

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1970

04.70.11

TE. 3/41 ✓

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO DE METALES REACTIVOS ✓

A. Leyt ✓

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina
1970

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO DE METALES REACTIVOS

A. Leyt

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina
1970

INDICE

	Pags.
I. INTRODUCCION	1 - 2
II. LA FUSION POR ARCO	2 - 6
II.1 El fenómeno de descarga de un arco.	3 - 5
II.2 Estabilización del arco.	5 - 6
III. LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO	7 - 33
III.1 Fusión en crisol refrigerado con electrodo no consumible o permanente	7 - 8
III.2 Fusión en crisol refrigerado con electrodo consumible	8
III.2.1 Algunos detalles concernientes a la construcción de hornos por arcos con electrodo consumible.	9 - 19
III.2.1.1 Diseño general	9
III.2.1.2 Crisol	9
III.2.1.3 Esponja	9 - 11
III.2.1.4 Electrodo	11 - 14
III.2.1.5 Métodos de aleado	14 - 15
III.2.1.6 Avance del electrodo	15 - 16
III.2.1.7 Regulación del arco	16 - 17
III.2.1.8 Vacío	17 - 18
III.2.1.9 Alimentación eléctrica	18
III.2.1.10 Consideraciones sobre seguridad	19
III.2.2 Fenómenos que ocurren durante la fusión	19 - 24
III.2.2.1 El proceso de fusión	19 - 21
III.2.2.2 Condiciones de vacío	21
III.2.2.3 Degasado y evaporación	21 - 23
III.2.2.4 Solidificación	23 - 24
III.2.3 Condiciones operativas	25 - 31
III.2.3.1 Tamaño de electrodo	25
III.2.3.2 Polaridad de electrodo y velocidades de fusión	25 - 27
III.2.3.3 Longitud de arco	27
III.2.3.4 Presión, volumen del baño y sobrecalentamiento	27 - 29
III.2.3.5 El flujo del metal al molde	29
III.2.3.6 Defectos en los lingotes	29 - 31

III.3 Fusión por arco con obtención de formas fundidas ("skull melting")	31 - 33
APENDICE A	34 - 35
APENDICE B	36
APENDICE C	37
TABLAS	38 - 40
BIBLIOGRAFIA	41 - 44

LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO DE METALES REACTIVOS

Arnoldo Leyt

I. INTRODUCCION

La fusión de materiales reactivos (circonio, titanio, etc.) presenta muchas dificultades debido a sus altos puntos de fusión y actividad química. Estos dos factores restringen los medios de calefacción, la atmósfera del horno y especialmente los materiales del crisol y del molde.

Todos los óxidos refractarios conocidos reaccionan con el circonio y el titanio (1, 2) y en algunos casos, los óxidos refractarios se disuelven en los metales y el producto final es quebradizo. Si la base metal del óxido es más volátil que el circonio o el titanio, se podría cambiar el equilibrio entre tales óxidos y los metales, como en el caso del óxido de calcio. Esto es particularmente cierto si se trabaja en vacío. Lilliendhal (3) describe que la remoción del oxígeno del circonio y del titanio utilizando calcio como agente reductor no puede ser completa. La presión favorece la reducción del óxido de circonio a metal, pero en vacío, el circonio reducirá el óxido de calcio a calcio metálico.

Del estudio de utilización como material de crisol de la sílice, alúmina, magnesia, circonia, berilia (1, 2) y toria (1, 2, 3, 4) se concluye que esta última es el mejor óxido refractario para fundir circonio o titanio.

Sin embargo, el grafito libre de gas, se presenta como el material de crisol más satisfactorio para la fusión de circonio, titanio, torio y probablemente hafnio (5, 6, 7). El tipo de grafito es muy importante. El grafito de electrodo comercial es muy poroso y es bastante fácilmente penetrado por los metales fundidos altamente fluidos. El grafito de grados AUF o AUC (este último está casi libre de gas y puede ser utilizado sin degasado previo) es el mejor. El grado de contaminación por carbono en los diferentes casos de fusión es: circonio entre 0,15 y 0,25% C; titanio entre 0,4 y 1,2% C y torio entre 0,1 y 0,2% C. Si se emplea una temperatura excesiva por un largo período, la contaminación aumenta produciéndose finalmente un carburo metálico puro.

Los hornos de inducción, cuando se emplean atmósferas inertes, pueden producir grandes fundidos con algo más de facilidad. Con ciertas restricciones, el mismo trabajo puede hacerse en vacío.

Los hornos con resistencia de grafito son particularmente apropiados para fundir por el método de colada por el fondo, dando fundiciones uniformes y sólo una leve contaminación con carbono. Si se emplea corriente trifásica se puede obtener una cierta agitación del baño. Regularmente se pueden obtener fundiciones con 0,07 - 0,11% C (8).

Los hornos por arco pueden ser empleados (en vacío o con atmósfera inerte) para hacer lingotes en moldes de cobre enfriados por agua o en vainas de grafito, con contaminación variable que depende del electrodo y del material del crisol.

Los métodos de fusión mencionados -por inducción o por resistencia en crisoles refractarios o de grafito y por arco- tienen sus ventajas y desventajas. La elección de cual es el mejor, depende parcialmente del volumen de gas a ser tolerado en el lingote.

Si se desea un metal totalmente degasado, la fusión y colada en un horno de resistencia de grafito en vacío da plena satisfacción, especialmente si se considera el bajo contenido de carbono y la ausencia de hidrógeno residual.

Si la fusión se lleva a cabo bajo una atmósfera de gas inerte, no se elimina todo el hidrógeno contenido en el metal, pero puede ser enteramente apropiado, por ejemplo, para la producción de circonio que no sea utilizado en electrónica. Los tres tipos de hornos son apropiados para esta operación. Sin embargo, si se tiene en cuenta además de la producción la posibilidad de reducir no sólo la contaminación del fundido por el material del crisol sino también el contenido de impurezas gaseosas y volátiles a un nivel muy bajo por sucesivas refusiones, el último método aparece como el más conveniente.

Por lo tanto, y de acuerdo a la discusión precedente, nuestro trabajo tendrá por objetivo, pasar revista principalmente a los fundamentos y características que presentan los procesos de fusión por arco.

II. LA FUSION POR ARCO

El interés en el uso del arco eléctrico como una fuente de calor tiene origen en los primeros experimentos de Sir Humphry Davy (9) en 1808 con un arco descargado entre dos electrodos de carbón. Hare (10) describe en 1839 un horno por arco bajo atmósfera controlada, que fue utilizado principalmente para investigar reacciones químicas a altas temperaturas. Napier en 1845 y Pichon en 1853 construyeron hornos por arco para la reducción de óxidos. Con la invención de la dínamo por Wilde en 1867, la fusión por arco llegó a ser potencialmente un proceso industrial, ya que hasta ese entonces las fuentes de potencia eran células voltaicas. En 1878 Siemens (11) diseña un horno capaz de fundir 4 kg de platino y este fue probablemente el primer horno por arco especialmente pensado para fundir metales. Moissan (12) en 1892 realiza un trabajo ya clásico, cuando fundió un gran número de metales refractarios en un pequeño crisol calentado por un arco descargado entre dos electrodos de carbón opuestos horizontalmente.

La fusión por arco bajo atmósfera controlada y utilizando un crisol refrigerado data de 1905 cuando von Bolton (13) informa que ha fundido tantalio en un horno diseñado por Simpson. Pirani (14), en su trabajo, registra este experimento y publica detalles y un esquema de este horno (Fig. 1). Entre 1903 y 1912 Pirani, utilizando este tipo de horno y diferentes electrodos y con el complemento de un equipo de vacío, funde aproximadamente

1 ton de tantalio.

En 1910, Weiss (15) comunica la fusión de electrodos de circonio, tungsteno y titanio. Moore (16), en 1923, funde uranio en un horno muy similar al usado por von Bolton, pero al que se agregó un dispositivo para colar.

La M.W. Kellogg Company comenzó a investigar en 1935 la fusión por arco de aceros especiales en crisoles refrigerados y durante la guerra fundió un considerable tonelaje en un horno ilustrado en Fig. 2. Esta fue probablemente la primera producción de lingotes cilíndricos de un tamaño sustancial por este proceso. Desafortunadamente este trabajo fue publicado recién en 1948 (17) y el gran interés en la fusión por arco de materiales reactivos no arranca de esto sino de la descripción que en 1940 Kroll (18) hizo de la fusión por arco de las primeras muestras de titanio dúctil. Este horno, que puede verse en la Fig. 3, tiene una carcasa metálica refrigerada, un electrodo con punta de tungsteno, un crisol de cobre refrigerado en forma de plato poco hondo y la fusión se realizaba bajo una presión reducida de argón o hidrógeno.

La primera descripción de hornos por arco con crisol refrigerado capaz de fundir grandes lingotes cilíndricos de molibdeno bajo vacío, fue realizada por Parke y Ham en 1947 (19), Fig. 4. En los años de posguerra se llevó a cabo un gran incremento en el uso de este tipo de proceso para la obtención de metales altamente reactivos. Se puede mencionar los trabajos del Battelle Memorial Institute en 1948 (20) sobre titanio y los del U.S. Bureau of Mines en 1952 (21) sobre circonio.

Antes de pasar a estudiar en detalle los procesos de fusión por arco, veamos en que consiste el fenómeno de la descarga de un arco.

II. 1 El Fenómeno de Descarga de un Arco

Podemos considerar a este fenómeno desde dos puntos de vista, uno básico y otro aplicado. El aspecto básico o de fundamentos está resumido en el Apéndice I, el que nos da una idea de lo complejo del fenómeno.

Si entramos a considerar ahora la utilización de sus propiedades en los procesos de fusión debemos decir que actualmente no existe una teoría que permita predecir el comportamiento del arco en vacío como una función de variables tales como presión, material de electrodo e intensidad de corriente. Para llegar rápidamente a una base para operar un equipo de fusión por arco bajo vacío, el camino más rápido es la aproximación empírica, y en este sentido debemos consignar el trabajo de Johnson y colaboradores (22, 23). Los resultados de estos estudios pueden ser resumidos como sigue:

Si alimentamos con corriente continua un electrodo metálico (cátodo) y un baño de metal fundido (ánodo) y mantenemos la presión del recinto entre la atmosférica y ~ 30 mm Hg, tan pronto como se excede una cierta potencia de alimentación (la que

depende del material del electrodo) se obtiene un arco bastante estable con una mancha catódica y una anódica bien definidas. En realidad el arco consiste de tres partes básicas: el área anódica, la mancha catódica y la columna positiva o plasma (24). En la zona más fría que rodea la columna positiva, tiene lugar una recombinación de átomos con liberación de calor; esta zona es conocida como la aureola. Combine (25) ha sugerido que la temperatura de la columna positiva puede llegar a ser de 1100°K para un arco de 200A en el aire a presión atmosférica. El cátodo es calentado por bombardeo de su superficie con iones positivos, y el ánodo es calentado por bombardeo electrónico.

Las características del arco dependen principalmente del material del cátodo; cuanto mayor es la temperatura máxima del cátodo -la que a su vez está determinada por el punto de fusión del material del cátodo- más estable es el arco. También la distribución de energía entre cátodo y ánodo es desplazada hacia el ánodo cuando mayor es el punto de fusión del material del cátodo. La temperatura de la mancha anódica está determinada principalmente por la presión de vapor y por lo tanto varía directamente con el punto de ebullición del material en el baño fundido (26).

Si se reduce lentamente la presión debajo de los 30 mm Hg, desaparece gradualmente la distinción entre el núcleo del arco y la aureola, llegando a ser la luminosidad más y más difusa. El efecto concentrado del gas no conductor que rodea el núcleo del arco decae lentamente hasta que el arco es finalmente tan difuso que se parece a una descarga luminiscente.

Debajo de los 30 mm Hg, nos encontramos en un rango de presión en el que la mancha catódica muestra una inestabilidad y la mancha anódica también desaparece. Este rango de presión se desarrolla antes o después según el gas utilizado. La concentración de energía local en el cátodo llega a ser entonces tan pequeña que es insuficiente para fundir el metal catódico. Por otro lado, en los equipos de fusión por arco que operan con crisoles refrigerados por agua puede suceder fácilmente que el calentamiento está concentrado en la pared del crisol y puede ser tan severo en un punto (usualmente cerca del centro catódico) que la pared funde y el agua irrumpe en la cámara del horno, involucrando peligro de explosión.

El riesgo de que ocurra este tipo de descarga, la cual puede consumir la energía total disponible, crece con la disminución de presión hasta que se alcanza una presión crítica debajo de la cual el arco llega a estar estabilizado en la punta del cátodo. Esta presión crítica es más elevada cuanto más grande es la intensidad de la corriente del arco; en grandes equipos con altas corrientes de arco, ésta es de $\sim 0,5-0,1$ mm Hg. Kroll (27) considera que en este rango de presión las condiciones son similares a aquéllas que prevalecen en una descarga luminiscente entre un alambre de tungsteno y un cátodo caliente, como ha sido estudiado por Altherhum y colaboradores (28). La Fig.5 muestra el rango estable de esta descarga en un diagrama corriente/presión para argón e hidrógeno.

Debajo de esta presión crítica cambia completamente, tanto la manera como ésta descarga tiene lugar, como el proceso de fusión en sí mismo. Aunque aquí también el núcleo del arco no está exactamente definido, como lo es a presiones más elevadas, existe una diferencia fundamental comparada con la descarga a presiones más elevadas en que la atmósfera de gas permanente ha sido reemplazada casi enteramente por vapor metálico como portador del arco. También en este rango de presión, es requerida una cierta corriente mínima para estabilizar el arco; otros elementos siguen siendo iguales, la corriente debe ser más alta y la emisión y la presión de vapor del material del cátodo más bajas (29). Esto también depende de las dimensiones del electrodo y de otras condiciones geométricas.

La energía del arco está concentrada en la punta del electrodo; con presión decreciente el arco parece estar distribuido sobre un gran número de puntos sobre el cátodo los que se mueven rápidamente sobre su superficie directamente opuesta al baño. A distancias cátodo-ánodo pequeñas (10-20 mm) el transporte de metal se realiza bastante suavemente en forma de gotitas que fluyen desde todas las áreas de la cara catódica; esto es bastante diferente del proceso de fusión a más altas presiones, en el que siempre se forman grandes gotas. Las manchas catódicas representan, muy probablemente, áreas en las que están presentes impurezas (óxidos, nitruros) que tienen una baja función trabajo (30). Como se puede ver, las condiciones para el degasado son mucho más favorables en este rango que a más altas presiones; es, por lo tanto, obviamente mejor seleccionar, si es posible, la fusión por arco con electrodo consumible de tal forma que se produzca una descarga en la que el vapor metálico sea el portador del arco.

Una característica del arco en vacío es su baja caída de tensión, la que es casi independiente de la separación cátodo-ánodo. Los cambios de tensiones más elevadas llegan a ser perceptibles sólo cuando la longitud del arco es reducida a unos pocos milímetros.

II.2 Estabilización del Arco en Vacío

Si bien en principio había sido difícil estabilizar el arco en vacío, procedimientos actuales permiten obtener un arco estable en vacío con menor dificultad que en una atmósfera inerte. Se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Inmediatamente después de establecer el arco, hay que producir una presión de gas o vapor suficiente en la zona del arco. En las fusiones primarias, esta presión gaseosa es debida a los gases que escapan del electrodo y a los vapores metálicos. Si se emplean corrientes de arranque suficientemente altas (p.ej. 1000 ó 2000 A en las fusiones de titanio o circonio) siempre se producirá suficiente vapor metálico como para hacer estallar el arco y mantenerlo. La misma regla se aplica en fundidos secundarios y terciarios.
- b) La presión en el horno no debería exceder los 10 micrones. Esta baja presión en la región del arco impide la formación estable de arcos laterales entre el

electrodo y la pared del crisol, los cuales por otro lado, tienden a separarse del arco principal. Estos arcos laterales no pueden permanecer estables porque sus respectivos niveles de corriente son demasiado bajos como para proveer la presión de vapor metálico necesaria para la estabilidad del arco. Los arcos laterales pueden empezar muy fácilmente en zonas ionizadas creadas por proyecciones de metal caliente. Su naturaleza difusa los hace menos peligrosos que los arcos laterales obtenidos bajo presión de gas inerte; estos últimos son siempre más concentrados y tienden a producir manchas anódicas.

- c) También disminuye el riesgo de iniciación de arcos laterales, la existencia de una separación muy chica entre la base del electrodo y el baño (p.ej. de 15 a 20 mm).
- d) La relación entre las secciones transversales del electrodo y el crisol es impuesta por compromisos. Para la estabilización es necesario que el juego anular entre el electrodo y la pared del crisol sea por lo menos de 15 mm (5/8"). Menores juegos favorecen el comienzo de arcos laterales y hacen dificultoso el centrado de grandes electrodos en el crisol. Un juego amplio es también conveniente para proveer una conductancia máxima al flujo de gases desde el fundido a las bombas de vacío. Por otro lado, teniéndose un juego amplio, se requiere que el electrodo de un peso de metal dado, sea comparativamente más largo. La superficie del lingote, además, se mejora sustancialmente cuando el juego entre el electrodo y el crisol se hace más chico. Un juego de 30 a 50 mm es un buen compromiso.
- e) Aún cumpliendo con todos los requisitos no se está exento de arcos laterales. Una rápida y momentánea reducción de la tensión de arco debajo de su valor normal provocará la extinción de todos los arcos pero no del principal.

Frecuentemente es utilizado un solenoide con corriente continua alrededor del crisol para estabilizar el arco en vacío. Por otro lado, un solenoide aumenta considerablemente la turbulencia del fundido, obteniéndose ventajas de refinación de tamaño de grano así como también en la homogeneidad de la estructura granular.

Si se trata de arcos de corriente alterna, éstos se estabilizan cuando se les sobreimpone una corriente de alta tensión obtenida de un transformador (31). La sola objeción a este tipo de estabilizador es su comportamiento errático cuando no se lo ajusta apropiadamente. Un resultado mucho más satisfactorio se obtiene con un estabilizador de alta tensión de radio frecuencia.

La temperatura de un arco de corriente alterna es sustancialmente más elevada que la de uno de corriente continua (máxima de 4700 a 7000°K y mínima entre 3550 y 5000°K, respectivamente) (32).

III. LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO

Actualmente, dos son los principales procesos de fusión por arco:

- 1) Fusión por arco en un molde de cobre enfriado por agua utilizando tanto un electrodo auxiliar no consumible, frecuentemente denominado permanente (Fig. 6, 7), como un electrodo consumible (constituyen probablemente el 95% en la producción industrial) (Fig. 8). Sólo una muy pequeña porción de la carga total está usualmente en el estado líquido. La fusión y la solidificación proceden simultáneamente y la constitución del lingote es un proceso casi continuo.
- 2) Fusión por arco en un crisol, utilizando un electrodo consumible o uno permanente, o ambos simultáneamente. El baño de metal fundido es subsecuentemente colado en uno o varios moldes (Fig. 9).

III.1 Fusión en Crisol Refrigerado con Electrodo No Consumible o Permanente

El electrodo es de tungsteno toriado (la adición aproximada de 1% de torio permite incrementar la emisión electrónica), grafito o cualquiera de los varios carburos de alto punto de fusión. Con este electrodo, el metal es fundido en un molde metálico enfriado por agua y la carga puede ser agregada continuamente (33) al baño metálico (Fig. 6, 7).

Este método es empleado en pequeños hornos para ensayar esponja de circonio o de titanio y en hornos de laboratorio para trabajos generales con metales refractarios y carburos metálicos. Las desventajas que presenta este método son:

- a) Contaminación del fundido por el material del electrodo. Aunque esta contaminación no es muy grande, puede ser bastante perjudicial. Por ejemplo: 0,05% C disminuye fuertemente la resistencia a la corrosión del titanio y del circonio.
- b) La fusión por arco con electrodo no consumible debe realizarse preferentemente en atmósfera inerte. Es decir, realizar la fusión bajo cualquier presión de gas inerte, estática o dinámica. Esta atmósfera puede estar constituida por argón puro, helio o una mezcla de ambos. Una mezcla de 20% argón y 80% helio (a cualquier presión, preferentemente entre 5 y 200 mm) permiten una tensión de arco más alta que con argón puro y un arco más estable que con helio puro. Además, la mezcla de gases da una mayor potencia eléctrica para una corriente dada. Se utiliza argón de pureza igual al utilizado en soldadura. Un método de purificación de argón está descrito en (34).

- c) Las velocidades de fusión son muy bajas (35) porque el degasado sólo se produce en el baño metálico y porque las adiciones de esponja deben ser realizadas muy lentamente para obtener lingotes homogéneos. Cuando se funde con corriente continua, un tercio de la potencia de alimentación es gastada en el electrodo.
- d) Es muy difícil hacer aleaciones homogéneas debido a la gran dificultad de controlar el mecanismo de alimentación de la esponja para obtener proporciones seguras de los ingredientes aleantes. Se puede incrementar la homogeneidad empleando una bobina solenoide para agitación. El metal base y los componentes aleantes pueden también ser adicionados previamente mezclados y compactados en forma de pastillas.

III.2 Fusión en Crisol Refrigerado con Electrodo Consumible

Muchas de las desventajas del primer método son eliminadas al utilizar la fusión con electrodo consumible. El electrodo no contiene otro metal que el que va a ser fundido y por lo tanto no hay contaminación del fundido.

La mayor ventaja de este método es que la fusión puede realizarse en vacío sin la adición de gases inertes. La contaminación gaseosa del fundido es por lo tanto mantenida a su nivel más bajo posible y, como resultado de esto, se pueden obtener los valores de dureza más bajos. Por ejemplo: fundiendo el mejor grado de esponja de titanio Kroll se han obtenido niveles de dureza Brinell entre 95 y 195, mientras que con el mismo material pero operando bajo argón los valores fueron 0,01% en peso de hidrógeno y 110 a 120 de dureza Brinell(36). En la fusión en vacío, la dureza final depende enteramente de la calidad de la esponja utilizada.

El electrodo consumible permite una alimentación controlada. Pueden ser obtenidas aleaciones homogéneas mezclando los ingredientes aleantes y la esponja, previamente al compactado.

Si bien con electrodo consumible y bajo atmósfera inerte las velocidades de fusión son bastante elevadas, cuando se trabaja en vacío se pueden obtener velocidades aún mayores debido a que la transferencia térmica se reduce en gran medida. Por lo tanto, la eficiencia eléctrica del horno es máxima cuando se opera en vacío. La mayor desventaja de la fusión con electrodo consumible es la dificultad de preparación de los electrodos.

A continuación pasaremos a considerar algunos detalles concernientes a la construcción y manipulación de hornos por arco con electrodo consumible.

III. 2. 1 Algunos detalles concernientes a la construcción de hornos por arco con electrodo consumible

1. Diseño general

Los detalles básicos de una unidad para la fusión por arco que emplea un electrodo consumible se pueden ver en la Fig. 8. Esta unidad consiste esencialmente de una cámara de vacío a la que está conectado un sistema de bombeo, un molde refrigerado por agua que cierra la cámara de vacío, el electrodo con su soporte y el dispositivo de alimentación del electrodo.

