



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTILÁN**

**“DE SARROLLO EXPERIMENTAL DE UN ELECTRODO DE  
ARCO ELÉCTRICO MANUAL PARA SOLDAR ACEROS  
INOXIDABLES AUSTENÍTICOS TIPO HK-40”**

**T E S I S**

**PRESENTADA :**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA**

**GUSTAVO GERARDO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ**

**ASESOR DE TESIS: M. en C. SERGIO DE MORAES BENÍTEZ  
COASESOR: M. en C. HÉCTOR ENRIQUE CURIEL REYNA**

**2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# **CARTA VOTOS APROBATORIOS**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la memoria de mis padres: Gustavo y Victoria, quienes empeñaron su vida sin escatimar esfuerzos en formarnos como personas de bien.

A Luz del Carmen, mi esposa, por su apoyo siempre incondicional y a mis hijos: Gustavo, Lucy y Adriana por ser la alegría y el motivo de nuestras vidas.

A los maestros Sergio de Moraes y Enrique Curiel por la asesoría brindada para la realización de este trabajo.

# I N D I C E

<b>INTRODUCCIÓN</b>	6
<b>OBJETIVOS</b>	8
<b>CAPÍTULO I.- LOS ACEROS RESISTENTES A ALTAS TEMPERATURAS</b>	9
1.1 GENERALIDADES	9
1.2 EL ACERO HK-40	18
<b>CAPÍTULO II.- PROCESOS DE SOLDADURA Y SOLDADURA DE LOS ACEROS A ALTAS TEMPERATURAS</b>	21
2.1 GENERALIDADES SOBRE SOLDADURA	21
2.1.1 SOLDADURA BLANDA	21
2.1.2 SOLDADURA FUERTE	22
2.1.3 SOLDADURA POR FORJA	23
2.1.4 SOLDADURA CON GAS	24
2.1.5 SOLDADURA CON RESISTENCIA	26
2.1.6 SOLDADURA POR INDUCCIÓN	30
2.1.7 SOLDADURA POR ARCO	31
2.1.8 SOLDADURA POR VACIADO	35
2.1.9 SOLDADURA POR FRICCIÓN	35
2.1.10 SOLDADURA POR EXPLOSIÓN	35
2.1.11 SOLDADURA POR RAYO LÁSER	36
2.1.12 SOLDADURA DE ARCO BASE FLUJO	38
2.1.13 SOLDADURA DE ARCO CON PLASMA	38
2.1.14 SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO	40
2.1.15 SOLDADURA DE RAYO DE ELECTRÓN	41
2.1.16 SOLDADURA ULTRASÓNICA	42
2.1.17 SOLDADURA POR ARCO ROBÓTICA	43
2.2 PROCEDIMIENTOS PARA SOLDAR LAS ALEACIONES RESISTENTES AL CALOR	44
2.2.1 SOLDADURA CON ARCO METÁLICO PROTEGIDO (SMAW)	44
2.2.2 SOLDADURA DE ARCO DE TUNGSTENO Y GAS (GTWA)	46
2.2.3 SOLDADURA CON ARCO METÁLICO Y GAS (GMWA)	48
2.3 SOLDADURA DE LOS ACEROS HK-40	51
<b>CAPÍTULO III.- FUNDAMENTOS DE LOS MATERIALES PARA UN ELECTRODO DE ARCO PROTEGIDO</b>	52
3.1 GENERALIDADES	52
3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS	54
3.3 CARACTERÍSTICAS PARA EL REVESTIMIENTO DEL HK-40	57

<b>CAPÍTULO IV.- DESARROLLO DEL ELECTRODO HK-40</b>	60
4.1 INTRODUCCIÓN	60
4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN	60
4.2.1 ENTRADA AL ALMACÉN DE MATERIAS PRIMAS	60
4.2.2 CORTE Y ENDEREZADO DE ALAMBRE	63
4.2.3 LAVADO Y SECADO DE ALAMBRE	64
4.2.4 PESAJE	65
4.2.5 MEZCLADO EN SECO	66
4.2.6 MEZCLADO EN HUMEDO	67
4.2.7 COMPRESION DE LA PASTA	68
4.2.8 EXTRUSIÓN	68
4.2.9 SECADO AL AIRE	70
4.2.10 HORNEO	71
4.2.11 MARCADO	72
4.2.12 PESADO Y EMPACADO	73
4.2.13 ALMACENAJE	73
4.3 BALANCE Y AJUSTE DE MATERIALES	74
4.4 COSTOS DE MATERIALES	88
4.5 COSTOS DE FABRICACIÓN	90
<b>CAPÍTULO V.- RESULTADOS</b>	91
5.1 VALIDACIÓN MEDIANTE NORMA AWS	91
5.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	111
<b>CONCLUSIONES</b>	112
<b>LISTA DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS</b>	113
<b>RELACIÓN DE TABLAS</b>	115
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	118

## INTRODUCCIÓN

Durante los 18 años de haber laborado en la empresa Eutectic + Castolin, en el área de calidad y desarrollo de nuevos productos, lo cual me permitió trabajar con las formulaciones de la compañía y desarrollarme en la elaboración de soldaduras y fundentes, pude percatarme de la importancia que tenía el diseño y elaboración de diferentes fundentes para sus aplicaciones específicas.

Dado que no es muy común que las tesis se puedan desarrollar sobre la preparación de una soldadura puesto que, en general, las formulaciones en todas las empresas son confidenciales, decidí seleccionar este tema para contribuir un poco a llenar ese vacío de información puesto que tuve la oportunidad de participar ampliamente en el desarrollo de diferentes productos y especialmente en el que fue solicitado por empresas como Cementos Cruz Azul y PEMEX, ya que demandaban un producto revestido con las características del Acero HK-40.

El presente trabajo contiene una explicación general de lo que son los aceros inoxidables resistentes al trabajo a altas temperaturas y a la corrosión, su clasificación, propiedades físicas y químicas y las aplicaciones generales de los aceros HK-40.

Así mismo se mencionan algunos procedimientos de aplicación de soldadura, los fundamentos de la soldadura por electrodos, la función del revestimiento y características de los componentes.

La parte importante, tema del desarrollo de esta tesis, es el desarrollo de un electrodo para soldar los aceros HK-40, por necesidades presentadas en la reparación de equipos para las industrias cementera y petroquímica. Se presenta el proceso de fabricación de los electrodos, con sus equipos, el balance y ajuste de los materiales utilizados en la fabricación del electrodo, los costos de los materiales involucrados en la fabricación y el precio de venta del mismo.

En el capítulo de resultados, se ve todas las pruebas de calidad que se deben realizar para aprobar el producto comparándolos contra normas AWS para su validación.

Por último se sacan las conclusiones del desarrollo del producto, los resultados obtenidos en las pruebas realizadas y las necesidades cubiertas con su obtención.

## **OBJETIVOS**

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

1°. Investigar los métodos que se utilizan para soldar los aceros HK-40.

2°. Elaborar un electrodo revestido con las mismas características del metal base: el acero HK-40.

3°. Verificar el comportamiento y propiedades del electrodo elaborado, comparado con estándares similares.

4°. Verificar que la composición química del depósito cumpla con las especificaciones del acero HK-40.

5°. Verificar que las propiedades mecánicas del depósito cumplan con las especificaciones del acero HK-40.

# CAPÍTULO 1.- LOS ACEROS RESISTENTES A ALTAS TEMPERATURAS Y LA CORROSIÓN

## 1.1 GENERALIDADES.

El acero es una aleación hierro-carbono en la cual el carbono aparece en un porcentaje variable de 0.05% a 1.7%. Además está constituido de pequeños porcentajes de elementos como manganeso, azufre, silicio y fósforo. Se prepara a partir del hierro colado del alto horno, a través de una operación de afinación que consiste en la decarburación del hierro fundido; es decir, de disminuir el contenido de carbono.

Los aceros se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **ACEROS AL CARBONO.** Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, bastidores y horquillas.
- **ACEROS ALEADOS.** Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Los aceros de aleación se pueden subclasificar en :
  - Estructurales.- Aquellos aceros que se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranajes, ejes y palancas. Además se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0,25% a un 6%.
  - Para herramientas.- Aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, escariadores, fresas, terrajas y machos de roscar.
- Especiales.- Aceros de Aleación especiales son los aceros inoxidables y aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12%. Estos

aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos.

- **ACEROS DE BAJA ALEACION ULTRARESISTENTES.** Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales, ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. Por ejemplo, los vagones de mercancías fabricados con aceros de baja aleación pueden transportar cargas más grandes porque sus paredes son más delgadas que lo que serían necesarias en caso de emplear acero al carbono. Además, como los vagones de acero de baja aleación pesan menos, las cargas pueden ser más pesadas. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.
- **ACEROS INOXIDABLES.** Los aceros inoxidable contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidable son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos períodos a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas; para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También se usan para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que son resistentes a la acción de los fluidos corporales y al rechazo orgánico. En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que este no oscurece los alimentos y puede limpiarse con facilidad.

Los aceros inoxidable se pueden fabricar, ya sea fundidos o conformados; los conformados son más difíciles de obtener que los fundidos, ya que para

conformar las aleaciones deben tener una ductilidad considerable a temperaturas de trabajo en caliente o en frío, lo cual no es necesario en la fundición.

Los aceros inoxidable fundidos tienen dos clases distintas de aleaciones: la primera que corresponde a los grados conformados, usados generalmente para resistir medios corrosivos a temperaturas por debajo de 650oC (1200oF) y la segunda, de composiciones modificadas, para proveer mayor resistencia al desgaste a temperaturas elevadas, usadas para componentes estructurales que operan por arriba de 1205oC (2200oF). (1,5)

Los aceros inoxidable fundidos tienen dos clases distintas de aleaciones: la primera que corresponde a los grados conformados, usados generalmente para resistir medios corrosivos a temperaturas por debajo de 650oC (1200oF) y la segunda, de composiciones modificadas, para proveer mayor resistencia al desgaste a temperaturas elevadas, usadas para componentes estructurales que operan por arriba de 1205oC (2200oF). (1,5)

El Instituto de Fundición de Aleaciones (ACI) se ha encargado de hacer la identificación y designación de las aleaciones fundidas, mientras que el Instituto del Hierro y del Acero (AISI) lo ha hecho con las aleaciones conformadas. En la norma ACI la primera letra indica si la aleación es para servicio a altas temperaturas o para corrosión. Aquellas con la letra C son normalmente usados para resistir ataques corrosivos a temperaturas menores de 650oC (1200oF) y las de letra H son generalmente usadas bajo condiciones donde la temperatura del metal excede 650oC (1200oF). La segunda letra de la designación representa el porcentaje de cromo-níquel nominal, como se muestra en la tabla 1. Los números siguientes a las letras indican el contenido de carbono máximo en centésimas de por ciento de las aleaciones; el contenido de carbono se designa en los grados resistentes al calor, por el número que indica el punto medio de un  $\pm 0.05\%$  de carbono. Si se incluyeran los elementos especiales en la composición, estos se indican con la adición del símbolo químico del elemento a la designación. Así por ejemplo, CD-Mcu es una aleación para servicio de resistencia a la corrosión del tipo 26Cr-5Ni son un máximo contenido de carbono de 0.04% y contiene molibdeno y cobre. (1,5,7)

### 1.1.1 Aceros Resistentes a la Corrosión.

Las aleaciones resistentes a la corrosión se distinguen de las aleaciones resistentes a la temperatura, refiriéndose a su composición química, por el bajo contenido de carbono y, en algunos grados, por la adición de molibdeno y cobre. En general, la composición de las aleaciones resistentes a la corrosión son balanceadas como resultado de una microestructura completamente austenítica o una duplex ferrita en austenita. El fortalecimiento en las aleaciones resistentes a la corrosión generalmente se relaciona a la cantidad de la fase ferrita en la microestructura duplex. Estas aleaciones son normalmente utilizadas en el tratamiento de soluciones calientes condición para minimizar la presencia de las fases carburo y sigma, con lo cual se maximiza la resistencia a la corrosión.

### 1.1.2 Aceros Resistentes a Altas Temperaturas.

Las aleaciones resistentes a altas temperaturas soportan los ataques corrosivos de gases calientes porque forman capas protectoras adherentes que disminuyen la velocidad de corrosión con el tiempo. La capa protectora aumenta con el incremento de cromo o níquel, dependiendo de los constituyentes de la atmósfera a la cual es expuesta la aleación. La estabilidad estructural es otra propiedad esencial para la vida prolongada de las aleaciones usadas a alta temperatura. En los cambios de fase (de ferrita a austenita y viceversa) se evita la distorsión que ocurre en la aleación por medio de los constituyentes de reforzamiento, tales como carburos nucleados no precipitados. (1,5)

Estas aleaciones son listadas en la tabla 1. Los rangos para los elementos son: 8 a 32% cromo, 0 a 68% níquel, y 13 a 90% hierro. Como las aleaciones resistentes a la corrosión, los grados resistentes al calor también contienen menores cantidades de carbono, silicio, manganeso, azufre, y fósforo, pero el contenido de carbono es considerablemente más alto que para las otras series.

TABLA 1.- Composición química de aleaciones Fe-Cr-Ni vaciadas resistentes a la corrosión y al calor.

Aleación	Concentración del Elemento en Por ciento en peso (m denota máximo)									
	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	C	Fe	Otros
<u>Aleaciones Resistentes a la Corrosión</u>										
Grupo Fe-Cr-Ni:										
CD-4Mcu	25.0-28.0	4.75-6.0	1.75-2.25	1.00m	1.00m	0.04m	0.04m	0.04m	Bal.	2.75-3.25Cu
CF-30	26.0-30.0	8.00-11.0		2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.30m	Bal.	
CF-3	17.0-21.0	8.0-12.0		2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.03m	Bal.	
CF-8	18.0-21.0	8.0-11.0		2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.03m	Bal.	
CF-20	18.0-21.0	8.0-11.0		2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.20m	Bal.	
CF-3M	17.0-21.0	9.0-13.0	2.0-3.0	1.50m	1.50m	0.04m	0.04m	0.03m	Bal.	
CF-8M	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	1.50m	1.50m	0.04m	0.04m	0.08m	Bal.	
CF-12M	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.12m	Bal.	
CF-8C	18.0-21.0	9.0-12.0		2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.08m	Bal.	1.00Cbm
CF-16F	18.0-21.0	9.0-12.0	1.50m	2.00m	1.50m	0.17m	0.04m	0.16m	Bal.	0.20-0.30Se
CG-8M	18.0-21.0	9.0-13.0	3.0-4.0	1.50m	1.50m	0.04m	0.04m	0.08m	Bal.	
CH-20	22.0-26.0	12.0-15.0		2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.20m	Bal.	
CK-20	23.0-27.0	19.0-22.0		1.75m	1.50m	0.04m	0.04m	0.20m	Bal.	
Grupo Fe-Cr-Ni:										
CN-7M	19.0-22.0	27.5-30.5	2.0-3.0	1.50m	1.50m	0.04m	0.04m	0.07m	Bal.	3.0-4.0Cu
Aleaciones Resistentes al Calor										
Grupo Fe-Cr-Ni:										
HD	26.0-30.0	4.0-7.0	0.5m	2.00m	1.50m	0.04m	0.04m	0.50m	Bal.	
HE	26.0-30.0	8.0-11.0	0.5m	2.00m	2.00m	0.04m	0.04m	0.22-0.50	Bal.	
HF	19.0-23.0	9.0-12.0	0.5m	2.00m	2.00m	0.04m	0.04m	0.20-0.40	Bal.	
HH	24.0-28.0	11.0-14.0	0.5m	2.00m	2.00m	0.04m	0.04m	0.20-0.50	Bal.	0.2N m
HI	26.0-30.0	14.0-18.0	0.5m	2.00m	2.00m	0.04m	0.04m	0.20-0.50	Bal.	
HK	24.0-28.0	18.0-22.0	0.5m	2.00m	2.00m	0.04m	0.04m	0.20-0.60	Bal.	
HL	28.0-32.0	18.0-22.0	0.5m	2.00m	2.00m	0.04m	0.04m	0.20-0.60	Bal.	
Grupo Fe-Ni-Cr:										
HN	19.0-23.0	23.0-27.0	0.5m	2.50m	2.00m	0.04m	0.04m	0.20-0.50	Bal.	
HP	24.0-28.0	26.0-30.0	0.5m	2.50m	2.00m	0.04m	0.04m	0.35-0.75	Bal.	
HT	15.0-19.0	33.0-37.0	0.5m	2.50m	2.00m	0.04m	0.04m	0.35-0.75	Bal.	
HU	17.0-21.0	37.0-41.0	0.5m	2.50m	2.00m	0.04m	0.04m	0.35-0.75	Bal.	
HW	10.0-14.0	58.0-62.0	0.5m	2.50m	2.00m	0.04m	0.04m	0.35-0.75	Bal.	
HX	15.0-19.0	64.0-68.0	0.5m	2.50m	2.00m	0.04m	0.04m	0.35-0.75	Bal.	

(2, 5)

Las aleaciones resistentes al calor las podemos clasificar en tres clases, dependiendo dependiendo del contenido de los aleantes.

**Clase 1. Grados Fierro-Cromo.** Contienen de 8 a 30% de cromo y poco o nada de níquel. Tienen baja resistencia mecánica a elevadas temperaturas pero excelente resistencia a la oxidación, son usadas bajo condiciones oxidantes, con calentamiento uniforme y bajas cargas estáticas.

Los tipos HA, HC y HD, están incluidos en este grupo. El tipo HA es recomendado para uso solamente a temperaturas por arriba de 649°C (1200°F) . El contenido de molibdeno de la aleación mejora la resistencia en el rango de temperatura 538 a 649°C (1000 a 1200°F) y las fundiciones de este grado son usadas extensamente en la industria del petróleo. Las aleaciones HC y HD son usadas en aplicaciones donde se toleran cargas medias por arriba de 649°C (1200°F) y, donde solamente cargas ligeras son aplicadas, arriba de 1038°C (1900°F). El tipo HD tiene mayor resistencia que el tipo HC a temperatura elevada porque tiene mayor contenido de níquel. El HC y HD son útiles en atmósferas que contiene alto contenido de azufre y en aplicaciones donde las aleaciones que contienen alto contenido de níquel no pueden ser usadas. Los usos en atmósferas con alto contenido de azufre no requieren alta resistencia ante la temperatura. Las aleaciones HC y HD formarán fase sigma si se mantienen por largos períodos en el rango de temperaturas de 704 a 816°C (1300 a 1500°F). (1,5)

**Clase 2. Grados Fierro-Cromo-Níquel.** Contienen más de 19% de cromo y más de 9% de níquel, con el contenido de cromo mayor que el de níquel. Son usadas bajo condiciones oxidantes para resistir cambios moderados de temperatura. Esta clase de aleaciones incluye las HE, HF, HI, HK y HL, las cuales son parcial o totalmente austeníticas, teniendo mayor resistencia a altas temperaturas que las aleaciones de la clase 1. Son usadas en atmósferas reductoras u oxidantes que contienen cantidades moderadas de azufre. El tipo HE es para servicios por arriba de 1093°C (2000°F), tiene excelente resistencia a la corrosión a altas temperaturas, tiene bajo contenido de níquel, es útil en medios con muy alto contenido de azufre. El tipo HF es similar en

composición al CF, con la diferencia que el contenido de carbono es más alto, las fundiciones de estas aleaciones operan entre 649 a 871°C (1200 a 1600°F). (1,5)

El tipo HH presenta alta resistencia mecánica y resistencia a la oxidación a temperaturas arriba de 1093°C (2000°F). Dependiendo del balance de la composición, la aleación puede ser parcialmente ferrítica ó totalmente austenítica. El tipo austenítico es seleccionado para operaciones por abajo de 871°C (1600°F); para servicio por encima de 871°C (1600°F) cualquiera de las dos composiciones servirá; el ferrítico para ductilidad a mayor temperatura y el austenítico para mayor resistencia al calor. No son recomendadas donde existen ciclos térmicos. (1,2,5)

El tipo HI es más resistente a la oxidación que el tipo HH y puede ser usado arriba de 1176°C (2150°F). Similar al HH en propiedades mecánicas, el grado HI ha sido usado principalmente para retortas vaciadas operando arriba de 1149°C (2100°F) en la producción de magnesio. El tipo HK es también similar a una aleación completamente austenítica HH; tiene alta resistencia a la oxidación y es una de las aleaciones resistentes a la temperatura más eficaces a temperaturas arriba de 1038°C (1900°F). Puede ser usada en aplicaciones estructurales arriba de 1149°C (2100°F), pero no es recomendada para atmósferas en presencia de alto contenido azufre o donde existen severos choques térmicos. La variedad HK-40 (0.35-0.45% de carbono) es un estándar para tubería fundida enfriada por centrifugación que se usa en procesos petroquímicos y de refinación de petróleo. El tipo HL es semejante al tipo HK pero tiene mayor contenido de carbono. La composición de esta aleación es de las más resistentes a la corrosión en atmósferas que contienen alto contenido de azufre a temperaturas de 982°C (1800°F) o superiores; es usada en donde se requiere mayor resistencia que la obtenida con el grado HE o que las aleaciones de la clase 1. Sus usos típicos son para instalaciones de equipo de disociación de gas, tubos radiantes y tiros de chimeneas. (1,2,5)

**Clase 3. Grados Fierro-Níquel-Cromo.** Contienen más de 10% de cromo y más de 23% de níquel, con el contenido de níquel mayor que el de cromo. Son usadas tanto

en condiciones de reducción como de oxidación para resistir severos gradientes de temperatura. (1,5)

Incluyen las aleaciones HN, HP, HT, HU, HW y HX. Estas aleaciones contienen níquel como elemento aleante predominante o como metal base y tienen una estructura austenítica estable que no es sensible a variaciones en composición como los grados de la clase 2, de cromo. Este grupo de alto níquel constituye el 40% de la producción total de fundiciones resistentes al calor. Pueden usarse a 1149°C (2100°F); tienen buena resistencia en caliente, no se carburizan fácilmente y tienen buen servicio donde hay calentamientos y enfriamientos rápidos. Por su alto contenido de níquel, no se recomienda su uso en atmósfera de alto contenido de azufre. (1,2,5)

En las especificaciones para aleaciones fundidas resistentes al calor sus propiedades mecánicas mínimas a temperatura ambiente son valores que tienen poca importancia. Puede ser de interés si las fundiciones son sometidas a esfuerzos elevados cuando están a temperatura ambiente, como en hornos parados para reparación, pero para propósitos de trabajo, son esenciales los datos de sus propiedades a temperatura elevada. Tiene que verse que los valores mostrados se deducen de pruebas de laboratorio y que las condiciones actuales de servicio pueden causar desviación sustancial en la deformación o vida útil. Las variaciones en la temperatura (calentado por encima del máximo indicado) puede acortar la vida considerablemente. (1,5)

En la tabla 2 se pueden ver las propiedades mecánicas de las aleaciones resistentes a la corrosión y al calor.

TABLA 2.- Propiedades Mecánicas de las Aleaciones Vaciadas Resistentes a la Corrosión y al Calor.

