurar su ductilidad.

Al realizar un tratamiento por recocido es necesario realizarlo sobre el límite de la precipitación de los carburos, es decir por encima de la temperatura comprendida entre 400 y 850°C, ya que si está dentro de ese límite se precipitaran los carburos reduciendo su resistencia a la corrosión. Al recocer por encima de ese límite, lo mejor es no sobrepasar la temperatura de 1090°C para evitar un crecimiento de grano.

Para el enfriamiento de piezas austeníticas de esta clase el mejor medio de enfriamiento es el agua para evitar la precipitación de los carburos, sin embargo si la pieza es delgada su enfriamiento se realiza con aire forzado.

Tabla V.1 Tratamiento de recocido para aceros austeníticos no estabilizados	
Tipo	**Temperatura °C**
201, 202	1010-1120
301, 302, 303	1010-1120
304, 305, 308	1010-1120
309	1040-1120
310	1040-1120
314	1040-1120
316	1040-1120
317	1065-1120

Fuente: Metalografía y tratamientos térmicos

En la tabla V.1 se muestran las temperaturas para los aceros austeníticos no estabilizados. Aunque aquí se muestra que la temperatura máxima de tratamiento de recocido es de 1120, es recomendable no sobrepasar la de 1090 ya que habría un crecimiento del grano en el metal.

V.1.2.2.- TT de Aceros Austeníticos Estabilizados

Se les denomina estabilizados ya que contienen otros metales dentro de la aleación como son el Titanio, Niobio y el Tantalio. Su función es evitar la precipitación de los carburos de cromo, es por eso que estos pueden llegar a tener una cantidad mayor de carbono.

Al igual que los anteriores no se endurecen más que por trabajo en frio y se les proporciona un recocido ya sea para aliviar esfuerzos producidos al manufacturar una pieza o para incrementar su ductilidad.

En la tabla V.2 se muestran las temperaturas para tratamientos de recocido en estos aceros, una diferencia que existe entre los no estabilizados y los estabilizados es el enfriamiento ya que no necesariamente se tiene que emplear agua también se utiliza aceite. Solamente se emplean estos dos medios de enfriamiento para tener una máxima retención de la austenita.

Tabla V.2 Tratamiento de recocido para aceros austeníticos estabilizados	
Tipo	**Temperatura °C**
309C	1065-1120
318	1040-1120
321	950-1065
347, 348	980-1065

Fuente: Metalografía y tratamientos térmicos

V.1.2.3.- TT de Aceros Austeníticos con Bajo Contenido de Carbón

Estos aceros al contener una cantidad muy baja de carbono (0.03% máximo), asegura que no se precipiten los carburos en los límites de grano. Tienen la gran ventaja de que pueden recocerse al igual que las clasificaciones anteriores o pueden someterse a temperaturas donde el carburo se precipitaría (400 a 850°C), sin embargo tiene que cuidarse los tiempos de exposición, ya que de lo contrario el carburo se precipitaría. El medio de enfriamiento es muy diverso debido al bajo contenido de carbono.

Tabla V.3 Tratamiento de recocido para aceros austeníticos de bajo carbón	
Tipo	**Temperatura °C**
304L	1010-1120
316L	1040-1110
317L	1040-1110

Fuente: Metalografía y tratamientos térmicos

En la tabla V.3 se muestran las temperaturas para el recocido de estos aceros, aunque estos pueden tratarse en la zona de precipitación del carburo, es recomendable manejar las temperaturas nominales para su recocido.

V.1.3.- TT de Aceros Ferríticos

Estos aceros no sufren un gran endurecimiento por temple, pero se les puede proporcionar un recocido para aumentar su ductilidad, mejorar su resistencia a la corrosión, y aliviar esfuerzos por manufactura.

El rango de temperatura que se maneja para los ferríticos son 3. El primer rango va de los 400 a 530°C, es peligroso ya que existe una precipitación de ferrita con alto contenido en cromo lo cual lo vuelve frágil y reduce la resistencia a la corrosión. El siguiente rango de temperatura está por encima de los 530 (la cual es la más ideal para un recocido). El último rango está por debajo de la formación de la austenita que solamente se da para aquellos aceros con bajos contenidos de cromo (ver figura II.2).

En la tabla V.4 podemos observar la temperatura para realizar un recocido, también se muestra el medio de enfriamiento, que por lo general en los ferríticos es agua y aire.

Tabla V.4 Tratamientos para aceros ferríticos

Tipo	Temperatura °C	Medio de enfriamiento
405	650-815	Aire o agua
430	700-790 y 815-900	Aire, en el caso de 700-900 y en horno hasta alcanzar 600°C seguido de enfriamiento en aire cuando es entre 815-900
430F	700-790	Aire o agua
442	760-830	Aire o agua
446	760-830	Aire o agua

Fuente: Metalografía y tratamientos térmicos

V.1.4.- TT de Aceros Martensíticos

Los aceros martensíticos al tener un mayor contenido de carbono en su aleación que el resto de los inoxidables, los hace endurecibles por tratamiento térmico, y su dureza depende de la cantidad de carbono que tengan.

Para poder endurecerlos se someten a temperaturas entre los 930 a 1060°C. Sin embargo al tener una conductividad térmica inferior a los aceros al carbón, se originan una gran cantidad de esfuerzos, que provocan fracturas o fallas en la pieza a endurecer. Para evitar estos inconvenientes, se somete al acero martensítico a un precalentamiento que va desde los 760 a 790°C, con el fin de homogenizar el calentamiento en toda la pieza.

Los medios para realizar el temple son tanto en aceite como en aire, aunque es más empleada la primera ya que asegura una mejor resistencia a la corrosión y tenacidad. Un peligro cuando se manejan grandes espesores es la precipitación de los carburos, por eso cuando son espesores muy grandes se emplea el temple por aire.

El recocido de estos aceros solamente se emplea cuando se somete posteriormente a un trabajo en frio, ya que los recocidos provocan la formación de carburos gruesos y se necesitaría aumentar la temperatura para disolverlo, esto cuando se requiera endurecer la pieza nuevamente.

La tabla V.5 Muestra las temperaturas de temple y revendió para los aceros martensíticos, así como el medio para realizar el temple.

Tabla V.5 Tratamientos térmicos para aceros martensíticos

Tipo	Temperatura de austenización °C	Medio de temple °C	Revenido °C		Resistencia a la tensión (Mpa)	Dureza HR
			Mínima	Máxima		
403, 410	930 a 1010	Aire o aceite	500 200	600 370	760 a 960 110 a 1500	25 a 31 38 a 47
414	930 a 1050	Aire o aceite	600 230	650 370	760 a 960 110 a 1500	25 a 31 38 a 49
416	930 a 1010	Aceite	560 230	600 370	760 a 960 1100 a 1500	25 a 31 35 a 45
420	980 a 1065	Aire o aceite	200	370	1550 a 1930	48 a 56

Fuente: Metalografía y tratamientos térmicos

V.1.5.- TT de Aceros Dúplex

Los aceros dúplex son muy especiales, ya que contienen dos fases balanceadas que son la austenita y la ferrita. Esta combinación les proporciona grandes ventajas sobre un austenítico o un ferrítico, pero también conlleva grandes desventajas como los vistos en el capítulo II.4.

Durante la elaboración de los aceros dúplex se puede dar que ciertas partes se enfríen a una baja velocidad creando frágiles fases intermetálicas, reduciendo su resistencia mecánica y su resistencia ante la corrosión. Para evitar estas fases frágiles es necesario realizar un recocido para restaurar estas resistencias perdidas. Para el recocido de estos aceros, se debe de evitar el incremento de la ferrita, ya que mientras más aumenta la temperatura de recocido, así también lo hace la ferrita, y por lo tanto al final se reducirá su ductilidad así también las resistencias mecánicas y ante la corrosión. Por lo tanto el recocido se realiza a bajas temperaturas, a menos de que dentro de la aleación tengamos inhibidores de la fase sigma como son el níquel y el nitrógeno, para lo cual se tendrá que aumentar la temperatura para disolver dicha fase. El rango de temperaturas para el recocido está entre los 900 a los 1200°C (ver tabla V.6).

Tabla V.6 Tratamiento de recocido para acero dúplex	
Tipo en sistema UNS	**Temperatura °C**
S32900	925-955
S32950 Mo	995-1025
S31500	975-1025
S31803	1020-1100
S31260	1065-1175
S32550	1065-1175

Fuente: Metalografía y tratamientos térmicos

V.2.- Tratamiento Mecánico (TM)

El tratamiento mecánico en los AI les otorga mejoras físicas a través de la deformación plástica de los metales. Estos tratamientos se pueden realizar de dos maneras:

- En caliente.- Al emplear un tratamiento mecánico en caliente se dice que el metal se encuentra a una temperatura donde existe recristalización continua, el metal es maleable lo que permite afinar el tamaño del grano, eliminar cavidades y mejorar su estructura interna.
- En frio.- Los tratamientos mecánicos en frio se realizan a temperatura donde no existe recristalización, el metal no es del todo maleable permitiendo incrementar la dureza y resistencia mecánica

Existen una gran variedad de conformados de metales, sin embargo mencionaremos solo algunas para que el lector comprenda la diferencia entre los trabajos en frio y en caliente de los siguientes conformados:

- Laminación
- Forja
- Embutido

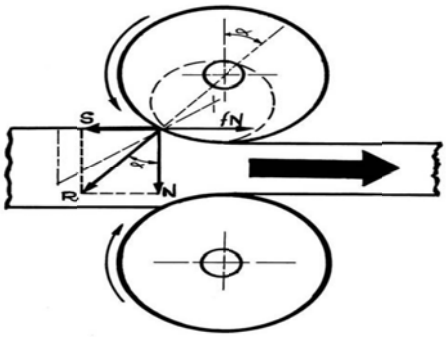
V.2.1.- Laminación

El TM por laminación, consisten en hacer pasar un lingote de determinado espesor a través de unos rodillos que tiene una determinada separación entre ellos. Al pasar el lingote por el espacio que existe entre los rodillos, este se aplasta y se alarga, reduciendo su espesor.

Durante el proceso de laminación se desarrollan 3 fuerzas que nos producen la reducción del espesor del lingote, siendo estas fuerzas las siguientes:

- R.- Es la fuerza resultante que produce la reducción de espesor
- S.- Es la componente de estiramiento, la cual crecerá si el diámetro de los rodillos disminuye
- N.- Es la fuerza normal ejercida por los rodillos
- fN.- Es el avance del metal atreves de los rodillos. Para producir este desplazamiento, se debe cumplir lo siguiente fN>S

Figura V.2 Laminación de metales



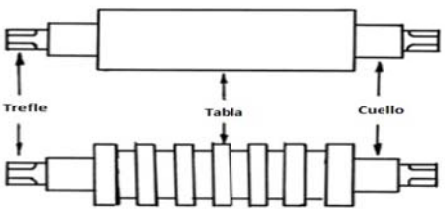
Fuente: Enríquez José Luis Laminación, Madrid Enero 2010

V.2.1.1.- Cilindros de Laminación

Los cilindros de laminación son quienes permitirán la reducción del espesor y el aumento del largo en un lingote de metal. Estos cilindros se dividen en dos:

- Planos.- Son los más simples y realizan la función mencionada con anterioridad
- Perfilados.- Son cilindros especiales las cuales nos permiten obtener formas

Figura V.3 Tipos de rodillos



Fuente: Enríquez José Luis Laminación, Madrid Enero 2010

Debido a los grandes esfuerzos que se ejercen durante el proceso, la tabla mostrada en la figura V.3 no debe exceder de 3.5 veces el diámetro de los cilindros, ya que de lo contrario estos rodillo se flexionarían.

Los rodillos deben de cumplir con ciertas características como son su alta resistencia al desgaste, deben de ser tenaces y su dureza debe de ser mayor que la del metal a laminar.

Los materiales que los componen pueden ser de tres tipos:

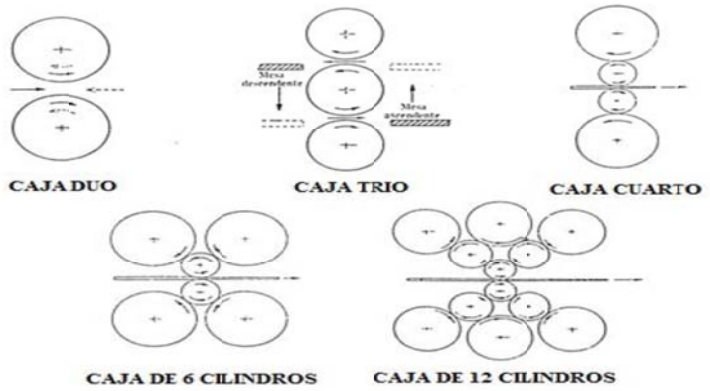
- Aceros especiales al cromo o al cromo manganeso
- Fundición de grafito esferoidal
- Fundición con alto contenido de fosforo colada

V.2.1.1.1.- Cajas de Laminación

Las cajas de laminación es la disposición de los rodillos siendo estas (ver figura V.4):

- Dúo.- Es el más sencillo de todos al estar compuesto solamente de 2 rodillos, algunos de estas cajas pueden ser reversibles, al girar en ambos sentidos
- Trio.- Se compone de 3 rodillos, cuyos ejes por donde circula el metal son paralelos, el inferior por donde pasa a su primera etapa de laminación y el superior cuyo movimiento es invertido al del eje inferior.
- Cuatro.- Este tipo de cajas ejercen una mayor presión al metal, los rodillos de menor tamaño son los de trabajo, los otros rodillos son más grandes debido a que estos son los que soportan el esfuerzo de flexión.
- Múltiple.-Estos se componen a partir de 6 rodillos en adelante, la fuerza empleada es mayor, obteniendo un bajo espesor del metal. Estas cajas no pueden ser reversibles, debido a que el espesor es tan pequeño que el largo aumenta de manera significativa, por lo tanto se emplean con varias cajas sucesivas hasta terminar con el espesor deseado.

Figura V.4 Cajas de laminación



Fuente: Enríquez José Luis Laminación, Madrid Enero 2010

De la figura anterior las cajas de 6 y 12 son las empleadas para la laminación en frio del acero inoxidable, ya que ofrecen la mayor fuerza y generan los más bajos espesores.

V.2.1.2.- Laminación en Caliente del AI

La laminación en caliente recibe este nombre debido a que durante su proceso el metal se encuentra a elevadas temperaturas, las cuales oscilan entre los 800°C-1200°C. Se realizan varias operaciones de laminado reduciendo el espesor del metal, hasta alcanzar los 10 o 50 mm, donde posteriormente se comienza a realizar el embobinado del metal, debido a la gran longitud que alcanza después de todas las operaciones de laminado. Al finalizar el proceso el metal alcanza una temperatura entre los 700°C-900°C.

Durante la operación de laminación en caliente, la temperatura es esencial y favorable, pero es necesario tener un cuidadoso control de la misma para evitar errores comunes en el mal manejo de la temperatura de recristalización:

- Si la temperatura es demasiado alta se puede tener un aumento en el tamaño del grano o la formación de grietas en el lingote.
- Si la temperatura es baja el esfuerzo puede ser tan alto y al poseer una baja ductilidad el metal, el resultado final será una laminación con grietas.

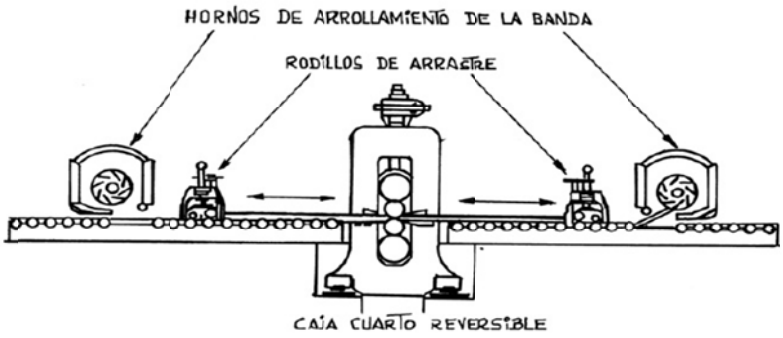
Dentro de la laminación en caliente del AI, debemos tomar en cuenta la cantidad que se produce, ya que si esta es alta, se deben de emplear trenes de laminación de forma continua, los

cuales resultan ser costosos. Por el contrario si la producción es baja podemos emplear trenes de laminación tipo Steckel.

En la laminación continua se producen una gran cantidad de AI, empleando trenes que están dispuestos de manera consecutiva, generando espesores muy bajos debido a la longitud que alcanza el AI, en esta producción las cajas empleadas no pueden ser reversibles.

Para producciones bajas de AI el tren Steckel (ver figura V.5) es el más empleado, debido a que emplea cajas reversibles, y realiza un embobinado de laminación al final del primer proceso, después comienza el paso reversible donde al final tenemos un nuevo embobinado. Para evitar la caída de temperatura del AI después de cada proceso, los embobinados se encuentran dentro de hornos, esto quiere decir que el enrollamiento del AI se realiza dentro de un horno que mantiene la temperatura para un trabajo en caliente.

Figura V.5 Laminación con tren Steckel



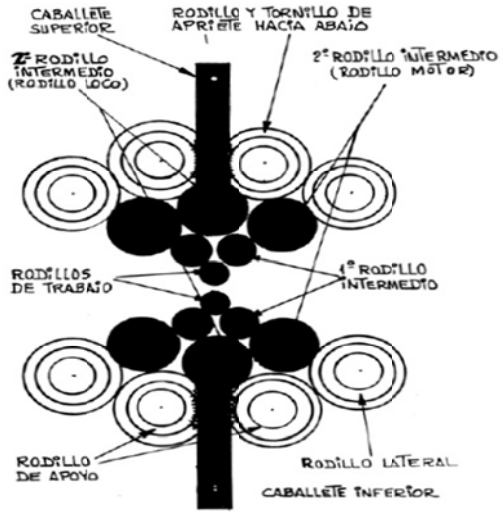
Fuente: Enríquez José Luis Laminación, Madrid Enero 2010

V.2.1.3.- Laminación en Frio del AI

El proceso comienza con el embobinado de AI obtenido de la laminación en caliente, posteriormente se somete a un recocido, siendo el horno de tipo campana para los ferríticos y martensíticos y continuo para los austeníticos. Después del tratamiento de recocido, se somete a un decapado para eliminar la cascarilla de óxido que se presenta durante el recocido. A continuación se procede a realizar la laminación en frio con cajas de tipo Sendzimir, las cuales pueden soportar grandes esfuerzos, reduciendo el espesor del AI hasta en un 80%, realizando varias pasadas de laminación. Al final del proceso el AI es nuevamente sometido a un tratamiento de recocido para

eliminar esfuerzos residuales, generados durante la laminación y un último decapado para evitar la contaminación del AI

Figura V.6 Caja tipo Sendzimir



Fuente: Enríquez José Luis Laminación, Madrid Enero 2010

Dentro del decapado empleado para el AI cuando es lamiando en frio se tiene dos tipos:

- En frio.- Se realiza con un baño de hidróxido sódico y un decapado en base al ácido nítrico, generando acabados del tipo 2D
- Brillante.- Se realiza en atmosferas reductoras con amoniaco disociado, generando acabados altamente brillantes.

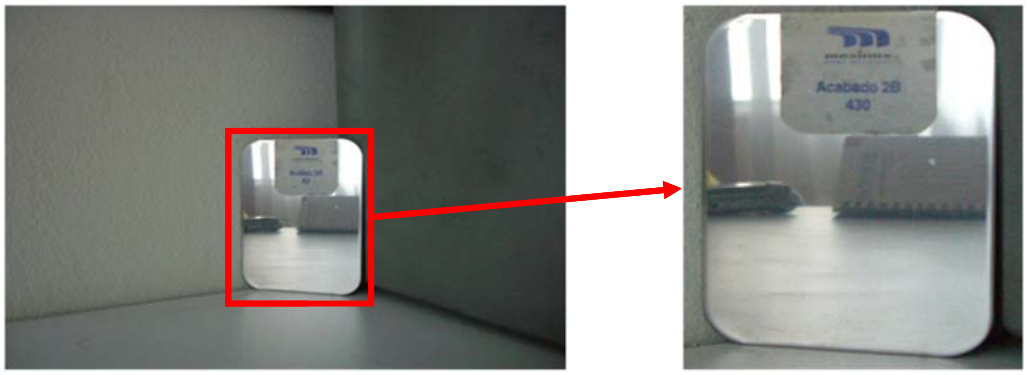
V.2.1.4.- Acabados del AI por Laminación

Aun cuando existe una gran variedad de productos manufacturados de AI, en algunos de ellos es necesario dar un acabado superficial, ya sea para un mejor desempeño de la pieza o por simple estética.

Los acabados superficiales modifican el tono de la superficie del acero, sin afectar de manera significante su resistencia a la corrosión. Estos acabados se originan por laminación en caliente y en frio. La Figura V.7 muestra un acabado superficial del tipo 2B en un acero ferrítico (430). Su característica más importante es el buen acabado a espejo que posee, ya que como se puede observar en la figura, es capaz de reflejar una imagen de forma nítida y sin distorsiones. Este

acabado se logra gracias a la laminación en frio, recocido, decapado y una última laminación con rodillos finamente pulidos.

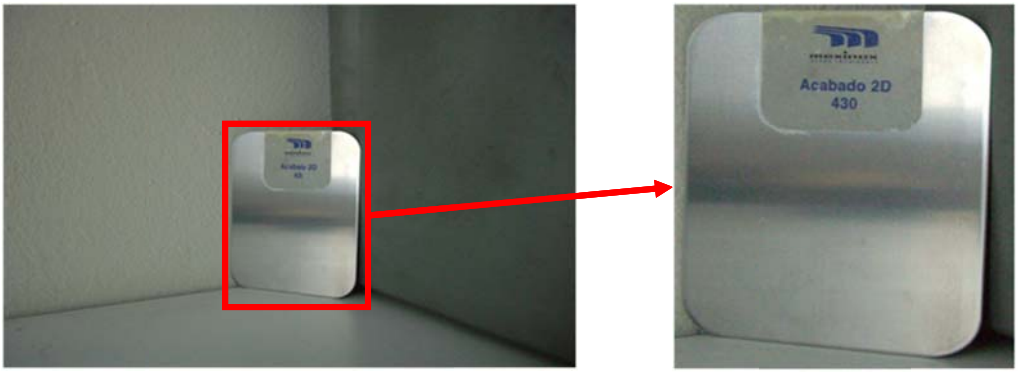
Figura V.7 Acabado superficial 2B en acero ferrítico



Fuente: Pruebas de acabados de acero inoxidable Mexinox

En la figura V.8 Se observa el acabado superficial 2D en un acero ferrítico (430), la diferencia entre este acabado y el anterior radica en el pulido a espejo que tienen, ya que en el 2B era posible apreciar un reflejo nítido, pero en el 2D es distorsionado y no se logra apreciar la imagen. Este acabado se obtiene debido a la laminación en frio, el recocido y decapado que tuvo esta muestra.

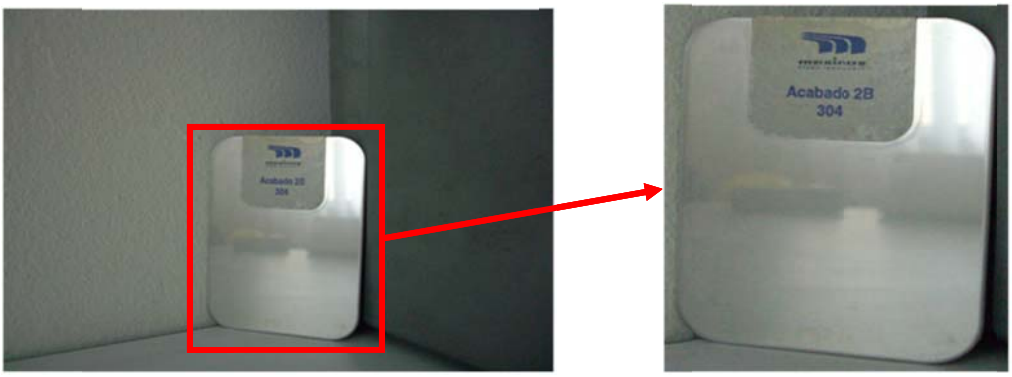
Figura V.8 Acabado superficial 2D en un acero ferrítico



Fuente: Pruebas de acabados de acero inoxidable Mexinox

La figura V.9 muestra un acabado 2B en un acero austenítico (304). Como se puede observar el acabado a espejo no es tan nítido como en el acero ferrítico, se puede notar cierta palidez en la imagen que refleja.