2. Crisol

Los hornos de fusión industriales son usualmente provistos con crisoles de cobre enfriados por agua. El riesgo de perforación por el arco es muy leve si se tiene suficiente cuidado en proveer una poderosa velocidad de flujo de agua (hasta varios cientos de litros por minuto) en buen contacto con la pared del crisol. El flujo puede ser tanto vertical como helicoidal alrededor del crisol. Es esencial que el flujo de agua no deje ninguna zona de la pared del crisol sin refrigerar. Si se permite que se formen burbujas de vapor cerca de la zona de fusión, el crisol será perforado por el arco.

El espesor de la pared del crisol de cobre no tiene influencia en la determinación de si el crisol será perforado por el arco o no. Usualmente en hornos por arco bajo vacío el espesor de la pared puede llegar a ser de 12 mm ($\frac{1}{2}$ "), dependiendo dicho espesor del diámetro del crisol y del requerimiento de carga.

Si el lingote es tan alto como el crisol, no habrá dificultad en hacer deslizar el lingote a través de la cabeza del crisol para sacarlo. La contracción provee un juego suficiente como para realizar la operación. Para crisoles que son llenados parcialmente o para lingotes de menos de 150 mm, se recomienda los crisoles con tapón inferior. Es de gran importancia una cuidadosa manipulación del crisol durante la remoción del lingote.

3. Esponja

Como secuela del método Kroll de obtención de esponja de circonio (37) y de titanio (38), ésta siempre contiene ciertas cantidades de cloruros de magnesio y de sodio. Durante la fusión estos cloruros provocan un problema de salpicado sobre el electrodo y el interior del horno. El salpicado aumenta cuando el contenido de cloruro de magnesio de la esponja aumenta.

Experimentos de lixiviación con esponja fina y gruesa indicaron que el contenido de cloruro de la esponja más fina era mayor que el de la gruesa. La

esponja gruesa funde con menos salpicado que la esponja fina. Esto sugiere que el súbito escape de agua de hidratación contenido en el cloruro de magnesio bajo el intenso calor del arco es la causa del severo salpicado.

Si se hace una lixiviación de esponja de titanio con agua seguida por un secado a 120°C se obtiene una pequeña reducción del salpicado pero produce lingotes más blandos (30). El utilizar metanol para la lixiviación produce mejores resultados que el agua ya que las últimas trazas del solvente son más fácilmente removibles de la esponja (39,40), pero el mejor método es asegurar que el cloruro de magnesio esté reducido a un nivel bajo por el tratamiento de separación por sales después de reducción. No obstante, es posible, por un tratamiento posterior de la esponja triturada a aproximadamente 1000°C en vacío, reducir considerablemente el contenido de cloruro de magnesio de la esponja, pero es necesario períodos de tratamientos largos y el costo de dicho tratamiento es alto (41). El cloruro de calcio tiene una presión de vapor mucho más baja que la del cloruro de magnesio y es eliminado de la esponja en el proceso anterior (8).

Para evitar absorción de humedad hay que almacenar la esponja en una atmósfera seca después de ser obtenida del recipiente de reacción. La existencia de los cloruros provoca la absorción. La dureza de la esponja varía con el tratamiento previo para eliminar el cloruro de magnesio (30). La mejor calidad de esponja se obtiene removiendo los cloruros en un proceso de reducción. Si hay cloruros presentes no hay que darles oportunidad de hidrolizarse (41).

En general, las esponjas de titanio y circonio contienen de 0,3 a 2 litros/kg de gas, el cual es desprendido durante la fusión (42). Los principales componentes gaseosos son hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. Aparentemente el hidrógeno y el oxígeno están parcialmente debido a una disociación y a una reducción del vapor de agua en el arco. Cuando la fusión es conducida bajo argón o helio estáticos, los gases serán reabsorbidos por el titanio o el circonio caliente (a las presiones que prevalecen en este proceso y a más altas temperaturas, el hidrógeno es aún altamente soluble). El resultado es un incremento en impurezas gaseosas de aproximadamente 0,1% en peso. Aún este pequeño porcentaje reduce considerablemente la ductilidad de los mencionados metales.

En el caso de la contaminación por hidrógeno, la precipitación de agujas de Ti-H disminuye en gran medida la resistencia al impacto. Esta precipitación es debido a la solubilidad decreciente del hidrógeno en la fase α cuando la temperatura decrece (la solubilidad a 200°C es aproximadamente de 0,002% en peso y a 280°C de 0,18% en peso) (43). El contenido de hidrógeno debe estar por debajo de 0,015% en peso si se quiere mantener la precipitación de Ti-H dentro de un límite razonable (35). Este contenido tan bajo en hidrógeno puede ser obtenido si se funde bajo una atmósfera inerte estática una esponja de titanio conteniendo menos de 0,015% en peso de hidrógeno. Si el contenido de hidrógeno de la esponja

es más alto, la fusión debe ser realizada con presiones de aproximadamente 100 micrones de Hg, si se quiere reducir el contenido de hidrógeno a menos del 0,015% en peso señalado.

Aunque se ha mencionado que es imposible obtener contenidos finales de hidrógeno suficientemente bajos si se parte de esponja con alto contenido en hidrógeno y se realiza la fusión bajo una atmósfera inerte estática, la absorción del nitrógeno y del oxígeno puede ser reducida llevando a cabo la fusión bajo un flujo de gas inerte (atmósfera inerte dinámica). El gas inerte, no obstante, debe ser muy puro. Para obtener presiones parciales de oxígeno y de nitrógeno suficientemente bajas (aproximadamente 100 micrones) sería necesario contar con una alta velocidad de flujo. Esto no sólo significa que el costo del gas inerte será alto, sino que también se requerirá grandes equipos de bombeo.

4. Electrodo

Un electrodo debe satisfacer ciertos requerimientos cualitativos generales, aunque cuantitativamente puede haber una gran variación para cada aplicación. Los requerimientos generales conciernen a: 1) resistencia; 2) conductividad; 3) pureza y 4) rectitud. El punto principal es respecto a la resistencia, pues el electrodo debe ser capaz de soportar su propio peso.

Los electrodos son frecuentemente de sección transversal cuadrada o circular. Si el electrodo es cilíndrico, su diámetro no debería ser mucho más chico que el del molde para que el baño de metal fundido pudiera ser calentado ampliamente en toda su superficie. Por otro lado, debe ser mantenida una cierta diferencia para evitar que el arco choque con la pared del molde. Como resultado de esta medida de precaución, la relación longitud electrodo/longitud lingote resulta más grande cuando más pequeño es el diámetro del lingote. Si la producción de aleaciones terminadas se realiza en una sola operación de refusión partiendo de material previamente fundido, el diámetro del electrodo es de $\sim 25\%$ más pequeño que el del molde. No obstante, si el electrodo no es muy recto, como puede suceder en hornos chicos, la diferencia en diámetro debería ser más grande. Si el material es fundido por primera vez y es posteriormente refundido, la calidad de la superficie no es entonces crítica y puede ser utilizada una relación diámetro electrodo/lingote mucho más chica (44).

El requerimiento de conductividad eléctrica está íntimamente relacionado a la aplicación exacta. Es más seguro calcular un electrodo dado sobre la base de la conductancia promedio más que por su conductividad específica. La resistividad eléctrica, para dar un ejemplo, varía en barras prensadas de circonio (50x50x500 mm) entre 125 y $155 \times 10^{-6} \Omega / \text{cm/cm}^2$ (45). De ensayos realizados con estas barras para determinar la relación resistividad vs. resistencia a la tracción, se puede constatar que existe un agudo incremento en la resistencia

a la tracción cuando la presión excede los 6 kg/cm^2 , Fig. 10 (46).

Ocasionalmente es importante considerar también la conductividad calórica de un electrodo.

La pureza es siempre importante cuando se trata de operaciones con metales caros o raros. Debe existir una correlación entre la pureza del producto final y la de la materia prima. Así, no puede aceptarse un método de soldadura que agregue mucho óxido o tungsteno, o una técnica de prensado que requiera excesiva lubricación de la matriz con aceite o grafito.

El alineamiento del electrodo a través de todo el proceso es esencial y en la práctica esto significa que el electrodo debe ser recto y permanecer así cuando se calienta.

Si el material de partida es un polvo o una esponja, como sucede, por ejemplo, con el circonio, titanio o molibdeno, debe ser primero compactado, aún eventualmente presinterizado, y luego dispuesto para formar largas barras o directamente los electrodos en una máquina especial de soldadura (como se muestra en las Fig. 11, 12) bajo una atmósfera protectora o cuando no se dispone de esta máquina, por soldadura Argonarc o Heliarc. Una consideración adicional en la producción del electrodo es la facilidad de adición de los aleantes. Chatarra y adiciones aleantes son incorporadas al polvo o a la esponja antes del compactado. Ambas, no obstante, pueden ser agregadas en forma de barras al electrodo, las que deberían ser distribuidas en toda la longitud, de manera que el electrodo y las barras fundan al mismo tiempo uniformemente. Los componentes aleantes marcadamente más volátiles que el metal base son colocados preferentemente en el centro del electrodo, de manera que la aleación se realice lo más pronto posible reduciendo entonces la presión de vapor. Hay siempre una tendencia de las zonas exteriores del lingote a ser enriquecidas en constituyentes de aleación más volátiles, de manera que podría ser una ventaja el tener una concentración inicial de estos constituyentes en el centro del baño durante el proceso de fusión.

El empleo de chatarra en la preparación del electrodo trae aparejadas muchas dificultades. No sólo es difícil su manipulación (por sus formas irregulares) sino que hacen falta mayores presiones y el molde debe tener una relación de compresión alta. Como ejemplo, En los Estados Unidos se acostumbra agregar 30% de chatarra a la esponja de circonio y fabricar compactos de $150 \times 150 \times 500$ mm con prensas de doble efecto, siendo las cargas vertical y horizontal 3000 y 1200 ton, respectivamente. Los compactos son prensados al 80-85% de la densidad teórica. Si no se emplean prensas de doble efecto para compactos más pequeños ($25 \times 25 \times 250$ mm) se emplean prensas de 500 ton de acción vertical y matriz flotante, bajo presión de $1,5 \text{ kg/cm}^2$. Estos compactos de 65% de densidad teórica se sueldan. No obstante la baja densidad tienen suficiente resistencia. A

veces se le hace una costura longitudinal para aumentar la resistencia. La baja densidad favorece el degasado (47). La chatarra en placa debe ser fabricada a mano por soldadura en "dry box". El requisito primordial es la rectitud. Los requerimientos de resistencia y conductancia son cumplidos sin ninguna dificultad. Las soldaduras de este tipo de material con el electrodo de tungsteno presenta problemas de salpicado.

También pueden conformarse electrodos a partir de virutas. Pero éstas requieren una presión más elevada que la utiliza con la esponja para formar una briqueta de resistencia semejante, Briquetas de esponja de circonio de 100 mm pueden ser producidas satisfactoriamente con una prensa mecánica de 80 ton de capacidad, pero briquetas de virutas de las mismas dimensiones requieren una presión total de por lo menos 200 ton para ofrecer una calidad igual. Esto asciende a aproximadamente $2,5 \text{ kg/cm}^2$.

Hemos mencionado más arriba, el empleo del sinterizado y la soldadura en el conformado de un electrodo. En el Apéndice B damos algunos detalles más sobre dichas operaciones.

Es práctica común con los metales raros y sus aleaciones y cuando se quiere obtener un lingote de primera calidad fundir por lo menos dos veces por el proceso de electrodo consumible.

Como el lingote es más corto que el inicial es bueno matener la relación longitud/diámetro alrededor de 4, de manera de formar el segundo electrodo a partir de 2 o más lingotes. Las Fig. 13 y 14 ilustran las secuencias de operación en fusiones primaria y secundaria utilizando como material de partida electrodos consumibles de esponja compactada (casos del titanio y del circonio).

Para unir lingotes de primera fusión se puede emplear la soldadura bajo argón pero con lingotes más grandes es preferible soldarlos en el horno. Como regla general para unir lingotes debe considerarse del orden de 25 mm^2 de área para cada 1000 A de corriente de arco.

Como práctica regular se agujerea los extremos frenteados de primera fusión y se atornillan entre sí con cortos niples del mismo metal. El principal objetivo es obtener un contacto cara contra cara de los lingotes, ya que el niple solo deberá poder conducir la corriente del arco requerida sin sobrecalentar y fundir.

En conclusión, debe establecerse que no hay un sólo método para producir compactos para electrodos consumibles que sea satisfactorio para todas las aplicaciones. Las barras prensadas tienen ventajas sobre las briquetas cilíndricas en relaciones de longitud/anchura y consistencia dimensional. Las barras

sinterizadas pueden ser producidas en cantidad con una inversión baja de capital. La fabricación por soldadura es fácilmente realizada a mano o a máquina y puede ser empleada con chatarra, la que de otra forma sería difícil de manipular.

5. Métodos de aleado

El método de adición de elementos aleantes a los fundidos de material refractario presenta un problema difícil al tener que asegurar un mínimo de segregación y de pérdidas de fusión (48, 49). En el proceso de fusión por arco con electrodo consumible, dos son los métodos básicos para la adición de los aleantes: via el electrodo mismo o por una adición separada al baño fundido.

a) Electrodos aleados: Puede parecer, a primera vista, que el método de aleado más satisfactorio es utilizar electrodos que contengan todos los elementos aleantes necesarios y los deoxidantes. Desafortunadamente, éste tiene limitaciones serias y en la práctica sólo puede ser aplicado a un número limitado de aleaciones (48). En el capítulo dedicado a la fabricación de electrodos hemos mencionado las dificultades. Además, si no es requerido un gran número de lingotes de composición similar no es económico mantener un gran stock de electrodos de una composición particular (49).

Los electrodos revestidos (p.ej. electrodos de molibdeno con un electrodeposito de níquel o cromo) han probado ser poco satisfactorios porque el revestimiento puede fundir antes que el núcleo de metal refractario y caer en el baño de manera irregular, provocando un aumento de segregación.

Para lingotes muy pequeños las adiciones de aleantes, en forma de barra, pueden ser insertadas en los electrodos de material refractario a los que se le han realizado una perforación a lo largo del eje longitudinal. Esta técnica es relativamente satisfactoria pero el perforado de agujeros largos es una operación difícil y que requiere mucho tiempo.

b) Agregado directo de los aleantes al baño metálico: La adición directa de aleantes y deoxidantes en forma de tabletas o pastillas al baño fundido puede ser conveniente para lingotes de grandes diámetros, pero no puede ser recomendado para lingotes pequeños debido a la posibilidad de segregación y al peligro que partículas no fundidas queden en el lingote.

El método de adición de aleantes y deoxidantes en forma de polvo directamente en el baño metálico es un método económico y popular, pero hay que tener cuidado de utilizar las condiciones óptimas de manera de evitar segregación y pérdida de aleación. Es necesario asegurar que entre al molde una corriente uniforme y continua de polvo de tal manera que sea distribuido por igual sobre toda la sección transversal del molde, de lo contrario se producirá segregación. Cualquiera sea el tipo de dispositivo utilizado para alimentar de polvo al fundido, hay que tener cuidado de asegurar una velocidad de alimentación constante. Cambios en la alimentación eléctrica del equipo o en la temperatura

ambiente del dispositivo pueden influir en dicha velocidad.

El tamaño de partícula de un dado polvo de adición es de la mayor importancia. Corrientes gaseosas de alta velocidad que se escapan del molde pueden soplar los polvos más finos antes que ellos entren en el baño fundido, mientras que el uso de partículas gruesas puede provocar la inclusión en el fundido de partículas no fundidas (Fig. 15). Similarmente, con una adición de una mezcla de polvo es sabido que, con un cierto tamaño de partícula, puede haber una división de los constituyentes de alta y baja densidad. El problema de la segregación por densidad preferencial puede ser eliminada utilizando cuando sea posible aleaciones patrones homogéneas. De fallar ésto, la mejor técnica es realizar un pre-mezclado de los varios polvos constituyentes en tamaño fino (en el rango de los micrones) y prensado posterior en compactos de esta mezcla. Estos compactos, que pueden ser sinterizados según la cohesión de los polvos empleados, son entonces molidos y clasificados. La Tabla I da tamaños de partícula determinados empíricamente para varios elementos aleantes.

La adición de aleantes ferromagnéticos es complicada (48), pues el polvo se adhiere al electrodo que al conducir la corriente crea un campo magnético alrededor de él. Este defecto puede provocar una pronunciada segregación en el lingote.

En el Apéndice C se resumen los métodos de adición de aleantes en el caso particular de la producción de Zircaloy 1 y Zircaloy 2.

6. Avance del electrodo

El avance de los electrodos en los tipos de horno que nos ocupa, puede efectuarse de muchas maneras. Cada una de ellas involucra ventajas y desventajas (Fig. 16).

Entre estos procedimientos, el que utiliza el sistema de una barra porta-electrodo suspendido de una cadena penetrando en la cámara del horno parece el mejor por las siguientes razones:

Se puede en efecto, sin modificación del horno, utilizar electrodos de no importa que diámetro o longitud. La preparación de estos electrodos no demanda ningún cuidado particular, cualquiera sea su sección. La llegada de corriente al porta-electrodo se efectúa en el interior del horno con la ayuda de conductores flexibles; se evita así todo contacto por frotamiento o rodamiento. El interior del horno no tiene ningún dispositivo complejo que pueda descomponerse. El movimiento del porta-electrodo se hace con ayuda de una cadena en lugar de una cremallera. No hay, pues, riesgo de dañar una parte cualquiera del horno cuando el electrodo toca el fondo del crisol o el lingote. Además, la elasticidad de la cadena permite retirar los lingotes de primera fusión soldados en el horno a la cabeza del electrodo. El guiado de la barra de avance no se hace sino de un lado.

su construcción particular no necesita de ningún otro en el interior del horno.

El inconveniente inherente al empleo de una barra porta-electrodo rígida es su introducción por deslizamiento en el interior de la cámara de vacío. Esta dificultad se puede resolver con cámaras de pre-vacío con bombeo separado.

La alimentación se encuentra en la parte superior de la barra porta-electrodo, habrá que prever una compensación automática de caídas de tensión en función de la longitud del electrodo consumible.

7. Regulación del arco

En el caso de fusión en vacío dinámico del orden de 5×10^{-1} mm Hg, la regulación automática de la longitud del arco debe funcionar de una manera precisa y no se puede hacer simplemente con la ayuda de la tensión. En efecto:

- a) La longitud de los electrodos consumibles en los hornos por arco en vacío no queda constante; de ahí las variaciones en la caída de tensión a lo largo del electrodo durante la fusión. Estas variaciones son muy superiores a las variaciones de la tensión del arco.
- b) Los electrodos se recalientan frecuentemente durante la fusión y provocan un aumento de la resistencia específica. Un electrodo de longitud constante provocaría entonces, un acrecentamiento de la caída de tensión a lo largo del electrodo.
- c) Los electrodos consumibles constituidos por esponja o polvos comprimidos sufren durante el calentamiento una sinterización. La resistencia específica del electrodo disminuye y en consecuencia, la caída de tensión disminuye igualmente a lo largo del electrodo. Estas causas no tendrían mucha importancia si, por una parte, se podría medir la tensión en los bornes del arco y, por la otra, no surgiera el inconveniente siguiente.
- d) El gradiente de tensión del arco en el vacío es muy pequeño. Recordemos que este gradiente de tensión es igual a la relación de las variaciones entre la tensión en los bornes del arco y la longitud del mismo. El valor de este gradiente es del orden de 0,39 V/cm en el vacío y respectivamente de 10 V/cm y 3 V/cm bajo presión para las longitudes de arco por debajo y por arriba de 2 cm (50, 51).

Este débil gradiente de tensión al que se superpone además una caída de tensión del electrodo, hace muy difícil un reglaje exacto de la longitud del arco.

A fin de asegurar un funcionamiento regular, sería necesario que la distancia entre el electrodo consumible y el baño fundido sea inferior a la existente entre el electrodo consumible y las paredes del crisol. Además, si las longitudes del arco son grandes y ellas varían mucho, la calidad superficial de los lingotes se desmejora.

8. Vacío

La experiencia enseña que el vacío ideal en la cámara del horno es de 10^{-2} mm Hg. Es inútil bajar más la presión en la cámara, la resistencia de flujo en la zona anular entre el electrodo y el crisol y los gases desprendidos por la fusión del arco no permiten obtener una presión inferior en el interior del crisol. Cuando se funde titanio la presión nunca será menor que la presión de vapor del titanio fundido, esto es, $3,5 \mu$ (52-55). En el caso del circonio la presión mínima será $\sim 1,5 \mu$. Ha sido demostrado que es imposible obtener una presión inferior a $10^{-2} - 10^{-1}$ mm Hg en el crisol en los alrededores inmediatos del arco (51).

Numerosos hornos por arco para la producción de titanio y de circonio trabajan bajo vacíos dinámicos del orden de 10^{-1} mm Hg. Se podría suponer que la diferencia entre las presiones es de 10^{-1} mm Hg y 10^{-1} a 10^{-2} mm Hg no tiene importancia en el degasado de metales. Sin embargo, a las presiones de 10^{-2} a 10^{-1} mm Hg se obtienen tenores de gases inferiores a aquéllos obtenidos bajo presiones de 1 a 10^{-1} mm Hg.

La objeción principal contra la fusión bajo presión de 10^{-1} a 1 mm Hg en el horno por arco en vacío es la siguiente: el trabajo se realiza en el límite y en ciertos casos, en el dominio de las descargas luminosas el que se encuentra en la zona aproximada de 5×10^{-1} y 5 mm Hg. Esta zona constituye un dominio de trabajo extremadamente peligroso; el arco se puede transformar en una descarga luminosa de alta intensidad, interrumpiendo el proceso de fusión y favoreciendo la formación de arcos vagabundos en la pared del crisol.

La velocidad de evacuación útil del grupo de bombeo puede ser determinada fácilmente. Se determinará en principio, por un ensayo, la cantidad de gas que debe ser bombeada durante la fusión. Esta cantidad depende de la velocidad de fusión y del tenor específico en gas del metal. La velocidad de bombeo deberá ser elegida de manera de evacuar el gas bajo una presión de 10^{-2} mm Hg. En la práctica el degasado es más acentuado al principio de la fusión que al final.

Dos sistemas de bombas han demostrado su eficacia en hornos del tipo que nos ocupa. En primer lugar, la bomba mecánica sistema Roots, cuya velocidad de bombeo máxima se encuentra en la zona de 10^{-2} a 10^{-1} mm Hg, es decir, justo en el dominio más importante para la fusión por arco. Además, esta bomba posee velocidades de bombeo elevadas en dominio del mm. Las bombas sistema

Roots pueden, en caso de entrada de agua, evacuar los vapores que se forman así como el hidrógeno, lo que disminuye considerablemente el peligro de explosiones.