<u>Aleación</u>	<u>Resistencia a la tensión</u> <u>kg/cm<sup>2</sup></u>	<u>Resistencia a la Cedencia</u> <u>kg/cm<sup>2</sup></u>	<u>Elongación En 2 in.</u> <u>Por ciento</u>	<u>Número de Dureza Brinell</u>
<u>Aleaciones Resistentes a la Corrosión</u>				
Grupo Fe-Cr-Ni:				
CD-4Mcu	7600	5670	25	253
CE-30	6826	4433	18	190
CF-3	5418	2533	60	140
CF-8	5418	2604	55	140
CF-20	5418	2533	50	163
CF-3M	5630	2674	55	150
CF-8M	5630	2955	50	170
CF-12M				
CF-8C	5418	2674	39	149
CF-16F	5418	2815	52	150
CG-8M	5770	3096	45	176
CH-20	6192	3518	38	190
CK-20	5348	2674	37	144
Grupo Fe-Ni-Cr:				
CN-7M	4855	2181	48	130
<u>Aleaciones Resistentes al Calor</u>				
Grupo Fe-Cr-Ni:				
HD	5981	3378	16	190
HE	6685	3167	20	200
HF	6474	3167	35	165
HH	5630	2815	25	185
HI	5630	3167	12	180
HK	5278	3518	17	170
HL	5770	3659	19	192
Grupo Fe-Ni-Cr:				
HN	4785	2674	13	160
HP	4996	2815	11	170
HT	4926	2815	10	180
HU	4926	2815	9	170
HW	4785	2533	4	185
HX	4574	2533	9	176

(2,5)

## 1.2 EL ACERO HK-40.

Dentro de las aleaciones resistentes al calor existen varios tipos como se vio en la tabla 1; dentro del grupo de aleaciones Fe-Cr-Ni tenemos:

HD con 28% Cr- 5.5% Ni	HE con 28% Cr- 9.5% Ni
HF con 21.5%Cr-10.5% Ni	HH con 26% Cr- 12.5% Ni
HI con 28% Cr- 16% Ni	<b>HK con 26% Cr-20% Ni</b>
HL con 30% Cr-20% Ni	

Específicamente las HK contienen mayor contenido de Níquel. Las aleaciones HK contienen suficiente Cromo para asegurar buena resistencia a la corrosión por gases calientes, incluyendo los gases producidos por el azufre, bajo condiciones oxidantes y reductoras.

El alto contenido de Níquel ayuda a hacerlas unas de las más resistentes a temperaturas por arriba de 1040oC (1900oF).

Las principales características del acero HK-40 es que pertenece al grupo que tienen mayor resistencia a altas temperaturas y mayor ductilidad. Además esfuerzo cortante a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, resistencia a la abrasión, resistencia al choque térmico, estabilidad estructural en cuanto a precipitación de carburos, esferoidización, formación de fase sigma y tratamiento térmico.

Sus principales aplicaciones son las siguientes:

- Serpentes para pirolisis de etileno
- Hornos para gasificación del carbón
- Hornos para reducción de menas de fierro
- Tubos reformadores de los hornos de hidrógeno
- Hojas para tubulares de rodillos de hornos
- Brazos agitadores
- En sistemas de hornos como bigoterías
- Para levas
- Parrillas para todo tipo de enfriadores
- Placas enrejadas para enfriamiento
- Martillos para hornos.

En la tabla 3 se puede ver la composición química del acero HK-40, y en la tabla 4 sus propiedades mecánicas y físicas.

TABLA 3.- Composición Química y tolerancias para un acero HK-40.

<u>A297-HK40</u>	
Cromo	24-28%
Níquel	18-22%
Molibdeno	0.50% máx.
Carbono	0.20-0.60%
Manganeso	2.00% máx.
Silicio	2.00% máx.
Fósforo	0.04% máx.
Azufre	0.04% máx.

TABLA 4.- Propiedades Físicas y Mecánicas para un acero HK-40.

Densidad a 21°C	7.75 g/cm <sup>3</sup>
Calor Específico a 20°C	2.20cal/g/°C
Resistividad Eléctrica a 70°F	90 microhm-cm
Permeabilidad Magnética	1.02
Temperatura de Fusión	1400°C (2550°F)

El HK-40 no puede ser endurecido por tratamiento térmico.

	Como Fundición	Envejecido
Resistencia a la Tensión	5279 kg/cm <sup>2</sup>	5983 kg/cm <sup>2</sup>
Límite Elástico	3519 kg/cm <sup>2</sup>	3519 kg/cm <sup>2</sup>
Elongación en 2"	17%	10%
Dureza BHN	170BHN	190BHN

(1, 2, 14, 22)

A continuación se pueden ver algunas piezas fabricadas con acero HK-40



Placas enrejadas para enfriamiento



Barras



Martillos para hornos

## **CAPITULO II.- PROCESOS DE SOLDADURA Y SOLDADURA DE LOS ACEROS RESISTENTES A ALTAS TEMPERATURAS.**

### **2.1 GENERALIDADES SOBRE SOLDADURA.**

Existen diversos procesos de soldadura los que difieren en el modo en que se aplica el calor o la energía para la unión. A continuación se presenta una manera general de agruparlos:

1. Soldadura blanda
2. Soldadura fuerte
3. Soldadura por forja
4. Soldadura con gas
5. Soldadura con resistencia
6. Soldadura por inducción
7. Soldadura por arco
8. Soldadura por vaciado
9. Soldadura por fricción
10. Soldadura por explosión
11. Soldadura por rayo láser
12. Soldadura de arco base flujo
13. Soldadura de arco con plasma
14. Soldadura de arco sumergido
15. Soldadura por rayo de electrón
16. Soldadura ultrasónica
17. Soldadura por arco robótica

Para lograr la soldadura algunos procesos requieren sólo de fuerza para la unión, otros requieren de un metal de aporte y energía térmica que derrita a dicho metal. Cada uno de los diferentes procesos de soldadura tiene sus características de ingeniería particulares y sus costos específicos.

Existen diferentes tipos de uniones de los materiales, estas uniones se conocen como juntas y van desde las elementales hasta las más complejas, a continuación se observan algunas de las juntas de soldadura más comunes. Su aplicación dependerá fundamentalmente del tipo de material a utilizar, la apariencia de la unión y del uso que se dará a la unión. (8)

#### **2.1.1 Soldadura blanda**

La soldadura blanda comprende todas aquellas aleaciones cuyas temperaturas de trabajo sean inferiores a 500°C (773°K). Entre los metales que en sus diferentes proporciones forman aleaciones que cumplen esta condición cabe resaltar el estaño,

plata, cobre y plomo. La combinación de estos metales y en proporciones adecuadas, hace que se obtengan diversas aleaciones que se adapten a cada necesidad.

En una aleación se busca la combinación de las siguientes características:

- 1) Dureza, en estado sólido (en frío).
- 2) Elasticidad, en estado sólido (en frío).
- 3) Fluidéz, en estado líquido (en caliente).
- 4) Temperatura de trabajo (margen de fusión).
- 5) Costo económico.

En función del tipo de unión que queremos obtener, y de los metales a unir, deberemos combinar las anteriores características a base de mezclar metales en proporciones adecuadas.

Este tipo de soldadura es utilizado para la unión de piezas que no estarán sometidas a grandes cargas o fuerzas. Una de sus principales aplicaciones es la unión de elementos a circuitos eléctricos. Por lo regular el metal de aporte se funde por medio de un caudín y fluye por capilaridad. (23)

### **2.1.2 Soldadura fuerte**

En esta soldadura se aplica también metal de aporte en estado líquido, pero este metal, por lo regular no ferroso, tiene su punto de fusión superior a los 430 °C y menor que la temperatura de fusión del metal base. Por lo regular se requiere de fundentes especiales para remover los óxidos de las superficies a unir y aumentar la fluidéz al metal de aporte. Algunos de los metales de aporte son aleaciones de cobre, aluminio o plata. A continuación se presentan algunos de los más utilizados para las soldaduras denominadas como fuertes:

1. Cobre. Su punto de fusión es de 1083°C.
2. Bronces y latones con punto de fusión entre los 870 y 1100°C.
3. Aleaciones de plata con temperaturas de fusión entre 630 y 845°C.
4. Aleaciones de aluminio con temperatura de fusión entre 570 y 640°C

La soldadura dura se puede clasificar por la forma en la que se aplica el metal de aporte. A continuación se describen algunos de estos métodos:

**Inmersión.** El metal de aporte previamente fundido se introduce entre las dos piezas que se van a unir, cuando este se solidifica las piezas quedan unidas.

**Horno.** El metal de aporte en estado sólido, se pone entre las piezas a unir, estas son calentadas en un horno de gas o eléctrico, para que con la temperatura se derrita al metal de aporte y se genere la unión al enfriarse.

**Soplete.** El calor se aplica con un soplete de manera local en las partes del metal a unir, el metal de aporte en forma de alambre se derrite en la junta. Los sopletes pueden funcionar con los siguientes comburentes: aire inyectado a presión (soplete de plomero), aire de la atmósfera (mechero Bunsen), oxígeno o aire almacenado a presión en un tanque. Los combustibles pueden ser: alcohol, gasolina blanca, metano, propano-butano, hidrógeno o acetileno.

**Electricidad.** La temperatura de las partes a unir y del metal de aporte se puede lograr por medio de resistencia a la corriente, por inducción o por arco, en los tres métodos el calentamiento se da por el paso de la corriente entre las piezas metálicas a unir. (8)

### **2.1.3 Soldadura por forja**

Es el proceso de soldadura más antiguo. El proceso consiste en el calentamiento de las piezas a unir en una fragua hasta su estado plástico y posteriormente por medio de presión o golpeteo se logra la unión de las piezas. En este procedimiento no se utiliza metal de aporte y la limitación del proceso es que sólo se puede aplicar en piezas pequeñas y en forma de lámina. La unión se hace del centro de las piezas hacia afuera y debe evitarse a como de lugar la oxidación, para esto se utilizan aceites gruesos con un fundente, por lo regular se utiliza bórax combinado con sal de amonio. La clasificación de los procesos de soldadura mencionados hasta ahora, es la más sencilla y general, a continuación se hace una descripción de los procesos de Soldadura más utilizada en los procesos industriales. (8)

#### 2.1.4 Soldadura con gas

La **soldadura a gas** fue uno de los primeros procesos de soldadura de fusión desarrollados que demostraron ser aplicables a una extensa variedad de materiales y aleaciones. Durante muchos años fue el método más útil para soldar metales no ferrosos. Sigue siendo un proceso versátil e importante pero su uso se ha restringido ampliamente a soldadura de chapa metálica, cobre y aluminio. El equipo de soldadura a gas puede emplearse también para la soldadura fuerte, blanda y corte de acero.

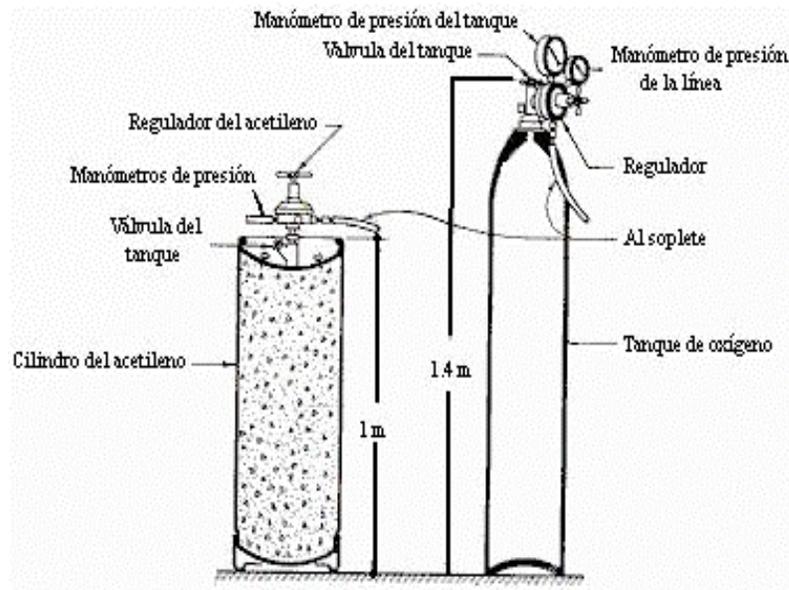
Tanto el oxígeno como el gas combustible son alimentados desde cilindros, o algún suministro principal, a través de reductores de presión y a lo largo de una tubería de goma hacia un soplete. En este, el flujo de los dos gases es regulado por medio de válvulas de control, pasa a una cámara de mezcla y de ahí a una boquilla. El caudal máximo de flujo de gas es controlado por el orificio de la boquilla. Se inicia la combustión de dicha mezcla por medio de un mecanismo de ignición (como un encendedor por fricción) y la llama resultante funde un material de aporte (generalmente acero o aleaciones de zinc, estaño, cobre o bronce) el cual permite un enlace de aleación con la superficie a soldar y es suministrado por el operador del soplete.

Las características térmicas de diversos gases combustibles se indican en la siguiente tabla:

Gas combustible	Temperatura de flama teórica °C	Intensidad de combustión cal/cm <sup>3</sup> /seg	Uso
<u>Acetileno</u>	3 270	3 500	Soldadura y corte
<u>Metano</u>	3 100	1 700	Soldadura fuerte y blanda
<u>Propano</u>	3 185	1 500	Soldadura en general
<u>Hidrógeno</u>	2 810	2 100	Uso limitado

Tanto el oxígeno como el gas combustible son alimentados desde cilindros, o algún suministro principal, a través de reductores de presión y a lo largo de una tubería de goma hacia un soplete. En este, el flujo de los dos gases es regulado por medio de válvulas de control, pasa a una cámara de mezcla y de ahí a una boquilla. El caudal máximo de flujo de gas es controlado por el orificio de la boquilla. Se inicia la combustión de dicha mezcla por medio de un mecanismo de ignición (como un encendedor por fricción) y la llama resultante funde un material de aporte (generalmente acero o aleaciones de zinc, estaño, cobre o bronce) el cual permite un enlace de aleación con la superficie a soldar y es suministrado por el operador del soplete.

La soldadura autógena se logra al combinar al acetileno y al oxígeno en un soplete (Figura 1).



**Figura 1.- Cilindros y reguladores para soldadura oxiacetilénica**

En los sopletes de la soldadura autógena se pueden obtener tres tipos de flama las que son reductora, neutral y oxidante. De las tres la neutral es la de mayor aplicación. Esta flama, está balanceada en la cantidad de acetileno y oxígeno que utiliza. La temperatura en su cono luminoso es de 3500°C, en el cono envolvente alcanza 2100°C y en la punta extrema llega a 1275°C.

En la flama reductora o carburizante hay exceso de acetileno lo que genera que entre el cono luminoso y el envolvente exista un cono color blanco cuya longitud esta definida por el exceso de acetileno. Esta flama se utiliza para la soldadura de monel, níquel, ciertas aleaciones de acero y muchos de los materiales no ferrosos.

La flama oxidante tiene la misma apariencia que la neutral excepto que el cono luminoso es más corto y el cono envolvente tiene más color, Esta flama se utiliza para la soldadura por fusión del latón y bronce. Una de las derivaciones de este tipo de flama es la que se utiliza en los sopletes de corte en los que la oxidación súbita genera el corte de los metales. En los sopletes de corte se tiene una serie de flamas pequeñas alrededor de un orificio central, por el que sale un flujo considerable de oxígeno puro que es el que corta el metal.

En algunas ocasiones en la soldadura autógena se utiliza aire como comburente, lo que genera que la temperatura de esta flama sea menor en un 20% que la que usa oxígeno, por lo que su uso es limitado a la unión sólo de algunos metales como el plomo. En este tipo de soldadura el soplete es conocido como mechero Bunsen.

En los procesos de soldadura con gas se pueden incluir aquellos en los que se calientan las piezas a unir y posteriormente, sin metal de aporte, se presionan con la suficiente fuerza para que se genere la unión. (9,22)

### **2.1.5 Soldadura por resistencia**

El principio del funcionamiento de este proceso consiste en hacer pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los metales que se van a unir, como en la unión de los mismos la resistencia es mayor que en sus cuerpos se generará el aumento de temperatura, aprovechando esta energía y con un poco de presión se logra la unión. La corriente eléctrica pasa por un transformador en el que se reduce el voltaje de 120 o 240 a 4 o 12 V, y se eleva el amperaje considerablemente para

aumentar la temperatura. La soldadura por resistencia es aplicable a casi todos los metales, excepto el estaño, zinc y plomo.

En los procesos de soldadura por resistencia se incluyen los de:

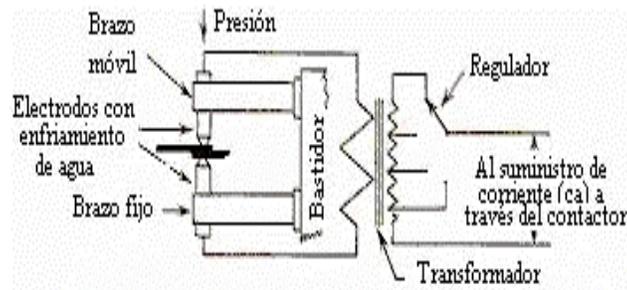
2.1.5.1 Soldadura por puntos (Figura 2)

2.1.5.2 Soldadura por resaltes (Figura 3)

2.1.5.3 Soldadura por costura (Figura 4)

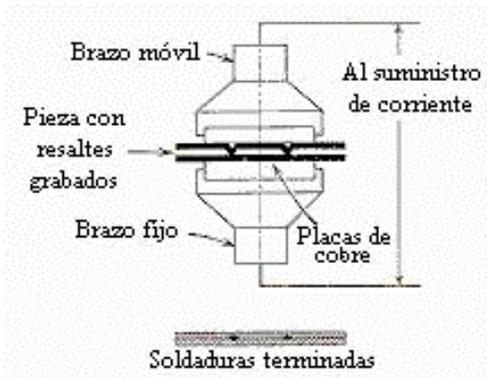
2.1.5.4 Soldadura a tope (Figura 5)

2.1.5.1 En la soldadura por puntos la corriente eléctrica pasa por dos electrodos con punta, debido a la resistencia del material a unir se logra el calentamiento y con la aplicación de presión sobre las piezas se genera un punto de soldadura. La máquinas soldadoras de puntos pueden ser fijas o móviles o bien estar acopladas a un robot o brazo mecánico.



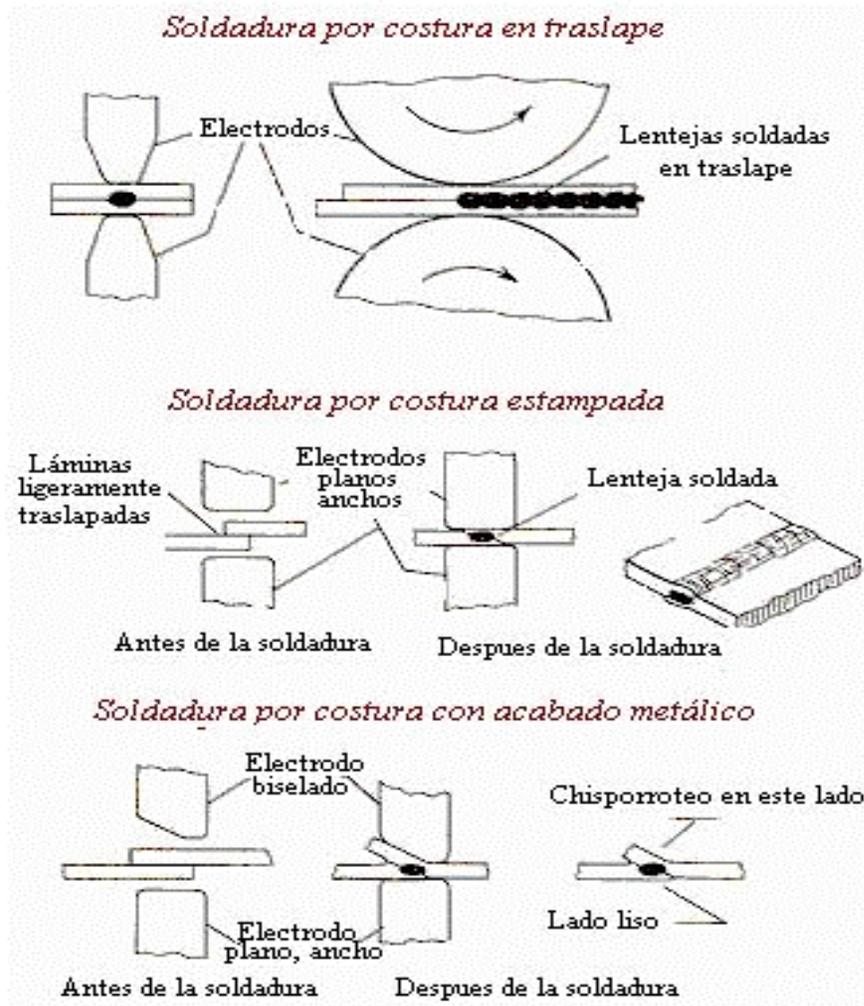
**Figura 2.- Diagrama de una máquina soldadora por puntos**

2.1.5.2 La soldadura por resaltes es un proceso similar al de puntos, sólo que en esta se producen varios puntos a la vez en cada ocasión que se genera el proceso. Los puntos están determinados por la posición de un conjunto de puntas que hacen contacto al mismo tiempo. Este tipo de soldadura se puede observar en la fabricación de malla de alambre.



**Figura 3.- Soldadura con resaltes**

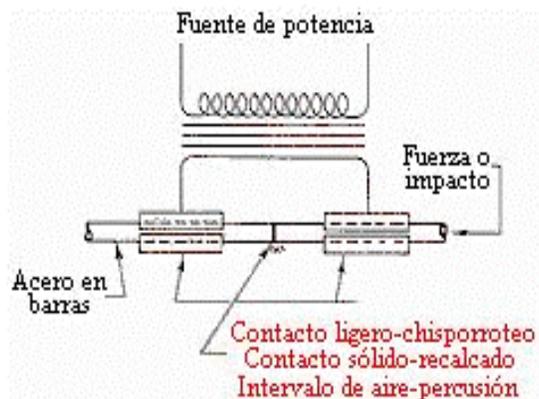
2.1.5.3 La soldadura por costura consiste en el enlace continuo de dos piezas de lámina traslapadas. La unión se produce por el calentamiento obtenido por la resistencia al paso de la corriente y la presión constante que se ejerce por dos electrodos circulares. Este proceso de soldadura es continuo.



**Figura 4.- Soldadura por costura**

2.1.5.4 La **soldadura a tope** consiste en la unión de dos piezas con la misma sección, éstas se presionan cuando está pasando por ellas la corriente eléctrica, con lo que se genera calor en la superficie de contacto. Con la temperatura generada y la presión entre las dos piezas se logra la unión.

(8)



**Figura 5.- Soldadura a tope**

### 2.1.6 **Soldadura por inducción**

Esta soldadura se produce al aprovechar el calor generado por la resistencia que se tiene al flujo de la corriente eléctrica inducida en la piezas a unir. Por lo regular esta soldadura se logra también con presión. Consiste en la conexión de una bobina a los metales a unir, y debido a que en la unión de los metales se da más resistencia al paso de la corriente inducida en esa parte es en la que se genera el calor, lo que con presión genera la unión de las dos piezas. La soldadura por inducción de alta frecuencia utiliza corrientes con el rango de 200,000 a 500,000 Hz de frecuencia, los sistemas de soldadura por inducción normales sólo utilizan frecuencias entre los 400 y 450 Hz. (8)

### **2.1.7 Soldadura por arco eléctrico**

Es el proceso en el que su energía se obtiene por medio del calor producido por un arco eléctrico que se forma entre la pieza y un electrodo. Por lo regular el electrodo también sirve de metal de aporte, el que con el arco eléctrico se funde, para que así pueda ser depositado entre las piezas a unir. La temperatura que se genera en este proceso es superior a los 5,500°C. La corriente que se utiliza en el proceso puede ser directa o alterna, utilizándose en la mayoría de las veces la directa, debido a que la energía es más constante con lo que se puede generar un arco estable. La corriente alterna permite efectuar operaciones de soldadura con el objeto de trabajo en posición horizontal y preferentemente en materiales ferrosos, mientras que la corriente continua no presenta esas limitaciones de posición y material.