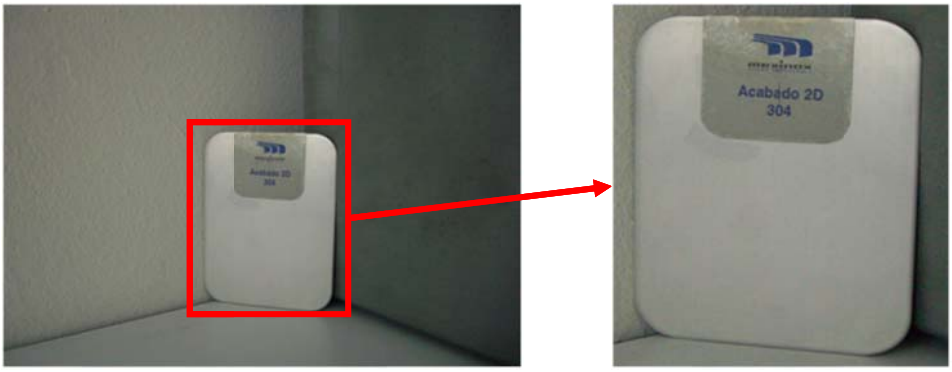
Figura V.9 Acabado 2B en un acero austenítico



Fuente: Pruebas de acabados de acero inoxidable Mexinox

En la figura V.10 se observa un acabado del tipo 2D en un acero austenítico (304). Como se puede observar este acabado con este tipo de acero no refleja imagen alguna, tiene una apariencia opaca, a diferencia con el 2B en el mismo acero

Figura V.10 Acabado 2D en un acero austenítico



Fuente: Pruebas de acabados de acero inoxidable Mexinox

En la tabla V.7 se muestran los diferentes tipos de acabados por laminación que se pueden obtener para el acero inoxidable, dividiéndose por laminación en caliente y posteriormente por laminación en frio.

Tabla V.7 Acabados del acero inoxidable por laminación	
Acabado	**Aplicación**
Laminación en caliente	
1C	Laminación en caliente, tratado térmicamente y sin decapado
1E	Laminación en caliente, tratado térmicamente y decapado
1D	Laminación en caliente y tratado térmicamente
1U	Laminación en caliente, sin tratar térmicamente y sin decapado
Laminación en frio	
2C	Laminación en frio, tratado térmicamente sin decapado la superficie
2E	Laminación en frio, tratado térmicamente y decapada
2D	Laminación en frio, recocido, decapado y una última laminación con rodillos finamente pulidos
2B	Laminación en frio, recocido y decapado
2R	Laminación en frio y recocida
2Q	Laminación en frio, y endurecimiento superficial
BA	Laminación en frio y tratado térmicamente

Fuente: Yieh Corp Stainless Steel

V.2.2.- Embutido

El procedimiento para realizar un embutido es el forzar una placa a pasar por un agujero con un diámetro 2 veces superior al espesor de dicha placa, mediante una fuerza de presión. Cuando se realiza esta operación, el material en su borde es sometido a un esfuerzo de compresión, mientras que la base que está en contacto directo con el punzón debe de resistir un esfuerzo de tensión.

Debido a los grandes esfuerzos el autor Rossi Mario (1979) considero los siguientes parámetros como los más importantes:

- Profundidad de embutido
- Espesor de la placa
- Forma del embutido

Los parámetros anteriores nos dan la pauta para elegir alguno de los siguientes métodos de embutición:

- Embutido de simple efecto.- emplea un movimiento del tipo vertical, siendo este el movimiento del punzón. Es el más simple ya que se distingue por que el embutido debe de ser poco profundo y se emplean grandes espesores.

- Embutido de doble efecto.- Se utiliza cuando se van a realizar embuticiones de gran profundidad, o se tiene bajo espesor de la placa. Se le conoce como doble efecto debido a que realiza dos acciones, siendo estas:
  1. La fuerza con que se opera el punzón.
  2. La misma fuerza con que se opera el punzón es con que se retiene la placa en el anillo de sujeción.
- Embutido de triple efecto.- Se emplean cuando se realizan piezas de gran tamaño donde se requiera gran fuerza para obtener la pieza a manufacturar.

Una parte importante durante esta operación de manufactura es el conocer el diámetro original de la placa, ya que con ella aseguraremos que el estiramiento radial del material será suficiente para no provocar pliegues en la pieza final. Rossi Mario (1979) en su libro "Estampado en frio de la chapa" señala en su Tabla VI las fórmulas para calcular el diámetro de la placa necesaria para realizar un recipiente con ciertas características.

V.2.2.1.- Lubricación para Embutir

Como en toda operación de conformado de materiales, en el embutido es también necesaria la lubricación durante la operación, para facilitar el movimiento del metal al tomar una nueva forma gracias a la acción conjunta del punzón y la matriz, con esto aseguramos larga vida a la pieza creada al reducir los esfuerzos internos que se generan durante la operación.

Los lubricantes que se emplean dependen del tipo de material que se está manufacturando, así como la profundidad del mismo. En la tabla V.8 se muestra el tipo de lubricante para el material empleado y la profundidad que se necesita.

Tabla V.8 Lubricantes para embutir metales

Embutido	**Lubricante**	**Material**			
		Aceros al carbón	**Aceros inoxidables y aleados**	**Aluminio**	**Cobre, latón y bronce**
Poco profundo	Hidrosoluble	448	-	-	DO-17
	Oleosoluble	CC-2	DO-29	CC-2	CC-2
Profunda	Hidrosoluble	DC-K	-	-	448
	Oleosoluble	DO-29	DO-2A	DO-29	DO-29

Fuente: Rossi Mario, 1979, Estampado en frio de la chapa, Editorial Dossat, México

Los lubricantes CC-2, DO-2A y DO-29 son del tipo de aceites colorados y empleados para embuticiones difíciles o profundas. El DO-2A es empleado principalmente para embutir aAI.

Los lubricantes 448, DO-17, DC-K son del tipo jabonoso y es empleado para toda operación de embutido de poca profundidad incluyendo AI.

V.2.2.2.- Embuticiones Sucesivas

Las ollas, cacerolas y sartenes de cocina son algunos de los productos de AI que se manufacturan por medio de embutido. Sin embargo no todos se realizan con tan solo un proceso de embutido, en algunas ocasiones es necesario realizar embuticiones de manera consecutiva antes de alcanzar las dimensiones requeridas. Esto se realiza con el objetivo de evitar fracturas y pliegues que se puedan generar en los productos a la hora de realizar el proceso de embutido.

Para conocer la cantidad de embutidos necesarios para un producto debemos de conocer el coeficiente de embutido para un material en específico. La tabla V.9 nos muestra los diferentes coeficientes para algunos materiales empleados en este proceso.

Tabla V.9 Coeficiente de embutición

Material	**K_1**	**K_2.....K_n**
Acero	0.56	0.75
Latón	0.52	0.75
Cobre	0.50	0.75
Aluminio	0.55	0.80
Acero inoxidable	0.60	0.80
Cinc	0.75	0.90

Fuente: Berna Salueña Xavier, 2000, Tecnología mecánica, UPC, Barcelona España

Para conocer el número de embutidos, también se requiere conocer las dimensiones de la pieza a fabricar, para así conocer el diámetro de la placa original. En el capítulo IV.2.4.1 se menciona al autor Rossi Mario (1979) el cual maneja en su tabla VI las fórmulas para calcular el diámetro original de la placa dependiendo de la forma de la pieza.

Con los datos de la placa original y el diámetro de la pieza se emplea la siguiente expresión:

Expresión V.1

$$\frac{d}{D}=K_O$$

Donde

- d.- Es el diámetro de la pieza requerida
- D.- Es el diámetro de la placa original
- K_O.- Es el coeficiente de embutición obtenida entre ambos diámetros

La K_O será quien nos determinara el número de embuticiones, y para esto se siguen las siguientes expresiones:

Expresión V.2

$$K_O \geq K_1$$

Si se presenta la expresión V.2 nos indica que la pieza no requiere de embuticiones consecutivas y con tan solo una operación bastara para terminar la pieza.

Expresión V.3

$$K_O < K_1$$

Si se nos presenta la expresión V.3 indica que para poder manufacturar la pieza es necesario realizar varias operaciones de embutido. Para esto se siguen las siguientes ecuaciones:

Expresión V.4

$$d_1 = DK_1$$
$$d_2 = d_1K_2$$
$$d_n = d_{n-1}K_n$$

Siguiendo las ecuaciones de la expresión V.4 y despejando la altura en las ecuaciones donde obtuvimos el diámetro de la placa original obtendremos la altura para cada proceso de embutición.

Conforme al ir avanzando dentro de las ecuaciones y al obtener nuevos diámetros (los cuales se van reduciendo conforme el proceso avanza), necesitaremos un nuevo proceso de embutido. El número de embuticiones termina cuando alguno de los diámetros calculados es menor al diámetro de la pieza que se quiere manufacturar.

V.2.2.3.- Fuerza Necesaria para el Embutido

Debido a la gran fuerza ejercida durante el proceso de embutido, es necesario calcular la fuerza que se requiere para una determinada pieza, y evitar que agujere la placa metálica durante el proceso.

La siguiente expresión nos permite calcular la fuerza necesaria para realizar el embutido de metales.

Expresión V.5

$$F = P \cdot e \cdot \sigma c \cdot m$$

Dónde:

- F.- Es la fuerza necesaria para el embutido
- P.- Representa el perímetro de la circunferencia.
- e.- Es el espesor de la placa metálica.
- σc.- Es el esfuerzo al corte del material.
- m.- Es un valor definido por d/D, que es igual a 1 a partir de la primera embutición exceptuando a la última donde cambiara su valor por interpolación.

La resistencia al corte del material se presenta en la tabla V.10 para diferentes materiales que pueden ser embutidos.

Tabla V.10 Resistencia al corte		
Material	**Resistencia al corte σc Kg/mm^2**	
	Laminado	**Recocido**
Acero laminado 0.1% C	32	25
Acero laminado 0.2% C	40	32
Acero laminado 0.3% C	48	35
Acero inoxidable	60	52
Aluminio	13-15	6-7
Bronce	40-60	32-40
Cinc	20	12
Cobre	25-30	18-22
Estaño	-	3-4
Latón	35-40	22-30
Plomo	-	2-3

Fuente: Berna Salueña Xavier, 2000, Tecnología mecánica, UPC, Barcelona España

Con la fuerza calculada podemos determinar con la siguiente expresión la energía que se necesita desarrollar para cada proceso de embutido.

Expresión V.6

$$W = F \cdot h$$

La altura representada por la letra "h" es el estiramiento que se da en un proceso de embutición, por lo tanto si se tiene más de un proceso, la última altura calculada restara a la penúltima, para sacar el estiramiento que se dio en ese paso de embutido.

Se debe tomar en cuenta que los autores Rossi Mario (1979) y Berna Salveña Xavier (2000) en sus obras manejan distintas formas para determinar el número de embuticiones necesarias para un recipiente en específico, siendo Rossi Mario quien aporta un mayor número de pasos empleando otros parámetros del metal y Berna Salveña Xavier proporciona una menor cantidad de pasos con los datos vistos durante este tema.

V.2.3.- Forja

La forja es un conformado de materiales, en el que sometemos un metal a deformación plástica, aplicando esfuerzos de compresión que terminan por exceder la resistencia a la fluencia de los metales.

El proceso de forjado actualmente en la industria se basa en comprimir el metal a través de dos dados, empleando una fuerza gradual para deformar el material. Las operaciones de forja se pueden realizar en caliente o en frio, siendo la primera la más empleada, sin embargo la forja en frio se emplea en algunos productos dando como ventaja adicional el endurecimiento de la pieza.

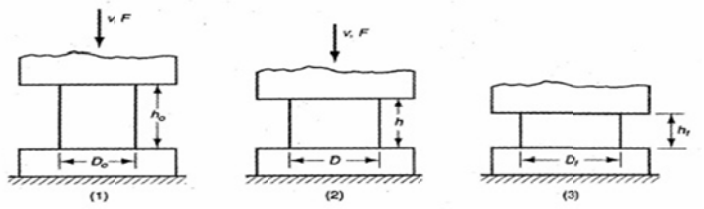
La fuerza empleada para esta operación puede ser de manera gradual o de impacto, denominándosele martinete de forja cuando se emplea la fuerza de impacto y si es de manera gradual se le denomina prense de forjado.

V.2.3.1.- Dados de Forjado

Para la operación de forjado existen 3 tipos de dados, la diferencia entre cada uno es la forma en que restringen al material, siendo estos los siguientes:

1. Dado abierto.- Es la operación de forjado más sencilla, se emplean dos planos y el material es colocado entre ellos. Al no haber una restricción en el material, fluirá de manera libre conforme se realice la operación, se puede aumentar espesor o altura con este procedimiento.

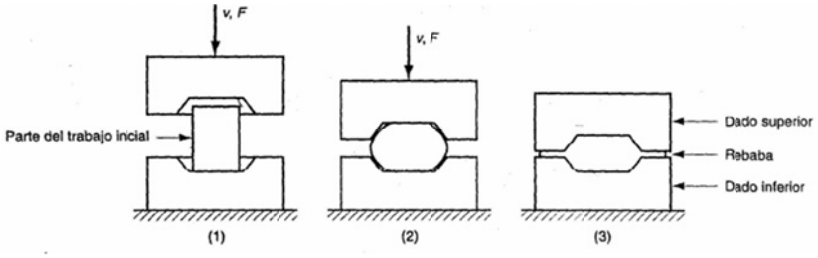
Figura V.11 Forja con dado abierto



Fuente: UMSS Facultad de ciencias y tecnología Ingeniería mecánica

2. Dado impresor.- Este tipo de forja permite que el material adquiera una forma requerida, ambos dados tiene la forma de la pieza. El metal tendrá una restricción, sin embargo no es total permitiendo que el excedente quede alojado en una pequeña cavidad entre los dados, siendo esta la rebaba.

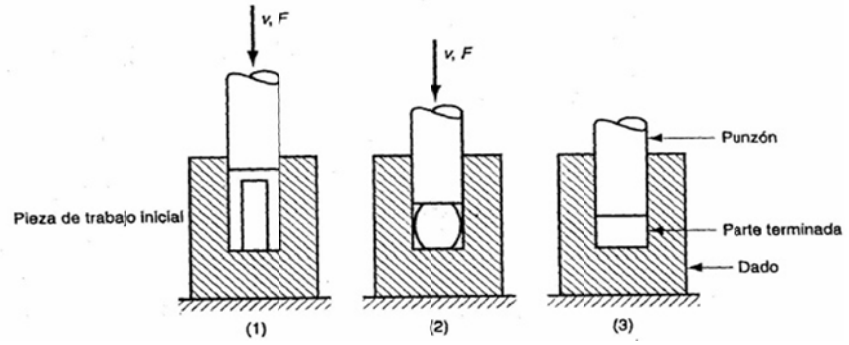
Figura V.12 Forja con dado impresor



Fuente: UMSS Facultad de ciencias y tecnología Ingeniería mecánica

3. Forjado sin rebaba.-A diferencia de los procesos anteriores en que el material tenia nula o cierta restricción al fluir durante la operación, en el forjado sin rebaba el material no tiene ningún lugar hacia donde fluir, es decir el dado es completamente hermético, además de emplear un punzón para deformar al material. En esta operación se debe tener cierta precaución con el volumen, debido a que el material debe de llenar completamente el dado, si se tiene un exceso de material, se podría causar daños tanto al dado como al punzón. Este tipo de forja se utiliza para manufacturar piezas simples y simétricas.

Figura V.13 Forja sin rebaba



Fuente: UMSS Facultad de ciencias y tecnología Ingeniería mecánica

V.2.3.2.- Forja de AI

Para deformar el acero inoxidable mediante forja, ya sea en frio o en caliente, se deben considerar ciertas precauciones, debido a las diferencias que existen entre forjar un AI y uno al carbón.

Durante la forja en caliente el AI debe someterse a un precalentamiento, siendo de 815 hasta 870 °C para la familia austenitica y 760 hasta 815°C para las familias ferríticas y

martensíticas. Los hornos empleados son de arco eléctrico y de combustible; en el primero la atmosfera es controlada y en el segundo el combustible no debe ser del tipo sulfurado. El horno empleado tendrá la característica de realizar un calentamiento rápido a la temperatura de forja para el acero en cuestión, después de primero precalentar el material a forjar.

Los martinetes y las prensas deben tener una mayor potencia, ya que se requiere el doble de fuerza para forjar un acero inoxidable que uno al carbón o de baja aleación. Las matrices de la forja sufren un mayor desgaste cuando se emplea acero inoxidable, es por esto que se siguen las siguientes recomendaciones para alargar su vida útil:

- El material debe de ser un acero aleado que permita la estampación en caliente
- Calentar la matriz para evitar el choque térmico
- Eliminar cascarilla generada, ayuda a reducir su desgaste y permita una mejor dimensión a la pieza.

V.2.3.2.1.- Forja de Aceros Austeníticos

Los aceros austeníticos a diferencia de otras aleaciones estos requieren de una mayor fuerza para deformarse, debido a que muestran un endurecimiento por trabajo, cuando se deforman a altas temperaturas. Debido a este endurecimiento al acero austenítico se le añaden elementos que permitan una mejor deformabilidad, como es el caso del azufre. Sin embargo aquellos aceros que tienen elementos inhibidores para evitar la precipitación del cromo y evitar la corrosión intergranular son más difíciles de forjar.

Para realizar el proceso de forjado de un acero austenítico, es necesario conocer la forma de la pieza, ya que si la pieza a realizar necesita una gran cantidad de deformaciones, es necesario realizar la forja en caliente (por arriba de la temperatura de recristalización) para que así sea más fácil de producir la pieza, por el contrario si no es necesario una gran cantidad de deformaciones, el forjado puede realizarse en frio.

La tabla V.11 nos muestra las temperaturas a las cuales se puede realizar un forjado en caliente para distintos tipos de aceros austeníticos.

Tabla V.11 Temperatura de forja para aceros austeníticos						
	303	**304**	**310**	**316**	**321**	**347**
Rango de temperatura	930°C-1260°C	870°C-1315°C	930°C-1315°C	930°C-1315°C	870°C-1290°C	870°C-1290°C
Temperatura recomendada	1180°C	1230°C	1230°C	1230°C	1200°C	1200°C
Habilidad de forja	Pobre	Buena	Buena	Buena	Razonable	Buena

La temperatura de recristalización del acero austenítico oscila entre los 850°C y los 930°C, estas temperaturas pueden alcanzarse si durante el forjado en frio se aumenta la deformación plástica del acero por lo que se debe tener especial cuidado al realizar un forjado en frio de un acero austenítico.

Durante la operación de forjado en caliente, se debe tener especial cuidado en las temperaturas, ya que si se realiza un forjado en caliente con una baja deformación plástica se sufriría de un aumento en el tamaño del grano. Sin embargo una excesiva temperatura provocaría que la austenita se convirtiera en ferrita δ, dificultando la operación de forja.

Después de cualquier operación de forja en los aceros austeníticos, es necesario realizar un tratamiento de recocido para evitar la precipitación de carburos de cromo. En aquellos aceros que tienen elementos estabilizadores, también se les realiza un tratamiento de recocido, para asegurar que el carbón se precipite con el titanio y el niobio en forma de carburos.

V.2.3.2.2.- Forja de Aceros Martensíticos

Los aceros martensíticos debido al contenido de cromo que poseen, requieren un aumento de fuerza en comparación con los aceros de baja aleación, este aumento es de 30 hasta un 50%.

Estos aceros pueden forjarse en frio o en caliente, sin embargo algunos de ellos tienden a formar a la ferrita δ a los 1100°C, la cual reduce de manera significativa su forgabilidad

La tabla V.12 muestra las temperaturas de forja que se pueden manejar en los aceros martensíticos, además de mostrar la carga ejercida con respecto al acero 4340 siendo 1 la fuerza que se ejerce para forjarlo.

Tabla V.12 Temperatura de forja de aceros martensíticos		
Material	**Temperatura °C**	**Carga de forja en relación al 4340**
4340	1260	1
410	1175	1.2-1.5
414	1175	1.3-1.5
416	1175	1.3-1.5
420	1205	1.1-1.2
440A	1150	2
440B	1150	2
440C	1120	2

De acuerdo a la tabla anterior la mayoría de los trabajos de forja en caliente se realizan por arriba de los 1100°C (esto no significa que todos tienden a desarrollar la ferrita δ). Después del proceso de forjado, se deben de enfriar de manera lenta, ya que estos son endurecidos por tratamiento térmico y pueden presentar fracturas por el mal manejo de la temperatura.

V.2.3.2.3.- Forja de Aceros Ferríticos

Los aceros ferríticos dentro del proceso de forjado se debe tener especial cuidado en el manejo de la temperatura ya que estos aceros sufren un rápido crecimiento del grano si se mantiene durante mucho tiempo la temperatura de forja. Como estos aceros al igual que los austeníticos no son endurecidos por tratamiento térmico, sin embargo es necesario realizar un tratamiento de recocido para eliminar los esfuerzos residuales que se generaron durante el proceso de forja.

Tabla V.13 Temperatura de forja para aceros ferríticos y martensíticos	
Acero	**Temperatura °C**
403	1040-1150
405	1040-1150
410	1040-1150
414	1120-1210
416	1150-1230
420	1090-1180
430	1040-1150
446	980-1090

La tabla V.13 muestra las temperaturas que se manejan durante la operación de forjado tanto para aceros martensíticos como para ferríticos. Los hornos empleados para la forja en caliente son de tipo de eléctrico con atmosferas controladas.

CAPÍTULO VI

ELABORACIÓN DE ALGUNOS UTENSILIOS DE COCINA

Los aceros inoxidables son metales que a diferencia de otros no tienen un recubrimiento en su superficie que los haga resistentes a ataques corrosivos. Esta propiedad se presenta por la aleación de hierro y cromo, que mientras más cantidad de cromo exista en la aleación más resistente a la corrosión pude hacerse (sin llegar a la fase sigma que reduce dicha resistencia).

Una gran característica de los AI dentro de la preparación de los alimentos es la gran limpieza e higiene que ofrece, ya que estos a diferencia de otros metales como el aluminio (que también se llega a emplear como instrumento de preparación de alimentos) el AI no cambia el color, el olor y el sabor de los alimentos, regla que se sigue en todo el mundo para preparar alimentos.

Existen una gran cantidad de utensilios de cocina elaborados de AI, pero dentro de este trabajo de tesis solamente mencionaremos los más comunes dentro de los hogares, como son cuchillos, cucharas, tenedores y tijeras.

VI.1.- Manejo de Alimentos con AI

Para el manejo de los alimentos de cualquier clase se han establecido normas para su correcto manejo, algunas de ellas fueron mencionadas en el capítulo IV aplicables para México. A pesar de la normalización existen reglas que mencionan que herramientas tienen que ser de acero inoxidable para la cocción, almacenaje, manipulación con corte y transporte de alimentos.

VI.1.1.- Reglas para Cocinas

Para toda aquella persona o empresa que ofrezca algún servicio de consumo de alimentos directa al público, la Organización Panamericana de la Salud presenta una escala en la que se evalúan los materiales con que se manipulan los alimentos. Esta evaluación se basa en la cantidad de bacterias o inclusiones extrañas que pudieran tener los alimentos durante su preparación.

