

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

04.70.12

PMM/C-46

Comisión Nacional de Energía Atómica
dependiente de la Presidencia de la Nación

LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO DE METALES
REACTIVOS Y REFRACTARIOS

A. Leyt

PROGRAMA MULTINACIONAL DE METALURGIA
Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico

IV Jornadas Metalúrgicas
Sociedad Argentina de Metales
Córdoba, noviembre de 1970

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina

Comisión Nacional de Energía Atómica
dependiente de la Presidencia de la Nación

LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO DE METALES
REACTIVOS Y REFRACTARIOS

A. Leyt

PROGRAMA MULTINACIONAL DE METALURGIA
Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico

IV Jornadas Metalúrgicas
Sociedad Argentina de Metales
Córdoba, noviembre de 1970

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina

INDICE

	Pag.
1. INTRODUCCION	1
2. LA FUSION POR ARCO	3
2.1 El fenómeno de descarga de un arco	4
2.2 Estabilización del arco	6
3. LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO	7
3.1 Fusión en crisol refrigerado con electrodo no consumible o permanente	7
3.2 Fusión en crisol refrigerado con electrodo consumible	8
3.3 Algunos detalles concernientes a la construcción de hornos por arco con electrodo consumible	9
3.3.1 Diseño general	9
3.3.2 Crisol	9
3.3.3 Esponja	10
3.3.4 Electrodo	11
3.3.5 Métodos de aleado	13
3.3.6 Avance del electrodo	15
3.3.7 Regulación del arco	15
3.3.8 Vacío	16
3.3.9 Alimentación eléctrica	17
3.3.10 Consideraciones sobre seguridad	18
3.4 Fenómenos que ocurren durante la fusión	19
3.4.1 El proceso de fusión	19
3.4.2 Condiciones de vacío	20
3.4.3 Degasado y evaporación	21
3.4.4 Solidificación	23
3.5 Condiciones operativas	25
3.5.1 Tamaño de electrodo	25
3.5.2 Polaridad de electrodo y velocidades de fusión	26
3.5.3 Longitud de arco	27
3.5.4 Presión, volumen del baño y sobrecalentamiento	28
3.5.5 El flujo del metal al molde	29
3.5.6 Defectos de los lingotes	29
3.6 Fusión por arco con obtención de formas fundidas ("Skull melting")	32
BIBLIOGRAFIA	35

LOS PROCESOS DE FUSION POR ARCO DE METALES

REACTIVOS Y REFRACTARIOS

Arnoldo I eyt

1. INTRODUCCION

La fusión de materiales reactivos y refractarios (circonio, titanio, tantalio, niobio, tungsteno, etc.) presenta muchas dificultades debido a sus altos puntos de fusión y actividad química. Estos 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.

Del estudio de utilización como material de crisol de la sílice, alumina, 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 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 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.

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 una contaminación sólo leve con carbono. 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 refrigerados 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, por resistencia en crisoles

refractarios o de grafito y por arco- tienen sus ventajas y desventajas. La elección de cuál es el mejor, depende parcialmente del volumen de gas 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 el material obtenido puede ser enteramente apropiado para determinados usos. En este caso, los tres tipos de hornos mencionados pueden ser servir.

Sin embargo, el último proceso citado (y que ha tenido un desarrollo extremadamente rápido después de la última guerra) parece ser el más conveniente, ya que al importante factor "cantidad de material producido", se suman las siguientes ventajas:

- 1) posibilidad de reducir a un nivel muy bajo por sucesivas refusiones el contenido de impurezas gaseosas y volátiles, y la contaminación por el material del crisol y los materiales del electrodo (cuando el electrodo es consumible;
- 2) posibilidad (como ya se ha consignado) de realizar la fusión en alto vacío o en una atmósfera gaseosa inerte;
- 3) como resultado de una solidificación controlada y continua del lingote en el crisol refrigerado por agua, se consigue: a) un lingote absolutamente sano, b) que no haya rechupes, c) controlar la segregación, d) un lingote de estructura uniforme;
- 4) de la buena estructura de fundición, el bajo contenido gaseoso y el alto grado de purificación obtenidos, se consigue: a) incrementar las propiedades de conformado, b) incrementar las propiedades mecánicas en la dirección longitudinal y transversal tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas;
- 5) la versatilidad del proceso, lo que lo hace aplicable a la fusión de metales y aleaciones sobre un amplio rango de propiedades físicas. En principio, el proceso puede aplicarse a cualquier material que conduzca corriente eléctrica y tenga un alto punto de fusión, incluyendo al tungsteno;
- 6) es simple y rápido.

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.

2. LA FUSION POR ARCO

El interés en el uso del arco voltaico como una fuente de calor tiene origen en los primeros experimentos de Sir Humprhy Davy (9) en 1808 con un arco descargado entre dos electrodos de carbón. 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 energía eran células voltaicas. En 1878, Siemens (10) diseña un horno capaz de fundir 4 kg. de platino y éste fué probablemente, el primer horno por arco especialmente pensado para fundir metales. Slavinoff (11) utilizando un arco que provocaba la fusión del electrodo obtuvo, en 1890, lingotes de acero.

La fusión por arco bajo atmósfera controlada y utilizando un crisol refrigerado, data de 1908 cuando von Bolton (12) informa que ha fundido tantalio en un horno diseñado por Simpson. En 1910, Weiss (13) comunica la fusión de tungsteno, circonio y titanio.

La M. W. Kellog Company comenzó a investigar en 1935 la fusión por arco de aceros especiales en crisoles refrigerados y durante la guerra fundió un considerable tonelaje. Esta fué probablemente la primera producción de lingotes cilíndricos de un tamaño sustancial por este proceso. Desafortunadamente este trabajo fue publicado recién en 1948 (14) y el gran interés en la fusión por arco de materiales reactivos no arranca de éste sino de la descripción que en 1940 hizo Kroll (15) de la fusión por arco de las primeras muestras de titanio dúctil. El horno utilizado poseía 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 presión reducida de argón o hidrógeno.

La primera descripción de hornos por arco con crisol refrigerado capaz de fundir lingotes cilíndricos grandes de molibdeno bajo vacío, fue realizada por Parke y Ham en 1947 (16). En los años de postguerra se llevó a cabo un gran incremento en el uso de este tipo de proceso para la obtención de metales altamente reactivos. Se pueden mencionar los trabajos del Battelle Memorial Institute en 1948 (17) sobre titanio y los del U. S. Bureau of Mines en 1952 (18) sobre circonio. En 1962 se fundía por el proceso de fusión por arco en vacío entre 100 y 200.000 ton. de aceros de media y alta aleación y aleaciones de base níquel y cobalto. La Nidvale-Heppenstall de los Estados Unidos posee un horno capaz de fundir un lingote de acero de 52 ton y 152 cm de diámetro y en el mercado se encuentran actualmente hornos capaces de entregar lingotes de acero de 200 ton.

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

2.1. El fenómeno de descarga de un arco

Podemos considerar a este fenómeno desde dos puntos de vista: uno básico y otro aplicado.

La fundamentación teórica del fenómeno está ampliamente desarrollada por M. F. Hoyaux (19).

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 del electrodo e intensidad de corriente. Para llegar rápidamente a una base para operar un equipo de fusión por arco en vacío, el camino más rápido es la aproximación empírica, y en este sentido debemos consignar el trabajo de Johnson y sus colaboradores (20, 21). Los resultados de estos estudios pueden ser resumidos como siguen:

Si alimentamos con corriente continua a un electrodo metálico (cátodo) y a 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 (22). 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. 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- más estable es el arco. También la distribución de energía entre el cátodo y el 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 (23).