Otro tipo muy apropiado es la bomba a vapor de aceite Booster (oil diffusion ejector pump). Su velocidad de bombeo máxima se encuentra igualmente en la zona de 10^{-2} mm Hg. Su velocidad de bombeo para el hidrógeno, gas que se encuentra frecuentemente en los hornos por arco en vacío, es dos veces superior a la del aire, mientras que en las bombas Roots, la velocidad de bombeo del hidrógeno baja ligeramente.

La práctica enseña que en caso de degasado importante (sobre todo por el hidrógeno) el acoplamiento en paralelo de estos dos tipos de bombas es lo mejor, ya que combinan las ventajas de los dos sistemas. Estas ventajas pueden ser apreciadas en la Fig. 17, la que ejemplifica la curva de velocidad de bombeo para una conexión paralela.

9. Alimentación eléctrica

Para alimentar hornos de fusión por arco se emplean casi exclusivamente fuentes de corriente continua. Este hecho puede ser explicado por lo siguiente:

- a) Cuando el baño metálico es el ánodo, aproximadamente dos tercios de la potencia de alimentación en corriente continua son utilizados para fundir, mientras que si se utiliza una fuente de corriente alterna, se usa la mitad. Para obtener una homogeneidad óptima en un lingote, es de mucha importancia obtener un baño líquido profundo. Esto requiere una elevada energía de alimentación para el baño.
- b) Tensiones de corriente continua a circuito abierto de bajo nivel (20 a 50 volts) proveen un arco estable en vacío con el electrodo catódico. El menor valor aplicado al electrodo debe estar en exceso con respecto a la tensión de arranque del arco; debe tenerse una tolerancia conveniente para la caída de tensión en los conductores desde la fuente al horno. Usualmente, la fuente de corriente alterna requiere tanto tensiones de operación más elevadas como la superposición de una corriente de alta frecuencia para mantener estable el arco. Las tensiones elevadas incrementan el riesgo y peligro de arcos parásitos o laterales.

Como fuentes pueden utilizarse generadores de soldadura en paralelo, pero los rectificadores de selenio o de germanio son preferibles debido a que permiten una operación silenciosa y de bajo costo de mantenimiento (56).

10. Consideraciones sobre seguridad

Al operar un horno por arco en vacío, nos encontramos ante el hecho siguiente: un metal licuado a una temperatura de 1600°C en un crisol de cobre refrigerado por agua y una concentración de energía de 500 Kw o más en el espacio reducido del arco; esto involucra la existencia de un peligro latente de perforación del crisol con la consiguiente penetración de agua con formación de hidrógeno (57). A fin de evitar estos peligros, son recomendables las siguientes medidas:

- a) La longitud del arco deberá ser reducida y ser de cualquier manera inferior a la distancia existente entre el electrodo y la pared del crisol, de manera de reducir la probabilidad de formación de arcos vagabundos; esto está a cargo de la regulación automática del arco.
- b) Fusión en vacío, es decir, bajo presiones inferiores a la del límite crítico de la descarga luminosa a aproximadamente 10^{-1} mm Hg, en la zona del arco. Debiendo tenerse en cuenta el gradiente de presión a lo largo del crisol, habrá que mantener en la cámara del horno una presión de 10^{-2} mm Hg.
- c) El horno debería estar provisto de una sopapa de presión que se abra sobre una canalización que descargue al exterior, a fin de poder eventualmente evacuar el hidrógeno. Esta sopapa se cerrará automáticamente de una manera estanca después del equilibrio de la presión para impedir la entrada del oxígeno del aire en el horno.
- d) En caso de entrada de agua, es necesario mantener una presión tan baja como sea posible; de donde la necesidad del empleo de bombas mecánicas que posean grandes velocidades de bombeo.
- e) A pesar de todas las precauciones técnicas adoptadas no se puede garantizar que no haya peligro de una explosión. Se recomienda, por lo tanto poner en cerramientos de hormigón armado a los hornos de fusión por arco en vacío destinado a la fusión de metales reactivos, tales como el titanio y el circonio, ensayando dirigir las explosiones hacia un lado determinado. La Fig. 18 muestra la disposición de un gran horno por arco en vacío con paredes protectoras para los operadores y un sistema de control óptico del arco.

III.2.2 Fenómenos que ocurren durante la fusión

1. El proceso de fusión

Para no complicar la explicación, consideremos que el equipo de fusión está

constituido por piezas tubulares, una colocada sobre la cabeza de la otra. La pieza base contiene un crisol de cobre; la pieza superior contiene el electrodo. El agua fluye alrededor del crisol de cobre, mientras que la camisa superior y el crisol son evacuados con un equipo de bombeo. El electrodo está conectado a un terminal de una máquina de soldar y el crisol al otro terminal. Todas las complicaciones que pueden aparecer involucran a los accesorios del horno.

La Fig. 19, que está basada en un informe de Kroli (27), muestra qué procesos ocurren durante la fusión de un electrodo de esponja de titanio. El diagrama ha sido complementado con el trazado de la presión y temperatura a lo largo de la longitud del electrodo y del lingote solidificado, como fue consignado por Rossin (58). Aquí no obstante, la discusión estará limitada a aquéllos fenómenos que ocurren bajo condiciones óptimas de vacío y el electrodo hecho cátodo.

Como primer paso se hace estallar un arco entre el electrodo y una capa de material esponja o un disco del mismo material del electrodo colocado en la base del molde. Se incrementa entonces gradualmente la corriente de manera tal que el baño de metal fundido toca la pared del molde y comienza a formarse un lingote uniforme sin capas que se solapen.

El electrodo recibe calor del arco principalmente: por el impacto de iones positivos, por radiación y conducción desde el gas a alta temperatura y el vapor metálico presentes en la zona del arco; por radiación desde la superficie del ánodo y finalmente por efecto Joule, desarrollado dentro del electrodo mismo, como resultado de la alta densidad de corriente. El espesor del filme líquido que cubre la cara del electrodo está determinado, por un lado, por la tensión superficial y por el otro, por las fuerzas mecánicas inducidas por el arco y los gases que pueden ser desarrollados dentro del filme, provocando ambos una dispersión. El calor de fusión requerido debe ser transmitido al metal sólido a través de este filme. Puede ser considerado que existen localmente dentro del filme gradientes de temperatura muy variables y frecuentemente muy abruptos.

Las gotas finas que se separan desde el filme pasan vía el plasma del arco muy caliente al baño anódico del metal fundido (Fig. 20). Este baño absorbe la energía de los electrones que chocan y -como en el caso del cátodo- también la energía transmitida por radiación y conducción desde el plasma del arco; también recibe energía por radiación desde el cátodo y finalmente desde el material catódico sobrecalentado que lo golpea. Rossin (58) estima que la temperatura de la superficie del baño está 200-300°C arriba del punto de fusión.

El calor recibido en el ánodo es transmitido principalmente a las paredes laterales del molde, una vez que el lingote haya alcanzado cierta altura, pero sólo en la arista superior del lingote hay suficiente buen contacto con la pared del molde como para extraer el calor por conducción. Debajo de esta zona muy angosta se forma una separación entre la pared del molde y el lingote como resultado de

una contracción, y aquí la transferencia térmica tiene lugar por radiación. Por esta razón el baño de metal fundido puede considerarse un 50% del volumen total del lingote si el lingote es corto y las velocidades de fusión altas (59, 60).

2. Condiciones de vacío

Como a través de un espacio anular largo y angosto entre el electrodo y la pared del molde deben ser bombeadas muy grandes cantidades de gases, es natural que se encuentre una diferencia de presión sustancial entre la zona de fusión y el anillo superior del molde. Gruber y Scheidig (61) estiman por consideraciones teóricas que existe una diferencia de $\sim 5 \times 10^{-2}$ mm Hg para presiones del orden de 10^{-2} mm Hg en la boca de extracción. Como la diferencia de presión es independiente de la velocidad de bombeo, no debe esperarse que, p.ej. en la fusión de electrodos de esponja de titanio en escala industrial, sean alcanzadas presiones menores en la zona del arco aún si son empleadas velocidades de bombeo extremadamente altas. Esto, por supuesto, se aplica sólo a los gases permanentes; la presión absoluta en el plasma del arco (la que es afectada por vapores metálicos e impurezas condensables) puede ser más elevada en varios órdenes de magnitud (26).

En fusiones secundarias la evolución gaseosa es ya muy reducida y no hay dificultad para mantener presiones de gases permanentes menores. Por lo tanto, si se tiene en cuenta el contenido gaseoso del material de partida, así como también la restricción sobre el degasado impuesto por otros factores, la resistencia al flujo no ejerce ninguna influencia decisiva sobre el proceso de degasado.

Como la fusión por arco es utilizada principalmente para metales que son marcadamente reactivos y son además, llevados a un grado extremadamente alto de actividad en la zona del arco, es de gran importancia que el equipo sea estanco y posea baja liberación gaseosa. Si la materia prima llega a estar contaminada con sales higroscópicas durante la preparación, se pueden formar dentro de la cámara depósitos que han absorbido gran cantidad de humedad. Si ésto sucede, la absorción debe ser mantenida lo más bajo posible durante el período en que el equipo está abierto; el degasado del equipo debe ser realizado antes de comenzar la fusión, ya que el oxígeno de la humedad será absorbido muy rápidamente por el fundido. La proporción de todo el gas liberado y que será absorbido está dada en primera aproximación, por la relación de la velocidad de absorción del fundido, el que a su vez está determinado de un modo general por la resistencia al flujo a lo largo del crisol, a aquélla del sistema de bombeo.

3. Degasado y evaporación

Desde la esponja y los electrodos de polvos puede desprenderse, aún antes de la fusión, una gran proporción de gases. Por ejemplo, Noessen (26) encontró

que con una aleación de molibdeno-titanio, todo el hidrógeno y la mayoría del nitrógeno era removido antes de alcanzar el punto de fusión. El oxígeno, no obstante, era librado solamente después de la fusión.

Con electrodos fundidos o laminados el degasado está prácticamente restringido a la zona del arco y es en gran medida función de la velocidad de fusión. El degasado se lleva a cabo lateralmente con evaporación del material de electrodo, teniendo lugar principalmente en la cara del electrodo y en la superficie del baño y, en menor extensión, durante el pasaje de las gotitas desde el electrodo al fundido. Estas superficies están a tan altas temperaturas como en la fusión por inducción, pero son mucho menos extensas. En el corto tiempo de que se dispone para el pasaje de la superficie del electrodo al frente de solidificación no es posible que exista descomposición cuantitativa o reducción de inclusiones de escoria. No obstante esto, se observa una reducción de un número de inclusiones particularmente en las más grandes y es atribuida parcialmente a la flotación, esto es, a la acumulación sobre la superficie del baño (62). De esta manera, las inclusiones están expuestas a los efectos del vacío y de la alta temperatura por un largo tiempo, lo que hace posible la reducción o descomposición.

Como se ve en la Fig. 19, los componentes más fácilmente condensables de las impurezas volátiles son precipitadas sobre la pared del molde. Lo mismo sucede con los componentes aleantes de alta presión de vapor, las que son absorbidas por el baño de metal líquido en su última etapa; las zonas exteriores del lingote, por lo tanto, serán enriquecidas en tales componentes. También los gases reactivos, que han sido absorbidos químicamente y condensados en forma suelta, encuentran así su manera de regresar al fundido por este medio.

Cuando son fundidos materiales de alto contenido de gases o conteniendo gran proporción de inclusiones volátiles, como sucede p.ej. con la esponja de titanio, o si se aplica una muy alta densidad de corriente, el metal salpicará y las salpicaduras formarán un anillo sobre la arista superior del lingote. En este caso, resulta una superficie rústica y manchada, la remoción de la cual involucra pérdidas serias de material antes que cualquier trabajo pueda llevarse a cabo en el lingote. En tales casos la práctica es decapar la superficie y refundir el lingote. Usualmente el lingote refundido muestra sólo defectos superficiales locales los que pueden ser fácilmente eliminados con una herramienta de mano.

La remoción de cloruros del circonio y titanio presenta un gran problema. Los cloruros de magnesio y sodio no son eliminados por las bombas como gases, sino que se condensan sobre las paredes frías de todo el horno y en las bombas. La esponja puede contener hasta un 0,5% del cloruro de magnesio y de sodio los que son altamente deliquescentes y, cuando el horno es abierto, absorben cantidades tremendas de humedad del aire recogiendo hasta 100% de sus propios pesos en agua. A menos que se tomen precauciones apropiadas, mucha de esta

agua será absorbida por el lingote de titanio o circonio durante la próxima fusión. El agua es absorbida por el lingote como hidrógeno y oxígeno, el hidrógeno es extraído pero el oxígeno permanece en el lingote. Sobre un breve período de operación, con sólo unas pocas fusiones, la cantidad de oxígeno absorbido por este medio puede ser apreciable.

4. Solidificación

La entrega de calor a la hoya depende de varios factores: tensión y corriente de arco, longitud de arco, posición geométrica del arco en relación a las paredes del molde, reparto de la energía del arco en los polos positivo y negativo y pérdidas calóricas. La velocidad de solidificación depende primordialmente de la velocidad de extracción calórica por el molde y es, por lo tanto, afectada por el espesor del molde y la velocidad de flujo y temperatura del agua de enfriamiento. La velocidad promedio de solidificación, como se debería esperar, está relacionada al tamaño del lingote, siendo más rápida para lingotes de pequeño diámetro y decreciente cuando es incrementado el tamaño a 100 mm; entre 100 y 200 mm de diámetro hay poco cambio en la macroestructura bruta de fundición.

El examen de los lingotes fundidos por arco ha mostrado que, excepto los pequeños granos equiaxiales que se encuentran en la capa exterior y en la parte superior del lingote, la macroestructura está totalmente constituida por granos columnares cuyos ejes corren parabólicamente desde la superficie del lingote al eje del mismo (63)(Fig.21). Como las paredes verticales del molde son enfriadas por agua y la porción más caliente del baño fundido está en el centro de la parte superior, los gradientes de temperatura normales a las superficies de crecimiento son siempre más grandes que aquéllos paralelos a la superficie de crecimiento; entonces, de acuerdo con Northcott (64), en el fundido existen condiciones favorables para un crecimiento columnar. El hecho que este crecimiento columnar está en una dirección normal al contorno del solidus es de un significado práctico particular porque la forma del baño fundido, y por lo tanto la interfase líquido-sólido, pueden ser variadas considerablemente por cambios en la entrega de calor, principalmente en la velocidad de fusión.

Cuando son requeridas estructuras de grano fino se agregan frecuentemente agentes nucleantes a los fundidos. Los nucleantes son usualmente sustancias de alto punto de fusión tales como nitruros, boruros y carburos. Aparte de la adición de nucleantes, el agregado de ciertos elementos aleantes puede también cambiar el tipo y tamaño de los granos al actuar sobre el grado de subenfriamiento constitucional (65)(Fig.22).

Para prevenir la formación de largos granos columnares y homogeneizar el fundido, algunas unidades de fusión por arco están equipadas con una bobina llamada de agitación, la que rodea al molde. La bobina, a través de la cual fluye corriente continua, crea un campo magnético paralelo al eje del molde. La

corriente desde la mancha anódica sobre la superficie del fundido fluye prácticamente en forma radial hacia la pared del molde y recorre principalmente la superficie del baño, ya que sólo allí existe un buen contacto con la pared del molde. Por lo tanto, en concordancia con la regla de la mano derecha de Fleming, se genera una fuerza que hace que el fundido gire alrededor del eje del molde (Fig. 23). La velocidad de agitación está controlada tanto por la corriente del arco como por la intensidad del flujo magnético. Las condiciones óptimas son bastante críticas y deben ser determinadas experimentalmente. El agitado magnético tiende a hacer mínima la segregación. También actúa sobre el arco, al que centra evitando su errar sobre el baño metálico y su fijación sobre la pared del molde, creando una seguridad adicional contra el peligro de perforación del molde.

No obstante, se discute la utilidad de la bobina de agitación, ya que no puede esperarse un marcado efecto de homogeneización en la dirección vertical. Además, no es posible incrementar el movimiento de agitación indefinidamente, ya que el avance uniforme del frente de solidificación en la pared del molde puede llegar a ser perturbado, dando como resultado una pobre calidad superficial de lingote. Algunos estudios (66) muestran que la transmisión directa de ultrasonido desde la base del lingote a través del baño de metal fundido podría ser un método efectivo para obtener un refinamiento de grano.

Para reducir el rechupe, y por lo tanto la cantidad de scrap, es muy importante -especialmente en lingotes de grandes diámetros- reducir gradualmente la corriente al final de la fusión. En muchos casos no puede ser completamente evitado un rechupe interno, pero aún así puede servir por lo menos para prevenir su extensión a demasiada profundidad.

Cuando es necesario asegurar un mayor grado de pureza y homogeneidad que la que podría obtenerse por una única operación de fusión se emplea la técnica de fusiones múltiples (67, 49, 68, 69, 70, 71). La práctica de la doble fusión es generalmente adecuada en producción (caso del titanio y del circonio).

La rutina usual para la refusión es utilizar el proceso de fusión por arco tan to con electrodo consumible como no-consumible para producir un lingote de primera fusión y después, utilizar éste como un electrodo consumible en una segunda fusión (Fig. 13, 14). Similarmente, el lingote de segunda fusión -en la forma bruta de colada o trabajado- puede ser utilizado para producir material de triple fusión. En cada fusión hay una cierta pérdida de los constituyentes de baja tensión de vapor, y la experiencia dirá cual es el límite de tolerancia de esta pérdida a fijar al comienzo de la fusión. Se ha observado que la estabilidad del arco disminuye con el incremento de pureza del electrodo cuando son utilizados electrodos consumibles de metal refractario puro. Esto puede ser superado utilizando un valor de corriente de arco más alto.

III.2.3 Condiciones operativas

1. Tamaño de electrodo

La selección del tamaño de un electrodo consumible es materia de controversia y son válidos muchos argumentos en favor de utilizar tanto uno grande como uno chico. En la práctica, la elección está gobernada algunas veces por las posibilidades que brinda el equipo auxiliar y los métodos utilizados para producir el electrodo. Los electrodos de pequeño diámetro facilitan el rápido bombeo de los gases desde los moldes; con electrodos más grandes el camino de conductancia se reduce y ésto eleva la presión parcial por arriba del baño fundido. Esto, no obstante, no es significativo a menos que el diámetro del electrodo sea superior en un tercio al diámetro del molde.

El tamaño mínimo del electrodo está determinado por la corriente que él puede conducir para producir un lingote satisfactorio. Si un electrodo de un dado material y densidad es demasiado pequeño en diámetro, se producirá una temperatura excesiva por calentamiento óhmico; la distancia entre los contactos de toma de corriente y el tapón de base deberá ser la más corta posible. Un electrodo de diámetro pequeño produce generalmente un arco más estable que un electrodo grande porque se produce una fuente de calor relativamente centralizada aún cuando la mancha catódica erra sobre la punta. El tamaño máximo del electrodo está gobernado por el diámetro interno del molde y por la tolerancia deseada entre el electrodo y la pared del molde.

Ejemplos del rango de tamaño de electrodos consumibles utilizados para producir varios tamaños de lingotes de metal refractario se dan en la Tabla II, y algunos detalles de las condiciones de fusión se dan en la Tabla III.

Cuando se han de producir lingotes de doble fusión es conveniente algunas veces refundir el lingote de primera fusión en la forma bruta de colada; en este caso es esencial un electrodo de pequeño diámetro, de manera que el lingote de primera fusión pueda también ser de pequeño diámetro. Por ejemplo, electrodos de molibdeno de 9,5 mm ($3/8''$) han sido utilizados para producir lingotes de 25 mm ($1''$) de diámetro; éstos pueden ser entonces refundidos para producir lingotes entre 63,5 y 150 mm ($2\frac{1}{2}$ y $6''$ de diámetro).

2. Polaridad de electrodo y velocidades de fusión

En hornos por arco con electrodo consumible han sido utilizadas tanto alimentaciones de corriente alterna como de corriente continua para fundir metales refractarios, pero no hay un acuerdo general respecto a cual es la mejor alimentación para un dado conjunto de condiciones.

Cuando se emplea una alimentación de corriente continua, la polaridad del electrodo está determinada por la naturaleza y presión de la atmósfera gaseosa utilizada y por el metal a ser fundido. Por ejemplo, con molibdeno se utiliza el electrodo con polaridad negativa cuando se funde en vacío, pero son obtenidos mejores resultados cuando se emplea con argón a presión atmosférica el electrodo con polaridad positiva. Con corriente alterna, la energía total no es distribuida necesariamente por igual en el electrodo consumible y en el baño fundido, debido a posibles efectos de rectificación.

El uso de alimentación de corriente continua y electrodo de polaridad negativa, produce un arco más estable tanto en vacío como en atmósfera de argón y, cuando la velocidad de fusión es la adecuada, ofrece las condiciones de fusión más satisfactorias (48, 24). En contraste, un arco de corriente continua con electrodo positivo no es tan estable (48, 24) y la mancha catódica puede errar sobre la pared del molde, especialmente cuando la fusión se realiza en vacío. Si esto ocurre, la fusión debe ser detenida para prevenir un daño al crisol. La tendencia al vagabundeo de la mancha catódica puede estar relacionada al diámetro del molde; esto es teóricamente factible.

Desde el punto de vista de la fusión, los arcos de corriente alterna son estables y no se han encontrado ejemplos serios de vagabundeo del arco en atmósfera de argón o en vacío. Cuando se utiliza una alimentación de corriente alterna la distancia entre el baño fundido y los contactos de toma de corriente debería mantenerse lo más corta posible, siendo la razón por la cual esta alimentación frecuentemente induce un movimiento oscilatorio en el electrodo. Este movimiento puede dar lugar a tres efectos perjudiciales: a) en moldes de pequeño diámetro el electrodo puede tocar las paredes del molde; b) puede ser producido un campo denso de salpicado; y c) el electrodo se puede romper (usualmente en las uniones) particularmente cuando se emplea molibdeno o tungsteno.

En condiciones normales de trabajo con electrodos consumibles se requiere, como se ha visto, una tensión entre 20 y 50 V, pero la intensidad de corriente fluctúa ampliamente, dependiendo del tamaño del electrodo y el punto de fusión del metal. La intensidad de corriente debe ser suficientemente alta como para que la energía introducida en la hoya fundida mantenga el baño líquido hasta la pared del molde; sólo si esta condición es plenamente cumplida se puede obtener una buena superficie de lingote. En la Tabla IV, tomada de un artículo de Ham y Sibley (72), están registrados valores observados para diez metales diferentes y para varios tamaños de molde, atmósferas y presiones. Si la corriente es demasiado alta, puede tener lugar la formación de burbujas en el lingote, conjuntamente con un deterioro de la calidad superficial como resultado de un fuerte salpicado durante la fusión.

Además de la estabilidad del arco, la velocidad de fusión es también importante en el control de la calidad del lingote. No es posible correlacionar las

velocidades de fusión para los diferentes metales debido a diferencias en las condiciones experimentales utilizadas. Aún con condiciones standard pueden encontrarse diferencias significativas entre diferentes electrodos de un mismo metal (Fig. 24).