Para la evaluación de las cocinas se consideran los siguientes puntos a evaluar:

- Pisos.- Deben de ser impermeables con sumidero de evacuación de agua contando con la pendiente apropiada hacia el sumidero y evitar el estancamiento de fluidos.
- Piletas para lavado de alimentos.- Deben ser profundas y estar hechas de acero inoxidable austenítico 304 para ácidos domésticos y ferrítico 430 para agua dulce (en caso de emplear metal) sin roturas y ralladuras
- Hornos.- Deben de estar alejados de paredes para evitar transmitir calor
- Campanas.- Debe cubrir el espacio donde allá fuente de calor, ser liso y de acero inoxidable 304 o 316.
- Extractores.- Que posean buena succión del humo
- Ductos.- Poseer 3 metros por encima del edificio.
- Revestimientos impermeables de 2 metros de altura.- La pared en caso de utilizar metales se utiliza el acero inoxidable (ferrítico), empleándose ángulos sanitarios para techo y piso
- Mesas.- Deben de ser lisas y lavables, en caso de emplear metales, es estrictamente el uso de acero inoxidable 304.

VI.2.-Productos de AI Dentro de la Cocina

Dentro de las actividades diarias que el ser humano realiza dentro de su hogar, se encuentra presente el uso del acero inoxidable. Algunas actividades que realizamos dentro del hogar como el

cocinar, lavar los trastes, cortar alguna fruta, o incluso abrir la leche con unas tijeras, no podrían realizarse de manera higiénica empleando otros metales, ya que algunos de ellos reaccionan con los jugos que desprenden los alimentos, volviendo toxico dicho alimento.

VI.2.1.- Elaboración de Cucharas y Tenedores

Las cucharas y tenedores son dos utensilios de cocina que se emplean a diario en nuestro hogar, y debido a la gran variedad de platillos que hay, muchos de estos podrían propiciar corrosión, es por esto que estos utensilios se fabrican de AI debido a su resistencia a la corrosión y a su propiedad higiénica.

El proceso de fabricación de las cucharas y tenedores, son muy similares en sus pasos iníciales, es al final cuando cada uno de ellos tendrán procesos de manufactura diferentes.

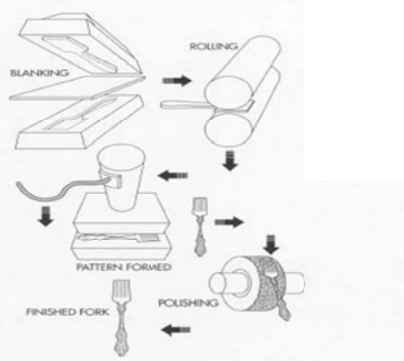
El principio de manufactura comienza con placas rectangulares de acero inoxidable martensítico 440A que son troqueladas como primer paso. Una vez que se tiene la forma de la pieza, se hacen pasar por unos rodillos de izquierda a derecha y después de manera inversa, esto para obtener el espesor adecuado para el cubierto que se hace. Ya que contamos con el espesor adecuado se recorta el excedente para delinear el cubierto (el cual es reciclado para un nuevo cubierto). En el caso de las cucharas y los tendedores se aplica un doblado en la base del mango para tener comodidad a la hora de utilizarlo en los alimentos.

Dentro de las operaciones de manufactura la pieza tiene que pasar por operaciones de recocido para aliviar los esfuerzos generados. El recocido tiene que ser controlado para que al final la pieza pueda resistir todos los esfuerzos generados durante su uso cotidiano. Se tiene un último recocido el cual es el más importante ya que determinara el grado de dureza. Después de este tratamiento la pieza está lista para agregársele decoraciones y detalles necesarios.

Para colocar la decoración en el mango de los cubiertos, se realiza un estampado con dos punzones uno superior y uno inferior, esto para colocar la decoración tanto por el frente como por detrás del cubierto. La fuerza que se emplea es de 200 toneladas produciendo endurecimiento del metal, a tal grado que no necesita un recocido ya que se adquiere la dureza necesaria para su uso, al final se le da brillo y se pule.

Los pasos descritos en los párrafos anteriores son en común para los 2 tipos de cubiertos. Sin embargo cada uno de ellos tienen pasos únicos para completar su manufactura.

Figura VI.1 Proceso de manufactura en común para tenedores, cucharas y cuchillos



Fuente: How products are made, Volume 1 Cutlery

En el caso de las cucharas se siguen pasos adicionales. Después de colocarles la decoración se procede a formar la cuenca, la cual es manufacturada por dos punzonados. Debido al estiramiento la dimensión de la cuchara no es la correcta, por lo que se le realiza un segundo delineamiento.

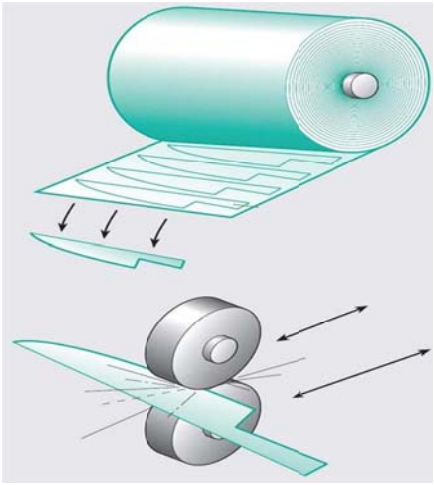
En los tenedores el proceso para generar los dientes se realiza antes de colocar la decoración en el mango. Se utilizan troqueles para generar las ranuras, posteriormente el metal que une a cada ranura es removida con un proceso de corte una vez decorado el tenedor.

VI.2.2.- Elaboración de Cuchillos

El cuchillo de cocina es otro de los utensilios que más se emplean en los alimentos, al igual que las cucharas y tenedores se utiliza acero martensítico del tipo 420. A pesar de que las cucharas, y tenedores también son de acero martensítico, en los cuchillos hay pasos adicionales como son un templado, ya que su principal función es cortar.

En la manufactura de cuchillos existen dos formas para poder obtener lo que es la hoja cortante, la primera se obtiene de una simple lamina de AI la cual es troquelada, la segunda y la más común es teniendo una bobina la cual es troquelada con la forma de la hoja. Una vez obtenida se procede al pulido de la hoja con un esmeril de grano fino. En la figura VI.2 se observa el pulido de la hoja cuyo objetivo es dejar la pieza lo más lisa posible para que cuando realice algún corte en un alimento este resbale y no se atasque en las paredes del cuchillo.

Figura VI.2 Bobina para la obtención de la hoja de un cuchillo



Fuente: The kitchen knife, Surface engineering

Una vez pulida la hoja se procede al afilado, (tema que se tratara en capítulos más adelante) pero todavía más importante es como retener ese afilado. La manera más adecuada de retener el filo es con un tratamiento térmico, con esto se puede aumentar la dureza del cuchillo hasta los 500 o 600 HV (dureza Vickers), aun así esta dureza no garantiza que no se desafile el cuchillo.

El tratamiento térmico de las hojas se realiza a una temperatura mínima de 820°C y se enfrían empleando aceite. El enfriamiento debe de realizarse de manera uniforme, ya que de lo contrario podría fracturarse o deformarse por la temperatura. Una vez enfriada la hoja se reviene a 220°C durante 20 o 30 minutos.

En cuanto al magno de los cuchillos se sujetan por medio de remaches cuando se tiene una extensión del cuchillo bastante larga (la cual no tiene filo), y cuando esta es pequeña es a través de presión mecánica utilizando un mango de madera o plástico.

VI.2.2.1.- El Filo de los Cuchillos

La parte más importante de un cuchillo es el filo quien efectuara el trabajo durante el corte de los alimentos.

Cualquier cuchillo fabricado de AI es sometido a tratamientos térmicos, con el fin de aumentar su dureza y garantizando una larga vida al filo, sin embargo el mal uso del cuchillo puede causar que este pierda su filo. A pesar de que el tratamiento térmico es un método que garantiza la

permanencia del filo de un cuchillo, la forma de la hoja es el segundo método que nos permite incluso seleccionar el cuchillo adecuado para cortar ciertos alimentos.

Existen muchos fabricantes a nivel mundial que manejan sus propias formas de hojas, pero las más comunes son las siguientes:

1. Filo con sierra
2. Filo festoneado
3. Filo ondulado
4. Filo decorador

1.- El filo con sierra es el cuchillo más común de todos ya que puede cortar a través de comida sólida, gracias a la sierra adicionada al filo.

Figura VI.3 Filo con sierra

Fuente: Canada Cutlery Inc., Facts about knives, Culinary Caddy

2.- El filo festoneado es ideal para cortar alimentos que son bastante duros por fuera pero blandos por dentro. Su filo tiene una mayor duración que la del tipo sierra debido a que es protegido por los puntos salientes en el borde.

Figura VI.4 Filo festoneado

Fuente: Canada Cutlery Inc., Facts about knives, Culinary Caddy

3.- El tipo ondulado es de los cuchillos con el mayor filo, ya que la ondulación produce bolsas de aire que previenen que la comida se atasque. Puede cortar fácilmente a través de carnes, pero debe evitar cortar huesos ya que podría astillarse el borde.

Figura VI.5 Filo ondulado

Fuente: Canada Cutlery Inc., Facts about knives, Culinary Caddy

4.- El filo decorador es para cortar frutas y vegetales únicamente y darles formas artísticas.

Figura VI.6 Filo decorador

Fuente: Canada Cutlery Inc., Facts about knives, Culinary Caddy

VI.2.2.2.- Afilado de Cuchillos

Los cuchillos con el paso del tiempo su uso ya sea correcto o incorrecto este llegara a perder su filo. El afilado generalmente se realiza de manera manual empleando piedras y es el más recomendable. El utilizar esmeriles para el afilado no es adecuado ya que podemos quemar el cuchillo, provocando astilla miento de la hoja o rotura de la misma.

Para el correcto afilado la compañía japonesa Korin promueve los siguientes parámetros:

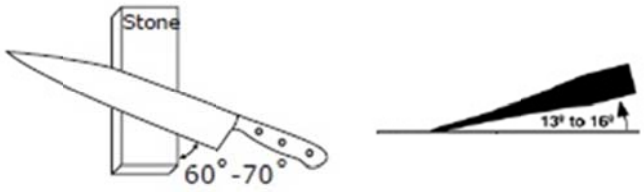
1. Piedra a emplear para el afilado.- se clasifican en dos tipos:
   a) Piedras de diamante
   b) Piedras naturales
2. Lubricante para el afilado.- Este depende de la piedra que se emplea pero se dividen en 3 tipos de lubricación:
   a) Agua
   b) Aceite vegetal
   c) Aceite base de petróleo

Antes de comenzar el afilado, la piedra a utilizar debe de ser preparada sumergiéndola en agua por unos minutos, esto para mantener los poros de las piedras limpias, ya que con esto reducimos fricción y evitamos realizar un mayor esfuerzo a la hora de comenzar el proceso de

afilado. Para toda herramienta de corte es necesario un ángulo de afilado, para los cuchillos de cocina se necesitan dos ángulos:

a) Angulo frontal.-Es el ángulo que determinara el movimiento de afilado a lo largo de la piedra por lo general este ángulo va de los 60°-70°
b) Angulo lateral.- Es el ángulo para dar el filo se determina tomando la base de la piedra como 0° de allí se levanta el cuchillo entre los 13°-16°

Figura VI.7 Ángulos de afilado



Fuente: Knife Sharpening Basics, 2008, Korin Japanese Trading Copr., Japón

Teniendo los ángulos de afilado el proceso comienza con un va y ven, aumentado la presión del filo del cuchillo contra la piedra cuando el movimiento va hacia adelante y liberando un poco de presión cuando es en retroceso.

El proceso se realiza por partes, mientras una nueva porción del borde se va afilando la otra deja de afilarse, esta operación se repite hasta terminar con todo el filo del cuchillo. Una vez terminada una cara se prosigue con la siguiente, para quitar rebabas y tener un mejor filo del cuchillo. No se debe de alternar bordes durante el proceso y la cantidad de movimientos debe de ser igual para un lado que para el otro.

VI.2.3.- Elaboración de Tijeras

Uno de los productos de AI que se emplean de manera cotidiana dentro del hogar, es el uso de las tijeras, y por ser una herramienta de corte estas tiene que ser de un material duro, que en este caso por la higiene será un acero martensítico.

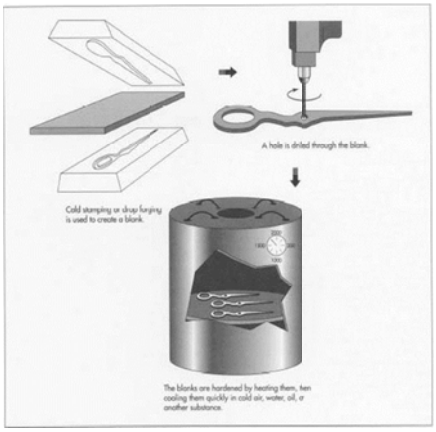
El proceso de manufactura de las tijeras se realiza de dos maneras:

1. Consiste en realizar un troquelado a la placa metálica. El punzón tendrá la forma de la navaja y el proceso se realizara en frio.
2. Consiste en fundir el metal a un molde que tendrá la forma de la navaja.

De las dos formas de obtener las navajas, la primera es la más recomendada, ya que al realizar un trabajo sobre el metal obtenemos un cierto grado de dureza que al final será benéfico para las mismas.

Teniendo las navajas fabricadas se procede a quitar el excedente y dejarlas a la forma apropiada, para posteriormente realizar el barreno el cual será la unión y permitirá la movilidad de ambas navajas para poder así realizar su función de corte.

Figura VI.8 Manufactura de tijeras de acero inoxidable



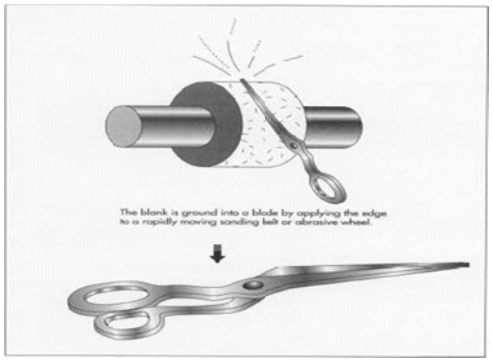
Fuente: How products are made, Volume 3 scissors

Un proceso muy importante durante la elaboración de las tijeras es el tratamiento térmico (el cual se puede ver en la figura VI.8), que se realiza una vez realizado el barreno de unión. Para el tratamiento térmico es recomendable emplear temperaturas entre los 930 a 1060°C y el medio de enfriamiento varía dependiendo el uso al que vaya a ser destinado. Este primer tratamiento nos da una alta dureza pero también son muy frágiles, por lo que se realiza otro tratamiento de revenido, para reducir esta fragilidad y para permitir que la dureza sea de manera uniforme en toda la pieza. Debido al calentamiento durante los tratamientos térmicos en algunos casos se puede llegar a deformar la pieza, si esto llegase a ocurrir las navajas se colocan en un yunque y se forjan para poder quitar estas deformaciones.

Una vez que las navajas tienen el tratamiento térmico adecuado se procede al afilado de las mismas a través de un esmeril. Dentro del afilado se tiene que estar enfriando constantemente para prevenir deformaciones o que se añada un nuevo tratamiento térmico al borde la navaja. Una vez afilado se procede a su pulido (ver figura VI.9).

El armado de ambas navajas se realiza por medio de un remache para las tijeras que no sean ajustables y con un perno para las tijeras cuyas navajas sean ajustables.

Figura VI.9 Afilado de las navajas



Fuente: How products are made, Volume 3 scissors

VI.2.4.- Elaboración de Ollas

Dentro de la preparación de alimentos es indispensable el uso de ollas o sartenes, ya sea para elaborar caldos o cocinar algún alimento. Estos productos de cocina son manufacturados de diversos materiales, algunos de ellos son el aluminio. Sin embargo al cocinar frutas o verduras, estos expulsan jugos que al estar en contacto con el aluminio reaccionan y se vuelven tóxicos para el ser humano. Otra gran observación para evitar el uso del aluminio radica en que puede llegar a cambiar el olor e incluso el color de los alimentos. Debido a las desventajas del aluminio, se emplea el acero inoxidable para la elaboración de ollas y sartenes, esto debido a su gran propiedad higiénica de conservar el olor y color de los alimentos, además de que no reacciona con los jugos que expulsan las frutas o verduras durante su cocción.

Para elaborar una olla o sartén se emplean dos métodos de manufactura:

- Troquelado para la obtención del disco base.
- Embutido del disco para obtener el recipiente con las dimensiones deseadas.

La parte más importante dentro de la manufactura es el embutido, ya que se experimenta una gran fuerza para poder estirar radialmente al acero y en la mayoría de los casos se emplean embuticiones sucesivas, esto dependerá de la profundidad de la pieza.

VI.2.4.1.- Proceso para la Elaboración de Ollas

Para la elaboración de ollas, sartenes y cacerolas de AI se emplea el tipo austenítico, ya que debido a sus propiedades de ductilidad lo hace el más idóneo para la elaboración d estos productos, además de poseer mejor resistencia ante la corrosión que los otros aceros inoxidables.

El proceso comienza con una bobina de AI austenítico 304 o 316 calibre 18, el cual pasa a una troqueladora que emplea 45 toneladas de fuerza para obtener el disco que será posteriormente embutido.

Teniendo el disco de acero inoxidable cortado, este pasa a la embutidora, el cual realizara en una o varias operaciones (dependiendo de las dimensiones de la olla) de embutido. Teniendo el recipiente con la forma adecuada se realiza un corte en el excedente para manufacturar el borde donde se colocara la tapa.

Debido a que el AI es un mal conductor del calor, debajo de las ollas se les coloca una chapa de aluminio, la cual es protegida por otra capa de AI. Para colocar la placa entre las dos capas de AI, la olla se calienta a 500°C para ablandar al aluminio y sea así más manejable para su distribución. Para lograr esto las ollas pasan a una prensa que ejerce 450Kgf en la base para que el aluminio se distribuya de manera uniforme sobre toda la base de la olla. Con el aluminio distribuido, la olla pasa a la zona de pulido la cual consta de 9 estaciones, cada una con un grano más fino que el anterior conforme se avanza en cada estación. El pulido se realiza por dentro y por fuera de la olla para obtener un mayor brillo y a si absorba de mejor forma el calor para la cocción de los alimentos.

La última etapa de la manufactura de las ollas es la limpieza y la instalación de los mangos, los cuales pueden ser de plástico o de acero inoxidable.

VI.2.4.2.- Ejemplo para la Embutición de una Olla a Presión

Para saber cuántos procesos de embutido se necesitan para realizar una olla exprés de acero inoxidable, analizaremos una olla de la marca ECKO de 6L (ver figura VI.10) de las siguientes características:

- Altura (h).- 22.4cm
- Diámetro (d).-24.7cm
- Espesor (e).- 1mm
- Acero inoxidable 304

Para el AI de acuerdo a la tabla V.9, su coeficiente de embutición es K_1=0.6 y K_2=0.8 y su resistencia al corte en estado recocido (ver tabla V.10) es de 52Kg/mm^2

Figura VI.10 Olla exprés ECKO de 6L

Fuente: http://www.fagor.com/

Para determinar la cantidad embuticiones necesarias para realizar esta olla, necesitamos tener el diámetro de la placa original, para esto ejecutamos la siguiente ecuación:

Expresión VI.1

$$D = \sqrt[2]{d^2 + 4dh}$$
$$D = 53.13cm$$

Conociendo el diámetro de la placa original aplicamos la expresión V.1 y comparamos el resultado con las expresiones V.2 y V.3:

$$K_O = \frac{d}{D} = \frac{24.7}{53.13} = 0.46$$

En este caso K_O<K_1, entonces se deduce que para la fabricación de esta olla se necesitara más de un proceso de embutido.

Utilizando la expresión V.4, determinaremos el diámetro que se genera durante cada operación de embutido. Para conocer cuál es el embutido final, alguno de los diámetros calculados tiene que ser menor al diámetro de la pieza (d), para este caso d_n<d.

$$d_1 = D \cdot K_1 = 53.13(0.6) = 31.878cm$$
$$d_2 = d_1 \cdot K_2 = 31.878(0.8) = 25.50cm$$

$$d_3 = d_2 \cdot K_n = 25.50(0.8) = 20.4cm$$
$$d_3 < d$$

Con las ecuaciones anteriores se determina que es necesario emplear 3 procesos de embutido para la manufactura de esta olla.

Conociendo los diámetros en cada proceso se procede a calcular la altura en cada uno de ellos. Despejando h de la expresión VI.1 tenemos la siguiente ecuación:

Expresión VI.2

$$h_n = \frac{D^2 - {d_n}^2}{4d_n}$$

Al final la altura h_n debe de ser casi igual a la altura h.

$$h_1 = \frac{D^2 - {d_1}^2}{4d_1} = \frac{53.13^2 - 31.878^2}{4(31.878)} = 14.168cm$$
$$h_2 = \frac{D^2 - {d_2}^2}{4d_2} = \frac{53.13^2 - 25.50^2}{4(25.50)} = 21.29cm$$

Para la última altura que es h_3 no se empleara el diámetro d_3, ya que nosotros queremos una olla con las dimisiones mencionadas. Por lo tanto en este último cálculo de h se emplea el diámetro al que queremos llegar que es 24.7cm

$$h_3 = \frac{D^2 - d^2}{4d} = \frac{53.13^2 - 24.7^2}{4(24.7)} = 22.39cm$$

Ya determinadas las alturas y los diámetros, procedemos a calcular la fuerza necesaria para cada embutido, para esto emplearemos la expresión V.5.

$$F = P \cdot e \cdot \sigma c \cdot m = \pi d_n \cdot e \cdot \sigma c \cdot m$$
$$F_1 = \pi(318.78mm)(1mm)\left(52\frac{Kgf}{mm^2}\right)(1) = 52076.79Kgf$$
$$F_2 = \pi(255mm)(1mm)\left(52\frac{Kgf}{mm^2}\right)(1) = 41657.51Kgf$$

Para la fuerza F_3 el valor de m varía dependiendo del coeficiente de embutición, el cual solamente se aplica al último proceso de embutido. Para esto K=0.6, m=1 y cuando K=1, m=0. Sabiendo esto necesitamos encontrar la "m" para cuando "K" vale 0.8.

$$\begin{matrix} x1 = 0.6 & y1 = 1 \\ x = 0.8 & y = m \\ x2 = 1 & y2 = 0 \end{matrix} \therefore \frac{y2-y1}{x2-x1}(x - x1) + y1$$

$$m = \frac{0-1}{1-0.6}(0.8 - 0.6) + 1 = 0.5$$

$$F_3 = \pi(247mm)(1mm)\left(52\frac{Kgf}{mm^2}\right)(0.5) = 20175.3Kgf$$

Conociendo la fuerza ejercida sobre cada proceso de embutición, se suman todas para conocer la fuerza total requerida, y con esta sabremos qué prensa necesitaremos para realizar la olla puesta de ejemplo. Para este caso se necesitara una prensa de 114 o 115 toneladas de fuerza.

