



REMETALLICA

REVISTA DEL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
ESTACIONES DE ENERGÍA, INDUSTRIAS, COMERCIO, INVESTIGACIONES

OCTUBRE 1980

SANTANDER, CHILE

ED. 1

Energía, Contaminación ... EL DESAFÍO



EDITORIAL

REMETALLICA N° 1 y N° 2 tuvieron como temas de fondo la Metalurgia del Cobre y del Fierro respectivamente, con lo cual, se ha querido dejar de manifiesto la gravitación que tienen en la Metalurgia Chilena estos dos metales tan útiles al hombre.

El Comité de Redacción ha querido orientar este tercer número de "REMETALLICA" hacia la energía y la contaminación ambiental, haciendo eco de la incidencia que ellas tienen en la industria metalúrgica, y a la vez coincidiendo con la preocupación académica de nuestra Facultad de Ingeniería por darle cada vez más relevancia al multifacético tema de la ENERGIA.

Hemos visto que revistas metalúrgicas de tanto prestigio como METALLURGICAL TRANSACTIONS y ERZ-METALL, en sus más recientes ediciones han puesto especial énfasis en los aspectos energéticos y tecnológicos asociados a los procesos metalúrgicos. Estimamos que no podemos eludir dicha inquietud a nivel mundial, muy por el contrario, es posible, que las consecuencias de la crisis energética afecte en forma más desfavorable a países como el nuestro, por no tener, en muchos casos, en operación la mejor tecnología disponible.

Nuestros ingenieros, que bien podemos definir como los "Ingenieros de los años 2.000", tienen el deber de egresar muy conscientes del rol que jugarán los aspectos energéticos, y los ecológicos en sus proyectos ingenieriles. Cúmplenos a nosotros los docentes, inculcar reiterativamente a nuestros alumnos, el más claro respeto a dichos factores, en particular, cuando ellos tengan relación directa con sus trabajos y operaciones en la Ingeniería Metalúrgica.

Finalmente, deseamos comunicar a toda la comunidad que tiene relación con REMETALLICA, que los diversos cambios estructurales que experimentó la Universidad Técnica del Estado al dar origen a la Universidad de Santiago, no han modificado el esquema anterior de la revista: la estructura y la filosofía seguirán siendo los mismos, y sobre todo el espíritu de contacto y de diálogo seguirá siendo el motor que ha movilizado y movilizará nuestras publicaciones.



Dr. Ing. Nelson Santander M.
Director del Departamento
de Metalurgia USACH

REFRACTARIOS EMPLEADOS EN HORNOS DE INDUCCION

1. INTRODUCCION

Cada día es más clara la evidencia que nos hace pensar que a futuro la pirometalurgia y la industria de la fundición emplearán cada vez más la electricidad como fuente de la energía térmica requerida en sus hornos.

La electricidad es una fuente energética mucho menos contaminante, en particular la hidroeléctricidad. Es de uso más eficiente, y en muchos casos permite un mejor control de la temperatura.

Todo esto nos lleva a fijar más de cerca la atención en torno a los hornos eléctricos como equipos alternativos para fusión o para procesos. Como para los metalurgistas son de particular interés los refractarios usados en los hornos, el presente artículo estará orientado a analizar los refractarios empleados en un tipo muy importante de hornos eléctricos: los hornos eléctricos de INDUCCION.

2. ASPECTOS TEORICOS

En principio, cualquier material conductor de la electricidad puede calentarse induciendo en él una corriente eléctrica mediante una bobina envolvente de frecuencia adecuada. En la práctica este método ha demostrado presentar varias ventajas:

- a) Se obtiene un calentamiento rápido ya que sólo se calienta la carga.
- b) Pueden alcanzarse muy elevadas temperaturas.
- c) El baño metálico queda sometido a una activa agitación promovida por las corrientes inducidas.
- d) Es particularmente adecuado para calentar cargas contenidas dentro de sistemas al vacío o con atmósferas protegidas.

No obstante, el método también tiene algunas desventajas:

- a) El equipo para generar altas frecuencias es caro.
- b) No es fácil controlar la temperatura en forma precisa durante largos períodos de tiempo.

En la industria metalúrgica, el calentamiento por inducción encuentra numerosas aplicaciones entre las cuales podemos citar la fusión de aceros especiales, fundiciones de fierro de alta calidad, aleaciones no ferrosas, para precalentar piezas antes de someterlas a endurecimiento o a forja, para soldar, etc.

La corriente alterna alimentada a la bobina del horno induce una tensión en él (o en la carga), el cual (o la cual) puede considerarse como el secundario de un transformador que tiene una sola espi-

ra y está en cortocircuito. Por ello fluyen por la carga corrientes de alta densidad de corriente y de baja tensión, la que se transforma en calor con una relación ideal dada por la conocida relación

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal} = 3,6 \times 10^6 \text{ Joule}$$

Obviamente que a ese ideal no se acerca ningún horno ya que las pérdidas calóricas por radiación, convección y conducción hay que restarlas de la entrega de energía al secundario.

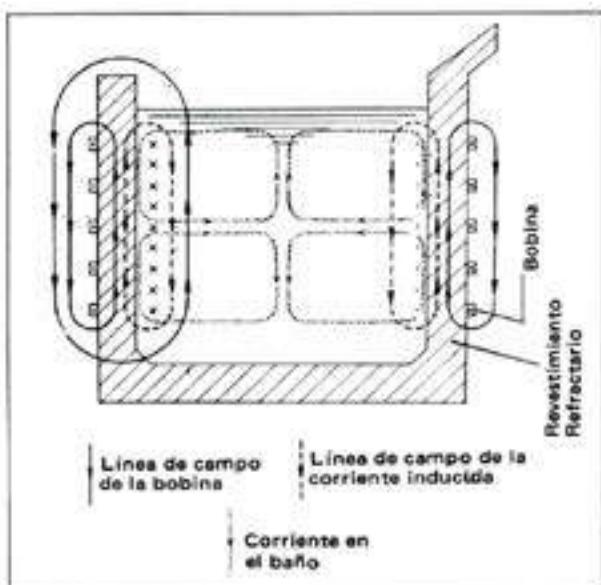


Fig. 1. Efectos producidos por la inducción.

La Fig. 1 ilustra los efectos producidos por la inducción. Las líneas llenas muestran el curso de las líneas del campo de la bobina y las líneas discontinuas las de la carga. Tal como puede apreciarse allí, entre la bobina y el contenido del crisol ocurre un robustecimiento del campo magnético determinado por la equidireccionalidad de las líneas de fuerza, en cambio en el crisol, debido a la contradireccionalidad ocurre un debilitamiento magnético. Por esta razón el baño (que es un conductor móvil), se sumerge en la zona de debilidad magnética y este fenómeno se robustece debido a la gran densidad de energía en la parte central del baño. El movimiento del baño así generado se representa por las líneas punteadas de la Fig. 1. Este fenómeno se designa como presión por potencia, por analogía con la presión radial que se ejerce a la mitad de la altura del baño debido a la potencia eléctrica. Dicha presión queda evaluada según la expresión:

$$P = \frac{31,6}{\sqrt{\rho \cdot f}} \cdot \frac{P_i}{\pi dl} \cdot 10^{-4} \quad \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$$

donde

ρ = resistencia específica del baño

f = frecuencia

P_i = potencia inducida en la carga, por segundo

πdl = superficie del manto del baño

Se ve entonces que a bajas frecuencias se robustece el flujo interno del baño comparado con las altas frecuencias. El fenómeno de levantamiento del baño en su centro (en comparación con el borde) se manifiesta claramente en hornos de baja frecuencia (particularmente con frecuencias de red) comparado con hornos de alta frecuencia.

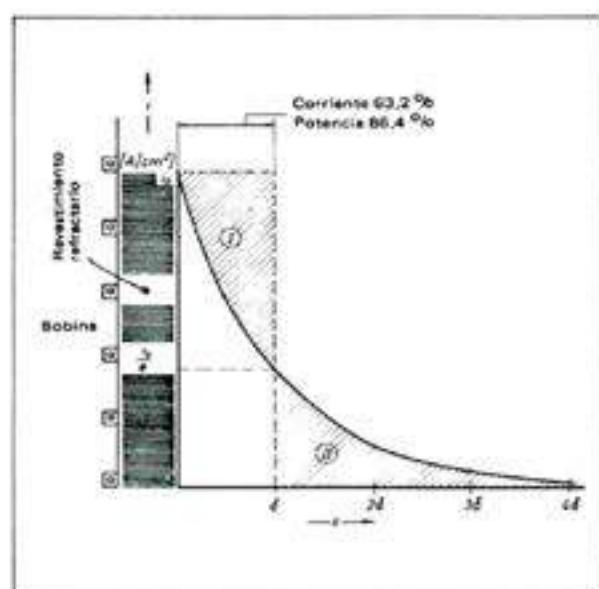


Fig. 2. Caida de la densidad de corriente hacia el centro del crisol.

Para tener en cuenta el rol del revestimiento es esencial emplear el concepto de "grado de penetración", lo que puede visualizarse observando la caída de la densidad de corriente en el baño, la que tal como muestra la Fig. 2 sigue una función exponencial. En el borde externo del baño, la energía y la densidad de corriente son las máximas, valiendo i_0 , y descendiendo hacia el centro del baño según la ley exponencial:

$$i = i_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

alcanzando a la distancia $x = \delta$ (desde la pared del crisol) la e -ésima parte de su valor original i_0 , o sea:

$$i_\delta = \frac{i_0}{\delta}$$

La corriente que fluye por la carga se obtiene

como producto entre el largo h de la bobina y la superficie bajo la curva i vs x (desde 0 hasta ∞), o sea:

$$[\text{Corriente en el crisol}] = h \cdot i_0 \int_0^\infty e^{-\frac{x}{\delta}} dx = h i_0 \delta$$

δ se designa como "grado de penetración", y da la distancia desde la pared hasta la cual la densidad de corriente inicial se reduce a la e^{-1} parte, o sea, a $\approx 37\%$. Como a su vez, la potencia decrece en el cuadrado de la función exponencial, puede demostrarse fácilmente que hasta la zona δ actúa el 86% de la potencia inducida, pudiéndose entonces despreciar el rango más allá de δ , y puede entonces evaluarse δ según la fórmula simplificada:

$$\delta = 50,5 \sqrt{\frac{1}{f}} \quad [\text{cm}]$$

Esta teoría señala también que las muestras más pequeñas requieren altas frecuencias, y que el tamaño óptimo de la carga depende fuertemente de la resistividad del material. Así por ejemplo, para trabajos con metales delgados en hornos pequeños se usa muy alta frecuencia, en hornos de 1 t se

usan 500 Hz, y en hornos grandes es usual emplear la frecuencia de la red, o sea, 50 a 60 Hz.

Aunque en un comienzo los hornos de 1 t se consideraban notables, hoy son bastante comunes los hornos de 2 a 5 t, y los hay de 200 y 250 t.

En los últimos años se ha observado un notable aumento en el uso de grandes hornos de inducción en las fundiciones de fierro, lo que se ha debido principalmente a la necesidad de minimizar la contaminación del aire, y a la aplicación de mayores exigencias metalúrgicas a las fundiciones.

Conviene agregar aquí dentro de este párrafo de aspectos teóricos, algunas observaciones acerca de procesos químicos que pueden llevarse a cabo ex profeso en hornos de inducción, para ello se ilustrará la posibilidad de efectuar la desulfuración de un baño de acero en este tipo de hornos (algo análogo ocurre al efectuar desfosforación u otro proceso similar).

El hecho que durante la operación se genere un activo movimiento del baño puede aprovecharse para promover reacciones de escorificación, o bien, lograr buenas homogenizaciones cuando se está dosificando una aleación (por ejemplo, al añadir ferroaleaciones). El intenso movimiento del baño puede aprovecharse para crear un contacto interno permanente entre la escoria y el baño, agitando incluso parcialmente la escoria en el baño metálico. De este modo, se crean condiciones tan favorables para la transferencia de materia que pueden lograrse reacciones rápidas entre los componentes del baño y de la escoria hasta llegar al equilibrio. La Fig. 3 muestra a modo de ilustración la variación del contenido de azufre en el baño y en la escoria en un horno de inducción de 5 t Brown Boveri.



**INTEC
CHILE**

al servicio de la MINERIA

- Análisis químicos y Geoquímicos
- Metalurgia extractiva
- Contaminación y Energía

Avda. SANTA MARIA 06500, Lo Curro
Teléfono: 2289066

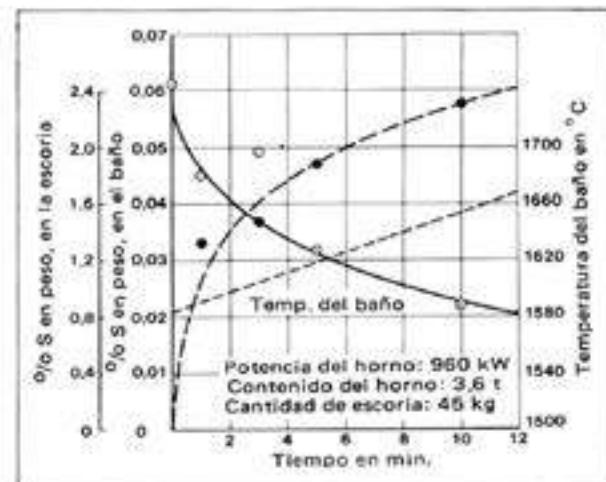


Fig. 3. Desulfuración de acero en un Horno de Inducción. (3.6 t acero, 45 kg escoria).

3. CLASIFICACION

Para los efectos del presente análisis conviene clasificar los hornos eléctricos tal como muestra el Cuadro 1, y de esa manera, comprender el lugar que tienen los 2 tipos de hornos de inducción que existen, dentro del esquema global de los hornos calefaccionados eléctricamente.

Cuadro 1.

Clasificación de los hornos eléctricos en general y de los hornos de inducción sin núcleo, y hornos de inducción con núcleo.



Analicemos ahora con más detalle lo que se entiende por hornos de inducción sin núcleo, y hornos de inducción con núcleo.

i) **Hornos de Inducción sin Núcleo:** En este tipo de hornos el primario es la bobina del horno, el secundario es el metal líquido (o la carga) y el núcleo de este sistema transformador es el aire. Al aplicar una corriente de alta frecuencia al primario, ésta induce una corriente en el secundario que calienta rápidamente el baño metálico y funde cualquier chatarra u otro material sóli-

do en la carga. El revestimiento puede ser ácido o básico siendo este último el más común en EEUU.

Se emplean también extensamente hornos de inducción de baja frecuencia, en particular para fundir fierro, acero y aluminio.

El horno de inducción sin núcleo difiere radicalmente del horno de arco, ya que la composición del producto está altamente controlada por la composición de la carga y las pequeñas pérdidas que ocurren durante la fusión. Con suficiente experiencia es posible predecir lo último y en consecuencia puede prepararse el acero muy ajustado a las especificaciones. Estos hornos se usan para fabricar aceros especiales, tales como los inoxidables, muy bajo carbono, alto manganeso y aceros para herramientas.

ii) **Hornos de Inducción con Núcleo:** Este tipo de horno contiene una bobina primaria que rodea a un núcleo laminado. El secundario queda constituido por el metal fundido que se encuentra dentro de un canal que rodea a la bobina primaria.

Estos hornos se usan para fundir bronce y otras aleaciones de cobre, aluminio de alta pureza y sus aleaciones, cinc y en algunos casos fierro de alta pureza.

La figura 4 muestra la diferencia entre un horno de inducción sin núcleo (coreless), y otro con núcleo (core-type), ambos con sus revestimientos típicos.

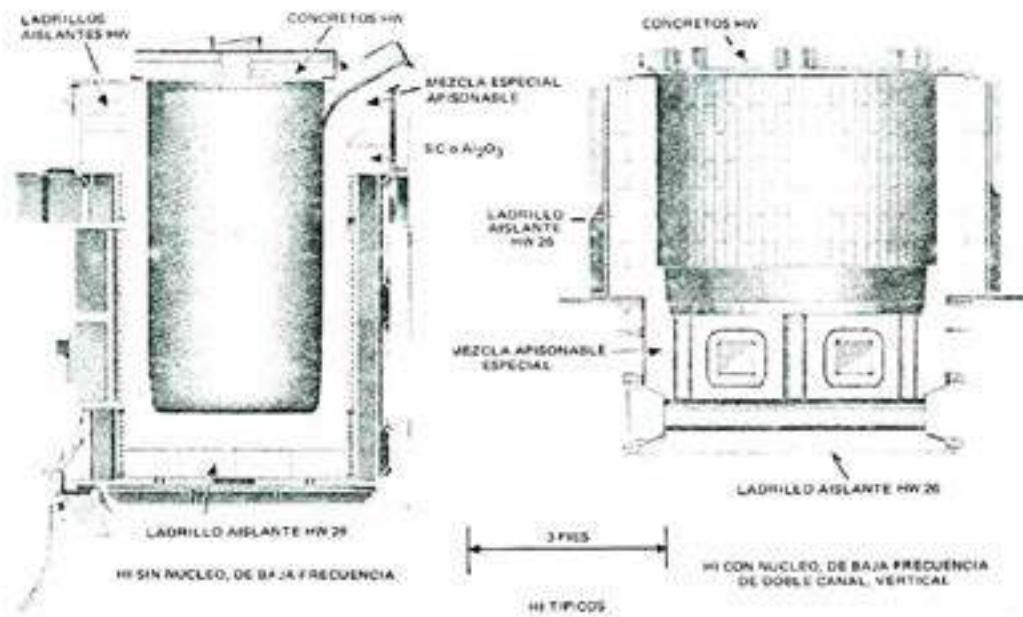


Fig. 4. Diferencias entre Horno de Inducción sin núcleo y horno de inducción con núcleo.

En Chile, la tecnología de los hornos de inducción lleva ya bastante tiempo. La Fig. 5 da una imagen de la cantidad y tipos de hornos industriales usados en nuestro país en relación a sus capacidades de colada. El catastro no incluye hornos de fusión de otros metales diferentes de los de fierro y cobre y sus aleaciones. Es muy posible que no sea absolutamente exacto, pero sí, da una buena idea de los rangos de capacidad de producción, distribución y diseño eléctrico fundamental.

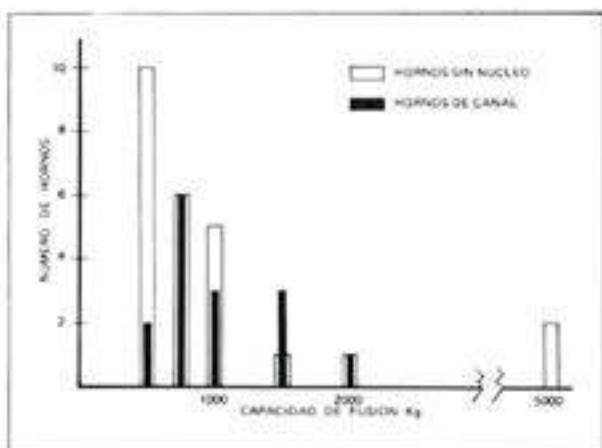


Fig. 5. Catastro de Hornos de Inducción en Chile usados para fierro y cobre.

Adicionalmente, podemos añadir que las universidades chilenas y Centros de Investigación, cuentan con cerca de una decena de hornos para trabajos de experimentación e investigación. En la casi totalidad de los casos se trata de hornos que pueden operar al vacío. A modo de ilustración, la Fig. 6 muestra el horno Stel con que cuenta nuestro departamento y cuyas características son: 50 kW de potencia con una frecuencia de 4.000 Hz y con una capacidad de fundida equivalente a dos litros de metal.

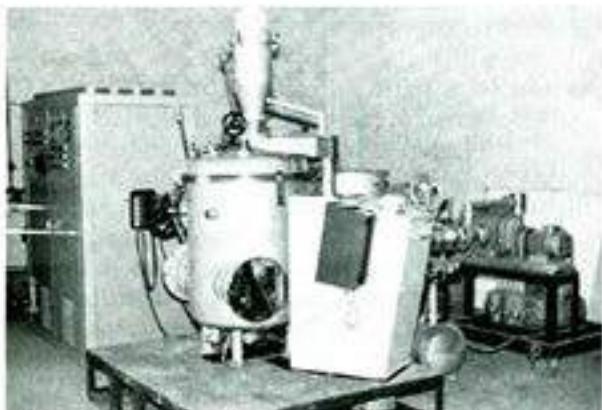


Fig. 6. Horno de Inducción de laboratorio (Departamento de Metallurgia, Universidad de Santiago de Chile).



**KÜPFER
HNOS. S.A.**

LIBERTAD 58 - CASILLA 284 V - CORREO 21 - FONO 98821

**Un Siglo
de Experiencia
al Servicio
del Progreso**

PROVEEDORES DE LA INDUSTRIA

ACEROS • FERRETERIA INDUSTRIAL
SOLDADURAS • SEGURIDAD INDUSTRIAL

VALPARAISO
Santiago 0193 7477
Fono: 5-2893

CONCEPCIÓN
Explan 601
Fono: 7-2287

ANTOFAGASTA
Aconcagua 923
Fono: 7-05537

COPÍAPIO
Villalobos 8-6000 0-1000-111
Fono: 3-0447

GPO Santiago Periodical 100



**METALURGICA
COPLASA**

FUNDICIÓN DE COBRE
electrolítico, desoxidado
y sus aleaciones

• BILLETS • CAKES

oficinas:
Av. Pedro de Valdivia 0193 - 9º Piso
Teléfono 2230663

Planta:
Av. Ramón Freire 6692
Teléfono 794370
Telex: 40306 GRAPE CL
Santiago - Chile

4. MAMPOSTERIAS TIPICAS

El primer horno de inducción del que se tiene noticias, operó en 1887 y fue construido por Ferranti, tenía un crisol toroidal que cumplía la función de secundario de un transformador con núcleo de fierro. Bajo el crisol estaba el enrollado primario, que consistía de una bobina de alambre de cobre.

Los tipos de mampostería usados en hornos de inducción pueden clasificarse en: i) Crisoles premoldeados; ii) Revestimientos monolíticos; iii) Revestimientos enladrillados.

Las figuras 7a y 7b ilustran la diferencia entre los dos últimos tipos, que son los más empleados industrialmente.

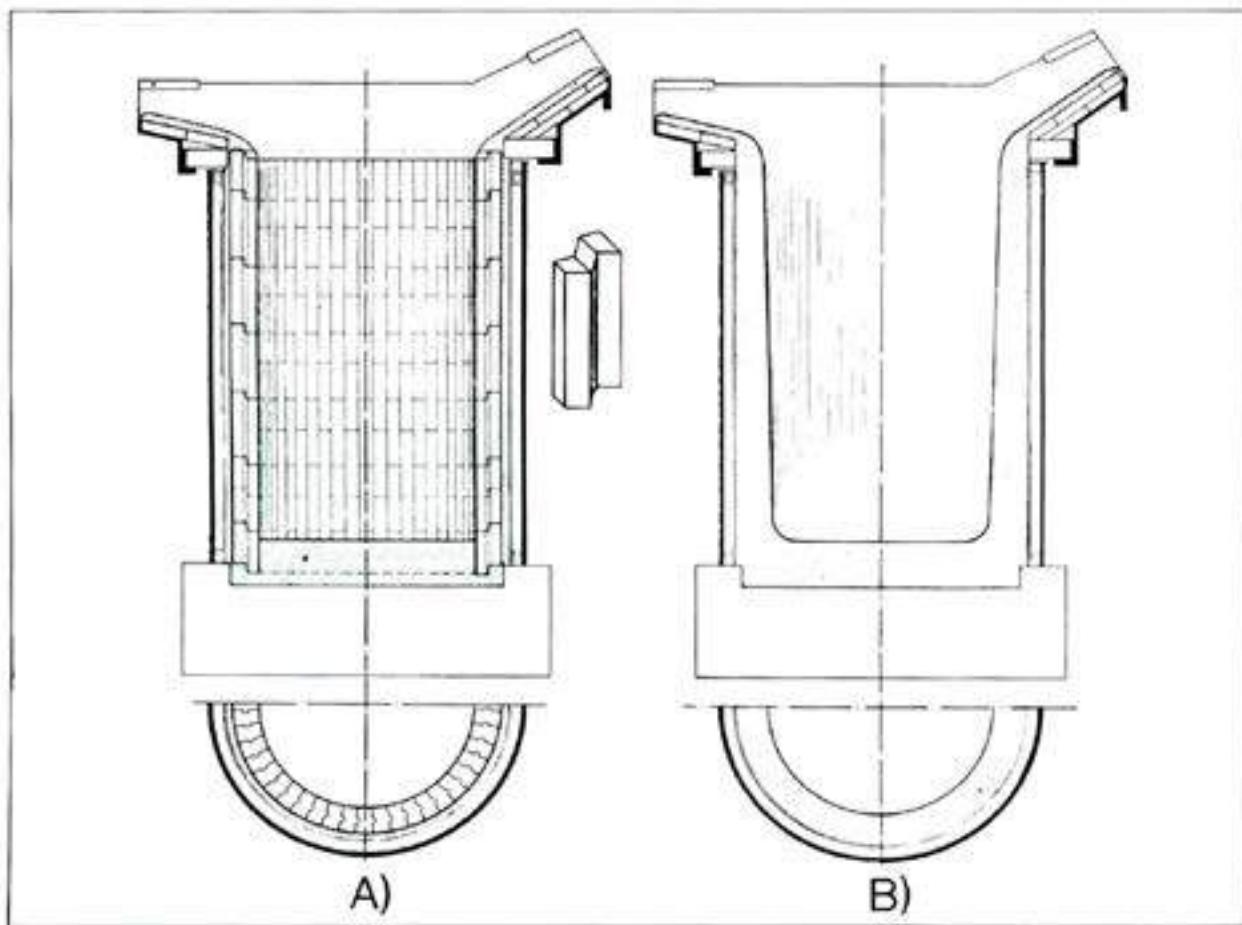


Fig. 7. Diferencias entre a) revestimientos enladrillados y b) monolíticos.