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 inestabilidad posicional y la mancha anódica también desapa-

ce. 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 material catódico. Por otro lado, en los equipos de fusión por arco que operan con crisoles refrigerados por agua puede suceder fácilmente que el calentamiento esté 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 la 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 (24), considera que en este rango de presión, las condiciones son similares a aquellas que prevalecen en una descarga luminiscente entre un alambre de tungsteno y un cátodo caliente, como ha sido estudiado por Altherum y sus colaboradores (25).

Debajo de esta presión crítica cambian completamente, tanto la manera como esta 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 (26). 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 la 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 (27). Como se puede ver, las condiciones para el degasado son 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 elevados llegan a ser perceptibles sólo cuando la longitud del arco es reducida a unos pocos milímetros.

2.2. Estabilización del arco en vacío

Si bien en un 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 de 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.
- 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 pequeña entre la base del electrodo y el baño líquido.
- 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 concentrado de electrodos grandes 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 del 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.

Si se trata de arcos de corriente alterna, éstos se estabilizan cuando se les sobreimpone una corriente de alta tensión obtenida de un transformador (28). La objeción a este tipo de estabilizador es su comportamiento errático cuando no se lo ajusta apropiadamente. Un resultado más satisfactorio se obtiene con un estabilizador de alta tensión por radio frecuencia.

3. 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. 1 y 2), como un electrodo consumible (constituyen probablemente el 95 % en la producción industrial) (Fig. 3). 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. 4).

3.1. 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 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 en forma continua (29) al baño metálico (Fig. 1 y 2).

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) permite 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 similar al empleado en soldadura.
- c) Las velocidades de fusión son muy bajas (30) 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.

3.2. 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 ésto, se pueden obtener los valo-

res de dureza más bajos. 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.

3.3. Algunos detalles concernientes a la construcción de hornos por arco con electrodo consumible

3.3.1. Diseño general

Los detalles básicos de una unidad para la fusión por arco que emplea un electrodo consumible se pueden ver en la Fig. 3. 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.

3.3.2. 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 12,7 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 tapa inferior.

Es de gran importancia una cuidadosa manipulación del crisol durante la remoción del lingote.

3.3.3. España

Como secuela del método Kroll de obtención de esponja de circonio (31) y de titanio (32), 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 en la esponja aumenta.

Para resolver este problema de salpicado hay que asegurar que el cloruro de magnesio esté reducido a un nivel bajo, y para obtener ésto, el mejor método es 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 son necesarios períodos de tratamiento largos y el costo del mismo es alto (33). El cloruro de calcio tiene una presión de vapor mucho más baja que la del cloruro de magnesio y es eliminada de la esponja en el proceso anterior (8).

La dureza de la esponja varía con el tratamiento previo para eliminar el cloruro de magnesio (27). 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 (33). Para evitar la 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.

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 (34). 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 metal caliente.

Aunque 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.

3.3.4. 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/diámetro lingote más chica (35)

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.

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.

El alineamiento del electrodo a través de todo el proceso es esencial y en la práctica ésto 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 Figs. 5 y 6), 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 aparejado 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.

También pueden conformarse electrodos a partir de virutas. Pero éstas requieren una presión más elevada que la utilizada con la esponja para formar una briqueta de resistencia semejante.

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

Como el lingote es más corto que el inicial es bueno mantener la relación longitud/diámetro alrededor de 4, de manera de formar el segundo electrodo a partir de 2 o más lingotes. Las Figs. 7 y 8, 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), y la Fig. 9, los corres-

pondientes a la fusión de acero.

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 1000A de corriente de arco.

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

En conclusión, debe establecerse que no hay un solo 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/ancho 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.

3.3.5. 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 (36, 37). En el proceso de fusión por arco con electrodo consumible, dos son los métodos básicos para la adición de los aleantes: vía 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 (37).

Los electrodos revestidos (por ejemplo, electrodos de molibdeno con un electrodepósito 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. 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 esto, 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 de esta mezcla en compactos. Estos compactos, que pueden ser sinterizados según la cohesión de los polvos empleados, son entonces molidos y clasificados.

La adición de aleantes ferromagnéticos es complicada (36), pues el polvo se adhiere al electrodo que al conducir la corriente crea un campo magnético alrededor de él. Este efecto puede provocar una pronunciada segregación en el lingote.

3.3.6. Avance del electrodo

El avance de los electrodos en los tipos de hornos que nos ocupa, puede efectuarse de muchas maneras. Cada una de ellas involucra ventajas y desventajas (Fig. 10).

Entre estos procedimientos, el que utiliza el sistema de una barra porta-electrodo suspendido de una cadena penetrando en la cámara del horno parece 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.

3.3.7. 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 bordes 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 (38, 39).

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.

3.3.8. 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. 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 (39).

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 bombeo 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 el 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.

3.3.9. 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 de un lingote, es de mucha importancia obtener un baño líquido profundo. Esto requiere una ele-

vada 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. Corrientemente, 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 (40).

3.3.10. 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; ésto involucra la existencia de un peligro latente de perforación del crisol con la consiguiente penetración de agua con formación de hidrógeno (41).

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 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. 11 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.

3.4. Fenómenos que ocurren durante la fusión

3.4.1. 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. 12, que está basada en un informe de Kroll (24), 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 (42). 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 solapan.

El electrodo recibe calor del arco, principalmente: a) por el impacto de iones positivos; b) por radiación y conducción desde el gas a alta temperatura y el vapor metálico presentes en la zona del arco; c) por radiación desde la superficie

Como se ve en la Fig. 12, 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 por ejemplo 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 el lingote pueda ser sometido a cualquier posterior operación de trabajado. 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.

Bastante sorprendentemente, la fusión por arco en vacío, lleva el contenido en gases de muchos materiales cerca de los valores de equilibrio. La relación de hidrógeno en titanio y sus aleaciones durante la fusión a 20 ppm es ~ 10 micrones; a 50 ppm, es ~ 500 micrones. La relación de hidrógeno en titanio fundido puede ser trazada como muestra la Fig. 14. Se encuentra que esta relación se mantiene aproximadamente válida en la producción comercial.

El degasado de aceros es mucho más complejo aunque la remoción de hidrógeno es simple y directa. En aceros al carbono de baja aleación que no contengan aluminio o titanio, el carbono reacciona con el oxígeno y con los óxidos para producir monóxido que es bombeado. Las presiones de vapor de nitrógeno son apreciables y es posible alguna remoción del mismo. En la Fig. 14 se muestra la experiencia realizada con varios aceros de baja aleación. No hay equilibrio entre el monóxido de carbono y el acero, ni aproximadamente; pero se obtiene resultados "reproducibles" de contenido de oxígeno como función de la presión gaseosa durante la fusión; y aquéllos son afectados por el contenido de carbono y la presión de los elementos aleantes en la misma manera que sería afectado el equilibrio.