Para conocer la energía generada en cada paso, emplearemos la altura y la fuerza, utilizando la expresión V.6.

$$W = F \cdot h$$

$$W_1 = F_1 \cdot h_1 = (52076.79Kgf)\left(\frac{9.81N}{1Kgf}\right)(.14168m) = 72380.53J$$

$$W_2 = F_2 \cdot h_2 = (41657.51Kgf)\left(\frac{9.81N}{1Kgf}\right)(.2129m - .14168m) = 29104.77J$$

$$W_3 = F_3 \cdot h_3 = (20175.3Kgf)\left(\frac{9.81N}{1Kgf}\right)(.2239m - .2129m) = 2177.11J$$

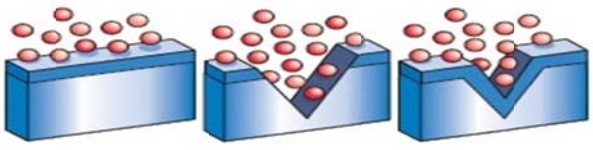
Las alturas se restan para sacar el estiramiento real que se dio durante los procesos 2 y 3

CAPÍTULO VII

LA CAPA PASIVA Y LA CORROSIÓN EN UTENSILIOS DE COCINA FABRICADOS DE ACERO INOXIDABLE

La característica de los aceros inoxidables de resistir ataques corrosivos, se debe a una capa pasiva que recubre su superficie. Esta capa está formada por oxido de cromo, y tiene la gran propiedad de auto recuperarse cuando esta es dañada o rayada, siempre y cuando la superficie este expuesta a suficiente oxigeno o se encuentre trabajando dentro de soluciones oxidantes. Como se mencionó la capa puede crearse o regenerarse casi en cualquier condición, pero se tienen dos formas de hacerlo. La primera forma de crear esta capa es de forma natural, cuando el acero está expuesto al aire o al agua (sin intervención de otros agentes externos químicos o físicos). Cuando se da la regeneración natural, la capa carece de uniformidad y de riqueza en cromo originando que sea más fácil de quebrar. La segunda forma es cuando el metal es expuesto en ambientes controlados, utilizando ácidos (cítrico o nítrico). El tiempo de exposición en medios ácidos debe de ser controlado debido a que si se extiende el tiempo, puede causar la degeneración de la capa y causar corrosión a la superficie del metal.

Figura VII.1 Auto recuperación de la película pasiva



Fuente: Crookes Roger Sheffield Euroinox Bélgica 2004

VII.1.- La Corrosión

La corrosión es un ataque que provoca la destrucción de un material. En el caso de los metales son los ambientes, soluciones o el mismo contacto entre metales disimiles los que provocaran un ataque corrosivo.

Los metales sufrirán de corrosión en distintos ambientes algunos con mayor velocidad que otros, esta velocidad es la que tiene que ser controlada, mientras más baja sea el deterioro de los metales será menor.

La corrosión puede clasificarse de la siguiente manera:

- Por la forma:
  1. Uniformes.- El ataque corrosivo es homogénea en toda la superficie de la pieza, permitiendo calcular la vida útil de la misma.
  2. Localizadas.- Son las más peligrosas ya que el ataque se da en una cierta zona de la pieza avanzando con profundidad perforando el metal.
- Por el medio:
  1. Químicas.- Se trata de una oxidación en medios no iónicos (aquellas soluciones que no son buenos conductores) y por lo tanto el metal reacciona con dicho medio.
  2. Electroquímicas.- Este tipo de ataque se caracteriza al darse a temperatura ambiente y a la existencia de una diferencia de potencial generando zonas catódicas y anódicas.

Los AI son metales que pueden resistir ataques corrosivos, gracias a la capa pasiva que cubre su superficie. Dependiendo del tipo de acero empleado, el ambiente, el contacto con otros metales y la temperatura, serán las causas que originen diferentes tipos de corrosión, algunos serán más vulnerables que otros, debido a las familias existentes y a la composición de cada uno.

VII.1.1.- Teoría Electroquímica

La mayoría de los ataques corrosivos son del tipo electroquímico, ya que producen transferencia de electrones. Para que se cumpla esta teoría se tienen que presentar 3 condiciones:

- Las heterogeneidades de un metal pueden actuar como electrodos, estableciéndose partes catódicas y anódicas, la solución será la encargada de transportar los electrones a estas partes.
- La solución y el metal deben de ser conductores eléctricos.
- Debe de existir una diferencia de potencial para producir el movimiento de los electrones que generalmente se origina por la ionización de la solución.

Apraiz Barrero Jose en su obra Aceros especiales y otras aleaciones (1971) hace una distinción de ataques corrosivos que se caracterizan por la reacción de productos de corrosiones anteriores, sin embargo su efectividad depende de que tan cerca se depositen sobre la superficie del metal:

- Ataque corrosivo de forma directa.- se presenta cuando los productos de la corrosión quedan depositados sobre la superficie atacada del metal y al no disolverse en la solución estos forman una capa protectora que al irse aumentando reduce la velocidad de la corrosión.
- Ataque corrosivo en dos etapas.- se presenta cuando los productos de un ataque previo de corrosión vuelven a reaccionar con la solución iniciando un nuevo ataque corrosivo sobre el metal.

VII.1.1.1.- Curvas de Polarización

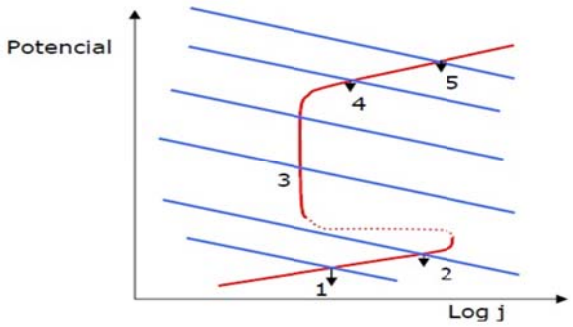
Algunos metales son más resistentes ante ataques corrosivos esto se debe a la película de óxido que se forma en su superficie, volviéndolos pasivos al tener un comportamiento catódico, sin embargo se tiene que poner especial atención tanto a la polaridad y a la diferencia de potencial existente cuando se tienen condiciones que propicien corrosión galvánica, ya que a ciertos voltajes el metal mantendrá una capa pasiva estable y bien adherida, mientras que en otros dejara de proteger al metal volviéndolo activo al presentar un comportamiento anódico.

Las curvas de polarización nos proporcionan un registro de la variación tanto del voltaje como de la corriente, permitiéndonos conocer en qué zonas el metal se comportara catódica o anódicamente, esta es la razón del porque en algunas tablas de serie galvánica el acero inoxidable aparece como pasivo (si es electronegativo) o como activo (si es electropositivo).

Las curvas de polarización se distinguen de 2 formas:

- Curva anódica.- Se caracteriza cuando la corriente va en dirección hacia los metales más nobles, es decir en dirección a los metales pasivos
- Curva catódica.- Se caracteriza porque la corriente va hacia los metales activos.

Figura VII.2 Curva de polarización con corriente logarítmica



Fuente: Universidad de Alicante, Cinética de la corrosión

La figura VII.2 nos presenta una curva de polarización (Fled), donde se presentan 4 zonas importantes donde se remarca cuando un metal se vuelve activo y cuando pasivo:

- Activa.- Dentro de esta zona comprendida por los puntos 1 a 2, la velocidad de corrosión es alta por no tener una capa pasiva estable, por lo tanto el metal es completamente activo.
- Transitoria.- En esta zona (parte punteada de la figura VII.2) es cuando comienza a formarse una capa de óxido la cual protegerá la superficie del metal. La corriente aumenta y la velocidad con que se corroe la base del metal comienza a disminuir, pero sigue sin ser estable esta capa.
- Pasiva.- La zona comprendida por el punto 3 es donde el metal es completamente pasivo, teniendo una capa bien adherida a la superficie del metal e invisible, disminuyendo la velocidad de corrosión.
- Traspassiva.- En este punto la potencia y la corriente comienzan a elevarse, favoreciendo el estado activo del metal y aumentando la velocidad de corrosión.

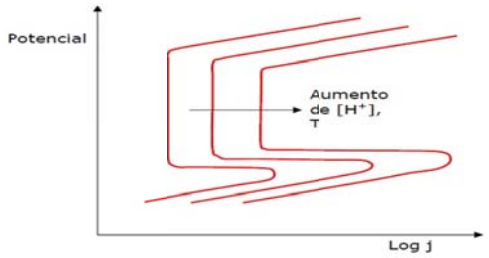
Las zonas activas y pasivas dependen del medio en el que se encuentre el metal, es por eso que se deben tomar en cuenta las siguientes variables:

- Velocidad del fluido de trabajo
- Impurezas
- Potencial eléctrico
- Homogeneidad de la pieza
- pH

El pH presente en el medio es de vital importancia ya que puede tener un gran efecto en la curva al desplazarla hacia la derecha conforme este aumenta. A pesar de que ciertos ácidos

propician la regeneración de la capa de óxido, si se excede el pH puede dar el efecto contrario volviendo la capa inestable, dando como resultado una menor resistencia ante la corrosión.

Figura VII.3 Desplazamiento de la curva



Fuente: Universidad de Alicante, Cinética de la corrosión

La figura VII.3 nos muestra el desplazamiento de la curva conforme se aumenta el pH, disminuyendo la zona pasiva del metal y aumentado las activas.

VII.1.2.- Corrosión Galvánica

La corrosión galvánica se produce cuando se tienen zonas anódicas y catódicas en un mismo metal cubiertos por un fluido conductor o cuando dos metales de composiciones diferentes entran en contacto el uno con el otro y están expuestos a la misma solución. Todo este conjunto actúa como una celda galvánica produciendo una corriente eléctrica, atacando al metal o a la zona anódica (menos noble). Este tipo de corrosión puede presentarse sin que los metales estén en contacto físico, para esto deben cumplirse los siguientes casos:

- Soluciones distintas
- Soluciones similares de concentraciones distintas
- Superficies con irregularidades
- Distintas velocidades de aeración o agitación en la solución, o distintas velocidades en la circulación del fluido

A pesar de que el AI es un metal noble existen ciertas circunstancias donde este será activo, como sería el caso de una capa de óxido insoluble que cubriría al metal anódico, esto haría que la corriente eléctrica cambiara de sentido, siendo entonces el AI el que pasaría a ser disuelto como ánodo.

La corriente eléctrica y la polaridad son muy importantes ya que esto permite que se cree una película de óxido estable que protege la superficie del acero o puede ocurrir lo contrario que se deshaga aumentado la velocidad de la corrosión, estos parámetros se pueden observar con las curvas de polaridad las cuales nos indicaran a que voltajes y corrientes la capa pasiva es estable.

Para poder prevenir la corrosión galvánica es necesario uniformar los tipos de metales o aleaciones que entran en la construcción del equipo, las condiciones de las superficies bañadas, las soluciones contenidas en el quipo, así como la temperatura, la agitación y la concentración de las mismas. Cuando es inevitable tener dos metales de composiciones diferentes, se puede reducir la corrosión galvánica aislándolos eléctricamente.

VII.1.3.- Corrosión por Picaduras

La corrosión por picaduras aparece cuando una porción del metal pierde su pasividad, provocando la aparición de ánodos y cátodos en el metal generando pares galvánicos, la severidad del ataque corrosivo depende de la concentración del electrolito y el potencial eléctrico que exista. Debido a que el ánodo generado es pequeño en comparación al cátodo el ataque se agudiza hacia el interior de la pieza.

Este tipo de corrosión tiene diferentes comportamientos a diferentes pH teniendo un aumento de perforaciones cuando se maneja un pH entre 7-12 y disminuyen cuando están entre 4-6, por lo que es necesario mantener bajos niveles de pH para evitar este tipo de ataques corrosivos en metales.

VII.1.4.- Corrosión por Contacto

Este tipo de corrosión se caracteriza por que el fluido en el que está en contacto el AI no tiene movimiento alguno y es conductor eléctrico, causando una deficiencia de oxígeno en la superficie del metal y evitando la regeneración de la capa pasiva una vez que está fue destruida. Otra desventaja radica en la nula movilidad del fluido generando puntos galvánicos produciendo corrosión por picaduras.

Para evitar o reducir la corrosión por contacto se emplean aceros inoxidables con alta resistencia a la corrosión y primordialmente evitar que el fluido se quede sin movimiento entre las superficies por donde este circula.

VII.1.5.- Erosión Corrosiva

La erosión corrosiva es un fenómeno inverso a la corrosión por contacto, debido a que la velocidad de un fluido corrosivo causa un desgaste sobre la superficie del metal destruyendo la capa pasiva y por lo tanto al no haber oxigeno no hay regeneración de la misma y se propicia la corrosión del metal.

Para prevenir esta erosión de la capa si se trata de un fluido altamente corrosivo es esencial disminuir su velocidad y dentro de los mantenimientos hacerles circular un fluido oxidante a alta velocidad para que este se lleve las impurezas dejadas por el anterior fluido y ayude a la recuperación de la pasividad del acero.

VII.1.6.- Corrosión por Fatiga del Material

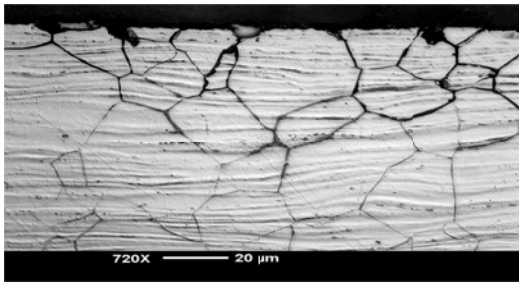
La corrosión por fatiga se presenta cuando en una misma pieza ciertas partes de esta tienen esfuerzos acumulados causadas por fabricación, por trabajo en frio o por la operación del mismo material que permita que ciertas zonas generen estos esfuerzos. Estas concentraciones permiten que esa parte sea un poco más anódica que el resto del material y por lo tanto al tener un ánodo, un cátodo y un fluido conductor propiciamos la formación de celdas galvánicas.

La mejor manera de evitar estas tensiones dentro de la fabricación de una pieza es proporcionarle un tratamiento de recocido, para que de esta manera la pieza sea completamente homogénea y evitar la generación de zonas anódicas por concentración de esfuerzos.

VII.1.7.- Corrosión Intergranular

Ataque de tipo localizada que se presenta en los límites de grano, ocurre cuando existe una precipitación de una fase sólida que en el caso de los AI es el carbono con el cromo y otros metales presentes en la aleación formando carburos. Al precipitarse el cromo junto con el carbono de los límites del grano, estas zonas dejan de tener riqueza en cromo y por lo tanto su resistencia a la corrosión disminuye considerablemente. Esto origina zonas anódicas y catódicas, dando como resultado un par galvánico que al igual que la corrosión por picaduras la intensidad del ataque se concentra hacia el interior de la pieza.

Figura VII.4 Corrosión intergranular en un acero austenítico



Fuente: Colombier Louis Aceros inoxidables: aceros refractarios 1968

La figura VII.4 muestra la corrosión intergranular que se forma en los aceros austeníticos, ya que estos son más sensibles a este tipo de corrosión. En el capítulo V.1.2 se mencionó que los aceros austeníticos pueden ser más resistentes a la corrosión intergranular si se les agrega Titanio, Niobio y Tantalio para que el carbono se precipite junto con estos elementos y no con el cromo.

VII.1.7.1.- Prevención de la Corrosión Intergranular

Para aumentar la resistencia a la corrosión intergranular los AI son sometidos a tratamientos o durante su proceso de fabricación se les realizan ciertas modificaciones que impide la precipitación del carburo de cromo, siendo estos medios de prevención:

- Regeneración
- Deformación previa en frio
- Medios metalúrgicos

VII.1.7.1.1.- Regeneración

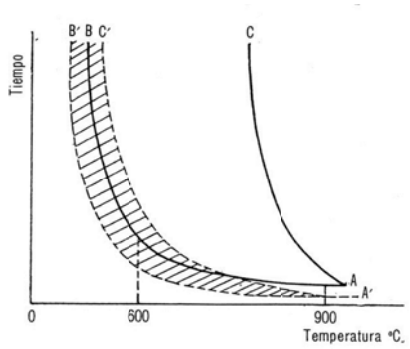
Cuando una pieza de acero inoxidable autentica fue sometida a un proceso de soldadura, es necesario aplicar un recocido en toda la piez, ya que las zonas adyacentes a la soldadura estuvieron expuestas a temperaturas entre 400 y 850°C, provocando así una precipitación de los carburos de cromo. La tabla V.1 nos indica las temperaturas para realizar un recocido cuando el acero no tiene elementos estabilizadores.

VII.1.7.1.2.- Deformación Previa en Frio

Bain, Aborn y Rutherford dictan que la deformación en frio puede contribuir al aumentar la resistencia a la corrosión intergranular, sobre todo cuando el acero experimenta después de la deformación un calentamiento de una duración relativamente corta entre 650 y 800ºC. Este rango de temperaturas no es un recocido de la pieza sino que es una regeneración o estabilización de la pieza. Cuando no hay una deformación previa al calentamiento el periodo de tiempo expuesto a estas temperaturas es mucho más largo que en un recocido.

La figura VII.5 nos presenta una gráfica de regeneración de un acero austenítico, cuando la pieza fue sometida a deformación en frio antes del calentamiento el tiempo de exposición a las temperaturas citadas es de 1 hora. Por el contrario cuando esta no ha sido sometida a la deformación en frio el tiempo es demasiado largo incluso superando las aplicadas en un recocido.

Figura VII.5 Campo de susceptibilidad



Fuente: Colombier Louis Aceros inoxidables: aceros refractarios 1968

Sin embargo esta solución a la corrosión intergranular presenta dos desventajas:

- Únicamente puede aplicarse sobre formas que puedan experimentar una deformación regular como son bandas, chapas e hilos y no es posible aplicarlo a piezas forjadas, moldeadas o barras.
- El metal deformado y calentado entre 650 y 800ºC no es completamente blando y presenta dificultad para conformarlo.

VII.1.7.1.3.- Medios Metalúrgicos

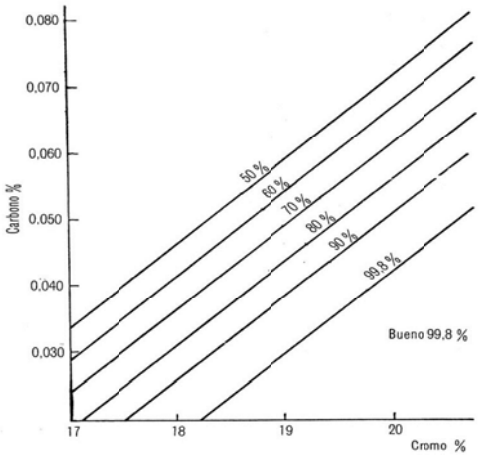
Para este método se emplean 3 formas diferentes para combatir la corrosión intergranular:

1. Disminución del contenido de carbono
2. Adición de elementos como el titanio y niobio que forman carburos insolubles
3. Cambio a una estructura austenoferrítica

VII.1.7.1.3.1.- Disminución del Carbón

La disminución de los contenidos de carbono en un acero austenítico a 0.03% como máximo nos permite evitar la precipitación de estos carburos, incluso pueden mantenerse trabajando en las temperaturas donde se precipitarían estos carburos durante tiempos prolongados, pero no es recomendable no exceder estos tiempos para evitar fomentar su precipitación.

Figura VII.6 Probabilidad sobre la aparición de corrosión intergranular



Fuente: Colombier Louis Aceros inoxidables: aceros refractarios 1968

En la figura VII.6 se puede observar la probabilidad de aparición de corrosión intergranular en un acero austenítico al depender de las cantidades de cromo y carbono. En esta figura se demuestra que los bajos contenidos de carbono nos garantizan casi una nula aparición de este tipo de corrosión.

VII.1.7.1.3.2.- Adición de Elementos Estabilizadores

Dentro de la adición de elementos estabilizadores para impedir la corrosión intergranular se dispone del Titanio, Niobio y Tantalio. Estos elementos se combinan fácilmente con el carbono, de tal manera que precipitan en forma de carburos de Titanio, Niobio y Tantalio evitando la precipitación con el cromo.

Para saber la cantidad necesaria de titanio o de niobio a agregar en un acero austenítico se siguen las siguientes fórmulas:

Expresión VII.1 En relación al titanio

$$\frac{Ti}{C} = 4$$

Expresión VII.2 En relación al niobio

$$\frac{Nb}{C} = 8$$

En cuanto al Tantalio este puede remplazar al niobio sin embargo su peso atómico al ser el doble que el del niobio, la cantidad para añadirse tiene que ser 20 veces mayor que el contenido de carbono existente en el acero.

VII.1.7.1.3.3.- Cambio a Estructura Austenoferrítica

La presencia de ferrita provoca en aceros de doble fase que la precipitación de carburos sea sobre los planos de deslizamiento y no sobre los límites de grano, debido a que el contenido de cromo y su difusión es más fácil en la ferrita que en la austenita. A la hora de producirse el empobrecimiento de cromo la zona ferrítica tendría todavía suficiente cantidad de cromo para resistir la corrosión intergranular.

VII.2.- Métodos para la Conservación de la Capa Pasiva

Los aceros inoxidables tienen la característica de resistir a la corrosión debido a la capa pasiva que está en toda su superficie, pero cuando esta capa se ve contaminada o destruida, es

necesario realizar ciertos tratamientos superficiales para poder recuperarla o mejorar sus características que nos permitan un aumento en su resistencia.

Para evitar la contaminación, ayudar a la regeneración y evitar la eliminación completa de la capa pasiva, se emplean los siguientes métodos:

- Descascarillado
- Decapado
- Pasivación con ácidos
- Limpieza

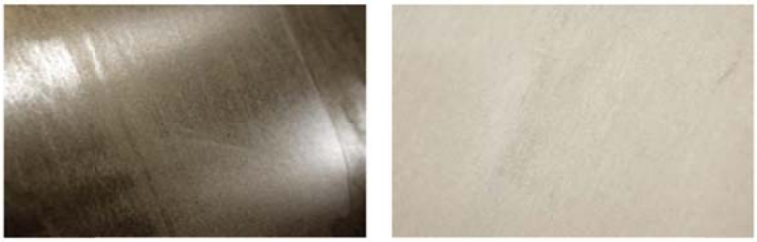
VII.2.1.- Descascarillado

El objetivo principal de este método es en eliminar una capa gruesa de óxido visible en la superficie de los AI, ya que la capa pasiva de óxido tiene que ser fina, bien adherida e invisible para que evite la corrosión. Este proceso se realiza de manera rutinaria en las acerías antes de entregar el AI al cliente.

El descascarillado se realiza en dos pasos, el primero consta en el desprendimiento de la capa gruesa de óxido de la superficie del metal por medios mecánicos ya sea desincrustación, granallado o cepillado, el segundo paso es en retirar la cascarilla que se desprendió del proceso anterior e inmediatamente sigue un proceso de decapado para retirar una pequeña porción de la superficie del metal que estuvo expuesta a esta cascarilla.

En la figura VII.7 se puede observar a la izquierda una lámina de acero inoxidable antes del descascarillado, el color gris de esta capa de óxido se produce gracias a las altas temperaturas de laminación. A la derecha en la misma figura se observa la misma lámina después del proceso de descascarillado además de tener un decapado en su superficie.

Figura VII.7 Descascarillado de acero inoxidable



Fuente: Crookes Roger Sheffield Euroinox Bélgica 2004

VII.2.2.- Decapado

El proceso de decapado se basa en la eliminación de una capa muy fina de la superficie de los aceros inoxidables. Con este proceso se eliminan contaminaciones por partículas metálicas, defectos de mecanizado y prepara al acero para un proceso posterior ya sea para un acabado superficial o para pintado.

Durante el decapado se emplean soluciones como ácido nítrico, utilizado principalmente para el decapado de aceros austeníticos y el ácido fluorhídrico para aumentar la homogeneidad y mejorar la apariencia.

Para realizar un decapado de forma correcta y exitosa se emplean 3 métodos, los cuales son:

- Decapado por Inmersión en tanque
- Decapado por aspersión

El decapado por inmersión en tanque tiene la ventaja de que tratara todas las superficies de la pieza en un 100% y lograra una óptima resistencia contra la corrosión y un acabado uniforme. Como la pieza se sumerge en un tanque es necesario al final limpiar toda la superficie del metal, para asegurar que los deshechos que se producen en el decapado no se vengan con la pieza.