- i) **Crisoles premoldeados:** Los primeros crisoles de hornos de inducción se hacían de arcilla o de plumbago (arcilla más grafito). Los de arcilla duraban cuatro a cinco coladas y los de plumbago, algo más. Se usaban también otros materiales como, magnesita y magnesita-circon, pero no eran resistentes al choque térmico. Para vencer esta dificultad se probó revestir los crisoles de arcilla o de grafito con varios cementos (por ejemplo, cementos en base a MgO y ZrO_2 en crisoles de grafito), sin embargo, estos revestimientos tuvieron aplicaciones muy limitadas, en parte porque se gastan muy rápidamente y por-

que al agrietarse podía ocurrir contaminación del baño, debido al carbono del crisol de plumbago.

- ii) **Revestimientos Monolíticos:** El revestimiento monolítico es el más empleado en la actualidad en los hornos de mayor uso. Chesters describe dos interesantes métodos de construcción. El método llamado de la carcasa de acero fue inicialmente desarrollado por Rohn, quien patentó el uso de un material granuloso seco que se sintetiza in situ al fundirse una carcasa de acero. El otro método descrito por Chesters, es el de la carcasa de asbesto, de gran aplicación en Esta-

dos Unidos. Aquí el refractario granuloso se apisona entre la bobina y un cilindro de asbesto. La reacción entre el asbesto y el refractario durante la fusión es suficiente para dar una adecuada sinterización.

iii) **Revestimientos Enladrillados:** Tal como su nombre lo indica, el método se basa en revestir el interior del horno con ladrillo refractario. Pueden emplearse ladrillos hechos de materiales ácidos o básicos, cocidos o no. Estos pueden ser planos o bien con formas curvas y es usual unir un ladrillo con sus vecinos mediante caras machihembradas, tal como lo muestra la figura 7a.

Materiales Refractarios Usados: La mayoría de los revestimientos antiguos eran de cuarcita, la que daba una expansión permanente al calentar y así se lograba un buen sellado. Desgraciadamente la sílice no era satisfactoria para fundir muchas aleaciones de acero, incluyendo aceros inoxidables de bajo carbono, aceros al manganeso o los aceros muy especiales requeridos para la producción de magnetos o bien de hojas de turbinas.

Los revestimientos básicos, principalmente los de MgO tenían mucho mejor resistencia a la escoria y mayor refractariedad; además permitían fabricar acero más limpio. Otras ventajas especiales la constituyan, su habilidad para resistir sobrecalentamientos (hasta 1700 °C o más) requeridos para hacer piezas complicadas de acero, y evitar la reducción del SiO₂ a Si en los hornos al vacío.

i) **MAGNESITA:** En los primeros hornos de inducción los revestimientos básicos duraban muy pocas coladas, luego se agrietaban y el metal usualmente chocaba con la bobina. Algunos revestimientos ni siquiera sobrevivían a la primera colada; la carencia de sinterización hacía que el material del revestimiento fallara tan pronto como la costra de acero se deslizaba en el metal formado.

Granulometría: Durante los últimos 30 años se ha trabajado mucho, tanto en materiales monolíticos como para ladrillos, que cuesta comprender que aún en 1920 no se conociera el hecho que la sinterización estaba fuertemente controlada por la fracción fina. Como resultado de estudios se estableció la mezcla estándar: 45% grueso, 10% medio y 45% fino para monolíticos y ladrillos densos. Si la fracción de superfina es insuficiente hay problemas debido a la sinterización incompleta, pero si es excesiva es muy difícil apisonar ya que el pisón atraviesa al material como si éste fuera un líquido. Se han usado exitosamente algunos revestimientos

gruesos, pero si hay muchos granos sobre siete mallas se puede producir una segregación seria y por ende porosidad localizada.

Ánálisis Químico: Puede usarse MgO de minas o bien de agua de mar; la electrofundida es mejor ya que es pura y altamente cristalina.

Sinterizabilidad: Se recomienda usar granulometría 45-10-20/25. La mayoría de los revestimientos básicos actuales contienen ligantes de bajo punto de fusión, como ácido bórico y por ello muestran buena sinterización a temperaturas bajas (ej. 1000 °C). Si hubiera dudas para saber si un material nuevo sinteriza bien en la práctica, debe compararse con el estándar, llevando crisolitos con los dos materiales y calentándolos uno al lado del otro a medida que sube la temperatura.

Encogimiento: Se vio que mientras la MgO sola o ligeramente ligada con ácido bórico daba un pequeño encogimiento aún a 1200 °C, los revestimientos comerciales exitosos mostraban una expansión permanente de más de 1,5 a 1200 °C, el encogimiento era mucho mayor. Se concluyó que el encogimiento a alta temperatura no es serio siempre que el revestimiento muestre una expansión positiva a una temperatura intermedia, lo que produciría compresión en la zona intermedia del revestimiento, con el consiguiente sellado.

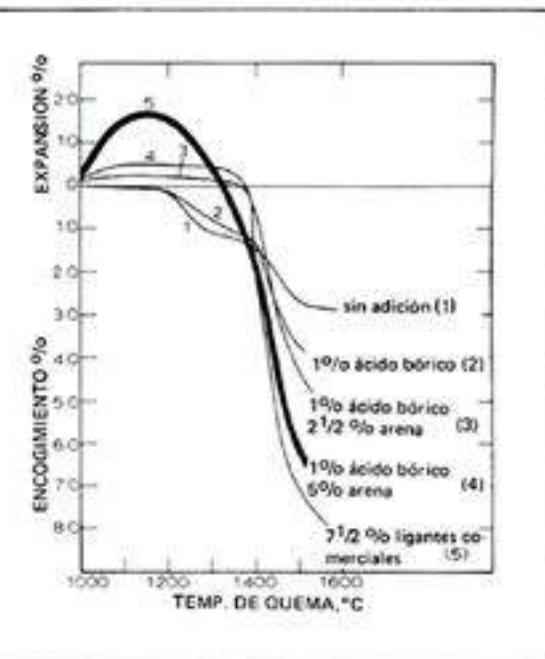


Fig. 8. Efecto del ácido bórico y la arena sobre el encogimiento al calentar MgO de agua de mar.

La figura 8 muestra que los ligantes comerciales de bórax más arena al calentarlos causaban



FABRICANTES DE LA LINEA MAS COMPLETA DE
REFRACTARIOS DEL PAIS

LADRILLOS Y ESPECIALIDADES • BASICOS • ALTA ALUMINA
SILICO ALUMINOSOS • CARBURO DE SILICIO • AISLANTES
FIBRAS CERAMICAS.



REFRACTARIOS CHILENOS S.A.

PANAMERICANA NORTE 3076 - CASILLA 1335 SANTIAGO

FONO: 771305 STGO.

primero una disolución de la arena en el bórax y luego el vidrio así formado reaccionaba con el MgO, dando una capa de forsterita que producía la separación de los granos. Una expansión permanente se conseguía así a expensas de un aumento de la porosidad. Al aumentar la temperatura la forsterita se redissolvía en el líquido, generando MgO y una gran cantidad de fundente lo que explica el gran encogimiento a 1600°C.

Hoy se hacen controles de calidad para caer en el rango de 2% de expansión y con una dispersión menor que 1%.

Resistencia a la Escoria: Aunque el revestimiento mismo es la prueba final, siempre conviene ensayar los materiales realmente nuevos, para lo cual pueden probarse crisoles llenos con escoria, o bien, viendo el punto de fusión de mezclas (conos o píldoras) de refractorio más escoria.

- ii) **MgO-Al₂O₃.** Aquí se ha añadido suficiente Al₂O₃ para dar una sustancial reacción expansiva al generar MgO·Al₂O₃ que tiene una menor densidad que el promedio entre MgO y Al₂O₃. La velocidad de esta reacción no sólo depende de la temperatura sino también del tamaño del grano y de la cantidad de fundente. La máxima expansión ocurre para 70% de Al₂O₃ - 30% MgO, pero en la práctica un 30% de Al₂O₃ o menos, da un sellado adecuado y una mayor resistencia a la escoria. Para una mayor resistencia a la escoria puede usarse MgO muy pura, sin fierro pero dando un material no sinterizado cerca de la bobina y produciendo con esto un mayor riesgo de rotura.
- iii) **Cromo-MgO; Doloma; MgO-Circón; CaO; Al₂O₃-CrO₃.** Se han probado muchos otros revestimientos básicos tanto como monolíticos y como ladrillos. Los resultados son bastante buenos pero no superiores a MgO o MgO-Al₂O₃, y como con la cromita siempre existe el riesgo de contaminación con cromo, no se siguió esa línea. Ensayos con dolomita especial más 1% de ácido bórico como ligante dio buenos resultados, pero la vida obtenida fue apreciablemente menor que con MgO. En

el caso de los ensayos con MgO-Circón la aplicación fue limitada.

Una alternativa obvia a la MgO es la cal. En Aachen (TH) se ha usado CaO electrofundida (que se hidrata más lentamente que la cal siderúrgica) en hornos de inducción de 350 - 1000 kg. de capacidad, con grandes ventajas metalúrgicas, para la fabricación de aceros con bajo contenido en azufre y oxígeno. Para minimizar la segregación de la cal molida al apisonar, se usó aceite en lugar de agua. La duración de revestimientos con 95 - 99% de CaO fue del mismo orden que para los otros básicos.

- iv) **SiO₂.** La cuarcita ligada con ácido bórico o bórax es lejos el revestimiento ácido más usado. Se han utilizado también arenas ligadas con arcilla y mezclas de cuarcita pura con un tercio de cuarcita impura cuyo contenido de fundentes es justo el suficiente para dar la sinterización necesaria. La cuarcita se la puede utilizar cruda o calcinada, mientras que el ácido bórico o bórax añadido es del orden del 1%.

Revestimientos ácidos conteniendo hasta 10% de agua pueden usarse sin riesgo de roturas, como aislante de la bobina, y como esa humedad reduce la segregación y el riesgo de silicosis, se recomienda la adición de una pequeña cantidad de agua.

Ánálisis químico: Pueden usarse cuarcitas de 97% de SiO₂ y también Klebsand que contiene 8% de Al₂O₃ que es muy resistente a las escorias ricas en óxido de fierro.

Sinterizabilidad: Los revestimientos ácidos con una cantidad normal de finos y ligados con ácido bórico sinterizan ya a los 1.000 °C.

Encogimiento: Aquí no hay problema como sucede con el MgO.

Resistencia a escorias: La resistencia de la sílice a las escorias en óxido de fierro es notoriamente inferior que la del MgO, y su empleo como revestimiento se debe a sus características físicas. Hay que tener cuidado al trabajar con aceros altos en manganeso o escorias de CaF₂, ya que el riesgo es mucho mayor que con MgO.



Decano Raúl Smith Fontana.
Seis mil estudiantes bajo su responsabilidad.

Proyección de la Facultad de Ingeniería de la USACH



Por: José Campos B.

Con una interesante experiencia en el campo de la energía nuclear y en la investigación especializada en dicha área, el ingeniero químico Raúl Smith Fontana, 44, antofagastino, asumió en marzo pasado el decanato de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile. Lo cierto es que el señor Smith no era una autoridad recién llegada al plantel, puesto que estaba vinculado a la Facultad por más de quince años, desde que era profesor de la ex Escuela de Ingenieros Industriales (antecesora de la unidad que ahora dirige). Su vuelta este año fue sólo un reencuentro con viejos colegas y exalumnos que ahora habían asumido tareas en la formación de las nuevas generaciones de ingenieros.

Oficial de Ejército e ingeniero egresado de la Academia Politécnica Militar, el Decano, Sr. Smith obtuvo su Master of Science en Matemáticas Aplicadas en la Universidad de Nueva York (1967-1969), donde cursó posteriormente estudios conducentes al doctorado (1972-1974). Luego de desempeñarse como ingeniero de FAMAE y ejercer como profesor ayudante en la Academia Politécnica Militar (Operaciones Unitarias), se retira del Ejército en 1963 y asume tareas académicas en las Universidades Católica de Chile y Técnica del Estado, teniendo bajo su responsabilidad la planificación, organización, coordinación e implementación de la enseñanza integrada de la matemática en el primero de los planteles citados. A la vuelta de su segunda permanencia en los Estados Unidos, ingresa a la Comisión Chilena de Energía Nuclear a cargo de funciones de planificación, coordinación y docencia, participando en el estudio preliminar de factibilidad para la creación de una central nucleoeléctrica en Chile y del pro-

yecto nuclear de potencia, alcanzando su jefatura en 1980.

Con especial dedicación recibió a REMETALLICA y dialogó sobre temas de la mayor relevancia para la Facultad. El siguiente es el contenido del diálogo sostenido:

A pesar de ser un antiguo académico de nuestra Facultad, su llegada al Decanato debe haberle causado más de alguna impresión. ¿Cómo encontró la Facultad en el momento de asumir?

—La encontré más "grande" de lo que me imaginaba. Para darse cuenta de la real magnitud de la Facultad, no basta con saber que tiene alrededor de 6.000 alumnos, ni conocer algunas o varias de sus instalaciones, laboratorios y talleres, o tomar contacto con sus académicos y administrativos u otros funcionarios que trabajan, sino que es necesario, valorar en plena conciencia, la responsabilidad de dirigirla y orientar sus funciones, de acuerdo al "quehacer" universitario recientemente definido.

Sabemos que Ud., tiene muchos proyectos en el ámbito académico, de investigación y extensión. ¿Podríamos conocer alguno de ellos?

—Yo no diría que son muchos, sin embargo, considero que ciertos aspectos previos que debemos enfrentar.

- Una organización funcional adecuada que permita hacer compatible importantes valores tradicionales universitarios, con los conceptos y sistemas actuales de organización y gestión.
- La acción interdisciplinaria que permita potenciar a la Ingeniería en un trabajo integrado y multidisciplinario en torno a la solución de problemas energéticos, ecológicos y del medio ambiente, alimenticios, urbanísticos y otros más.

— El contacto permanente de las estructuras académicas con la Ingeniería e Industria Nacional, como el medio natural para orientar a nuestros ingenieros y graduados hacia la solución de problemas nacionales.

La cooperación internacional, es factor fundamental en el desarrollo. En anteriores entrevistas realizadas en estas mismas columnas, hemos señalado que la Universidad y nuestra Facultad no han usado intensamente esta ayuda externa. ¿Hay algún plan para alcanzarla con mayor intensidad?

— Conuerdo en que la cooperación internacional es muy importante en el desarrollo. Aún más, es fundamental la transferencia de tecnología, cuando ésta se realiza en forma específica y cuando la parte que recibe está mentalizada y preparada.

Nuestra Facultad está entrando a la formación en Post-Grado. Los grados de Magíster y de Doctor, requieren de un ambiente académico permanente y una tradición en investigación, que aunque no la tenemos la estamos formando. El intercambio académico, la participación y presentación de trabajos en eventos nacionales e internacionales científicos y tecnológicos, los programas de becas en estudios de graduados y finalmente, convenios específicos con Universidades de prestigio u Organismos de Investigación en Ciencias de la Ingeniería, son elementos de la cooperación internacional que debemos utilizar. Un plan que considera estos factores, y otros más,

esperamos tenerlo funcionando antes de fin de año.

Parte importante en todo planteamiento, es la atención a los requerimientos en equipos, presupuesto para docencia y, naturalmente, recursos humanos. Pensando a cinco años plazo, ¿qué se puede esperar en nuestra Facultad al respecto?

— En la medida que seamos realistas en nuestra planificación, definiendo claramente los objetivos de la Facultad, que son los de los Departamentos, consideremos las líneas de desarrollo prioritarias, nos propongamos metas y deliniémos estrategias para obtenerlos, podremos alcanzar más de lo que nos propusimos.

Por supuesto, que lo anterior no se cumpliría si no demostramos todos una fuerte y decidida voluntad.

¿Cómo advierte que se realiza la investigación básica y aplicada en la Facultad, en términos de productividad y en cuanto a lo que el país espera de nuestro desempeño como Ingenieros?

— No intentaré separar la investigación básica de la aplicada en Ingeniería, para mí es claro, que es muy difícil evaluarla en términos de productividad.

Creo firmemente que en un país de recursos medios, como el nuestro, se debe orientar y estructurar la investigación, hacia ciertas áreas prioritarias cuidadosamente seleccionadas, de acuerdo a políticas y estrategias de desarrollo.

Nuestra Facultad debe, por una parte, seleccionar esas líneas de desarrollo prioritario que miren la evolución de la ingeniería hacia el futuro y por otra, debe buscar dinámicamente la solución de problemas reales actuales de la Industria e Ingeniería Nacional. Esta última, es muy directa y puede materializarse fácilmente mediante la asistencia

técnica selectiva y calificada y los trabajos de titulación para ingenieros.

Volviendo un poco sobre lo anterior. ¿Qué rol deben jugar, a su juicio, los problemas energéticos y ecológicos en la formación del ingeniero? (A menudo se suele señalar que el primer contaminador de todo ambiente es el ingeniero).

—Considero muy importante, que la formación de todo Ingeniero, considere y profundice sobre aspectos energéticos y ecológicos.

Creo que debe actuarse con una mayor intencionalidad y personalidad en la formación de los futuros ingenieros. En los nuevos planes de estudio de la Facultad, se está estudiando que el currículum obligatorio debería considerar las asignaturas de Energía, Ecología y Medio Ambiente, Garantía de Calidad, Control Automático, Ingeniería de Sistemas y Evaluación de Proyectos, por nombrar lo más relevante. El primer y único contaminador del medio ambiente es la sociedad y su desarrollo. La Ingeniería actual se está preocupando, día a día, en mejorar las condiciones de operación de las industrias o de sus productos para disminuir la contaminación.

Dentro de la misma inquietud por lo que viene, ¿qué factibilidad ve Ud., para la dotación de un nuevo edificio al Departamento de Metalurgia?

—Hay Departamentos que proyectaron un edificio donde poder realizar su actividad en forma integrada y lo consiguieron, hay otros que lo están realizando y otros que lo están planeando. Yo me preguntaría ante todo, si para los intereses de un Departamento eso es importante y más aún es prioritario dentro de sus líneas de desarrollo. Si es así, no debe vacilar un

instante en demostrarlo objetivamente y comprometerse; lo demás viene solo.

Acabamos de cumplir 40 años en la formación de Ingenieros desde que se puso en marcha, la querida Escuela de Ingenieros Industriales y posteriormente nuestra Facultad. Hasta el año pasado la Universidad de Santiago, fue la que más ingenieros graduaba en Chile. ¿Cómo detecta o detectará la Facultad la demanda futura de Ingenieros?

—En primer lugar, es interesante saber qué ha pasado y qué está pasando con los ingenieros titulados por esta Casa de Estudios. He establecido conversaciones con la Fundación Enrique Fröemel con el objeto de que conjuntamente realicemos un esfuerzo para conocer esa realidad.

Creo que una Fundación de Ingenieros de nuestra Facultad por su permanente contacto con el mercado profesional, debe tener una activa participación en producir estudios sobre demanda futura de Ingenieros con la experiencia y formación que nuestra Universidad les da. Existen también otros organismos o instituciones de gobierno o privados que se preocupan de estos estudios.

Finalmente, nuestra Facultad debe estar permanentemente revisando y analizando estos estudios para formular oportunamente las adecuaciones a sus mecanismos, normas y programas que permitan satisfacer oportunamente los requerimientos del mercado de Ingeniería.

¿Cómo participará la Corporación Universitaria para el Desarrollo (CUD), en los planes de la Facultad?

—La Corporación Universitaria para el Desarrollo, CUD, es una corporación de derecho privado, sin fines de lucro, autorizada por el Decreto N° 1317 del Ministerio de Justicia, del 15 de Octubre de 1980, cuyo objeto es crear, estimular, coordinar y difundir, toda clase de iniciativas y acciones que tiendan a desarrollar el nivel nacional de las ciencias, técnicas y artes.

Para que la Facultad de Ingeniería pueda prestar servicios de Ingeniería al mercado, se requiere de mecanismos y procedimientos flexibles. Este proceso puede generarse internamente, de acuerdo a la delegación de atribuciones que proceda hacia la Facultad, o mediante el funcionamiento del CUD, o bien en forma mixta.

Se está definiendo la participación del CUD, a través de un convenio con la Facultad, este convenio regula, entre otros, los siguientes aspectos:

- Responsabilidades y coordinaciones operativas entre: Decanato, Dirección de Asistencia Técnica, Departamentos y Proyectos de Ejecución.
- Mecanismos, procedimientos y gestiones en la utilización de la oferta de Asistencia Técnica de los Departamentos.
- Destino y uso de los fondos recaudados en:
 - Mejoramiento de la infraestructura de la Facultad.
 - Financiamiento y complementación de Becas para Académicos y Profesionales de la Facultad.
 - Financiamiento de Congresos y Seminarios organizados por la Facultad.
 - Financiamiento para la participación en Congresos, Seminarios y Simposium de Académicos de la Facultad.

- Financiamiento para la Investigación que desarrolla la Facultad.
- Inversiones en inmuebles e Infraestructura necesaria para la operación del CUD, que quedaría en el futuro en poder de la Facultad.
- Gastos de operación y mantenimiento del CUD.

Todo lo anterior, debe implicar una complementación, en la medida que los recursos lo permitan, de los presupuestos que debe otorgar la Universidad para la Facultad de Ingeniería.

El Rector ha señalado que se dará especial importancia a la formación de los Post-Graduados y a los investigadores. Concretamente en nuestra Facultad, ¿cómo se materializará dicha política universitaria?

—Estamos definiendo la estructura básica de los Estudios de Pre y Post-Grado. La licenciatura, es condición previa para optar, tanto al Título profesional de Ingeniería Civil, como al Grado de Magíster y éste, a su vez, es previo al Grado de Doctor. La actual estructura de programas, debe ser modificada para generar para el país, las carreras profesionales y grados académicos de acuerdo a sus necesidades.

Por una parte, es conveniente aprovechar las ventajas comparativas de Infraestructura que tiene

mos sobre las otras Universidades, generando alternativas de carreras más cortas.

Debemos tener presente que los alumnos deben financiar sus estudios; luego la extensión de la carrera es fundamental y la opción a una profesión cuyos estudios sean de menor duración, es un factor importante ante la realidad personal que el alumno comienza a experimentar, cuando enfrenta los estudios de Ingeniería.

Por otra parte, los estudios de Post-Grado, deben apoyarse fuertemente en la investigación y ésta debe contribuir al desarrollo de la ciencia y tecnología nacional. Esta contribución debe significar orientar y asesorar a la industria e ingeniería nacional; como asimismo, debe buscar la realimentación de la investigación.

"No somos los grandes contaminadores, sino los únicos rectificadores de tal desequilibrio".



Impacto y perspectivas de la ciencia de materiales en la conversión de energía solar

*Eyes, though not ours, shall see
Sky high a signal flame
The sun returned to power above
A world, but not the same*

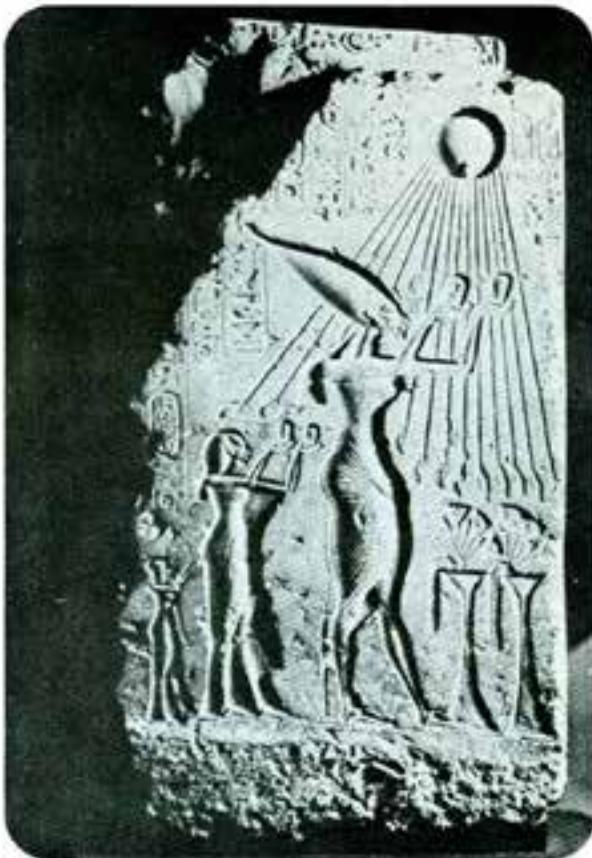
C.D. Lewis



Dr. Jorge Garin C.
Prof: Opto. de Metalurgia

Desde los albores de la humanidad, virtualmente toda la energía consumida por el hombre ha provenido desde el sol. En efecto, el carbón, el petróleo y el gas natural, son residuos de plantas y animales que originalmente absorbieron la energía necesaria para su desarrollo, desde la radiación solar. La energía solar también regula el ciclo de lluvias de la tierra, proporcionando así la potencia para mover grandes generadores hidroeléctricos, y la circulación atmosférica que produce vientos aprovechables en forma de energía mecánica. La luz solar induce el proceso fotoquímico, convirtiendo dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno en las hojas de las plantas, bajo la acción catalizadora de aquella substancia verde llamada clorofila.