A partir del momento que están presentes el aluminio y el titanio, el panorama se complica por el hecho que estos elementos reducen la presión de vapor del monóxido de carbono en el acero líquido. El óxido de aluminio es reducido por el carbono pero son necesarias presiones más bajas para llegar al mismo contenido gaseoso. El cromo en aceros, baja la actividad del carbono y del oxígeno y otra vez reduce la presión necesaria para obtener la reducción de oxígeno. Los aceros que endurecen por precipitación, con alto contenido de cromo, son tam-

bién generalmente de bajo tenor en carbono, de manera que la remoción de gas por una fusión en vacío, no significa una mejora si se la practica en materiales tales como el A-286. Por otro lado los aceros tales como los 52100, 4340 o 4620, pueden ser degasados porque el rango de presión requerido está dentro de los límites de la operación práctica de los equipos de fusión por arco en vacío. En el caso de aceros austeníticos inoxidable, la refusión por arco en vacío conduce a una marcada reducción en el contenido gaseoso (oxígeno e hidrógeno) y el contenido de inclusiones no-metálicas. El tenor de nitrógeno se reduce en menor proporción y no en todos los casos, debido aparentemente al hecho de que el nitrógeno en algunos fundidos conteniendo titanio o niobio, está en forma de nitruros estables.

La remoción de cloruros del circonio y del titanio presenta un gran problema. Este, ya ha sido tratado en el capítulo referente a esponja.

Un problema que no ha sido resuelto es el del azufre en aceros. El azufre no es eliminado totalmente durante la fusión en vacío. Para aceros con bajo contenido en manganeso, $\sim 0,002\%$ S se elimina en la fusión en vacío. No obstante, la distribución de azufre en un fundido al aire y posteriormente refundido en vacío, muestra un sustancial cambio cuando se la compara con el original fundido al aire. La Fig. 15, muestra una comparación entre las impresiones de azufre tomadas de lingotes de aceros de baja aleación hechos electrodos y refundidos al aire y en vacío, mientras que en la Fig. 16 se ven las micrográficas de dos lingotes confirmando el decremento y dispersión de las inclusiones de sulfuros.

3.4.4. 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, repartición 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 (47) (Fig. 17). 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 la superficie de crecimiento son siempre más grandes que aquellos paralelos a la superficie de crecimiento; entonces, de acuerdo con Northcott (48), existe en el fundido 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 puede ser variada considerablemente por cambios en la entrega de calor, principalmente en la velocidad de fusión.

Los lingotes de acero de baja aleación producidos por refusión por arco en vacío presentan pocos granos equiaxiales grandes y por lo tanto requieren una reducción fuerte menor en caliente para romper la estructura bruta de fundición. Por ejemplo: redondos de 250 mm obtenidos a partir de lingotes de 400 mm del 4340 exhiben los mismos tamaños de grano, con un incremento de la resistencia en dirección transversal, como los redondos de 250 mm obtenidos a partir de lingotes de 600 mm fundidos al aire. Esto es sabido que se cumple para los tipos de aceros 52100, 4620 y 4340. La estructura granular y los tamaños de grano de los aceros rápidos, aleados de base níquel e inoxidable presentan un cuadro distinto y no están bastante bien estudiados como para poder generalizar.

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 pueden también cambiar el tipo y tamaño de los granos al actuar sobre el grado de subenfriamiento constitucional (49) (Fig. 18).

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 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 homogenización 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 per-

turbado, dando como resultado una pobre calidad superficial de lingote. Algunos estudios (50) 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 (37, 51-55). En producción es usualmente adecuada la práctica de la doble fusión (caso del titanio y del circonio, por ejemplo).

La rutina usual para la refusión es utilizar el proceso de fusión por arco tanto 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. 7, 8 y 9). 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 cuál 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.

3.5. Condiciones Operativas

3.5.1. 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 está reducido y esto 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 poder 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 usualmente un arco más estable que un electrodo grande porque se produce una fuente de calor relativamente centralizada. 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.

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.

3.5.2. 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 (36, 22). En contraste, un arco de corriente continua con electrodo positivo no es tan estable (36, 22), 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 del 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 que 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 de salpicado denso; 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 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 para que la energía introducida en la hoyo 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.

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 standards puede encontrarse diferencias significativas entre diferentes electrodos de un mismo metal (Fig. 19).

3.5.3. Longitud de arco

Para mantener condiciones satisfactorias de fusión es necesario controlar la longitud del arco dentro de límites bastante estrechos; esto puede ser hecho manualmente o por medio de algún dispositivo automático.

El uso de 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 estos 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 pérdi-

da 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 esto 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.

3.5.4. 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 (por arriba 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 del 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 arriba 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. 20 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.

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 marcadamente de la presión.

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 100°C arriba del punto de fusión.

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

3.5.5. El flujo del metal al molde

Cuando se producen lingotes por el proceso de fusión por arco con electrodo consumible es necesario asegurar que un flujo uniforme de metal fundido sea 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.

3.5.6. 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) Segregación y aleación

Estos problemas ya los hemos señalado al referirnos a los métodos de aleado. Podemos agregar aquí lo siguiente:

Los materiales que contienen elementos de alta densidad, tales como el molibdeno y el tungsteno, en superaleaciones y aceros rápidos, segregan formando densos centros. Esta segregación que en la fusión por arco al aire se localizan en el tercio superior del lingote, si bien no es enteramente eliminada, por lo menos es minimizada al refundir en vacío. En la aleación A-286, estos centros son compuestos de M_2Ti , los que constituyen una fase de bajo punto de fusión, Fig. 21.

No se conoce si la segregación de carburos ocurre en la fusión en molde frío de aceros rápidos o de aceros de alto carbono y altamente aleados. Aceros de alto carbono y baja aleación, tal como el 52100, no presentan segregación de carburos.

Cuando se trata de la refusión por arco en vacío de aceros, no ocurre una gran reducción en el tenor de carbono. Se han encontrado algunas dificultades en unos pocos aceros donde el rango de carbono es sólo de 3 a 4 puntos, pero tales tolerancias son bastante raras. Con respecto al manganeso, podemos decir que hay pérdida. Aceros conteniendo mucho más del 1,5 % Mn, requieren especial atención; aceros con 2 % Mn ó menos pierden aproximadamente del 15 al 25 % de su manganeso total y es necesario tomarlo en consideración al seleccionar al acero a refundir. La pérdida de elementos tales como níquel, cromo, cobalto, niobio, tantalio, titanio, aluminio, molibdeno, silicio y tungsteno, ni es muy grande ni son muy segregados (el tungsteno no es totalmente conocido) tanto en el caso de aceros como en el del titanio y circonio. El carburo de tungsteno no se aleará, y se cree que adiciones inapropiadas de ferrotungsteno hechas al lingote originalmente fundido al aire pueden ser transferidas al lingote refundido en vacío.

b) Inclusiones

Las inclusiones en los aceros, tales como nitruro de titanio, óxidos de aluminio y silicatos y distintos óxidos globulares, flotan en el baño fundido a medida que la fusión progresa (Figs. 13 y 22). Algunas inclusiones pueden formar escoria sobre la parte superior del lingote. Con aceros altos en cromo, tales inclusiones son particularmente evidentes en la cabeza del lingote como una escoria verde de óxido de cromo.

En el presente, los aceros refundidos por arco en vacío, no son tan limpios como el mejor acero seleccionado de una fusión por inducción, pero la ventaja de la fusión por arco en vacío es que su limpieza es consistente, fusión tras fusión - un factor de miles de veces mejor, si se la compara con las fusiones por arco al aire.

c) 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 post-solidificación. Estas rajaduras pueden seguir los límites de los granos columnares, o pueden atravesar los granos; 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 funda-

mento que el oxígeno (en forma de óxido) en el caso de materiales refractarios, causa un decremento 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 baja posible.

d) Porosidad

Los lingotes fundidos de materiales refractarios, sin una adición de desoxidantes, son generalmente porosos. La adición de un desoxidante tal como el carbono al molibdeno, produce un lingote más sano (36).

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. 23). 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 (22).