Figura VII.8 Decapado por inmersión

Fuente: Crookes Roger Sheffield Euroinox Bélgica 2004

El decapado por aspersión se emplea cuando la pieza es muy grande y no hay forma de desarmarla para decaparla con el método anterior. Una desventaja de este método es el tiempo de contacto con el ácido, debido a que podría producirse corrosión en las zonas tratadas si no se maneja con cuidado el tiempo de decapado.

VII.2.3.- Pasivación con Ácidos

De acuerdo a la ASTM A380 (Imagineering 2009) la pasivación "es la remoción de compuestos de hierro sobre la superficie del AI, empleando en su mayoría tratamientos por solución acida que removerá la contaminación sobre su superficie y que afectara de manera insignificante las propiedades de estos". Pasivación también se refiere "al tratamiento químico por medios oxidantes que se le da al acero inoxidable, como es en soluciones de ácido nítrico, las cuales fomentan la formación de la capa pasiva".

Cuando el AI está sometido a altas temperaturas se forma una capa de óxido gris que (vista en la figura VII.7) aunque normalmente esta capa reduce la resistencia a la corrosión, es muy benéfica para los AI cuando está sometido a trabajos de altas temperaturas, por lo que esta capa tiene que ser gruesa para evitar la oxidación y mientras más gruesa sea mejor resistencia tendrá.

Cuando el AI tiene un ambiente de trabajo a bajas temperaturas, la capa de óxido pasivo de estos aceros tiene que ser fina e invisible. Aunque esta capa se regenera sola a veces es necesario ayudarla a recuperarse con una mayor velocidad, para esto se emplean ácidos oxidantes como el nítrico (es necesario tener presente que el pasivado no tendrá ningún efecto benéfico si la superficie del metal está contaminado con cascarilla).

Para poder realizar el proceso de pasivación de forma general en piezas de AI la Asociación de Industrias de Acabados de Superficies (AIAS Enero del 2008) recomienda realizar como primeros pasos realizar una limpieza quitando todo residuo metálico, orgánico y fluidos que puedan contaminar la capa. Una vez que se removieron todos estos compuestos deben de considerarse 3 variables:

- La temperatura.- nominalmente se emplean entre 70^{o}C
- El tiempo de inmersión.- se emplean alrededor de 20 minutos hasta 2 horas
- La concentración de la solución pasivadora.- varía entre 20% hasta el 50% dependiendo el volumen de las piezas. Para el cuidado control de la solución se emplea agua purificada, impurezas metálicas en ppm (partes por millón) y mantenimiento químico de la solución.

Para que el proceso de pasivación sea satisfactorio para cada uno de los diferentes tipos de AI, se tiene que elegir la mejor solución y su mejor control, así como el tiempo que debe de estar sumergida la pieza a pasivar.

Tabla VII.1 Soluciones para descontaminar y pasivación		
Baño de 1000L	Aceros austeníticos	Aceros austeníticos y ferríticos con un 13% de Cr
Ácido nítrico (62%)	250L	500L
Dicromato de potasio	--	2% en peso
Agua	750L	500L

Fuente: Martínez Enrique AIAS Barcelona España Enero 2008

En la tabla VII.1 se muestran las condiciones necesarias para pasivar aceros austeníticos y ferríticos. A continuación se dan los tiempos necesarios de inmersión para cada uno de los diferentes tipos de acero con el fin de obtener una pasivación exitosa y evitar que el mismo tratamiento cause la destrucción de la capa.

- La temperatura del baño debe de ser alrededor de los 50°C
- El tiempo de inmersión para un acero austenítico es de 15 minutos
- El tiempo de inmersión para un acero martensítico es de 30 minutos
- El tiempo de inmersión para un acero ferrítico es parecido al de los austeníticos según la cantidad de cromo que contengan

Las recomendaciones otorgadas por la AIAS (Enero del 2008) se realizan cuando el acero fue sometido previamente a un decapado y la temperatura de la solución es de 50°C. Sin embargo cuando se emplea una temperatura menor a los 50°C (no menor a los 20°C) los tiempos se elevan a 30 minutos en caso de los austeníticos y ferríticos y a 3 horas los martensíticos. Puede ocurrir que una pieza no fue sometida a un decapado, para estos casos la pasivación con ácido nítrico se efectúa con tiempos mayores a las 3 y 5 horas.

VII.2.4.- Limpieza

Para mantener en perfectas condiciones la capa pasiva, no solamente basta con favorecer el regeneramiento de esta, también tiene que limpiarse la superficie para evitar que se contamine una vez regenerada.

El AI se puede limpiar de forma fácil con agua y jabón, se enjuaga dos veces, una utilizando agua caliente y la siguiente con agua fría. Esta forma de limpieza se ejecuta cuando el acero no tiene manchas o decoloración superficial, si llegase a tenerlas es necesario identificar el problema para posteriormente limpiarla de manera adecuada. La tabla VII.2 muestra una serie de problemas presentadas en el AI e indica el agente con el que se tiene que limpiar.

Tabla VII.2 Limpieza del acero inoxidable	
Problema	**Agente limpiador**
Limpieza rutinaria en todos los acabados	Jabón o detergente suave y agua caliente
Huellas digitales en los acabados	Jabón y agua caliente o disolvente orgánico (acetona)
Manchas persistentes y decoloración	Limpiadores poco corrosivos
Depósitos de cal por agua	Solución compuesta de 1/4 de vinagre y 3/4 de agua
Aceite o marcas de grasa	Disolventes orgánicos (acetona). Grasa endurecida se puede eliminar con amoniaco previo al disolvente
Arañazos en la superficie	Para rayones leves utilizar paños de nylon impregnados. Para rayones de profundidad utilizar abrasivos libres de hierro

Fuente: Grupo GRUPSA España Madrid E28971

CAPÍTULO VIII

TRABAJO DE CAMPO

El acero inoxidable es una herramienta de gran importancia en la preparación de alimentos, ya que este no hace reacción con ellos (no como otros metales que tiene reacción con algunos alimentos). Sin embargo a través de todo este tema expuesto en este trabajo de tesis, hemos podido conocer el uso de cada familia de los AI, encontrando diferencias tanto en propiedades mecánicas como en su resistencia corrosiva. Es por esta razón que los aceros 430 (ferrítico) y 304 (austenítico) se sometieron a pruebas de corrosión (asesoradas por el Maestro en Ciencias Carlos Rodríguez Rivera) en medios comúnmente empleados para la cocción de alimentos. La elección de estos dos tipos de aceros sobre el martensítico radica en que este último tiene la más baja resistencia corrosiva, y su mayor uso es como herramientas de corte.

VIII.1.- Preparación del Equipo

Para realizar las pruebas corrosivas y conocer que medios son benéficos para la creación de la capa pasiva, se emplearon las siguientes sustancias que normalmente pueden estar presentes en algún preparado alimenticio:

- Vinagre
- Jugo de limón
- Agua con sal (de mesa)
- Agua con sal (de mar)

Obviamente ningún alimento se prepara solamente con estas sustancias por esta razón el propósito de emplearlos es para conocer el comportamiento de cada acero cuando se varía el pH o cuando se tiene una mayor cantidad de sales minerales, este es el motivo de la selección de estas sustancias.

Para cada acero se realizaron 2 pruebas siendo estas las siguientes:

- Potencia de corrosión contra tiempo
- Curvas de Tafel

Cada prueba se realizó con el quipo GillAC intruments, emepleandose como software de apoyo el GillAC sequencer y GillACcore_run. El primero de los programas nos permite ajustar el tiempo, el intervalo de potencial y el área al que se someterá el acero de prueba. El segundo nos permite observar el potencial de reposo, la corriente, el tiempo transcurrido y la formación de la gráfica donde se extraerán los datos para posteriormente graficarse en Excel.

Figura VIII.1 GillAC instruments

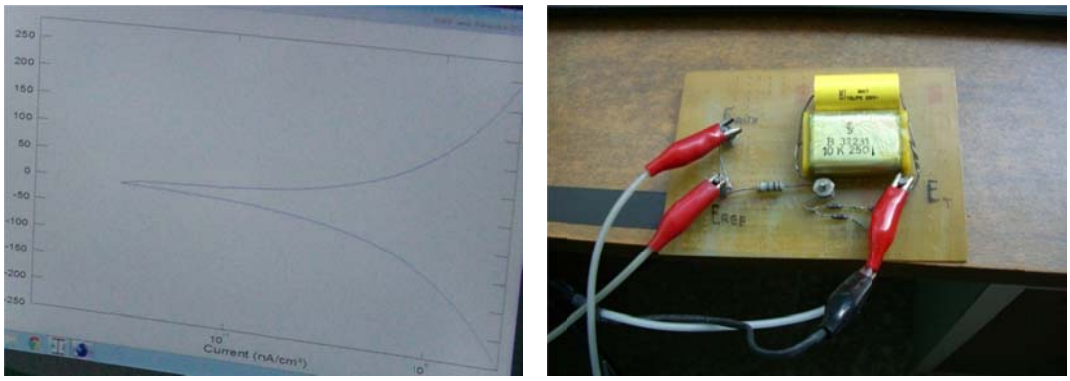
Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

En la figura VIII.1 se observan las conexiones siendo estas de izquierda a derecha las siguientes:

- Electrodo de trabajo.- Es la conexión que va directamente al metal en estudio, que en nuestro caso es el acero inoxidable 304 y 430.
- Electrodo de referencia.- Su función es medirnos la diferencia de potencial con respecto al material en estudio. El electrodo empleado es de calomel.
- Electrodo auxiliar.- Es aquel que permite la conexión con el electrolito permitiendo la circulación de corriente al material en estudio. El electrodo empleado es de grafito.

Antes de realizar la primera gráfica del día el equipo tiene que calibrase por medio de un circuito que tiene como función proporcionar una corrosión fantasma. Para saber si el equipo fue calibrado de manera adecuada, se obtiene una gráfica de Tafel (la cual en pruebas reales proporciona la velocidad de corrosión del metal en estudio). La figura VIII.2 nos permite ver el circuito fantasma empleado para calibrar el equipo, además podemos observar la gráfica generada durante la prueba.

Figura VIII.2 Circuito y grafica generada durante la calibración del equipo



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

La figura VIII.3 nos muestra las celdas donde se realizaran las pruebas. El área de exposición está marcada por el barreno con un área de 0.785 cm^2, la cual nos permitirá saber la densidad de corrosión que existe en el metal en estudio. Esta densidad es de suma importancia ya que con ella podemos obtener las gráficas de Tafel.

Figura VIII.3 Celdas de prueba

Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

VIII.2.- Prueba Potencial de Corrosión contra Tiempo

La prueba de potencial de corrosión a diferencia de las otras que se describirán más adelante se realiza sin aumento de voltaje, es decir solamente se va a medir la diferencia de

potencial que existe entre el líquido y el metal en estudio dentro de un intervalo de tiempo definido. La primera parte consiste en medir el potencial de reposo en el momento preciso en que la sustancia y el metal entran en contacto, a partir de allí se procede a medir un intervalo de tiempo entre 1800 a 3600 segundos.

Con esta prueba podemos aclarar si el metal en dicho fluido es capaz de crear, mantener y estabilizar una capa pasiva en su superficie, esto se muestra cuando el potencial medido tiende a la parte positiva, por el contrario si se dirige hacia la parte negativa esto indica que la capa se empieza a destruir y es poco estable, demostrando así que sustancias hacen que nuestro acero sea más anódico o catódico.

Antes de realizar la prueba ambas muestras tiene que ser lavadas con acetona y lijadas para eliminar impurezas superficiales; la lija debe ser del número 360.

Una vez realizado el procedimiento de preparación de las muestras, los metales de prueba se sujetan con un perno hacia las celdas de prueba corroborando que no allá fuga. Hecho esto se está listo para realizar las pruebas de potencial de corrosión.

VIII.2.1.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Contacto con Vinagre

Para esta prueba se empleó un vinagre de cocina cuyo pH medido fue de 3, esto quiere decir que es una sustancia acida. Normalmente estos pueden pasivar a los inoxidables, sin embargo una larga exposición nos ofrece el efecto contrario.

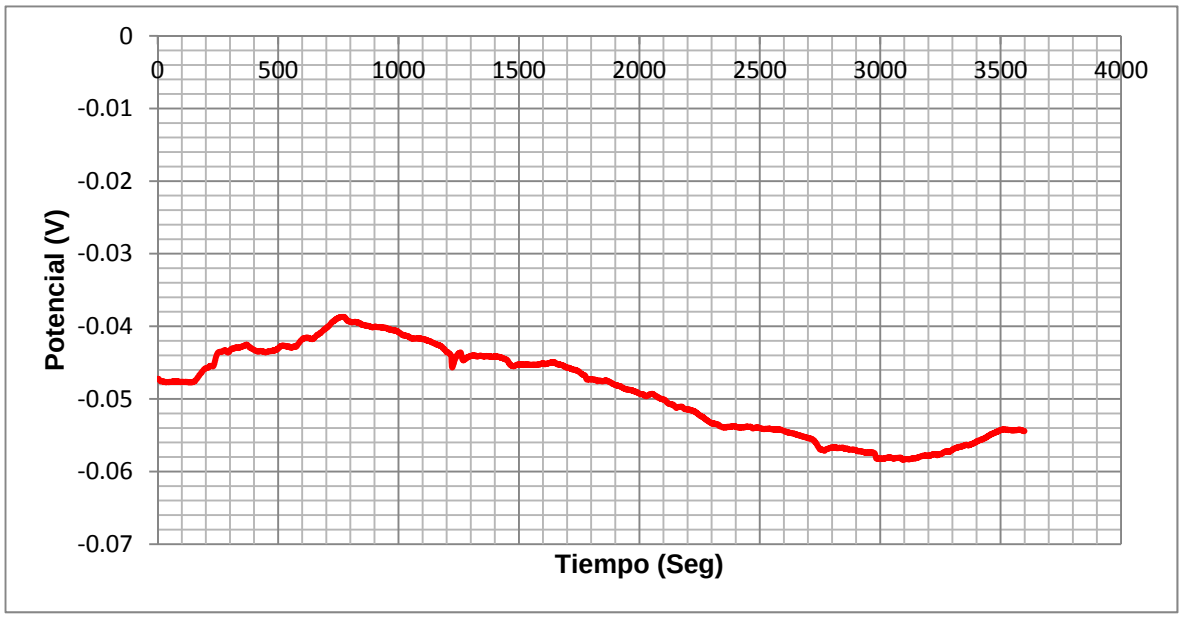
Para dichas pruebas tenemos un acero 430 ferrítico y un 304 austenítico. La mayoría de las ollas hechas de acero inoxidable son austeníticas, sin embargo para probar la resistencia corrosiva de estos aceros haremos la comparación con un ferrítico que es el siguiente acero más resistente (el de más baja es el martensítico).

El tiempo empleado para ambas pruebas fue de 3600 segundos debido a que era la primera vez que se realizaba una prueba con este tipo de soluciones.

La grafica VIII.1 representa el potencial de corrosión medido con respecto al tiempo de un acero 304. En ella podemos observar como a partir del potencial de reposo (-0.047214 V) el metal intenta acoplarse al medio que lo rodea al manejar potenciales positivos, esta capa será del tipo catódica por lo tanto protegerá al acero, pero al ser negativas la capa será anódica y por lo tanto ofrecerá poca protección ante un ataque corrosivo.

Podemos observar en toda la gráfica que existe una pequeña diferencia de 20 mV, y como maneja bajos potenciales negativos el vinagre conserva al AI en un estado pasivo.

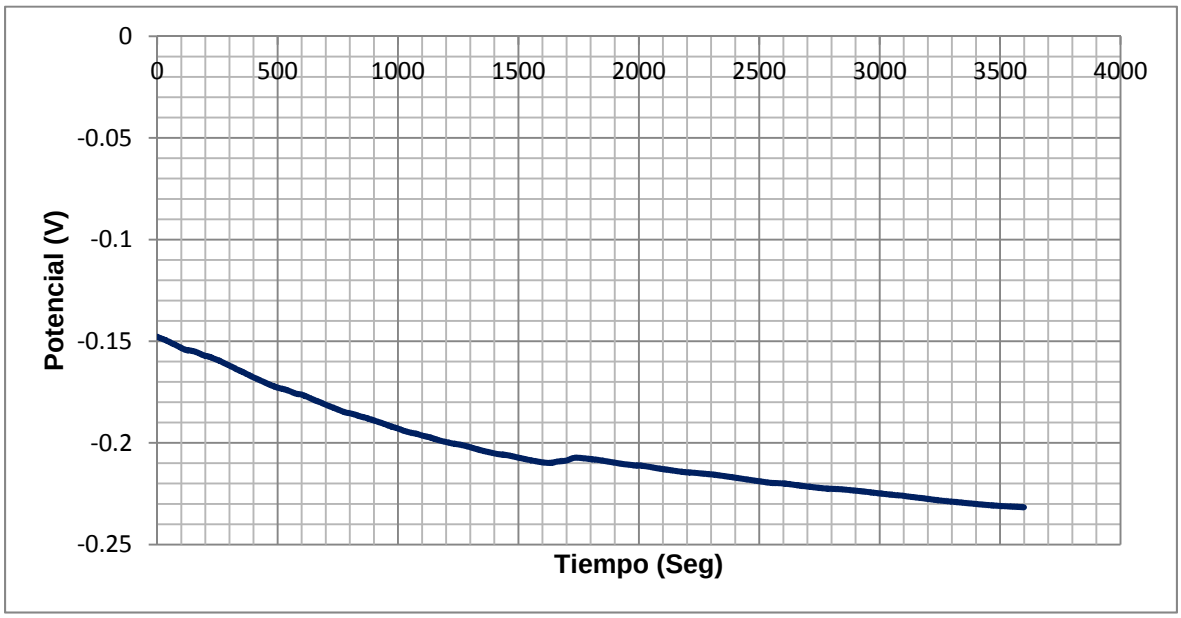
Grafica VIII.1 Potencial de corrosión en acero 304 con vinagre



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

En la gráfica VIII.2 tenemos el potencial de corrosión de un acero 430. Su potencial de reposo comienza a los -0.14779 V un potencial 3 veces mayor al del 304 y con el transcurso del tiempo este acero no alcanza una estabilización en el vinagre durante el lapso de tiempo que duro la prueba. Sin embargo al manejar potenciales negativos un poco más altos no significa que se esté corroyendo, si no que la capa no es del todo estable y puede ser quebrada con facilidad.

Grafica VIII.2 Potencial de corrosión en acero 430 con vinagre



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

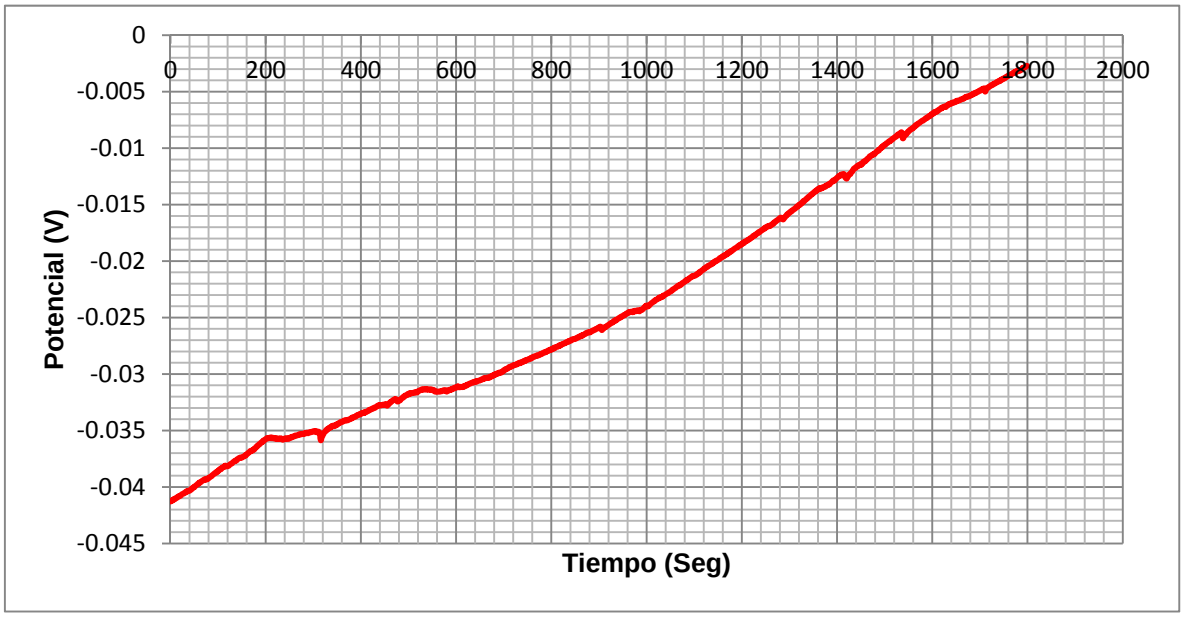
VIII.2.2.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Contacto con Jugo de Limón

El jugo de limón es un ácido cítrico de un pH de 3 igual que el vinagre, sin embargo veremos como las gráficas son totalmente diferentes debido a la composición del vinagre ya que es ácido acético al 5% disuelto en agua.

La grafica VIII.3 nos muestra el potencial de corrosión de una cero 304, teniendo un valor de -0.041282 V de potencial de reposo, un valor poco más bajo que el del vinagre. La grafica tiene una tendencia hacia los potenciales positivos, esto quiere decir que el AI sigue pasivandose y forma una capa pasiva de mejor calidad que con el vinagre.

Comparando la gráfica del vinagre con la del jugo de limón tenemos que este último fluido de prueba es un excelente pasivador del AI 304.

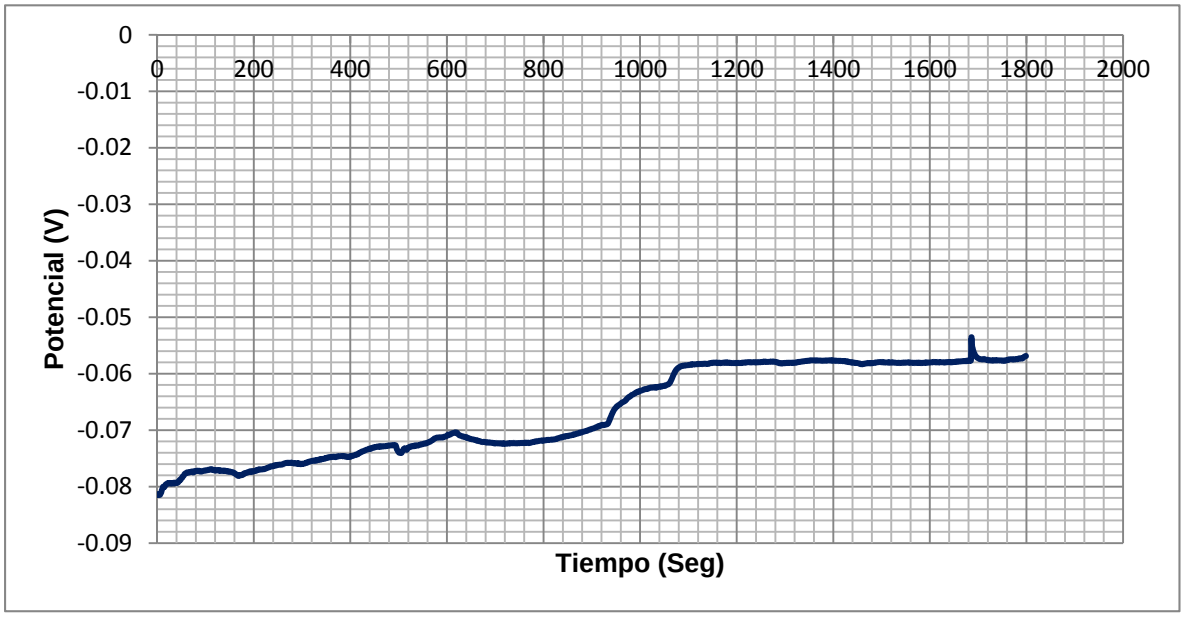
Grafica VIII.3 Potencial de corrosión en acero 304 con jugo de limón



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

La grafica VIII.4 representa el potencial de corrosión de un acero 430, observemos que también tiene una tendencia a potenciales positivos, sin embargo a diferencia del 304 el 430 tiene una estabilización de su capa a los 1080 segundos. Esta horizontal indica que el acero alcanzo su máximo grado de resistencia ante este medio, por lo tanto su capa tiene más calidad en este medio que en el vinagre pero en el jugo de limón el acero 304 posee una mejor calidad de su capa pasiva que el acero ferrítico.