3. Longitud de arco

Para mantener condiciones satisfactorias de fusión es necesario controlar la longitud del arco dentro de límites bastante estrechos; ésto puede ser hecho manualmente o por medio de algún dispositivo automático. Para la producción de lingotes de metal refractario puro hasta un diámetro de 75 mm (3"), utilizando electrodos consumibles de 9,5 a 12,7 mm ($\frac{3}{8}$ a $\frac{1}{2}$ ") la longitud óptima está entre 12,7 y 19 mm ($\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ "). Es necesario frecuentemente utilizar un arco más largo para lingotes aleados de manera de prevenir la formación de depósitos por arriba del baño. Estos depósitos son causados por corrientes gaseosas de alta velocidad que desde el arco soplan metal muy fluido hacia los lados del molde donde éste solidifica.

El uso de un arco demasiado corto reduce el diámetro de libre flujo del baño fundido e incrementa la probabilidad de corto circuito entre el electrodo y el baño. Los arcos demasiado cortos incrementan la posibilidad de formación de gruesos depósitos sobre las paredes del molde, y éstos pueden provocar una estructura cristalina heterogénea, segregación de aleantes y, en casos extremos, puede conducir a establecer arcos laterales; en este caso, la fusión debe detenerse para evitar dañar el molde. El uso de arcos apreciablemente más largos que los óptimos provoca un excesivo salpicado y lingotes inferiores con pobre calidad superficial, e incrementa mucho la posibilidad de arcos laterales particularmente cuando son utilizadas densidades de corriente bajas. Otra desventaja de utilizar un arco innecesariamente largo es que provoca una más baja eficiencia térmica; la pérdida es menor en vacío que en una atmósfera de gas tal como argón. Varios investigadores han establecido que la longitud de arco óptima debería ser más pequeña que el huelgo entre el electrodo y las paredes del molde. Mientras que ésto es una precaución aconsejable, en la práctica no siempre es posible.

Es importante que la longitud correcta de arco sea utilizada en concordancia con un valor de corriente dentro del rango óptimo.

4. Presión, volumen del baño y sobrecalentamiento

Para una dada potencia de alimentación y para cualquier polaridad, el volumen del baño aumenta cuando la presión disminuye (y por encima del rango de la descarga luminiscente). Cuando se usa corriente alterna, la presión tiene poco o ningún efecto, de manera que el cambio de volumen del baño con la presión no puede ser atribuido a la conducción térmica o a la convección del

gas. La única manera concebible por la cual la presión puede afectar la velocidad de fusión o el volumen del baño, para una dada potencia de alimentación, podría ser el cambio en la distribución de la potencia entre el electrodo y el baño. La pregunta es: por qué la distribución debe modificarse en el mismo sentido que la polaridad? Se ha sugerido que la diferencia en temperatura entre la superficie del electrodo y la superficie del baño es responsable de este comportamiento.

Los trabajos del Bureau of Mines sobre producción de lingotes de titanio y circonio, muestran que la cantidad de metal disponible para obtener una forma fundida depende, por supuesto, de las velocidades de fusión, señalando además que, cuando la fusión se realiza a presiones reducidas, estas velocidades sufren un gran incremento, cuyo máximo se encuentra justo por encima del punto en el que se produce la descarga luminiscente. La presión exacta no puede ser pronosticada con precisión y debe ser determinada para cada horno. En la Fig. 25 se muestra un gráfico de la relación de quemado o de consumo de electrodo/presión; en la misma se puede apreciar el marcado aumento de velocidad de fusión cuando se alcanza una presión óptima, seguida por un súbito descenso cuando se produce la descarga luminiscente. En este ejemplo, los estudios fueron realizados en una cámara evacuada donde la presión óptima era de ~ 30 mm Hg. Esto no implica que la presión en el horno debería ser de 30 mm para la velocidad de fusión máxima, sino que la presión del horno debería ser necesaria y suficiente como para prevenir la descarga luminiscente. Se cree que, ya que la presión afecta la velocidad de fusión, ella debe afectar también el volumen del baño y al sobrecalentamiento. Toda la potencia, excepto una porción de la irradiada desde el electrodo y el baño líquido, penetra eventualmente en el baño y debe contribuir tanto al volumen del baño como al sobrecalentamiento. La cantidad contribuida a cada uno, dependerá en alguna medida de la distribución de potencia entre el electrodo y el baño, la cual depende notablemente de la presión.

Para la misma distribución de potencia entre el electrodo y el baño durante la fusión en vacío debajo de 1 mm., debería ser obtenida una mejor relación de volumen de baño a Kw-h, ya que 30 mm o más de argón son suficientes para provocar una considerable pérdida por conducción térmica y convección además de radiación.

La velocidad de fusión o sea la energía (Kw-h) requeridos por kilogramo de metal fundido, depende del calor de fusión y del calor específico promedio desde la temperatura ambiente hasta quizás unos 1000°C por encima del punto de fusión. En el caso del circonio, depende de la cantidad de magnesio residual o agregado con el propósito de estabilizar el arco (21). La adición usual de magnesio para este propósito es de 0,02 a 0,04% en forma de alambre colocado en la esponja durante el prensado. La variación normal es de 0,7 a 2,3 Kw-h/kg de electrodo consumido (45). En el caso del titanio, el consumo es superior debido a un calor específico y a un calor de fusión más elevados con respecto al circonio.

La resistividad eléctrica del electrodo afecta los Kw-h/kg en cuanto influye en la pérdida por radiación térmica desde el electrodo.

5. El flujo del metal al molde

Cuando se producen lingotes por el proceso de fusión por arco con electrodo consumible es necesario asegurar un flujo uniforme de metal fundido dirigido hacia las paredes del molde, de manera de minimizar las pérdidas por desbastado. La relación entre el diámetro del flujo metálico en un molde y el valor de corriente utilizado está influenciado por la distribución de energía entre los polos y por las pérdidas de calor.

Con una alimentación de corriente continua en vacío, los mejores resultados son obtenidos cuando el electrodo está conectado al polo negativo (una excepción es el caso del tungsteno para el que es aconsejable una alimentación de corriente alterna). Puesto que con alimentación de corriente continua, electrodo positivo y en vacío, no siempre se consiguen buenos lingotes y la vida del molde es corta, esta polaridad no es recomendable.

La experiencia ha mostrado que cuando se utiliza electrodos de metal refractario puro de 9,5 a 25,4 mm (3/8 a 1") de diámetro, el diámetro máximo de los lingotes satisfactorios es, en general, 5 a 6 veces el diámetro del electrodo usado.

6. Defectos en los lingotes

Como los lingotes producidos por procesos convencionales de fusión, los lingotes fundidos por arco pueden exhibir defectos de variadas clases. En vista del alto costo de los materiales básicos, deben ser tomadas precauciones para evitar cualquier defecto en el lingote.

a) Rajaduras

Las rajaduras internas son el más serio de los defectos encontrados en los lingotes porque invariablemente ellas conducen a una entrega baja de material sano después del procesamiento subsiguiente. Ellas son causadas, probablemente, por una tensión de tracción axial resultante de un gradiente de temperatura a través del lingote durante la solidificación y la consiguiente contracción diferencial pos-solidificación. Estas rajaduras pueden seguir los límites de los granos columnares o pueden atravesarlos; una mezcla de las dos puede conducir a una formación tipo escalera.

La química del lingote es un factor importante para determinar si se formarán o no rajaduras y, en caso afirmativo, el tipo de rajadura. Se cree con bastante fundamento que el oxígeno, en forma de óxido, causa un decrecimiento

de la cohesión entre los granos y que tensiones de contracción internas son suficientes para provocar la fractura. El mecanismo preciso por el cual se inicia esa carencia de cohesión y la temperatura a la que se forman las rajaduras no ha sido establecido hasta ahora.

La experiencia práctica indica que las rajaduras en los lingotes pueden ser minimizadas asegurando una desoxidación adecuada y uniforme, evitando segregación química, y manteniendo una velocidad de enfriamiento lo más bajo posible.

b) Porosidad

Los lingotes fundidos sin una adición de desoxidantes son generalmente porosos. La adición de un desoxidante tal como el carbono*, no obstante, produce un lingote más sano (48). Hopkin y sus colaboradores (48) han mostrado que la principal causa de porosidad en lingotes desoxidados de molibdeno es la evolución de oxígeno. Es probable que mucho del oxígeno en el fundido esté en forma de MoO_2 , el que ocasiona oxígeno libre por lenta descomposición, la mayor parte del cual entra en solución durante la solidificación del metal.

Estudios llevados a cabo para relacionar el efecto de la velocidad de fusión (la que está vinculada a la corriente del arco) al grado de porosidad en fusiones de molibdeno (alimentación con corriente continua, electrodo negativo y en vacío) muestran que la micro-porosidad decrece primero con el aumento de la corriente hasta un mínimo y luego aumenta con el aumento de la corriente (Fig.26). Experimentos similares indican que, con alimentación de corriente alterna, se produce menor porosidad mientras que se obtiene más porosidad cuando el electrodo está conectado al polo positivo de una alimentación de corriente continua (24).

En fundidos producidos en vacío y desoxidados con carbono, algo de CO queda en solución en el metal fundido durante el tiempo de enfriamiento ya que siempre existe sobre el metal una pequeña presión parcial de CO. Se piensa que este equilibrio de solubilidad del CO es responsable de la micro-porosidad encontrada en todos los lingotes desoxidados con carbono. Intentos para desoxidar molibdeno con carbono en una atmósfera gaseosa provoca una excesiva porosidad debido a una presión parcial más alta arriba del fundido.

A menos que se tomen precauciones para minimizar el contenido gaseoso de las adiciones en forma de polvo y los filmes de gas adsorbidos sobre los electrodos, la porosidad estará presente.

*(caso del molibdeno)

c) Defectos resultantes de momentáneas extinciones del arco

La inestabilidad del arco o la momentánea extinción del arco pueden producir un defecto por el cual se interrumpe la continuidad del crecimiento de los granos columnares de un lingote. Esto ocurre cuando un arco que deposita metal vuelve a chocar sobre el baño fundido que ha comenzado a solidificar. La Fig.27 muestra una sección transversal de un lingote de molibdeno desoxidado con carbono, el que se ha rajado durante el laminado. Es visible que la rajadura ha comenzado en puntos coincidentes con áreas de estructura equiaxial. La causa precisa de la falla no se conoce, pero podría suponerse que la rajadura resulta por una concentración de tensiones causadas por contracciones diferenciales o por áreas localizadas de alto contenido de impurezas. Cuando el arco se ha extinguido por un período más largo se podría suponer que se producirán "cold shuts", es decir, uniones no soldadas de dos corrientes metálicas.

d) Otros

En grandes fusiones o donde es utilizada una alta velocidad de fusión, el volumen del baño es lo bastante grande como para provocar serias cavidades si no se tiene la precaución de disminuir convenientemente la potencia al final de la fusión, a efectos de reducir la profundidad del baño líquido y consecuentemente la profundidad del agujero del rechupe, y posteriormente cortada. Para un tamaño dado de molde, si la potencia es demasiado baja o se permite que el arco sea muy largo, la superficie del lingote será pobre. En la fusión en vacío, cuando están presentes materiales volátiles en cantidades excesivas, se pueden formar salpicaduras cubiertas con una costra aparentemente sana. No obstante, cuando no está presentes metales volátiles, la fusión en vacío produce lingotes más lisos que cuando la fusión se realiza en atmósfera de argón. Los defectos superficiales pueden ser removidos tanto por maquinado como por aplicación de un arco a la superficie mientras el lingote es rotado en una cámara llena de argón (27)(Fig.28).

III. 3 Fusión por Arco con Obtención de Formas Fundidas ("Skull Melting")

La última categoría de hornos corresponde a los hornos que emplean el método denominado de "skull melting" (Fig.9). Se trata en particular de la técnica que permite la fusión del metal sobre una capa solidificada del mismo material ("skull"). Esta "cáscara" es mantenida por control de las velocidades relativas de la potencia entregada al líquido y la pérdida de calor a través de aquélla.

En principio, todo horno por arco en vacío funcionando con crisol enfriado por agua es un horno para "skull melting", ya que el metal líquido esparcido sobre la pared

del crisol solidifica inmediatamente y forma una delgada capa que separa la carga líquida de la pared del crisol. No obstante, la inversa no es verdad. Es decir, todos los hornos para "skull melting" no son hornos de crisol frío, ya que el recipiente que contiene la capa puede ser operado a alta temperatura y ser metálico (acero o cobre) revestido de cerámica o grafito por termodeposición, o cerámico (Fig. 29, 30, 31, 32). El término "horno para skull melting" o "skull furnace" viene a estar asociado con hornos en los que la carga es colada por el fondo o por volcado.

Los hornos para "skull melting" funcionan con electrodos consumibles, electrodos permanentes o una combinación de uno o varios electrodos permanentes con un electrodo consumible. El empleo de electrodos no consumibles o permanentes necesita siempre el empleo de presiones superiores a 5-10 mm Hg.

Estos hornos permiten la fusión de granallas de cualquier grosor y su colada en lingoteras o moldes, ya que el arco es suficientemente intenso como para mantener el 50-80% de la carga bajo forma de baño líquido.

El método de "skull melting" no debe ser empleado para metales que se transforman fácilmente en electrodos ni con aquéllos que se disgregan fácilmente en el líquido, como por ejemplo la esponja de titanio. En estos casos se preferirá la técnica de los electrodos consumibles. Dejando de lado su uso para metales altamente reactivos, pueden consignarse las siguientes ventajas del proceso de "skull melting", cuando se lo compara con aquéllos en que la refusión y la formación del lingote es realizado en un molde enfriado por agua:

- 1) La homogeneidad de la colada no depende ya de la homogeneidad del electrodo o, si es utilizado el método del electrodo permanente, de la adición de los elementos aleantes, ya que toda la carga está en estado líquido al mismo tiempo. Además, si se dispone de agitación, se asegura la homogeneidad de la aleación aún en hornos grandes.
- 2) Si se emplea un electrodo permanente se puede utilizar escoria o material bruto de cualquier forma.
- 3) Si es requerida una toma de la muestra y una corrección de composición del baño, esto puede ser llevado a cabo antes de la colada. Tal forma de obtener muestras es particularmente ventajosa cuando se utiliza scrap de origen cuestionable.

Las desventajas del proceso de "skull melting" son:

- 1) Cuando se producen lingotes existe una pronunciada formación de rechupes y un más elevado grado de segregación.
- 2) Costos de fusión relativamente altos.

- 3) Restricción a la producción en cantidad de tipos de aleaciones similares, ya que la cáscara que queda en el crisol representa una gran proporción de la carga.
- 4) Pocas oportunidades para el refinado; cuando se utiliza electrodos consumibles, los que son esenciales para fundir en alto vacío, la fusión debe ser muy rápida de manera de obtener un grado suficientemente alto de sobrecalentamiento del fundido.

De esta comparación surge que el proceso podría ser aplicado sólo cuando sus ventajas particulares pudieran ser explotadas completamente, por ejemplo en la producción de formas fundidas de metales altamente reactivos y sus aleaciones.

APENDICE A

La definición del arco, en sí mismo, es un problema puesto que la misma palabra ha sido utilizada para describir un número de descargas eléctricas semejantes pero que carecen de un mecanismo físico común.

En general, el arco puede ser definido sólo en términos de corriente y caída de tensión. Hay una categoría definida de descargas eléctricas, ampliamente diferentes unas de otras, pero que comparten la interesante propiedad de que la corriente excede un umbral situado entre 0,1 y 1 ampere, siendo el límite superior no especificado y muy grande, mientras que la caída de tensión está en el rango de unos pocos volts a unos pocos décimos de volts, definitivamente más bajos que los valores encontrados en descargas gaseosas de baja corriente tales como las descargas oscuras, las descargas luminiscentes, etc.

Esta situación está ilustrada en la Fig. 33. En esta figura se ha trazado una típica característica tensión vs corriente para una descarga no especificada, siendo la única restricción principal que los electrodos deben estar exentos de aristas agudas o puntas. Tres dominios principales aparecen con las transiciones correspondientes (las que en general corresponden quizás a descargas inestables): la descarga oscura, también llamada descarga de Townsend, la descarga luminiscente y la descarga de arco. Hay que hacer notar que pueden ser dibujadas curvas muy similares dejando de lado cuales son las condiciones no especificadas.

Si se trata, no obstante, de ser más específico con respecto a esas condiciones, aparece inmediatamente que en la categoría designada como "descarga de arco", encontramos juntas dos categorías de fenómenos enteramente diferentes designadas respectivamente como "arcos de alta presión" y "arcos de baja presión". La diferencia entre las dos está ilustrada por la Fig. 34. Nuevamente hay que hacer notar que curvas muy similares son obtenidas en condiciones relativamente diferentes. En esta figura, se ha trazado en abscisas la presión de gas, mientras que las ordenadas representan las temperaturas (o energías) de los componentes del plasma: temperatura del electrón, temperatura del ión, temperatura del gas neutro.

La región del arco de alta presión está caracterizada por el hecho de que las tres temperaturas indicadas (y más si hay más de tres componentes en el plasma) están razonablemente cerca una de otra (diferencias del orden de unos pocos porcientos se consideran como tolerables). De ésto resulta un estado particular del plasma, llamado "equilibrio termodinámico local". Esta expresión significa que, en cada punto del plasma, se puede definir una temperatura única; no obstante, el equilibrio es puramente local; importantes flujos calóricos, asociados con gradientes de temperatura significativos, pueden existir a través de la descarga.

La región del arco de baja presión está caracterizada por el hecho de que la temperatura del electrón excede considerablemente (dos órdenes de magnitud o más) la

temperatura de las partículas pesadas. Volviendo a la Fig. 33, debemos agregar que la corriente, a su vez, está gobernada por las características de la fuente de alimentación.

En la Fig. 35 (22), se ha trazado la corriente que se puede obtener de una fuente de alimentación vs la tensión de descarga, en la que las curvas A, B y C representan tres combinaciones diferentes de la fuente de potencial ("tensión a circuito abierto") y resistencia serie. Como lo requiere la aplicación de la ley de Ohm a las resistencias series, la corriente en cada caso aumenta linealmente cuando la tensión disminuye.

Las líneas en la Fig. 35 son función solo de las fuentes de alimentación respectivas. La Fig. 33, por otro lado, está determinada sólo por el comportamiento de la descarga. La forma y características de la descarga que serán obtenidas con una dada fuente de alimentación están dadas por la intersección de la curva de alimentación de energía apropiada, tales como la A, B o C de la Fig. 35, con la curva de descarga de la Fig. 33. Una superposición de tales curvas se ve en la Fig. 36 (las curvaturas de A, B y C son el solo resultado del retrazado de la Fig. 35 tomando la corriente en escala logarítmica). Se ve que la energía de alimentación de la curva A solo sostendrá la descarga luminiscente; de donde A puede ser denominada apropiadamente curva característica de la energía de alimentación de la descarga luminiscente. La curva B intersecta la curva de descarga en dos puntos, pero sólo el que corresponde a la corriente más alta es estable. Esto es dentro de los rangos de corriente y tensión del arco, y por lo tanto B es denominada apropiadamente curva característica de energía de alimentación del arco. La curva C es característica de una alimentación de alta tensión la cual tiene suficiente capacidad de conducción de corriente para sostener el arco.

APENDICE B

Sinterizado

Este es frecuentemente utilizado para asegurar compactos más resistentes y su eficiencia depende del material empleado. La resistencia adicionada al compacto es usualmente función del tiempo, temperatura y presión utilizados en la operación (Fig. 37)(46). Ejemplo: una pila de briquetas de esponja de circonio de 100 x 325 mm de largo (peso aproximado 14 kg) se sinteriza satisfactoriamente a una temperatura máxima levemente superior a 1000°C en 7 min. Para temperaturas superiores a los 1100°C se produce ablandamiento y un severo arqueado.

Soldadura

Se pueden emplear dos métodos: la soldadura con electrodo inerte y la soldadura con electrodo consumible. Para evitar la contaminación atmosférica puede utilizarse una protección por gas inerte o un "dry box" con atmósfera inerte.

Con respecto al primero debe establecerse que hasta el presente no se ha descubierto un verdadero electrodo inerte. Cuando se suelda esponja que contiene más de 0,05% Cl es difícil prevenir la contaminación por el electrodo debido al excesivo salpicado. El tungsteno toriado (1% Th) es el electrodo más satisfactoriamente utilizado. Otros materiales que podrían utilizarse como electrodos serían: tungsteno puro, grafito, renio y nitruro de circonio (77). En vista de esta dificultad, los mejores resultados se obtienen con un mínimo de soldaduras.

Si se utiliza un "dry box", se evacúa el mismo a 150 micrones con una bomba mecánica a condición de que la velocidad de pérdida del equipo sea menor de 20 micrones/min. La operación en un equipo con guantes requiere una presión bien balanceada para maniobrabilidad (78). Para compactos chicos y livianos se emplean electrodos de tungsteno toriado de 3,2-6 mm (1/8-1/4") de diámetro y corrientes usuales de 180 a 250 A (46). La soldadura también puede ser realizada con un electrodo consumible y una protección de gas inerte en lugar de un "dry box".

Si comparamos la operación con protección con gas inerte y con "dry box" (ambas en óptimas condiciones) debemos decir que la primera no es tan buena como la segunda. El grado de contaminación atmosférica que sufre el compacto en el primer caso es función de la eficiencia de la protección, de la longitud de la soldadura y de la velocidad de enfriamiento.

Hay pocos problemas con barras soldadas en lo que se refiere a resistencia. No obstante, la conductancia es un problema. Como regla general operativa: el o los glóbulos de soldadura deben tener bastante sección transversal como para conducir toda la corriente del arco sin sobrecalentar y fundir. La pureza es difícil de controlar cuando se opera con electrodo de tungsteno sobre material salpicado.

APENDICE C

Para la producción de Zircaloy 1 (contiene $2\frac{1}{2}\%$ Sn) y Zircaloy 2 (aleación cuaternaria que contiene 1,5% Sn, 0,12% Fe, 0,1% Cr y 0,05% Ni) se pueden emplear tres métodos de adición de los aleantes: 1) método del prensado, 2) método del alambre de estaño y 3) método de las pastillas.

El primer método es utilizado para producir Zircaloy 1. El estaño es extrudado a alambre de 1,6 mm ($1/16''$) cortado a la medida de la matriz e incorporado a la esponja de circonio antes del prensado en un electrodo. Aunque esta técnica es probablemente apropiada para adicionar materiales aleantes de alto punto de fusión es insatisfactorio para el estaño. El estaño funde a mucha más baja temperatura que el circonio y debido al gradiente de temperatura a lo largo del electrodo de circonio el estaño fundido se escurre de la barra. Debido al fenómeno descrito, la cantidad de estaño excede la cantidad proporcional deseada.