El arco se enciende cortocircuitando el electrodo con la pieza a soldar. En esa situación, en el punto de contacto el calentamiento óhmico es tan intenso que se empieza a fundir el extremo del electrodo, se produce ionización térmica y se establece el arco.

Para la generación del arco existen los siguientes electrodos:

- a. Electrodo de carbón. En la actualidad son poco utilizados, el electrodo se utiliza sólo como conductor para generar calor, el metal de aporte se agrega por separado.
- b. Electrodo metálico. El propio electrodo sirve de metal de aporte al derretirse sobre los materiales a unir. Se pueden utilizar para estos electrodos máquinas para soldar de corriente directa o alterna, las segundas constan de transformadores estáticos, lo que genera bajos mantenimiento e inversión inicial. Existen máquinas de 150, 200, 300, 500, 750 y 1000 A.
- c. Electrodos recubiertos. Los electrodos metálicos con un recubrimiento que mejora las características de la soldadura son los más utilizados en la actualidad, las funciones de los recubrimientos son las siguientes:
  - Proporcionan una atmósfera protectora
  - Proporcionan escoria de características adecuadas para proteger al metal fundido

- Facilita la aplicación de sobrecabeza
- Estabiliza el arco
- Añade elementos de aleación al metal de la soldadura
- Desarrolla operaciones de enfriamiento metalúrgico
- Reduce las salpicaduras del metal
- Aumenta la eficiencia de deposición
- Elimina impurezas y óxidos
- Influye en la profundidad del arco
- Influye en la formación del cordón
- Disminuye la velocidad de enfriamiento de la soldadura

Las composiciones de los recubrimientos de los electrodos pueden ser orgánicas o inorgánicas y estas sustancias se pueden subdividir en las que forman escoria y las que son fundentes. Algunos de los principales compuestos son:

- Para la formación de escoria se utilizan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$  y  $\text{FeO}$
- Para mejorar el arco se utilizan  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{TiO}_2$
- Desoxidantes: grafito, aluminio, aserrín
- Para mejorar el enlace: silicato de sodio, silicato de potasio y asbestos
- Para mejorar la aleación y la resistencia de la soldadura: vanadio, cesio, cobalto, molibdeno, aluminio, circonio, cromo, níquel, manganeso y tungsteno.

### Intensidad de corriente

El amperaje que se debe aplicar para generar la soldadura es muy importante, de ello depende que no se pegue el electrodo, que la soldadura fluya entre las dos piezas o que no se perforen las piezas que se van a unir.

En la tabla 3 se muestran las cantidades de corriente en amperes que se deben utilizar de acuerdo al grueso de los electrodos.

Tabla 5.- Intensidad de corriente aproximada para diferentes diámetros de electrodos

Diámetro del electrodo mm	Amperes para soldadura plana	Amperes para soldadura vertical y sobrecabeza
1.6	25-70	-
2.4	60-100	-
3.2	80-150	75-130
4.0	125-225	115-160
4.8	140-240	125-180
6.4	200-350	170-220
7.9	250-500	-
9.5	325-650	-

Una recomendación práctica que se utiliza en los talleres para hacer la determinación de la corriente, sin tener que recurrir a la tabla es la siguiente:

Convierta el diámetro del electrodo de fracciones a decimales, elimine el punto y esa será la corriente aproximada que debe utilizar con ese electrodo. Por ejemplo, si tiene un electrodo de 1/8 su conversión a decimales será 0.125, al quitarle el punto se obtiene 125, lo que indica que se deben utilizar mas o menos 125 amperes para que el electrodo funcione bien.

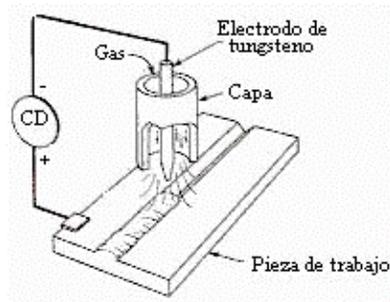
#### 2.1.7.1 Soldadura por arco con hidrógeno atómico

Es un sistema generador de un arco eléctrico en el que se agrega hidrógeno se liberará calor con mayor intensidad que en un arco común, la temperatura que se alcanza en este tipo de arco es superior a los 6,000 °C.

#### 2.1.7.2 Soldadura por arco con gas protector

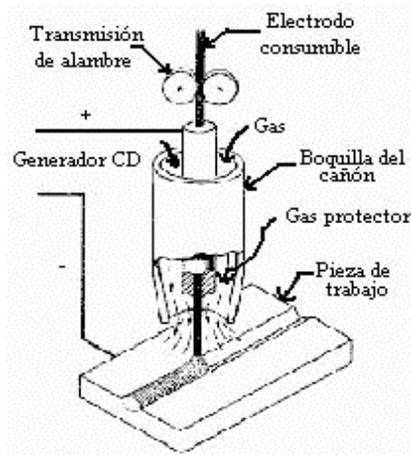
En este proceso la unión se logra por el calor generado por un arco eléctrico que se genera entre un electrodo y las piezas, pero el electrodo se encuentra protegido por una copa por la que se inyecta un gas inerte como argón, helio o CO<sub>2</sub>. Con lo anterior se genera un arco protegido contra la oxidación y además perfectamente controlado. Existen dos tipos de soldadura por arco protegido la **TIG** y la **MIG**.

La soldadura TIG (tungsten inert gas) es aquella en la que el electrodo de la máquina es de tungsteno, por lo que el metal de aporte se debe añadir por separado (Figura 6).



**Figura 6.- Soldadura TIG**

La soldadura MIG (metal inert gas) es la que el electrodo es de un metal que se utiliza como metal de aporte, por lo que este sistema es considerado como un proceso de soldadura continua (Figura 7). (8)



**Figura 7.- Soldadura MIG**

### 2.1.8 Soldadura por vaciado

Con algunos materiales la unión no se puede hacer por los procedimientos antes descritos debido a que no fácilmente aceptan los metales de aporte. Para lograr la soldadura de estos metales es necesario fundir el mismo metal que se va a unir, dejándolo enfriar con lentitud, para que se adapte a la forma del molde. Con ello cuando solidifica, las piezas quedan unidas.

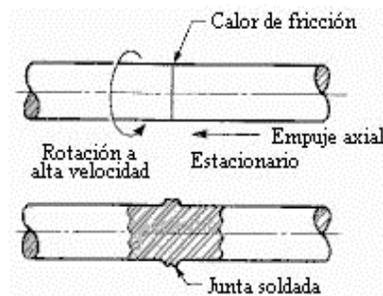
A este procedimiento se le conoce como fundición por vaciado y se utiliza a veces para reparar piezas fundidas que tienen grietas o defectos.

(24)

### 2.1.9 Soldadura por fricción

En este proceso la unión se logra por el calor que se genera al girar una de las piezas a unir en contra de la otra que se encuentra fija, una vez alcanzada la temperatura adecuada se ejerce presión en las dos piezas y con ello quedan unidas.

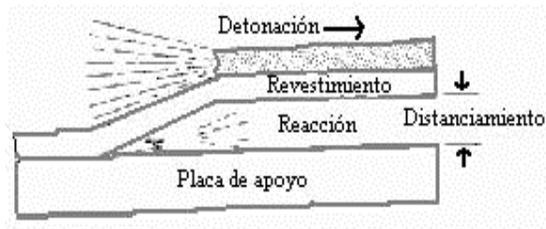
(25)



**Figura 8.- Ilustración de un proceso que emplea calor generado por fricción para producir una soldadura**

### 2.1.10 Soldadura por explosión

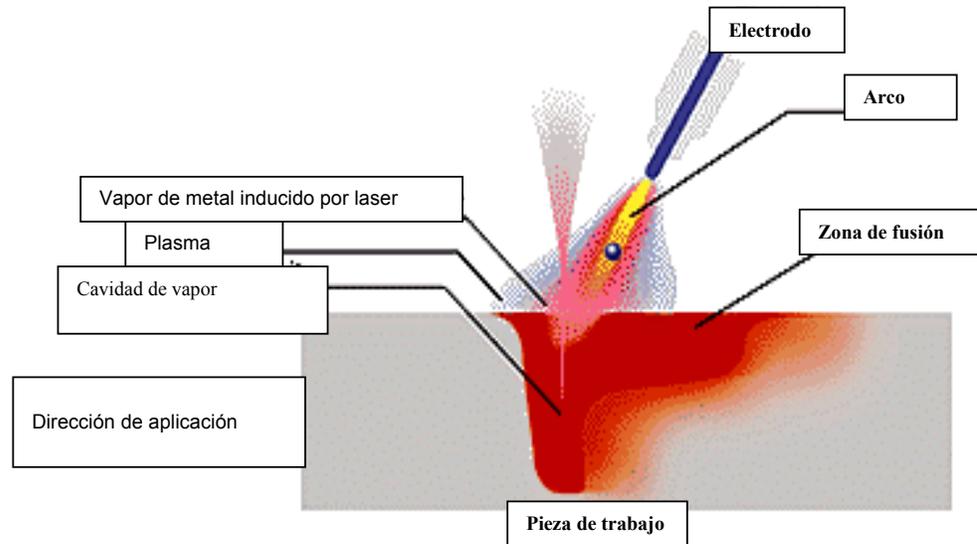
Esta soldadura también se llama de recubrimiento consiste en la unión de dos piezas metálicas, por la fuerza que genera el impacto y presión de una explosión sobre las proximidades a las piezas a unir. En algunas ocasiones, con el fin de proteger a las piezas a unir, se coloca goma entre una de las superficies a unir y el yunque que genera la presión (Figura 9). (8)



**Figura 9.- Proceso de unión explosiva mostrando la reacción a alta velocidad que emana del punto de colisión debido a la presión ascendente**

### **2.1.11 Soldadura por Rayo Láser**

La soldadura por rayo láser es un proceso de soldadura por fusión que utiliza la energía aportada por un haz láser para fundir y recristalizar el material o los materiales a unir, obteniéndose la correspondiente unión entre los elementos involucrados. En la soldadura láser no existe aportación de ningún material externo y la soldadura se realiza por el calentamiento de la zona a soldar.



**Figura 10.- Proceso de soldadura por Rayo Láser**

Mediante espejos se focaliza toda la energía del láser en una zona muy reducida del material. Cuando se llega a la temperatura de fusión, se produce la ionización de la mezcla entre el material vaporizado y el gas protector (formación de plasma). La capacidad de absorción energética del plasma es mayor incluso que la del material fundido, por lo que prácticamente toda la energía del láser se transmite directamente y sin pérdidas al material a soldar.

La alta presión y alta temperatura causadas por la absorción de energía del plasma, continúa mientras se produce el movimiento del cabezal arrastrando la "gota" de plasma rodeada con material fundido a lo largo de todo el cordón de soldadura.

De ésta manera se consigue un cordón homogéneo y dirigido a una pequeña área de la pieza a soldar, con lo que se reduce el calor aplicado a la soldadura reduciendo así las posibilidades de alterar propiedades químicas o físicas de los materiales soldados.

La soldadura por rayo laser puede ser usada con buenos resultados para unir muchos metales entre ellos mismos o también para metales disímiles. Las principales aplicaciones están enfocadas para soldar aceros, titanio y aleaciones de níquel. (14)

### **2.1.12 Soldadura de arco base flujo**

La soldadura de arco base flujo (FCAW) es frecuentemente referida como soldadura base flujo únicamente. Es usado comúnmente como un proceso de alta velocidad de depósito que añade los beneficios del flujo de la soldadura a la simplicidad de la soldadura MIG. Así como el alambre es alimentado continuamente de un carrete. La soldadura base flujo es así mismo referida como un proceso de soldadura semiautomático.

La soldadura base flujo es generalmente más clemente que la soldadura MIG. Se necesita menos limpieza que la MIG. Sin embargo, la condición del metal base puede afectar la calidad de la soldadura. Excesiva contaminación debe ser eliminada.

La soldadura base flujo produce un fundente que debe ser removido. La soldadura base flujo tiene buena apariencia del cordón (liso, cordón uniforme teniendo un buen contorno).

Beneficios de la soldadura base flujo:

- Capacidad en todas posiciones
- Depósito del cordón metálico de buena calidad
- Mayor velocidad de depósito que la SMAW
- Beneficios metalúrgicos que pueden ser ganados de un fundente
- Baja habilidad del operador. (16)

### **2.1.13 Soldadura de arco con plasma**

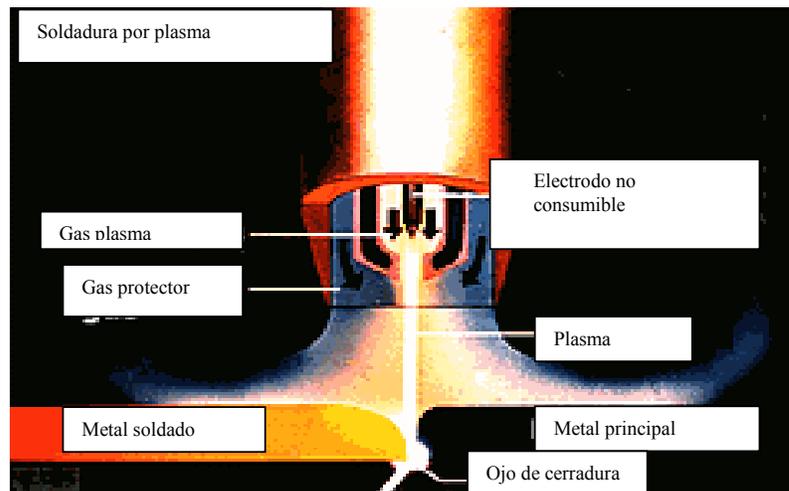
La soldadura de arco de plasma PAW, es un proceso muy similar al proceso de soldadura TIG "GTWA", de hecho es una evolución de este método, el cual está diseñado para incrementar la productividad.

En la soldadura por arco de plasma PAW, el uso del gas es algo más complejo, dos flujos de gases separados trabajan cada uno cumpliendo un papel diferente.

Las partes que componen el proceso básico tenemos: un gas que fluye envolviendo el electrodo de tungsteno y, por consiguiente, formando el núcleo del arco de plasma y el escudo de gas que provee protección a la soldadura fundida (Figura 11).

PAW es usado de tres maneras:

1. Soldadura microplasma, con corrientes de soldadura de entre 0.1 amperios hasta 20 amperios.
2. Soldadura de plasma-mediano, con corrientes de soldadura de entre 20 amperios hasta 100 amperios.
3. Soldadura de cerradura, por encima de 100 amperios, donde el arco de plasma penetra el espesor de la pared. Es muy usado, por dejar juntas de alta calidad, en la industria de la aviación y especial, procesos, química y las industrias petroleras. (17)



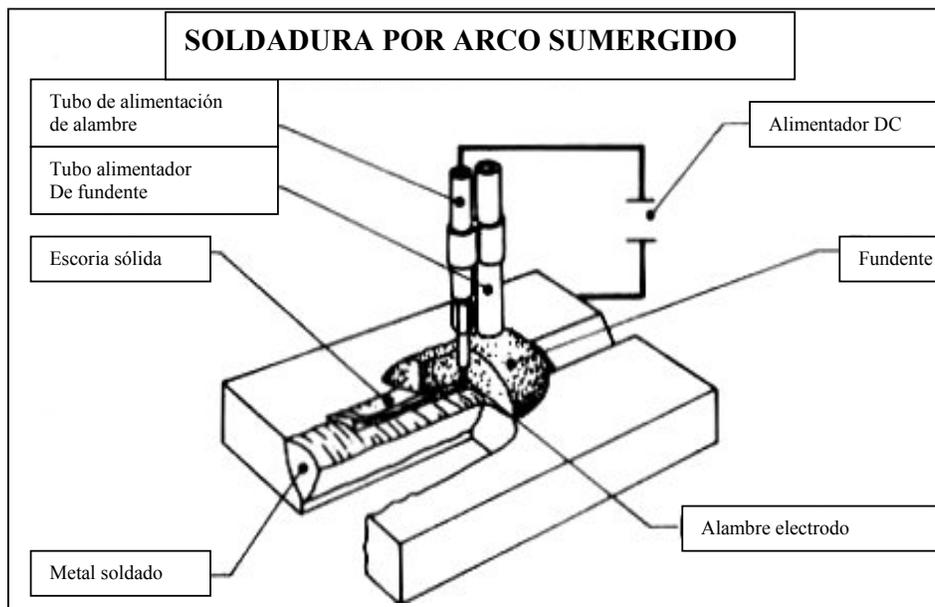
**Figura 11 .- Soldadura de arco con plasma.**

### 2.1.14 Soldadura de arco sumergido

En la soldadura de arco sumergida, o la SIERRA, el calor para la fusión es proporcionado por un arco voltaico pulsado entre el objeto y el electrodo consumible. La protección es proporcionado por una manta del flujo granular, depositada sobre el área que se soldará con autógena (Figura 12).

Características de proceso:

- Utiliza un consumible alambre-alimento, el electrodo
- Es blindado por un flujo granular que se vaporice parcialmente
- Tiene un depósito de la escoria en el grano de la autógena
- Es capaz de altas velocidades de la soldadura y tarifas de la deposición
- Produce las autógenas de la alta calidad en los objetos gruesos



**Figura 12 .- Soldadura de arco sumergido**

### 2.1.15 Soldadura por rayo de electrón

El sistema del EB se compone de un arma del haz electrónico, de una fuente de alimentación, de sistema de control, del equipo del movimiento y del compartimiento de la soldadura del vacío. La fusión de metales bajos elimina la necesidad de metales de relleno. El requisito del vacío para la operación del equipo del haz electrónico elimina la necesidad de blindar los gases y los flujos (Figura 13).

El arma del haz electrónico tiene un filamento se caliente que, electrones que liberan del tungsteno. Los electrones se aceleran de la fuente con potencial de alto voltaje entre un cátodo y un ánodo. La corriente de electrones entonces pasa a través de un agujero en el ánodo. La viga es dirigida por las fuerzas magnéticas de enfocar y de desviar bobinas. Esta viga se dirige de la columna del arma y pulsa el objeto. (19)

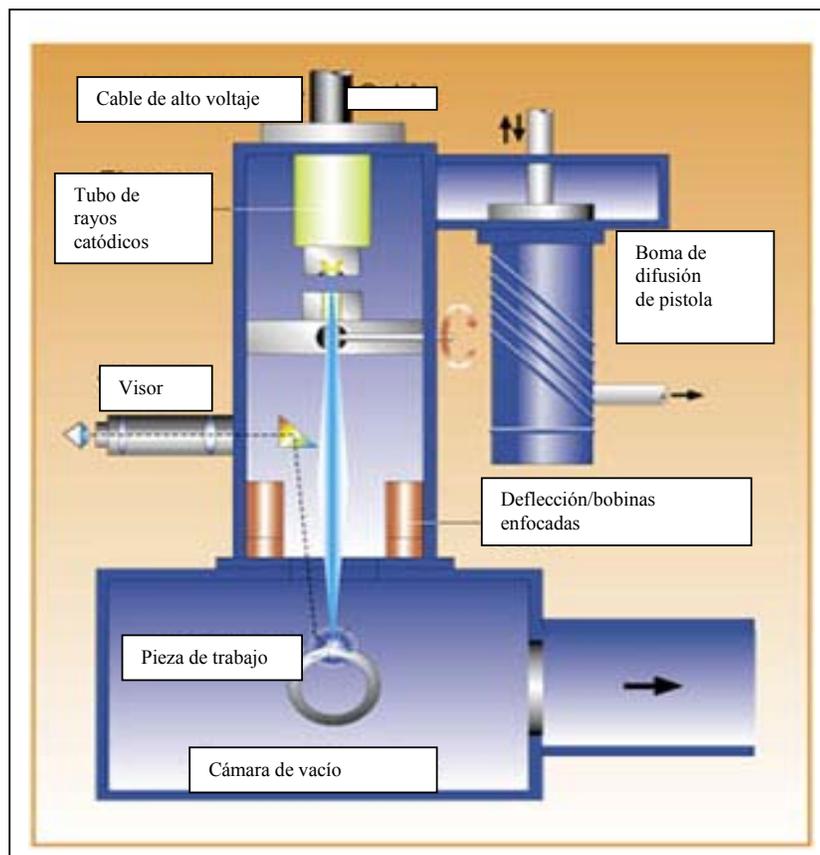


Figura 13 .- Soldadura por rayo de electrón

### 2.1.16 Soldadura ultrasónica

La soldadura ultrasónica metálica utiliza vibraciones de alta frecuencia. Consiste en colocar las partes a soldar en un yunque; enseguida, se aplica presión a las partes. Entonces la parte superior es vibrada atrás y adelante con el cuerno ultrasónico; esto causa a las partes frotar juntas. La energía ultrasónica dispersa la película en capas (limpiando la superficie) y provoca el mezclado de los átomos de metal. La actividad de los átomos metálicos junta el uno al otro causando una verdadera unión metalúrgica (Figura 14).

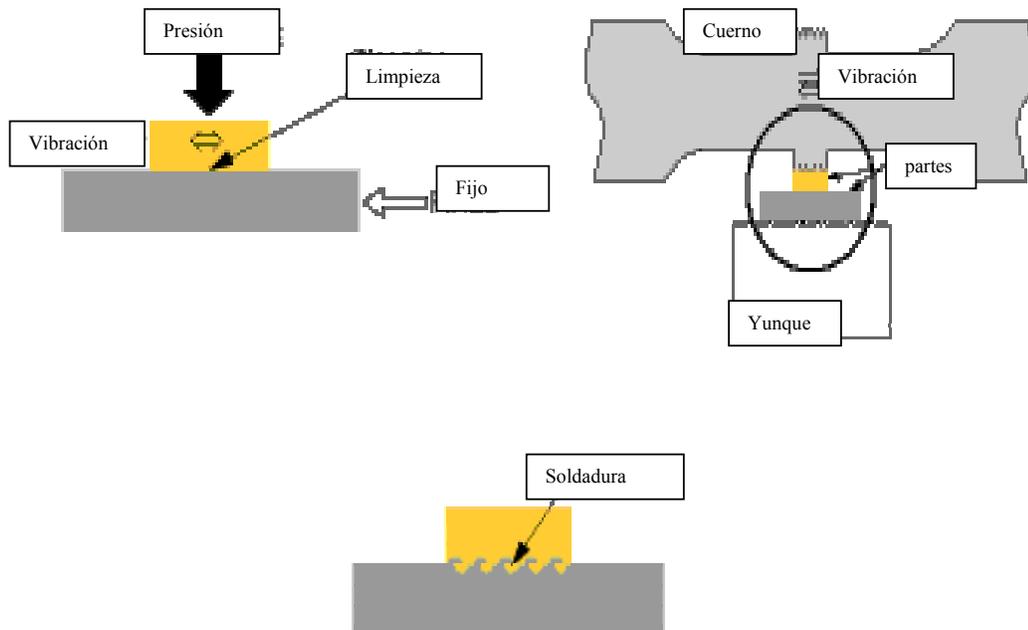


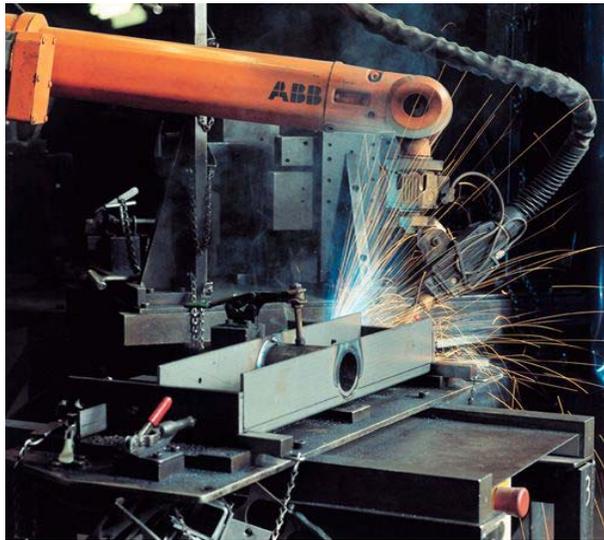
Figura 14 .- Soldadura ultrasónica

La soldadura de metal ultrasónica es algunas veces llamada “soldadura fría” porque actúa sin fundir los metales. Se limpia y une a temperaturas más bajas que el punto de fusión de los metales. La soldadura ultrasónica más comúnmente une metales no ferrosos, pero también puede ser usada con otros metales, como cuando se quiere unir aluminio a cerámicos. (20)

### **2.1.17 Soldadura por arco robótica**

Soldadura Robótica significa soldar, es decir, fusionado y controlado por equipo robótico. En general el equipo para soldadura por arco automático es diseñada de otra manera que la usada para arco de soldadura manual. La soldadura de arco automática envuelve ciclos de servicio alto, y el equipo de soldadura debe poder operar bajo estas condiciones. En adición, los componentes del equipo deben tener características y controles necesarios para interconectar con el sistema de control principal (Figura 15).