Grafica VIII.4 Potencial de corrosión en acero 430 con jugo de limón



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

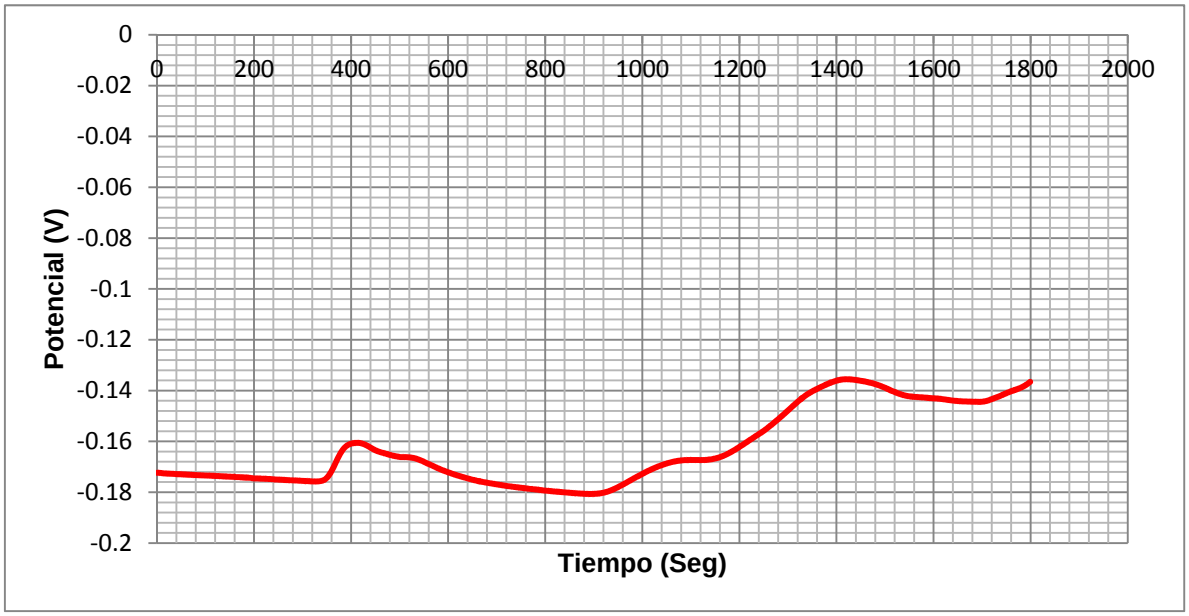
VIII.2.3.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Agua con Sal (fina)

Como se ha podido ver en las pruebas anteriores el pH de una solución puede ser benéfica para un estado pasivo. También se notó que dependiendo del tipo de ácido los beneficios serán mejores que en otros. Cada solución puede ser buena o mala conductora de electricidad, esto nos puede influir de manera significativa en la pasividad de los aceros inoxidables.

El agua de mar es un líquido alcalino que tiene un pH entre 7.4 a 8.5, sin embargo la sal de mesa es neutra, por lo tanto al disolver esta sal en agua el pH obtenido para esta prueba es de 6 (esto se debe a la cantidad de cloro presente en cada colonia). La siguiente prueba se realizó disolviendo 30 gramos de sal fina en 1 litro de agua dulce.

La grafica VIII.5 muestra el potencial de corrosión de un acero 304 en agua con sal fina, el potencial de reposo fue -0.17232 V, el más alto dentro de las pruebas de este tipo para el acero 304. A pesar de este potencial tiene una diferencia de 40 mV, sin embargo al presentarse dentro de los potenciales negativos la capa pasiva es de menor calidad ofreciendo menor resistencia a la corrosión.

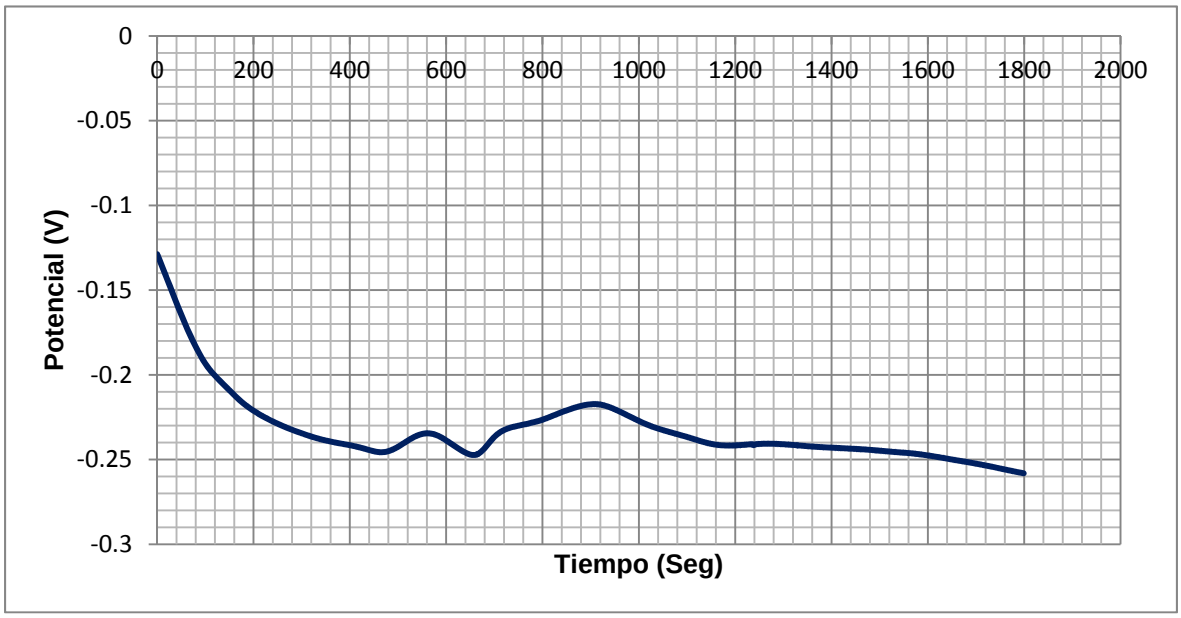
Grafica VIII.5 Potencial de corrosión en acero 304 con agua salada (fina)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

La grafica VIII.6 nos muestra la tendencia de un acero 430 cuando es expuesto al agua con sal fina, su potencial de reposo es menor que la del acero 304 siendo esta de -0.12878 V, sin embargo tiene una gran caída de potencial que después se estabiliza alrededor de los 400 segundos de iniciada la prueba. A partir del tiempo mencionado el acero alcanza una diferencia de potencial de 30 mV. Los potenciales negativos que maneja son hasta el momento los más altos para un AI, por lo tanto la calidad de esta capa pasiva es de mala calidad y debido que todos los metales no poseen una superficie homogénea, el AI ferrítico en agua con sal es más propenso a recibir un ataque corrosivo por picaduras.

Grafica VIII.6 Potencial de corrosión en acero 430 con agua salada (fina)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

VIII.2.4.- Potencial de Corrosión en Acero 304 y 430 en Agua con Sal (gruesa)

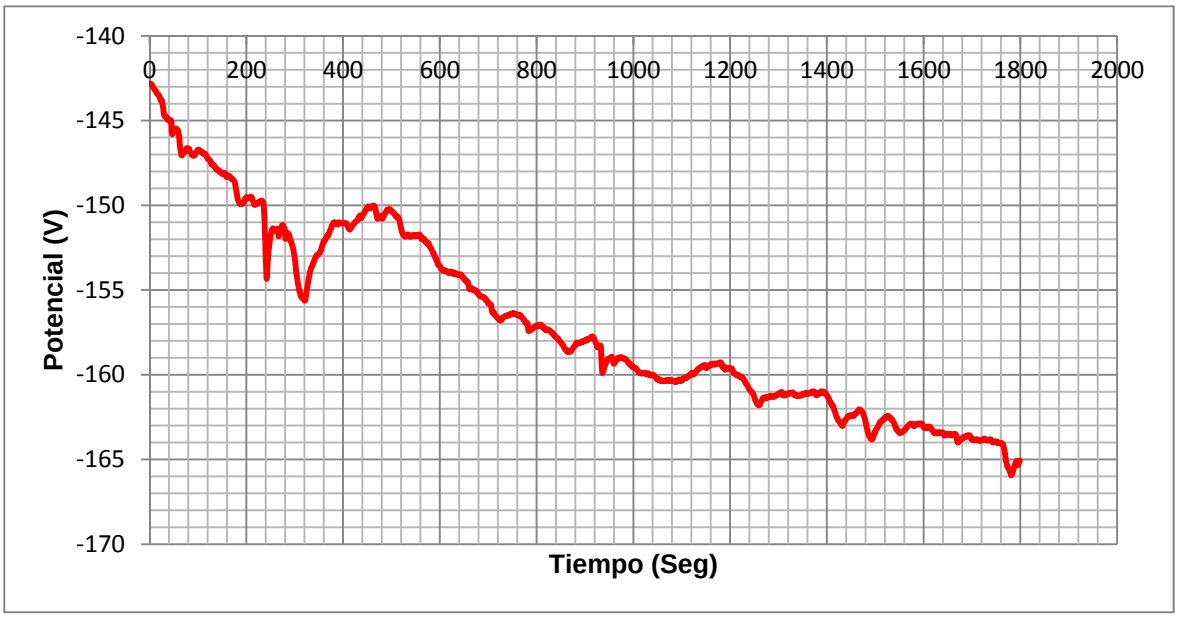
Debido al refinamiento de la sal fina el AI no poseía una buena calidad en su capa pasiva, aun así se comprueba que los aceros 304 son los ideales para la elaboración de productos en las que se realiza el proceso de cocción de los alimentos.

La siguiente prueba se realizó con los mimos parámetros que con la sal fina 30 gramos en 1 litro de agua con la diferencia que esta vez la sal era del tipo gruesa y de mar.

La grafica VIII.7 nos muestra el comportamiento de un acero 304 en agua con sal del tipo grueso. Se puede observar como su tendencia es directamente hacia los potenciales negativos, afectando de manera notoria la calidad de la capa pasiva de los aceros 304.

La diferencia entre ambas sales radica en la calidad de la capa la cual es mejor cuando se empela sal fina que cuando se emplea la del tipo gruesa, esto se debe a la cantidad de minerales que poseen cada sal, en la fina su composición está dada al 99% de cloruro de sodio mientras que en la gruesa al tener una gran cantidad de minerales como cloro, sodio, sulfatos, calcio y potasio, lo hace un mejor conductor de electrones perjudicando radicalmente la calidad de la capa pasiva del AI.

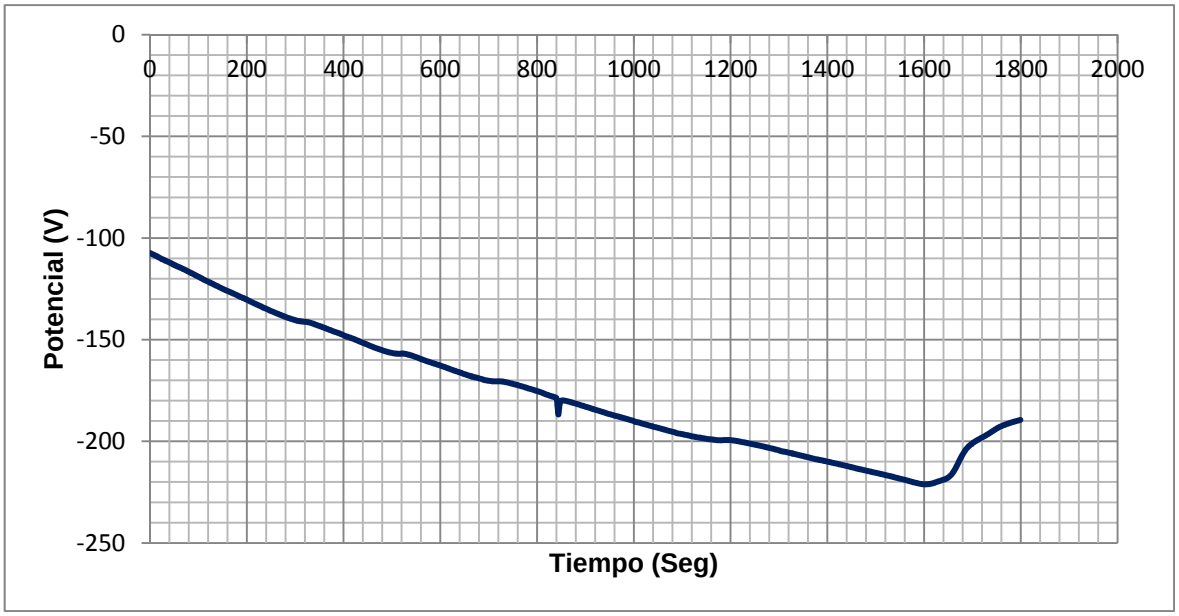
Grafica VIII.7 Potencial de corrosión en acero 304 con agua salada (gruesa)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

La grafica VIII.8 muestra el comportamiento de un acero 430 en agua con sal de tipo gruesa. Al igual que en la gráfica VIII.6 este acero tiende hacia los potenciales negativos, pero existe una diferencia entre la sal fina y la gruesa en esta prueba, la cual radica en que los potenciales empleados en la primera son mayores, pero la sal fina tiene una zona donde existe un comportamiento constante que a diferencia de la sal gruesa no tiene dicha zona.

Grafica VIII.8 Potencial de corrosión en acero 430 con agua salada (gruesa)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Comparando las gráficas VIII.7 y 8 sabemos que la calidad en sus capas es baja, sin embargo en el mismo medio y empleando el mismo tiempo el acero 304 tendría una mayor resistencia a la corrosión que el 430 esto por las pendientes mostradas y el valor de los potenciales que manejan en cada una de las soluciones.

VIII.3.- Calculo de la Velocidad de Corrosión

Existen diferentes medios, formas y fórmulas para calcular la velocidad de corrosión de un metal. La empleada en este proyecto de tesis es conocida como las curvas de Tafel, teoría desarrollada en 1905 por el suizo Julius Tafel.

Las curvas de Tafel se basan en controlar el potencial desde un valor negativo hasta uno positivo de la misma magnitud, generando una curva catódica y después una anódica. En este proyecto estos valores van desde -300 hasta 300 mV, cuyo punto de intersección entre ambas curvas es el potencial de reposo existente entre el fluido y el metal en estudio. Una vez que tenemos las curvas se trazan dos pendientes, y la intersección de ambas nos indicara la corriente de corrosión del metal (LogIcorr). Las curvas mostradas se expresan de forma logarítmica en base a la corriente, la intersección de las pendientes nos dará el valor de la densidad corrosiva en forma logarítmica por

lo que posteriormente será necesario utilizar la siguiente expresión para calcular la densidad de corriente corrosiva.

Expresión VIII.1 Calculo de la densidad de corrosión

$$I_{corr} = 10^{Log\ I_{corr}}$$

Con la corriente calculada emplearemos la siguiente fórmula para calcular la velocidad de corrosión:

Expresión VIII.2 Velocidad de corrosión

$$\mathrm{V_{corr}} = 0.129(\frac{\mathrm{PE}}{\mathrm{D}})(\mathrm{I_{corr}})$$

Dónde:

- $V_{corr.}$- es la velocidad de corrosión del metal medida en mpy (milésimas de pulgada por año)
- PE.- es el peso equivalente del metal
- D.- es la densidad del metal (g/cm^3)
- $I_{corr.}$- es la corriente de corrosión del metal
- El número 0.129 es perteneciente a la constante de Faraday representada por las unidades mpy*g/μA*cm

Dentro de las unidades para medir la corrosión tenemos la tabla VIII.1 que nos muestra los rangos que determina que tan bueno es el metal para resistir la corrosión.

Tabla VIII.1 Valores de resistencia a la corrosión

Resistencia a la corrosión	**mpy**	**mm/año**	**micra/año**	**nm/h**	**pm/s**
Sobresaliente	<1	<0.02	<25	<2	<1
Excelente	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Bueno	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	5-20
Regular	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Malo	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Inaceptable	200 en adelante	5 en adelante	5000 en adelante	500 en adelante	200 en adelante

Todos los valores para calcular la velocidad de corrosión los podemos obtener de tablas, en el caso de los aceros inoxidables 304 y 430 tenemos que su densidad es de:

- 304.- 7.9 g/cm^3
- 430.- 7.7 g/cm^3

Para calcular el peso equivalente de un metal puro solamente es necesario dividir el peso molecular entre la valencia de dicho elemento, pero al ser el acero inoxidable una aleación tenemos que aplicar la siguiente fórmula para obtener su número equivalente:

Expresión VIII.3 Número equivalente de aleaciones

$$N_{eq} = \sum(\frac{fn}{a})$$

Dónde:

- N_{eq}.- es el número equivalente
- f.- es el porcentaje de cada elemento presente en la aleación
- n.- es la valencia predominante de cada elemento
- a.- es el peso atómico de cada elemento

La expresión VIII.3 nos da como resultado el número equivalente de la aleación, este valor se empleara en la expresión VIII.4 para sacar el peso equivalente.

Expresión VIII.4 Peso equivalente de aleaciones

$$PE = \frac{1}{N_{eq}}$$

En la tabla VIII.2 se muestra la cantidad de elementos aleantes para el acero 304 y el 430 indicando su peso molecular, la valencia y el porcentaje presente para cada uno de ellos.

Tabla VIII.2 Composición de los aceros 304 y 430							
Acero 304				**Acero 430**			
Elemento	F(%)	a	n	Elemento	F(%)	a	n
C	0.07	12.0115	4	C	0.12	12.01115	4
Mn	2	54.938	2	Mn	1	54.938	2
Si	0.75	28.086	4	Si	1	28.086	4
P	0.045	30.9738	5	P	0.04	30.9738	5
S	0.03	32.064	6	S	0.03	32.064	6
Cr	19.5	51.996	3	Cr	18	51.996	3
Ni	10.5	58.71	2	Ni	0.75	58.71	2
N	0.1	14.0067	3				

Fuente Atlas steel Stainless Steel Grade Datasheets, Noviembre del 2011

De acuerdo a la tabla VIII.1 y realizando la ecuación de la expresión VIII.2 tenemos el número equivalente:

Ecuación VIII.1 Calculo del número equivalente

$$304\ N_{eq} = \left[\frac{\left(\frac{.07}{100}*4\right)}{12.0115}\right] + \left[\frac{\left(\frac{2}{100}*2\right)}{54.938}\right] + \left[\frac{\left(\frac{.75}{100}*4\right)}{28.086}\right] + \left[\frac{\left(\frac{.045}{100}*5\right)}{30.9738}\right] + \left[\frac{\left(\frac{.03}{100}*6\right)}{32.064}\right] + \left[\frac{\left(\frac{19.5}{100}*3\right)}{51.996}\right] + \left[\frac{\left(\frac{10.5}{100}*2\right)}{58.71}\right] + \left[\frac{\left(\frac{.1}{100}*3\right)}{14.0067}\right] = 0.01720083$$

$$430\ N_{eq} = \left[\frac{\left(\frac{.12}{100}*4\right)}{12.0115}\right] + \left[\frac{\left(\frac{1}{100}*2\right)}{54.938}\right] + \left[\frac{\left(\frac{1}{100}*4\right)}{28.086}\right] + \left[\frac{\left(\frac{.04}{100}*5\right)}{30.9738}\right] + \left[\frac{\left(\frac{.03}{100}*6\right)}{32.064}\right] + \left[\frac{\left(\frac{18}{100}*3\right)}{51.996}\right] + \left[\frac{\left(\frac{.75}{100}*2\right)}{58.71}\right] = 0.012949488$$

Ejecutando la expresión VI.3 obtenemos que el peso equivalente para cada acero:

Ecuación VIII.2 Calculo del peso equivalente

$$304\ PE = \frac{1}{N_{eq}} = \frac{1}{0.01720083} = 58.139524$$

$$430\ PE = \frac{1}{N_{eq}} = \frac{1}{0.012949488} = 77.2231284$$

Para poder emplear la ecuación de la expresión VIII.1 el único valor faltante es la corriente de corrosión, la cual obtenemos de la intersección de las pendientes de Tafel, las cuales se basan en la selección de puntos que asemejen una recta, siendo la zona roja representante de la pendiente anódica y la azul la catódica. Estos puntos por el método de mínimos cuadrados nos darán la

ecuación de la pendiente (y=mx+b), teniendo por cada grafica dos ecuaciones. Estas se igualaran en base a "y", y una vez resuelta las ecuaciones nos darán el punto exacto de intersección de ambas, indicándonos la corriente de corrosión (I_{corr}) del metal en estudio.

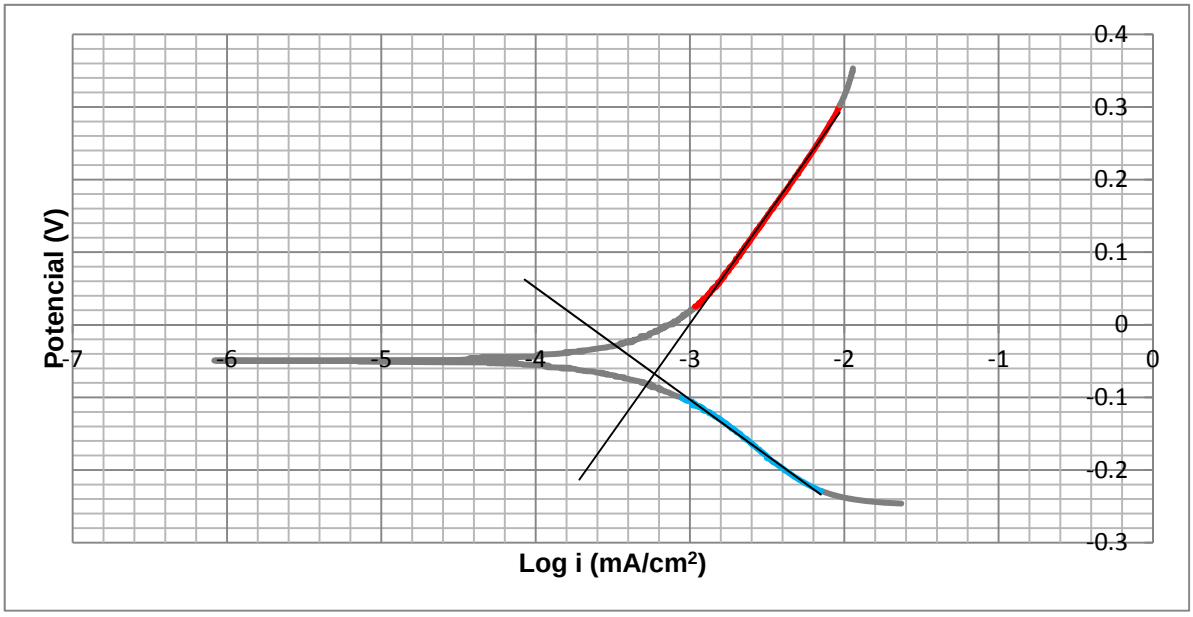
La diferencia en tomar las gráficas de potencial de corrosión contra tiempo y las curvas de Tafel, radica en que dichas curvas nos mostraran la tendencia de un metal en un fluido determinado en un intervalo de tiempo y a un voltaje controlado. Conociendo la tendencia podemos saber la velocidad de corrosión que se daría si en un determinado momento se presentara un ataque corrosivo.