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 microporosidad 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 absorbidos sobre los electrodos, la porosidad estará presente.

e) 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. 24 muestra una sección transversal de un lingote de molibdeno desoxidado con carbono, el que se ha rajado durante el laminado. Es visible que si 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 de tiempo más largo se podría suponer que se producirán "Cold shuts", es decir, uniones no soldadas de dos corrientes metálicas.

f) 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 para 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 metales volátiles en cantidades excesivas, se pueden formar salpicaduras cubiertas con una costra aparentemente sana. No obstante, cuando no están presentes metales volátiles, la fusión en vacío produce lingotes más lisos que cuando la fusión se realiza en atmósfera de argón. La condición superficial de lingotes de titanio, circonio, hafnio y muchos aceros (especialmente los 52100 y 4340) es particularmente buena.

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 (56) Fig. 25.

3.6. Fusión por arco con obtención de formas fundidas (Skull Melting)

La última categoría de hornos corresponde a los hornos que emplean el método denominado "skull melting" (51, 37, 47, 57-61) (Fig. 4). 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. 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 no importa qué 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 así como 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 aquellos en 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 muestra y una corrección de composición del baño, esto puede ser llevado a cabo antes de la colada. Tal forma de obtener muestra es particularmente ventajosa cuando se utiliza scrap de origen dudoso.

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 algo vacío, la fusión debe ser muy rápida de manera de obtener un grado suficientemente alto de sobrecalentamiento del fundido.

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

B I B L I O G R A F I AObras de consulta general:

- A. G. L. Miller, "Zirconium" (Academic Press Inc., 1954).
- B. W. E. Kuhn, "Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum" (J. Wiley & Sons, 1954).
- C. A. D. y M. K. McQuillan, "Titanium" (Butterworths Scientific Pub., 1956).
- D. R. F. Bunshah (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:

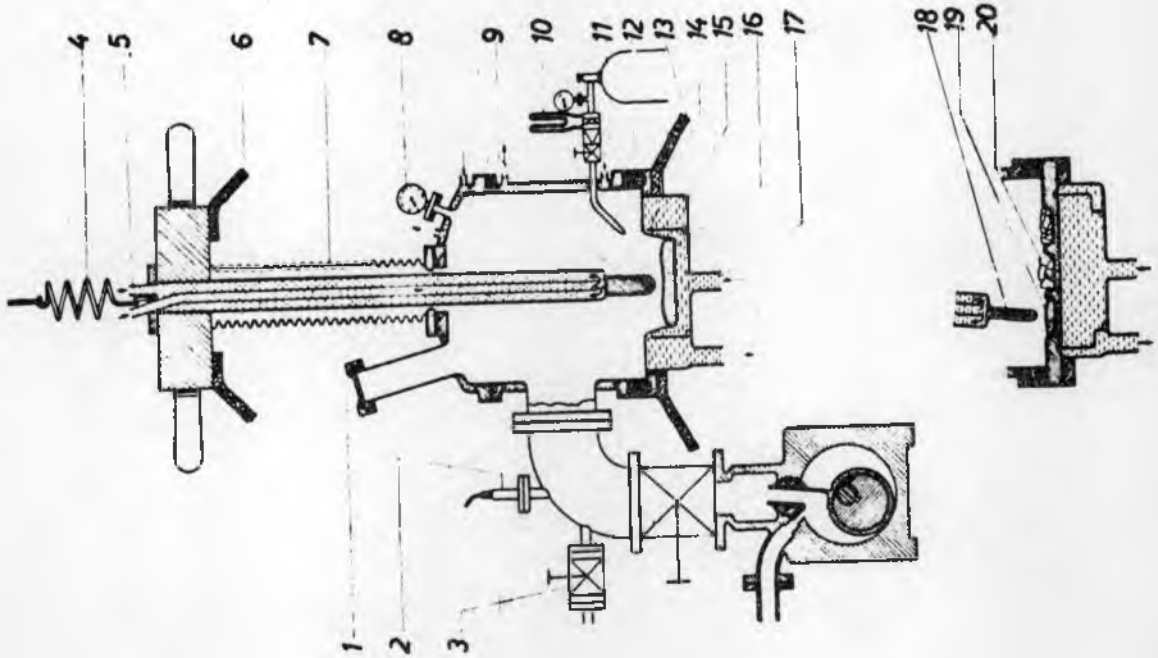
- 1. W. J. Kroll, Trans. Electrochem. Soc., 78 (1940) 35.
- 2. W. J. Kroll, U.S. Pat. No. 2205884 (1940).
- 3. W. C. Lilliendahl y H. C. Rentschler, Trans. Electrochem. Soc., 91 (1947) 285.
- 4. F. H. Brace, J. (y Trans.) Electrochem. Soc., 93 (1948) 247.
- 5. W. J. Kroll, A. W. Schlechten, W. R. Carmony, L. A. Yerkes, H. P. Holmes y H. L. Gilbert, Trans. Electrochem. Soc., 92 (1947) 99.
- 6. W. J. Kroll, C. T. Anderson y H. L. Gilbert, Metals Technol. T.F. 2310 (1948).
- 7. W. J. Kroll, C. T. Anderson, H. P. Holmes, L. A. Yerkes y H. L. Gilbert, J. (y Trans.) Electrochem. Soc., 94 (1948). 1.
- 8. W. J. Kroll y H. L. Gilbert, J. Electrochem. Soc., 96 (1949) 158.
- 9. (Sir) Humphry Davy, Trans. Phil. Royal Soc., 97 (1809) 71.
- 10. W. Siemens, Brit. Patent No. 4208 (1878).

11. H. Slavianoff y L. Alexander, *Trans. A. I. E. E.*, (1927) (5) 336.
12. W. von Bolton, *Z. Elektrochem.*, 11 (1905) 45.
13. L. Weiss y col., *Z. anorg. Chem.*, 65 (1910) 248, 279, 345.
14. L. E. Browne, *Steel*, 122 (1948) (3) 24.
15. W. J. Kroll, *Trans. Electrochem. Soc.*, 78 (1940) 35.
16. R. M. Parke y J. L. Ham, *Trans. AIME*, 171 (1947) 416.
17. O. W. Simmons, C. T. Greenidge y L. W. Eastwood, *Proc. of Titanium Symposium (Of. of Naval Research, USA, Dec. 1948, pag. 77)*.
18. H. L. Gilbert. W. A. Aschoff y W. E. Brennan, *J. Electrochem. Soc.*, 99 (1952) 191.
19. M. F. Hoyaux, *Arc Physics* (Springer-Verlag N. Y. Inc. 1968).
20. E. W. Johnson, *Ref. D.* pag. 101.
21. E. W. Johnson, G. T. Hahn y R. Itoh, *Ref. B*, pag. 19.
22. A. R. Moss, *Proc. Inst. Elec. Eng. (London)*, 192 Pt. A (1955) 45.
23. S. J. Noesen, *Ref. E*.
24. W. J. Kroll, *Metall*, 11 (1957) 1.
25. H. Alterthum, H. M. Reger y R. Seelinger, *Z. Techn. Physik*, 9 (1928) 169.
26. M. P. Reece, *Nature*, 177 (1956) 1089.
27. W. E. Kuhn, *J. Electrochem. Soc.*, 99 (1952) 89.
28. J. A. Davis, S. A. Herres y C. T. Greenidge, *Battelle Memorial Institute Rand Report R-131* (March 1949).
29. S. F. Radke, *Trans. AIME* 191 (1951) 620.
30. H. D. Kessler, *Western Metals Congress, ASM* (marzo 1955).
31. *Ref. A*, pag. 74