El método del alambre de estaño consiste en agregar el alambre a una velocidad de alimentación proporcional a la velocidad de alimentación del electrodo. Aunque la apariencia exterior de los lingotes es excelente y el análisis químico de muestras tomadas a lo largo de la cara lateral indica una aleación homogénea, el macroataque de las secciones verticales revelan áreas con contenido de estaño extremadamente alto. Estas áreas son debidas a trozos de estaño o de compuestos Zr-Sn que descienden a la base del baño fundido y solidifican antes de mezclarse completamente con el circonio. Estas áreas están usualmente cerca del centro del baño y a indeterminados niveles dentro del lingote aunque la dispersión de estaño a través de la sección transversal exterior del área central es bastante uniforme. El agregado de agitación magnética homogeneiza el lingote demostrando el macroataque la ausencia de estaño no aleado. También puede realizarse doble fusión para controlar la porosidad y la segregación.

Para producir Zircaloy 2 se emplean las siguientes técnicas: 1) adición de hierro y cromo en la operación de briqueteado de la esponja, prealeada con el níquel; 2) aleación de níquel con el alambre de estaño y 3) la utilización de alambres obtenidos por extrusión de polvos de estaño-hierro-cromo-níquel mezclados. Aunque este método de adición producía lingotes de excelente calidad, el mejor método es alimentar con pastillas comprimidas hechas con polvos metálicos al fundido durante la fusión. Las pastillas son de 9,5 mm ($3/8''$) por 6,3 mm ($1/4''$) de espesor. Las pastillas son agregadas en una cadencia regulada de acuerdo a la velocidad de fusión del electrodo. Este método da la mejor homogeneización y combinándolo con la agitación magnética y la doble fusión, da lingotes que pueden cumplir especificaciones muy rígidas.

TABLA I

TAMAÑO OPTIMO DE PARTICULA PARA VARIOS ELEMENTOS ALEANTES	
Elemento	Tamaño de partícula (diámetro en mm)
Al	1,8
Ti	1,0
V	0,9
Zr	0,8
Cr	0,8
Co	0,75
Ni	0,75
Nb	0,7
W	0,5
Ta	0,5

TABLA II

TAMAÑOS DE ELECTRODOS UTILIZADOS PARA PRODUCIR LINGOTES DE METALES REFRACTARIOS			
Diámetro de lingote (pulg - mm)		Diámetro de electrodo (pulg - mm)	
1	25,4	3/8	9,5
2	50,8	3/8 a 3/4	9,5 a 19
2½	63,5	1/2 a 1¼	12,7 a 31,7
3	76,2	1/2 a 1¾	12,7 a 46,4

TABLA III

A. CONDICIONES DE FUSION PARA LINGOTES DE METALES REFRACTARIOS PUROS					
Metal	Atmósfera	Diam. ling. (pulg. -mm)		Diam. electr. (pulg.-mm)	Corriente (A)
Mo	Vacío	1	25,4	3/8 9,5	Negativa 1000-1300
Mo	Vacío	1 $\frac{3}{4}$ -2	46,4-50,8	3/8 9,5	Negativa 1300-1700
Mo	Vacío	3	76,2	1/2 12,7	Negativa 1500-2000
Mo	Argón	2	50,8	3/8 9,5	Positiva 2000-2300
Ta	Vacío	2	50,8	3/8 9,5	Negativa 1400-1700
Nb	Vacío	2	50,8	3/8 9,5	Negativa 1200-1600
W	Vacío	2	50,8	3/8 9,5	Corr.Alt. 2200-2600
B. ALTERNATIVAS DE CONDICIONES DE FUSION PARA LINGOTES DE METALES REFRACTARIOS PUROS.					
Metal	Atmósfera	Diam. ling. (pulg.-mm)		Diam. electr. (pulg.-mm)	Corriente (A)
Mo	Vacío	2	50,8	3/8 9,5	Corr.Alt. 1900-2300
Mo	Vacío	3	76,2	1/2 12,7	Corr.Alt. 2200-2800
Mo	Vacío	3	76,2	1 25,4	Corr.Alt. 3000-4500
Mo	Argón	2	50,8	3/8 9,5	Corr.Alt. 2100-2400
Ta	Vacío	2	50,8	3/8 9,5	Corr.Alt. 1800-2300
Nb	Vacío	2	50,8	3/8 9,5	Corr.Alt. 1800-2200
W	Vacío	3	76,2	3/8 9,5	Corr.Alt. 2900-3500

TABLA IV

FUSION POR ARCO CON ELECTRODO CONSUMIBLE*							
Metal	Sección Transv. Electr. (pulg ² -mm ²)	Diám. Electr. (pulg-mm)	Corriente (A)	Tensión (V)	Presión (mm)	Vel. de Fusión	
Ti	28,0 18.000	10 254	9000	30	30 A	0,50	0,23
Fe	3,1 2.000	5 127	850	45	760 A	0,32	0,14
Zr	3,9 2.500	9 228,6	4450 ca	41	0,008	0,28	0,13
Mo	3,9 2.500	9 228,6	6000 ca	65	0,025	0,43	0,20
Hf	5,0 3.200	4 101,6	2400	32	63A-63 He	0,42	0,19
W	0,2 130	1,5 38,1	1650 ca	21	0,025	0,39	0,17
Ta	0,3 190	2 50,8	2000 ca	36	0,025	0,80	0,36
U	4,9 3.150	4 101,6	2300	27	190A-190He	0,15	0,07
Base Zr	1,5 970	4 101,6	1200	35	0,1	0,22	0,10
Base Ni	1,2 775	4 101,6	1800	30	0,003	0,30	0,14
Base Co	1,1 710	4 101,6	1400	30	0,005	0,23	0,10
Base Ti	1,2 775	4 101,6	940	31	0,07	0,27	0,11

* Alimentación con corriente continua y electrodo negativo, salvo indicación.

BIBLIOGRAFIA

Obras de consulta general:

- A. MILLER, G.L., "Zirconium" (Academic Press Inc., 1954).
- B. KUHN, W.E., "Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum" (J.Wiley & Sons, 1954).
- C. McQUILLAN, A.D. y M.K., "Titanium" (Butterworths Scientific Pub., 1956).
- D. BUNSHAH, R.F. (Editor), "Vacuum Metallurgy" (Reinhold Pub.Co., 1958).
- E. "Thermodynamics in Vacuum Metallurgy" (Curso dictado en la New York University en 1958)(New York University Press, 1960).

Artículos:

1. KROLL, W.J., (Trans.Electrochem.Soc., 78 (1940) 35).
2. KROLL, W.J., (U.S. Pat. No. 2205884 (1940).
3. LILLIENDAHL W.C, y RENTSCHLER, H.C., (Trans.Electrochem.Soc., 91 (1947) 285).
4. BRACE, P.H., (J. (y Trans.) Electrochem.Soc., 93 (1948) 247).
5. KROLL, W.J., SCHLECHTEN, A.W., CARMONY, W.R., YERKES, L.A., HOLMES H.P. y GILBERT, H.L., (Trans.Electrochem.Soc., 92 (1947) 99).
6. KROLL, W.J., ANDERSON, C.T. y GILBERT, H.L., (Metals Technol. T.P. 2310 (1948).
7. KROLL, W.J., ANDERSON, C.T., HOLMES, H.P., YERKES, L.A. y GILBERT, H.L., (J. (y Trans.) Electrochem.Soc., 94 (1948) 1).
8. KROLL, W.J. y GILBERT, H.L., (J.Electrochem.Soc., 96 (1949) 158).
9. DAVY, H. (Sir), (Trans.Phil.Royal Soc., 97 (1809) 71).
10. DOREMUS, C.A., (Trans.Electrochem.Soc., 13 (1908) 347).
11. SIEMENS, W., (Brit. Patent No.4208 (1878).
12. MOISSAN, H., (Compt.Rend., 115 (1892) 1031).
13. BOLTON, W. von, (Z.Elektrochem., 11 (1905) 45).
14. PIRANI, M., (Vacuum, 2 (1952) (2) 159).

15. WEISS, L. y col., (Z.Anorg.Chem., 65 (1910) 248, 279, 345).
16. MOORE, R.W., (Trans.Electrochem.Soc., 43 (1923) 317).
17. BROWNE, L.E., (Steel, 122 (1948) (3) 24).
18. KROLL, W.J., (Trans.Electrochem.Soc., 78 (1940) 35).
19. PARKE, R.M. y HAM, J.L., (Trans.AIME, 171 (1947) 416).
20. SIMMONS, O.W., GREENIDGE, C.T. y EASTWOOD, L.W., (Proc.of Titanium Symposium, Of. of Naval Research, USA, Dec. 1948, pag. 77).
21. GILBERT, H.L., ASCHOFF, W.A. y BRENNAN, W.E., (J.Electrochem.Soc., 99 (1952) 191).
22. JOHNSON, E.W., (Ref.D, pag. 101).
23. JOHNSON, E.W., HAHN, G.T. y ITOH, R., (Ref.B, pag. 19).
24. MOSS, A.R., (Proc.Inst.Elect.Eng.(London) 192 Pt.A (1955) 45).
25. COMBINE, J.D., (Metal Progress, 56 (1949) 376).
26. NOESEN, S.J., (Ref.E).
27. KROLL, W.J., (Metall. 11 (1957) 1).
28. ALTERTHUM, H., REGER, H.M. y SEELINGER, R., (Z.Techn.Physik, 9 (1928) 169).
29. REECE, M.P., (Nature, 177 (1956) 1089).
30. KUHN, W.E., (J.Electrochem.Soc., 99 (1952) 89).
31. DAVIS, J.A., HERRES, S.A. y GREENIDGE, C.T., (Battelle Memorial Institute Rand Report R-131 (March 1949).
32. SPRARAGEN, W. y LENGYEL, B.A., (J.Am.Welding, Research Suppl. 8, No. 1 (1943).
33. RADKE, S.F., (Trans. AIME 191 (1951) 620).
34. Ref.A pag. 284
35. KESSLER, H.D., (Western Metals Congress, ASM (marzo 1955).

36. Ref.B, pag. 122.
37. Ref.A, pag. 74.
38. Ref.C, pag. 17.
39. SIMMONS, O.W., GREENIDGE, C.T. y EASTWOOD, L.W., (Metal Progress, 55 (1955) 197).
40. CRAIGHEAD, C.M., SIMMONS, O.W. y EASTWOOD, L.W., (J. Metals, 188 (1950) 485).
41. Ref. A, pag. 285.
42. GRUBER, H., (Ref.B, pag. 120).
43. LENNING, G.A. y CRAIGHEAD, C.M., (Trans. AIME, 200 (1954) 367).
44. WINKLER, O., (Metallurgical Reviews, 5 (1960) (17) 92).
45. STEPHENS, W.W., GILBERT, H.L. y BEALL, R.A., (Trans. ASM, 45 (1953) 862).
46. BEALL, R.A., WOOD, F.W. y MAGNUSSON, P.C., (U.S. Bureau of Mines, Rep. No. 5247 (1956)).
47. GRUBER, H., (Ref.B, pag. 142).
48. HOPKIN, G.L., JONES, J.E., MOSS, A.R. y PICKMAN, D.O., (J. Inst. Metals, 82 (1953-54) 361).
49. MOSS, A.R., (J. Less-Common Metals, 1 (1959) 80).
50. JOHNSON, E.W., (Ref. B, pag. 25 y 38).
51. GRUBER, H., (Ref.B, pag. 133).
52. BLOCHER, J.M. y CAMPBELL, I.E., (J. Amer. Chem. Soc. 71 (1949) 4040).
53. SCHOFIELD, T.H. y BACON, A.E., (J. Inst. Metals, 82 (1953-54) 167).
54. QUILL, L.L. (Editor), "Chemistry and Metallurgy of Miscellaneous Materials" (McGraw-Hill, 1950).
55. KROLL, W.J., (Metal Ind., 87 (1955) 130).

56. BORREBACH, E.J., (Ref.D, pag. 136).
57. GRUBER, H., (Ref.B, pag. 133).
58. ROSSIN, P.C., (Ref.D, pag. 79).
59. JOHNSON, E.W., (Ref.D, pag.153).
60. BEALL, R.A., BORG, J.O. y WOOD, F.W., (U.S. Bureau of Mines, Rep.No. 5144 (1955).
61. GRUBER, H., y SCHEIDIG, H., (Z.Metallkunde, 47 (1956) 149).
62. DYRKACZ, W.W., (Ref.E).
63. MOSS, A.R., (J.Less-Common Metals, 1 (1959) 34).
64. NORTHCOTT, L., (J.Inst.Metals, 72 (1946) 283).
65. CHALMERS, B., "Principles of Solidification" (J. Wiley & Sons, 1964).
66. Metal Progress, 74 (1958) (6) 63.
67. COOK, M. y SWAINSON, E., (J.Inst.Metals, 87 (1958-59) 161).
68. KIEFFER, R. y PIPITZ, E., "The Metal Molybdenum" (ASM, 1958, 530).
69. PICKMAN, D.O., (Alloy Metals Rev., 8 (1956) 2).
70. OLDS, L.E. y RENGSTORFF, G.W.P., (J.Metals, 8 (1956) 150).
71. TOTTLE, C.R., (J.Ins.Metals, 85 (1956-57) 375).
72. HAM, J.L.y SIBLEY, C.B., (J.Metals, 9 (1957) 976).
73. BEALL, R.A., WOOD, F.W. y ROBERSON, A.H., (J.Metals, 7 (1955) 801).
74. MOSS, A.R., (British Patent Appl. No. 29599 (1958).
75. ROBERSON, A.H., (J.Inst.Metals, 86 (1957-58) 1).
76. BEALL, R.A., WOOD, F.W., BORG, J.O. y GILBERT, H.L., (U.S. Bureau of Mines, Rep.No. 5265 (1956).
77. WOOD, F.W., (U.S. Bureau of Mines, Inv.Rep. (Oct.1953).
78. WOOD, F.W., BORG, J.O. y BEALL, R.A., (U.S.Bureau of Mines, Rep.No.5149(1955).

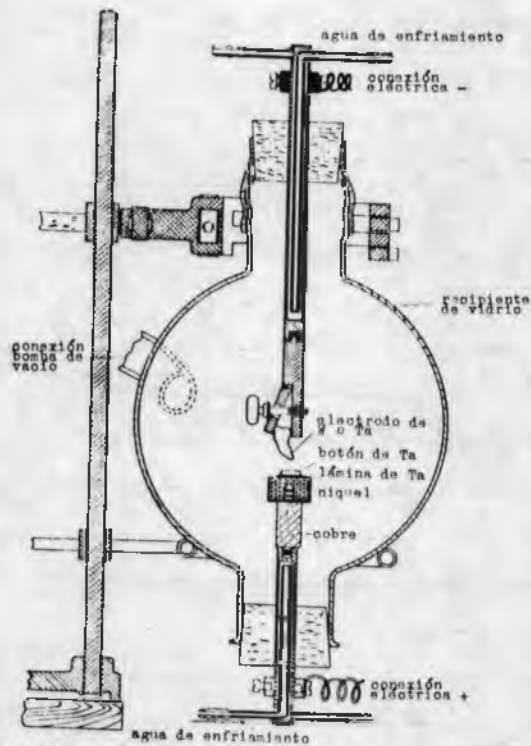


Fig.1.-Horno de Simpson-von Bolton según Pirani (1905)

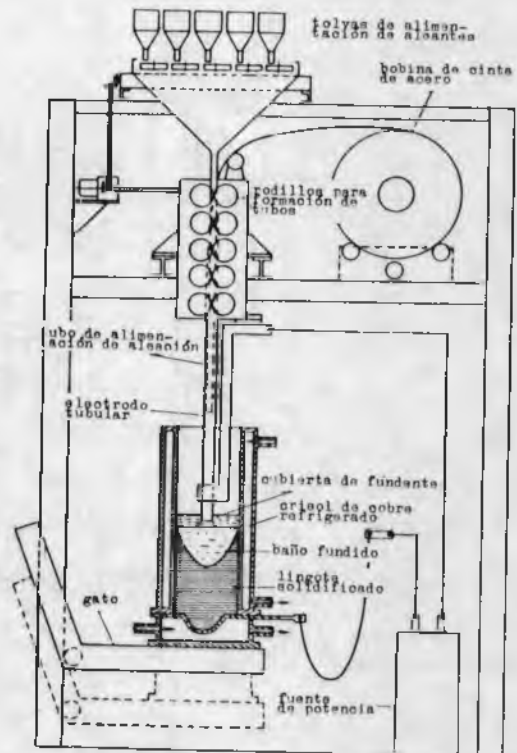


Fig.2.-Horno Kellogg empleado para fundir aceros aleados (ca.1940)

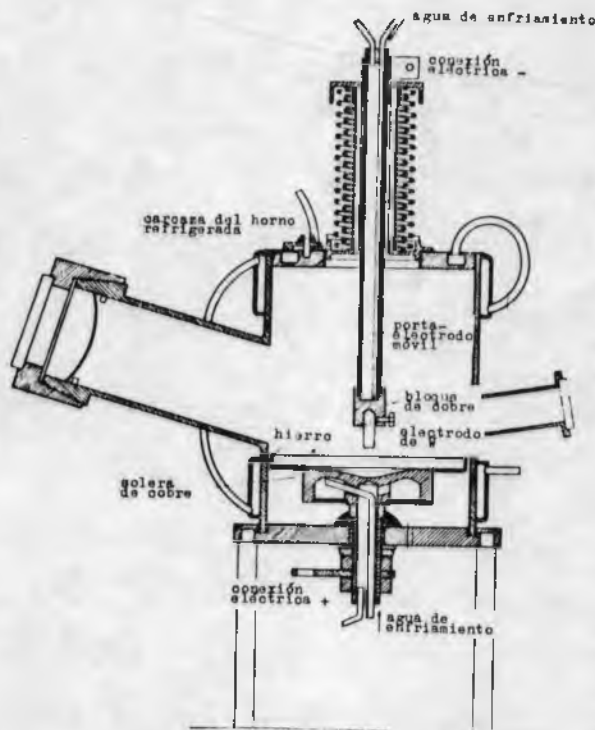


Fig.3.-Horno utilizado por Kroll para fundir titanio (1940)

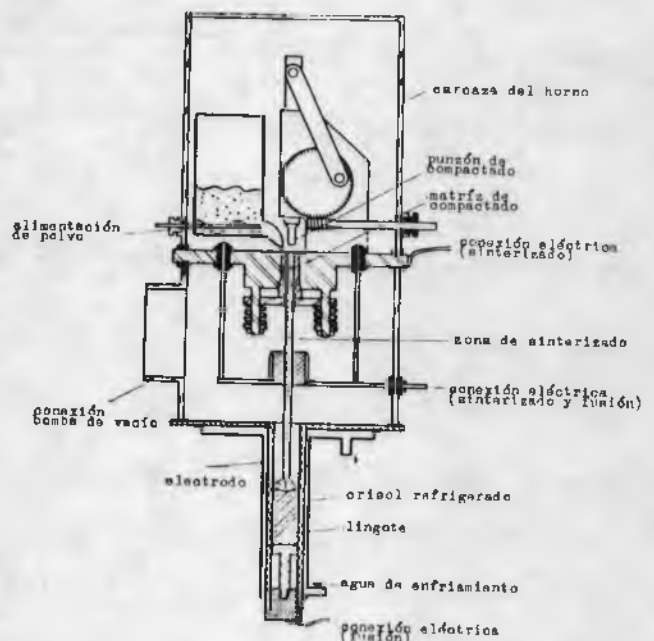


Fig.4.-Horno desarrollado por Parke y Ham para fundir molibdeno (1946)

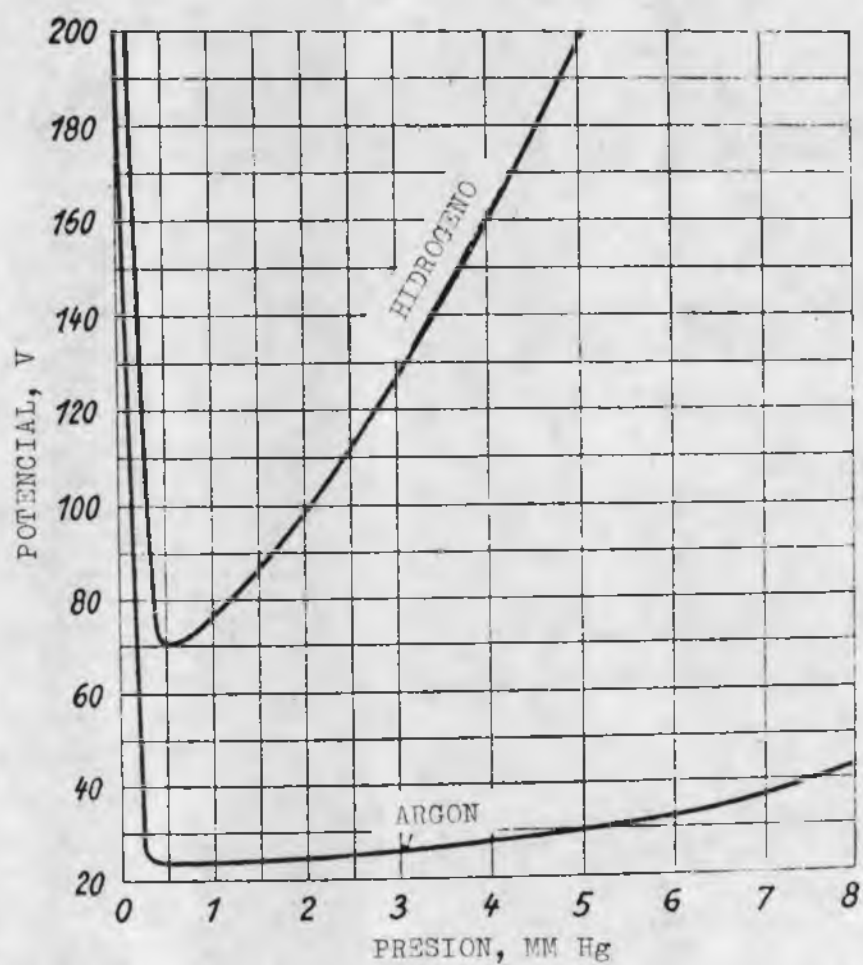
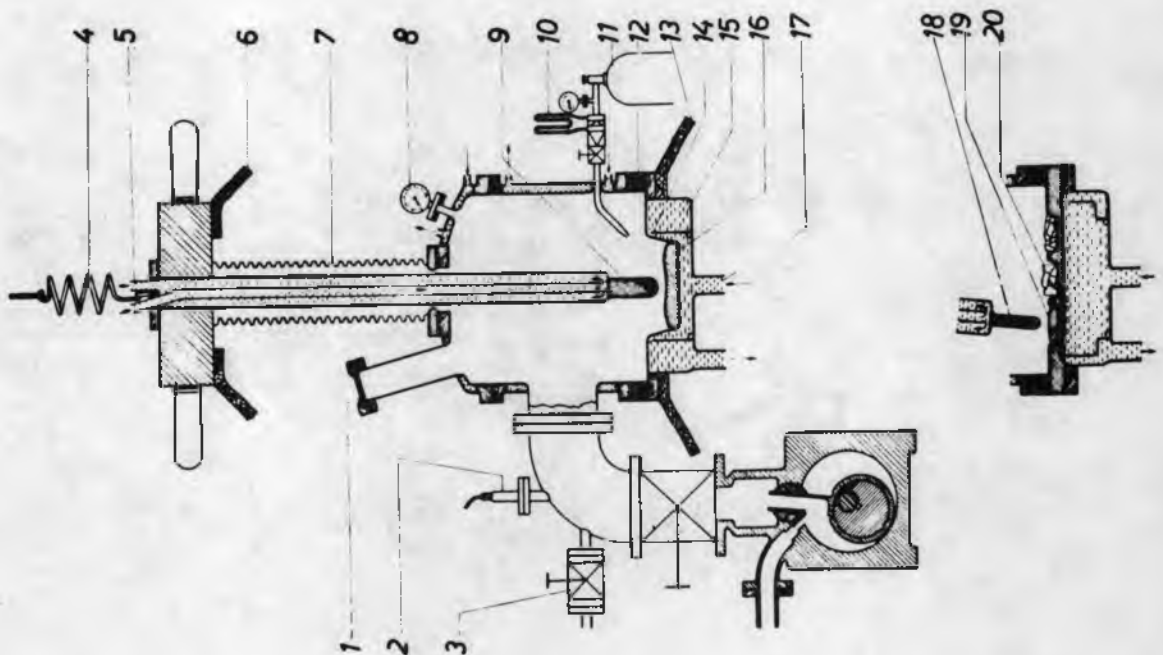