El sol es una fuente prácticamente inagotable de energía y no contaminante, capaz de proporcionar, en magnitud, las necesidades energéticas de la sociedad, con un mínimo de consecuencias ecológicas adversas. La transformación de energía solar a gran escala, sin embargo, no es aún compatible con los requerimientos de la economía moderna.



Akenatón, XVIII dinastía, 1.300 años A.C.

Como consecuencia del gran crecimiento industrial en Estados Unidos y Europa Occidental, la

extracción y utilización de combustibles fósiles se convirtió en algo importante en el siglo XIX. La explotación del carbón a gran escala comenzó en 1820, mientras que el uso del petróleo data del 12 de Agosto de 1859, al descubrirse en forma experimental durante la perforación de un pozo en el estado de Pennsylvania. Los combustibles de origen fósil, conocidos desde mucho antes de esa época, se convirtieron repentinamente en la forma favorita de energía en el siglo XIX, como resultado del gran desarrollo de motores que se experimentó durante el período de progresos científicos y tecnológicos alcanzados a fines del siglo XVIII en los países industrializados.

En la actualidad el hombre comprende claramente el peligro de la contaminación y el límite de las fuentes convencionales de energía.

La crisis energética de los años 1973-74 moderó la curva de crecimiento económico de los países desarrollados, pero la fiebre del petróleo no fue curada, solo se aplacó. Hoy en día, no escapa al entendimiento del hombre común, que el petróleo será cada vez más caro y estará prácticamente agotado a fines del presente siglo. Bajo todo punto de vista, es evidente entonces que se deberá aprovechar ese período de tiempo para investigar y desarrollar sistemas de conversión de energía solar, entre otros, de modo que a un nivel económico puedan enfrentar la demanda energética mundial.

El diseño y análisis de sistemas de energía solar se ha basado frecuentemente en principios de la ingeniería perfectamente establecidos. Ello ha derivado en una diversificación del tema, de acuerdo a las disciplinas tradicionales. Es necesario, por lo tanto, considerar un nuevo punto de vista que combine las características de las diferentes especializaciones de la ciencia y la ingeniería en un planteamiento unificado del problema.

Poco se ha realizado en el pasado en relación con la aplicación de ciencias como la electrónica moderna, por ejemplo. Muchas disciplinas de actualidad, en particular la ciencia de materiales, deberán jugar un papel fundamental en la investigación de todos los aspectos relacionados con la captación y conversión de energía solar, lo que hará que la contribución del experto en materiales al problema, sea de importancia decisiva.

Las consideraciones económicas constituirán, sin embargo, el paso controlante del trabajo a realizar. Muchas de las soluciones tecnológicas desarrolladas hasta la fecha, fueron concebidas en el marco de los programas espaciales, con asignaciones presupuestarias prácticamente sin límites, lo cual las hace actualmente inaceptables, si se consideran los balances de costo y energía.

La ciencia de materiales ofrece potencialmente soluciones adecuadas, llevando la tecnología solar

más allá de las barreras económicas que la han limitado hasta ahora.

MATERIALES Y CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR

El proceso de conversión de la energía solar en otras formas útiles de energía, centra sus principios en los fenómenos de interacción de la radiación con la materia. Existen varias alternativas para convertir radiación solar en energía mecánica, eléctrica, térmica y química, a través de captación natural o tecnológica, como se resume en la figura N° 1.

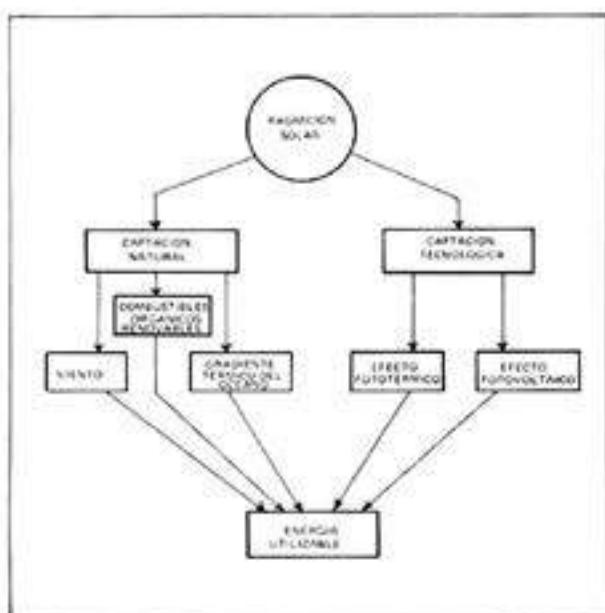


Fig. 1. Alternativas de conversión de Energía Solar.

Hay consenso entre los especialistas en la materia, que cualquier dispositivo de conversión a nivel aplicable debe exceder un valor mínimo de eficiencia para ser económicamente aceptable. Para efectos de generación de electricidad, por ejemplo, dicho valor se define en un 80%. Dado que la conversión fotovoltaica y la conversión fototérmica son las transformaciones de energía que con mayor margen exceden ese valor límite, normalmente se han designado mejores presupuestos de investigación para el estudio de esos fenómenos, a los cuales la ciencia de materiales, a su vez, puede realizar una contribución más efectiva. Debido a que en una sociedad industrializada aproximadamente dos tercios del consumo energético es de carácter térmico, resulta difícil establecer una competencia entre la conversión fotovoltaica y la conversión fototérmica.

Aún más, no es económicamente factible gene-

rar calor a partir de la corriente producida por dispositivos fotovoltaicos, siendo entonces ambos esquemas de conversión igualmente importantes.

CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA. La conversión directa de luz solar en electricidad se obtiene por medio de baterías o celdas solares, a través del proceso denominado "efecto fotovoltaico", que ocurre cuando existe una barrera de potencial en un semiconductor no iluminado. Dicha barrera se localiza en la intercara de dos cristales que han sido dopados con diferentes tipos de impurezas, en concentraciones inferiores al 1%. Si el material se ilumina con fotones de longitud de onda adecuada¹ como se muestra en la Fig. N° 2, las cargas creadas por la luz serán separadas por la barrera, en cargas positivas y negativas, las que se moverán hacia los respectivos electrodos, generando así una corriente eléctrica. Fotones de longitud de onda más corto² crean cargas y calor, mientras que los de longitud de onda grande³ pasan sin efecto a través de la celda.

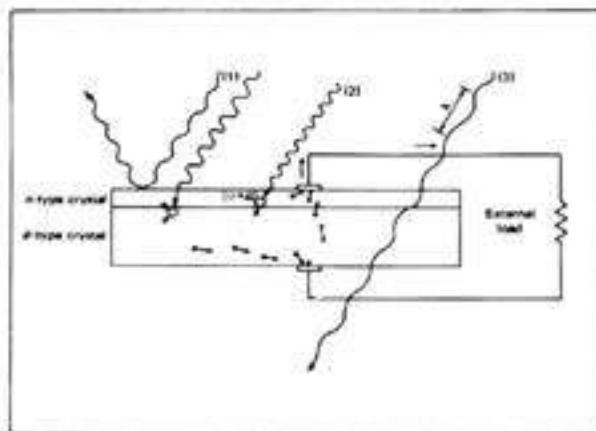


Fig. 2. Esquema de una célula fotovoltaica.

Todos los semiconductores exhiben el efecto de conversión fotovoltaica. Los aisladores son inapropiados a causa de su baja conductividad, y los metales son insensibles a la luz, debido a su alta concentración de electrones en la oscuridad. Hasta el momento, el silicio es el material más utilizado en la conversión fotovoltaica de energía solar. A pesar de que este elemento no es el más conveniente desde el punto de vista de la eficiencia, es el que ofrece un menor costo de fabricación, con una tecnología perfectamente bien desarrollada. Las celdas de silicio llamadas de bajo costo, se construyen con material monocristalino obtenido por medio de un proceso de solidificación bajo acción capilar de una matriz de grafito, según se muestra en la Fig. N° 3. Los rendimientos conseguidos hasta hoy con celdas solares comerciales de silicio varían en-

tre 10 y 150%. A nivel de laboratorio se ha realizado un esfuerzo considerable para incrementar ese rendimiento, habiéndose alcanzado valores de 17 a 190%, muy cercanos al máximo teórico de 220%.

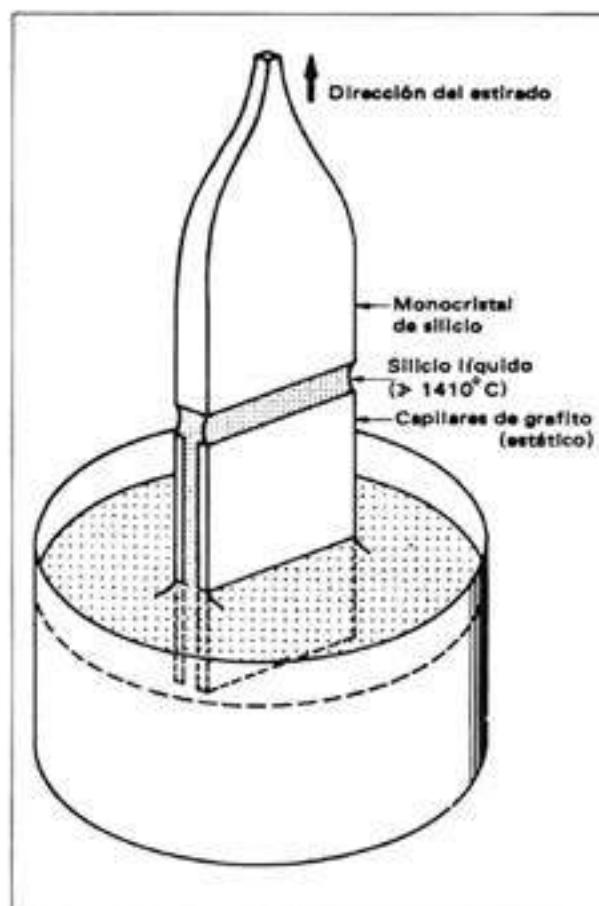


Fig. 3. Fabricación de láminas de silicio para celdas fotovoltaicas.

Después del silicio, el material que más ha atrajido la atención para efectos de conversión de energía solar, es el sulfuro de cadmio (CdS), que muestra muy buen rendimiento cuando se emplea asociado con sulfuro de cobre (Cu₂S), en las llamadas heteroestructuras CdS-Cu₂S. La producción comercial de celdas solares de CdS se proyectó por primera vez en 1974.

La tecnología consiste en un substrato sobre el cual se evapora una capa de CdS de 20 micrones de espesor con una fina película de Cu₂S en su parte superior. El conjunto luego se sella herméticamente en una cápsula de vidrio.

Un tercer tipo de célula es la de arseniuro de galio (GaAs), que muestra altos rendimientos cuando se usa en forma monocristalina. Debido a sus propiedades físicas, el GaAs es un material óptimo para celdas solares. Por su alto coeficiente de ab-

sorción por la luz visible, toda la energía luminosa se absorbe en una capa superficial de no más de un micrón de espesor. Sin embargo, el consumo de material por unidad es considerablemente mayor que para las celdas de CdS, ya que se necesita un substrato de GaAs monocristalino.

Existen muchas más estructuras y celdas solares de semiconductores compuestos, como Al Sb, InP-CdS, CdTe, SnO₂, pero aparte de las celdas de CdTe, sobre las cuales se está investigando, ninguna de ellas ha logrado el suficiente grado de interés.

CONVERSIÓN FOTOTÉRMICA. Cuando una superficie negra se expone a la radiación solar, absorbe energía y aumenta su temperatura. Los colectores de energía solar que funcionan según ese principio, consisten en una placa que al calentarse por el sol transfiere parte de la energía a un fluido en contacto con ella, Fig. N° 4. El proceso fundamental actualmente en uso es el efecto "invernadero": una cubierta de vidrio ordinario se coloca sobre la placa negra, de modo que el vidrio, que es relativamente transparente a la luz visible, es absorbente para la luz infrarroja emitida por la superficie negra cuando ésta transfiere su energía térmica. La luz infrarroja absorbida por el vidrio es entonces reemitiida en todas direcciones, de tal manera que parte de ella se pierde hacia el exterior y parte es absorbida por la placa colectora, aumentando así su temperatura hasta alcanzarse el equilibrio térmico.

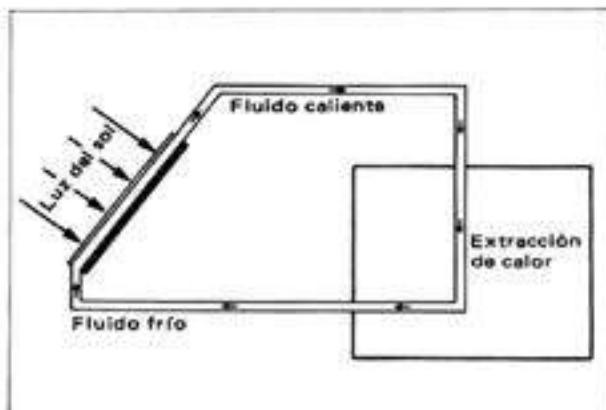


Fig. 4. Efecto del termosifón.

Existe otro tipo de efecto invernadero que se puede utilizar independientemente o reforzando el sistema placa negra-vidrio. Este efecto usa "superficies selectivas", las que se caracterizan por tener un elevado coeficiente de absorción para el espectro visible e infrarrojo cercano. A diferencia del cuerpo negro, sin embargo, tiene un bajo coeficiente de emisión para el infrarrojo, de tal modo que al

absorber la luz solar retienen la energía térmica.

Los recubrimientos selectivos se obtienen depositando finas películas del material adecuado sobre la placa colectora. En general, el espectro de absorción de los semi-conductores los hace aptos para tales fines. Materiales comunes para superficies selectivas son, por ejemplo, el óxido de cobre formado químicamente sobre aluminio pulido; óxido de cobalto u óxido de níquel o capas de Fe₂O₃, MgF₂, SiO, SiN, etc., depositadas desde la fase gaseosa a fin de obtener un efecto de interferencia de la luz. El silicio y los recubrimientos de NiS-ZnS sobre níquel y aluminio y de Cr₂O₃ sobre níquel, con su alta absorción en la región visible y su baja emisión en la infrarroja, son también materiales selectivos.

La utilización térmica de la energía solar en la actualidad es técnica y económicamente factible para calentamiento de agua. La obtención de temperaturas más elevadas, por su parte, requiere el uso de dispositivos de enfoque de radiación. Con este método, por ejemplo, se han alcanzado temperaturas del orden de 4.000° K en el horno solar de Odeillo en Francia.

PERSPECTIVAS

Entre las dos guerras mundiales se hizo un esfuerzo significativo en varios países, principalmente en Estados Unidos, Francia, Alemania e Inglaterra, para el desarrollo de las celdas solares. Los materiales utilizados fueron principalmente silicio y Cu₂O. Debido a que la metalurgia de los materiales semiconductores no había avanzado suficientemente, no se disponía en ese tiempo de materiales como el silicio monocristalino de alta pureza.

La primera celda de silicio se fabricó recién en 1954, por Pearson, Fuller y Chapin. La tecnología básica de las celdas solares de silicio ha mejorado significativamente desde entonces. También se realizaron esfuerzos para el desarrollo de celdas solares de GaAs, CdTe y CdS. Al comienzo de la década del 70, cuando progresó la metalurgia del GaAs, se intensificaron los estudios sobre celdas monocrísticas, llegándose a rendimientos de hasta 20%.

En 1975, la producción mundial de celdas solares de silicio para usos espaciales fue de cerca de dos millones de unidades de 2 x 2 cm, cada una, lo que corresponde a una potencia de 100 Kw. Durante el mismo año, se vendieron por primera vez más celdas solares para uso en tierra que en el espacio, lo que constituyó un resultado considerablemente positivo, al hacerse una comparación con los bajos niveles del año 1973. Actualmente sólo se dispone de celdas de silicio para distribución comercial, pero se están probando otros materiales

con resultados promisorios. En Francia, por ejemplo, se han utilizado celdas de CdS para alimentar globos estratosféricos.



Celda Solar para la alimentación de un faro en Indonesia.

El costo actual de las celdas solares resulta alto, debido principalmente al delicado proceso de manufacturación, que requiere bastante dedicación de trabajadores experimentados, para crecer y cortar los cristales y luego armar el fino dispositivo. Es posible esperar, sin embargo, una gran reducción de los costos de fabricación dentro de los próximos 10 a 15 años, hasta alcanzar el nivel requerido para las centrales de energía solar. Las razones técnicas para creer en una reducción considerable del costo, se basan en un descenso en el consumo de materiales por unidad de potencia, el abandono de la metalurgia sofisticada, a saber el material monocristalino y de pureza ultra elevada y la selección de tecnologías apropiadas para un proceso de producción continua. En cuanto al consumo de las materias primas, sólo se puede disminuir el espesor de las celdas, ya que para un rendimiento determinado, la superficie expuesta al sol es un parámetro absoluto. El uso de materiales monocrystalinos parece inadecuado para celdas de bajo costo, porque la producción de capas monocrystalinas muy delgadas es impráctico y la fabricación de monocrystalinos es más costosa que la de materiales policristalinos.

La celda solar de CdS, es la que más se aproxima a las características de la unidad de bajo costo. El problema se plantea al considerarse las reservas mundiales de cadmio para la producción a gran escala de la celda de CdS. Según cálculos actuales, la reserva total se eleva a la cantidad de 18.500.000 toneladas, siendo Estados Unidos y Australia los principales productores de ese metal.

El cadmio es un producto derivado de la metalurgia del cinc, por lo que la provisión de cadmio depende de la producción de cinc. Se puede predecir que las reservas alcanzarán para una producción a gran escala de celdas de CdS de algunos micrones de espesor, pero no habrá cadmio suficiente para cubrir las superficies que necesitan pe-

lículas más gruesas, de 20 micrones o más.

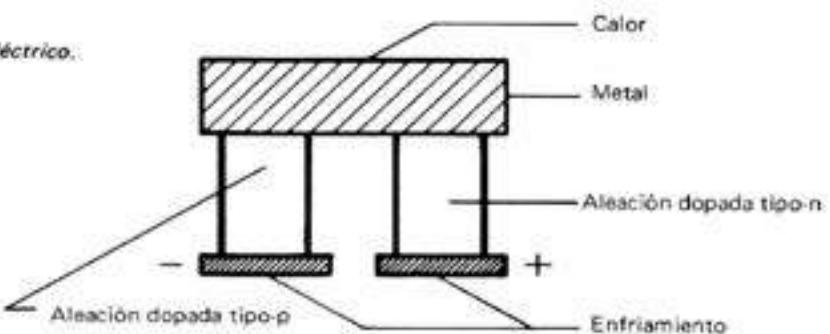
El silicio, por otro lado, es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre. Los límites físicos para el rendimiento de las celdas solares de silicio son comparables a los de las celdas de CdS. Desde otro punto de vista, sin embargo, el proceso de película fina de silicio es más difícil que el de sulfuro de cadmio, siendo el punto de fusión de 1.410°C, la mayor dificultad. Ello hace que el costo actual oscile entre 3 y 25 dólares por metro cuadrado de celda solar.

Es posible fabricar buenas celdas solares sin utilizar silicio de grado electrónico. Con una pureza un poco más baja, actualmente se está desarrollando el silicio denominado de "grado solar", lo que permite anticipar que el costo de polvo de silicio descenderá por lo menos en un 50%, o quizás eventualmente mucho más. Un logro reciente ha sido la construcción de celdas de silicio monocrystalino a partir de silicio metalúrgico con un 20% de impurezas, sometido a dos tratamientos de refinación antes de incluirse en el proceso. Finalmente, se plantea la interrogante de cuánto se puede reducir el costo de transformación a monocrystal por medio de técnicas mejoradas. Es posible reducir el costo total de las láminas monocrystalinas, aumentando sus dimensiones y la velocidad de extracción, junto con posible automatización del proceso, lo que llevaría el costo a probablemente 15 a 30 centavos de dólar por watt.

Otra alternativa interesante de conversión directa de energía solar en electricidad, es el efecto termoeléctrico, que consiste en la generación de un voltaje entre elementos semiconductores dopados con impurezas diferentes, cuando se exponen a un gradiente térmico, Fig. N° 5. Los dispositivos termoeléctricos podrían plantearse como alternativa de generación de energía en pequeña escala en los países en desarrollo. Tienen la ventaja de hacer uso de todas las radiaciones, cuya energía se distribuye entre el espectro visible y el infrarrojo, pero hasta la fecha, su rendimiento es muy pobre comparado con aquel de las baterías solares. A temperaturas obtenibles sin concentración solar, sólo se pueden alcanzar rendimientos del 1%, debido a que la conversión termoeléctrica es un proceso termodinámico. Los materiales más usados actualmente son PbTe, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, AS₂Te₃ y GeSi. El progreso de los termoeléctricos dependerá de la habilidad de los técnicos e ingenieros para sintetizar nuevos materiales, adecuados para construir dispositivos solares, optimizando su diseño y costo de producción.

Finalmente, otra forma de aprovechar la radiación solar es a través de la fotoelectrólisis del agua para producir gas de hidrógeno. En efecto los semiconductores pueden catalizar la descomposición

Fig. 5.
Efecto termoeléctrico.



del agua bajo la acción de la luz. Además del trabajo original llevado a cabo con electrodos de TiO_2/Pt , se han probado combinaciones de $SrTiO_3$, SnO_2 , CdS , ZnO y varios otros óxidos metálicos, con electrodos de platino. Los ánodos semiconductores incluyen también Si, GaP y GaAs. Se lograrán mejores características de este novedoso método de conversión, con semiconductores que combinen valores óptimos de bandas de energía y electronegatividad con estabilidad fotoelectroquímica y propiedades de superficie que estabilicen la barrera de potencial bajo iluminación. Este tipo de celdas, que hasta el momento operan con un rendimiento de menos de 10%, puede contribuir a una futura "economía del hidrógeno", cuando se hayan desarrollado mejores electrodos semiconductores.

La utilización de la energía solar para satisfacer las necesidades energéticas de las sociedades futuras, será probablemente el mayor desafío que deberá afrontar la humanidad. Es razonable esperar que el tiempo necesario para conseguir la energía solar, sea más corto y menos costoso, de lo que fue

para la energía nuclear. Una vez que ello se logre, marcará sin dudas, un avance histórico en el derrotero de las ciencias y la tecnología.

BIBLIOGRAFIA

1. Electricidad Solar, Wolfgang Palz (1978).
2. Principles of Solar Engineering, Frank Kreith and Jan Kreider (1978).
3. Fourth Course on Solar Energy Conversion, International Centre for Theoretical Physics Trieste, Italia (1977).
4. Generadores Termoeléctricos Solares, Hugo Levy, VII Congreso Panamericano de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y ramas afines, Santiago (1977).
5. The Photovoltaic Generation of Electricity, Bruce Chalmers Scientific American, Octubre 1976, p. 34.
6. Estructura y Propiedades Termoeléctricas de Semiconductores Ternarios, Jorge Garín y Hugo Levy, IV Interamerican Conference on Materials Technology, Caracas (1975), p. 215.

CONTRIBUCION DE
Compañía Minera Disputada de Las Condes S.A.



Ing. Jaime Torreblanca,
Prof. Jornada completa,
Departamento Metalurgia,
U. SANTIAGO DE CHILE

La ciencia humana consiste más en destruir errores que en descubrir nuevas verdades". Este aserto de Sócrates se aplica plenamente a la historia del nacimiento de la termodinámica. No es el caso de otras disciplinas, en que un experimento crucial marca la frontera entre dos épocas, el límite entre la sombra y la luz. Se trata, en cambio, de una gestación, una germinación intelectual que se percibe y desarrolla contra la corriente. Es una lucha que desemboca en un doloroso parto, en que los dolores se olvidan con la alegría del nacimiento.