32. Ref. C, pag. 17.
33. Ref. A, pag. 285.
34. H. Grüber, Ref. B, pag. 120.
35. O. Winkler, Metallurgical Reviews, 5 (1960) (17) 92.
36. G. L. Hopkin, J. E. Jones, A. R. Moss y D. O. Pickman, J. Inst. Metals, 82 (1953-54) 361.
37. A. R. Moss, J. Less-Common Metals, 1 (1959) 60.
38. E. W. Johnson, Ref. B, pag. 25 y 38.
39. H. Grüber, Ref. B, pag. 133.
40. E. J. Borrebach, Ref. D. pag. 136.
41. H. Grüber, Ref. B, pag. 133.
42. F. C. Rossin, Ref. C, pag. 79.
43. E. W. Johnson, Ref. D, pag. 153.
44. R. A. Beall, J. O. Borg y F. W. Wood, U.S. Bureau of Mines, Rep. No. 5144 (1955).
45. H. Grüber y H. Scheidig, Z. Metallkunde, 47 (1956) 149.
46. W. W. Dyrkacz, Ref. E.
47. A. R. Moss, J. Less-Common Metals, 1 (1959) 34.
48. L. Northcott, J. Inst. Metals, 72 (1946) 283.
49. B. Chalmers, "Principles of Solidification" (J. Wiley & Sons, 1964).
50. Metal Progress, 74 (1958) (6) 63.
51. M. Cook y E. Swainson, J. Inst. Metals, 87 (1958-59) 161.
52. R. Kieffer y E. Pipitz, "The Metal Molybdenum" (ASM, 1958, 530).
53. D. O. Pickman, Alloy Metals Rev., 8 (1956) 2.

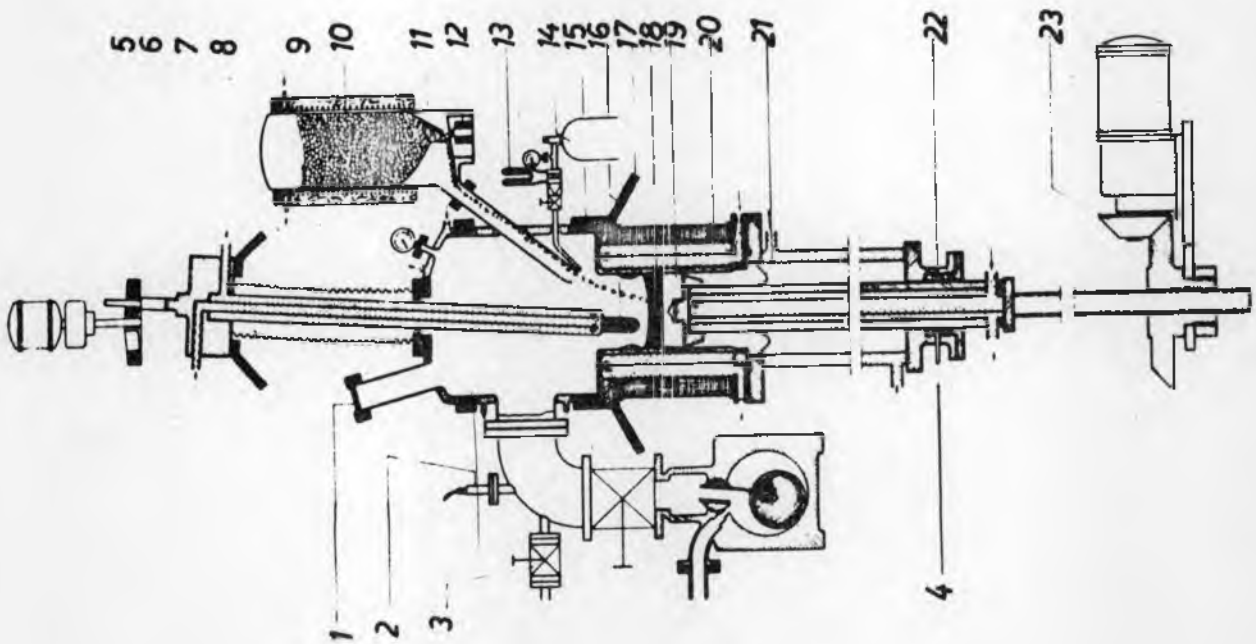
54. I. E. Olds y G. W. P. Rengstorff, *J. Metals*, 8 (1956) 150.
55. C. R. Tottle, *J. Inst. Metals*, 85 (1956-57) 375.
56. J. L. Ham y C. B. Sibley, *J. Metals*, 9 (1957) 976.
57. R. A. Beall, F. W. Wood y A. H. Roberson, *J. Metals*, 7 (1955) 801.
58. A. R. Moss, *British Patent Appl. No. 29599* (1958).
59. A. H. Roberson, *J. Inst. Metals* 86 (1957-58) 1.
60. R. A. Beall, F. W. Wood y P. C. Magnusson, *U. S. Bureau of Mines, Rep. No. 5247* (1956).
61. R. A. Beall, F. W. Wood, J. O. Borg y H. L. Gilbert, *U. S. Bureau of Mines, Rep. No. 5265* (1956).

Figura 1 Horno de fusión por arco en vacío con electrodo 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. Carisa de refrigeración
16. Lingote
17. Agua de enfriamiento del crisol
18. Electrodo no-consumible
19. Botón fundido
20. Esponja antes de la fusión

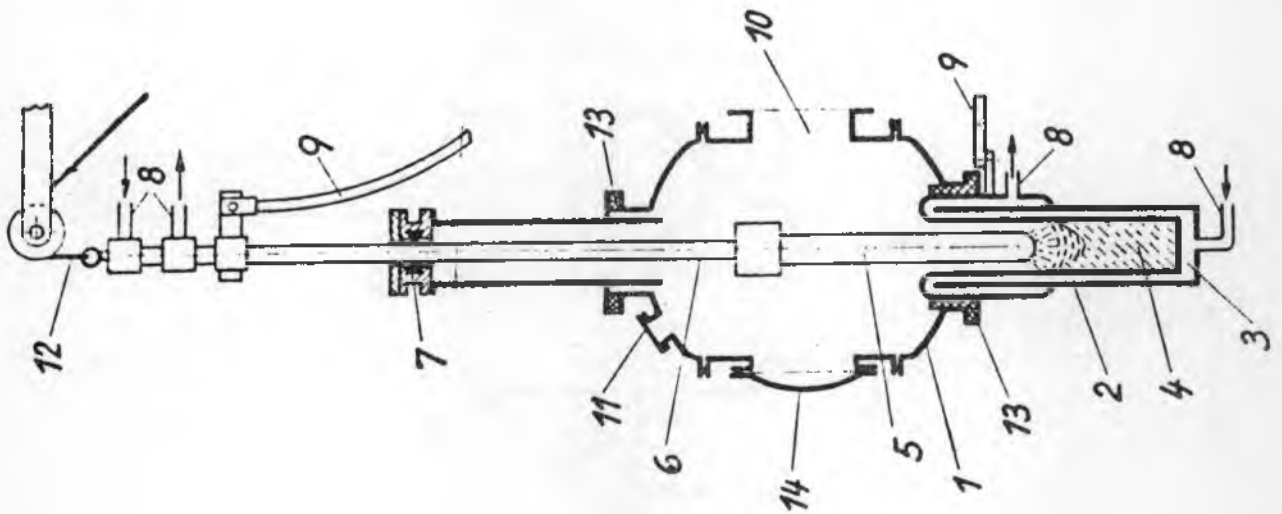
Figura 2 -Horno de fusión por arco en vacío con electrodo no-consumible y crisol con tapón re-tráctil.