Durante el corto tiempo que los robots para soldadura industrial han estado en uso, el brazo articulado o tipo revolución se ha vuelto por mucho la más popular. La razón de esta popularidad es que permite a la antorcha de soldadura ser manipulada de la misma manera que lo haría un humano. El ángulo de la antorcha y el ángulo de viraje pueden ser cambiados para hacer soldaduras de buena calidad en todas posiciones. La industria automotriz en particular reconoce los beneficios de la soldadura robótica. En la soldadura, la combinación de calor extremo y chisporroteo implican muchos riesgos en los humanos, los cuales pueden ser fácilmente superados por los robots. Las compañías que han empleado esta tecnología han ampliado principalmente el uso de los robots soldadores por arco. (21)



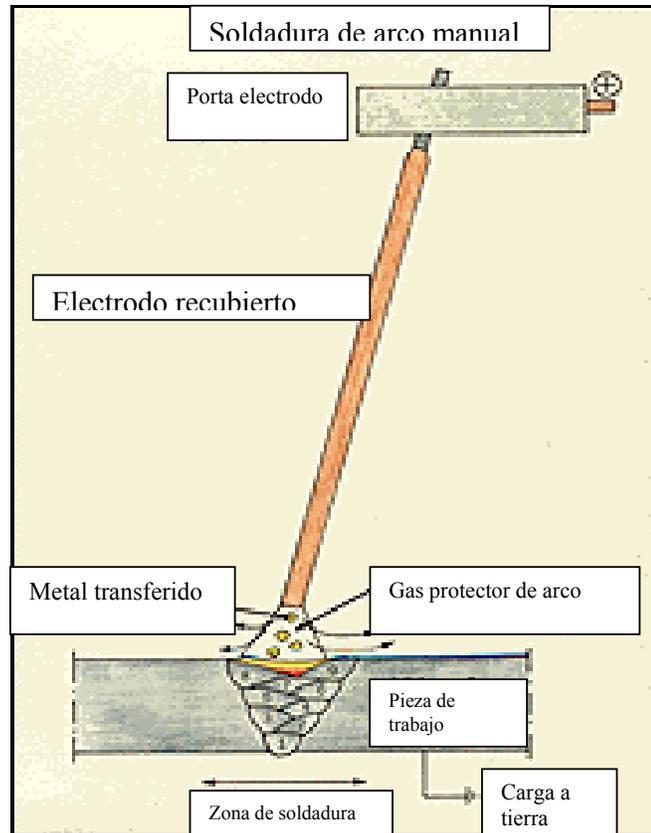
**Figura 15 .- Soldadura por arco robótica**

## **2.2PROCEDIMIENTOS PARA SOLDAR LAS ALEACIONES RESISTENTES AL CALOR**

A continuación se da una breve explicación de los procesos de soldadura que se pueden utilizar para las aleaciones resistentes a alta temperatura:.

### **2.2.1 SOLDADURA CON ARCO METALICO PROTEGIDO (SMAW).**

Es el proceso más comúnmente usado de los varios de arco eléctrico. Las siglas significan Soldadura de arco metálico protegido. Emplea el calor del arco para fundir el metal base y el extremo de un electrodo recubierto consumible. El electrodo y la mesa de trabajo son parte de un circuito eléctrico conocido como circuito de soldadura (figura 16).



**Figura 16.- Elementos de un típico circuito de soldadura para arco metálico**

Este circuito comienza con la fuente de poder e incluye los cables para soldar, un portaelectrodo, un sujetador a tierra, una mesa de trabajo y el electrodo. Uno de los dos cables de la máquina es conectado a tierra y el otro al portaelectrodo.

La soldadura comienza cuando un arco eléctrico se produce al contactar el extremo del electrodo y la pieza de trabajo. El intenso calor del arco funde el extremo del electrodo y la superficie de trabajo bajo el arco. Pequeños glóbulos de metal fundido rápidamente se forman en el extremo del electrodo, y son transferidos al charco de soldadura fundida a través de la corriente del arco. De esta forma, el metal de aporte es depositado conforme el electrodo se consume progresivamente.

El arco es movido sobre la pieza de trabajo a una apropiada longitud de arco y velocidad de movimiento, fundiendo y fusionando una porción del metal base y

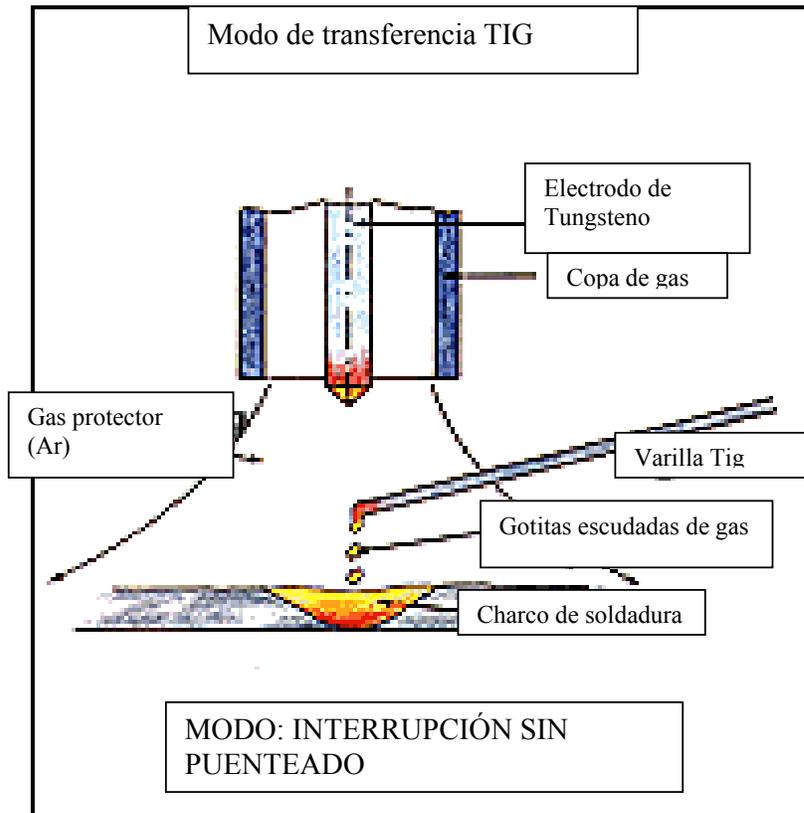
añadiendo metal de aporte conforme el arco avanza. Desde que el arco es una de las fuentes comerciales más altas de calor ( temperaturas arriba de 5000°C (9000°F) han sido medidas en su centro), la fundición toma lugar casi instantáneamente, cuando el arco contacta con el metal.

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para fundir tanto al electrodo como la apropiada cantidad de metal base. También se requiere una apropiada abertura entre el extremo del electrodo y el metal base o charco de soldadura fundido. Los tamaños y tipos de electrodos para la soldadura con arco metálico protegido define los requerimientos del voltaje (dentro del rango de 16 a 40 V) y el amperaje requerido (dentro del rango de 20 a 550 A). La corriente puede ser alterna o directa, pero la fuente de poder debe poder controlar el nivel de la corriente dentro de un rango razonable para poder responder a las complejas variables del mismo proceso de soldadura. (10)

### 2.2.2SOLDADURA CON ARCO DE TUNGSTENO Y GAS ( GTAW).

El proceso de soldadura por arco con tungsteno y gas es algunas veces llamado "TIG" (Tungsteno y gas inerte) pero las letras preferida para su designación es GTAW (Gas tungsten arc welding).

El calor para la soldadura de arco de tungsteno y gas es producida por un arco eléctrico entre el electrodo no consumible y la parte a ser soldada. El electrodo usado para llevar la corriente es una varilla de tungsteno o aleación de tungsteno. El calentamiento de la zona soldada, el metal fundido, y el electrodo de tungsteno son protegidos de la atmósfera por una envoltura de gas inerte alimentado através del portaelectrodo (Figura 17).



**Figura 17.- Soldadura con arco de tungsteno y gas.**

El arco eléctrico es producido por el paso de corriente a través del gas inerte ionizado protector. Los átomos ionizados pierden electrones y son dejados con una carga positiva. Los iones del gas positivo fluyen del polo positivo al negativo del arco. Los electrones viajan del polo negativo al positivo.

El electrodo de tungsteno caliente y el metal soldado se oxidarán rápidamente en el proceso al estar expuestos al aire. Por lo tanto, el gas protector debe ser principalmente inerte consistiendo de helio, argón, o una mezcla que protegerá tanto al electrodo como al charco de soldadura de la oxidación.

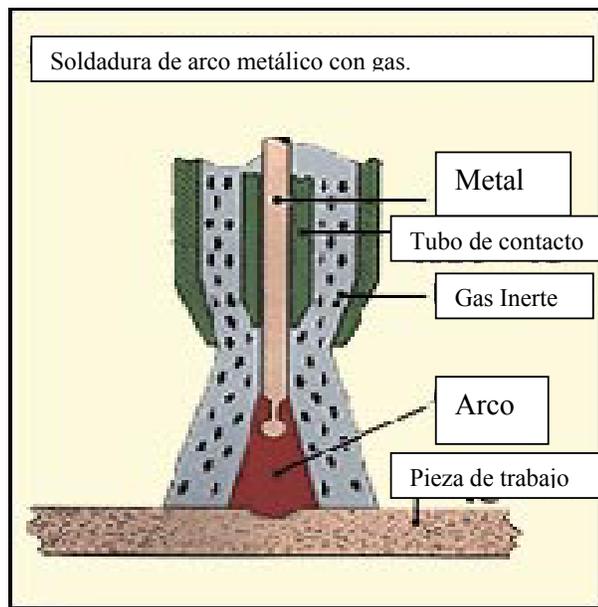
La alta densidad de corriente eléctrica producida por este proceso hace posible soldar a mayores velocidades, y obtener mayor penetración que con la soldadura a gas combustible o con el arco metálico protegido. Pueden hacerse soldaduras de muy buena calidad con este proceso, pero todo depende del ajuste del equipo y de la apropiada preparación del metal base (limpieza). Este proceso puede ser manual, semiautomático ó automático.

El proceso TIG es usado extensamente para soldar costuras longitudinales de pared delgada de tubos a presión y tubería, de aceros inoxidable, generalmente sin metal de aporte. Para unión en todas posiciones de tubos y tuberías para las industrias de generación de corriente, química, y petróleo, generalmente con metal de aporte.

(11)

### 2.2.3 SODADURA CON ARCO METALICO Y GAS (GMWA).

Es un proceso de soldadura por arco eléctrico que produce enlace de metales por su calentamiento con un arco establecido entre un metal de aporte (consumible) electrodo y la pieza de trabajo. La protección del arco y del charco de soldadura fundida se obtiene enteramente de un gas o mezcla de gases suministrado externamente como se muestra en la figura18.



**Figura 18.- Proceso de soldadura con arco metálico y gas.**

El proceso también se conoce como MIG o CO<sub>2</sub>.

Cuando el proceso GMWA fué desarrollado por primera vez, se consideró fundamentalmente un proceso de alta densidad de corriente, pequeño diámetro, electrodo de metal desnudo, usando un gas inerte para protección del arco. Su aplicación original fué para soldar aluminio. Desarrollos subsecuentes incluyeron densidades de corriente baja y corriente directa pulsada, aplicandose a un rango muy extenso de materiales, y el uso de gases reactivos (particularmente CO<sub>2</sub>) o mezcla de gases. Esto permitió su uso en aleaciones tales como: aceros al carbono, aceros baja aleación, aceros inoxidable, aleaciones resistentes a la temperatura, aluminio y aleaciones de aluminio. (12)

En la tabla 6 podemos observar las diferentes aplicaciones de estos métodos de soldadura en los aceros resistentes al calor.

Tabla 6. Parámetros para soldadura de arco de aleaciones resistentes al calor.

<b>TIPO DE ALEACION</b>	<b>PRECALENTAMIENTO</b>	<b>POSTCALENTAMIENTO</b>	<b>SMAW *</b>	<b>GMAW **</b>	<b>GTAW ***</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
HA	232-288 °C	Calentar a 648-704 °C, enfriar al aire.	E508-18			
HC	204-704 °C	Calentar a 842-1036 °C, enfriar al aire o en el horno.	E446-15	No recomendado	No relleno, solamente pases de raíz	Baja ductilidad, aleaciones difíciles de soldar. Cada cordón se martillará.
HD	No requerido	Solamente relevado de esfuerzos.	E446-15			
HE	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E312-15 E310-15HC	ER310	No relleno, solamente pases de raíz	Grandes soldaduras en secciones de espesor mayores de ¾" pueden ser precalentadas a 593-704 °C.
HF	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E308-15 E310-15 E330-15	ER310	No relleno, solamente pases de raíz	Grandes soldaduras en secciones de espesor mayores de ¾" pueden ser precalentadas a 593-704 °C.
HH	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E309-15HC E310-15HC	ER309	No relleno, solamente pases de raíz	Grandes soldaduras en secciones de espesor mayores de ¾" pueden ser precalentadas a 898-953 °C, piezas grandes en espesores mayores a 1" pueden ser tratadas postsoldadura a 1036-1120 °C por 3-4 horas.
HK	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E310-15HC	ER310-HC	ER310-HC	Grandes soldaduras en secciones de espesor mayores de ¾" pueden ser precalentadas a 898-953 °C. Similarmente, después de soldar un relevado de esfuerzos de 1 h. a 871 °C mínimo, es recomendable.
HL	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E310-15HC	ER310-HC	ER310-HC	
HN	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E330-15HC	ER330-15HC	ER330-HC	
HP	No requerido	No requerido	E310-15HC			Grandes soldaduras en secciones de espesor mayores de ¾" pueden ser precalentadas a 898-953 °C. Grandes piezas o piezas críticas de formas complejas pueden ser tratadas después de soldar por 3-4 horas a 1036-1120 °C.
HT	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E330-15HCHS	ER330	No relleno, solamente pases de raíz	
HU	No requerido (ver observaciones)	No requerido (ver observaciones)	E330-15HCHS E310-15	ER330 ER310	ER330HC ER310	Grandes piezas o piezas críticas de formas complejas pueden ser tratadas después de soldar por 3-4 horas a 1036-1120 °C.
HW	No requerido	No requerido (ver observaciones)	ENiCr-1	No recomendado	No recomendado	En piezas críticas puede ser dado para relevar esfuerzos a 953 °C por 2 horas.

\*SMAW Soldadura con arco metálico protegido. \*\*GMAW Soldadura con arco metálico y gas. \*\*\*GTAW Soldadura con arco de tungsteno y gas. (12)

### **2.3 SOLDADURA DE LOS ACEROS HK-40**

Las aleaciones HK-40 tienen buena soldabilidad por los procesos SMAW, GTAW y GMAW usando como material de aporte metal de relleno semejante.

Como se puede ver en la tabla 6 se mencionan estos tres procesos:

SMAW (Soldadura con arco metálico protegido), el cual utiliza como material de aporte un electrodo revestido tipo 310-15HC para aplicar en todas posiciones con corriente directa electrodo al positivo. La composición química del metal depositado es la misma que un E310, excepto que el rango de carbono es de 0.35 a 0.45%. Estos electrodos son usados primeramente para soldar aleaciones resistentes al calor y aleaciones resistentes a la corrosión. Las aleaciones tienen una alta resistencia a temperaturas sobre 930oC. No se recomiendan para atmósferas altas en azufre o donde severos choques térmicos están presentes.

GTAW (Soldadura con arco de tungsteno y gas), utiliza ER310-HC, un alambre de acero inoxidable tipo 310 con alto contenido de carbono de 0.35 a 0.45%.

GMAW (Soldadura con arco metálico y gas), utiliza también ER-310-HC, tipo 310 con alto contenido de carbono de 0.35 a 0.45%. (15)

## **CAPITULO III.- FUNDAMENTOS DE LOS MATERIALES PARA UN ELECTRODO DE ARCO ELECTRICO PROTEGIDO.**

### **3.1 GENERALIDADES.**

El procedimiento de soldeo eléctrico por arco está caracterizado por la creación y el mantenimiento de un arco entre una varilla metálica denominada “electrodo” y la pieza que se va a soldar. El electrodo desempeña a la vez los papeles de conductor de la energía eléctrica necesaria para la fusión y de metal de aporte.

Los electrodos desnudos, que se utilizan en casos excepcionales, están hoy día casi totalmente reemplazados por los electrodos revestidos, constituidos por un alma metálica y un revestimiento. La fusión del revestimiento, en general sigue a la del metal de aporte, formando sobre el baño de metal líquido una escoria metalúrgica. Entonces se producen las reacciones más complejas que dependen de la naturaleza del revestimiento de la escoria y del metal fundido: reacciones de desoxidación, de desulfuración, de desnitruración, así como intercambio de elementos metálicos aportados en forma de ferroaleaciones por el revestimiento.

El electrodo revestido está constituido por un núcleo metálico generalmente de forma cilíndrica, y un revestimiento de composición química muy variable, según las características exigidas.

La composición química del revestimiento es muy compleja; son mezclas de materias orgánicas y minerales, de modo que cada sustancia juega una función determinada, ya sea durante la fusión, o bien durante la solidificación. Actuando como: estabilizadores de arco, formadores de escoria, depuradores del metal, portadores de elementos útiles al metal fundido, etc.

Las tres grandes funciones que realiza el electrodo son las siguientes:

- I.- Función Eléctrica del Revestimiento.
  - II.- Función Física de la Escoria.
  - III.- Función Metalúrgica del Revestimiento.
- (3)

## I.- Función Eléctrica del Revestimiento.

La existencia de un arco depende del estado de ionización de los gases existentes entre el ánodo y el cátodo. Los arcos metálicos son inestables a causa de sus características negativas, debido al hecho de que la resistencia disminuye cuando la intensidad del arco aumenta. Para obtener la estabilidad de funcionamiento se introduce en el circuito del arco una resistencia, o mejor una bobina de inducción con una resistencia, que se opone a las variaciones rápidas de la corriente.

Así mismo, los factores que actúan sobre la estabilidad del arco son numerosos:

- la tensión del cebado en vacío; en corriente alterna se precisan tensiones de cebado más elevadas;
- el potencial de ionización de los metales, mientras más bajo, el arco es tanto más estable;
- el poder termoiónico debe ser alto para mantener la estabilidad del arco;
- la conductibilidad térmica varía de acuerdo al tipo de material.

Para el arco con corriente alterna es indispensable un medio fuertemente ionizado; por lo mismo la necesidad de introducir en el revestimiento sales con baja tensión de ionización y un elevado poder termoiónico, tales como las sales de sodio, potasio y bario. La acción de estas sales es tanto más sensible cuanto que la concentración en metal es más elevada. La acción de ciertas sales es particularmente sensible en la soldadura eléctrica por arco en corriente alterna. Efectivamente, es imposible a baja tensión ( $U_1 < 60V$ ) cebar el arco entre una chapa pulida y un electrodo metálico desnudo, pero simples vestigios de cloruro de sodio sobre la chapa permiten el inmediato cebado del arco.

Hay otros materiales que también son favorables al cebado y al mantenimiento del arco tales como los silicatos, los carbonatos, los óxidos de hierro, los óxidos de titanio, el óxido de torio, etc. Contrariamente a estas substancias, existen muchos productos, tales como los fluoruros, que ofrecen una acción eléctrica desfavorable; por esta razón la criolita ( $Na_3AlF_6$ ) no es aconsejable como cuerpo ionizante. (3)

## II.- Función física del Revestimiento:

1º. Forma una capa de escoria que protege el cordón de soldadura caliente de la oxidación.

2º. Evita el rápido enfriamiento del cordón de soldadura gracias a la protección de la capa de escoria.

## III.- Función metalúrgica del Revestimiento.

Las funciones principales del revestimiento del electrodo en soldadura son:

1) Actúa como limpiador y desoxidante del material base durante la soldadura.

2) Actúa como estabilizador del arco eléctrico y disminuye el chisporroteo.

3) Influye directamente en la penetración del cordón de soldadura.

4) Rompe las tensiones superficiales de las gotas del metal de aporte, permitiendo que estas se amalgamen homogéneamente con el material base.

5) Permite, por medio de elementos adicionales, obtener un cordón de soldadura con características especiales.

6) Influye en la cantidad de aportación del material de soldadura.

(3)

### **3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS**

Los Revestimientos de los electrodos para soldar por arco pueden clasificarse, según su naturaleza química y las reacciones de sus escorias, en cinco grupos.

1º. REVESTIMIENTOS OXIDANTES, constituidos principalmente por una mezcla de óxidos de hierro, sílice y silicatos naturales (caolín, talco, mica, feldespato, etc.), con pocos elementos desoxidantes o ninguno. Las escorias pertenecen al sistema  $FeO.SiO_2$ . Estos electrodos se llaman oxidantes porque el metal fundido retiene gran cantidad de oxígeno o de óxido de fierro ( $FeO$ ) (así como nitrógeno en forma de nitruro  $Fe_4N$ ). Los electrodos oxidantes son los más corrientes, tienen bajas características mecánicas y dan cordones de soldadura de muy buen aspecto, especialmente en las soldaduras en ángulo. (4)

2°. REVESTIMIENTOS ACIDOS: están formados también a base de óxidos de hierro y silicatos naturales, pero contienen gran proporción de productos desoxidantes y desnitrurantes en forma de ferroaleaciones (ferromanganeso, ferrosilicio, ferrotitanio).

Las escorias que se obtienen forman parte del sistema FeO-SiO<sub>2</sub>-MnO, y dan silicatos complejos

Contienen:

- a) Gran proporción de silicato de hierro o de silicatos más complejos de hierro y manganeso.
- b) Oxidos libres FeO y MnO en proporciones variables.