Historia antes de la historia

Para llegar a comprender el contexto en que se produce la sucesión de acontecimientos que originan el nacimiento de la termodinámica, es preciso mirar retrospectivamente hacia las primeras máquinas térmicas y las mentes en que fueron incubadas.

Máquina térmica es la que convierte la energía del calor en energía mecánica (los animales son máquinas térmicas, puesto

ORIGEN DE LA TERMODINAMICA, el enigma de la energía

que mediante el metabolismo transforman energía térmica a baja temperatura en trabajo muscular).

En el comienzo de nuestra era, y un poco antes, ya los griegos construyeron pequeños modelos de máquinas térmicas. En muchos casos se fabricaron como meros juguetes. La más co-

nocida fue la EOLIPILA DE HERON, construida alrededor del año 75, que consistía en una esfera hueca de metal sostenida mediante soportes sobre un brasero. La salida de vapor en sentidos contrarios provocaba la rotación de la esfera.

El porqué de su funcionamiento no se explicó hasta 19 si-

Fig. 1
Eolipila
de Herón



gos después, cuando Newton enunció el ya conocido principio de acción y reacción. Sólo un siglo después se comprendió que al salir vapor de los orificios se estaba transformando energía térmica en cinética, y recién 50 años más tarde, los juguetes de los griegos se transformaron en turbinas de vapor a reacción, capaces de producir trabajo útil.

Sin embargo, también sería necesario la observación del comportamiento del vapor de agua para que se resolvieran importantes problemas técnicos y simultáneamente se avanzara hacia el pleno conocimiento de la energía.

Las primeras notas de observaciones hechas a las propiedades del vapor pertenecen a Ctesibio y Herón. Pero sólo en 1601, Giambattista della Porta, observó que el agua puede hacerse subir en una cámara si se llena con vapor y luego se lo condensa. Otros, también observaron el fenómeno y ya en 1630 David Ramsay obtuvo en Escocia una patente para "Un aparato para elevar agua desde pozos profundos mediante el fuego".

Antes del siglo XVII se usaba como fuente de energía, para el bombeo de agua, a hombres y animales y en menor grado ruedas de agua y molinos de viento.

Durante esta época, los científicos iniciaron investigaciones sistemáticas sobre las propiedades del aire y el agua. Así, en 1643 Torricelli y Pascal inventaron el barómetro, los ingenieros desarrollaron la idea de una bomba de reacción y Otto von Guericke inventó en Alemania la máquina de vacío alternativa.

Recordemos que en ese tiem-

po, también las matemáticas tuvieron un importante desarrollo con la invención de la geometría analítica por René Descartes y el cálculo diferencial por Newton y Leibniz. Newton hizo además contribuciones fundamentales a la mecánica, culminando con sus tres leyes básicas del movimiento.

La Máquina de Fuego

En 1698, el ingeniero inglés Thomas Savery obtuvo una patente para una máquina diseñada para el drenaje de agua de las minas. Le llamó "máquina de fuego", porque el vapor con que operaba era generado por fuego.

Esta máquina la diseñó Savery, según conocimientos, principios y observaciones de otros, más algunas ideas originales propias. Después de diseñar el primer modelo logró respaldo financiero y estableció una fábrica en Londres, en 1702 para la construcción de su máquina. Nació la primera fábrica de máquinas térmicas.

Sobre la base de la "máquina de fuego" se produce un creciente esfuerzo por parte de investigadores e ingenieros por mejorarla y fabricar otras más eficientes y económicas.

Como consecuencia nace la máquina de vapor de Newcomen, tan sólo 10 años después que Savery instalara su fábrica. Esta máquina fue perfeccionada hasta lograr su máximo desarrollo con John Smeaton.

El genio de James Watt hizo posible, cuando se le encomendó la reparación de una máquina de Newcomen, el inicio de una era brillante de la máquina de vapor, que culmina con su adaptación al transporte, en el buque de vapor y en el ferrocarril.

Reflexiones de Carnot

Todos los inventos habidos desde la "máquina de fuego" (1702) hasta la locomotora de Stephenson (1829) fueron concebidos, realizados y utilizados con una limitada comprensión teórica de los procesos que estos involucraban. En el fondo, se trataba de un conjunto de inteligentes diseños para mecanismos. Se hacia ciencia, ciencia de las máquinas, es decir, mecánica, tal como se la definió, ciencia del movimiento, sus causas y efectos.

A esas alturas la mecánica ya estaba ordenada como un cuerpo útil de conocimientos en el "Principia" de Newton, publicado en 1687, y en un tratado de mecánica en forma de texto que en ese mismo año preparó Pierre Varignon. Esta fue la base sobre la que trabajaron los inventores e ingenieros en máquinas térmicas.

Lo asombroso, es que a pesar del desarrollo de las matemáticas y la mecánica, se conociera tan poco de las propiedades mensurables de la materia, las leyes que gobiernan el comportamiento de fluidos y sólidos, la naturaleza de la energía y, en particular, de las relaciones entre las distintas formas de energía.

"Reflexiones sobre la energía motriz del calor" es el título de la memoria publicada por Sadi Carnot en 1824. Con ella, la ciencia dio un gran impulso a la teoría de la máquina térmica. Pasaron 25 años antes de que se reconociera el valor de este trabajo. Las razones, ya son familiares en la historia de la ciencia: Carnot era un físico desconocido, se imprimieron pocos ejemplares, los medios de difusión de literatura científica eran escasos

e ineficientes. Además, durante un siglo el centro de la máquina térmica había sido Inglaterra y no Francia.

Fue Lord Kelvin (William Thomson) quien redescubrió a Carnot, y junto a Clausius, físico alemán, escribió las memorias definitivas sobre las que se fundó la termodinámica clásica, mas, sin duda alguna, la clave la dió Carnot, un visionario, con experiencia tanto académica como industrial y militar (su memoria la escribió a los 23 años). Le llamó la atención la carencia absoluta de una teoría y la total dependencia de procedimientos empíricos para el diseño de máquinas de vapor. El mismo escribió "Si se desea elevar el arte de producir fuerza motriz a partir del calor a la altura de una ciencia, debe estudiarse todo el fenómeno desde el punto de vista más general, sin hacer referencia a un motor, máquina o fluido en particular". Elevar ese arte a la categoría de ciencia fue el objetivo que dominó los últimos años de su breve vida. El resultado de sus investigaciones de gases y vapores se resume en el principio que hoy nos parece evidente: "El agente mecánico mediante el cual se puede obtener efecto mecánico es la transferencia de calor de un cuerpo a otro que está a más baja temperatura". Definió también lo que sería una máquina termodinámicamente perfecta, en lo que se conoce como el principio de Carnot: "Cuálquiera que sea la cantidad de efecto mecánico que pueda obtenerse de cierto agente térmico, si se emplea una cantidad igual para hacerla trabajar en sentido contrario se producirá un efecto térmico igual y opuesto".

Un fluido sin masa

La única nube en el trabajo de Carnot es haber aceptado la teoría del calórico. Se ha dicho en su defensa que no la admitía como una convicción personal, sino más bien como deferencia a la mejor opinión científica de la época.

La teoría del calórico apareció con los primeros intentos por describir la naturaleza del calor. De acuerdo con ella, las manifestaciones del calor se debían a la acción de un fluido que tenía el poder de penetrar y expandir todas las sustancias y convertir algunos materiales en vapor.

Fueron las investigaciones de Joseph Black, profesor de química de la Universidad de Glasgow las que motivaron la formulación de la teoría del calórico, que se sostendía sobre dos postulados:

- 1) El fluido no podía ser creado ni destruido.
- 2) La cantidad del mismo transferida hacia o desde un objeto era proporcional a la masa y a la variación de temperatura del objeto.

Los físicos y matemáticos de la época se sintieron atraídos por esta teoría que parecía bastante admisible y concordante con los resultados experimentales. Incluso Lavoisier jugó todo su prestigio al apoyar el concepto de "un fluido de calor", y precisamente, fue el primero en llamarlo "calórico".

Con el tiempo fueron apareciendo incongruencias que la teoría del calórico no podía explicar. Se observó que al comprimir los gases aumentaba su temperatura y que las superficies expuestas a rozamientos se calentaban si no estaban convenientemente lubricadas. La teoría del calórico explicaba al calor de

fricción como una pérdida de fluido calórico tal como si éste fuera obligado a salir del material. Sin embargo, el conde de Rumford, en 1798, dirigiendo la perforación de cañones en un arsenal de Baviera preparó experimentos con el objeto de medir la cantidad de calor producida en esta operación. Construyó un tanque alrededor del cañón, llenó el tanque con agua y mientras los caballos hacían girar el molino, midió cuánto tiempo debía prolongarse el proceso de horadación para llevar el agua a su temperatura de ebullición. Infirió de sus observaciones que la fuente de calor generada por fricción debía ser inagotable. Este fue un concepto revolucionario. Usando una balanza analítica muy exacta trató de medir el "peso del calor". Las conclusiones a que llegó las expresó así: "me parece extremadamente difícil si no imposible, imaginar algo capaz de producir y comunicarse, como el calor en esos experimentos, a no ser el movimiento".

Los experimentos de Rumford sacudieron la teoría del calórico y provocaron un efecto en cadena que culminó con los experimentos de James Joule, que establecieron, sin duda alguna, que "el calor y el trabajo no son más que manifestaciones distintas de la misma cosa: la energía", nació la teoría mecánica del calor, fundada en dos postulados básicos:

- 1) Si bien la energía mecánica y la energía térmica pueden transformarse una en otra, la energía en sí no puede ser creada ni destruida.
- 2) La conversión del calor en trabajo jamás puede llegar a ser completa, aunque el trabajo puede ser convertido totalmente en calor.

Al presentar algunos resultados en una reunión en Oxford en 1847, Joule se encontró con un joven y brillante físico llamado William Thomson (Lord Kelvin) que había ido expresamente a criticar el trabajo de Joule. No obstante, Thomson haciendo gala de una gran amplitud de criterio escuchó a Joule y después se presentó en privado a discutir con él. Se inició así una fructífera amistad que duró por vida.

Thomson siguió usando la teoría del calórico, aunque le parecían convenientes los experimentos de Joule. El dilema era armonizarlos con el trabajo de Carnot. Empero continuó reflexionando y en 1850 resolvió la incompatibilidad, sin embargo, antes que pudiera dar a luz su trabajo, apareció en la publicación alemana Poggendorff's Annalen otro trabajo, titulado "Acerca de la fuerza móvil del calor y de las leyes del calor que pueden ser deducidas de ella". Su autor: un destacado físico matemático llamado Rudolf Clausius.

El trabajo de Clausius era incisivo y comprensible. Le reconoció a Thomson el mérito de haber aclarado e interpretado las teorías de Carnot y las investigaciones de Joule, sacando a la luz las dificultades y contradicciones que encerraba. Sin embargo, retuvo las verdades fundamentales del principio de Carnot con respecto a la reversibilidad de una máquina perfecta, demostrando que cualquier alternativa violaría el siguiente axioma: "Es imposible que una máquina que actúa por sí sola sin recibir ayuda de ningún agente externo, transporte calor de un cuerpo a otro que está a mayor temperatura". Este se conoce como el enunciado de Clausius del segundo prin-

cipio de la Termodinámica.

Entre 1850 y 1865 Clausius publicó 9 trabajos académicos que transformaron la termodinámica en una ciencia altamente matemática y teórica. Todos estos trabajos reunidos y publicados en 1865 constituyen el primer tratado sistemático de la Termodinámica como disciplina independiente. En el cuarto trabajo de esta serie, Clausius descubrió la existencia de una propiedad termodinámicamente abstracta, a la que después llamaría entropía.

Thomson llegó independientemente a las mismas conclusiones que Clausius, pues leyó el trabajo de éste sólo un año después de ser publicado. En 1851, publicó sus puntos de vista reconociendo el mérito de Clausius, pero reclamando para sí el descubrimiento del segundo principio, estableciendo el siguiente postulado: "Es imposible obtener, por medio de agentes materiales inanimados, efecto mecánico de cualquier porción de materia enfriándola a una temperatura inferior a la de los objetos que la rodean". Este axioma se conoce como el enunciado de Kelvin del segundo principio de la Termodinámica. Se puede demostrar que es equivalente al de Clausius.

También enunció Thomson el ahora conocido como primer principio de la Termodinámica: "Cuando por cualquier medio, iguales cantidades de efecto mecánico se producen a partir de fuentes puramente térmicas, o se pierden en efectos puramente térmicos, se consumen o generan iguales cantidades de calor". Este principio junto a los axiomas enunciados son, según Thomson, la base de la teoría de la potencia motriz del calor.

Clausius también reconoció que la Termodinámica se basaba fundamentalmente en estas dos hipótesis y, efectivamente, sobre estas dos columnas se ha evolucionado hasta nuestros días.

Son dos columnas, dos principios y varios hombres que hicieron posible el desarrollo y aceptación de la teoría dinámica del calor, enterrando definitivamente el error del calórico. Sócrates tenía razón.





Dr. Guillermo Ugarte,
Director Técnico
Comisión Chilena del Cobre,
y Profesor Part-Time Depto. Metalurgia USACH

IMPACTO ECOLOGICO DE LA MINERIA SUBMARINA DE NODULOS DE MANGANESO

INTRODUCCION

La minería de los nódulos de manganeso de los fondos marinos comenzará a escala industrial, probablemente, durante la próxima década. Hasta ahora y en el mediano plazo, se están realizando prospecciones, exploraciones y el desarrollo a escala piloto de los equipos necesarios para la minería y el procesamiento.

En estos momentos puede afirmarse que ya se ha comprobado la existencia de vastos depósitos de nódulos susceptibles de ser explotados con la tecnología en desarrollo y que la factibilidad técnica de la minería submarina ha sido prácticamente demostrada.¹

Entre los aspectos pendientes más importantes está el establecimiento de un régimen jurídico especial, ya que prácticamente todos los depósitos de interés se encuentran en los fondos marinos más allá de las jurisdicciones nacionales.

Mientras todavía continúan las negociaciones de la 3a. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, con miras a lograr una Convención Internacional, algunos países como Estados Unidos y Alemania Federal han promulgado leyes

que permitirán la exploración y explotación de los nódulos independientemente de dicha Convención. A estos países se agregarán próximamente otros países europeos y Japón. Es necesario hacer notar que todas estas legislaciones están cuidadosamente coordinadas entre sí.

A continuación se analizarán someramente los impactos ambientales que puede producir la explotación y explotación de estos nódulos de manganeso.

IMPACTOS ECOLOGICOS PRINCIPALES

Los efectos ecológicos de las actividades de exploración y explotación se producirán tanto en la columna de agua como en el fondo marino.² En la columna de agua los mayores efectos adversos, que pueden ser potencialmente significativos, son la absorción de trazas de metales por el zooplancton y los efectos sobre las larvas de los peces. En el fondo del mar ocurrirán pérdidas de organismos vivos durante la recolección de los nódulos.

El primer efecto se debe, principalmente, a la



Fig. 1. Barco Explorador Governor Ray, Ocean Minerals Co.

descarga de los residuos de sedimentos, agua del fondo, trozos de basalto y nódulos, desde el barco minero, una vez separados los nódulos. Esto produce una lluvia de material fino en la columna de agua situada debajo del barco.

El efecto sobre el fondo es producido directamente por el trabajo del colector e indirectamente por la nube de sedimentos que esto produce a su alrededor. Ambos hechos producen daños a la vida bentónica.

Efectos en la Columna de Agua

Se estima que aproximadamente 2.000 toneladas métricas de sólidos serán descargados diariamente por un barco minero de 5.000 toneladas métricas de capacidad diaria de extracción. Este sólido estará constituido casi en su totalidad por sedimento del fondo. Además del sólido se descargará alrededor de 25.000 m³ diarios de agua del fondo marino.

La "lluvia de finos" producida en la columna de agua se extenderá por cerca de 70 a 100 kilómetros y será detectable por 3 a 4 días después de la descarga.

Las trazas de metal, resultantes de la abrasión de los nódulos durante la elevación por tuberías, pueden ser absorbidas por el zooplancton produciendo cambios fisiológicos y movimientos de estas

trazas en la cadena alimenticia. Por otra parte, la "lluvia de sedimentos" puede afectar las larvas de algunos peces de alta mar como el atún.

Sin embargo, algunos estudios realizados indican que los siguientes efectos no serían potencialmente significativos:

- Daños a las especies migratorias.
- Disminución del oxígeno por aumento de las bacterias.
- Alteración de la composición de las especies del fitopláncton.
- Alta mortalidad del zooplancton.
- Florecimiento del fitoplásmo debido a un aumento de los niveles de los nutrientes.
- Inhibición de la productividad primaria debida a la absorción de trazas metálicas por el fitopláncton.
- Interferencias con la pesca, investigación y operaciones navales.

Efectos en el Fondo del Mar

La acción del colector y la fuerte agitación que produce en los sedimentos, a medida que avanza, destruirán inevitablemente una parte de la vida bentónica. Estos efectos dependerán del diseño del colector empleado. La vida bentónica afectada incluye animales como estrellas de mar, erizos, gusanos poliquetos y anémonas. No están involucra-

dos mamíferos, vertebrados, anfibios u otras formas superiores de vida.

La mayoría de estos pequeños animales viven en los centímetros superiores del sedimento del fondo y reciben su alimento de la lluvia de detritus orgánico que cae de las aguas superiores. La función ecológica de estos animales es decomponer la materia orgánica y reciclar así los nutrientes básicos al ecosistema. Los equivalentes terrestres más comparables a estos organismos marinos son las serpientes, insectos y gusanos que habitan en las cubiertas de hojas del suelo de los bosques. Las estimaciones más pesimistas hasta ahora son de que en cerca de 1% del área de explotación minera submarina, de primera generación, pueda destruirse la vida bentónica. Sin embargo, no es posible concluir por el momento de que este impacto sea realmente significativo.

EFFECTOS DE LA EXPLORACION

La exploración de nódulos de manganeso se realiza con pequeños barcos exploradores provistos de sofisticados equipos de navegación, laboratorios de análisis químicos y diversos equipos de exploración, batimetría y oceanografía entre los que podemos mencionar:

- Ecógrafos para determinación de espesor de sedimentos.
- Medidores y registradores de profundidad.
- Equipos de reflexión sísmica.

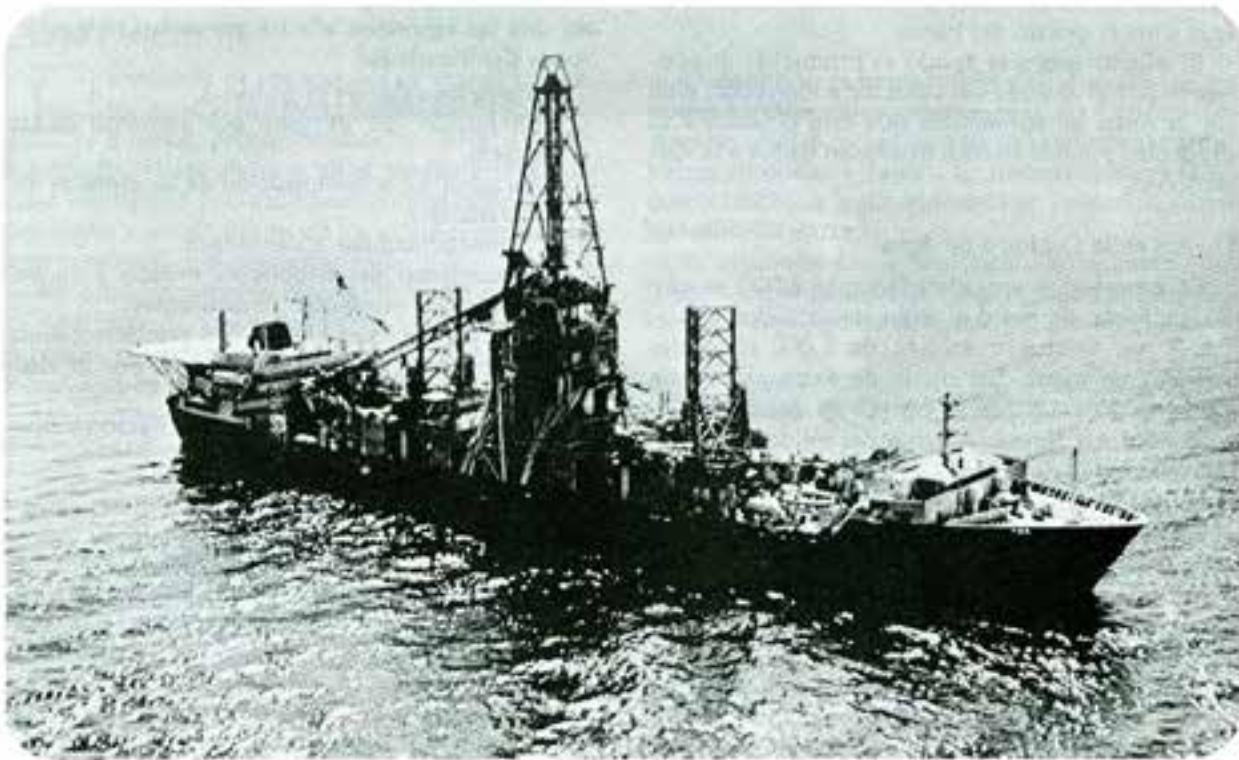
- Medidores de temperatura.
- Medidores de corrientes.
- Medidores de presión de agua.
- Medidores continuos de temperatura, salinidad, presión, etc.
- Cámaras fotográficas y de televisión sumergibles.
- Aparatos extractores de testigos de sedimentos.
- Recolectores de muestras tipo boomerang.

La metodología de la prospección y exploración consiste fundamentalmente en la realización de campañas, cada vez más detalladas, sobre un área de interés. La malla inicial está formada por puntos separados alrededor de 200 km. disminuyéndose gradualmente en las fases siguientes y más avanzadas de exploración.

Estudios realizados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos indican que las siguientes actividades de exploración no implican impactos potenciales significativos en el medio ambiente marino³:

- Observaciones y mediciones gravimétricas y magnetométricas.
- Determinaciones acústicas de perfiles del fondo y capas inferiores sin uso de explosivos.
- Muestreo de minerales de naturaleza limitada, tales como extractores de testigos y de tipo boomerang.

Fig. 2. Barco Minero Piloto Glomar Explorer, utilizado por Ocean Minerals Co.



- Muestras de agua y formas de vida siempre que éstas no afecten moluscos, mamíferos marinos o especies en peligro.
- Observaciones y mediciones meteorológicas incluyendo la instalación de instrumentos.
- Observaciones y mediciones hidrográficas y oceanográficas incluyendo la instalación de instrumentos.
- Observaciones y mediciones mediante televisión o fotografías.
- Instalación de transponders de posicionamiento.

Las únicas actividades realizadas durante la exploración que podrían tener efectos ecológicos potencialmente adversos, son las relacionadas con pruebas a escala piloto de equipos recolectores de nódulos. Este efecto puede estimarse confinado a un 0,01% del área de exploración.

EFFECTOS DE LA EXPLOTACION

Los efectos adversos mencionados en el punto 2 serán provocados por la fase comercial de la extracción de los nódulos de manganeso desde el fondo del mar.

Estos efectos dependerán del sistema de recolección y elevación empleado por el barco minero y de las medidas que se tomen para mitigarlos.

Una forma de reducir drásticamente los efectos sobre la columna superior de agua es instalando una tubería de descarga. Esta tubería permite que la descarga de sedimentos y trozos de roca y nódulos, resultantes de la separación de los nódulos en el barco, no afecte la parte superior de la columna de agua, que es donde se concentra la mayor cantidad de organismos vivos.

Esta medida de mitigación no afecta significativamente los costos estimados de inversión y explotación.⁴

En este momento, no existen en ninguna parte del mundo normas detalladas para prevenir, reducir y controlar la contaminación producida por actividades comerciales de extracción de nódulos de manganeso. Sin embargo, los países interesados en realizar estas explotaciones están estudiando y evaluando los posibles impactos que pudieran producirse con el objeto de dictar las legislaciones adecuadas.

PROYECTO DE LEGISLACION INTERNACIONAL

El Proyecto de Convención sobre Derecho del Mar, que está siendo negociado en Naciones Unidas⁵, indica en el párrafo 1 del artículo 209 que "se establecerán reglas, normas, prácticas y procedimientos recomendados en el plano internacional para prevenir, reducir y controlar la contaminación



- Válvulas de fierro fundido gris para usos industriales, gas, agua, vapor, etc.
- Diámetros desde 50 mm hasta 1200 mm para bajas y altas presiones.
- Piezas especiales de conexión para redes.
- Fundición mecanizada de fierro.
- Fierro fundido gris de alta resistencia según normas ASTM 126 clase B y otras aleaciones para diferentes usos.
- Fierro nodular.

TALLERES METALURGICOS CHILE S.A.

Alvarez de Toledo 764 — Fono 511403
SAN MIGUEL — SANTIAGO

fp Fleet Publications

Representantes de:

Mc GRAW - HILL
JOHN WILEY & SONS

- Chemical engineering
- Engineering and mining Journal

en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, y en puertos, ríos y lagos".