VIII.3.1.- VC en Vinagre

Como se ha venido observando a lo largo de estas pruebas, el vinagre maneja potenciales negativos aunque no tan altos como en las sales.

La grafica VIII.9 nos muestra la gráfica de Tafel del acero 304 en contacto con el vinagre mostrando las pendientes y la intersección de estas, la cual nos indica la densidad de corriente corrosiva.

Grafica VIII.9 Tafel para el acero 304 en vinagre



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Realizando los mínimos cuadrados para los puntos marcados en rojo y en azul tenemos las siguientes ecuaciones que nos representan las pendientes generadas:

- Y=-0.1542x-0.5655
- Y=0.2997x+0.9006

Igualando ambas ecuaciones en base a "y" tenemos que la densidad de corriente para el acero 304:

$$Y = Y$$

$$-0.1542x - 0.5655 = 0.2997x + 0.9006$$

$$-0.1542x - 0.2997x = 0.5655 + 0.9006$$

$$-0.4539x = 1.4661$$

$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{1.4661}{-0.4539} = -3.230006\,\frac{mA}{cm^2}$$

$$I_{corr} = 10^{-3.230006} = 0.00058883\,\frac{mA}{cm^2} = 0.588838\,\frac{\mu A}{cm^2}$$

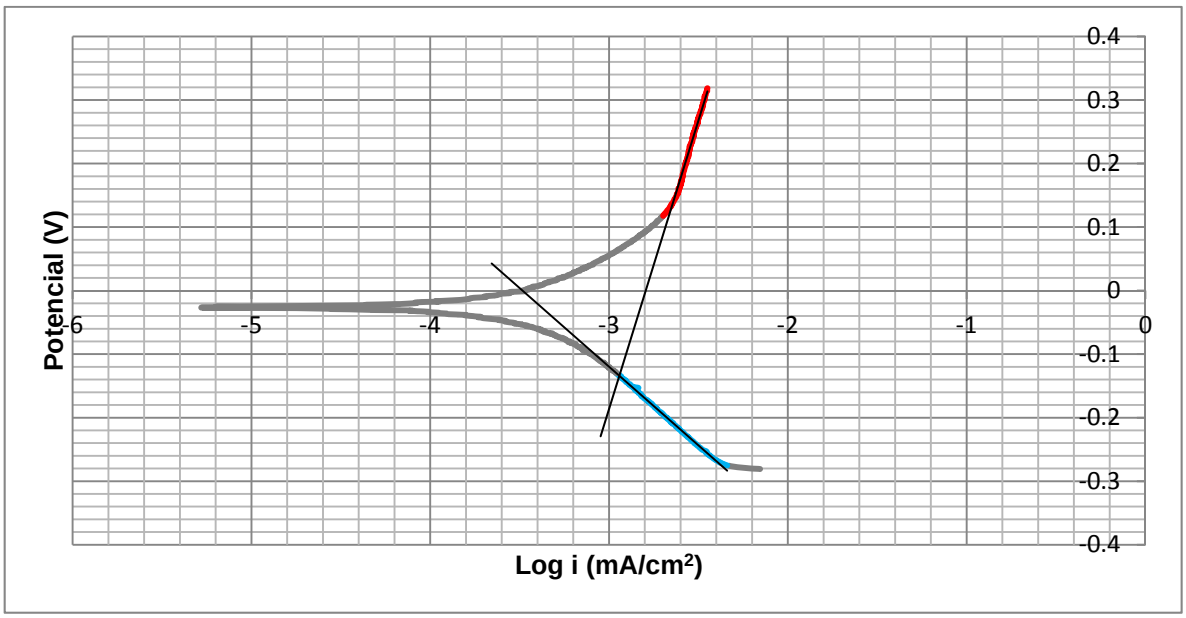
Siendo la corriente de corrosión para el acero 304 en vinagre de 0.58838 (μA/cm^2). Conociendo este dato podemos emplear la ecuación de la expresión VIII.1

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{58.139254}{7.9}\right)(0.588838) = 0.559017579\ mpy$$

Como se observó en la gráfica VIII. 9 el potencial de reposo es de un bajo potencial negativo, dando como resultado una tendencia de la gráfica hacia el estado pasivo. Su velocidad de corrosión fue de 0.5590 mpy, catalogando al AI como un metal excelente al resistir la corrosión si en dicho fluido se iniciara un ataque corrosivo.

La grafica VIII.10 nos muestra la curva en el mismo medio (vinagre) pero empleando el acero 430.

Grafica VIII.10 Tafel para el acero 430 en vinagre



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Las pendientes para las rectas son las siguientes:

- Y=-0.2476x-0.8626
- Y=0.909x+2.5404

Realizando la igualación obtendremos la densidad de corriente corrosiva para el acero 430.

$$Y = Y$$

$$-0.2476x - 0.8626 = 0.909x + 2.5404$$

$$-0.2476x - 0.909x = 0.8626 + 2.5404$$

$$-1.1566x = 3.403$$

$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{3.403}{-1.1566} = -2.94224451\,\frac{mA}{cm^2}$$

$$I_{corr} = 10^{-2.94224451} = 0.00114223507\,\frac{mA}{cm^2} = 1.14223507\,\frac{\mu A}{cm^2}$$

Calculando su velocidad de corrosión:

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{77.2231284}{7.7}\right)(1.14223507) = 1.47775306\ mpy$$

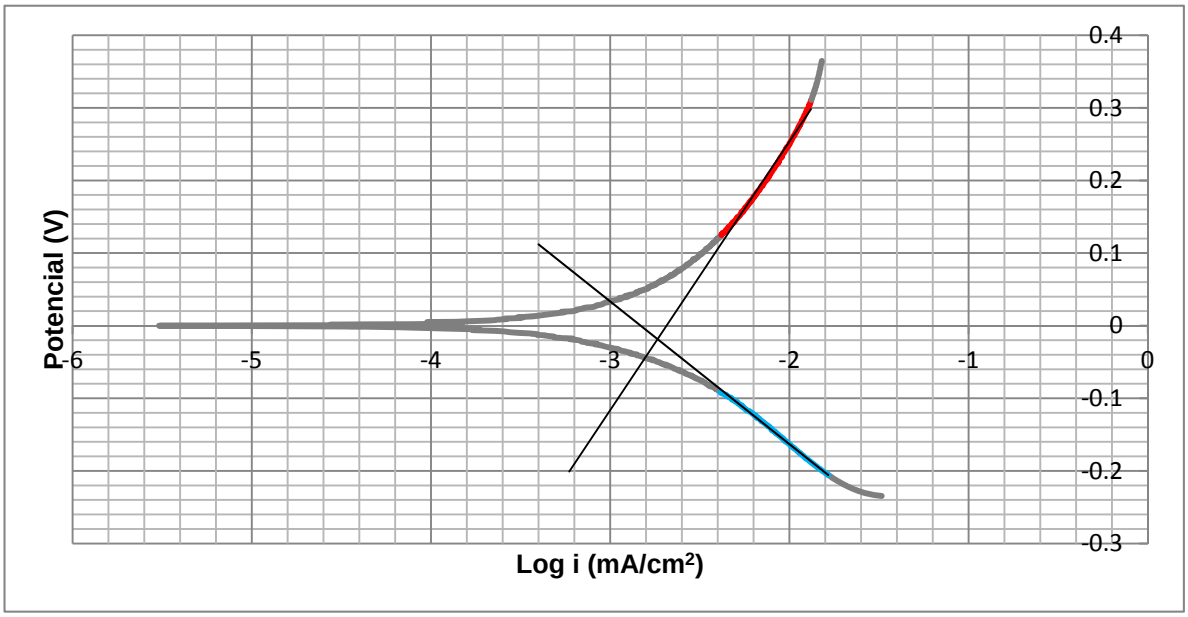
En la gráfica VIII.2 se mostró que el vinagre en contacto con el acero 430 no alcanza una rápida estabilización o una zona donde exista un bajo diferencial de potencial, sin embargo lo visto en la gráfica VIII.10 nos indica que el acero 430 en contacto con el vinagre tiene una tendencia hacia el estado pasivo y si se produjera un ataque de corrosión dentro de este fluido el acero inoxidable tardaría en corroerse por la velocidad de corrosión que se calculó.

VIII.3.2.- VC en Jugo de Limón

El jugo de limón al ser un cítrico permite en el acero 304 manejar potenciales positivos generando de esta manera una buena capa pasiva. Sin embargo en el acero 430 se genera una estabilización de la capa, aunque todavía está en los potenciales negativos estos son muy bajos, permitiendo su tendencia pasiva aunque no al nivel del 304.

La grafica VIII.11 nos muestra la tendencia de las curvas en jugo de limón. Se puede observar como el potencial de reposo está casi en los 0 volts, por lo tanto la gráfica se encuentra situada hacia los voltajes positivos, definiendo que el jugo de limón permite el estado pasivo del metal.

Grafica VIII.11 Tafel para el acero 304 en jugo de limón



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Las pendientes para el jugo de limón son:

- Y=-0.1966x-0.5566
- Y=0.3698+0.9932

Por lo tanto realizando las ecuaciones tenemos que la densidad de corriente corrosiva del acero 304 en jugo de limón es:

$$Y = Y$$

$$-0.1966x - 0.5566 = 0.3698 + 0.9932$$

$$-0.1966x - 0.3698x = 0.5566 + 0.9932$$

$$-0.5664 = 1.5498$$

$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{1.5498}{-0.5664} = -2.736228814\frac{mA}{cm^2}$$

$$I_{corr} = 10^{-2.736228814} = 0.001835571\frac{mA}{cm^2} = 1.835571\frac{\mu A}{cm^2}$$

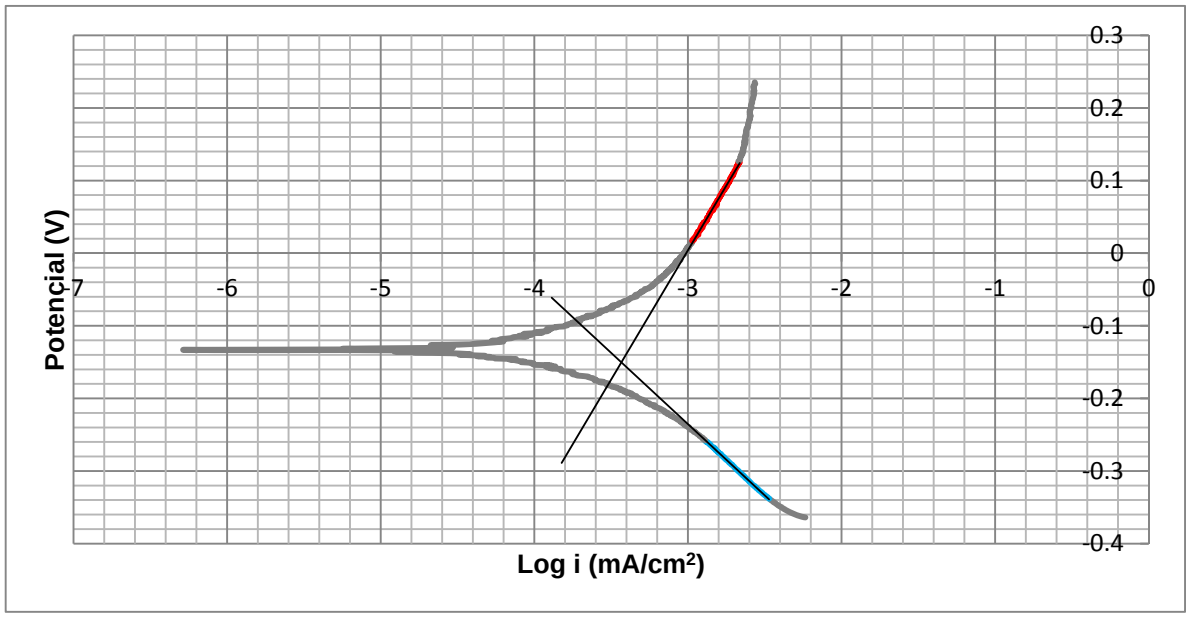
Su velocidad de corrosión es:

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{58.139254}{7.9}\right)(1.835571) = 1.74262227\ mpy$$

La velocidad de corrosión en el jugo de limón resulto ser mayor que la del vinagre. Observando las gráficas y las velocidades de corrosión obtenidas definimos que el jugo de limón es mejor pasivador del acero 304 que el vinagre, sin embargo si se propiciara un ataque corrosivo contra el acero inoxidable en alguno de los medios mencionados, en el vinagre la velocidad de corrosión sería más lenta, pero hay menos probabilidad de presentar corrosión en el jugo de limón que en el vinagre.

La grafica VIII.12 muestra las curvas del acero 430 en jugo de limón, podemos observar como a diferencia del vinagre su potencial de reposo se aleja de los valores positivos, indicando que su estado pasivo seria de menor calidad que en el vinagre.

Grafica VIII.12 Tafel para el acero 430 en jugo de limón



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Sus pendientes son:

- Y=-0.1963x-0.8423
- Y=0.3565x+1.0735

Realizando las ecuaciones tenemos que su densidad de corriente es:

$$Y = Y$$
$$-0.1963x - 0.8423 = 0.3565x + 1.0735$$
$$-0.1963x - 0.3565x = 0.8423 + 1.0735$$
$$-0.5528 = 1.9158$$
$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{1.9158}{-0.5528} = -3.465629522\,\frac{mA}{cm^2}$$
$$I_{corr} = 10^{-3.465629522} = 0.00036892\,\frac{mA}{cm^2} = 0.36892\,\frac{\mu A}{cm^2}$$

Su velocidad corrosiva es:

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{77.2231284}{7.7}\right)(0.36892) = 0.47728563\ mpy$$

Los resultados de la velocidad de corrosión en el jugo de limón muestran que si el acero 430 tuviera un ataque corrosivo la velocidad con que se corroería seria baja, sin embargo en esta ocasión la calidad del estado pasivo del metal sería de menor calidad que con el vinagre.

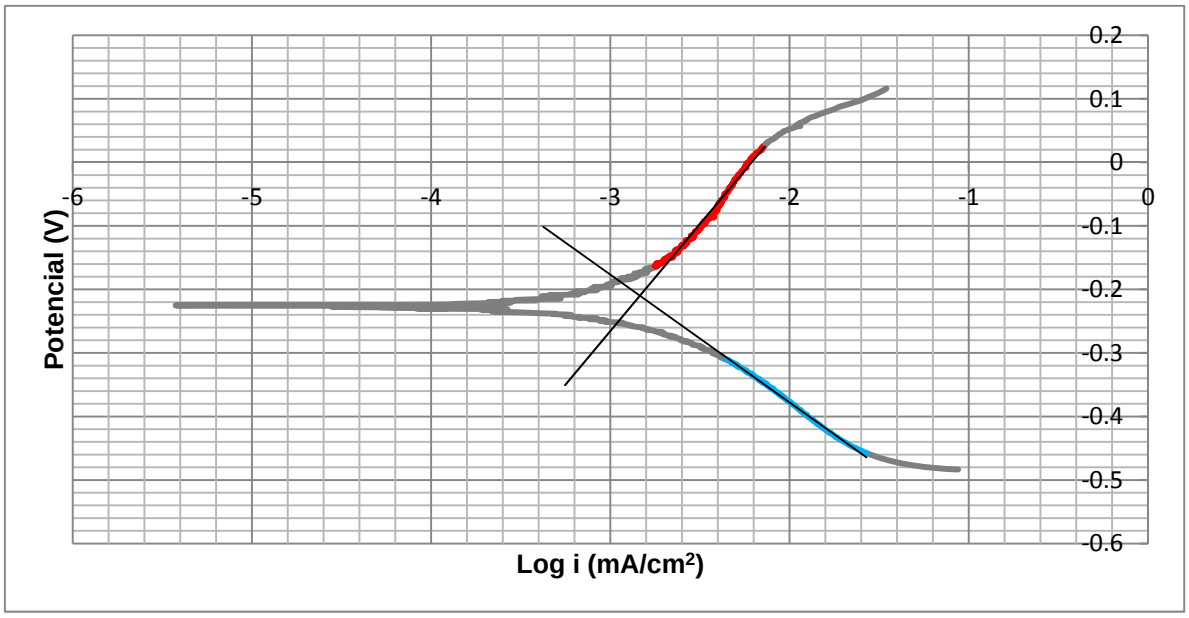
Con base a los resultados vistos para ambos ácidos se concluye que el jugo de limón muestra mejores beneficios en los aceros austeníticos, mientras que el vinagre muestra mejores resultados en los ferríticos.

VIII.3.3.- VC en Agua con Sal (fina)

La sal de mesa a diferencia de la de mar está compuesta casi por un 99% de cloruro de sodio (NaCl), que al disolverse en agua, proporciona una alta conductividad eléctrica al fluido, además los cloruros presentes en la sal, propician la degradación de la capa pasiva de los aceros inoxidables.

La grafica VIII.13 muestra la curva de Tafel de un acero 304 en agua con sal con una cantidad de 30 gramos. A diferencia de los ácidos expuestos dentro de este tema la sal fina maneja un alto potencial de reposo negativo, indicándonos que la preferencia del acero inoxidable dentro de este fluido es hacia la parte activa.

Grafica VIII.13 Tafel para el acero 304 en agua con sal (fina)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Sus pendientes son:

- Y=-0.2012x-0.7803
- Y=0.337x+0.7455

Obteniendo su densidad de corriente corrosiva:

$$Y = Y$$

$$-0.2012x - 0.7803 = 0.337x + 0.7455$$

$$-0.2012x - 0.337x = 0.7803 + 0.7455$$

$$-0.5382 = 1.5258$$

$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{1.5258}{-0.5382} = -2.83500557\,\frac{mA}{cm^2}$$

$$I_{corr} = 10^{-3.230006} = 0.001462159\,\frac{mA}{cm^2} = 1.462159\,\frac{\mu A}{cm^2}$$

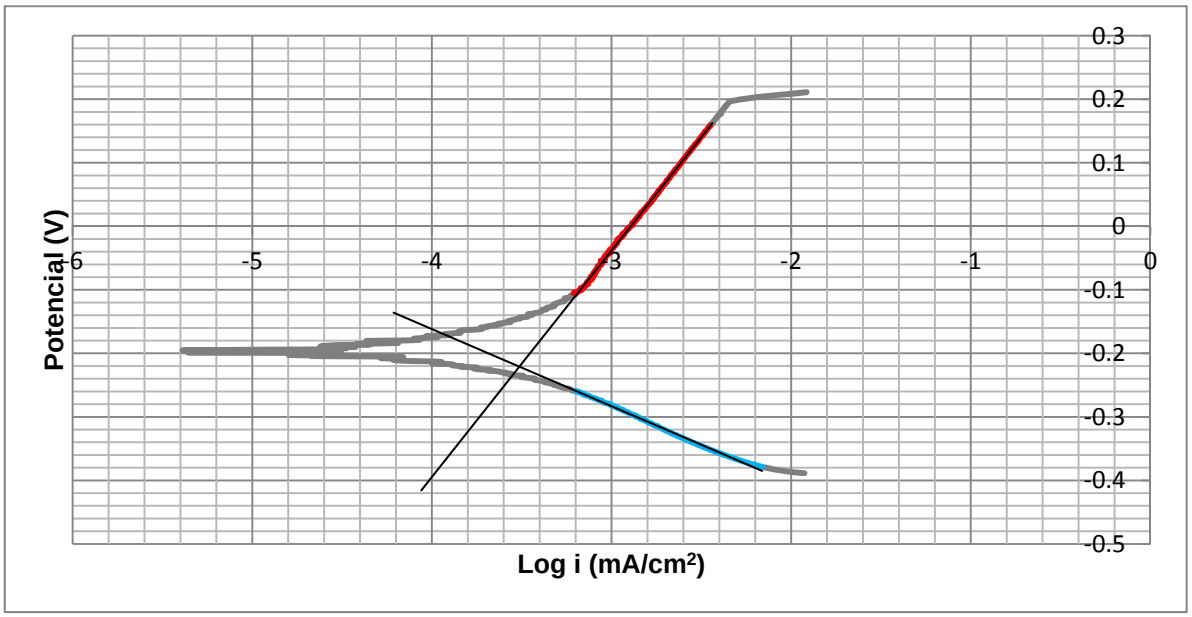
Calculando su velocidad de corrosión:

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{58.139254}{7.9}\right)(1.462159) = 1.3881186\ mpy$$

Como se mencionó el agua con sal fina tiende hacia el estado activo y lo más probable es que le ocurra un ataque corrosivo, que de suceder esto lo haría con la velocidad calculada. Cabe señalar que la velocidad obtenida es menor que en el jugo de limón, sin embargo es más propenso a sufrir un ataque corrosivo en el agua con sal que en el jugo de limón.

La grafica VIII.14 muestra la curva obtenida para el acero 430 en presencia de agua con sal fina. Se pueden observar diferencias entre el acero 304 y el 430 en el mismo medio, el austenítico posee un potencial de reposo ligeramente más negativo que en el 430, precisando de esta manera que el acero ferrítico tiene una mejor calidad en su estado pasivo, aunque es poca la diferencia existente. Sin embargo al igual que el 304 tiende hacia el estado activo que al pasivo.

Grafica VIII.14 Tafel para el acero 430 en agua con sal (fina)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Sus pendientes son:

- Y=-0.1214x-0.6474
- Y=0.3566x+1.0319

Obteniendo su densidad de corriente dentro del agua salada:

$$Y = Y$$
$$-0.1214x - 0.6474 = 0.3566x + 1.0319$$
$$-0.1214x - 0.3566x = 0.6474 + 1.0319$$
$$-0.478 = 1.6793$$
$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{1.6793}{-0.478} = -3.513179916\,\frac{mA}{cm^2}$$
$$I_{corr} = 10^{-3.230006} = 0.000306775\,\frac{mA}{cm^2} = 0.306775\,\frac{\mu A}{cm^2}$$

Por lo tanto su velocidad de corrosión es de:

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{77.2231284}{7.7}\right)(0.306775) = 0.39688662\ mpy$$

La presencia de los cloruros hace que el acero manifieste el estado activo, teniendo una mayor probabilidad de sufrir corrosión que con los ácidos. En cuanto a la velocidad de corrosión al ser menor que en los austeníticos, deducimos que los ferríticos son ligeramente más resistentes al agua salada siempre y cuando esta sal sea refinada.