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 3 -Horno de fusión por arco en vacío con electrodo 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



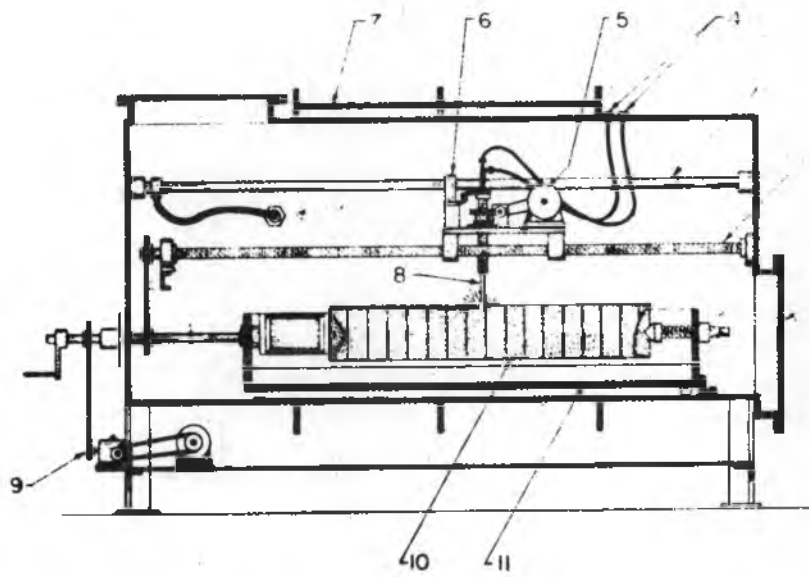
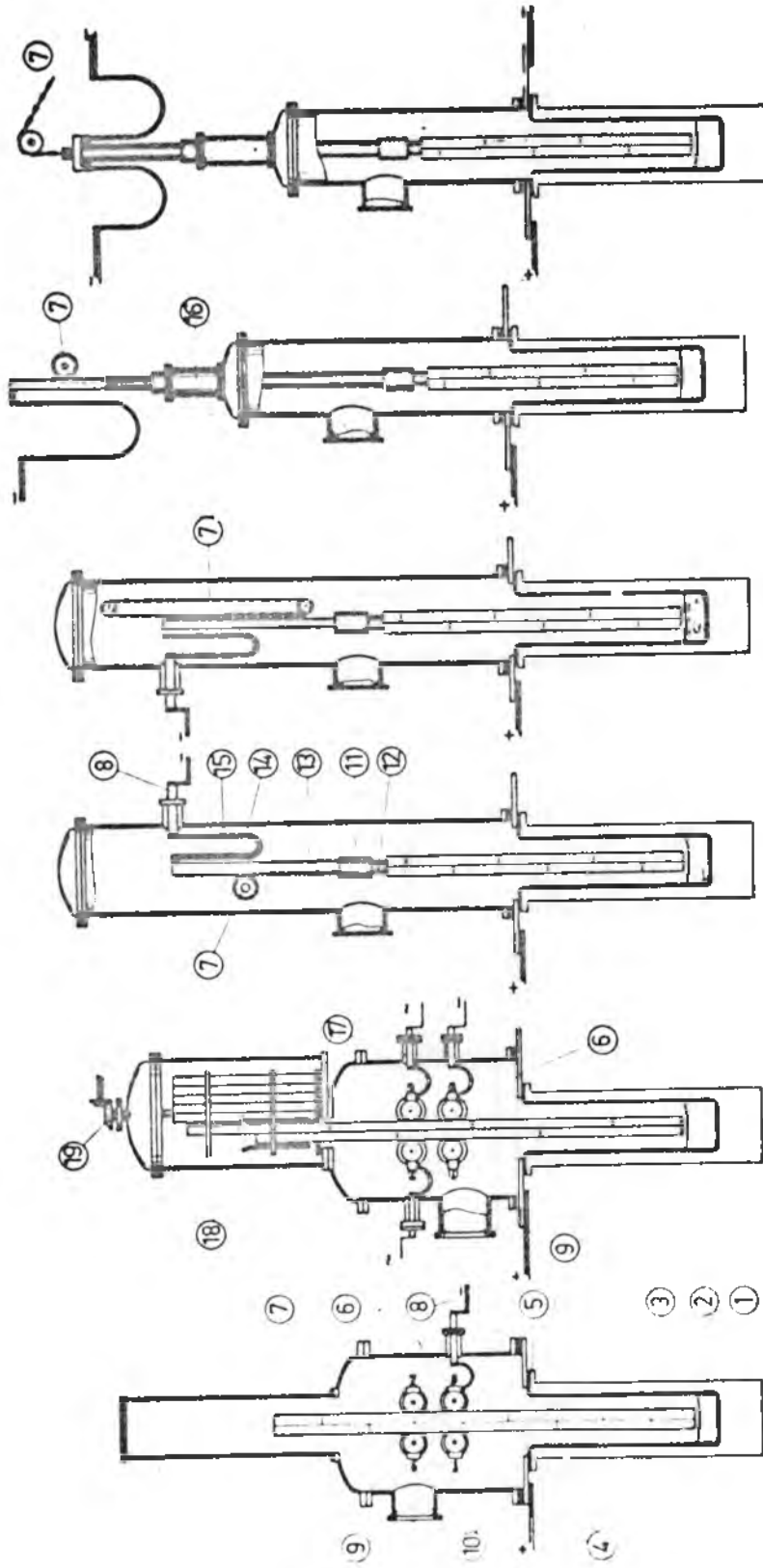


Figura 5 -Vista esquemática de una caja de soldadura automática en atmósfera inerte.



Figura 6 -Electrodos consumibles de titanio.



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

Figura 10 -Diagrama esquemático de diferentes mecanismos de alimentación de electrodos consumibles.

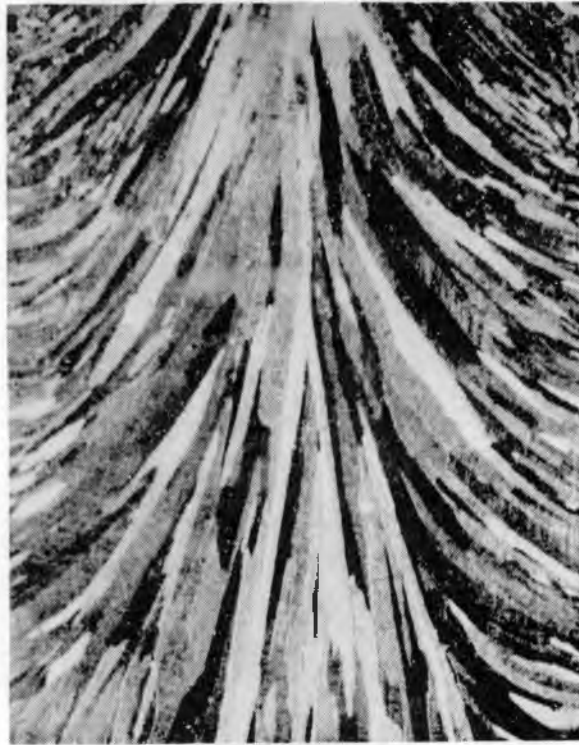


Figura 17 Macroestructura de un lingote de molibdeno conteniendo 0,052% C. (Atacado con NO_3H al 50%. X2.

gruesa



fina



muy fina

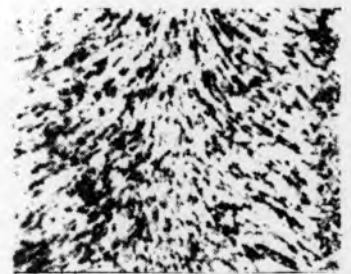


Figura 18 -El efecto de los elementos aleantes sobre la macroestructura bruta de colada de molibdeno desoxidado con carbón.