LEGISLACION CHILENA

Con respecto a la contaminación en las aguas jurisdiccionales, la legislación chilena establece en el artículo 142 del Decreto Ley N° 2.222, de Mayo de 1978, que: "Se prohíbe absolutamente arrojar iastre, escombros o basuras y derramar petróleo o sus derivados o residuos, aguas de relaves de minerales u otras materias nocivas o peligrosas, de cualquier especie, que ocasionen daños o perjuicios del medio marino causada por las actividades en la Zona. Tales reglas, normas, prácticas y procedimientos recomendados se reexaminarán con la periodicidad necesaria".

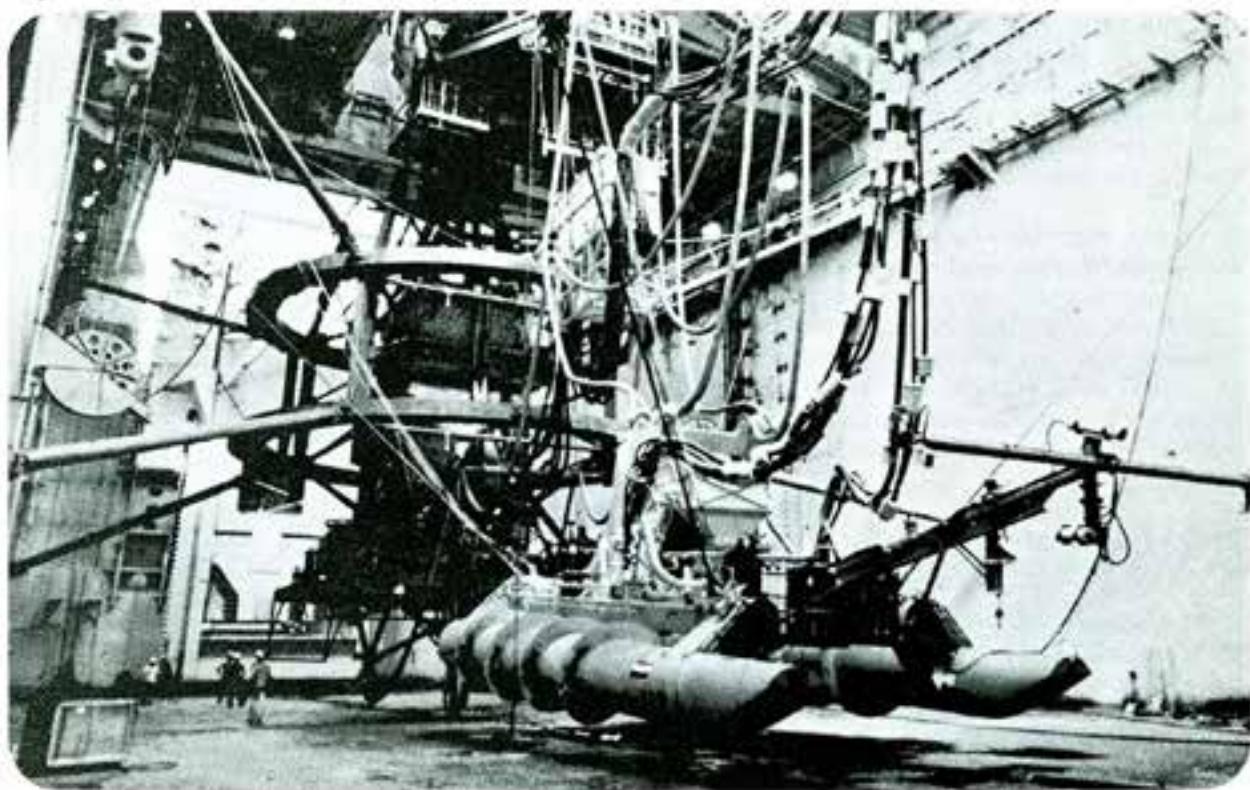
El párrafo 2 de este mismo artículo establece que: "Los Estados dictarán leyes y reglamentos para prevenir, reducir y controlar la contaminación del medio marino causada por las actividades en la Zona que realicen buques, instalaciones, estructuras y otros dispositivos que enarbolen su pabellón o estén matriculados en su territorio u operen bajo su autoridad, según sea el caso. Los requisitos establecidos en tales leyes y reglamentos no serán menos eficaces que las reglas, normas, prácticas y procedimientos recomendados en el plano internacional mencionados en el párrafo 1".

Más adelante, en este mismo Decreto Ley, se establece que el reglamento determinará la forma en que se ejercerán las funciones que se asignan en este artículo y que se establecerán las multas y demás sanciones para los casos de controversias, aplicables al propietario de la instalación; al propietario, armador u operador de la nave o artefacto naval, o a las personas directamente responsables del derrame o infracción.

REFERENCIAS

1. G. Ugarte "Situación Tecnológica de la Minería Submarina". Anales del Congreso Cincuentenario "Minería de Cobre Porfídicos", Vol. I, Instituto de Ingenieros de Minas, Noviembre 1980.
2. "Deep Seabed Mining, Draft Programmatic Environmental Impact Statement", Office of Ocean Minerals and Energy, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, March 1981.
3. "Deep Seabed Mining, Proposed Regulations", Office of Ocean Minerals and Energy, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, March 1981.
4. J.E. Flipse. "The Potential Cost of Deep Ocean Mining Environmental Regulation", Texas A & M University, July 1980.
5. "Proyecto de Convención sobre el Derecho del Mar", Tercera Conferencia sobre el Derecho del Mar, Naciones Unidas. DOC A/CONF. 62/WP. 10/Rev. 3, Septiembre 1980.

Fig. 3. Aparato Colector Piloto, escala 1/10, diseñado por Ocean Minerals Co.



Profesor
Antonio Araya M.



LEGISLACION SOBRE CONTAMINACION AMBIENTAL

Reconocer que la capacidad del medio ambiente para recibir todos los desechos que la actividad humana va creando, no es ilimitada, sino por el contrario, sus límites pueden reducirse a extremos que hacen peligrar el equilibrio de la naturaleza y la propia actividad humana; es un hecho reciente, al cual aún no nos acostumbramos.

Han sido los episodios agudos de contaminación del aire, del agua y del suelo los que han creado realmente una conciencia general que éste es un problema que se va agudizando y que es imprescindible preocuparse de él ahora, antes que sea muy tarde.

Episodios de contaminación atmosférica, tales como el del Valle de Mosa, en Bélgica, en 1930, los de Donora en EE.UU., en 1948 y los acaecidos en Londres desde 1952, son algunos de los más conocidos, y están demostrando que si no se toma conciencia del problema y se ejerce el control necesario, se puede llegar al punto en que el aire se haga irrespirable y el agua no utilizable, lo que provocaría fenómenos socio-económicos de efectos no fáciles de prever.

A pesar de que este problema ha sido conocido en su verdadera magnitud, recientemente, nuestra legislación tempranamente, en 1916, incorpora una ley, la

ley N° 3133, que establece la prohibición de vaciar en acueductos, cauces artificiales o naturales que conduzcan aguas, vertientes, lagos, lagunas o depósitos de agua, los residuos líquidos provenientes del funcionamiento de los establecimientos industriales, mineros o de cualquier especie, y que contengan substancias nocivas a la bebida o al riego, sin previa neutralización o depuración por medio de un sistema adecuado y permanente. Indica, además que los residuos no podrán contaminar el aire o dañar las alcantarillas u otros sistemas de desagües.

Posteriormente, la ley N° 9006 del 9 de Octubre de 1948 insiste en la prohibición para las empresas fabriles o mineras de lanzar al aire humos, polvos o gases, y vaciar al agua productos o residuos de sus operaciones, que puedan afectar la salud de los habitantes, los productos vegetales o alterar la condición agrícola de los suelos.

En 1931, se promulga el Código Sanitario que establece la obligatoriedad de tomar medidas que permitan controlar todos los elementos, factores o agentes del medio ambiente que afectan la salud, seguridad y bienestar de los habitantes.

Este Código fue modificado y publicado en 1967 y está actualmente en vigencia, y en su título IV del Libro I se refiere específicamente a la contaminación del aire y a ruidos y vibraciones.

Del Código Sanitario ha derivado una serie de regla-

mentos que refrendados por la autoridad correspondiente mediante Decretos y Resoluciones, constituyen un cuerpo legal de aplicación actual y cuyas disposiciones se han dictado en beneficio de todos.

Las disposiciones principales relativas a contaminación atmosférica se encuentran contenidas en los siguientes Decretos y Resoluciones:

- Decreto N° 762 del 6 de Septiembre de 1956, del Ministerio de Salud Pública, fija el Reglamento de Condiciones Sanitarias Mínimas en la Industria.
- Decreto N° 144 del 2 de Mayo de 1961, Ministerio de Salud, específico sobre Contaminación Atmosférica, establece obligaciones y responsabilidad respecto a las emanaciones de cualquier natu-

raleza, de aquellas procedentes de calderas, incineración al aire libre de hojas secas y basuras en el radio urbano.

- Resolución N° 1214 del 22 de Junio de 1978 del Delegado de Gobierno en el S.N.S., establece las normas de emisión de contaminantes evacuados por el tubo de escape de vehículos motorizados.
- Resolución N° 1215 del 22 de Junio de 1978, del S.N.S., que fija normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica, fija normas de calidad del aire y normas sobre proyectos de control de fuentes estacionarias.

En relación con la contaminación de aguas y suelos hay legislación dispersa que incluye lo establecido en lo general por el Código Sani-

tario, más lo que específicamente han establecido algunas reparticiones ministeriales, tales como Obras Públicas, Agricultura y Minería.

La tendencia a futuro es concentrar los esfuerzos estatales en relación con el control ambiental y unificar criterios de calidad del medio, con lo cual la actual legislación deberá seguir ese mismo camino.

Sin dejar de considerar la importancia del esfuerzo legislativo y de las autoridades estatales para establecer controles sobre la contaminación del medio, es preciso tener presente que la mejor acción corresponde a crear conciencia en el individuo que la contaminación es el resultado de su propia actividad y el principal beneficiado con dicho control es él mismo.

FORJADORES DE UNA NUEVA CIENCIA: **SIR NEVILL MOTT**

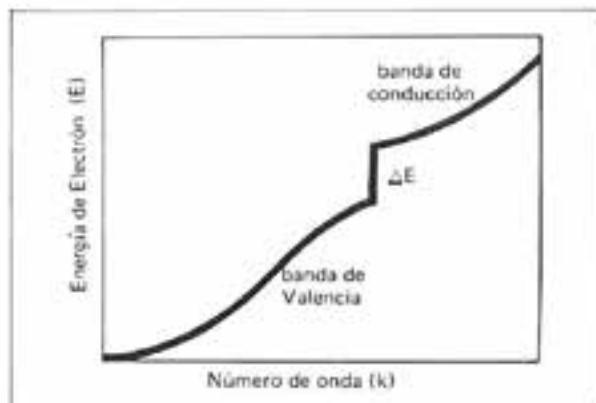
Muchos son los hombres de ciencia que han contribuido notablemente, durante el presente siglo, al desarrollo vertiginoso de la Metalurgia, como tecnología, ciencia e ingeniería. La física de metales, disciplina que constituye uno

de los pilares principales de la ciencia metalúrgica, ha merecido gran atención de los cultores de esa rama del saber, destacándose entre ellos el brillante físico inglés SIR NEVILL MOTT, quien dedicó largos años de su vida como investigador, a dilucidar

muchos de los fenómenos más importantes que caracterizan a los metales, estableciendo así nuevas fronteras del conocimiento de esa ciencia.

A principios de la década de los años 30, el profesor Mott desarrolló la teoría cuántica sobre colisiones atómicas y escribió el libro clásico sobre el tema, con SIR HARRIE MASSEY. Posteriormente, escribió dos de los textos más conocidos sobre física del estado sólido, con H. JONES sobre metales y con R. GURNEY sobre cristales iónicos; el primero de ellos presentó varios conceptos modernos sobre la estructura de bandas. Durante el mismo período, Mott contribuyó también a la teoría del efecto fotográfico y dio a conocer importantes discusiones sobre el fenómeno de semiconducción, como la rectificación, por ejemplo, y sobre defectos cristalinos en sólidos iónicos. Bajo la supervisión de Mott, un grupo de investigadores, que incluyó a Sir Frederick Frank, realizó interesantes trabajos en dislocaciones, defectos cristalinos y propiedades mecánicas de los cristales metálicos. Mott también efectuó aportes significativos a la teoría de la plasticidad, especialmente en lo que

se refiere al fenómeno de endurecimiento por deformación. De acuerdo a la teoría de bandas, el óxido de níquel debería ser un conductor metálico; sin embargo, es un aislador. Mott demostró en 1949 que ese comportamiento se podía explicar tomando en consideración la interacción entre electrones. Ese trabajo derivó en el estudio de las transiciones metal-aislador, frecuentemente denominadas "Transiciones de Mott", las cuales ocurren cuando la densidad de electrones disminuye o cuando la distancia interatómica aumenta.



Energía de los electrones libres en sólidos cristalinos.

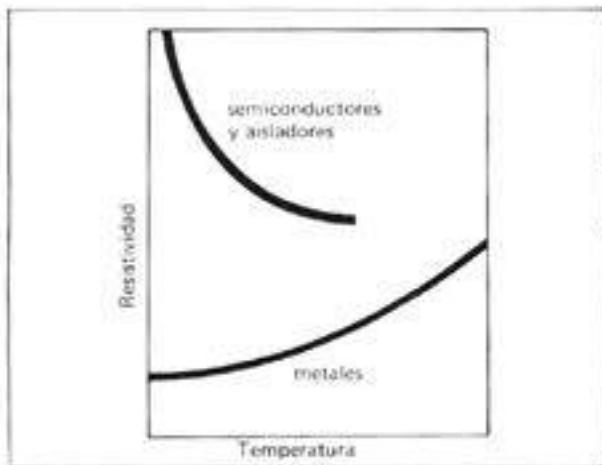


A comienzos de la década del 60, Mott llamó la atención, especialmente para beneficio de la física experimental, sobre la "Localización de Anderson", puntualizando que tales estados localizados ocurren en muchas situaciones. Durante los años siguientes, el físico demostró el significado e importancia del fenómeno a través de dos de sus ideas: transiciones de rango variable y conductividad metálica mínima. En 1967 Mott y Algaier describieron la conductividad metálica mínima, que es el menor valor no activado de la conductividad, de modo que en régimen metálico alcanza a un mínimo de aproximadamente $1.000 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Mott destacó la importancia del borde de movilidad, indicando que podía ser detectado del valor de la conductividad mínima, y propuso experimentos para demostrar su existencia. Junto con E. Davis es



Dr. Jorge Garín C.
Profesor Depto. Metalurgia

autor de dos textos clásicos sobre propiedades electrónicas de los materiales no cristalinos. En 1968, Mott presentó una interpretación microscópica de la conductividad en función de la temperatura, T : a altas temperaturas los electrones "saltan al nivel más cercano, pero a bajas temperaturas lo hacen hacia centros más distantes. La conductividad varía entonces como ($- \text{constante} / T^{1/4}$). Esa idea fue la base del análisis de transporte por transiciones.



Resistividad eléctrica de los sólidos cristalinos.

Durante la sexta conferencia conmemorativa de Hume-Rothery, dictada por el profesor Nevill Mott en el Departamento de Metalurgia y Ciencia de Materiales de la Universidad de Oxford, en marzo de 1980 el físico declaró: "Fue a través de William Hume-Rothery que me interesé por primera vez en los electrones en metales, y luego progresivamente en todos los aspectos de la física de estado sólido. En 1933 me cambié de Cambridge a Bristol para ocupar un cargo académico en física teórica, ocasión en la cual me encontré con Harry Jones, quien recientemente había aplicado la mecánica cuántica a las reglas de Hume-Rothery para aleaciones. Yo no había oido previamente sobre aquello, pero me fascinó saber que la mecánica cuántica se podía aplicar a problemas de tal importancia práctica como son las aleaciones metálicas, y fue eso más que nada, lo que incentivó mi interés a problemas de electrones en sólidos. Mi entusiasmo se hizo aún mayor cuando discutí muchos de esos problemas con Hume-Rothery, elaborando cientos de ideas, pero restringidos por la increíble pequeña cantidad de recursos materiales que Oxford podía asignarle en esa época. Desde entonces, nunca hice un intento serio para estudiar cualquier problema que no tuviese estrecha relación con la materia condensada y, particularmente, con sus propiedades electrónicas y mecánicas. He recorrido un largo camino.

desde el modelo de electrones en sólidos; he tratado de mostrar algo de su éxito, y cómo falla sólo cuando consideramos materiales no cristalinos. En Física, me parece que frecuentemente una simple hipótesis tiene un gran éxito, hasta que un análisis más profundo demuestra que no siempre funciona, debiendo por lo tanto ser mejorada. Esto ocurrió, por ejemplo, con la mecánica Newtoniana —hasta que Einstein apareció en escena. La mecánica de Newton, sin embargo, es tan verdadera como siempre lo ha sido para la mayor parte de los problemas mecánicos que ha debido enfrentar el ser humano. Lo mismo ocurre, en mi opinión, con el modelo de electrones en metales y aleaciones, del cual Hume-Rothery fue el pionero. Para metales, sólo quizás en aleaciones magnéticas amorfas, muchos metallurgistas lo encuentran insuficiente".

El profesor Nevill Mott obtuvo el grado de Bachelor en 1927 y el de Master en 1930, en la Universidad de Cambridge. Fue instructor de matemáticas en la Universidad de Manchester en 1929-30, y sirvió el mismo cargo en Cambridge hasta 1933. Luego fue nombrado profesor de Física en la Universidad de Bristol, donde permaneció hasta 1954. Posteriormente, Mott regresó a Cambridge como director del Laboratorio Cavendish, cargo que ocupó hasta su retiro en 1971. Actualmente es profesor emérito de esa prestigiosa institución, donde ha permanecido hasta la fecha.

La Real Academia de Ciencias de Suecia honró al profesor Nevill Mott con el Premio Nobel de Física en 1977, por sus investigaciones teóricas fundamentales de la estructura de los sistemas magnéticos y desordenados.

Profesor
MOTT





Dr. Agustín León Abello
Director de Extensión
Vicerrectoría Académica

Acerca de la noción de DEFINICION

1. INTRODUCCION

1.1 Preámbulo.

A raíz de una sesión de trabajo de Filosofía, se suscitó el tema "Definición", justamente porque el expositor utilizó este término, que luego desarrolló, para referirse a lo esencial, a su juicio, que caracteriza a esa disciplina. Durante la discusión que siguió, varios de los participantes se valieron, a su vez, de otras definiciones, tanto relativas a Filosofía como a asuntos menores. Entre ellos, quien escribe estas líneas y que fuera comisionado —¿Crimen y Castigo? — para presentar un estudio de la definición.

1.2. ¿Dónde aparecen las definiciones?

Podría creerse que sólo se emplean en Matemática, o en las Ciencias básicas como Matemática, Física, Química y Biología, o en éstas y las Ciencias Sociales. Sin embargo, una simple ojeada a libros, diarios, revistas e impresos de cualquier tipo, amén de la

expresión oral, muestra que las definiciones son una moneda corriente en el comercio cultural, a menudo propia de cada "país". El "Universo" que nos proponemos explorar no es, pues, vacío.

1.3. Definición en Matemática.

En parte por prudencia, pues Matemática es mi "país", pero principalmente porque a partir de la noción de definición en Matemática desarrollaré la tesis que propugno, empezaremos por este contexto, tomando el caso más ilustre: **teoría de conjuntos**, y exponiendo únicamente lo que es pertinente. Los conceptos que siguen corresponden, aproximadamente, a la presentación de Zermelo-Fraenkel (4.1 pág. 1).

a) **Términos primitivos.** Son las nociones de **conjunto** y **pertenece a** o **pertenencia**, que simplemente no se explican (pese a las interpretaciones materiales que se les puede adjudicar) y que, por lo de-

más, para el desarrollo de la teoría, no necesitan significado alguno, ni siquiera por motivos pragmáticos. Al hacer estas afirmaciones, no se está postulando lo dicho, sino **exponiendo conocimiento adquirido y aceptado, de uso corriente entre matemáticos**.

Veamos la primera definición que cabe dar.

Si X , Y son **conjuntos** y si todo **conjunto** x que **pertenece a** X necesariamente **pertenece a** Y , se dice que X es **subconjunto** de Y .

Nótese que (aparte del idioma castellano y la convención de designar el término primitivo "conjunto" por una letra) sólo se han empleado los términos primitivos "conjunto" y "pertenecer a" para crear un nuevo concepto: el de subconjunto. Para un matemático, que "no sabe" lo que son "conjunto" y "pertenecer a", el concepto "subconjunto" producto de esta definición, será "sabido", ni más ni menos que

como un niño "sabe" lo que es un "peso", ignorando lo que es un "centésimo", sin preocuparse por ello. Veamos otra definición:

Si X , Y son conjuntos tales que cada uno es subconjunto del otro, se dice que son **iguales**.

Se observa que se han utilizado, en esta definición, los términos primitivos y la definición anterior de subconjunto (en la cual está ya inserto el término primitivo "pertenece a", además del de "conjunto").

Esto es sólo el esbozo de la teoría, ya que faltan los axiomas y teoremas y que no veremos ahora. Digamos, sin embargo, que con los dos únicos términos primitivos enunciados se escribe toda la Matemática usual.

2. EJEMPLOS DE DEFINICIONES

- Llamamos **acidosis química** a la presencia ocasional de quetonuria e hiperquetonemia, sin expresión clínica (4.2: pág. 144).
- El cuadro clínico conocido como **colestitis aguda** comprende un conjunto amplio y variable de alteraciones inflamatorias de la vesícula biliar, que va de la colestitis catarral aguda hasta la gangrena de la vesícula (4.3: pág. 407).
- Se llama **hernia abdominal** a un defecto de las paredes del abdomen, que permite la salida de cualquier elemento que normalmente está dentro de la cavidad (4.3: pág. 99).

- El término **cefalalgia** comprende toda molestia o dolor localizado en la cabeza (4.4: pág. 56).
 - **Syntax** is the study of the principles and processes by which sentences are constructed in particular languages (4.5: pág. 1).
 - Las **válvulas** son las piezas que dirigen y regulan la entrada de mezcla fresca y la salida de los gases quemados en la combustión (4.6: pág. 180).
 - **Rotador**: es un dispositivo que hace girar las válvulas en cada movimiento de apertura (4.6: pág. 180).
 - **Acera**: parte de una vía limitada por soleras o por solera y la línea de edificación, destinada al uso de peatones (4.7: pág. 12).
 - **Avenida o Calle**: vía urbana destinada a la circulación de los peatones, de los vehículos y de los animales (4.7: pág. 12).
 - **Berma**: faja lateral pavimentada o no, adyacente a una calzada (4.7: pág. 12).
 - **Calzada**: parte de una vía destinada al tránsito de vehículos y animales (4.7: pág. 12).
 - **Camino**: vía rural destinada al tránsito de peatones, vehículos y animales (4.7: pág. 12).
 - **Mene**: c'est la phase d'une partie au cours de laquelle, après avoir placé le bouchon, tous les joueurs ont joué leurs boules (4.8: pág. 66).
 - **Adoubé**: toucher une pièce amie ou ennemie, non pas dans l'intention de la jouer ou de la prendre, mais seulement pour la mettre correctement en place (4.9: pág. 48).
 - El **B-1** es un avión de ala baja, de geometría variable y en el cual el recorrido de las alas es accionado hidráulicamente entre los 15° y $67\frac{1}{2}^\circ$, mediante un sistema duplicado para evitar quedar sin control si uno de ellos falla (4.10: pág. 80).
 - Se llama **profundidad de un suelo**, al espacio en el cual las raíces de las plantas pueden crecer bien (4.11: pág. 98).
 - **Profeta**: el que habla en nombre de Dios (4.12: pág. 1371).
 - **Profeta**: el que tiene el don de profecía (4.13: pág. 1043).
 - **Poesía**: ieres tú! (4.14: pág. 71).
 - **Definición**: proposición que explica los caracteres esenciales de una cosa (4.13: pág. 418).
- Sería, sin duda, un ejercicio interesante averiguar las "definiciones" de "matrimonio" que dan, respectivamente, en Chile, los juristas, los sacerdotes católicos, los médicos, y un poco de humor: los hombres casados, y comprobará que son distintas entre sí.

3. COMENTARIOS

3.1. Características de una definición.

Del análisis de los ejemplos precedentes se deducen algunas propiedades inherentes a las definiciones.

a) Toda definición emplea tér-

- minos "conocidos". Estos términos "conocidos" pueden ser "primitivos" o provenir de otras definiciones.
- b) Toda definición "propone" un "nuevo" término, que pasa a formar parte del diccionario constituido por los "antiguos" términos, al ser aceptado.
- c) No hay definición "precisa" o "verdadera" ya que, en el mejor de los casos, emplea términos primitivos directamente, los cuales no tienen explicación.
- d) Un mismo ente puede tener "definiciones" diferentes.
- e) En una definición "ideal", no debería haber términos primitivos, todos deberían ser "conocidos". Pero, ¿qué querría decir "conocido" en tal caso? Mientras este "problema" no reviste importancia alguna para un matemático, puede ser esencial para un filósofo o un creyente religioso.
- f) Toda definición tiene por objetivo "condensar" conocimiento, permitiendo así el "comercio" de las ideas en determinado campo del saber, cualquiera sea su lugar en la cultura.
- g) A veces, la empresa de "definir", simplemente no se acomete, como en el caso de la respuesta de G.A. Bécquer a su amada, o en el de la "definición" de Historia, que veremos ahora.