Estas escorias tienen reacción ácida: es decir, tienden a disolver los óxidos básicos tales como el MnO; en consecuencia, gran parte del manganeso se desplaza hacia la escoria. Este enriquecimiento en manganeso disminuye la viscosidad de la escoria, lo cual lleva a una mejora en el aspecto del cordón y facilita la realización de soldaduras en todas las posiciones. (4)

3°. REVESTIMIENTOS DE OXIDO DE TITANIO: a base de rutilo (TiO<sub>2</sub> natural en 95% de riqueza) o de ilmenita (óxido de hierro-titanado); contienen también silicatos naturales y ferroaleaciones, que son elementos de afino.

Las escorias que se forman son titanatos de hierro o titanatos complejos; pertenecen al sistema TiO<sub>2</sub>-FeO-MnO y tienen una función ácida, menos fuerte sin embargo que las escorias ácidas.

Los electrodos a base de rutilo permiten realizar soldaduras de muy buen aspecto con buenas características mecánicas; presentan, además las ventajas de dar gran estabilidad al arco, y de permitir la ejecución de soldaduras en todas las posiciones; constituyen una gama de electrodos muy apreciada. (4)

4°.REVESTIMIENTOS CELULÓSICOS: constituidos a base de productos volátiles (celulosa de madera o de algodón), contienen también silicatos naturales y ferroaleaciones reductoras. Estos electrodos producen una escoria poco voluminosa, y con ellos las reacciones de reducción se llevan en una atmósfera de hidrógeno que rodea el metal fundido.

El metal depositado por estos electrodos está afinado, carece de oxígeno ( $O_2$  menor ó igual a 0,020%), pero contiene en cambio gran proporción de hidrógeno (de 15 a 25 centímetros cúbicos por 100 g de metal).

Los electrodos celulósicos encuentran aplicaciones en el soldeo en posiciones diversas y sobre todo cuando se pretende conseguir cierta penetración de la soldadura. En efecto, a la temperatura del arco, la descomposición del hidrógeno molecular desprendido por la celulosa en hidrógeno atómico ( $H_2 \rightleftharpoons 2H$ ) se realiza con adsorción de 102 000 cal/mol, que se restituyen en forma de calorías suplementarias. (4)

5° REVESTIMIENTOS BÁSICOS: son mezclas de carbonato cálcico o magnésico cuyos valores de formación son elevados con un fundente, a las que se han añadido productos en forma de ferroaleaciones.

Estos revestimientos funden a temperatura muy elevada (hacia los 2000°C), y por ello se necesita añadir un fundente (espato flúor, criolita, etc.).

Las escorias obtenidas a partir de estos electrodos, que poseen una función básica fuerte, pertenecen al sistema  $CaO-SiO_2$  o a otros más complejos; se presentan en forma de metasilicato  $2CaO, SiO_2$  o de mezcla de metasilicato y trisilicato  $3CaO, SiO_2$ , ambos muy estables.

Los electrodos básicos depositan un metal puro con inclusiones dispersas y estructura fina, que posee elevada capacidad de deformación; alargamiento del orden de 30%.

Ciertos electrodos forman la clase de los llamados “bajos de hidrógeno”, que tienen gran importancia industrial. (4)

Para aumentar el rendimiento de las soldaduras manuales se están utilizando en el mercado electrodos con revestimiento ácido, de rutilo o básico, que permiten reducir el precio de coste de las soldaduras: ya por evitar una preparación larga y costosa de los bordes de la junta (electrodos de gran penetración), ya porque aportan un peso de metal superior al del alma del electrodo sin variación sensible del tiempo de la fusión (electrodos de gran rendimiento).

### 3.3 CARACTERISTICAS DEL REVESTIMIENTO PARA EL ELECTRODO HK-40

Para el desarrollo del electrodo para arco eléctrico hay que considerar dos aspectos importantes: el económico y el técnico.

En el aspecto económico se tiene que desarrollar un producto de buena calidad y lo más barato posible. En el aspecto técnico hay que ver la calidad de las materias primas y que el producto reúna todas las características técnicas requeridas por el cliente.

Dentro del aspecto técnico hay que tomar en cuenta que las materias primas van a ser:

- A) Alambre, que es el material de aporte de los elementos metálicos y para este caso va a ser un acero inoxidable 310.
- B) Fundente que va a recubrir el alambre y que debe aportar los siguientes materiales para el buen funcionamiento del electrodo.

Los componentes químicos para el electrodo utilizado para soldar el acero HK-40, son básicamente los siguientes:

- ◆ Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )
- ◆ Arena de Rutilo ( $\text{TiO}_2$ )
- ◆ Oxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ )
- ◆ Feldespato de Potasio ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ )
- ◆ Ferrocromo alto carbono
- ◆ Fluorita ( $\text{CaF}_2$ )
- ◆ Ferrotitanio ( $\text{TiFe}$ )
- ◆ Titanato de Potasio
- ◆ Manganeso electrolítico
- ◆ Niquel puro
- ◆ Ferrocromo extra bajo carbono
- ◆ Polvo de hierro
- ◆ Alginato de Sodio
- ◆ Arcilla

Binder (formador de pasta)

- ◆ Silicato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )
- ◆ Hidróxido de Potasio (KOH)
- ◆ Carbonato de potasio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

Estos materiales son los utilizados para fabricar soldadura de aceros inoxidables, balanceándose únicamente el contenido de carbono, cromo y níquel, específicamente para el acero HK-40.

Este tipo de revestimiento se considera del tipo Rutílico.

Las funciones de cada uno de los componentes son las siguientes:

- 1°. El núcleo de acero 310 proporcionar los elementos básicos de la aleación
- 2°. El carbonato de calcio, durante la descomposición del electrodo se produce también la descomposición del carbonato, obteniendo como resultado óxido de calcio y gas carbónico, que obra como protector del cordón de soldadura durante su desarrollo. De esta forma el óxido de calcio queda como elemento base, y siendo que tiene una gran afinidad con los ácidos, se combina, por ejemplo, con impurezas tales como el fósforo y el azufre (también productores de ácidos) para quedarse al final en forma de escoria, dejando el material depositado libre de impurezas.
- 3°. La arena de rutilo es un escorificante, favorece el cebado y el mantenimiento del arco.
- 4°. El óxido de titanio favorece el cebado y el mantenimiento del arco.
- 5°. Feldespato de potasio, produce elevado poder termoiónico y ayuda a la formación de escoria por el  $\text{SiO}_2$ .
- 6°. Ferrocromo alto carbono, introduce en la soldadura el carbono y compensa el cromo perdido por la fusión.
- 7°. Fluorita, la fuerza del arco eléctrico descompone la fluorita en calcio y en fluor, este último tiene una gran afinidad con el hidrógeno, se combina con él quedando en forma de gas fluorhídrico (HF), que por ser un gas de composición química de buena estabilidad, se sale del material de depósito durante su aportación, desapareciendo y dejando un cordón de soldadura casi exento de hidrógeno. También se puede decir que la fluorita proporciona una unión soldada de más elasticidad.

- 8°. Ferrotitanio: agente purificador del acero por la afinidad del Titanio por el Oxígeno.
- 9°. Titanato de potasio: favorece el cebado y el mantenimiento del arco por el potasio.
- 10°. Manganeso Electrolítico: se combina con el azufre para eliminarlo en la escoria; se agrega para compensar la pérdida de manganeso por la fusión, siendo esta de aproximadamente 50%.
- 11°. Níquel puro: se agrega para compensar su pérdida al momento de la fusión; se pierde aproximadamente un 6%.
- 12°. Ferrocromo extrabajo carbono: Se agrega para compensar la pérdida de cromo en la fusión: esta es aproximadamente de 5%.
- 13°. Polvo de Hierro: Se agrega como balance final de la formulación.
- 14°. Alginato de sodio: sirve como lubricante de la pasta al momento de la extrusión; el sodio nos sirve como ionizante.
- 15°. Arcilla: es un escorificante ya que está formado básicamente de sílice.
- 16°. Silicato de sodio: es el aglomerante en la preparación de la pasta, ya que es un líquido espeso, además que tiene el sodio que proporciona un medio fuertemente ionizante.
- 17°. Hidróxido de sodio: actúa como desengrasante en el binder y por el sodio favorece el cebado.
- 18°. Carbonato de Potasio: Ayuda en la protección del cordón de soldadura y el potasio específicamente como ionizante.

(4, 6)

## **CAPITULO IV.- DESARROLLO DEL ELECTRODO HK-40**

### **4.1 INTRODUCCION.**

El diseño de un electrodo para soldar aceros HK-40 resistentes a altas temperaturas se debió a la necesidad en el mercado mexicano de este tipo de electrodos, ya que los fabricantes nacionales no lo producían.

Empresas como UTP, Infra, Electroodos Monterrey, ESSAB, Messer, etc. no lo tenían entre sus productos.

Eutectic+Castolin por necesidades de PEMEX y Cementos Cruz Azul se dio a la tarea de diseñar un electrodo revestido HK-40 para soldar este tipo de aceros.

### **4.2 PROCEDIMIENTO DE FABRICACION.**

El proceso comúnmente seguido para la fabricación de electrodos es el proceso de extrusión.

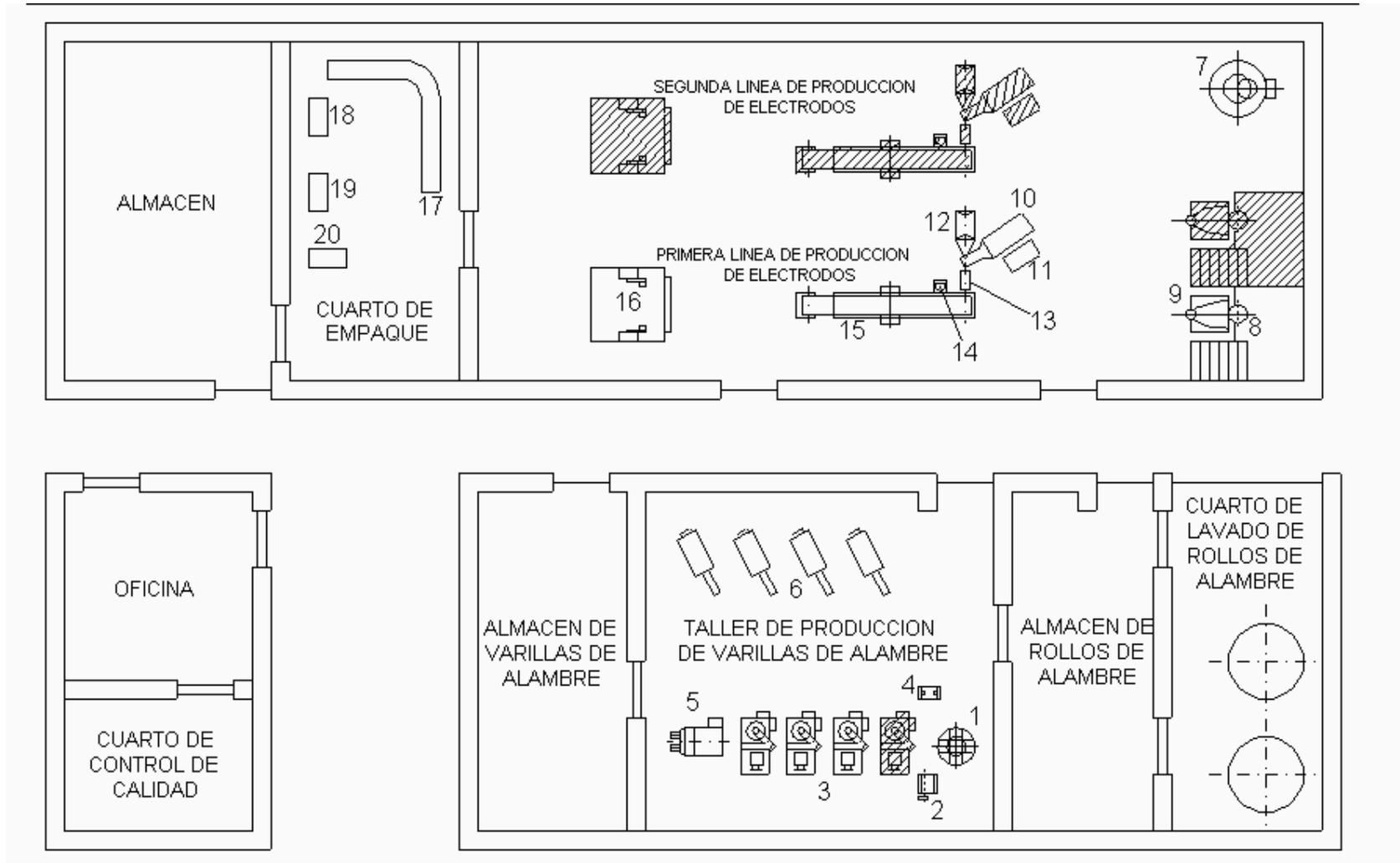
#### **4.2.1 Entrada al Almacén de Materias Primas**

Las materias primas son recibidas en el Almacén de materia prima donde se realizan las siguientes pruebas de calidad para su aprobación:

- Análisis químico y granulométrico a los polvos, donde se analizan los elementos químicos más importantes y se prueba en tamices la granulometría, especificadas en las normas y procedimientos internos de Eutectic.
- Análisis químico del alambre, de acuerdo a las especificaciones de Eutectic y de AWS (American Welding Society).
- Análisis químico y viscosidad a los silicatos (líquidos aglutinantes) que se utilizan para mezclar los polvos y formar la pasta (fundente).
- Prueba de Resistencia a la tensión a los alambres, de acuerdo a normas AWS.

Ya teniendo la materia prima aprobada por el departamento de control de calidad puede entrar al proceso.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ELECTRODOS.



## **DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.**

1. Plataforma de alimentación de bobinas o rollos.
2. Máquina afiladora.
3. Máquina de estirado de alambres.
4. Máquina soldador de alambres.
5. Máquina bobinadora.
6. Máquina de enderezado y corte de alambres.
7. Agitador de silicato de sodio.
8. Mezclador húmedo.
9. Prensa moldeadora de fundente.
10. Estrujador de fundente (máquina recubridora)
11. Unidad hidráulica.
12. Alimentador de alambres.
13. Transportador.
14. Examinador excéntrico.
15. Transportador de cepillos.
16. Horno de secado.
17. Máquina atadora.
18. Máquina engrapadora.
19. Máquina de sellado plástico.
20. Transportador de rodillos.

#### 4.2.2 Corte y Enderezado de alambre.

El alambre trefilado llega en rollos y se corta en una máquina enderezadora y cortadora según las longitudes indicadas por la norma (American Welding Society AWS). Las longitudes más comunes, dependiendo del diámetro del electrodo son las siguientes:

Diámetro	Longitud
1/16 in (1.6mm)	9 in (228.5mm)
3/32 in (2.4mm)	9 in (228.5mm)
1/8 in (3.2mm)	14 in (355.6mm)
5/32 in (4.0mm)	14 in (355.6mm)
3/16 in (4.8mm)	14 in (355.6mm)

El enderezado y corte del alambre deben ser muy cuidadosos, ya que admite una tolerancia muy pequeña en lo que respecta al diámetro y por tanto sobre los defectos, en particular las rebabas de corte son inadmisibles.

El alambre cortado debe estar perfectamente desengrasado, para que haya una buena adherencia de la pasta (recubrimiento) en el alambre.

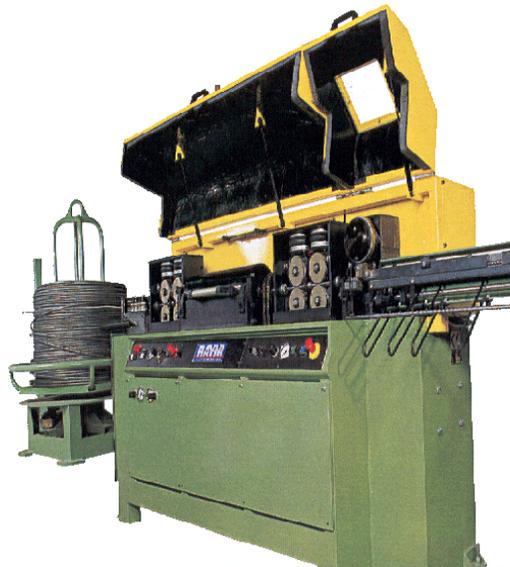
a) Pruebas de calidad.

Se checa constantemente la longitud del alambre que sale de la máquina cortadora.

b) Equipo.

La máquina cortadora-enderezadora tiene las siguientes características (Figura 19):

- Marca: Patterson.
- Capacidad: alambre de 12 a 45 mm.
- Velocidad: 80 metros por segundo.



Type	MD10	MD20	MD30	MD40	MD50	MD60
Dia. fil lisse (mm) 75 kg/mm <sup>2</sup> maxi	0,8-2	1,8-6	3-10	5-12	6-14	6-18
Dia. fil crenté (mm)			3-8	4-10	6-12	6-14
Vitesse m/mh	10-50	20-90	40-130	40-130	40-130	30-100

**Figura 19.- Enderezadora-cortadora de alambre**

#### 4.2.3 Lavado y secado de alambre.

El lavado se realiza en equipos especiales que tienen capacidad para 100 kg de alambre cortado. Se le añade agua y sosa o desengrasantes. El equipo gira mientras está en proceso, el cual dura alrededor de 20 minutos, dependiendo de la cantidad de grasa que tenga. Se enjuaga varias veces con agua corriente hasta eliminar la grasa.

El secado se realiza en tinas que contienen aserrín par eliminar la humedad.

##### a) Pruebas de calidad.

Se pasan algunos electrodos sobre papel secante para observar si hay presencia de grasa.

b) Equipo.

Las lavadoras son cilindros metálicos con varios compartimientos horizontales para colocar el alambre.

- Marca: s/m
- Capacidad: 500kg
- Medidas: diámetro 2m; ancho 50cm.
- Material: acero inoxidable 304.

4.2.4 Pesaje.

Se tienen básculas electrónicas para pesar los polvos y silicatos (aglutinantes). Cada materia prima se pesa conforme a la formulación entregada y se va colocando en bolsas de plástico y botes metálicos de 100 kg; el aglutinante (líquido) se pesa por separado y se coloca en botes de 20 kg.

a) Pruebas de calidad.

Las básculas son electrónicas y se imprimen todas las pesadas para llevar su control, anotándose a cada hoja impresa el número de orden de producción. Así también en cada tambo metálico se marca el número de orden de producción correspondiente.

b) Equipo:

Báscula 1 (Figura 20)

- Marca: toledo
- Modelo: METUB400P
- Capacidad: 500 kg.

Báscula 2

- Marca: toledo
- Modelo: XBL30R-XHD
- Capacidad: 30 kg.



**Figura 20.- Báscula electrónica**

#### 4.2.5 Mezclado en seco.

Este tiene como finalidad homogeneizar los polvos. Se lleva a cabo en un molino de doble garganta.

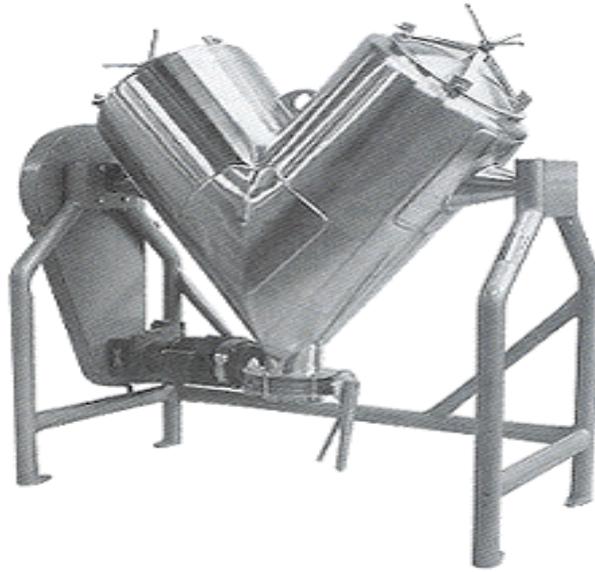
##### a) Pruebas de calidad.

Se verifica el tiempo del mezclado y se verifica el color de la mezcla, comparándola con muestras estándar (30 minutos de mezclado)

##### b) Equipo.

Mezcladora de doble garganta (Figura 21)

- Marca: micron
- Modelo: tipo V (doble garganta)
- Capacidad: 100 kg.



**Figura 21.- Mezcladora de doble garganta**

#### 4.2.6 Mezclado en húmedo.

En esta etapa se prepara la pasta, que son los polvos provenientes del mezclado en seco u homogenización con un líquido espeso (silicato de sodio o potasio), hasta que tenga una consistencia de plastilina. La proporción se verá más adelante, su peso es aproximadamente 16 kilos de solución por 100 kg de polvo. El proceso dura aproximadamente 30 minutos.

a) Pruebas de calidad.

Se checa la consistencia de la pasta.

b) Equipo.

Mezcladora de ruedas. (Figura 22)

- Marca: Ravin
- Modelo: 105B
- Capacidad: 500 kg.



**Figura 22.- Mezcladora para pastas**

#### 4.2.7 Compresión de la Pasta.

En un aparato a base de un pistón a presión se coloca la pasta en un recipiente cilíndrico con tapa, en donde se comprime para darle la forma del recipiente. Las dimensiones del mismo dependen de las dimensiones del pistón de la máquina de extrusión, donde se va a alimentar para revestir el alambre.

a) Prueba de calidad.

Se realiza una prueba de penetración de la uña, debiendo ser mínima su marca.

b) Equipo.

Estas compactadoras forman parte de la mezcladora de ruedas o pastas.

#### 4.2.8 Extrusión.

Esta parte del proceso se lleva a cabo en una máquina extrusionadora que consta de tres partes:

1ª. Prensa de extrusión, donde se alimenta la pasta compactada y fluye a presión a una cabeza de la máquina que se encuentra en el otro extremo de la prensa, donde la cabeza está unida por otro extremo al alimentador de alambre.

2ª. Alimentador de alambre, en el cual se coloca la varilla de alambre del paso 4.3.2, y que al pasar por la cabeza de la máquina extrusora se reviste por la pasta inyectada a presión por la prensa.

3ª. Banda transportadora.- Aquí cae el electrodo que sale de la máquina de extrusión para ser cepillada en los extremos (portaelectrodo y punta de contacto), y ser llevados a las charolas de secado.

a) Pruebas de calidad.

- Presión de alimentación de pasta. (90 lb/in<sup>2</sup>)
- Uniformidad de acomodo de pasta en alambre.
- Prueba de concentricidad (+- 0.003 in) \*
- Revisión visual de punta de contacto (libre de pasta).
- Revisión de longitud de cepillado en portaelectrodo (1in-25.4mm)
- Color de pasta (dependiendo del producto, comparándolo contra estándares).

Todas estas características son anotadas en la orden de producción.

\*Concentricidad.- prueba para checar que la pasta tiene la misma distancia desde cualquier punto exterior del electrodo al núcleo (alambre), o la diferencia es de +- 0.003 in. (Figura 23)



**Figura 23.- Medidor de concentricidad**

b) Equipo

Máquina extrusionadora (Figura 24):

Marca: Oerlikon

Modelo: EP-5

Capacidad: Presion de 14.078 Kg/cm<sup>2</sup> (200 lb/in<sup>2</sup>)



**Figura 24.- Extrusionadora y alimentadora de alambre**

#### 4.2.9 Secado al aire

Los electrodos ya colocados en charolas son dejados 24 horas para secado, para eliminar la humedad, ya que si se hornea antes de este tiempo se fisura la pasta en anillos.

a) Prueba de calidad.