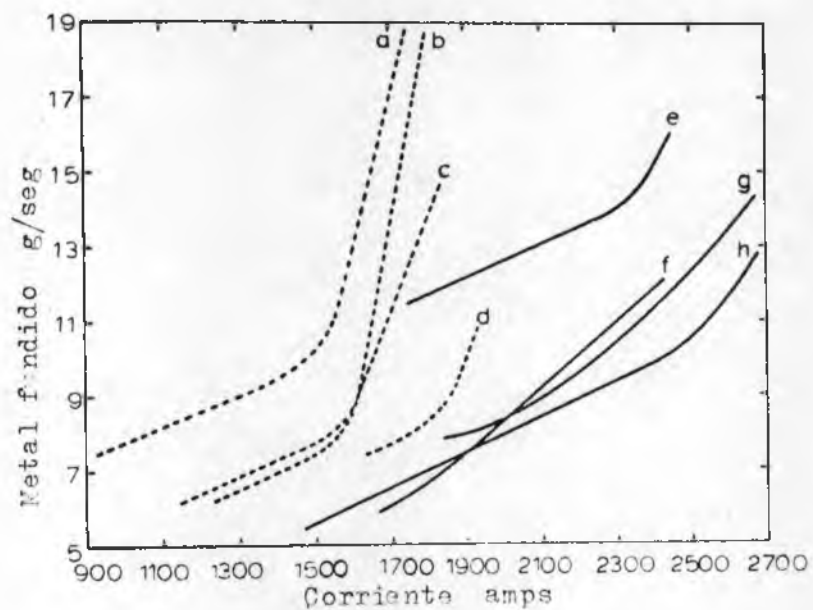


Figura 19 -Velocidades de fusión en vacío para electrodos de metales refractarios de 9,5 mm (3/8") de diámetro:

- 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.

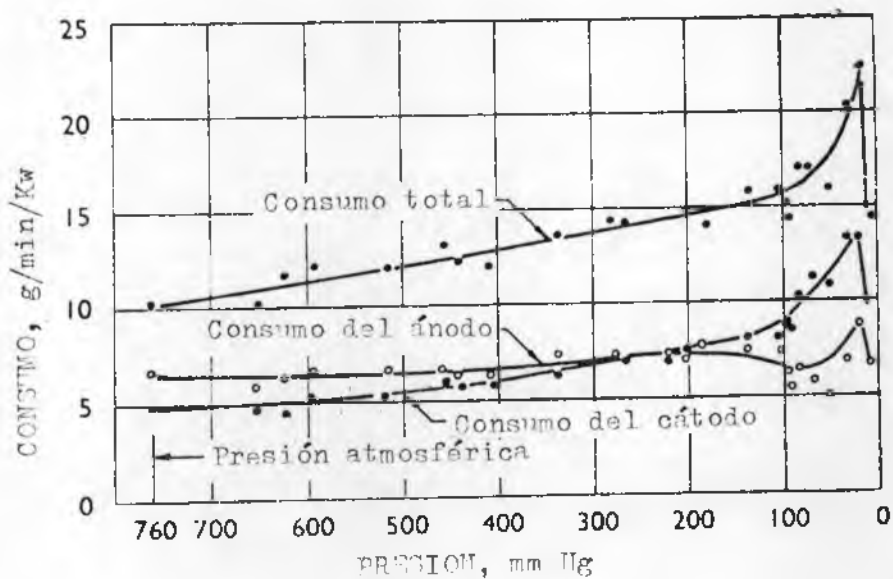
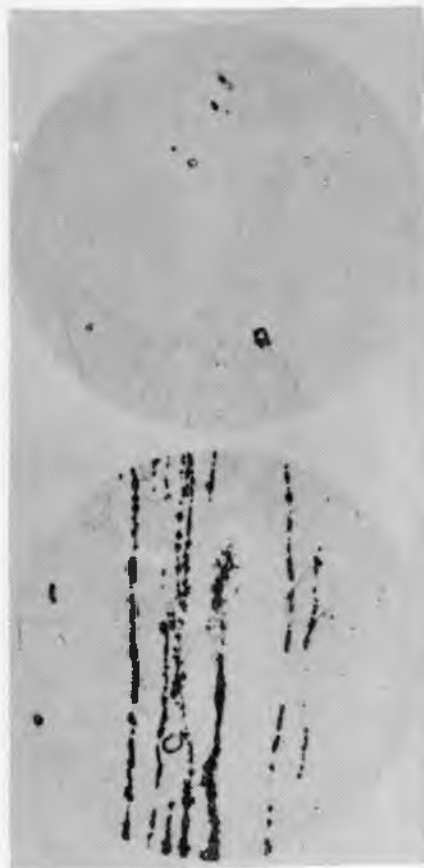
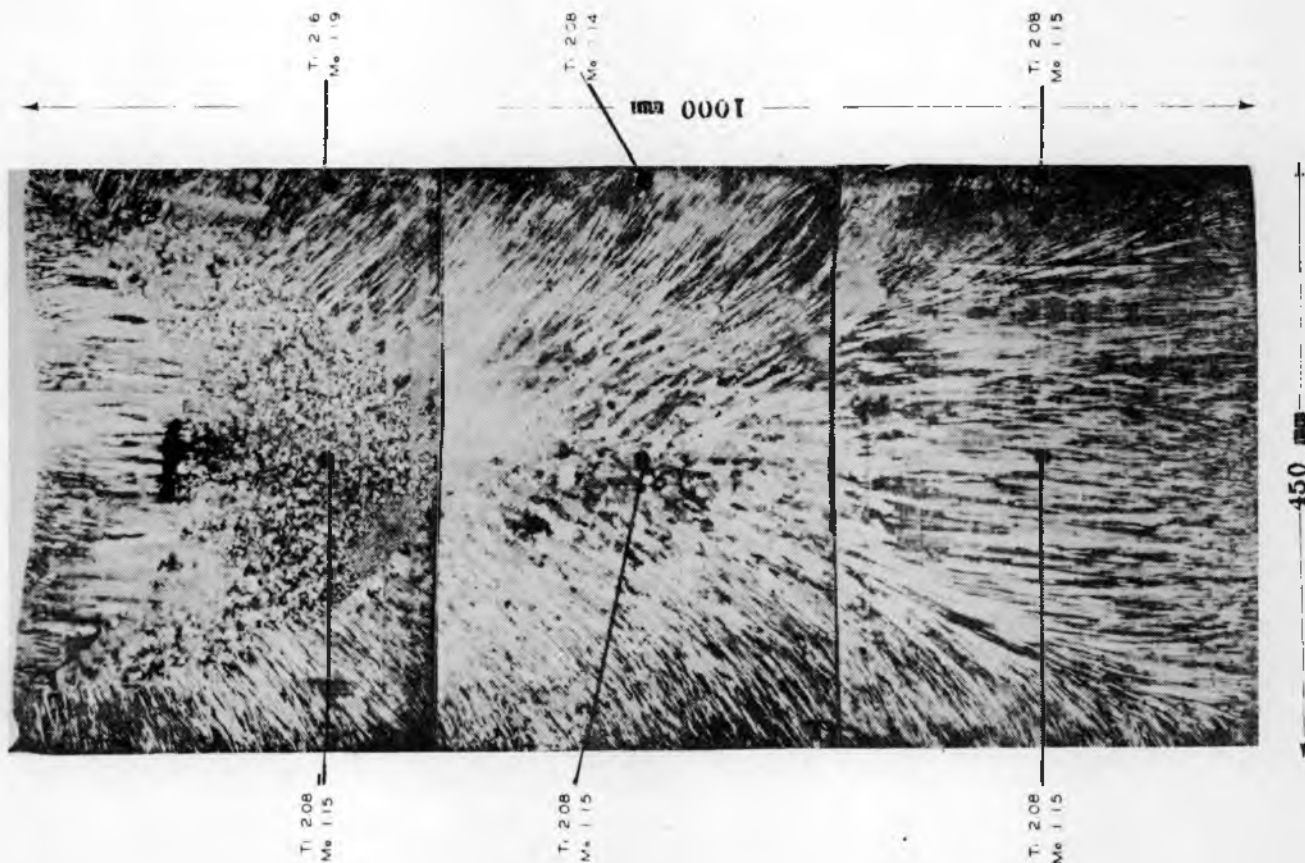