3.2. "Definición" de Historia.

¿Qué es Historia? se pregunta S.G.F. Brandon (4.15: pág. 9)

y en densas y objetivas páginas describe "lo" que hacen los historiadores, su trabajo, ora concreto, ora abstracto, sus planteos teóricos, la noción fundamental de tiempo como una de las categorías principales de nuestra conciencia, de la cual no podemos salirnos para considerarlo objetivamente. Ha de resaltar la importancia de los "momentos cruciales" de la Historia, a menudo asociados a hombres célebres y a veces producto del anónimo "homo sapiens". Así, con mano maestra, mano de "historiador" avezado, nos guía por su reino, hasta hacernos sentir que tenemos una noción inconfundible de "lo" que es la Historia, todo ello, sin haber, ni siquiera fugazmente, mencionado su "defini-

ción", si es que la tiene.

3.3. Palabras finales.

Propongo, pues, que rehusando definitivamente definir "definición", y adoptando una actitud realista y objetiva, se reconozca como "sabia" la posición siguiente: para quienes trabajan, en el más amplio sentido de la palabra, en determinado aspecto de la cultura humana, las definiciones aceptadas por los líderes de un determinado ámbito, se acuñan, pasando a formar parte del patrimonio de conceptos de esa rama del conocimiento, cumpliendo su función de vehículo de la comunicación, facilitando la expansión del Universo del saber, que eventualmente modificará estas mismas definiciones.

BIBLIOGRAFIA (por orden de cita en el texto).

- 4.1. León, Agustín; Teoría de conjuntos; LAM, UTE, 1973, (pág. 1).
- 4.2. Pumarino, Hugo; Endocrinología y Metabolismo; Edit. Andrés Bello, 1976, (pág. 19).
- 4.3. Casanueva del Canto, Manuel; Cirugía, tomo II; Edit. Andrés Bello, 1966.
- 4.4. Harrison, T.R.; Medicina, tomo I; Edit. La Prensa Médica Mexicana, 1973.
- 4.5. Chomsky, Noam; Syntactic structures; Edit. Mouton, 1969.
- 4.6. Dillenburger, H.; Tu auto; Edit. Daimon, 1967.
- 4.7. Ordenanza General del Tránsito, Art. 3.
- 4.8. Plume, Christian; Tont sur la pétanque; Edit. P. Horay, 1963.
- 4.9. Tartakover, Xavier; Bréviaire des échecs; Edit. Stock, 1936.
- 4.10. Revista de la Fuerza Aérea (FACH), vol. 36, No 144.
- 4.11. Chile Agrícola, Año 3, No 26.
- 4.12. Nucar y Calunga; Sagrada Escritura; Edit. Biblioteca de Autores cristianos, MCMLXIX.
- 4.13. Alonso, Martín; Diccionario del Español Moderno; Edit. Aguilar, 1966.
- 4.14. Bécquer, Gustavo Adolfo; Rimas; Edit. Los libros del mirasol, 1965.
- 4.15. Brandon S.G.F., y co-autores; Historia universal en sus momentos cruciales; Edit. Aguilar, 1970.



CONTROL DE CALIDAD DE ELEMENTOS SOLDADOS



J.H. Rogerson
Cranfield Institute of Technology
Bedford, England

Introducción.

Señores, quiero referirme a los problemas principales que presenta el control de calidad de elementos soldados.

Este tipo de fabricación impone grandes problemas a su control, debido a que involucra en cierta medida una habilidad artesanal difícil de medir.

Existen dos problemas básicos:

- Cómo definir un nivel de calidad para los elementos soldados en términos, en lo posible, cuantitativos.
- Cómo medirlo y con qué grado de confiabilidad.

Motivaciones del estudio.

Digamos primero el "porqué" estamos tan interesados en el control de calidad de elementos soldados. ¿Por qué es un aspecto importante en la industria de la soldadura? Puedo enumerar cuatro razones:

1. La creciente complejidad de las plantas de proceso; las plantas de proceso, plantas petroquímicas, plantas refinadoras de petróleo, siderúrgicas y otras de este tipo, se construyen cada vez más grandes y complejas. Por lo tanto, los problemas del control y las consecuencias de una falla, son mayores.
- 2) Menor número de plantas pero de mayor tamaño; por consideraciones económicas se construyen en la actualidad, instalaciones tales como: plantas de potencia y plantas químicas, en menor cantidad pero siendo cada una de ellas mucho más grande. Por lo tanto si una falla, hace que la producción de un bien en particular, a través de todo el país, se detenga en su totalidad o al menos en una gran parte.

* Conferencia ofrecida por el profesor Rogerson, enmarcada en el Proyecto Multinacional de Metalurgia de la O.E.A., del cual es miembro asociado este Departamento.

Traducción: Norberto Ponti, estudiante de Ingeniería de Ejecución Nivel 402.

- 3) Costos de materiales, energía y mano de obra; el costo creciente de estos grandes proyectos debido a esos ítems, nos ha hecho llegar al nivel de proyectos de más de un billón de dólares, en forma bastante común. Por lo tanto, cualquier retraso en el proyecto o en el retorno del dinero invertido, es bastante significativo. Debemos asegurar que los proyectos estén finalizados a tiempo, lo que significa que debemos evitar cualquier problema técnico, en otras palabras el control de calidad es muy importante.
- 4) Diseño con tolerancias más audaces y nuevos materiales; como las plantas que estamos construyendo son cada vez más grandes y más complejas, estamos diseñando con tolerancias más ajustadas, utilizando materiales más resistentes y metalúrgicamente más complicados. Estos materiales nuevos son susceptibles al mal uso y las fallas pueden tener graves consecuencias, ya que se diseña para operar a grandes presiones y de nuevo tenemos que el control es importante.

Por todas estas razones, hemos llegado a una etapa en que no podemos ser conservadores. No podemos tomar la antigua actitud de construir lo más rápido posible, inspeccionar y quedar satisfechos. Tenemos que tomar una posición más formal y controlada; se está valorando este nuevo enfo-

que, en la producción de energía, en la industria nuclear, en la industria del sistema de defensa y se está imponiendo en la construcción civil.

También debemos saber que no sólo nos interesan las inspecciones y los N.D.T. (Non Destructive Test), que son una herramienta para asegurar que se ha logrado la calidad deseada así como su control; pero hay muchos otros factores a considerar, algunos de los cuales son más importantes que los N.D.T. con respecto a determinar la calidad de una unión soldada.

Factores fundamentales.

El British Institute of Management, hizo un estudio abarcando un gran número de compañías ingenieriles para tratar de averiguar cuáles eran las causas mayores o principales de lo que se denominó "Los principales problemas de calidad". Determinaron los problemas en términos financieros lo que es hoy razonable, puesto que estamos en una industria competitiva; las demoras y la falta de calidad cuestan dinero.

Causas fundamentales de los principales problemas de calidad

| | |
|--|-----|
| 1. Error humano | 12% |
| 2. Malos métodos de inspección | 10% |
| 3. Especificaciones erróneas o falta de ellas | 16% |
| 4. Falta de pruebas (diseños, materiales y procesos de manufactura nuevos) | 36% |
| 5. Planificación deficiente | 14% |
| 6. Causas imprevisibles | 8% |
| 7. Otros | 4% |

Este estudio se hizo hace diez años pero los resultados son muy interesantes y creo que son aplicables a muchas industrias. Lo interesante de esta estadística, desde mi punto de vista, es considerar que las causas 3 y 4 totalizan más de la mitad de las causas de los problemas. Lo importante de estas dos categorías es que se relacionan con decisiones tomadas antes de que la fabricación comienza, en otras palabras están en las manos del diseñador o del gerente técnico y de adquisiciones. Ellas no dependen de la fabricación en la planta, en el sitio del taller, sino que aparecen como resultado de decisiones erróneas en etapas anteriores, lo que constituye una importante conclusión.

Vemos que la mitad de los problemas no están relacionados con malos procedimientos de fabricación, sino que con un mal diseño y mala selección de materiales, por lo tanto no debemos espe-

la más completa línea en soldaduras

- ELECTRODOS ESPECIALES
- FIERRO FUNDIDO
- ACERO INOXIDABLE
- RECUBRIMIENTOS Duros VIDALLOY
- ELECTRODOS MIG Y SISTEMA TIG
- SOLDADURA DE PLATA
- ALUMINIO, BRONCE, ESTAÑO
- FUNDENTES Y PASTAS

* Información técnica disponible



argenta®

SOLDADURAS ESPECIALES

Santa Lucía 0198 - La Cisterna - Santiago.
Teléfonos: 581493 - 587932.
Casilla 155, Correo 13 Santiago.

rar que la sola aplicación de los N.D.T. y de prácticas de inspección resolverían nuestros problemas.

Definición de una norma de calidad.

Necesitamos definir el nivel de calidad en forma muy precisa, porque el metal de aporte y el proceso de soldadura es un método de manufactura muy caro. Si ustedes hicieran un análisis completo y correcto de los costos del proceso de soldadura podrían demostrar que el metal de aporte instalado en términos de dólares por kilogramo, es casi tan caro como el metal más caro en el mundo. ¡Realmente lo es! Si se piensa que cada kilogramo de soldadura vale igual que un kilogramo de oro no se está tan lejos, ya que todos los costos involucrados en la mano de obra, ajustes, inspecciones, etc., hacen al metal de aporte muy caro. Por lo tanto si su calidad es mala y se debe efectuar una reparación, el costo crece dramáticamente. Diré que el costo de la reparación de la soldadura por kilogramo es cerca de tres veces el costo del metal de aporte original. Si consideramos lo que se debe hacer en una reparación de una soldadura defectuosa: inspección, eliminación del defecto trepanando, reinspección, luego soldar (y eso muy bien significa un precalentamiento de varias horas) e inspeccionar nuevamente para asegurarse que la reparación ha sido satisfactoria. Todo esto hace que el costo se aproxime a tres veces el valor de la soldadura original.

Así es como, definir el estándar de calidad en forma precisa es muy importante. Se debe evitar el que un estándar de calidad sea muy alto o muy bajo para un uso determinado; no es lo mismo construir un reactor nuclear que un puente. Para eso debemos saber en qué forma pueden influir sobre el desempeño de la soldadura los diferentes defectos que pueden aparecer en las uniones soldadas y cómo afectarán en el desempeño o en el empleo específico que se les dé.

Clasificación de los modos de fallas.

Existe una buena cantidad de estudios científicos sobre esto y creo que podemos clasificar los modos de falla o mecanismo de falla de las fabricaciones soldadas, fundamentalmente en tres categorías:

- Falla por tracción estática.
- Falla por fatiga.
- Falla por fractura frágil.

Este último modo de falla está restringido enteramente para estructuras de aceros ferríticos, pero como éstas constituyen el 80% o 90% de las estructuras soldadas en el mundo, es tal vez uno de los mecanismos más importantes a considerar.

Fallas por tracción estática.

Trabajos realizados por Kihara¹ en aceros ferríticos y por Rogerson en metales no ferrosos, han demostrado que los defectos comunes en las soldaduras como grietas, falta de fusión, porosidades, inclusiones de escorias, tienen un efecto similar en ambos materiales; la pérdida de resistencia a la tracción estática es proporcional a la pérdida de sección transversal causada por el defecto.

Si consideramos una unión a tope simple, con un defecto en la soldadura y que está tensionada, la pérdida de espesor porcentual se calcula así:

$$\% \text{ Pérdida Espesor} = \frac{t}{T} \times 100$$

Donde: t y T toman los valores que se muestran en la figura 1, y es este porcentaje el que se toma como abscisa en los gráficos 1 y 2 donde se ve la relación lineal entre la pérdida de espesor y la pérdida de resistencia.

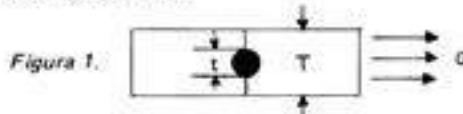


Figura 1.

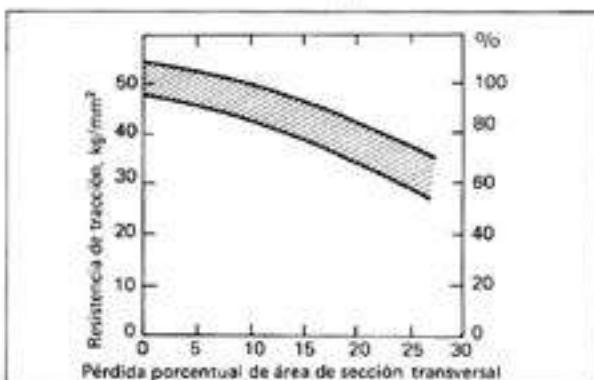


Gráfico 1. Relación entre resistencia a la tracción y defectuosidad en uniones a tope de aceros estructurales¹.

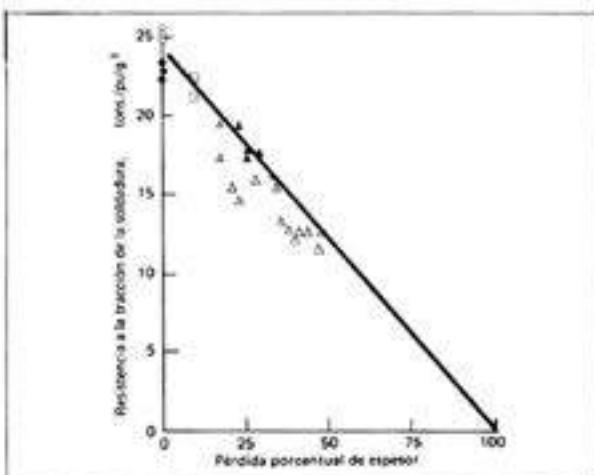


Gráfico 2. Variación de resistencia a la tracción con la profundidad de la falta de penetración². (En placas de 5/8 pulgs. de espesor. Aleaciones Al-Zn-Mg).

Si estos resultados se analizan junto a la realidad de que es físicamente imposible hacer una soldadura con más de aproximadamente un 6-7% de porosidades o inclusiones de escoria, uno puede notar que tales defectos tienen poca importancia en la resistencia de la soldadura.

Falla por fatiga.

Los trabajos hechos por Newman, Young y otros³ sobre el desempeño de uniones soldadas expuestas a fatiga de alta frecuencia, demostraron que las formas geométricas de las uniones tiene una fuerte influencia sobre la resistencia a la fatiga. Esto es ilustrado con los resultados de ensayos de fatiga de un acero al carbono, sometido a una tensión media igual a cero; en el caso de una soldadura a tope, tiene una resistencia a la fatiga de 25 Kgf/mm² a los 10⁶ ciclos, mientras que una unión de filete sólo resiste 5,5 Kgf/mm² a la misma cantidad de ciclos.

Otro factor que determina la resistencia a la fatiga son los defectos de la soldadura, tales como porosidades, fisuras, etc. La influencia de ellos en las diferentes situaciones de fatiga es producida a través de cuanto intensifican la concentración de esfuerzos. Así las porosidades e inclusiones de escoria son mucho menos importantes que las grietas y faltas de fusión.

Es necesario analizar también las interrelaciones entre estas dos variables, forma geométrica de la unión y los defectos. Un defecto de un tipo y tamaño dado, es menos importante en una soldadura de filete que en una unión a tope. Esto es debido a que la concentración de esfuerzos introducida por el defecto es menos significativa en una unión inherentemente más tensionada como es la soldadura de filete.

Falla por fractura frágil

Este tercer mecanismo de falla puede ocurrir al utilizar aceros ferríticos, cuya zona de transición Ductil-Frágil está alrededor de 0 °C. Estos aceros componen la mayor parte de los aceros estructurales y es especialmente en estos casos, estructuras, en que es esencial prevenir la iniciación de una falla catastrófica originada por la rápida propagación de un pequeño defecto como el que podría existir en una unión soldada.

Si consideramos en forma simple que el defecto es una grieta infinitamente aguda, podemos demostrar que hay una intensificación de tensiones alrededor de la punta de la grieta. Esta es una visión simplificada de la mecánica de fractura elemental, pero es suficiente para ilustrar la importancia de los diferentes tipos de defectos.

El factor de intensidad de esfuerzos K , que se relaciona con la geometría de la grieta, es una fun-

ción de la tensión aplicada σ y de la longitud de la grieta $2a$: $K = f(\sigma, 2a)$.

La forma exacta de la función depende de la geometría de la grieta o defecto dentro de la estructura. En todo caso, nos dice que existe un multiplicador de esfuerzos en la punta de la grieta y que obtendremos el inicio de la propagación de la grieta si esa intensificación excede un valor crítico, el cual es una propiedad del metal. En otras palabras, si se excede a la tenacidad del material se produce el inicio espontáneo del crecimiento de la grieta y una posterior falla catastrófica. De aquí concluimos que la importancia del defecto depende de su tamaño, de la tensión aplicada y por supuesto de las propiedades del material. Por lo tanto, los defectos que no pueden generar una gran intensificación de esfuerzos no son importantes desde este punto de vista; nuevamente las porosidades e inclusiones de escoria en materiales de construcción no inciden mayormente en la calidad de la unión.

Así es como en principio la ciencia de la mecánica de fractura nos permite en teoría definir un tamaño máximo permisible para una grieta o algo que se le parezca en un caso determinado. En la práctica sin embargo, es extremadamente difícil hacerlo, porque tenemos que manejar cuatro factores que no pueden ser medidos con exactitud y precisión:

1. FUNCION $K = f(\sigma, 2a)$ A UTILIZAR.

Los estudios matemáticos para determinar esta función pueden ser muy complejos, por ejemplo, si se tiene en una plancha plana una unión tubular en lugar de una simple.

2. ESFUERZO APLICADO.

Es también muy difícil poder evaluarlo con precisión, porque están los esfuerzos de las cargas de trabajo y los esfuerzos residuales. ¿Cómo medirlo para una unión complicada? Ya es necesario entrar en suposiciones.

3. PROPIEDADES DEL MATERIAL.

¿Cómo medir con exactitud y precisión la fractotensión del material? Con gran dificultad y nadie confía, ni está totalmente de acuerdo, en cómo interpretarla. Las mediciones de fractotensión presentan una gran desviación estándar. ¿Cómo manejamos eso en una ecuación?

4. TAMAÑO DEL DEFECTO.

Finalmente ¿cómo medir el tamaño de la grieta, $2a$? ¿Cómo conseguir un método no destrutivo que sea lo suficientemente preciso y confiable para medir $2a$? Bueno, la respuesta es que generalmente no se le consigue.

Por lo tanto, cualquier análisis que se haga tendrá que ser de carácter conservador y tenemos que introducir una cantidad de factores de seguridad,

de tal modo que al final podamos decir que no toleraremos ninguna grieta y en cuanto a los demás defectos, como porosidades e inclusiones de escoria, decir que en la mayoría de las veces no tienen importancia. La forma de la soldadura sí puede ser defectuosa, pero es algo que se puede medir y arreglar sin mayores problemas. Los defectos como grietas y con forma de grietas son los indeseables, porque no podemos estar seguros de cuál es el máximo tamaño que podemos tolerar ni tampoco medir el defecto con precisión.

Así es como podemos definir una norma de calidad que es algo diferente a las normas convencionales de fabricación, es un poco más relajada si se quiere, pero creo que la podemos respaldar.

Es importante recordar que menos del 15% de los defectos son del tipo grieta, siendo la gran mayoría de ellos relativamente poco importantes, por lo que nuestra búsqueda se centra en un número pequeño de defectos peligrosos, lo cual nos lleva al próximo tema.

Métodos de ensayos no destructivos (N.D.T.).

- RADIOGRAFIA
- ULTRASONIDO
- TINTAS MAGNETICAS.

Se supone en forma implícita que el nivel de calidad de la unión soldada está definido en términos del nivel de defectos más que en términos de las propiedades mecánicas de la soldadura. Consecuentemente los N.D.T. son los métodos naturales para medir el nivel de calidad de la unión.

La radiografía es un método muy confiable, en parte porque es una técnica bien definida y los procedimientos radiográficos, los equipos, películas y métodos de observación, están bien definidos en normas apropiadas y además porque proveen de un registro permanente de inspección, la radiografía, junto con una medida definida de la sensibilidad de la técnica. Desafortunadamente, no es adecuada para defectos de principal importancia en el desempeño estructural (grietas, laminaciones, faltas de fusión en unión soldadas) y no es posible garantizar que tales defectos serán siempre detectados por la radiografía. Este método de inspección es más útil cuando se le considera para estimar los niveles globales de calidad, más que para encontrar y determinar el tamaño de un defecto específico.

Las inspecciones por ultrasonido en los últimos años se han convertido en el método N.D.T. más importante en la industria manufacturera, precisamente porque puede localizar y determinar el ta-

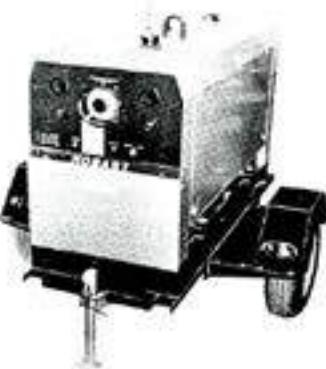
INDURA

VANGUARDIA TECNOLOGICA EN
PROCESOS, MATERIALES Y EQUIPOS
PARA SOLDAR....

LE OFRECE LOS SISTEMAS PARA SOLDAR



Soldadora petrolera,
300 Amp.
Motor Perkins,
partida automática,
poder auxiliar 3KVA/220V.



Línea completa de soldadoras
tipos: transformador/rectificador,
rotativas, bencineras,
petroleras, C.A., C.C., C.A. - C.C.
Sistemas: MIG, TIG,
arco sumergido, soldadura
por gravedad,
Accesorios,
etc.

... Y LOS RESPALDA CON STOCKS, ASESORIA
Y SERVICIO TECNICO PERMANENTES

CAMINO A MELIPILLA 7060 – CASILLA 13850 – FONO 571777 – SANTIAGO
Y PLANTAS EN: ANTOFAGASTA, VALLENAR, VIÑA DEL MAR, SANTIAGO,
TALCA, CONCEPCION, VALDIVIA, PUERTO MONTT

marlo de las grietas. Desafortunadamente, la confiabilidad en la práctica del ultrasonido no es grande. La focalización precisa y la medición del tamaño del defecto descansa en una calibración cuidadosa de las ondas y del lector de registro y es necesario conocer la posición precisa de las ondas con respecto a la unión y lograr un acoplamiento satisfactorio.

La cantidad relativamente alta de variables que se deben controlar, a veces en ambientes difíciles (el lugar de trabajo), significa que es una técnica cuya consistencia y sensibilidad son imposibles de cuantificar.

Las tintas magnéticas son un método simple que todos podríamos usar: lo que se hace es verter una tinta con partículas magnéticas en ella, sobre la superficie a inspeccionar. Nos sirve para detectar grietas superficiales, pero no los defectos interiores ubicados en el cuerpo del cordón.

Predicción de la confiabilidad de las uniones soldadas.

Para estructuras de alta integridad o estructuras donde las reparaciones y mantenimiento son difíciles o caras, es deseable conocer la confiabilidad de la estructura, en otras palabras, la probabilidad de que la estructura falle antes de llegar al fin de su vida de diseño. El nivel de calidad de la soldadura es de gran peso en la determinación de esa confiabilidad.

Existen dos modelos que parecen ser una gran promesa, concebidos por Lidiard y Harrop⁶ para predecir la confiabilidad de estanques de un reactor de potencia nuclear y el de Bokalrud⁸ para predecir la confiabilidad de estructuras petroleras de alta mar. No siendo la intención discutir aquí los modelos, sí cabe detenerse en algunos puntos.

En cada caso se hacen algunas suposiciones para obtener un modelo operativo. La suposición más importante es que se toma como modo de falla la fractura inestable resultante del crecimiento de una grieta por fatiga, en el caso de los estanques del reactor de potencia, y falla por fatiga en el pie de la soldadura, en el caso de estructuras en alta mar. También debe suponerse la distribución de los defectos y de las propiedades del material (principalmente la tenacidad), por falta de datos experimentales precisos en estos tópicos.

A pesar de estas deficiencias los modelos son muy útiles particularmente cuando dan luces sobre la importancia relativa de las diferentes variables; por ejemplo, se ha demostrado⁸ que las variaciones en la excentricidad de una unión cruciforme es de mayor peso que cualquier otro factor en determinar la probabilidad de falla por fatiga de una soldadura tubular de filete. Esto tiene directa relación con determinar los niveles aceptables de calidad en tales estructuras y métodos de inspección. Es posi-

ble que en el futuro se dé un mayor uso a las predicciones de confiabilidad para determinar las normas y procedimientos del control de la calidad.