En tarjetas de control se marca la fecha y hora del comienzo del secado así como su fecha y hora de terminación.

b) Equipo

Charolas y carritos.

#### 4.2.10 Horneo

De acuerdo al producto va a ser el ciclo de horneo, el cual debe comenzar con baja temperatura ( 60°C) durante 30 minutos y seguir el ciclo. En el caso del electrodo HK-40 su ciclo de horneo fue:

60 °C	30 minutos
110 °C	15 minutos
220 °C	30 minutos

Apagar el horno y dejar enfriar 60 minutos.

Esto en base a formulaciones Eutectic + Castolin para productos similares a éste.

##### A) Pruebas de calidad

1°. Aplicación del electrodo para observar chisporroteo y porosidad

(Si hay chisporroteo excesivo y poros quiere decir que hay humedad y falta horneo, y se deja unos 15 minutos más y se vuelve a probar).

2°. Ya listo el horneo se checan las siguientes características de aplicación:

- Diámetro
- Color de escoria
- Desprendimiento de escoria
- Amperaje utilizado
- Formación de escoria
- Color de cordón
- Tipo de corriente utilizada
- Máquina de soldar utilizada
- Fluidez
- Formación de uña
- Humedad
- Voltaje utilizado
- Chisporroteo

b) Equipo (Figura 25)

Marca: Caisa

Modelo: Serie G

Capacidad: 500 kg

Temperatura: hasta 500°C



**Figura 25.- Horno para secado de electrodos**

4.2.11 Marcado.

Los electrodos ya horneados y aprobados son colocados en una banda transportadora que tiene un sistema de marcado, del cual el electrodo saldrá con la siguiente información:

- Logotipo de la empresa (Eutectic + Castolin)
- Nombre del producto (Eutectrode HK-40)
- Código de bandas para identificación

a) Pruebas de calidad

Revisión por un inspector de la información arriba mencionada.

c) Equipo:

Marca: Oerlikon

Modelo: EP-5

Capacidad: 100 piezas/min.

#### 4.2.12 Pesado y Empacado

Los materiales con que se fabrican los electrodos absorben fácilmente humedad con el paso del tiempo, por lo cual se empacan en bolsa de plástico sellada en caliente y después se colocan en botes de plástico. El peso del producto es de 5Kg. y se pesan en básculas electrónicas (Figura 26).

a) Prueba de calidad

Verificación por muestreo del peso de las bolsas con electrodos antes de colocarlas en los botes de plástico, pesándolas en las básculas electrónicas.

b) Equipo:

Básculas

Marca: Braunker

Modelo: 10M3030

Capacidad: 10 kg.

#### 4.2.13 Almacenaje

Los electrodos empacados son enviados al Almacén de Producto terminado donde son colocados en anaqueles aislados del piso para evitar la humedad. También son estibados en 5 columnas máximo para que no se maltraten.



**Figura 26.- Empaque de electrodos.**

#### **4.3 BALANCE Y AJUSTE DE MATERIALES.**

Para el cálculo del fundente del electrodo se partió de la siguiente formulación:

<b>Fundente</b>	<b>Cantidad</b>
Carbonato de calcio	19.444
Arena de rutilo	17.644
Oxido de titanio	14.148
Feldespatos de potasio	6.868
Ferrocromo alto carbono	9.805
Fluorita	7.030
Ferrotitanio	1.402
Titanato de potasio	9.384
Manganeso electrolítico	3.020
Níquel puro	0.962
Ferrocromo extra bajo carbono	5.099
Polvo de hierro	2.000
Alginato de sodio	0.880
Arcilla	<u>2.314</u>
	100.000

## **Aglutinante**

Silicato de Sodio	15.685
Hidróxido de Potasio	1.911
Carbonato de potasio	0.441
Agua	0.490

Para el alambre, se partió de un acero inoxidable tipo 310 con la siguiente composición química (tabla 7):

TABLA 7.- Comparación del Análisis del alambre 310 con la Norma AWS. A5.9 ER-310y el acero HK-40

	<b>Actual</b>	<b>Norma ER310</b>	<b>HK-40</b>
	(alambre)0 Por ciento	Por ciento	Por ciento
Carbono	0.100	0.08-0.15	0.35-0.45
Manganeso	1.30	1.00-2.50	1.50 máx.
Silicio	0.60	0.30-0.65	1.50 máx.
Fósforo	0.015	0.030 máx.	0.040 máx.
Azufre	0.017	0.030 máx.	0.040 máx.
Cromo	26.50	25-28	23-27
Níquel	21.00	20-22.5	19-22

Como se puede observar todos los elementos están dentro del rango del alambre ER-310, pero si se compara el contenido de carbono con el de la aleación HK-40, no se encuentra dentro del mismo. El alambre 310 no se produce dentro de este rango de carbono, por lo que el ajuste del mismo se hará en el fundente.

Para las pruebas se deben tomar las siguientes consideraciones:

Relación alambre-fundente:	70-30
Carbono requerido: 0.40 %	merma = 1.0% (teórica)
Cromo requerido: 25.50 %	merma = 15.0% (teórica)
Níquel requerido: 20.00 %	merma = 3.0% (teórica)
Manganeso requerido 0.90 %	merma = 53.0% (teórica)

Esta información esta basada en pruebas realizadas a electrodos de la misma familia (inoxidable), así como su análisis químico para obtener el porcentaje de merma.

A continuación se realiza el balance de los mismos.

### PRUEBA No. 1

#### A) Balance del Carbono:

Materia prima: Ferrocromo alto carbono con 8.5% de carbono.

Carbono total = Carbono requerido / 100 – merma teórica.

$$\text{Carbono total} = 0.400/0.99 = 0.404$$

Carbono fundente = Carbono total - Carbono alambre

$$\text{Carbono fundente} = 0.404 - 0.100 = 0.304$$

Carbono equivalente = Carbono fundente / Porciento fundente/100 x (Porciento carbono en Ferrocromo /100)

$$\text{Carbono equivalente} = 0.304/0.30 \times 0.085 = 0.304/0.0255 = 11.921$$

$$\text{Ferrocromo alto carbono} = 11.921 \text{ Kg.}$$

#### B) Balance de Cromo:

Materia prima: Ferrocromo alto carbono con 70% de cromo

Ferrocromo extrabajo carbono con 70% de cromo.

Cromo total = Cromo Requerido / 100 – (%merma/100)

$$\text{Cromo total} = 25.50/0.85 = 30.000$$

Cromo fundente = Cromo total - Cromo alambre

$$\text{Cromo fundente} = 30.00 - 26.50 = 3.50$$

Cromo Equivalente = Cromo fundente / (Pureza ferrocromo / 100) (Porciento fundente/100)

$$\text{Cromo equivalente} = 3.500/0.70 \times 0.30 = 3.500/0.21 = 16.667$$

Ferrocromo bajo carbono = Ferrocromo total – Ferrocromo bajo carbono

$$\text{Ferrocromo bajo carbono} = 16.667 - 11.921 = 4.746 \text{ Kg.}$$

#### C) Balance de Níquel:

Materia prima: Níquel puro (97% pureza).

Níquel Total = Níquel Requerido / (Porciento pureza / 100)

$$\text{Níquel total} = 20/0.97 = 20.618$$

Níquel fundente = Níquel total - Níquel alambre

$$\text{Níquel fundente} = 20.618 - 21.000 = 0$$

D) Balance de Manganeso:

Materia prima: manganeso electrolítico (100% pureza).

Manganeso Total = Manganeso Requerido / (100 - % merma / 100)

Manganeso total =  $0.90/0.47 = 1.915$

Manganeso fundente = Manganeso total - Manganeso alambre

Manganeso fundente =  $1.915 - 1.30 = 0.615$

Manganeso Equivalente =

Manganeso fundente / (Porcentaje fundente / 100) (Porcentaje pureza / 100)

Manganeso Equivalente =  $0.615/0.30 = 2.050$  Kg.

<b>Fundente:</b>	<b>Cantidad:</b>
Carbonato de Calcio:	19.444
Arena de rutilo:	17.644
Oxido de titanio:	14.148
Feldespatos de potasio:	6.868
Ferrocromo alto carbono:	11.921
Fluorita:	7.030
Ferrotitanio:	1.402
Titanato de potasio:	9.384
Manganeso electrolítico:	2.050
Níquel:	0.962
Ferrocromo extra bajo carbono:	4.746
Polvo de hierro:	1.207
Alginato de sodio:	0.880
Arcilla:	2.314
<b>Aglutinante:</b>	
Silicato de sodio:	15.685
Hidróxido de Potasio:	1.911
Carbonato de potasio:	0.441
Agua:	0.490

## RESULTADOS DE LA PRUEBA 1

### A) Características Generales.

TABLA 8.- Verificación de Características Generales de Prueba 1 con las Típicas.

<b>Características</b>	<b>Típico</b>	<b>Prueba 1</b>
<b>Concentricidad</b>	<b>+ - 0.005"</b>	<b>0.002"</b>
<b>Diámetro del electrodo (1/8")</b>	<b>0.196" a 0.200"</b>	<b>0.197"</b>
<b>Color de escoria</b>	<b>Negro</b>	<b>Negro</b>
Desprendimiento de Escoria	Muy fácil	Muy fácil
Amperaje utilizado	90-110	100
Formación de escoria	Buena	Buena
Material base utilizado	Inoxidable 304	Inoxidable 304
Color de cordón	Gris metálico	Gris metálico
Tipo de corriente utilizado	CC-PD	CC-PD
Máquina de soldar utilizada	35 CC-CA	35 CC-CA
Fluidez	Buena	Buena
Formación de uña	Buena (nítida)	Buena (nítida)
Humedad	Sin poros	Sin poros
Voltaje utilizado	18-21	19
Chisporroteo	Normal	Normal

A continuación se definen las características en forma de atributos:

**Color de escoria:** Negra = correcta

Gris obscura = regular

Gris claro = mala

Esta depende del balance de los materiales y la temperatura alcanzada.

**Desprendimiento de Escoria:** Muy fácil = se desprende sola o con un ligero golpe

Fácil = se desprende con dos o tres golpes sobre la base.

Regular = se desprende con varios golpes.

Mala = se queda pegada y no desprende.

Esta depende de la humedad que contenga el electrodo.

**Color del cordón:** Gris metálico = color ideal del cordón.

Gris azulado = se presenta cuando hay exceso de amperaje.

**Fluidez:** Buena = cuando el cordón se acomoda con facilidad y sin escurrir.

Excesiva = el cordón se escurre con facilidad.

Regular = se va formando un cordón en partes no completo.

**Formación de uña:** Buena = al acomodarse el cordón metálico se deposita en anillos, lo que produce líneas como uñas que indican un buen depósito.

Excesiva = al acomodarse el cordón no se nota la uña, sino un cordón plano en su contextura.

Regular =- se acomoda el cordón en bolas sin formación de una (falta de corriente).

**Humedad:** Con poros = mal depósito, se presentan poros por presencia de humedad (falta de horneado).

Sin poros = buen depósito, cuando el horneado ha sido correcto.

**Chisporroteo:** Normal = cuando presenta chisporroteo igual al estándar (no hay presencia de humedad).

Excesivo = mayor al normal por exceso de humedad.

B) Análisis Químico.

Para el análisis químico se realizó un depósito de soldadura de acuerdo a AWS (American Welding Society) A5.4 con las siguientes especificaciones:

Se realizó con un equipo de Emisión óptica marca Termo, modelo ARL 3460.

TABLA 9.- Verificación de Análisis Químico de Prueba 1 con el Típico del HK-40.

Elemento	Típico (%)	Prueba 1 (%)
Carbono	0.400	0.410
Azufre	0.040 máx.	0.017
Fósforo	0.040 máx.	0.013
Silicio	1.50 máx.	0.55
Manganeso	0.90	0.80
Cromo	25.50	26.10
Níquel	20.00	19.50
Molibdeno	0.75 máx.	0.10
Titanio		0.16

C) Pruebas Mecánicas.

TABLA 10.- Verificación de Pruebas Mecánicas de la Prueba 1 con el Típico.

Característica	Típico	Prueba 1
<b>Resistencia a la tensión</b>	<b>5279 kg/cm<sup>2</sup></b>	5842 kg/cm <sup>2</sup>
Porcentaje de elongación en 2"	17	19
Dureza Brinell	170	180

Análisis de los Resultados:

1º. Características Generales: Todas están bien

2º. Análisis Químico:

Carbono está un poco arriba del típico

Cromo está arriba del típico

Níquel está abajo del típico

Manganeso está un poco abajo del típico.

Se ajustaron en prueba 2.

3°. Pruebas Mecánicas: Tanto resistencia a la tensión, elongación y dureza están arriba del típico

Por tal motivo se realizó prueba 2, para ajustar los elementos antes mencionados.

## PRUEBA No. 2

A) Balance de Carbono:

Pérdidas carbono:      Carbono en alambre: 0.100  
en la prueba 1.      Carbono en fundente: 0.304  
                                 Carbono total:      0.404  
                                 Carbono en depósito: 0.47

Pérdidas de carbono = Carbono total – Carbono P-1 / Carbono total.

Pérdidas carbono =  $0.404 - 0.410 / 0.404 = -0.0148 \times 100 = -1.48 \%$

Carbono total = Carbono requerido / 100 – Pérdidas Carbono/100

Carbono total =  $0.400 / 1.0148 = 0.394$

Carbono fundente = Carbono total - Carbono alambre

Carbono fundente =  $0.394 - 0.100 = 0.294$

Carbono equivalente = Cromo fundente / (Porcentaje de fundente / 100) (Porcentaje carbono en fbc\*/ 100)

Carbono equivalente =  $0.294 / 0.30 \times 0.085 = 0.294 / 0.0255 = 11.529$

Ferrocromo alto carbono = 11.529 Kg.

\*fbc = ferrocromo extrabajo carbono.

B) Balance de Cromo:

Pérdidas cromo:      Cromo en alambre: 26.50  
en Prueba 1      Cromo en fundente: 3.50  
                                 Cromo total:      30.00  
                                 Cromo en depósito: 26.10

Pérdidas Cromo = Cromo Total – Cromo depósito / Cromo total

Pérdidas cromo =  $30.000 - 26.100 / 30.000 = 0.130 \times 100 = 13.0 \%$

Cromo total = Cromo requerido / 100 – Pérdida Cromo / 100

Cromo total =  $25.5 / 0.87 = 29.310$

Cromo fundente = Cromo total - Cromo alambre

Cromo fundente =  $29.310 - 26.500 = 2.810$

Cromo equivalente = Cromo fundente / (Porciento fundente / 100) (Pureza fbc / 100)

Cromo equivalente =  $2.810/0.30 \times 0.70 = 2.810/0.21 = 13.382$

Ferrocromo extra bajo carbono = Ferrocromo total - Ferrocromo alto carbono

Ferrocromo extra bajo carbono =  $13.382 - 11.529 = 1.853$  Kg.

C) Balance de Níquel:

Pérdidas Níquel: Níquel en alambre: 21.000

en Prueba 1 Níquel fundente: 0

Níquel total: 21.000

Níquel depósito: 19.50

Pérdidas Níquel = (Níquel Alambre – Níquel depósito / Níquel alambre) x 100

Pérdidas níquel =  $21.000 - 19.500 / 21.000 = 0.0714 \times 100 = 7.14 \%$

Níquel total = Níquel requerido / 100 – Porciento pérdidas / 100

Níquel total =  $20.0/0.9286 = 21.538$

Níquel fundente = Níquel total - Níquel alambre

Níquel fundente =  $21.538 - 21.000 = 0.538$

Níquel equivalente = Níquel fundente / (Porciento fundente / 100)

Níquel equivalente =  $0.538/0.30 = 1.793$

Níquel puro = 1.793 Kg.

D) Balance de Manganeso:

Pérdidas manganeso: Manganeso alambre: 1.300

en Prueba 1 Manganeso fundente: 0.615

Manganeso total: 1.915

Manganeso depósito: 0.80

Pérdidas Manganeso = (Manganeso total – Manganeso depósito / Manganeso total) x 100

Pérdidas manganeso =  $1.915 - 0.80 / 1.915 = 0.5822 \times 100 = 58.22 \%$

Manganeso total = Manganeso requerido / 100 – Porciento pérdidas / 100

Manganeso total =  $0.90/0.4178 = 2.154$

Manganeso fundente = Manganeso total - Manganeso alambre

Manganeso fundente =  $2.154 - 1.30 = 0.854$

Manganeso Equivalente = Manganeso fundente / Porcentaje fundente / 100

Manganeso equivalente =  $0.854/0.30 = 2.847$

Manganeso electrolítico = 2.847 Kg.

## Prueba 2

<b>Fundente:</b>	<b>Cantidad:</b>
Carbonato de calcio:	19.444
Arena de rutilo:	17.644
Oxido de titanio:	14.148
Feldespatos de potasio:	6.868
Ferrocromo alto carbono:	11.529
Fluorita:	7.030
Ferrotitanio:	1.402
Titanato de potasio:	9.384
Manganeso electrolítico:	2.847
Níquel puro:	1.793
Ferrocromo extra bajo carbono:	1.853
Polvo de hierro:	2.864
Alginato de sodio:	0.880
Arcilla:	2.314

## **Aglomerante:**

Silicato de sodio:	15.685
Hidróxido de potasio:	1.911
Carbonato de potasio:	0.441
Agua	0.490

## RESULTADOS DE PRUEBA 2

### A) Características Generales

TABLA 11.- Verificación de Características Generales de Prueba 2 con las Típicas.

Características	Típico	Prueba 2
Concentricidad	+ - 0.005 in	- 0.003 in
Diámetro del electrodo (1/8")	0.196-0.200 in	0.199 in
Color de escoria	Negro	Negro
Desprendimiento de escoria	Muy fácil	Muy fácil
Amperaje utilizado	90 – 110 amperes	100
Formación de escoria	Buena	Buena
Material base utilizado	Inoxidable 304	Inoxidable 304
Color del cordón	Gris metálico	Gris metálico
Tipo de corriente utilizado	CC-PD	CC-PD
Maquina de soldar utilizada	35 CC-CA	35 CC-CA
Fluidez	Buena	Buena
Formación de uña	Buena (nítida)	Buena (nítida)
Humedad	Sin poros	Sin poros
Voltaje utilizado	18 – 21 volts	19 volts
Chisporroteo	Normal	Normal

### B) Análisis Químico

Se realizó con un equipo de Emisión óptica marca Termo, modelo ARL 3460.

TABLA 12.- Verificación de Análisis Químico de Prueba 2 con el Típico del HK-40.

Elemento	Típico (%)	Prueba 2 (%)
Carbono	0.400	0.395
Azufre	0.040 máx.	0.015
Fósforo	0.040 máx.	0.014
Silicio	1.50 máx.	0.50
Manganeso	0.90	0.88
Cromo	25.50	25.80
Níquel	20.00	19.90
Molibdeno		0.13
Titanio		0.18

### C) Pruebas Mecánicas

TABLA 13.- Verificación de Pruebas Mecánicas de POrueba 2 con el Típico del HK-40.

Características	Típico	Prueba 2
Resistencia a la tensión	5279 kg/cm <sup>2</sup>	5420 kg/cm <sup>2</sup>
Porcentaje de Elongación en 2"	17	16
Dureza Brinell	170	165

Análisis de resultados:

1°. Todas las características generales están bien.

2°. Todos los elementos se encuentran dentro de especificaciones, pero es conveniente bajar ligeramente el contenido de cromo para que se aproxime más a lo calculado y por los costos de los materiales, ya que el cromo es caro.

3°. Todas las características mecánicas están bien.

Por lo tanto, se hicieron ajustes para la prueba No. 3

#### PRUEBA No. 3

B) Balance de Cromo:

Pérdidas cromo: Cromo en alambre: 26.500  
en Prueba 2 Cromo en fundente: 2.810  
Cromo total: 29.310

Cromo depósito: 25.80

Pérdidas Cromo = (Cromo total – Cromo depósito / Cromo total ) x 100

Pérdidas cromo =  $29.310 - 25.800 / 29.310 = 0.1198 \times 100 = 11.98\%$

Cromo total = Cromo requerido / (100 – Pérdida Cromo / 100)

Cromo total =  $25.5 / 0.8802 = 28.971$

Cromo fundente = Cromo total - Cromo alambre

Cromo fundente =  $28.971 - 26.5 = 2.471$

Cromo Equivalente = Cromo fundente / (Porcentaje fundente / 100) (Pureza fcb / 100)

Cromo equivalente =  $2.471 / 0.30 \times 0.70 = 2.471 / 0.21 = 11.767$

Ferrocromo extra bajo carbono = Ferrocromo total - Ferrocromo alto carbono

Ferrocromo extra bajo carbono =  $11.767 - 11.529 = 0.238 \text{ Kg.}$

<b>Fundente:</b>	<b>Cantidad:</b>
Carbonato de calcio:	19.444
Arena de rutilo:	17.644
Oxido de titanio:	14.148
Feldespatos de potasio:	6.868
Ferrocromo alto carbono	11.529
Fluorita:	7.030
Ferrotitanio:	1.402
Titanato de potasio:	9.384
Manganeso electrolítico:	2.847
Níquel puro:	1.793
Ferrocromo extrabajo carbono:	0.238
Polvo de hierro:	4.479
Alginato de sodio:	0.880
Arcilla:	2.314

#### **Aglomerante**

Silicato de sodio	15.685
Hidróxido de potasio	1.911
Carbonato de Potasio	0.441
Agua	0.490

## RESULTADO DE LA PRUEBA 3

### A) Características Generales:

TABLA 14.- Verificación de Características Generales de Prueba 3 con las Típicas.

Características	Típico	Prueba 3
Concentricidad	+/-0.005"	0.003
Diámetro del electrodo (1/8")	0.196" a 0.200"	0.198"
Color de escoria	Negro	Negro
Desprendimiento de escoria	Muy fácil	Muy fácil
Amperaje utilizado	90-110	100
Formación de escoria	Buena	Buena
Material base utilizado	Inoxidable 304	Inoxidable 304
Color de cordón	Gris metálico	Gris metálico
Tipo de corriente utilizado	CC-PD	CC-PD
Máquina de soldar utilizada	35 CC-CA	35 CC-CA
Fluidez	Buena	Buena
Formación de uña	Buena	Buena
Humedad	Sin poros	Sin poros
Voltaje utilizado	18-21	19
Chisporroteo	Normal	Normal

### B) Análisis Químico:

Se realizó con un equipo de Emisión óptica marca Baird

TABLA 15.- Verificación de Análisis Químico de Prueba 3 con el Típico del HK-40.

Elemento	Típico (%)	Prueba 2 (%)
Carbono	0.400	0.403
Azufre	0.040 máx.	0.014
Fósforo	0.040 máx.	0.016
Silicio	1.50 máx.	0.53
Manganeso	0.90	0.91
Cromo	25.50	25.40
Níquel	20.00	19.85
Molibdeno		0.11
Titanio		0.19

## B) Pruebas Mecánicas:

TABLA 16.- Verificación de Pruebas Mecánicas de Prueba 3 con el Típico del HK-40.

Características	Típico	Prueba 2
Resistencia a la tensión	5279 kg/cm <sup>2</sup>	5420 kg/cm <sup>2</sup>
Porcentaje de Elongación en 2"	17	16
Dureza Brinell	170	165

### Análisis de resultados:

Todos los requerimientos características generales, análisis químico y pruebas mecánicas cumplen con lo típico.

## 4.4 COSTOS DE MATERIALES

En base a la fórmula obtenida en la prueba final del balance se procedió a calcular los costos de las materias primas:

TABLA 17.- Costos de Materias Primas para el Electrodo HK-40.