Figura 20 -Efecto de la presión sobre la velocidad de fusión.

Figura 21.--Sección longitudinal de un lingote de aleación A-286 obtenido por refusión en vacío (diámetro: 450 mm, peso: 1100 kg).



fundido al aire fundido en vacío

Figura 22.--Microestructuras de superaleación endurecible de base Ti mostrando cadenas de inclusiones de compuestos de Ti cuando es fundida al aire y la ausencia de tales cadenas cuando es refundida en vacío. Aumento 750X.

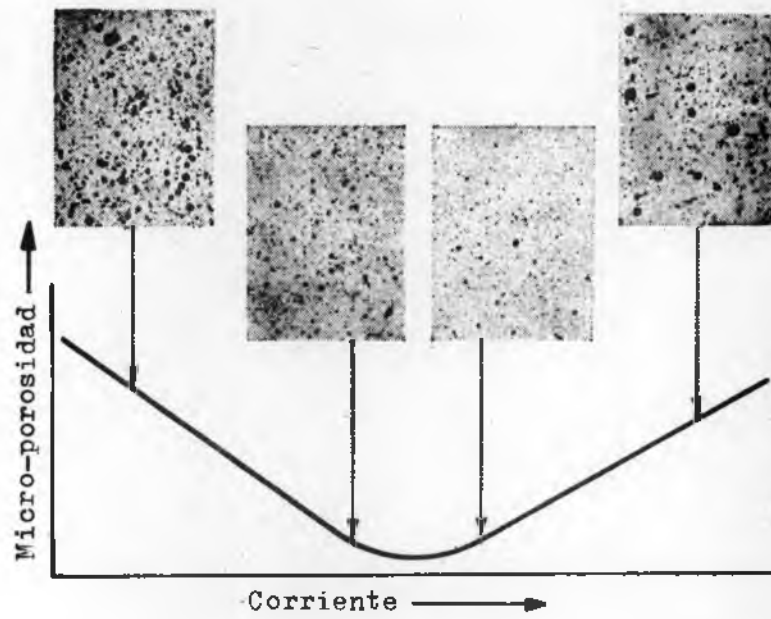


Figura 23 -Relación entre corriente de arco y micro-porosidad en lingotes de Mo no-desoxidados



Figura 24 -Rajaduras por laminado correspondientes a un cambio de estructura granular.

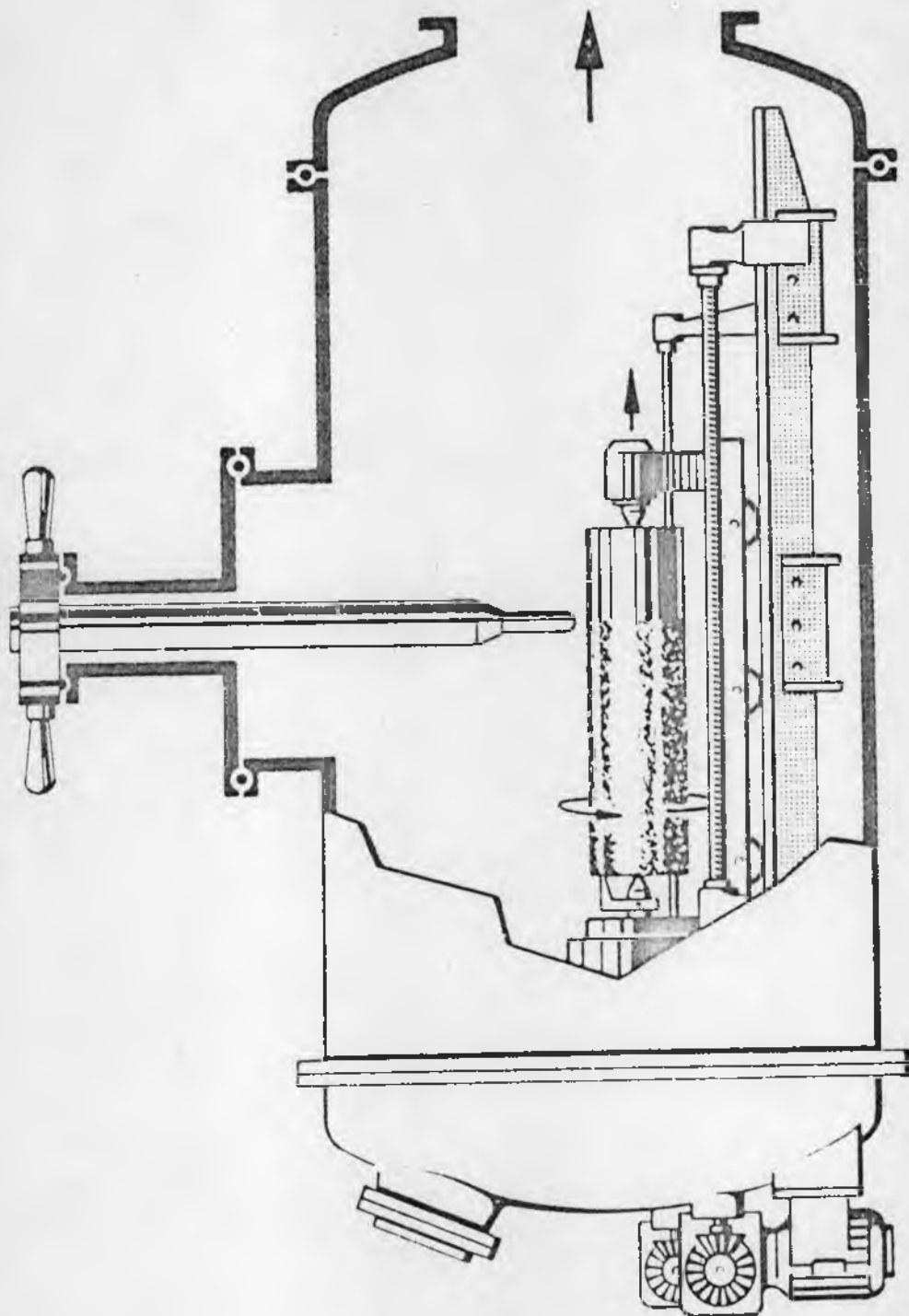


Figura 25 -Equipo para el acondicionamiento superficial del lingote por medio de un arco. (Electrodo no-consumible).