Acotaciones finales.

El enfoque general de sistemas del garantizado de la calidad, es esencialmente el mismo, cualquiera que sea la industria o sus productos. Las acciones físicas que deben tomarse, por supuesto, son altamente específicas de la industria y productos.

Aunque en el caso de la manufactura soldada estas acciones físicas son frecuentemente ejecutadas sobre la base de experiencias y juicio ingenieril subjetivo, hay una creciente conciencia de la necesidad de conseguir una estructura más lógica para tales acciones.

Todo esto provee de impetus para definir normas de calidad en forma más razonable, para determinar la confiabilidad de los N.D.T. cuantitativamente, para proveer de datos más precisos sobre calidad, y finalmente, para desarrollar medios de predecir el efecto de los cambios en la calidad sobre la confiabilidad a futuro o sobre la probabilidad de falla.

REFERENCIAS.

1. Kihara, H., Tada, Y., Watanabe, M., Ishii, Y., The Naval Architects Society of Japan 1970.
2. Rogerson, J.H., 2nd Conference on the Significance of Defects in Welds. The Welding Institute 1968.
3. Harrison, J.D., Conference on the Significance on Defects in Welds, Burdekin, F.M., Young, J.G., The Institute of Welding, 1967.
4. Burdekin, F.M., I.I.W. Colloquium on the Practical Application of Fracture Mechanics, Paper D3 Bratislava, 1979.
5. Johnson, D.P., Nuclear Engineering and Design Vol. 43, 1977, p. 219.
6. Ukaea, An Assessment of the Integrity of PWR Pressure Vessels October, 1976.
7. Rodríguez, P.E.L.B., Cranfield Institute of Technology (unpublished work).
8. Bokalrud, T., I.I.W., Colloquium on the Practical Application of Fracture Mechanics Paper D2 Bratislava, 1979.
9. Rodríguez, P.E.L.B., Wong, K.H., Rogerson, J.H., Offshore Technology Conference Houston, Texas, May, 1980.



James del Peloponeso



Ilustración/Eugenio Santiago



El cotelé, nombre clandestino del cóctel, es una necesidad de la sociedad moderna. Es también una demostración de su refinamiento. Basta comparar un cóctel de hoy con los que daba el César en Roma. Por cierto que al César lo que es del César y a nosotros lo que venga, pero en innegable que desde entonces mucha agua ha pasado bajo los puentes (o muchos asados han sido comidos).

En todo caso, el cóctel sigue siendo una necesidad. Lo necesita el hombre para excusarse en casa. La esposa para desquitarse e inventar un té con las amigas. El jefe para arrancarse a las 11 de la mañana y el subalterno para descansar del jefe.

Por eso está institucionalizado. Y las instituciones de hoy no serían las mismas sin el cóctel. Por ello debe abogarse por un mejor trato hacia su práctica. Hay que retrotraerlo hacia su contenido.

do original y plantearse algunas preguntas de profundo interés para los comensales, (¿comecócteles?, ¿contertulios?, ¿cócteltulios? , no está claro).

Hay que preguntarse cuál es el verdadero sentido de comunicación que tiene el cóctel. Está, por ejemplo, el problema de las aceitunas. Siempre las hay ¿por qué no nueces, pasas o tunas? Alguien dirá que faltaría lo principal: el cuesco. Es cierto, lo más importante es el

cuesco: estimula nuestro don de gente, nos obliga a taparnos la boca periódicamente y de paso nos permite esconder aquellos bostezos impertinentes o las embarazosas manifestaciones aéreas de la actividad estomacal.



Por otra parte, está el acto cumbre de todo el arte del cóctel (Cock-teil art?) : pinchar la aceituna. Hay que jugarse el todo por el todo (digo por la aceituna). Todo está preparado de antemano para el espectáculo. El palito es de mero adorno, resiste sí, justo lo necesario como para alcanzar a levantar la aceituna. Después, se hace evidente la fuerza de gravedad y mientras buscamos la maldita aceituna entre los pantalones claros del vecino y los zapatos taco aguja de su acompañante recordamos a Newton, su manzana, el paraíso y la serpiente.

Vista así la situación es imperioso encontrar una solución, como importar desde Taiwán aceitunas sin cuesco (de Japón no, serían chicas y de plástico), podrían ser autoadhesivas o autodeslizantes, con distin-

tos sabores y perfumadas. O, para poner coto a la situación, mejor que un médico finlandés descubra que la aceituna produce cáncer cuando se la come de pie.

Hay que hacer conciencia de los riesgos que involucra un cóctel. Se debe terminar con las anarquías en este sentido, por el bien de toda la humanidad. Cada invitación debería especificar las bondades gastronómicas que se ofrece y, en lo posible, adelantar algo sobre cantidades en peso y volumen, distinguiéndose sólido y líquido. Si será autoservicio con mozos o con mozas, si a discreción o a reacción. A cuántos discursos habrá que someterse, y deseable, una relación discurso/picadillo (lo que podría estandarizarse y hablarse de un factor de efectividad de mandíbula).

También se debe aclarar sobre los vecinos. Si nos toca al lado una promotora de turismo o una pinturita de esas de la tele, bien valdría para neutralizar un discurso acerca del **"Crecimiento sostenido del ingreso per cápita derivado del mayor intercambio promovido por el flujo monetario actual"**. Pero si caemos en el punto geográfico neurálgico del cóctel (léase, medio a medio entre los pierdeteuna) hay que estar sobre aviso, por razones obvias y para sonreír para la foto.

Un elemento importante en el desarrollo del cóctel es la llamada telefónica del anfitrión mayor (el jefe). Cuando la conversa está que arde entra la secretaria, rápida y sigilosa (lo necesario para que todos se percaten) y le dice a media voz **"Llamada urgente"** y agrega pa-



ra remachar en tono seco: **"grado 1"** (esas son claves jefe-secretaria), él comprende de inmediato (por algo es el jefe): Se trata de la señora o en su defecto de su propio jefe, para el caso da lo mismo, se debe recibir órdenes.

El condimento de suspenso, ambigüedad y misterio lo pone el personaje que se ha comentado asistirá. El amigo del amigo contó que asistirá el tal ..., el mismo que trabajó allá y se cambió porque ... el que dicen, etc, etc (el etcétera corresponde al autor). El "tal" no aparece. El inicio se retrasa mientras todos esperan paciente- mente y los intestinos abogan por mejor suerte. Se conversa de relleno, haciendo largas pausas, como oteando el horizonte, mirando de soslayo hacia las mesas: a punto de cortar las huinchas. Se decide comenzar (atacar). Finalmente, el gran ausente se transforma en un espectro que se esfuma a medida que se llenan los intestinos.

¿Se podrá hablar de paracaidistas en un cóctel? Propiamente no. Todos son como paracaidistas. Se les atiende de pie, a la pasada, se les invita a venir pero no a quedarse, se les da de comer pero no una comida, se les abre el apetito y se le deja entreabierto. Todo se sugiere, nada se define. ¿Y los periodistas? , cómo no, infaltables. No se conoce periodista sin cóctel y viceversa (sobre este prototipo de cocteleros no me extenderé para no caer en abuso de la libertad de opinión, pero mi pensamiento me lo guardare para un cóctel).

La clave del cóctel: el motivo. Claro, a veces a nadie le interesa. Es lo de menos. En ocasiones surge espontáneo: la distinción de alguien, un ascenso, una despedida, el cumpleaños del

jefe (lo organiza el Sr. Espina). Son originales, con autoría responsable, con premeditación, gestados en el más secreto de los cuchicheos, "en pro de las mejores relaciones", "para exteriorizar el afecto por". Falso (más que un beso de su- gra).

Como siempre en Chile, todo se encuentra malo. El champagne no estaba a punto y escaso a las burbujas, el queso a prueba de municiones y las papas fritas parecían sopaipillas. ¿Algo más? Sí. Cuando se sirvió, a algunos se les miró feo, a otros se les llenó más las copas y a otros tantos se les llamó al orden. Para remate, el discurso del jefe fue para alabar los méritos más abominables: orden, puntualidad, espíritu de sacrificio, lealtad, superación, etc. (hartos espíritus). Resumen: un cóctel así no es para amigos, no estimula.



Moraleja: "Para no sufrir decepciones, nunca piense en el motivo del cóctel".

.... ICOMA!



Dr. Ing. Marco Solar Baeza

Prof. Departamento de Metalurgia

Fluidización: parámetros de operación

En la operación del lecho fluidizado es importante predecir los siguientes parámetros de funcionamiento:

- Pérdida de carga a través del lecho.
- Velocidad mínima de fluidización.
- Velocidad máxima de fluidización.
- Rango utilizable de velocidad de fluidización.
- Placa fluidizadora o distribuidor.
- Requerimientos de potencia.

Pérdida de carga a través del lecho

Como el lecho fluidizado se origina generalmente a partir de un lecho fijo, las expresiones que se aplican se derivan de las correlaciones de pérdida de carga, en función del flujo, a través de lechos de sólidos granulares.

En un lecho fijo de altura L a través del cual pasa una corriente de fluido, se registra una diferencia de presión ΔP_T (Fig. 1), la cual está formada por la presión hidrostática (ΔP_h) de la columna de fluido de altura L , la fricción entre el fluido y las partículas (ΔP_{f-p}) y la fricción entre el fluido y el tubo (ΔP_{f-t}).

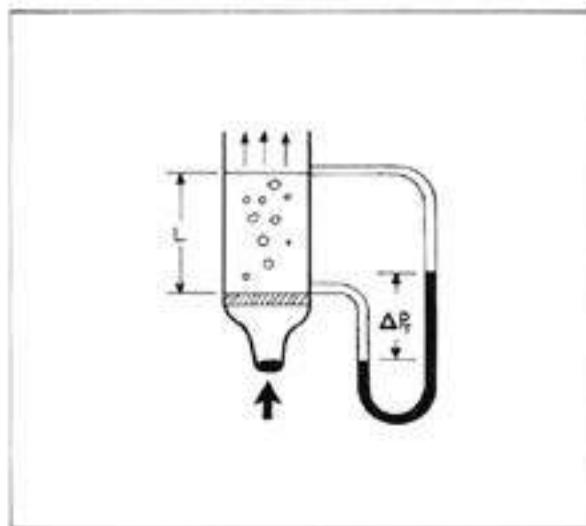


Figura 1.

En general, el término $\Delta P_{f,p}$ es muy superior al término $\Delta P_{f,t}$, ya que el área interfacial fluido-partícula es muy superior al área fluido-tubo, despre-

ciando entonces este término, la expresión anterior se transforma en:

$$\Delta P_{f+p} = \Delta P_T - \Delta P_h \quad (2)$$

En el caso particular que el fluido sea un gas, la presión hidrostática es despreciable y, por lo tanto:

$$\Delta P_{f+p} = \Delta P_T \quad (3)$$

En la literatura especializada existen numerosas correlaciones para ΔP_{f+p} , siendo una de las más utilizada la de Ergun:¹³

$$\frac{\Delta P_{f+p}}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu u_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_f u_0^2}{\phi_s d_p} \quad (4)$$

En esta expresión ϵ representa la porosidad del lecho, es decir, la fracción del lecho ocupado por el fluido; μ es la viscosidad del fluido; u_0 , la velocidad lineal del fluido medida en tubo vacío; ρ_f , la densidad del fluido; d_p , el diámetro equivalente de las partículas y ϕ_s , el factor de forma o esfericidad de las partículas.

Para el caso de partículas de tamaño único, el diámetro equivalente de la partícula se define como el diámetro de la esfera que tiene el mismo volumen que la partícula y el factor de forma como la razón entre la superficie de la esfera equivalente y la superficie de la partícula.

Para una partícula cúbica de arista "a", se tiene:

$$d_p = a \sqrt[3]{6/\pi}$$

$$\phi_s = \sqrt[3]{\pi/6}$$

En el caso de partículas con distribución de tamaño debe usarse, en la correlación de Ergun, el promedio del producto $\phi_s d_p$, el cual viene dado por:

$$\overline{\phi_s d_p} = \left[\sum_{\text{todas las fracciones}} \frac{\omega_i}{\phi_{s,i} d_{p,i}} \right]^{-1} \quad (5)$$

Donde ω_i es la fracción en peso de tamaño $d_{p,i}$ con factor de forma $\phi_{s,i}$.

La expresión (4) es válida para lechos de sólidos granulares colocados al azar y tiene una confiabi-

lidad de $\pm 25\%$, no siendo aplicable para lechos rellenos no al azar.

La pérdida de carga anterior está formada por dos términos, la pérdida en régimen viscoso y la pérdida en régimen turbulento.

Para Reynolds bajos predomina el término viscoso y la expresión se reduce a:

$$\frac{\Delta P_{f+p}}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu u_0}{(\phi_s d_p)^2} \quad (6)$$

para:

$$Re_p = \frac{d_p \rho_f u_0}{\mu} < 20 \quad (7)$$

donde:

Re_p = N° de Reynolds para la partícula.

Para Reynolds altos debe considerarse sólo las pérdidas turbulentas

$$\frac{\Delta P_{f+p}}{L} = 1,75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_f u_0^2}{\phi_s d_p} \quad (8)$$

$$Re_p > 1000$$

La porosidad para sólidos no esféricos y con distribución de tamaño, no puede estimarse en forma satisfactoria; influyen factores tales como el modo de cargar el sólido, su tamaño promedio, su curva de distribución. Por ejemplo, si la distribución es amplia, los finos pueden llenar los huecos formados entre las partículas grandes, disminuyendo considerablemente la porosidad. Ya que la porosidad es una magnitud que debe determinarse experimentalmente para cada sólido en particular, no se hace necesario entonces, buscar correlaciones.

La esfericidad de diversos materiales ha sido determinada por varios autores (2,3,4), encontrándose que los valores de esfericidad varían entre 0,5 y 0,7 para materiales tales como arena, sílice, carbón pulverizado, catalizadores, etc.

Velocidad mínima de fluidización.

El comienzo de la fluidización se produce cuando las fuerzas de fricción que ejerce el fluido sobre las partículas son iguales al peso de las partículas;

aplicando la expresión (4) se tiene:

$$\frac{\Delta P_{f+p}}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_f) g =$$

$$150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^2} \frac{\mu u_{mf}}{(\phi_s d_p)^2} +$$

$$1,75 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_f u_{mf}^2}{(\phi_s d_p)} \quad (9)$$

Donde el subíndice m.f. señala las condiciones en el mínimo de fluidización, o estado de fluidización incipiente.

Esta expresión puede escribirse también como:

$$\frac{1,75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} Re_p^2 + 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} Re_p =$$

$$\frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (10)$$

Si no se conocen los valores de ϵ_{mf} y ϕ_s , puede usarse la aproximación de Wen y Yu (5), quienes encontraron que para una gran variedad de sistemas se tiene que:

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}} \approx 14$$

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \approx 11$$

Reemplazando estos valores en la expresión (10) y resolviendo para Re_p :

$$Re_p = \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu} = [(33,7)^2 +$$

$$0,0408 d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)]^{1/2} - 33,7 \quad (11)$$

Para partículas pequeñas

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{1650 \mu} \quad Re_p < 20 \quad (12)$$

y para partículas grandes:

$$u_{mf} = \left[\frac{d_p (\rho_p - \rho_f) g}{24,5 \rho_f} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$Re_p > 1000$

Velocidad máxima de fluidización.

Si en un lecho fluidizado se aumenta la velocidad de pasada del fluido llega un momento en que el sólido es arrastrado fuera del lecho, cuando esto se produce la velocidad del fluido es aproximadamente igual a la velocidad terminal o velocidad de caída libre de las partículas, en el fluido considerado. Esta velocidad es la velocidad uniforme (o de equilibrio) que adquiere la partícula cuando cae libremente en el fluido en reposo; su valor se determina por un balance de fuerzas (Fig. 2).

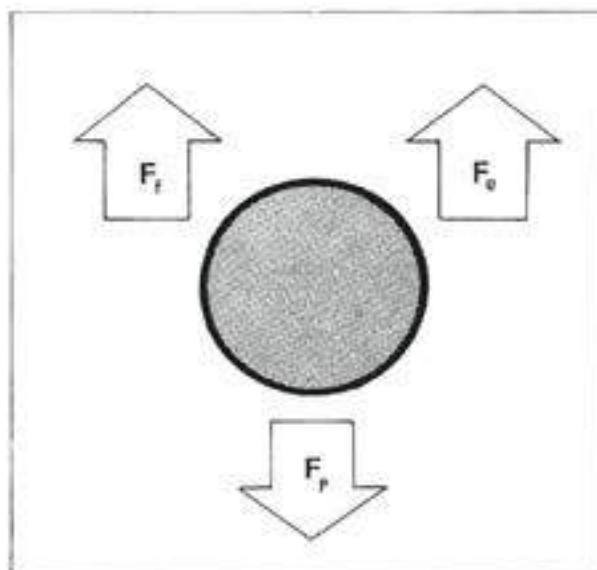


Figura 2.

Cuando una partícula cae libremente actúan sobre ella tres fuerzas:

La fuerza de gravedad o peso de la partícula (F_p), el empuje que el fluido ejerce sobre la partí-

cula (F_e) y la fuerza de roce entre el fluido y la partícula (F_f); la fuerza resultante (F_R) vale:

$$F_R = F_p - F_f - F_e \quad (14)$$

Cuando la partícula ha alcanzado la velocidad terminal $F_R = 0$ y

$$F_p = F_f + F_e \quad (15)$$

Reemplazando por sus valores:

$$\frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g = C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \left(\frac{1}{2} \rho_f u_t^2 \right) + \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_f g \quad (16)$$

Despejando la velocidad terminal:

$$u_t = \left[\frac{4g d_p (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (17)$$

C_D es el coeficiente de arrastre, función del número de Reynolds, el cual se encuentra graficado⁶, en la literatura especializada.

Para el caso de partículas esféricas se tiene:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 0.4$$

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad 0.4 < Re_p < 500$$

$$C_D = 0.43 \quad 500 < Re_p < 200.000$$

Para partículas de cualquier forma la velocidad terminal puede estimarse con la ayuda de la figura 3⁷, donde se ha graficado, el grupo adimensional $C_D Re_p^2$ en función de Re_p y ϕ_s como parámetro.

De (17) se obtiene:

$$C_D Re_p^2 = \frac{4g d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{3 \mu^2} \quad (18)$$

Con los valores conocidos de d_p , ρ_f , ρ_p y μ se calcula el número adimensional $C_D Re_p^2$ de acuerdo a (18), con este valor y la figura 3 se determina Re_p , del cual se puede calcular entonces u_t .

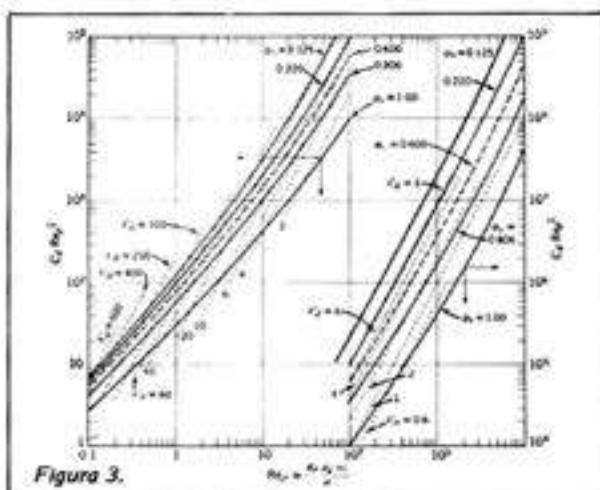


Figura 3. Rango utilizable de velocidad de fluidización.

Para partículas de tamaño único el rango de operación de la velocidad de fluidización está comprendido entre la velocidad mínima de fluidización, expresión (10) y la velocidad terminal, expresión (17).

Para el caso de partículas pequeñas:

$$\frac{u_t}{u_{mf}} \approx 90 \quad (19)$$

y para partículas gruesas:

$$\frac{u_t}{u_{mf}} \approx 9 \quad (20)$$

Para sólidos con distribución de tamaño, el valor inferior del rango corresponde a la velocidad mínima de fluidización de las partículas de mayor tamaño y el valor superior del rango por la velocidad terminal de las partículas de menor tamaño. De acuerdo a (12) para partículas finas la velocidad mínima de fluidización varía con el cuadrado del diámetro, por lo tanto, para este tipo de partículas la razón entre el diámetro de la partícula mayor y la menor no debe ser superior a 10 y para partículas gruesas de acuerdo a (13) la razón no debe ser superior a 100. Si estas razones son mayores, existe una gran posibilidad de que las partículas pequeñas sean arrastradas fuera del lecho, antes que las partículas grandes se fluidicen.

Pérdidas de carga en la placa fluidizadora.

La experiencia señala que la calidad de la fluidización depende principalmente del tipo de distribuidor o placa de fluidización utilizada. Los hechos observados son los siguientes: Cuando la placa tiene pocas aberturas la densidad del lecho (o ΔP a través del lecho) fluctúa apreciablemente en el

tiempo para todos los flujos de gas utilizados, aunque más severamente a velocidades altas; la densidad del lecho varía con la altura ($\Delta P/L$ no es constante a través del lecho) y el acanalamiento (by pass) puede ser considerable. Cuando la placa posee múltiples aberturas, la fluctuación de la densidad del lecho es despreciable a bajas velocidades, pero se hace importante a altas velocidades. La densidad del lecho es más uniforme en función de la altura, las burbujas son pequeñas y el contacto gas-sólido es más íntimo, con menos acanalamiento del gas.

Aunque las placas porosas dan una mejor calidad de fluidización, desde el punto de vista industrial tienen el problema de la alta pérdida de carga, además esta alta pérdida de carga puede impedir la circulación de sólidos en lechos multi-etapas.

En el diseño de una placa de fluidización se determina primero el ΔP_T disponible y considerando esto se selecciona el tipo de placa antes de entrar a un diseño más detallado.

La práctica demuestra que la placa de fluidización debe tener una pérdida de carga suficiente para producir un flujo igual en todas las aberturas. Es necesario, por lo tanto, que la pérdida de carga a través del distribuidor sea considerablemente mayor que la resistencia inherente al rearreglo del gas de entrada. Como una primera aproximación, la resistencia al rearreglo puede tomarse dentro del orden de magnitud de las pérdidas por expansión cuando el gas pasa de la conexión de entrada al lecho. Richardson⁸ sugiere que la razón entre el distribuidor y la pérdida por expansión debe tomarse igual a 100. Agarwal⁹ estima que la pérdida de carga en el distribuidor debe ser el 10% de la pérdida de carga a través del lecho, con un mínimo en todos los casos de 35 cm H₂O.

Las placas perforadas pueden ser diseñadas directamente de la teoría de orificios y ya que la pérdida de carga es una pequeña fracción de la presión total, podemos usar el siguiente procedimiento simplificado:

1. Se determina la pérdida de carga necesaria en el distribuidor de acuerdo a los criterios anteriores.
2. Se calcula el número de Reynolds para el flujo total que llega a la placa y se determina el valor del coeficiente de orificio C_D^* de la figura 4. La curva es para una área libre en el distribuidor < 10%.
3. De determina la velocidad de fluido a través del orificio, en las condiciones de densidad y temperatura con que el gas llega a la placa, de acuerdo a:

$$u_{\text{orif.}} = C_D^* \left(\frac{2 \Delta P_{\text{placa}}}{\rho_f} \right)^{1/2} \quad (21)$$

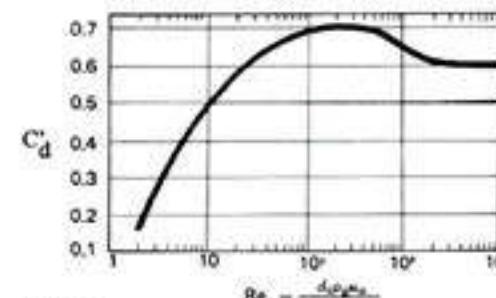


Figura 4.

La razón u_0/u_{orif} da la fracción de área libre en la placa de distribución.

4. Se escoge N_{orif} , el número de orificios por unidad de área del distribuidor y se calcula el diámetro correspondiente del orificio con la relación:

$$d_{\text{orif}} = \left[\frac{4}{\pi} \frac{u_0}{u_{\text{orif}} N_{\text{orif}}} \right]^{1/2} \quad (22)$$

Requerimientos de potencia.

El requerimiento de potencia es un factor de importancia en cualquier proceso de fluidización, ya que en algunos casos este parámetro puede indicar cuándo es factible o no el proceso. Por esta razón, al iniciar la factibilidad de un proceso en particular, es necesario hacer una primera aproximación del requerimiento de potencia.