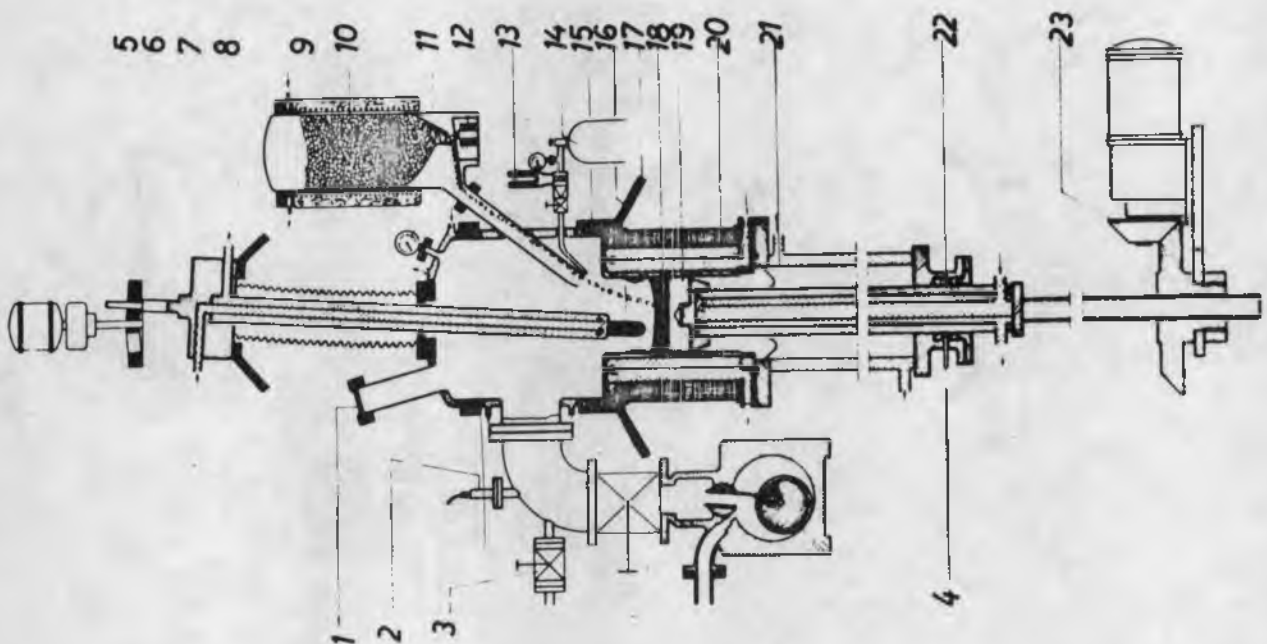
Fig.5.-Descarga luminiscente entre un filamento de tungsteno y un cátodo caliente, en argón e hidrógeno. (Alterhum (28))

Figura 6.-Horno de fusión por arco en vacío con electrodos no-consumible o permanente.



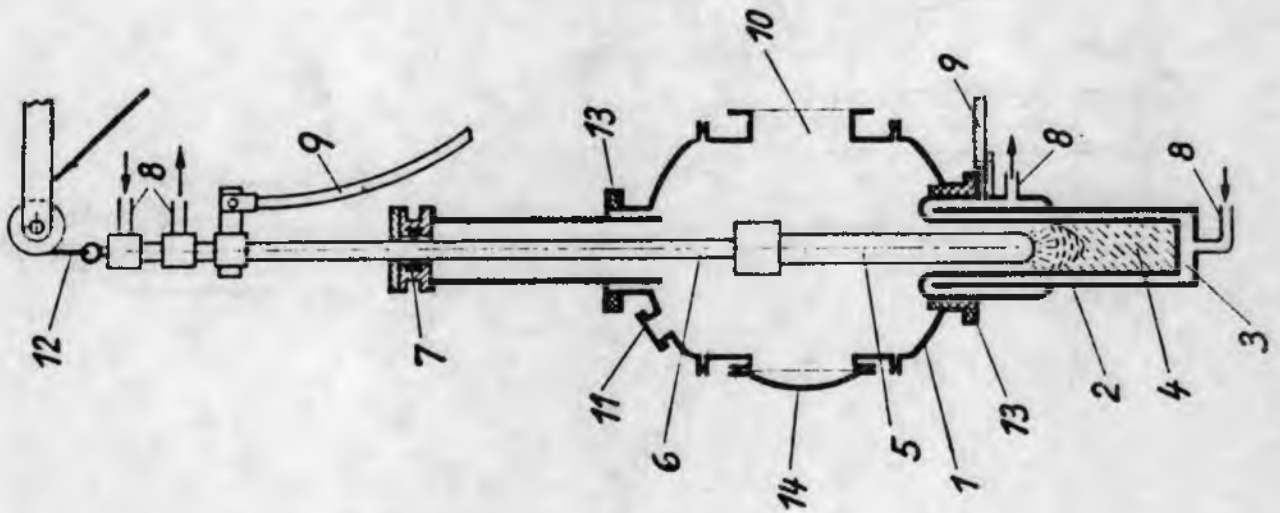
1. Ventana de observación
2. Vacuómetro
3. Válvula de entrada de aire
4. Resorte para compensación de la presión atmosférica
5. Agua de enfriamiento
6. Conexión eléctrica (cátodo)
7. Tubo flexible
8. Vacuómetro de diafragma
9. Electrodo no-consumible (tungsteno)
10. Caudalímetro
11. Gas inerte
12. Anillo aislante
13. Conexión eléctrica (ánodo)
14. Guía del agua
15. Camisa de refrigeración
16. Lingote
17. Agua de enfriamiento del crisol
18. Electrodo no-consumible
19. Botón fundido
20. Esponja antes de la fusión

Figura 7.-Horno de fusión por arco en vacío con electrodo no-consumible y crisol con tapón re-tráctil.



1. Ventana de observación
2. Vacuómetro
3. Válvula de entrada de aire
4. A la bomba de vacío
5. Oscilador de electrodo
6. Agua de enfriamiento
7. Conexión eléctrica (cátodo)
8. Tubo flexible
9. Horno
10. Esponja de titanio
11. Vacuómetro de diafragma
12. Vibrador de alimentación
13. Caudalímetro
14. Gas inerte
15. Anillo de aislación
16. Electrodo no-consumible
17. Conexión eléctrica (ánodo)
18. Lingote
19. Titanio (arrancador)
20. Bobina de agitación
21. Colector
22. Cierre dinámico
23. Extractor del lingote

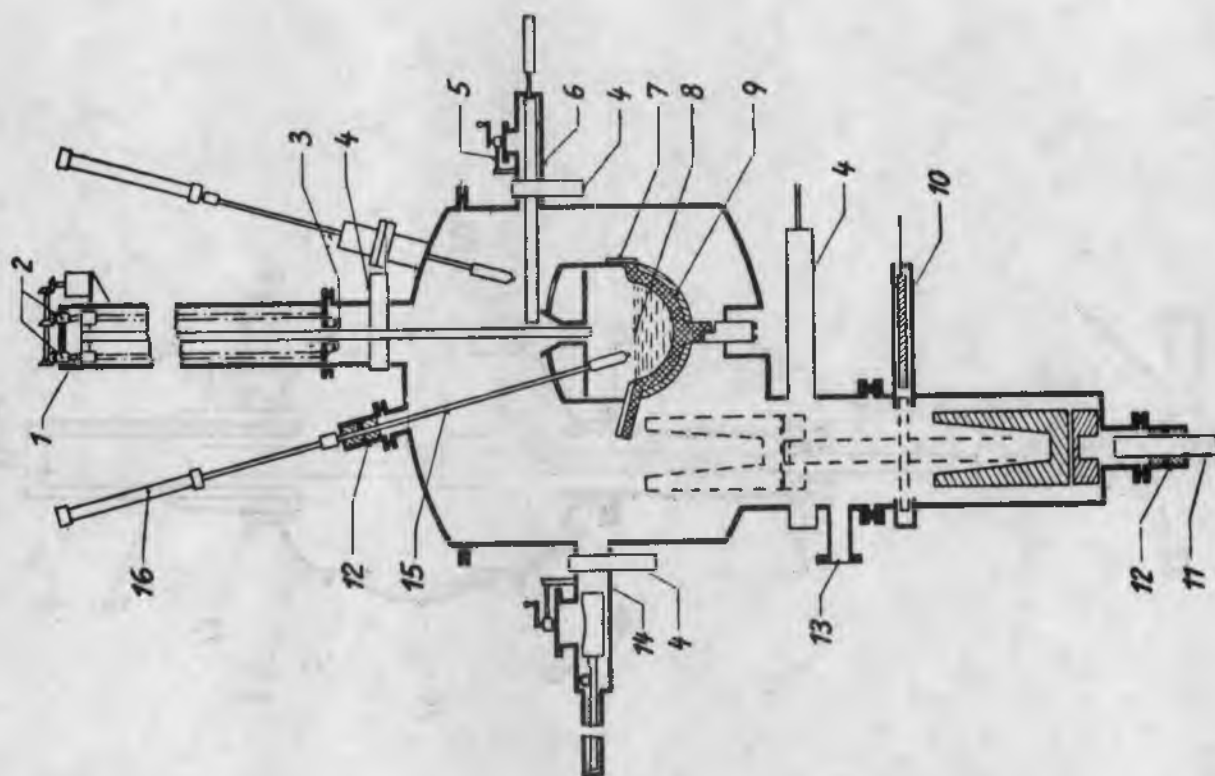
Figura 8.-Horno de fusión por arco en vacío con electrodos consumible y molde de cobre refrigerado por agua.



1. Cámara del horno
2. Molde de cobre refrigerado por agua
3. Camisa de refrigeración
4. Lingote solidificado
5. Electrodo consumible
6. Barra porta-electrodo refrigerada por agua
7. Cierre de vacío
8. Entrada y salida del agua de enfriamiento
9. Conexiones eléctricas
10. Al sistema de bombeo
11. Ventana de observación
12. Aparejo
13. Anillo de aislación
14. Puerta de servicio y válvula de liberación de presión

Fig.9.-Gran horno por arco en vacío con electrodo consu-
mible y electrodo permanente para la producción
de formas fundidas.

1. Tornillo de alimentación
2. Cierres rotatorios
3. Poleas de guía
4. Válvulas de vacío
5. Adición de aleantes
6. Dispositivo de alimentación
7. Articulación de la tapa
8. Eje de volcado alrededor del centro de gravedad del horno
9. Cáscara sólida de titanio
10. Baffle
11. Pistón hidráulico
12. Cierres de vacío
13. Conexión de vacío
14. Carga de material de rezago
15. Electrodo no-consumible refrigerado por agua
16. Control hidráulico del electrodo



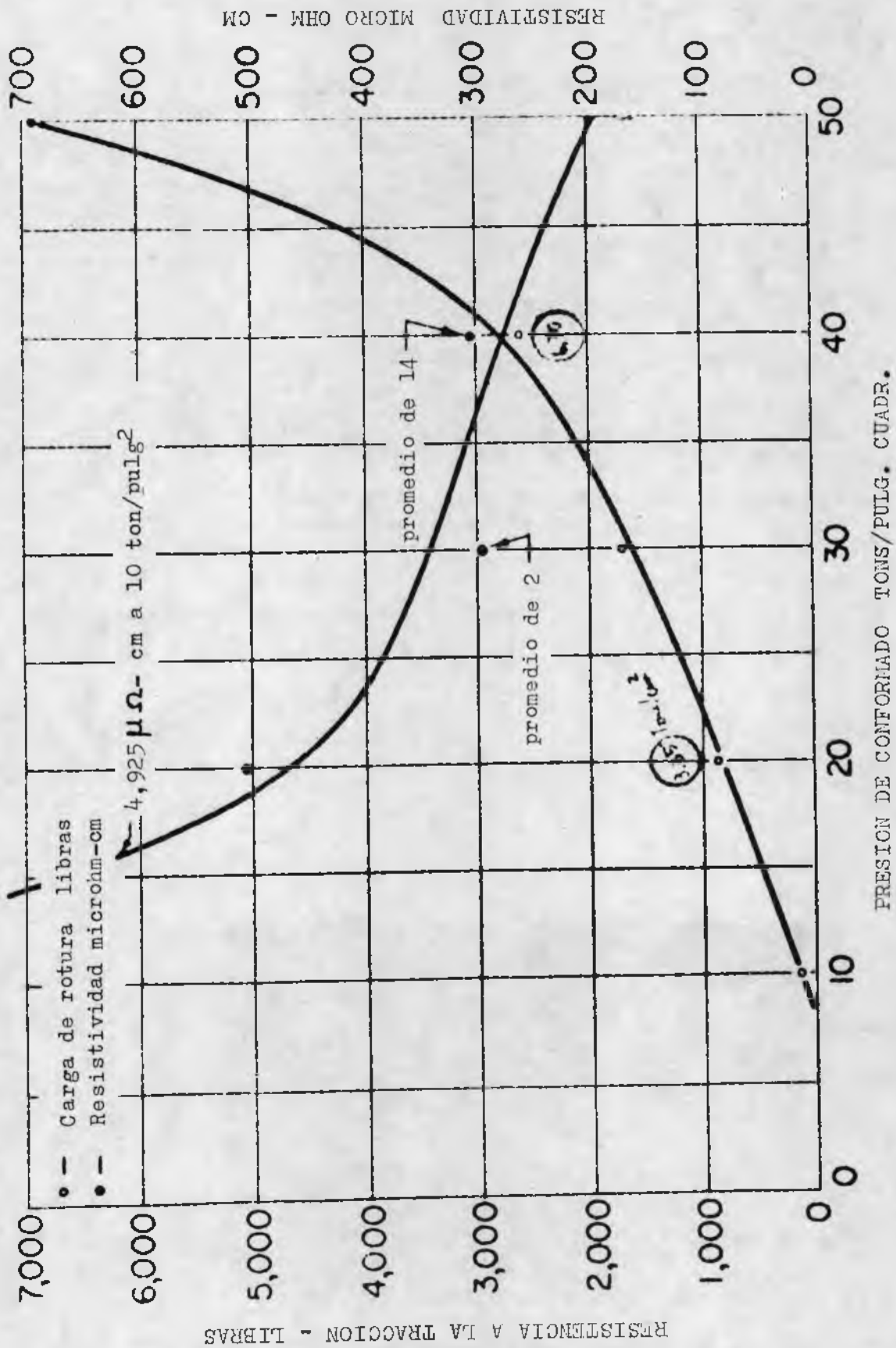


Figura 10.- Resistencia a la tracción y resistividad versus presión de conformado de compactos de esponja de 2 x 2 x 20 pulgadas

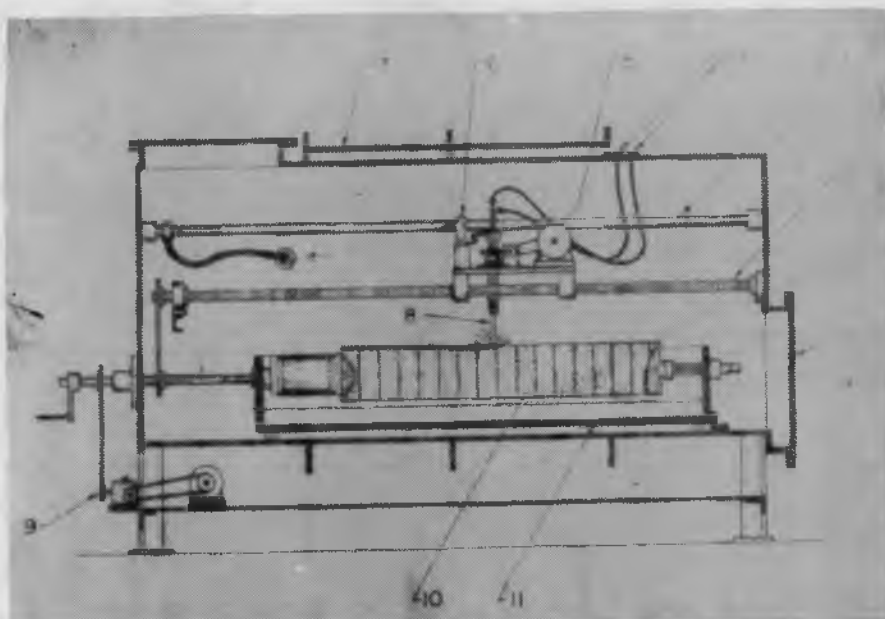
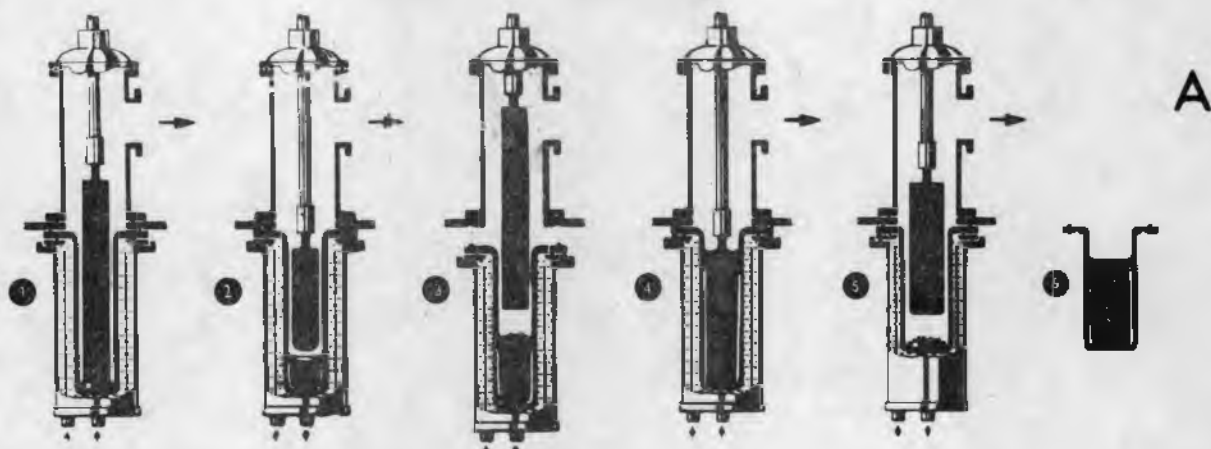


Figura 11.-Vista esquemática de una caja de sol
dadura automática en atmósfera iner-
te.



Figura 12.-Electrodos consumibles de titanio.

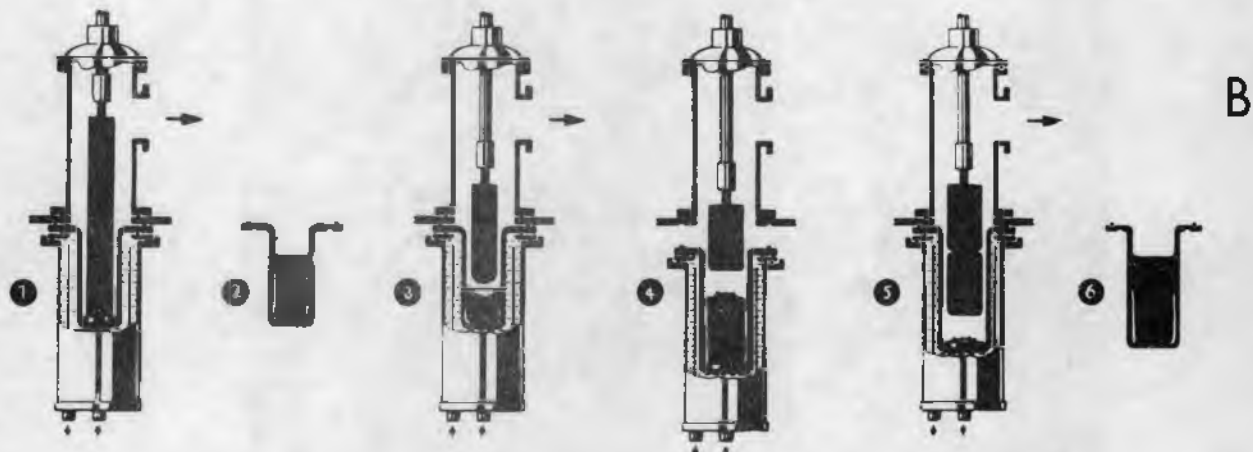
Figura 13



Método A : Primera fusión con dos electrodos de esponja compactada en el mismo crisol y segunda fusión.

- 1) Primer electrodo soldado a un resto de electrodo. En la figura no se consigna la placa-base con metal de rezago para la ignición del arco.
- 2) Fusión del primer electrodo.
- 3) Carga del segundo electrodo. Material de rezago sobre el lingote de primera fusión.
- 4) Segundo electrodo fundido sobre el lingote de primera fusión. Al final de la fusión: el resto del electrodo es introducido en el lingote líquido (soldadura). Subsecuentemente; extracción del lingote (= electrodo para la segunda fusión) de la cámara del horno.
- 5) Inserción de un crisol de un diámetro más grande, placa-base con metal de rezago para ignición. La segunda fusión puede ser comenzada.
- 6) Crisol con lingote de fusión.