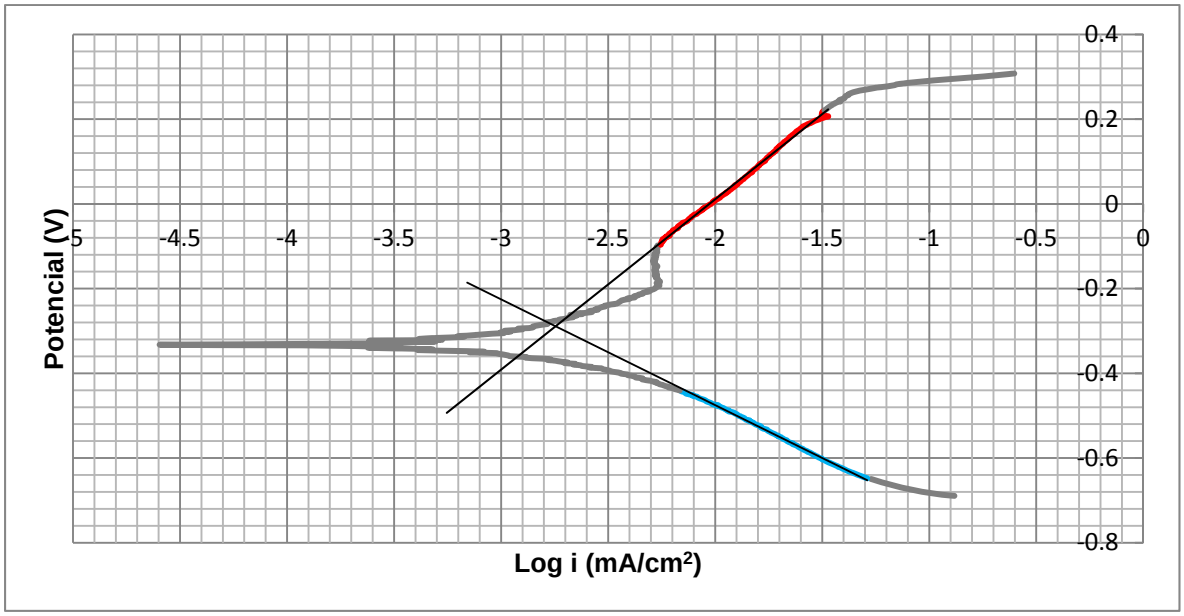
VIII.3.4.- VC en Agua con Sal (gruesa)

La sal gruesa al no ser refinada como la de mesa tiene una diferente composición química, siendo los siguientes elementos presentes dentro de esta sal:

- Cloro.- 55%
- Sodio.- 30.6%
- Sulfato.- 7.7%
- Calcio.-1.2%
- Potasio.- 2.1%

Al contener una mayor cantidad de elementos esta sal afecta de manera significativa las curvas de Tafel. En la gráfica VIII.15 podemos observar como su voltaje de reposo está por debajo de la sal fina en casi 40mV. Por lo tanto el agua con sal gruesa refuerza el estado activo del acero inoxidable 304, siendo aún más propenso a un ataque corrosivo que en la sal fina.

Grafica VIII.15 Tafel para el acero 304 en agua con sal (gruesa)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Sus pendientes son:

- Y=-0.2497x-0.9746
- Y=0.4022x+0.8153

Obteniendo su densidad de corriente corrosiva:

$$Y = Y$$

$$-0.2497x - 0.9746 = 0.4022x + 0.8153$$

$$-0.2497x - 0.4022x = 0.9746 + 0.8153$$

$$-0.6519 = 1.7899$$

$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{1.7899}{-0.6519} = -2.745666513\,\frac{mA}{cm^2}$$

$$I_{corr} = 10^{-3.230006} = 0.001796112\,\frac{mA}{cm^2} = 1.796112\,\frac{\mu A}{cm^2}$$

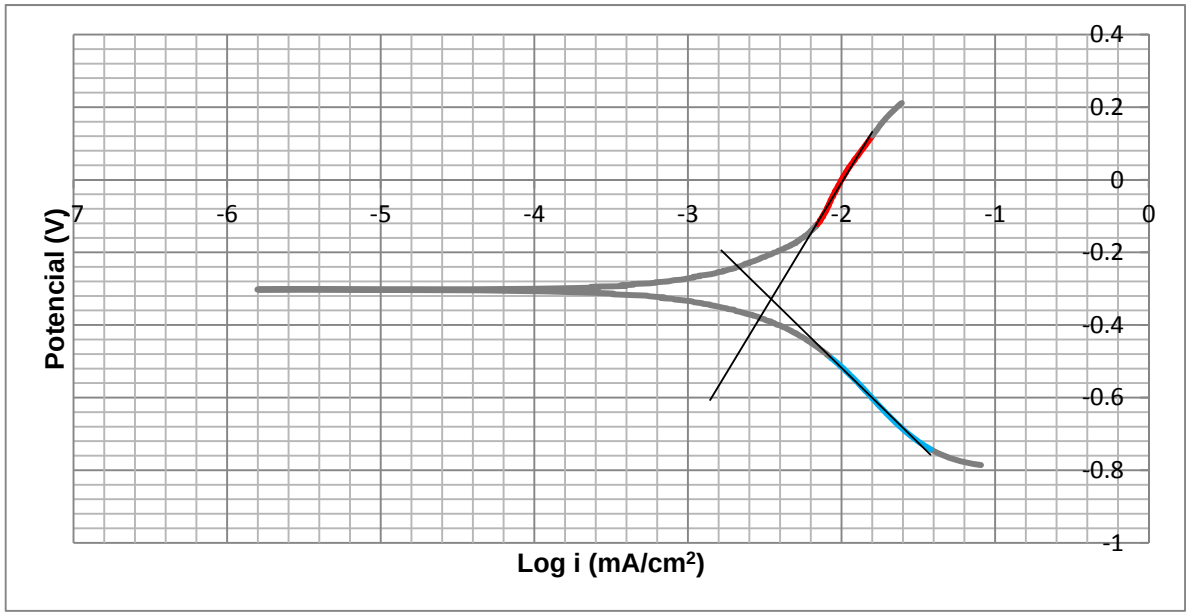
Calculando su velocidad de corrosión:

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{58.139254}{7.9}\right)(1.796112) = 1.70516167\ mpy$$

La velocidad de corrosión obtenida es ligeramente mayor a la obtenida en la sal fina, sin embargo como se mencionó tenemos todavía más probabilidad de que se corroa el metal en este ambiente que en la sal fina.

La grafica VIII.16 muestra la curva de Tafel para el acero 430 en agua con sal gruesa, existiendo una diferencia de potencial entre la sal gruesa y la fina de alrededor de 48 mV, pero aun con esta diferencial el acero ferrítico es ligeramente menos activo que el 304.

Grafica VIII.16 Tafel para el acero 430 en agua con sal (gruesa)



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

Las pendientes en esta solución son:

- Y=-0.4133x-1.3445
- Y=0.6996x+1.3913

Obteniendo su densidad de corriente corrosiva dentro de la solución:

$$Y = Y$$
$$-0.4133x - 1.3445 = 0.6996x + 1.3913$$
$$-0.4133x - 0.6996x = 1.3445 + 1.3913$$
$$-1.1129 = 2.7358$$
$$x \therefore Log\ I_{corr} = \frac{2.7358}{-1.1129} = -2.458262198\,\frac{mA}{cm^2}$$
$$I_{corr} = 10^{-3.230006} = 0.003481271\,\frac{mA}{cm^2} = 3.481271\,\frac{\mu A}{cm^2}$$

Por lo tanto su velocidad de corrosión es de:

$$V_{corr} = 0.129\left(\frac{77.2231284}{7.7}\right)(3.481271) = 4.5038527\ mpy$$

La velocidad de corrosión obtenida resulto ser demasiado grande en comparación con la sal fina y con el acero 304 en sal gruesa, por lo tanto no es recomendable exponer a este metal en este ambiente, ya que con la alta probabilidad de un ataque y con la velocidad sufriría una perdida en su peso rápidamente.

VIII.3.5.- Tendencia del AI con Respecto a las Curvas de Tafel

Como hemos podido observar a lo largo de estas pruebas, el potencial de corrosión mientras sea más negativo la capa pasiva será menos estable y por lo tanto el metal será más susceptible a corroerse. Por otro lado mientras que el potencial de corrosión sea más positivo la capa será más estable y la probabilidad de corrosión en el metal será baja.

La velocidad de corrosión es diferente en cada fluido, sin embargo esta velocidad no indica que el metal al entrar en contacto con el fluido inmediatamente empiece a corroerse, más bien si se presentara un ataque corrosivo en ese fluido ya sea porque tenemos en un metal más noble que el otro u otro factor que propicie la corrosión, esa será la velocidad con que se corroerá.

Las curvas de Tafel además de dar a conocer la velocidad de corrosión, nos permite conocer la verdadera tendencia del metal en el fluido con que este en contacto. Por ejemplo en el acero 304 en las gráficas de potencial de corrosión contra tiempo se observó que para el limón la pendiente de la curva era hacia arriba, mientras que para el vinagre tenía una cierta tendencia a quedarse en bajos

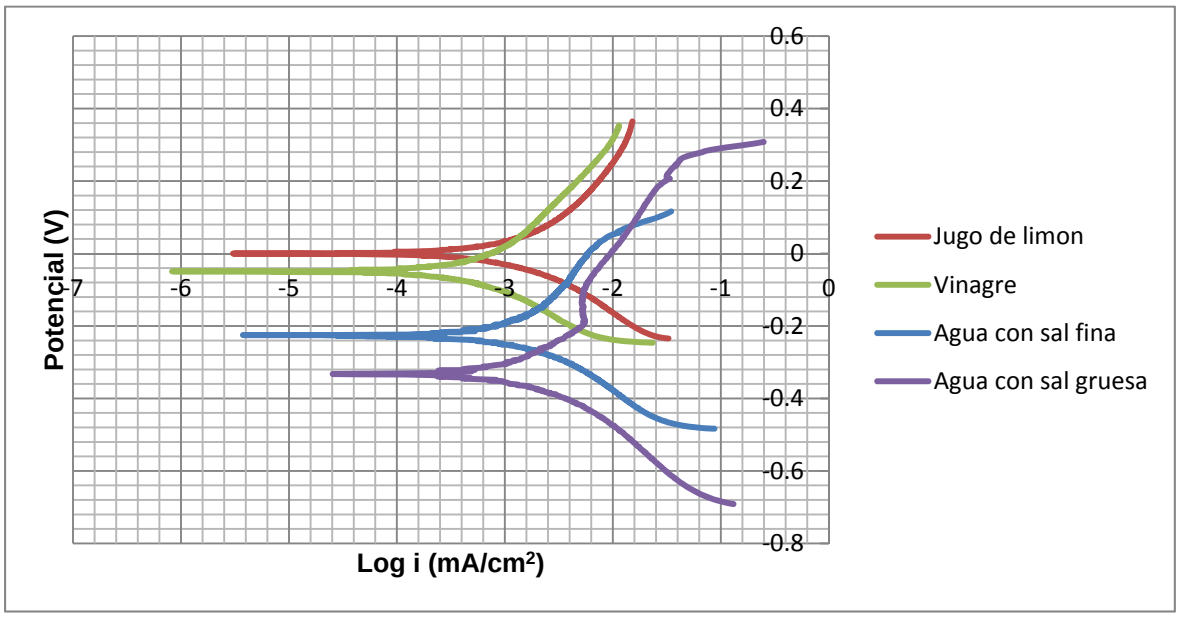
potenciales negativos y sin embargo en la velocidad de corrosión calculada, en el vinagre resulto tener un valor mucho más bajo comparado con el limón. Caso contrario pasa con el acero 430 en las pruebas de vinagre y jugo de limón, tendiendo ahora el vinagre la mayor velocidad de corrosión.

Las gráficas siguientes nos mostraran todas las curvas de Tafel en el acero 304 y 430 con todos los fluidos de experimentación. Este conjunto de curvas nos proporcionara la siguiente información:

- Cuando la intersección de las rectas se acerca más al "0", su velocidad de corrosión será más alta, mientras que si se aleja será más baja
- Cuando la curva se presenta hacia los potenciales positivos, tendrá una capa pasiva estable y la probabilidad de que ocurra un ataque corrosivo en este fluido será baja
- Cuando la curva se presenta del lado de los potenciales negativos, su capa pasiva es inestable y conforme más alto sea su valor (negativo), tendrá una mayor probabilidad de presentar un ataque corrosivo en ese fluido.

La grafica VIII.17 nos muestra la tendencia del acero 304 en los distintos fluidos de experimentación encontrándose que el limón presenta la mejor capa pasiva, por lo tanto las probabilidades de que este acero presente un ataque corrosivo en el jugo de limón son bajas. Por el contrario el agua con sal gruesa presenta una capa menos estable, aumentando considerablemente las probabilidades de que ocurra un ataque de corrosión.

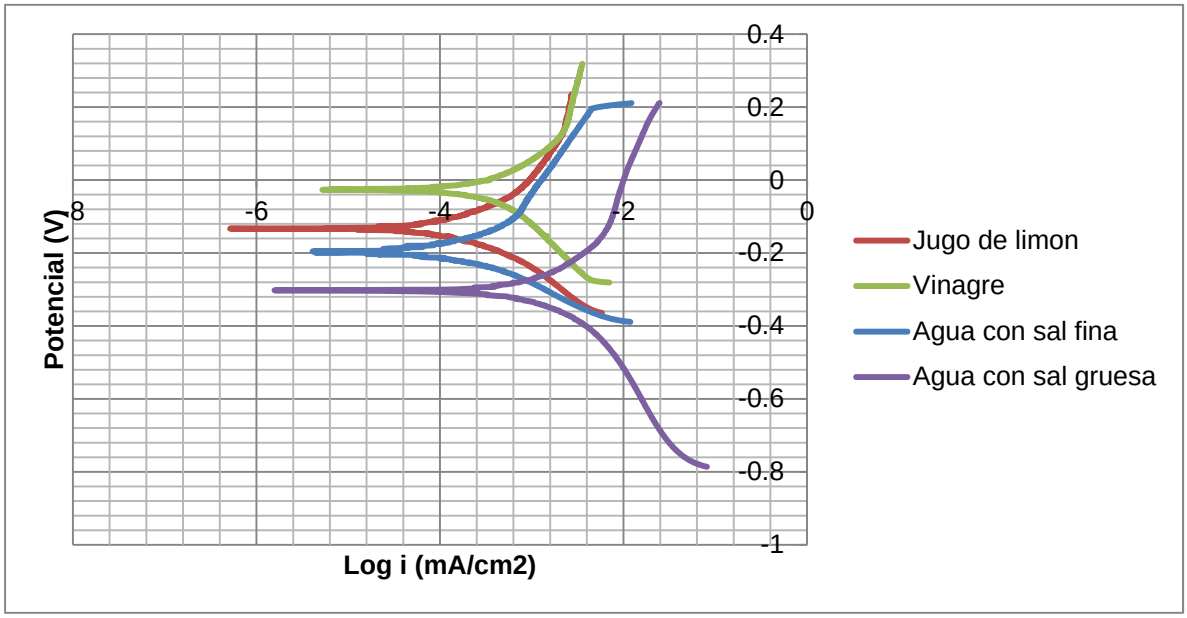
Grafica VIII.17 curvas de Tafel para el acero 304



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

La grafica VIII.18 muestra las curvas de Tafel para el acero 430, se observa como en este caso la capa más estable es la que se presenta con el vinagre y no con el jugo de limón, sin embargo en los cálculos de la velocidad de corrosión esta salió de manera invertida, siendo dentro de los ácidos la más baja la del jugo de limón. En cuanto a la capa pasiva más inestable es el agua con sal gruesa, siendo en ambos aceros el fluido más peligroso, pero a diferencia del acero 304 el 430 tiene una mayor velocidad de corrosión.

Grafica VIII.18 Curvas de Tafel para el acero 430



Trabajo de campo obtención directa Facultad de Química edificio D laboratorio de corrosión UNAM

A pesar de la presentación de cada curva para cada acero, debe tomarse en cuenta que el cálculo de las velocidades que se realizaron en este terma son para una exposición de entre 30 minutos hasta 2 horas y conforme el pasar del tiempo estas velocidades pueden cambiar, así como la tendencia de la capa pasiva.

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES

Dentro de la preparación de los alimentos es inevitable el uso del acero inoxidable, siendo los de mayor uso los del tipo austenítico los cuales se emplean para la fabricación de ollas o envases ya que el acero austenítico tiene las mejores ventajas de embutibilidad. En cuanto a los cubiertos y herramientas de corte como cuchillos o tijeras es indispensable el uso del acero martensítico, ya que, al ser endurecido por tratamiento térmico, es capaz de proporcionar una mayor tenacidad y resistencia al desgaste.

Los resultados obtenidos de las pruebas de corrosión dan a conocer el comportamiento que ejercen algunos fluidos contenidos en los alimentos sobre los aceros estudiados. Se encontró que los ácidos del tipo acético y cítrico ofrecen pasivación del acero inoxidable, sin embargo hay mayores beneficios al emplear ácido cítrico en los aceros austeníticos y el ácido acético proporciona mejores beneficios para los ferríticos.

El potencial de corrosión visto al principio del capítulo XIII es un factor de suma importancia a nivel industrial ya que el exceso de estos puede provocar el cambio de estado de uno pasivo para cambiar hacia el estado activo, aumentado la probabilidad de la existencia de corrosión en los aceros inoxidables. Sin embargo dentro de la cocción de los alimentos en el hogar dichos excesos de potencial jamás alcanzan rangos elevados ya sean positivos o negativos, por lo que es poco probable que estos potenciales sean las causas que propicien corrosión en los utensilios de cocina.

Finalmente los alimentos que se cocinan no son del todo ácidos o básicos, es decir su tendencia será ligeramente hacia alguna de ellas lo que es insuficiente para generar un estado altamente activo conservando el pasivo, de esta manera es poco probable que aparezca corrosión por la acción de los alimentos, sin embargo el calor sobre el metal puede afectar su estructura o su tratamiento reduciendo su resistencia a la corrosión, por lo que es necesario emplearlo siempre y cuando se tenga un alimento que cocer. Esto ya que los utensilios vacíos o zonas libres de alimentos estarán expuestos a mayores temperaturas, y por lo tanto son más susceptibles a la corrosión.

Debido a las propiedades higiénicas y fácil cuidado del acero inoxidable se observaron una gran cantidad de normas tanto nacionales como internacionales que dictaminan su uso, siendo las más importantes dentro de este tema las que tienen que ver con los alimentos, ya sean producidos en fábricas o de producción directa como en los restaurantes. Estas normas se basan en la nula reacción de los alimentos con el acero inoxidable, a diferencia del aluminio que si puede llegar a reaccionar generando fluidos tóxicos para la salud humana.

Como punto final se concluye que los aceros martensíticos son mejores para herramientas de corte en los alimentos, los ferríticos aunque no son del todo empleados como utensilios de cocina, si se piensa realizar una mesa o paredes higiénicas hechas con algún metal el ferrítico ofrece las cualidades que necesitamos además de ser el más barato de todos los tipos de acero inoxidable y en cuanto al austenítico es la mejor opción para realizar cualquier tipo de olla o sartén por sus alta embutibilidad y alta resistencia a la corrosión. En cuanto a los aceros dúplex y endurecidos por precipitación estos tienen las cualidades que ofrecen las demás familias de aceros inoxidables, sin embargo para su fabricación es necesario otros elementos, y una mayor cantidad de procesos, aumentado su costo y limitando su uso dentro del hogar, enfocándose más a la industria sea alimenticia o no.

Bibliografía

- Apraiz Barrero José, 1971, Aceros especiales y otras aleaciones, Editorial Dossat, Madrid España
- Atlas steel Stainless Steel Grade Datasheets, Noviembre del 2011
- Berciano José Luis Enríquez, Enero del 2010, Laminación, Monografías sobre tecnología del acero, Madrid España
- Berna Salueña Xavier, 2000, Tecnología mecánica, UPC, Barcelona España
- Botero Federico, Hornos de inducción, Inductotherm Corp. Colombia
- Canada Cutlery Inc., Facts about knives, Culinary Caddy
- Choulet J. Richard, 1999, Stainless Steel Refining, Dtroit EUA
- Colombier Louis, 1968, Aceros inoxidables: aceros refractarios, Editorial Urmo, Bilbao
- Crookes Roger Sheffield, 2004, Decapado y pasivado del acero inoxidable, Euroinox, Bélgica
- Di Caprio Gabriel, 1987, Los aceros inoxidables, Ebrisa, Grupinox
- Distribuidora de aceros y materiales S.A. de C.V., Clasificación de aceros inoxidables
- Dobrzanski L. A., 28 Abril 2007, International Scientific Jounal Volume, Polonia
- Doctor Dobrich Ramón, Manual Práctico de inspección municipal en alimentos, Organización panamericana de la salud
- Duplex stainless steels 97 book 1
- Equilibrado de una línea de producción de ollas, http://dspace.universia.net/bitstream/2024/713/1/Equilibrado+de+una+linea+de+produccion+de+ollas+rapidas.pdf
- Fernández G., Corrosión por picaduras de una tubería de acero al carbón, Escuela de Minas Universidad Politécnica de Madrid, España
- García Albert, 1 de Diciembre del 2009, Recubrimientos y tratamientos superficiales, AUJOR, Barcelona España
- Girón Callejas Oswaldo Rene, Agosto del 2005, Protección catódica y su aplicación en tanques de almacenamiento de productos petroleros en plantas Guatemaltecas, Facultad de ingeniería Guatemala
- Grupo GRUPSA, Mantenimiento del acero inoxidable, España Madrid E28971
- How products are made, Volume 1 Cutlery, http://www.madehow.com/Volume-1/Cutlery.html#b#ixzz1zCFioeeD

- How products are made, Volume 3 scissors, http://www.madehow.com/Volume-3/Scissors.html
- http://bibliotecas.salud.gob.mx/cgi-bin/library?e=p-00000-00---0compil--00-1--0-10-0---0---0prompt-10---4-------0-1l--11-es-50---20-about---01-3-1-00-11-1-0utfZz-8-00&a=q
- http://www.canacero.org.mx/Archivos/ONN/Catalogos/CATALOGO-DE-NORMAS-2011.pdf
- http://www.corrosionist.com/L_H_grades_Stainless_Steels.htm
- http://www.economia-noms.gob.mx/noms/inicio.do
- http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Elaboraci%C3%B3n%20de%20productos%20c%C3%A1rnicos.pdf
- http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Elaboraci%C3%B3n%20de%20quesos.pdf
- Imagineering, Diciembre del 2009, Passivation of stainless steel
- IMOA, Practical Guidelines for the fabrication of duplex stainless steel, 2009, Segunda edición, Londres Reino Unido
- Inchaurza Zabala Adrián, 1981, Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor, Editorial Limusa, México
- Istrati George, Febrero 1961, Manual de los aceros inoxidables, Editorial Alsina, Buenos Aires Argentina
- J. D. Jorgenson, Abril del 2010, USGS mineral de hierro, EUA
- Knife Sharpening Basics, 2008, Korin Japanese Trading Copr., Japón
- Lundin D. Carl, 30 de Septiembre del 2005, Metalurgical evaluation ofcast duplex stainless steel and their weldments, EUA
- Martínez Enrique, Enero del 2008, Descontaminación y pasivación de aceros inoxidables, AIAS, Barcelona España
- Metalografía y tratamientos térmicos, http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/16-_TT_aceros_inoxidables_v2.pdf
- Narvaes Carlos, 2009, Modelamiento del endurecimiento por precipitación en aleaciones de aluminio tratables térmicamente, AVANCES investigación en ingeniería
- Olla de acero inoxidable dentro de la fábrica, http://www.youtube.com/watch?v=bzDp1ydwe_w
- Orban Cedric, 13 de Octubre del 2010, Conferencia COMC, Paris Francia
- Outokumpu, Stainless Steels for Food Processing and Catering Household

- Partington Eric Fairford, 2006, Euroinox Satainless Steel in the Food & Beverage Industry, Reino Unido
- Peckner Donald, 1977, I. M. Handbook of Stainless Steels, Editorial Mcgrawhill
- Revista del consumidor, Estudio de calidad: ollas de presión, Junio del 2011
- Robert S. Shane, Materials and Process, 1985
- Roll L. Daryl, Passivation and the passive layer, Astro Pack CA 92626
- Rossi Mario, 1979, Estampado en frio de la chapa, Editorial Dossat, México
- Schaberl John, 2008, Stainless steel AISI grades for PM applications
- Shade Chris Hoeganaes, Improved stianless steel processing routes, Corporation Cinnaminson, NJ 2077
- Sydney H. Avner, 12 de Julio de 1989, Introducción a la Metalurgia Física, Editorial Mcgrwa Hill, México
- Tecnología de materiales II, Facultad de ciencias y Tecnología, UMSS, Ingeniería mecánica
- The kitchen knife, Surface engineering, http://openlearn.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=198418
- Trabajos de laboratorio, Química II 63.03
- Universidad de Alicante, Cinética de la corrosión, Departamento de química y física, Tema 5
- Vélez Luis Alberto, Corrosión I, Universidad del valle
- Zubek Luke, Enero del 2006, A technical review of precipitation hardening stainless steel grades