Material	Cantidad Kg	Costo por Kilogramo en pesos	Total	Costo Unitario
Carbonato de calcio:	19,444	1,65	32,08	
Arena de rutilo	17,644	28,00	494,03	
Oxido de titanio	14,148	73,00	1032,80	
Feldespatos de potasio	6,868	2,10	14,42	
Ferrocromo alto carbono	11,529	52,00	599,50	
Fluorita	7,030	50,00	351,50	
Ferrotitanio	1,402	3,25	4,55	
Titanato de potasio	9,384	58,75	551,31	
Manganeso electrolítico	2,847	82,00	233,45	
Níquel puro	1,793	220,00	394,46	
Ferrocromo bajo carbono	0,238	81,90	19,49	
Polvo de hierro	4,479	20,00	89,58	
Alginato de sodio	0,880	30,00	26,40	
Arcilla	2,314	1,10	2,54	
	100,000		3846,14	38,46
<b>Binder: *</b>				
Silicato de sodio	15,685	5,00	78,42	
Hidróxido de potasio	1,911	23,00	43,95	
Carbonato de potasio	0,441	54,00	23,81	
Agua	0,490	13,00	6,37	
	100		152,55	1,52
<b>Total Fundente</b>				39,98
Acero CW 310		110,00		110,00
Inoxidable				

\*Aglomerante

El Costo para las diferentes materias primas fue obtenida de diferentes proveedores:

- ◆ Productos Químicos Mardupol
- ◆ Grupo Materias Primas
- ◆ Koprino
- ◆ Cía. Química Industrial Neumann
- ◆ Silicatos y Derivados
- ◆ Alquimia Mexicana
- ◆ Grupo Calidad
- ◆ Alambres Astro
- ◆ Materiales Textiles.

Para realizar los cálculos se toma en cuenta la siguiente formula:

% de alambre CW 310 (3.2) :	72
% Fundente*:	28

\*Fundente es la pasta que se prepara, formada por los polvos y el binder.

TABLA 18.- Costos del Electrodo HK-40.

<b>Material</b>	<b>Costo por Kg en pesos</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Costo Total por Kg</b>
Alambre 310 (3.2mm)	110.00	0,70	77,00
Fundente	39,98	0,30	11,994
Costo Total		1.00	<b>88,99</b>

El resultado obtenido es el costo de las materias primas por kilogramos de soldadura,

**\$ 88,99/kg**

#### 4.5 COSTOS DE FABRICACIÓN

Los costos de fabricación se calculan de la siguiente fórmula:

$$\text{COSTOS FABRICACIÓN} = \text{MATERIALES} + \text{MANO DE OBRA} + \text{VENTAS} + \text{INDIRECTOS.}$$

MATERIALES.- Gastos por material que es o forma parte del producto o servicio. Aquí entran todas las materias primas utilizadas para fabricar el electrodo.

MANO DE OBRA.- Gastos por trabajos que tienen relación directa con el producto o servicio. Entran los salarios del personal de fabricación.

VENTAS.- Gastos por actividades de ventas, inmediatas, sin que intervenga influencia sobre el producto o servicio. Comisiones a los vendedores y sueldo de los vendedores.

CARGOS INDIRECTOS.- Gastos por todas las actividades que no son aplicables exclusivamente a mano de obra, ventas o materiales. Los costos indirectos son además de los costos de material, trabajo y ventas y se consideran como un solo grupo, por ejemplo no se separan en directos e indirectos. Costos generales de administración, gastos fiscales, depreciación, seguros, alquileres, luz, fuerza y teléfono.

Todo esto representa los costos en general que se toman en cuenta para los cálculos de fabricación, además se tiene que agregar la UTILIDAD que va a tener la empresa.

En la compañía Eutectic se realizaba el cálculo del precio que se le iba a asignar al producto utilizando la siguiente operación:

$$\text{PRECIO DE VENTA} = \text{COSTO TOTAL DE MATERIAS PRIMAS} \times 2.0$$

Costo total de materias primas es el obtenido arriba: \$ 88,99 /kg

2.0 es el factor ya determinado por la empresa, considerando costos y utilidad.

$$\text{PRECIO DE VENTA} = 88.99 \times 2.0 =$$

El precio de venta del electrodo HK-40 sería : **\$ 177.98/kg**

## CAPITULO V.- RESULTADOS

### 5.1 VALIDACIÓN MEDIANTE NORMA AWS

La validación de cualquier electrodo se realiza mediante las normas AWS (American Welding Society). En ellas se indican las pruebas que se tienen que llevar a cabo para verificar el producto.

En el caso del HK-40 no existe ninguna norma específica para el mismo, pero se utilizará la que aplica al acero inoxidable 310 de la norma AWS A5.4, por ser la más parecida, y que a continuación se describe:

#### ANSI/AWS A 5.4-99 An American National Standard.

Especificación para Electroodos revestidos para soldar, al cromo y al cromo-níquel resistentes a la corrosión.

Resumen:

Alcance: Esta especificación prescribe requerimientos para electrodos clasificados como recubiertos al cromo y cromo-níquel resistentes a la corrosión. Estos electrodos son para soldadura de arco eléctrico metálico, e incluye aquellos aceros aleados designados como aceros al cromo y cromo níquel resistentes al calor y la corrosión, en que el cromo excede 4.0% y el níquel no excede 50.0%

#### 1.0 Clasificación

Los materiales soldados cubiertos por esta especificación son clasificados de acuerdo al siguiente criterio: composición química, requieren de propiedades mecánicas del metal soldado, y tipo de corriente. Incluye electrodos clasificados bajo: EXXX-15 y EXXX-16.

#### 2.0 Aceptación

La aceptación del material estará de acuerdo con lo previsto en la sección 3 de AWS A5.01, guía de procedimientos de metal de relleno.

#### 3.0 Certificación

Para todo material surtido bajo esta especificación, el fabricante certifica que el material, o material representativo, ha pasado las pruebas requeridas para esta especificación.

#### 4.0 Repetición

Si alguna prueba falla, esta prueba deberá ser repetida dos veces. Los resultados de ambas pruebas deberán cumplir los requerimientos.

#### Sección B.

Pruebas requeridas y métodos de prueba.

#### 9.0 Requerimientos de composición química.

La composición química del depósito de soldadura deberá apegarse a los requerimientos siguientes: (tabla 19)

Tabla 19.- Requerimientos de composición química para material depositado, porcentaje en peso.

<u>Clasificación</u>	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Cb+Ta
AWS										
E209	0.06	20.5-24.0	9.5-12.0	1.5-2.3	4.0-7.0	0.9	0.03	0.03	0.75	
E308	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	0.5-2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	
E-309	0.15	22.0-25.0	12.0-14.0	0.75	0.5-2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	
E310	0.08-0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	1.0-2.5	0.75	0.03	0.03	0.75	
E312	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.75	0.5-2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	
E316	0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	0.5-2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	
E317	0.08	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	0.5-2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	
E318	0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-2.5	0.5-2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	6xCmín.-1.0
E320	0.07	19.0-21.0	32.0-36.0	2.0-3.0	0.5-2.5	0.6	0.04	0.03	3.0-4.0	8xCmín.-1.0
E330	0.18-0.25	14.0-17.0	33.0-37.0	0.75	1.0-2.5	0.9	0.04	0.03	0.75	
E410	0.12	11.0-13.5	0.6	0.75	1	0.9	0.04	0.03	0.75	
E430	0.1	15.0-18.0	0.6	0.75	1	0.9	0.04	0.03	0.75	

TABLA 20.- Composición química del acero HK-40

Elemento	Porcentaje en Peso
Carbono	0.20-0.60
Cromo	24.0-28.0
Níquel	18.0-22.0
Molibdeno	0.50 máx.
Manganeso	2.00 máx.
Silicio	2.00 máx.
Fósforo	0.04 máx.
Azufre	0.04 máx.
Cobre	0.75 máx.
Fierro	Balance

## 10.0 REQUISITOS MECANICOS Y DE PRUEBA..

### 10.1 Prueba mecánica y de sanidad y requerimientos.

Los especímenes para la prueba de tensión hechos con electrodos clasificados bajo esta norma deberán cumplir con los requisitos mecánicos prescritos en la tabla 21.

Los detalles de la prueba se describen en 13.3.

TABLA 21.- Requerimientos de Propiedades Mecánicas para metal depositado				
Clasificación AWS	Resistencia a la Tensión mínima		Elongación en 2 in por ciento mínimo	Tratamiento Térmico
	Kg/cm2	Mpa		
E209	7039	690	15	NO
E308	5631	550	35	NO
E309	5631	550	30	NO
E310	5631	550	30	NO
E312	6687	660	22	NO
E316	5279	520	30	NO
E317	5631	550	30	NO
E318	5631	550	25	NO
E320	5631	550	30	NO
E330	5279	520	25	NO
E347	5279	520	30	NO
E410	4575	450	20	a
E430	4575	450	20	b

a. El espécimen deberá ser calentado entre 840 y 870oC por 2 horas, y enfriado en el horno a una velocidad que no exceda 55oC por hora y enfriar al aire.

b. El espécimen deberá ser calentado entre 760 y 790oC por 2 horas, y enfriado en el horno a una velocidad que no exceda 55oC por hora y enfriar al aire.

10.2 La prueba de filete deberá prepararse de acuerdo con la tabla 22 y el espécimen de prueba deberá estar libre de defectos abiertos como poros y fisuras que afecten el esfuerzo de la soldadura.

10.2.1 Ambos filetes penetrarán más allá de los bordes de las placas.

10.2.2 Ambos pies en cada filete soldado serán iguales en alcance, dentro de 1/16 in ( 1.6mm )

10.2.3 La convexidad de cada filete estará dentro de los límites prescritos en la gráfica de la figura 27.

10.2.4 El filete no deberá presentar poros.

10.2.5 El cordón de soldadura deberá estar libre de socavación, traslape, escoria atrapada, y porosidad.

10.2.6 Los detalles de estas pruebas son especificados en 13.4

(13)

TABLA 22.- SUMARIO DE REQUERIMIENTOS DE PRUEBA

Designación del Electrodo Clasificación todos tamaños	in mm		Corriente	Análisis químico (a)	Posiciones de soldadura Pruebas de tensión (b)	Pruebas de Filete ©
	1/16	1.6	DCEP(d)	F	No requiere	No requiere
	5/64	2.0		F	No requiere	No requiere
	3/32	2.4		F	No requiere	No requiere
	1/8			F	F	H,V,OH
	5/32	4.0		F	F	H,V,OH
	3/16	4.8		F	F	H
	1/4	6.4		F	F	H
	1/16	1.6		AC y DCEP (d)	F	No requiere
	5/64	2.0	F		No requiere	No requiere
	3/32	2.4	F		No requiere	No requiere
	1/8	3.2	F		F	H,V,OH
	5/32	4.0	F		F	H,V,OH
	3/16	4.8	F		F	H
	1/4	6.4	F		F	H

Nota: Las abreviaciones F, V, OH, y H indican posiciones de aplicación de soldadura (fig. 3a) como sigue:

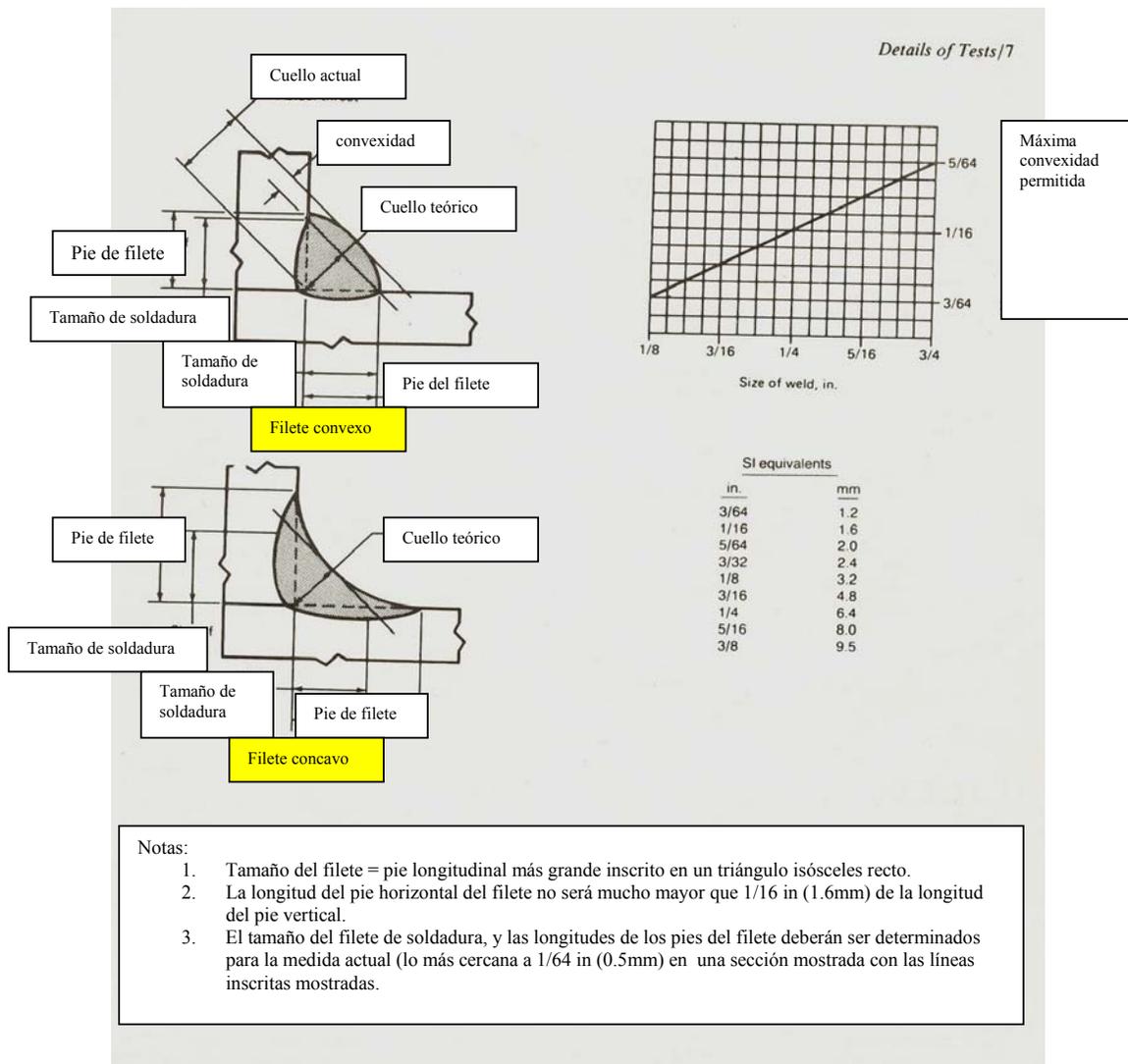
- F= plana
- H= horizontal
- V= vertical
- OH= sobrecabeza

(a) Ver secciones 9.0 y 13.2

(b) Ver secciones 10.1 y 13.3

(c) Ver secciones 10.2 y fig. 1 y 3

(d) Corriente directa, electrodo al positivo (polaridad inversa)



**Figura 27.- Dimensiones de la Soldadura de Filete, norma AWS A5.4**

(17)

## SECCION D.- DETALLES DE LAS PRUEBAS.

13.0 Pruebas Requeridas. Las pruebas especificadas en 9.0 y 10.0 se realizarán de acuerdo con los requerimientos de esta sección D.

13.1 Materiales para placas de prueba.

13.1.1 Para análisis químico de todos los electrodos clasificados (E209, E219, E240, E307, E308, E309, E310, E312, E316, E317, E318, E320, E330, E347, E349, E410, E430, E502, E505, E16-8-2 y E7Cr, el metal base será acero (al carbono, aleado, acero inoxidable, o hierro en lingote) de 0.25% de carbono máximo.

13.1.2 Para la prueba de tensión el acero usado deberá ser tipo maquinado o conforme a una de las siguientes especificaciones o su equivalente:

13.1.2.1 ASTM A285

13.1.2.2 ASTM A36

13.1.2.3 ASTM A515 grado 70

13.2 El Análisis Químico.

13.2.1 Al probar los electrodos como se requiere en la tabla 22, las muestras del metal depositado procedentes de electrodos clasificados en esta norma bajo la tabla 19, usarán el tipo de corriente indicado en la tabla 22.

13.2.2 Las muestras para análisis se pueden obtener de:

13.2.2.1 El colchón de soldadura especificado en 13.2.3 y 13.2.4, o cualquier método estable tal que produzca resultados equivalentes a aquellos obtenidos del cordón de soldadura especificado en 13.2.3 y 13.2.4.

13.2.2.2 En caso de disputa, muestra para análisis químico se obtendrán de colchones de soldadura de prueba especificados en 13.2.3 y 13.2.4.

13.2.3 Los colchones de soldadura se depositarán en posición plana en cordones; el ancho de cada pase será de 1 1/2 a 2 1/2 veces el diámetro del electrodo. La longitud del arco será tan corta como sea posible; la corriente promedio será como se especifica en la tabla 23. Después de cada cordón depositado, la muestra se enfriará en agua por 30 segundos.

13.2.4 Todos los colchones de soldadura concordarán con lo especificado en la tabla 6. El material para análisis estará libre todo material extraño.

TABLA 23.- Condiciones de aplicación para depósitos para análisis químico.

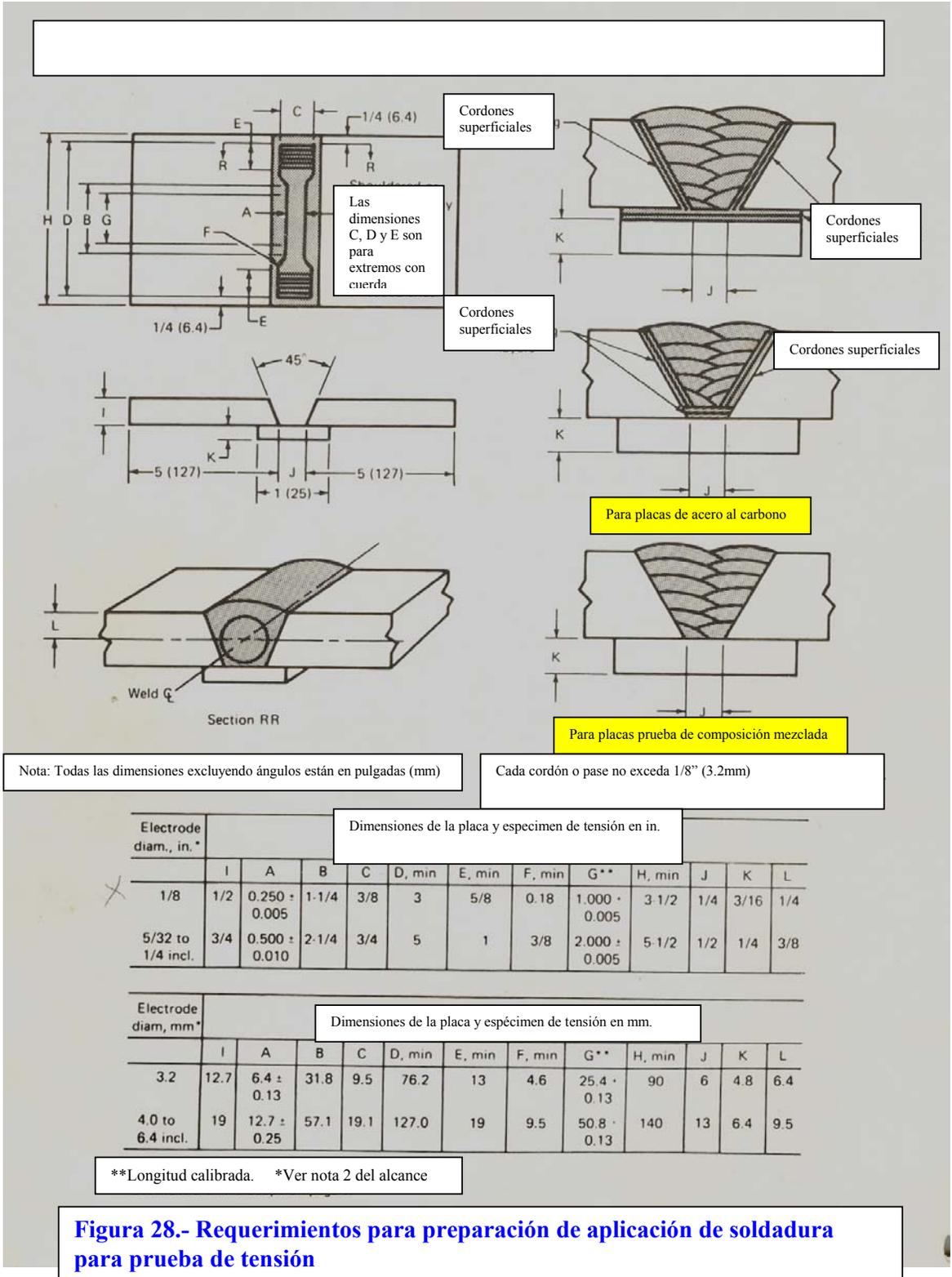
Designación de electrodos (todas las clasificaciones)	Tamaño del Electrodo		Corriente de Arco promedio	Voltaje de arco máximo
	in	Mm	Amperes	Volts
-15 y -16	1/16	1.6	35 a 45	24
	5/64	2.0	45 a 55	24
	3/32	2.4	65 a 80	24
	1/8	3.2	90 a 110	25
	5/32	4.0	120 a 140	26
	3/16	4.8	160 a 180	27
	1/4	6.4	220 a 240	28

### 13.3PRUEBA DE TENSION PARA MATERIAL DEPOSITADO

13.3.1 Como se especifica en la tabla 22, los ensambles de la prueba como se detallan en la figura 28 se prepararán como se indica en 13.3.2 y aplicada según lo prescrito en 13.3.3 usando el tipo de corriente especificado en la tabla 23 para cada tamaño de electrodo que es probado.

13.3.2 Las placas serán soldadas en posición plana, y serán juntadas suficientemente durante la aplicación para evitar el combeo de más de 5 grados. Una placa de prueba que se ha combado más de 5 grados se desechará. Placas de prueba no serán enderezadas.

(13)



**Figura 28.- Requerimientos para preparación de aplicación de soldadura para prueba de tensión**

TABLA 24.- DIMENSIONES DEL COLCHON DE SOLDADURA

Designación del electrodo (todas las clasificaciones)	Tamaño del electrodo		Tamaño del colchón		Distancia mínima de la superficie de la muestra del metal base.	
	in	mm	in	mm	in	mm
	-15 Y -16	1/16	1.6	1 x 1 x 1/2	25 x 25 x 13	1/4
5/64		2.0				
3/32		2.4				
1/8		3.2	1 1/2 x 1 1/2 x 5/8	40 x 40 x 16	5/16	8.0
5/32		4.0				
3/16		4.8				
1/4		6.4	2 x 2 x 3/4	50 x 50 x 19	3/8	9.5

(13)

13.3.3 El montaje de la prueba estará dentro de los intervalos de temperatura especificadas, antes de comenzar cada paso, incluyendo el depósito de cualquier capa superficial, según lo medido en la unión, a una distancia de 25mm de la soldadura, a la mitad de la longitud de la placa de prueba.

TABLA 25.- Temperaturas de Interpaso para montaje de placas y preparación de probetas para Prueba Tensión.