Figura 14

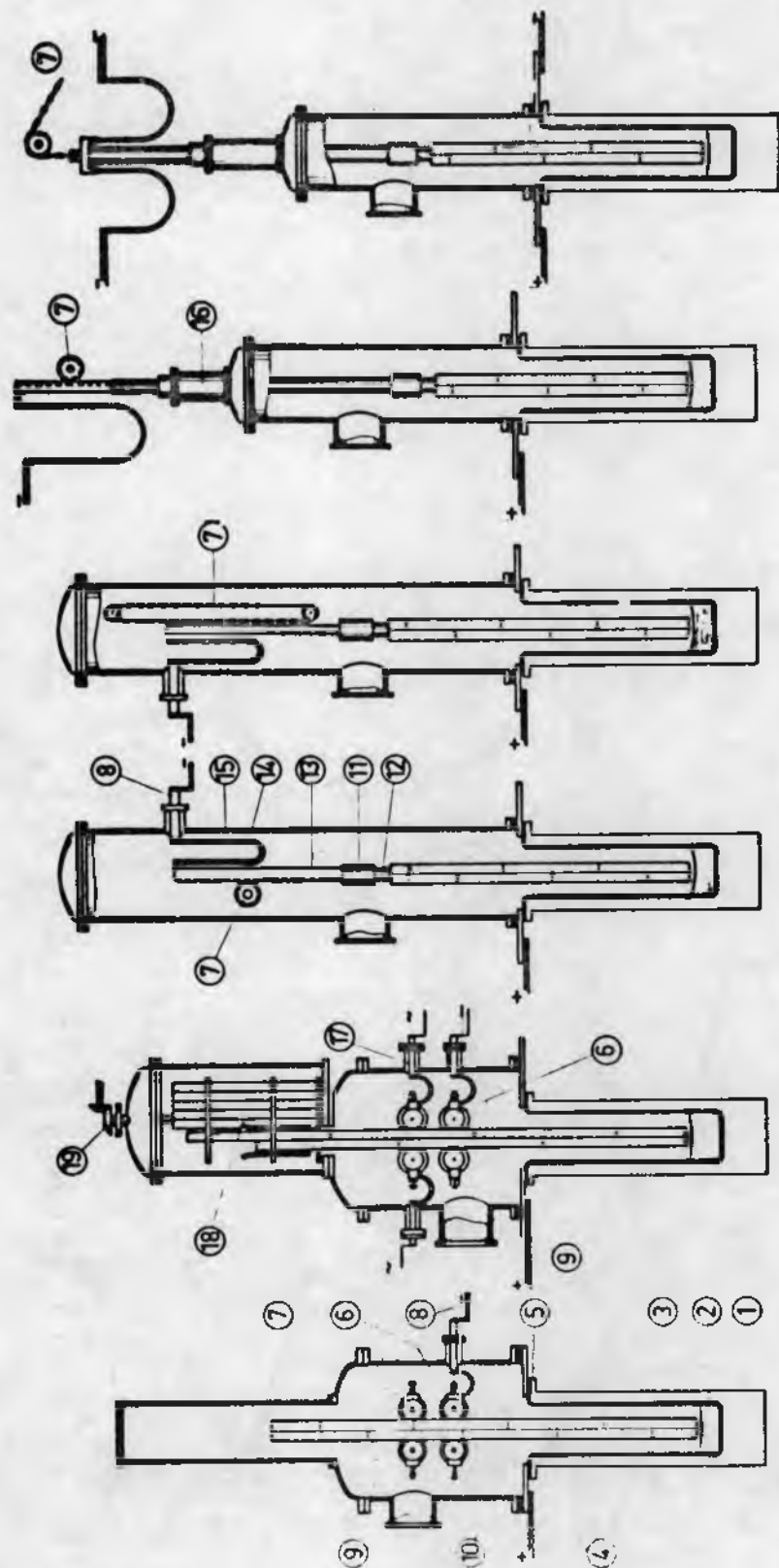


Método B : Primera fusión con dos electrodos de esponja compactada en dos crisoles y segunda fusión.

- 1) Inserción del primer electrodo. En la figura no se consigna la placa-base con metal de rezago para ignición del arco. Primera fusión.
- 2) Crisol con lingote de primera fusión.
- 3) El segundo electrodo es fundido en el segundo crisol. Al final de la fusión: introducción del resto de electrodo en el lingote líquido (soldadura). Subsecuentemente, extracción del lingote.
- 4) Se inserta un crisol de diámetro más grande y se carga el lingote de primera fusión (primer electrodo). Metal de rezago en posición.
- 5) Los dos lingotes (= electrodo para una segunda fusión) son soldados entre si.
- 6) Crisol con lingote de segunda fusión.



Figura 15.-Segregación de partículas de tungsteno
en un lingote de molibdeno-tungsteno.



- 1, cámara de refrigeración del crisol.
 2, crisol.
 3, electrodo consumible.
 4, conexión eléctrica (ánodo).
 5, anillo aislante.
 6, conexión eléctrica (cátodo) y conducción del electrodo consumible.
 7, conducción del electrodo consumible.
 8, conexión eléctrica (cátodo).
 9, conexión a equipo de vacío.
 10, cámara del horno.
 11, mordaza de sujeción.
 12, trozo de electrodo consumible.
 13, barra porta-electrodo.
 14, conexión eléctrica flexible (cátodo).
 15, rodillo de alimentación refrigerado por agua.
 16, guía del porta-electrodo y cierre de vacío.
 17, corriente para electrodo de soldadura.
 18, depósito de electrodos.
 19, mecanismo de alimentación de electrodos desde el depósito.

Figura 16.-Diagrama esquemático de diferentes mecanismos de alimentación de electrodos consumibles.

Figura 17.—Ejemplo de equipo de vacío de vacío para grandes hornos por arco.

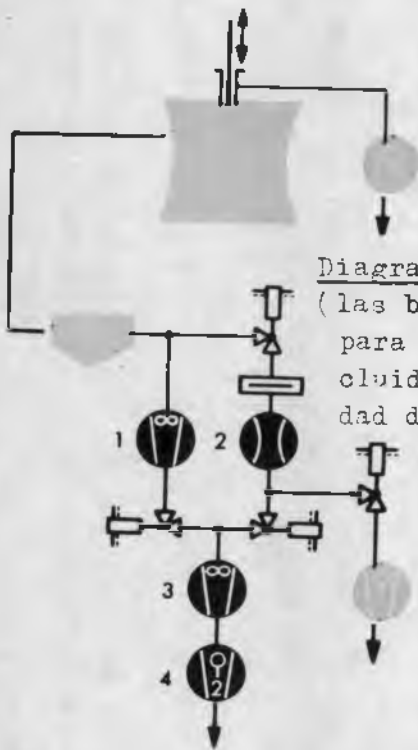
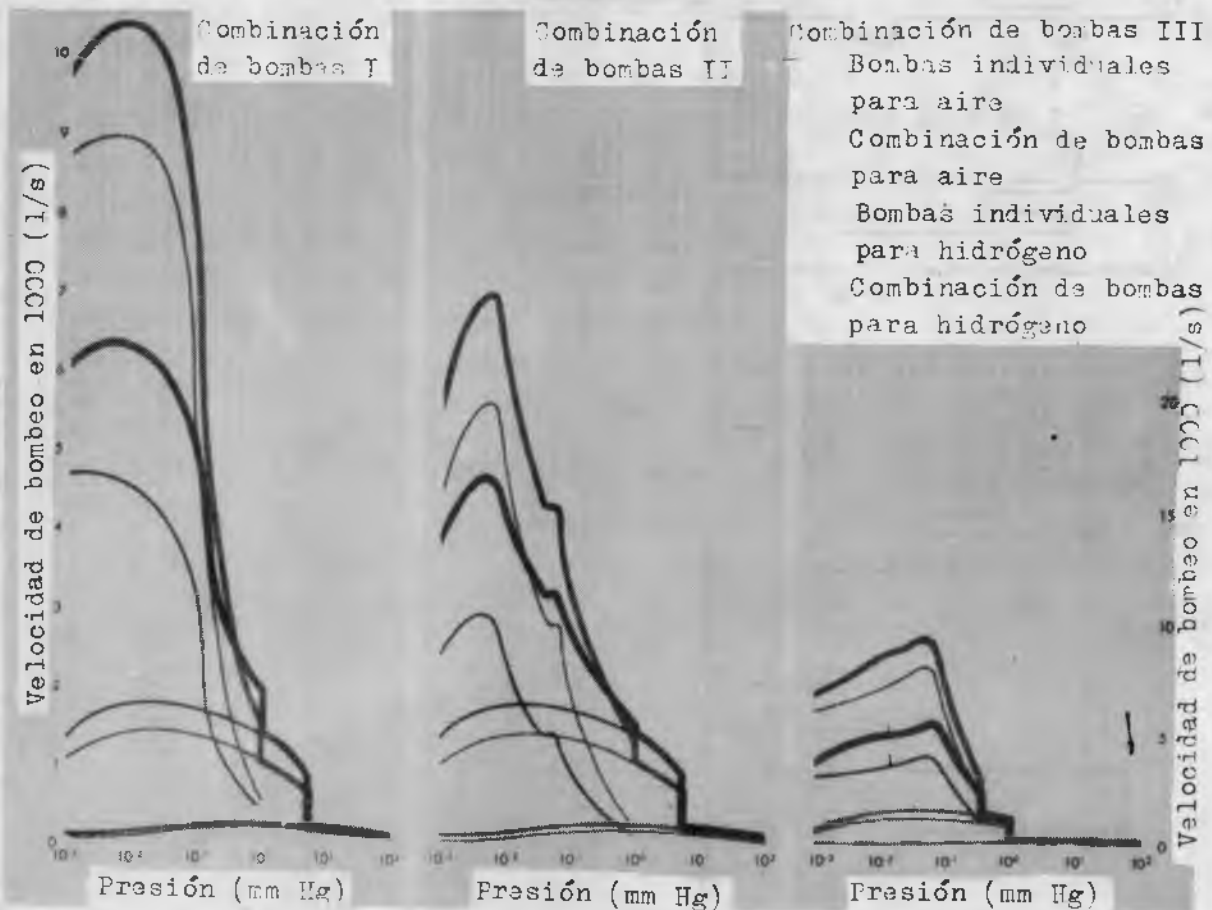


Diagrama de vacío

(las bombas de mantenimiento bombas para cierre dinámico, no están incluidas en el diagrama de velocidad de bombeo)

Diagramas de velocidad de bombeo



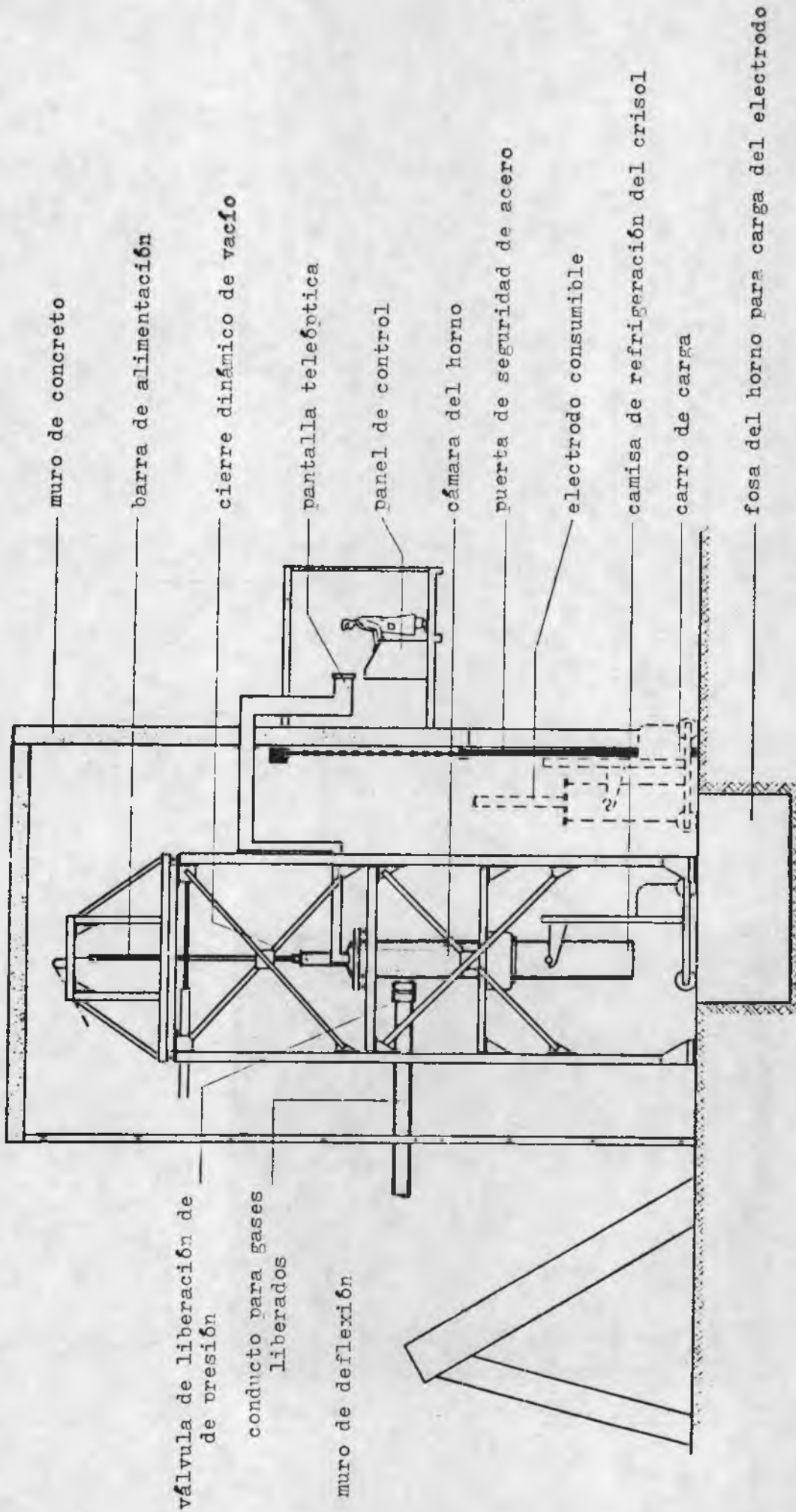


Figura 18.-Diagrama esquemático de la disposición de un horno por arco en vacío.

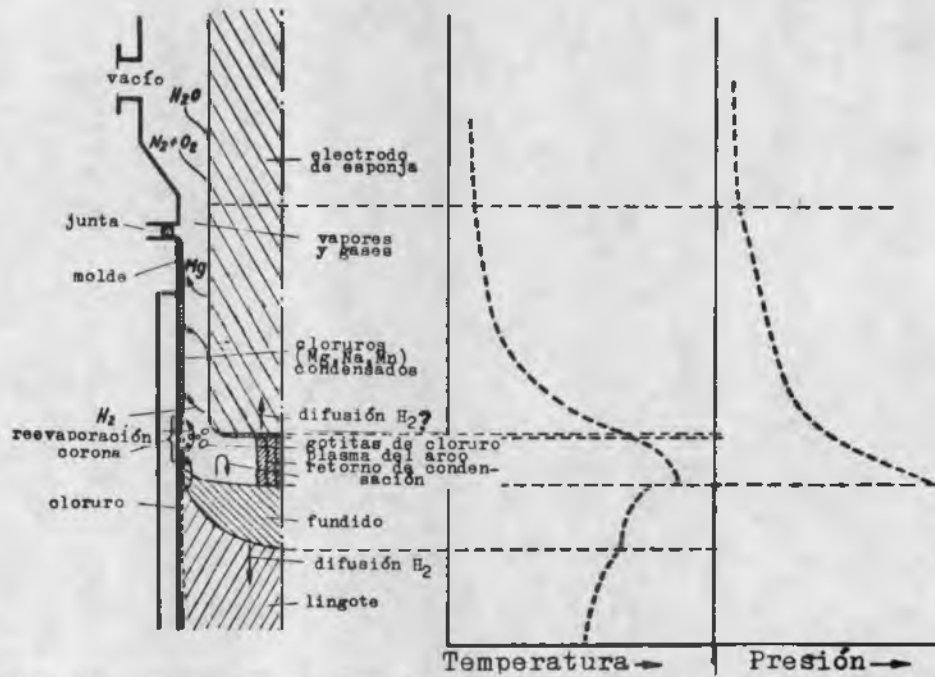


Fig. 19.-Diagrama esquemático de la zona del arco en una fusión en vacío con electrodo consumible. (Kroll (27) y Rossin (58)).

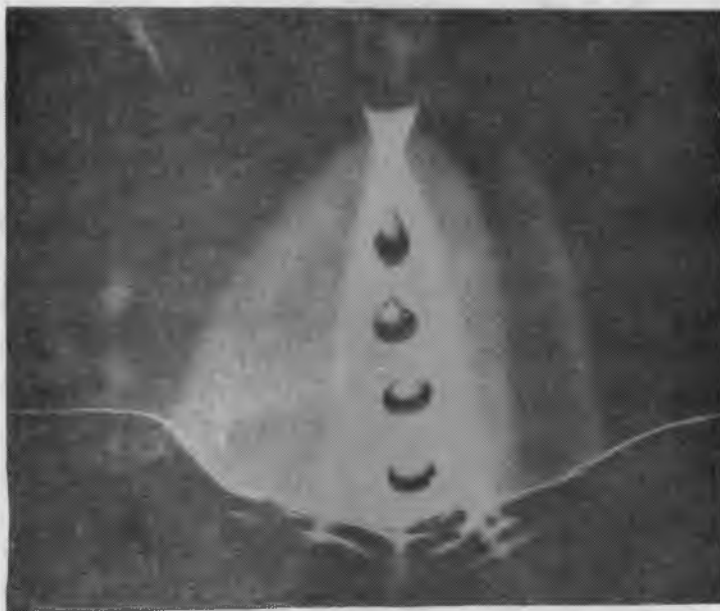
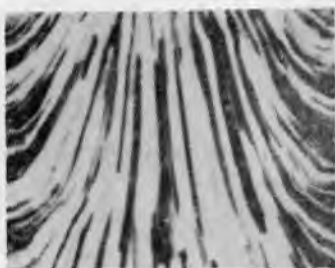


Figura 20.-Arco depositando metal.

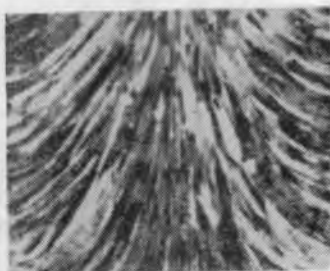


Figura 21.-Macroestructura de un lingote de molibdeno conteniendo 0,052% C. (Atacado con NO_3H al 50%. X2.

gruesa



fina



muy fina

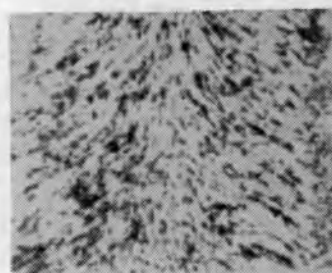


Figura 22.-El efecto de los elementos aleantes sobre la macroestructura bruta de colada de molibdeno desoxidado con carbón.

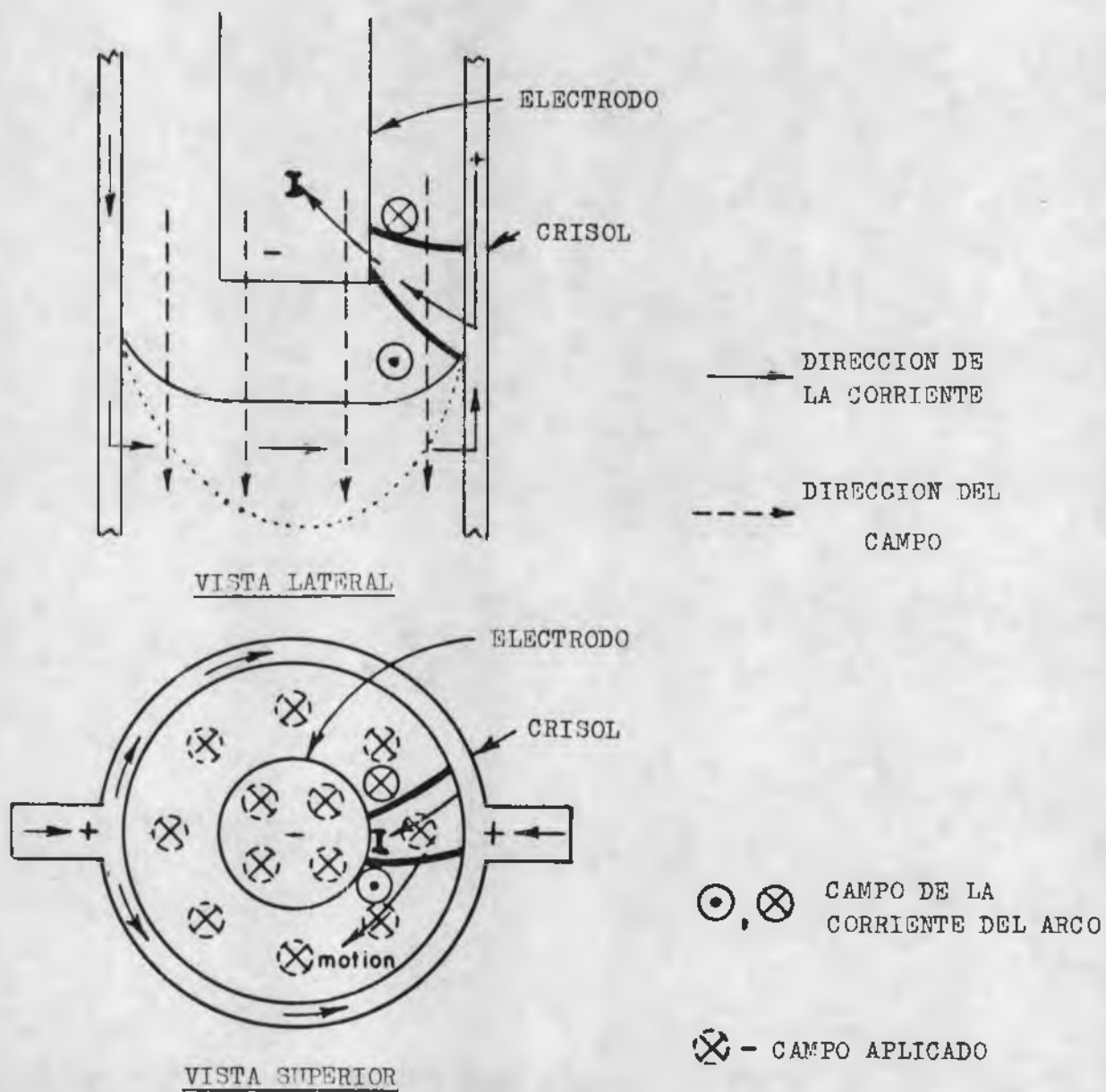


Figura 23.-Ilustración de la reacción entre el arco y el campo magnético aplicado

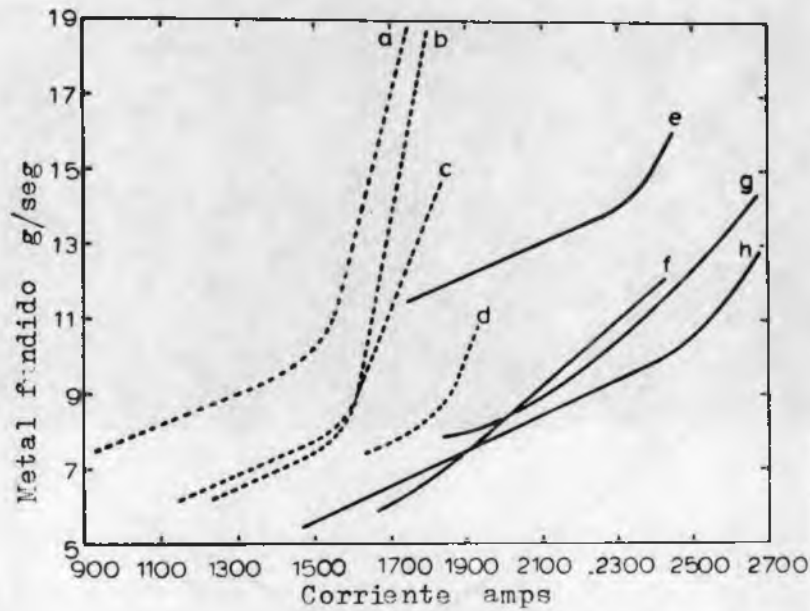


Figura 24.-Velocidades de fusión en vacío para electrodos de metales refractarios de 9,5 mm (3/8") de diámetro:

- a) Nb, c.c.negativo; b) Ta, c.c.negativo;
 c) Mo, c.c.negativo; d) W, c.c.negativo;
 e) Ta, c.a.; f) Nb, c.a.; g) W, c.a.;
 h) Mo, c.a.

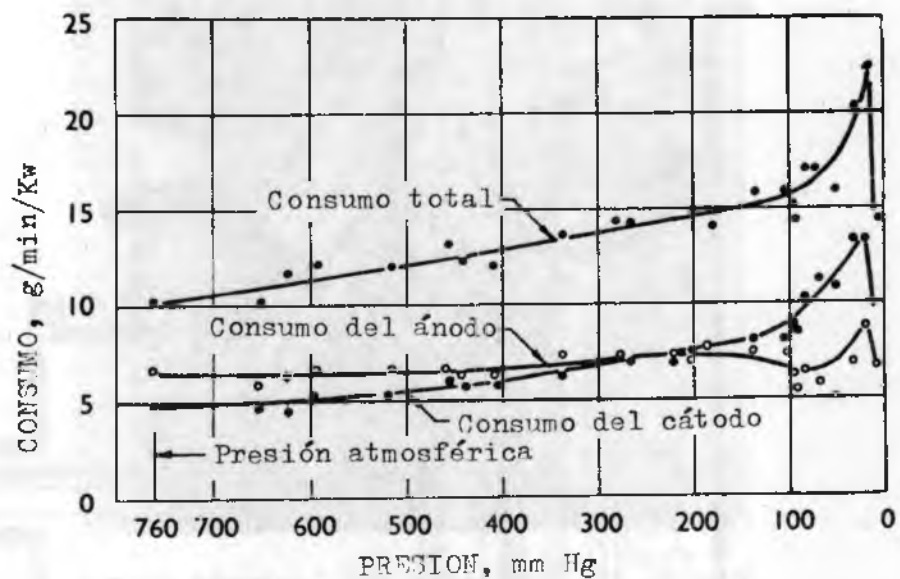


Figura 25.-Efecto de la presión sobre la velocidad de fusión.

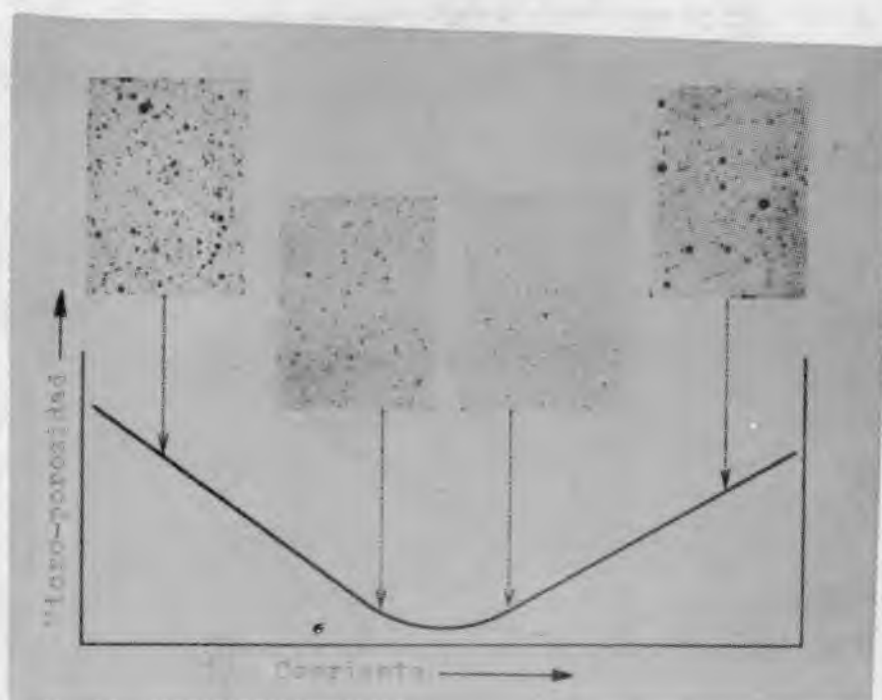


Figura 26.-Relación entre corriente de arco y micro-porosidad en lingotes de Mo no-desoxidados



Figura 27.-Rajaduras por laminado correspondientes a un cambio de estructura granular.

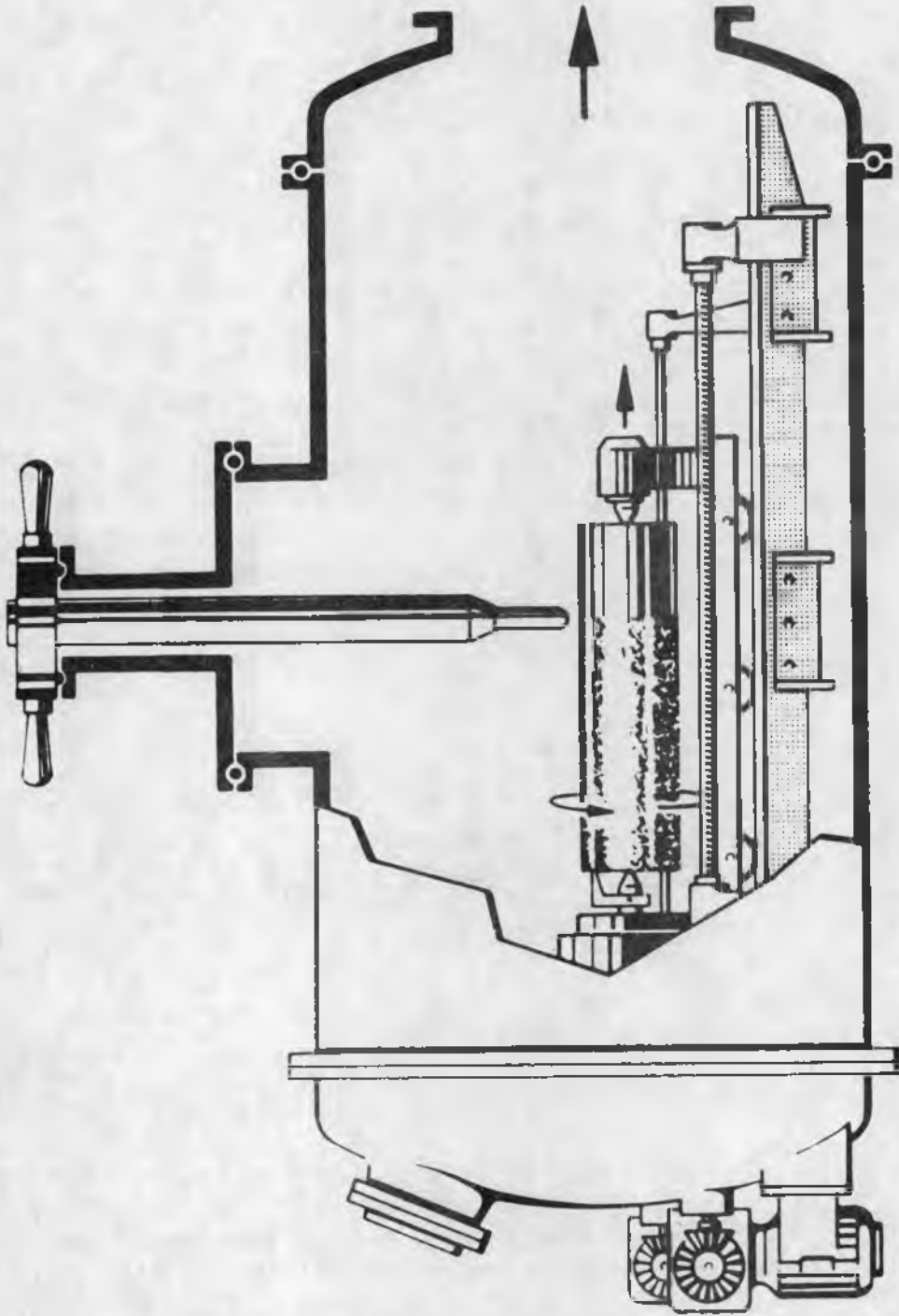


Figura 28.-Equipo para el acondicionamiento superficial del lingote por medio de un arco. (Electrodo no-cosumible).

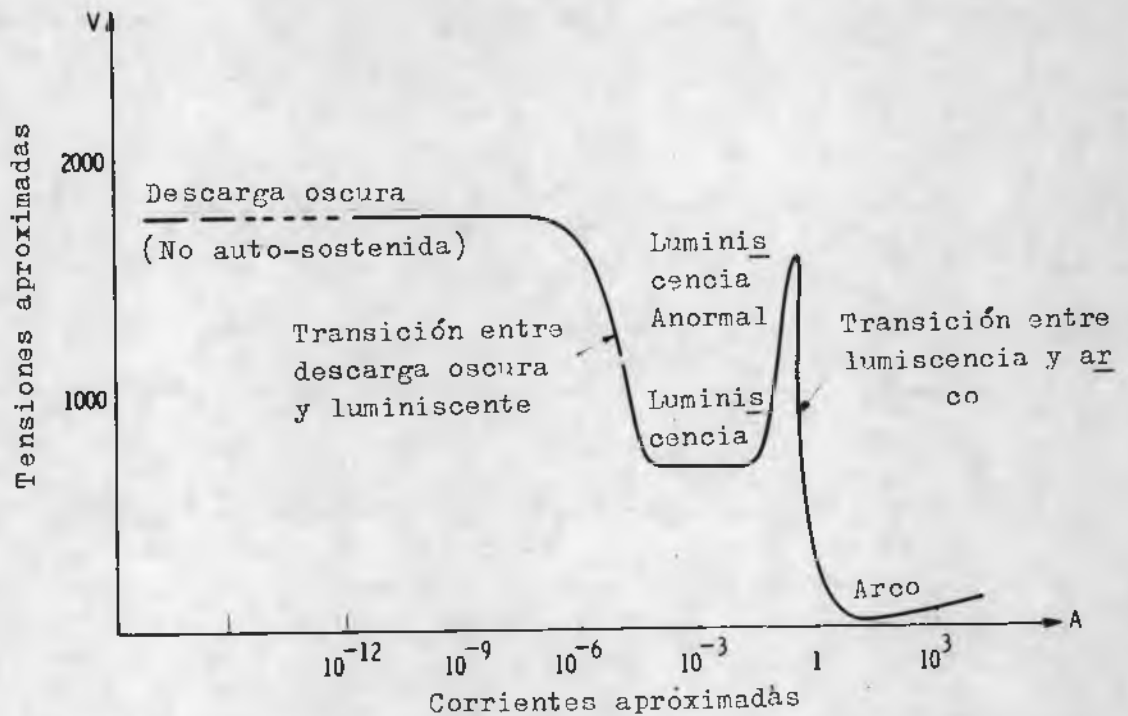


Figura 33.-Característica de tensión vs. corriente (aproximadas) de la descarga eléctrica sin puntas ni aristas.

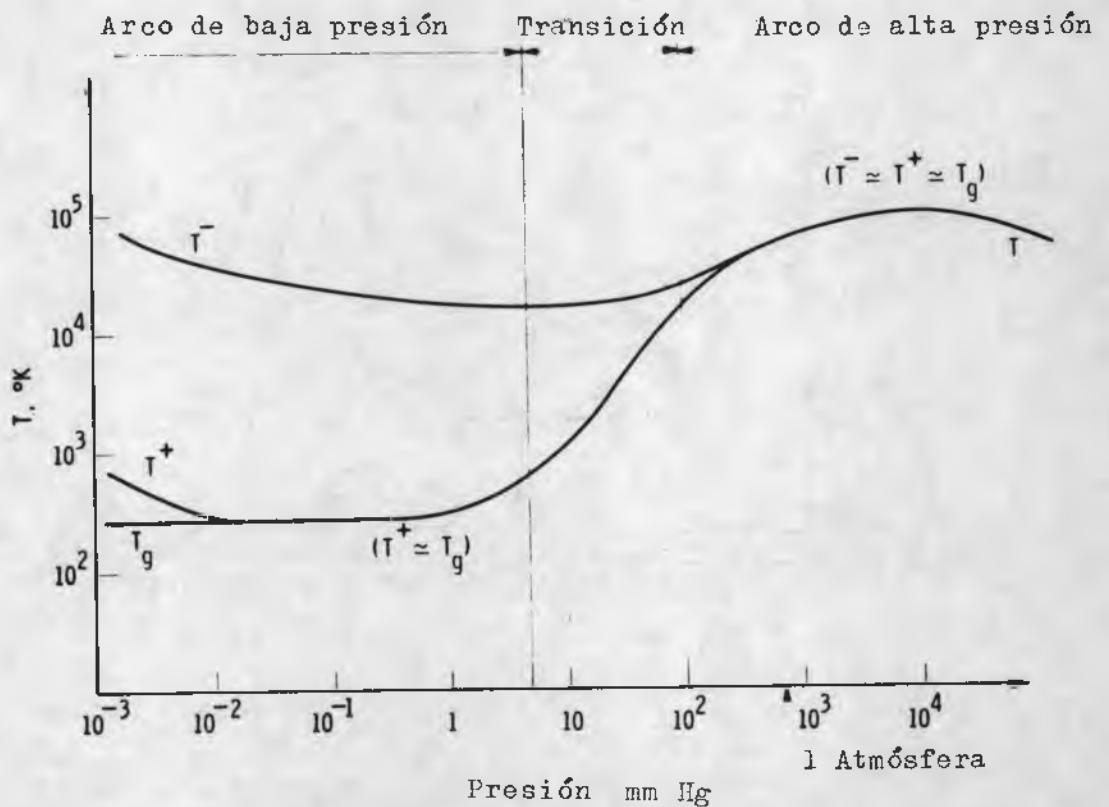


Figura 34.-Arco de baja presión vs. arco de alta presión y definición aproximada de equilibrio termodinámico local.

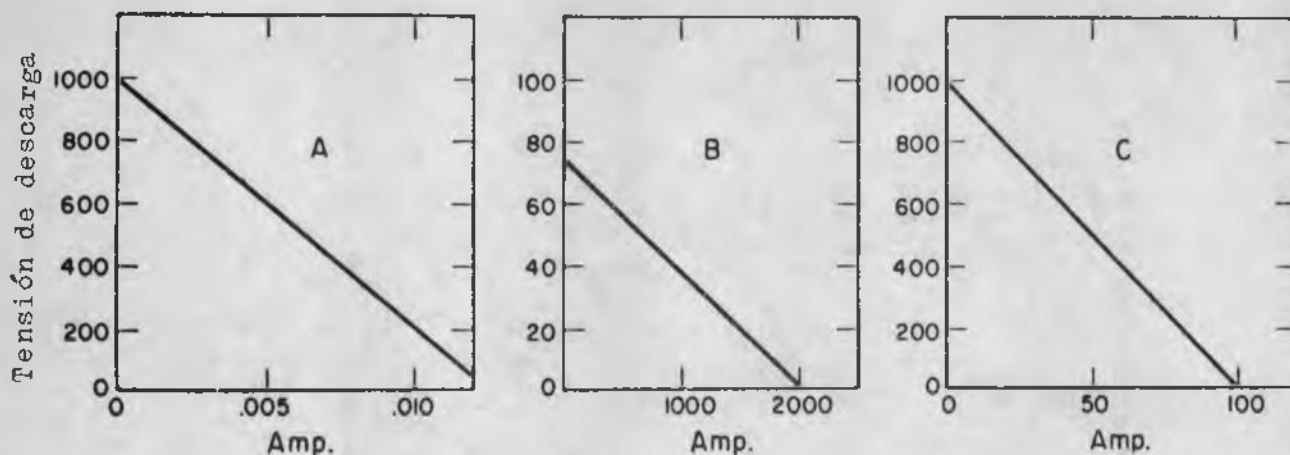


Figura 35.-Curvas características de tres alimentaciones de potencia que tienen diferentes combinaciones de tensión de fuente y resistencia serie.
 A.-Alimentación para descarga luminosa. B.-Alimentación para arco.
 C.-Alimentación de alta tensión y alta corriente.

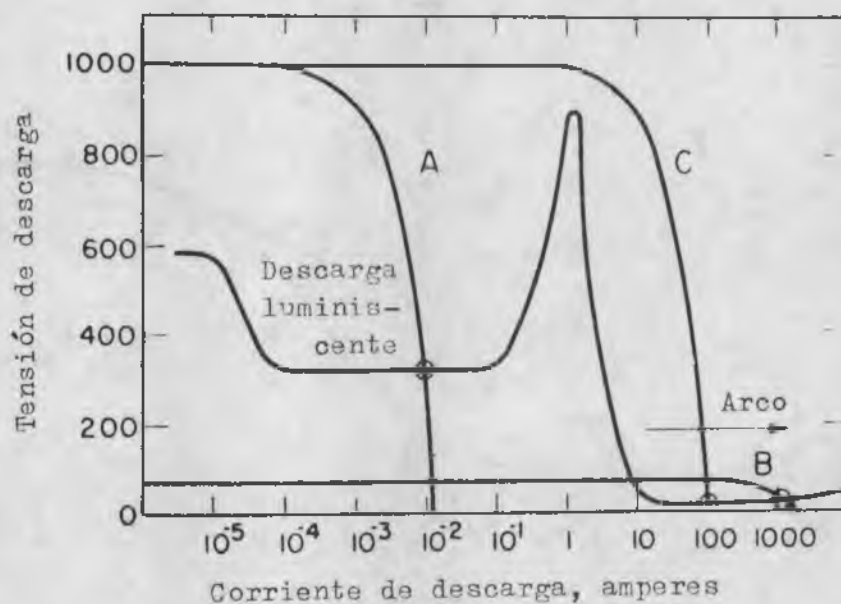


Figura 36.-Tipos y características de descargas obtenidas con diferentes alimentaciones de potencia. Las condiciones de descarga obtenidas están indicadas por las intersecciones de las curvas respectivas.

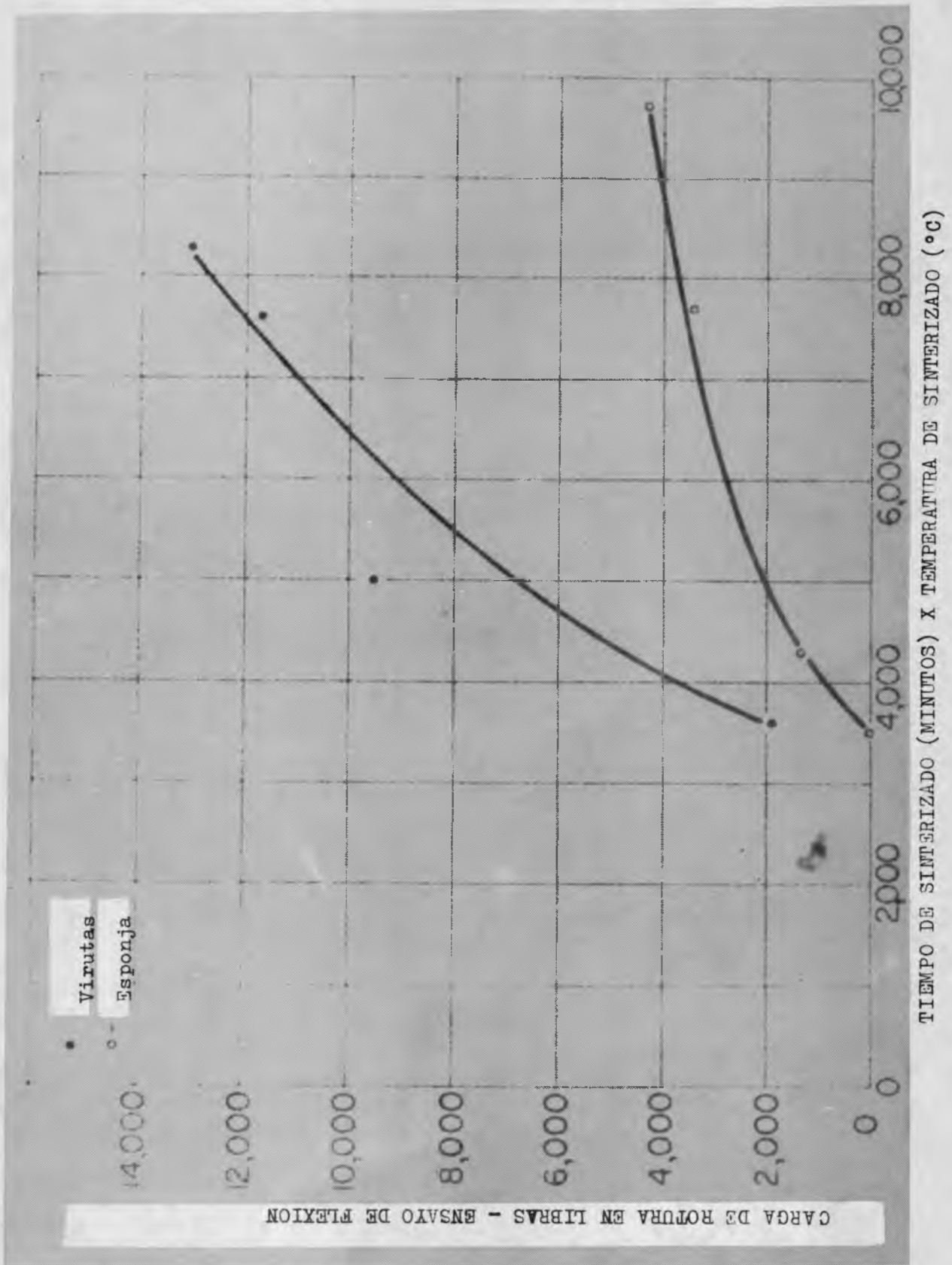


Figura 37.-Resistencia de electrodos vs. tiempo de sinterizado y temperatura. (compactos de 4" de diámetro; separación entre apoyos: 8").