Clasificación AWS	TEMPERATURA DE INTERPASO			
	Mínimo		Máximo	
	oF	oC	oF	oC
Series E200	60	16	300	150
Series E300	60	16	300	150
Series E400	300	150	500	260
Series E500	300	150	500	260
E630	60	16	300	150
E16-8-2	60	16	300	150
E7Cr	300	150	500	260

Si, después de cualquier pase, la temperatura máxima especificada arriba se excede, las placas se permite enfriarlas en aire (no se enfríe en agua ) a una temperatura dentro de la gama especificada.

13.3.4 Un espécimen de la prueba de tensión se maquinará de este ensamble, como se muestra en la figura 23.

13.3.5 Pruebas de tensión serán realizadas de acuerdo con la sección de la prueba de tensión de la última edición de AWS B5.0, métodos estándares para pruebas mecánicas.

#### 13.4 Prueba de Filete.

13.4.1 Mientras sea requerido en la tabla 22, los montajes prueba como se detallan en la figura 26 se prepararán como se indica en el párrafo 13.4.2 y soldados como se indica en 13.4.3 a 13.4.6 en las posiciones requeridas en la figura 26, usando cada tipo de corriente especificado en la tabla 22 para cada tamaño de la clasificación del electrodo que es probado.

3.4.2 En la preparación de las dos placas que forman el montaje de la prueba, deberá maquinarse una placa en un lado a lo largo de toda su longitud para que al momento de unirla con la otra pueda asentar perfectamente y permitir soldarla fácilmente.

13.4.3 Un solo cordón deberá ser depositado en un lado de la unión. El primer electrodo será consumido continuamente dejando una colilla de 2 in máximo (50 milímetros). Los electrodos adicionales, en caso de necesidad, se utilizarán para terminar la aplicación en la longitud completa del empalme, consumiéndose totalmente cada electrodo en cuanto sea permitido por la longitud del ensamble.

13.4.4 Al soldar en la posición vertical, la soldadura se aplicará hacia arriba.

13.4.5 Después de terminar la soldadura en el primer lado de la unión, el montaje se enfriará a temperatura ambiente (pero no menos que 160C) por cualquier medio conveniente antes de comenzar a soldar en el segundo lado (véase la nota):

NOTA: Si el agua se utiliza como el líquido refrigerante, se deberá tener cuidado de eliminarla totalmente antes de comenzar la soldadura en el segundo lado.

13.4.6 La soldadura de filete será depositada en el segundo lado del empalme con el mismo procedimiento usado para el filete en el primer lado.

13.4.7 El espécimen se cortará en un punto aproximadamente 1 in (25mm) adentro, delante del extremo del cráter del depósito hecho con el primer electrodo en el primer lado del empalme. Cualquiera de las dos superficies cortadas puede ser pulida, atacada, y examinada.

13.4.8 La superficie pulida y atacada se revisará como se muestra en la figura 22 y el tamaño, longitudes de pie, y la convexidad de ambos filetes soldados se determinará lo más próximo a 1/64 in (0.5mm) por medición real.

(13)

**Para la validación se realizaron las siguientes pruebas:**

1°. Características generales de aplicaciones, sobre un tubo de acero HK-40, basándose en especificaciones internas de la compañía Eutectic +Castolin, ya que no existe norma para las mismas.

2°. Prueba de análisis químico basada en la norma AWS A5.4 párrafos 9.0 y 13.2.

3°. Prueba de tensión basada en AWS A5.4 párrafos 10.1, 13.1 y 13.3.

4°. Prueba de filete basada en AWS A5.4 párrafos 10.2 y 13.4.

5°. Prueba de dureza, que no viene en la norma AWS, pero es otra propiedad importante que nos sirve para un mejor control de calidad de nuestro material.

### 5.1.1 Características Generales.

TABLA 26.- Tabla comparativa de Características Generales para tres pruebas de aplicación realizadas al Electrodo HK-40.

Característica	Típico	Validación		
		P1	P2	P3
Concentricidad	+/-0.005 in	0.002 in	0.003 in	0.002 in
Diámetro del electrodo (1/8")	0.196 a 0.200 in	0.197 in	0.198 in	0.198 in
Color de escoria	Negro	Negro	Negro	Negro
Desprendimiento de escoria	Muy fácil	Muy fácil	Muy fácil	Muy fácil
Amperaje utilizado	90-110 A	100 A	100 A	100 A
Formación de escoria	Buena	Buena	Buena	Buena
Material base utilizado	HK-40	HK-40	HK-40	HK-40
Color del cordón	Gris metálico	Gris met.	Gris met.	Gris metal.
Tipo de corriente utilizada	CC-PD	CC-PD	CC-PD	CC-PD
Máquina de soldar utilizada	35CC-CA	35CC-CA	35CC-CA	35CC-CA
Fluidez	Buena	Buena	Buena	Buena
Formación de uña	Buena	Buena	Buena	Buena
Humedad	Sin poros	Sin poros	Sin poros	Sin poros
Voltaje utilizado	25	25	25	25
Chisporroteo	Normal	Normal	Normal	Normal

### 5.1.2 Análisis químico

Se realizaron los análisis químicos en un espectrofotómetro de emisión, de los cuales se realizaron tres depósitos de acuerdo a la norma AWSA5.4, 13.2, obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 27.- Tabla Comparativa para Análisis Químico de tres pruebas realizadas bajo la Norma AWS A5.4 sección 13.2.

Elemento	Especificación del HK-40 Por ciento	Material Depositado		
		P-1	P-2	P-3
Carbono	0.20-0.60	0.38	0.39	0.41
Azufre	0.04 máx.	0.017	0.019	0.016
Fósforo	0.04 máx.	0.014	0.015	0.014
Silicio	2.00 máx.	0.52	0.50	0.54
Cromo	24.0-28.0	25.85	25.75	25.60
Níquel	18.0-22.0	19.70	19.90	19.90
Manganeso	2.00 máx.	1.30	1.40	1.37
Molibdeno	0.50 máx.	0.07	0.09	0.04
Cobre	0.75 máx.	0.05	0.06	0.03

Características del equipo de emisión óptica:

Marca: Termo (Figura 29).

Modelo: ARL 3460

Características: analizador de metales



**Figura 29.- Espectrofotómetro de Emisión Óptica**

### 5.1.3 Propiedades Mecánicas:

Para la prueba de tensión se hicieron tres probetas de acuerdo a la norma AWSA5.4 sección 13.3.

TABLA 28.- Tabla Comparativa de Propiedades Mecánicas de tres pruebas realizadas bajo la Norma AWS A5.4 sección 13.3.

Característica	Especificación HK-40	Validación
Resistencia a la tensión		
Probeta 1	5279 kg/cm <sup>2</sup>	5490 kg/cm <sup>2</sup>
Probeta 2	5279 kg/cm <sup>2</sup>	5399 kg/cm <sup>2</sup>
Probeta 3	5279 kg/cm <sup>2</sup>	79.4 KSI
Porcentaje de elongación en 2"		
Probeta 1	17	18
Probeta 2	17	19
Probeta 3	17	16

Las pruebas mecánicas se realizaron en una máquina universal de pruebas mecánicas con las siguientes características:

Marca: SATEC (Figura 30).

Modelo: DX

Capacidad: 300 kN (67,500 lbf)



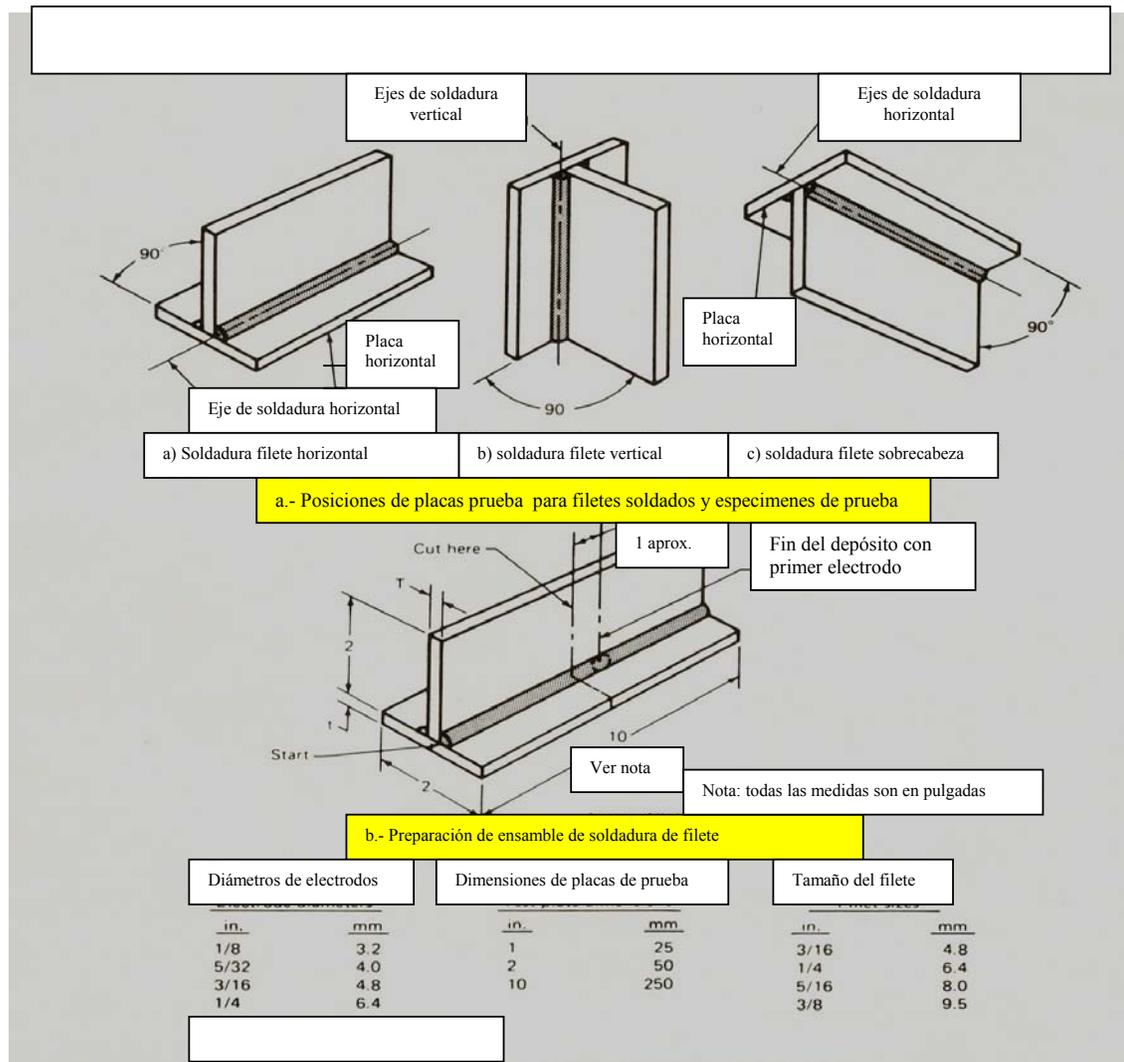
**Figura 30.- Máquina Universal de Pruebas mecánicas.**

#### 5.1.4 Prueba de filete.

Se realizaron 3 pruebas de filete en posición horizontal, vertical y sobrecabeza, de acuerdo a la norma AWS A5.4.

Los resultados obtenidos fueron:	máxima permitida (figura 27)
Prueba 1: Convexa con 1/64 in ( 0.397mm )	3/64 in (1.191 mm)
Prueba 2: Convexa con 2/64 in (0.794mm )	3/64 in (1.191 mm)
Prueba 3: Cóncava con 1/64 in (0.397mm )	3/64 in (1.191 mm)

La figura 31 nos muestra los requerimientos de la Norma para la aplicación de la prueba de filete en lo referente a posiciones de prueba, preparación del ensamble, diámetros de electrodos, dimensiones de placas de prueba, tamaño del filete, espesor de placas.



**Figura 31.- Pruebas de soldadura de filete**

Las figuras 32, 33 y 34 nos muestran las aplicaciones de filete, comenzando por las placas y el cordón completo, una vista de la penetración de la soldadura y la forma de medirla.



**Figura 32.- Prueba de filete**



**Figura 33.- Penetración filete**



**Figura 34.- Medición prueba filete**

### 5.1.5 Prueba de Dureza

Para la prueba de dureza se hicieron 3 depósitos de 3 cordones, utilizando como material base acero inoxidable 304. Para cada depósito se realizaron 5 lecturas de dureza, obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 29.- Tabla Comparativa de Pruebas de Dureza de tres muestras, con ASM Vol. 1.

Prueba	Dureza Brinell * Típica para HK-40	Dureza Brinell Lecturas	Dureza Brinell Promedio
1	170	166-172-168-170-174	170
2	170	174-169-171-180-181	175
3	170	167-165-171-172-170	169

\* Típica encontrada en el Metals-Handbook.

La prueba de dureza se realizó en un durómetro con las siguientes características:

Marca: Mitutoyo (Figura 32)

Modelo: 999-250



**Figura 32.- Durómetro.**

## **5.2 DISCUSION DE RESULTADOS.**

### **5.2.1 Características Generales.**

De acuerdo a las especificaciones técnicas de Eutectic-Castolin, como se mencionan en características generales valores típicos, los resultados obtenidos cumplen con estos.

### **5.2.2 Análisis Químico.**

El depósito para análisis químico fue preparado de acuerdo a la norma AWS A5.4 para aceros inoxidable y el análisis químico cumple con los requerimientos de un acero HK-40, como se puede ver en la tabla 24.

### **5.2.3 Propiedades mecánicas.**

Las probetas para prueba de Resistencia a la tensión fueron preparadas en base a la norma AWSA5.4, cumpliendo los resultados de Resistencia y porcentaje de elongación con lo especificado en el Metals-Handbook para un acero HK-40. (Ver tabla 28. )

### **5.2.4 Dureza**

Esta no se pide en la norma AWS A5.4, pero en el Metals-Handbook si la marca para el acero HK-40, por lo que se llevo a cabo y los resultados cumplen con lo especificado en el mismo (Ver tabla 29)

### **5.2.5 Prueba de Filete.**

También se realizó en base a la norma AWS A5.4, y los resultados obtenidos cumplen con la norma como se puede ver en la tabla.

## **CONCLUSIONES.**

Se puede concluir lo siguiente:

1°. El usar soldadura con las mismas propiedades físicas y químicas que el metal base, ayudan a mantener las propiedades originales, mecánicas, químicas y de aplicación.

2°. El aplicar un electrodo HK.40 permite que el carbono se mantenga dentro del rango y las propiedades de resistencia a temperatura y resistencia a la tensión cumplan con las especificaciones del producto HK-40

3°. La soldadura de arco con electrodo revestido es el proceso más económico y fácil de llevar a cabo, por lo que es importante el haber desarrollado este producto ya que en el mercado nacional solo existen electrodos de acero inoxidable tipo 300 y 400 para soldar el HK-40.

4°. El balance de los productos químicos utilizados en la fabricación de electrodos es de vital importancia, ya que se podrá obtener un cordón uniforme, una escoria fácil de desprender, la protección adecuada del arco para evitar oxidación y un balance correcto de los metales aportados en el fundente.

## LISTA DE DIBUJOS Y FOTOGRAFIAS

Figura 1.- Cilindro y reguladores para soldadura oxiacetilénica	23
Figura 2.- Diagrama de una máquina soldadora por puntos	25
Figura 3.- Soldadura con resaltes.....	26
Figura 4.- Soldadura por costura	27
Figura 5.- Soldadura por costura	28
Figura 6.- Soldadura a tope	32
Figura 7.- Soldadura Tig	32
Figura 8.- Soldadura Mig	33
Figura 9.- Ilustración de un proceso que emplea calor generado por fricción para producir una soldadura.	34
Figura 10.- Proceso de unión explosiva mostrando la reacción a alta velocidad que emana del punto de colisión debido a la presión ascendente.	35
Figura 11.- Soldadura de arco con Plasma	37
Figura 12.- Soldadura de arco sumergido	38
Figura 13.- Soldadura por rayo de electrón	39
Figura 14.- Soldadura ultrasónica	40
Figura 15.- Soldadura por arco robótica	42
Figura 16.- Elementos de un típico circuito de soldadura para	43
Figura 17.- Soldadura con arco de tungsteno y gas	45
Figura 18.- Proceso de soldadura con arco metálico y gas	47
Figura 19.- Enderezadora.cortadora de alambre	62
Figura 20.- Báscula electrónica	64
Figura 21.- Mezcladora de doble garganta	65
Figura 22.- Mezcladora para pastas	66
Figura 23.- Medidor de concentricidad	67
Figura 24.- Extrusionadora y alimentadora de alambre	68
Figura 25.- Horno para secado de electrodos	70
Figura 26.- Electrodos	72
Figura 27.- Dimensiones de la soldadura de Filete	95

Figura 28.- Requerimientos para preparación de aplicación de soldadura para prueba de tensión.	98
Figura 29.- Espectrofotómetro de Emisión óptica	104
Figura 30.- Máquina Universal de pruebas mecánica	106
Figura 31.- Pruebas de aplicación de Filete	107
Figura 32.- Prueba de filete	108
Figura 33.- Penetración filete	108
Figura 34.- Medición prueba filete	108
Figura 35.- Durómetro	109

## RELACION DE TABLAS

TABLA 1.- Composición química de las aleaciones Fe-Cr-Ni vaciadas resistentes a la corrosión y al calor.	13
TABLA 2.- Propiedades mecánicas de las aleaciones vaciadas resistentes a la corrosión y al calor.	17
TABLA 3.- Composición química y tolerancias para un acero HK-40	19
TABLA 4.- Propiedades físicas y mecánicas para un acero HK-40	19
TABLA 5.- Intensidad de Corriente aproximada para diferentes diámetros de Electroodos.	31
TABLA 6.- Parámetros para soldadura de arco de aleaciones resistentes al calor.	48
TABLA 7.- Comparación del análisis del alambre 310 con la norma ER-310 y el acero HK-40.	74
TABLA 8.- Verificación de características generales de prueba 1 con las típicas	77
TABLA 9.- Verificación del análisis químico de prueba 1 con el típico del HK-40	78
TABLA 10.- Verificación de pruebas mecánicas de la prueba 1 con el típico del HK-40	78
TABLA 11.- Verificación de características generales de prueba 2 con las típicas	82
TABLA 12.- Verificación de análisis químico de prueba 2 con el típico del HK-40	83
TABLA 13.- Verificación de pruebas mecánicas de prueba 2 con el típico del HK-40	83

TABLA 14.- Verificación de características generales de prueba 3 con las típicas	85
TABLA 15.- Verificación de análisis químico de prueba 3 con el típico del HK-40	86
TABLA 16.- Verificación de pruebas mecánicas de prueba 3 con el típico del HK-40	86
TABLA 17.- Costos de materias primas para el electrodo HK-40	87
TABLA 18.- Costos del electrodo HK-40	88
TABLA 19.- Requerimientos de composición química para material depositado, por ciento en peso, de acuerdo a Norma AWS A5.4	91
TABLA 20.- Composición química del acero HK-40	91
TABLA 21.- Requerimientos de propiedades mecánicas para metal depositado, en base a norma AWS A5.4	92
TABLA 22.- Sumario de requerimientos de prueba en base a la norma AWS A5.4	94
TABLA 23.- Condiciones de aplicación para depósitos de análisis químico, de acuerdo a AWS A5.4	97
TABLA 24.- Dimensiones del cordón de soldadura para análisis químico, en base a norma AWS A5.4	99
TABLA 25.- Temperaturas de interpaso para montaje de placas y preparación de probetas para prueba de tensión	100
TABLA 26.- Tabla comparativa de características generales para tres pruebas de aplicación realizadas al electrodo HK-40	102

TABLA 27.- Tabla comparativa para análisis químico de tres pruebas realizadas bajo norma AWS A5.4 sección 13.2	103
TABLA 28.- Tabla comparativa de propiedades mecánicas de tres pruebas Realizadas bajo norma AWS A5.4 sección 13.3	96
TABLA 29.- Tabla comparativa de prueba de dureza de tres pruebas comparadas con datos de ASM Vol. 1	99

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1.- Handbook of Stainless Steels  
Donald Reckner and Y.M. Bernstein  
McGraw-Hill Inc. 1977.
  
- 2.- ASM Handbook, Vol. 1  
Properties and Selection: Iron, Steels, and  
High performance alloys.  
ASM International, 1990.
  
- 3.- Las Soldaduras, Técnica y Control  
D. Seferian y P. Chevenard  
Urmo S.A., ediciones, 1977.
  
- 4.- Metalurgia de la Soldadura  
Daniel Seferian  
Editorial Tecnos, 1962.
  
- 5.- Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al calor  
Adrián Inchaurreza Zavala  
Editorial Limusa, 1981.
  
- 6.- Welding and Welding Technology  
Richard L. Little  
McGraw-Hill, New York 1973.
  
- 7.- Aceros Inoxidables y Refractarios  
L.Colombier y J. Hochmann  
Editorial Urmo, 1971

- 8- [www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia/sica88.html](http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia/sica88.html).
- 9- [www.drweld.com/oxyfuel.htm](http://www.drweld.com/oxyfuel.htm)
- 10- [www.drweld.com/smaw.html](http://www.drweld.com/smaw.html)
- 11 [www.drweld.com/gtaw.html](http://www.drweld.com/gtaw.html)
- 12- [www.drweld.com/gmaw.html](http://www.drweld.com/gmaw.html)
- 13.- Specification for Covered Corrosion-Resisting Chromium and Chromium-Níquel Steel Welding Electrodes.  
ANSI/AWS A5.4-81  
Miami, FL, American Welding Society.
- 14.- [http://es.wikipedia.org/wiki/soldadura\\_por\\_rayo\\_1%C3%A1Ser](http://es.wikipedia.org/wiki/soldadura_por_rayo_1%C3%A1Ser)
- 15.- [www.fnumbers.com](http://www.fnumbers.com)  
Filler metals on line.
- 16.- [www.weldingengineer.com/1flux.htm](http://www.weldingengineer.com/1flux.htm)
- 17.- [www.weldprocedures.com/plasmaarc.html#dp](http://www.weldprocedures.com/plasmaarc.html#dp)
- 18.- [www.class.et.bgu.edu/mfg130/.../descriptions/thermaljoining/sawwelding.htm](http://www.class.et.bgu.edu/mfg130/.../descriptions/thermaljoining/sawwelding.htm)
- 19.- [www.ebteccorp.com/ebweld.htm](http://www.ebteccorp.com/ebweld.htm)
- 20.- [www.dukcorp.com/us/products/metal//usmetweld2.htm](http://www.dukcorp.com/us/products/metal//usmetweld2.htm)
- 21.- [www.robotwelding.com/arcwelding\\_robot.htm](http://www.robotwelding.com/arcwelding_robot.htm)

22.- [http://es.wikipedia.org/wiki/soldadura\\_a\\_gas](http://es.wikipedia.org/wiki/soldadura_a_gas)

23.- [http://decap.com/spanish/blanda/flux\\_2.htm](http://decap.com/spanish/blanda/flux_2.htm)

24.- [www.cactus.fi.uba.arg/ j\\_falg/download/biomec%C3%A1nica2004/soldadura.pdf#='soldadura%20por%20vaciado](http://www.cactus.fi.uba.arg/j_falg/download/biomec%C3%A1nica2004/soldadura.pdf#='soldadura%20por%20vaciado)

25.- [www.itson.mx/dii/goros/procmanu/soldadura.pdf#search='soldadura%20po%fricc%C3%B3n'](http://www.itson.mx/dii/goros/procmanu/soldadura.pdf#search='soldadura%20po%fricc%C3%B3n)