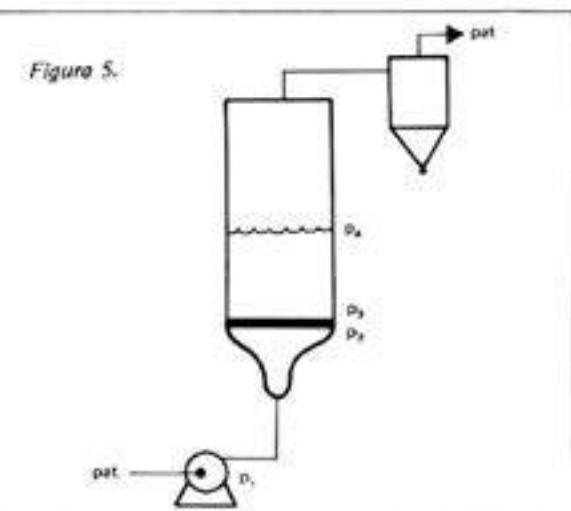


Figura 5.

De acuerdo a la figura 5 tenemos

$$\begin{aligned}
 p_1 - p_{at} &= \Delta P_{\text{compresor}} & = \Delta P_c \\
 p_1 - p_2 &= \Delta P_{\text{fricción}} & = \Delta P_f \\
 p_2 - p_3 &= \Delta P_{\text{placa}} & = \Delta P_p \\
 p_3 - p_4 &= \Delta P_{\text{lecho}} & = \Delta P_l \\
 p_4 - p_{at} &= \Delta P_{\text{sistema limpieza}} & = \Delta P_{s.l.}
 \end{aligned}$$

Es fácil ver que:

$$\Delta P_c = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_l + \Delta P_{s,l} \quad (23)$$

$\Delta P_{s,l}$ es la pérdida de carga a través del sistema de limpieza de los gases, y depende del tipo de equipo seleccionado, filtros, ciclones, etc., del flujo volumétrico y del contenido de sólidos.

ΔP_l es la pérdida de carga a través del lecho e igual al peso del lecho por unidad de sección del lecho.

ΔP_p es la pérdida de carga a través de la placa fluidizadora, y depende del tipo de placa y del flujo volumétrico.

ΔP_f es la pérdida de carga desde la salida del compresor hasta la placa fluidizadora.

Si consideramos que el fluido se comporta como un gas ideal y que la compresión es adiabática, la potencia recibida por el gas es:

$$P_{fl} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P_{at} Q_{at} \left[\left(\frac{P_1}{P_{at}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (24)$$

Q_{at} , flujo volumétrico medido a P_{at} y T_{at}
 $\gamma = C_p/C_v$

Si η es la eficiencia del compresor, el requerimiento real es

$$P_{real} = \frac{P_{fl}}{\eta} \quad (25)$$

Ejemplo

Se quiere fluidizar una columna de 60 cm de diámetro y 150 cm de alto de partículas esféricas con el siguiente análisis granulométrico:

| Mallas | Peso retenido (gr) |
|-------------|--------------------|
| + 65 | 0 |
| - 65 + 100 | 60 |
| - 100 + 150 | 150 |
| - 150 + 200 | 240 |
| - 200 + 270 | 120 |
| - 270 + 400 | 30 |
| - 400 | 0 |

El fluido a utilizar es aire y la densidad del sólido 4,8 gr/cm³.

Determinar la velocidad mínima de fluidización, el rango de fluidización y el requerimiento teórico de potencia.

Resolución

a) Calculamos el diámetro promedio de acuerdo a (5), pero para ello es necesario determinar primero la composición en peso.

| Mallas | $d_{pi}(\mu)$ | Peso retenido(gr) | ω_i |
|-------------|---------------|-------------------|------------|
| - 65 + 150 | 177,5 | 60 | 0,10 |
| - 100 + 150 | 125,5 | 150 | 0,25 |
| - 150 + 200 | 89,0 | 240 | 0,40 |
| - 200 + 270 | 63,5 | 120 | 0,20 |
| - 270 + 400 | 45,5 | 30 | 0,05 |
| | | Peso total 600 | 1,00 |

$$\bar{d}_p = \left[\frac{0,1}{177,5} + \frac{0,25}{125,5} + \frac{0,40}{89} + \frac{0,20}{63,5} + \frac{0,05}{45,5} \right]^{-1}$$

$$\bar{d}_p = 88,51 (\mu)$$

b) Para el cálculo de u_{mf} empleamos la expresión (12).

$$\bar{d}_p = 88,51 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\rho_p = 4,8 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_f = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ gr/cm}^3 \text{ (despreciable frente a } \rho_p \text{)}$$

$$g = 980 \text{ cm/seg}$$

$$\mu = 0,00018 \text{ poise (viscosidad del aire } p=1 \text{ at } t = 20^\circ\text{C})$$

$$u_{mf} = \frac{(88,51 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 4,8 \cdot 980}{1650 \cdot 0,00018} = 1,24 \text{ cm/seg}$$

$$Re_p = \frac{88,51 \cdot 10^{-4} \cdot 1,24 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{0,00018} = 0,073 < 20$$

luego la aplicación de (12) es correcta.

c) Para determinar el rango de fluidización:

u_{mf} para partícula mayor, aplicando (12)

$$u_{mf} = \frac{(177,5 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 4,8 \cdot 980}{1650 \cdot 0,00018} = 4,99 \text{ cm/seg}$$

$$Re_p = \frac{177,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4,99 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{0,00018} = 0,59 < 20$$

u_t para partícula menor, aplicando (17) y ensayando con

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad \text{para } Re_p < 0,4$$

la expresión (17) se transforma en:

$$u_t = \frac{g(\rho_p - \rho_f) d_p^2}{18 \mu}$$

$$u_t = \frac{980 \cdot 4,8 (45,5 \cdot 10^{-4})^2}{18 \cdot 0,00018} = 30,05 \text{ cm/seg}$$

$$Re_p = \frac{45,5 \cdot 10^{-4} \cdot 30,05 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{0,00018} = 0,9$$

No se cumple la condición $Re_p < 0,4$; ensayando con

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{para } 0,4 < Re_p < 500$$

La expresión (17) se transforma en:

$$u_t = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_f)^2 g^2}{\rho_f \mu} \right]^{1/3} d_p$$

$$u_t = \left[\frac{4 \cdot 4,8^2 \cdot 980^2}{225 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,00018} \right]^{1/3} 45,5 \cdot 10^{-4}$$

$$u_t = 55,56 \text{ cm/seg}$$

$$Re_p = \frac{45,5 \cdot 10^{-4} \cdot 55,56 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{0,00018} = 1,69$$

luego la expresión es correcta.

La velocidad máxima que puede soportar el lecho es de 55,56 cm/seg, ya que ésta es la velocidad a la cual las partículas de diámetro 45,5 μ comienzan a ser arrastradas fuera de él. La velocidad mínima de fluidización calculada con el tamaño promedio de 88,51 μ e igual a 1,24 cm/seg es la velocidad a la cual comienza a fluidizar el lecho y la velocidad de 4,99 cm/seg para el tamaño de 177,5 μ es la velocidad a la cual todo el lecho debiera estar fluidizado.

d) Requerimiento teórico de potencia.

Como sistema de limpieza de los gases usaremos filtro de tela con $\Delta P_{s+1} = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$.

Para el cálculo del peso de lecho por unidad de sección se puede considerar en primera aproximación para la mayoría de sólidos finos una porosidad de 0,40, luego:

$$\Delta P_s = 150 \cdot 4,8 (1 - 0,4) = 432 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\Delta P_p = 0,1 \Delta P_s = 43,2 \text{ cm H}_2\text{O}$$

Podemos suponer una pérdida por fricción de 100 cm H₂O, luego:

$$\Delta P_c = 100 + 43,2 + 432 + 10 = 585,2 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\Delta P_c = 0,6 \text{ atm}$$

Sobre la placa de fluidización necesitamos una velocidad lineal medida en tubo vacío que varía de 1,24 cm/seg a 55,56 cm/seg.

La sección del lecho es:

$$\Omega = \frac{\pi (60)^2}{4} = 2.827,4 \text{ cm}^2$$

El flujo variará entonces dentro de los siguientes límites:

$$(Q_{\min})_3 = 3,5 \text{ lt/seg} = 12,6 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$(Q_{\max})_3 = 157,1 \text{ lt/seg} = 565,5 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Estos flujos están medidos a la presión que está sobre la placa, es decir p_3 .

$$p_3 = p_{at} + \Delta P_s + \Delta P_{s+1}$$

$$p_3 = 1 + 0,43 = 1,43 \text{ atm}$$

$$Q_{at} = \left(\frac{1,43}{1} \right) Q_3 \quad (\text{Despreciando los efectos de temperatura.})$$

$$(Q_{\min})_{at} = 18 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$(Q_{\max})_{at} = 809 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\gamma_{aire} = 1,4$$

$$P_{fl} = \frac{1,4}{1,4 - 1} \left[\left(\frac{1,43}{1} \right)^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} - 1 \right] 18.000 = \\ = 6,78 \cdot 10^3 \quad \frac{\text{lt} \cdot \text{at}}{\text{hr}}$$

$$(P_{fl})_{\min} = 0,26 \text{ HP}$$

$$(P_{fl})_{\max} = 11,59 \text{ HP}$$

BIBLIOGRAFIA

1. Ergun, S., Chem. Eng. Progr., 48, 89, (1952).
2. Leva, M., Weintraub, M., et al., Chem. Eng. Progr., 44, 511, 619, 707, (1948), Ind. Eng. Chem., 41, 1206, (1949).
3. Uchida, S., Fujita, S., J. Chem. Soc. (Japón) (Ind. Eng. Secc.), 37, 1578, 1583, 1589, 1707, (1934).
4. Shirai, T., Ph.D. Thesis, Instituto de Tecnología Tokio, (1954).
5. Wen, C., Yu, Y., A.I. Chem. E. Journal, 12, 610, (1966).
6. Perry, J.H., "Chemical Engineer's Handbook", McGraw Hill Book Company, 5a Edición, 5-62, (1973).
7. Kunii, D., Levenspiel, O., "Fluidization Engineering", Krieger Publishing Co., New York, (1977), p. 77.
8. Richardson, D.R., Chem. Eng., 68, 83, (Mayo 1, 1961).
9. Agarwal, J.C., et al., Chem. Eng. Progr., 58, 85 (Nov., 1962).



José Palacios G.
Profesor J.C.,
Dept. Metalúrgica USACH

METALURGICA PERTAC LTDA.

- TUBOS Y PERFILES
DE ACERO
- CORTE DE FLEJES
DE BOBINAS

Fabricación Standarizada
y/o sobre pedido

ESPERANZA 1235 - 1501 STGO. OESTE
TELEFONO: 733239 - 737826

Alternativas hidro- metalúrgicas del cobre

La década pasada nos entregó grandes aportes en lo que se refiere a procesos extractivos del cobre. Este artículo pretende mostrar aquellos que emplean técnicas hidrometalúrgicas, en especial la hidrometalurgia de los sulfuros. Esta revisión hará especial referencia a los tratamientos de la calcopirita, por ser ésta, la especie sulfurada más refractaria a la lixiviación y por su relativa abundancia.

¿POR QUE PROCESOS HIDROMETALURGICOS?

Fue quizás difícil proveer de razones concluyentes para asegurar el interés en los procesos hidrometalúrgicos a mediados de la década del sesenta, pero algunos años más tarde comienza una campaña tendiente al control de la contaminación atmosférica, sin duda, por la contaminación del aire en las grandes ciudades. La polución por SO_2 proveniente de las fundiciones de cobre, fue quizás la fuerza motriz que impulsó la investigación y desarrollo de la hidrometalurgia de los sulfuros. Sin embargo, hay probablemente otros factores que han contribuido a tomar esta dirección, destacándose los siguientes:

- Muchos de los compuestos químicos requeridos por los procesos hidrometalúrgicos son producidos en gran tonelaje y a bajos costos (oxígeno, amoniaco, ácido clorhídrico, etc.).
- Se han desarrollado aleaciones y proporcionando materiales de construcción apropiados, tales como fibra de vidrio, plásticos y otros similares a costos razonables.
- La aplicación industrial de solventes selectivos para cobre, usados en el tratamiento de menas oxidadas, que han proporcionado un significativo auge en la hidrometalurgia del cobre.
- La factibilidad de algunos procesos hidrometalúrgicos de obtener azufre elemental que se puede almacenar y transformar en ácido sulfúrico en la medida que sea requerido.
- La imposibilidad técnica y económica de tratar algunas menas complejas por vía normal de flotación y técnicas pirometalúrgicas.
- El desarrollo de nuevos procesos pirometalúrgicos (Mitsubishi, Noranda, Worcra, etc.) que producen SO_2 de alta calidad en los gases, haciendo más fácil y de menor costo la fabricación de ácido sulfúrico.

Existiendo muchas publicaciones excelentes sobre las alternativas que han sido investigadas para el tratamiento de la calcopirita por vía hidrometalúrgica, se pretende mostrar aquellos procesos que parecen más atractivos frente al problema de la contaminación.

PROCESO SHERRITT GORDON

En este proceso se trata la calcopirita mediante lixiviación amoniacal a presión y se ha obtenido en pruebas de laboratorio y planta piloto, un 95% de extracción de cobre a partir de concentrados. El cobre no lixiviado puede ser flotado y este nuevo concentrado reciclado a la etapa de lixiviación.

El flowsheet para el tratamiento de concentrados de cobre-zinc, es mostrado en la figura N° 1.

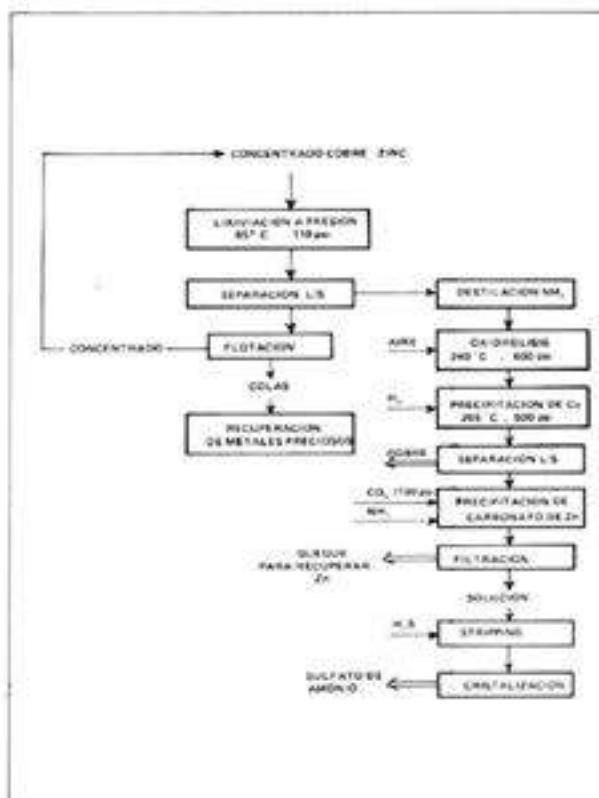
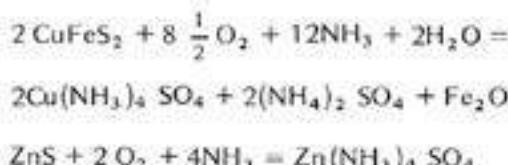


Fig. 1. Flowsheet del proceso de lixiviación a presión para concentrados de cobre y zinc usando amoniaco como disolvente. (Evans et al.⁴).

Las ecuaciones básicas para las disoluciones del cobre y el zinc, son las siguientes:



El cobre es recuperado de las soluciones, precipitándolo con H_2 a alta presión y el zinc por precipitación con CO_2 a presión.

PROCESO CYMET

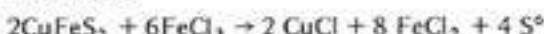
Este proceso fue desarrollado en la CYPRUS Mines Co. y es de los procesos vía cloruro que se han estudiado, uno de los más atractivos, ya que la lixiviación puede hacerse a presión atmosférica.

La aplicación de este proceso a concentrados de calcopirita se realizó en una operación continua, con una capacidad de 1200 libras de concentrado por día. De esta planta piloto se obtuvieron datos suficientes que permitieron el diseño de una planta para tratar 25 toneladas de concentrados por día.

El concentrado de flotación es tratado en molinos, que utilizan bolas de cerámica y revestimiento de goma. Los hidrociclos empleados en circuito cerrado con el molino entregan un producto de 95% bajo 200 mallas.

QUIMICA DEL PROCESO

Lixiviación.



Electrodisolución.

Reacción Anódica:



Reacción catódica:



Celdas para el fierro.

Cátodo:



Anodo:



La etapa de lixiviación ocurre entre 75 °C y 80 °C en contracorriente con el lixiviante que es reciclado de las celdas de obtención de fierro. La disolución electroatómica ocurre en celdas de diafragma, operando a una densidad de corriente de 200 [Amp/pie²] y manteniendo la temperatura aproximadamente a 50 °C. El azufre es recuperado de los sólidos filtrados y lavados en un autoclave trabajando a 135 °C aproximadamente, en condiciones tales que permitan la aglomeración de éste, recuperándose un 85% del azufre que entró al autoclave. Los sólidos restantes son tratados por flotación obteniéndose concentrados con 18% de cobre y 5,6% de azufre elemental, el cual es reciclado.

La solución de la electrodisolución es purificada de la forma en que se muestra en la figura N° 2 cementando cobre y plomo. Posteriormente, se eliminan impurezas tales como, arsénico, bismuto, antimonio, cobre y plomo residual. Luego el zinc

es removido desde la solución con una amina terciaria y en una solución alcalina es precipitado como hidróxido de zinc, posteriormente es regenerado el cloruro férrico que es reciclado a la etapa de lixiviación.

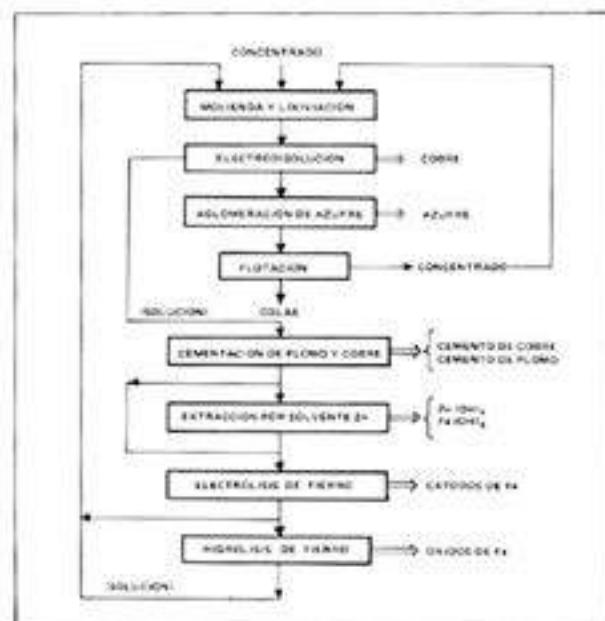
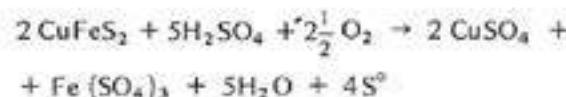


Fig. 2. Flowsheet del proceso CYMET para concentrados de calcopirita, (Krueger et al.²).

LIXIVIACION SULFURICA A PRESION

En este proceso se obtiene una oxidación completa de concentrados sulfurados en tiempos relativamente cortos (de 1 a 2 hrs) si la temperatura está en un rango de 140 °C a 200 °C y altas presiones de aire u oxígeno, sin embargo, los costos son elevados, y por esto se prefiere trabajar en un rango de temperatura más bajo, entre 100 °C y 120 °C siendo los costos por calentamiento y compresión mucho menores. Una ventaja posterior de trabajar a estas temperaturas es la obtención de azufre elemental antes que sulfato.

La reacción de la calcopirita en estas condiciones, es la siguiente:



Si la calcopirita es pretratada por activación mecánica y luego lixiviada a 110 °C, con una presión de oxígeno entre 15 y 20 atmósferas, usando ácido sulfúrico en una relación prácticamente

estequiométrica y con un contenido de sólido de 150 (grs./lt.), ésta puede ser completamente disuelta en una etapa, lixiviando durante un tiempo de 1 a 2 hrs.

El flowsheet para este proceso es mostrado en la figura N°3.

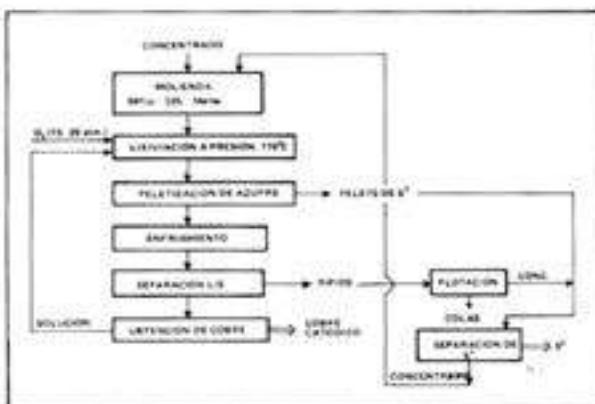


Fig. 3. Flowsheet del proceso a presión usando ácido sulfúrico (Vizsolyi et al.).

En la tabla N°1 se comparan los tres procesos expuestos en este artículo.

Si consideramos el estado de oxidación del azufre producido por estos procesos, tenemos que, en aquellos que producen azufre elemental requieren una cantidad menor de oxígeno, lo que es ya una ventaja, pero también es una ventaja la obtención de azufre elemental, debido a que su aplicación es más flexible y tiene un mayor mercado que otro compuesto de azufre. Además los procesos que entregan el azufre al estado de sulfato, deben neutralizarlo con caliza, lo que aumenta el costo de operación; pero en todo caso, el proceso amoniaco tiene la posibilidad de vender el $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como fertilizante.

Aquellos concentrados con gangas calcáreas no pueden ser tratados con ácido sulfúrico debido al alto consumo de éste, estando limitados a procesos, tales como el amoniaco.

Las posibilidades de tratar concentrados mixtos (cobre-zinc, cobre-plomo-zinc) es de gran importancia, ya que éste es un campo en que los procesos hidrometalúrgicos tienen posiblemente una ventaja sobre los procesos pirometalúrgicos.

Desde una visión muy general de la experiencia de algunos investigadores en la lixiviación de la calcopirita, aparece que la reactividad de ésta varía considerablemente, pero al comparar estos procesos debemos considerar también otros factores, como el estado de oxidación del fierro obtenido y la recuperación de los metales preciosos, ya que siempre los minerales sulfurados contienen algunos de estos metales y el grado de disolución de ellos, dependerá de cómo se encuentren en el concentrado.

De los procesos estudiados hasta ahora, sólo algunos han sido probados a escala piloto, siendo muy difícil hacer una comparación objetiva entre la vía tradicional de obtención de cobre a partir de los sulfuros y los procesos hidrometalúrgicos. Sin embargo, queda mucho por estudiar al respecto y sólo las necesidades futuras dirán la última palabra.

TABLA N°1

| PROCESO | AZUFRE PRODUCIDO | CONDICIONES DE OXIDACIÓN | % DE COBRE EXTRAIDO (%) |
|--|---|--|-------------------------|
| 1. Sharrit Gordon | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ CaSO_4 | Aire a 100 psi O ₂ Teórico 2,14 Kg/Kg de Cu | 90-95% |
| 2. Lixiviación ácida a presión con extracción masónica | > 85% S ²⁻ balance Ca SO ₄ | Oxígeno a 200 psi O ₂ Teórico 0,63 Kg/Kg de Cu | 98% |
| 3. CYMET | > 91% S ²⁻ | Eléctrica | > 80% |

(*) La extracción de cobre total dada por el % de extracción primaria.

REFERENCIAS

1. WADSWORTH, M.E., Advances in the leaching of sulphide minerals, Miner, Sel., Eng., Vol 4, N°4, Oct. 1972.
2. KRUESİ, P.R., ALLEN, E.S. and LAKE, J.L., CYMET PROCESS-HYDROMETALLURGICAL, conversion of base metal sulphides to pure metals. Can. Min. Metall. Bull., Vol. 66, No 734, Jun. 1973.
3. HAVER, I.P. and WONG, M.M., US Bur. Min., R.I. 7474, pp. 20.
4. GERLACH, J.K., GOCK, E.D. and GHOSH, S.K., Activation and leaching of chalcopyrite concentrates with dilute sulfuric acid. Int. Simp. on Hydrometallurgy Chicago 1973, pp. 403 - 416.
5. GJORLING, G., Leaching of minerals sulphides by selective oxidation at normal pressure. Int. Simp. on Hydrometallurgy, Chicago 1973, pp. 701 - 717.
6. DASHER, J., Hydrometallurgy of copper concentrates. Can. Min. Metall. Bull., Vol. 66, 1973, pp. 80 - 88.
7. SUBRAMANIAN, K.N. and JENNING, P.H., Review of Hydrometallurgy of Chalcopyrite, Can. Metall. Q., Vol. 11, N° 2, 1972, pp. 387 - 400.
8. EVANS, D.J., ROMANCHUK, S. and MACKIW, V.N., Treatment of copper-zinc concentrates by pressure hydrometallurgy. Can. Min. Metall. Bull., Vol. 57, Aug. 1964, pp. 857 - 866.
9. VIZSOLYI, A., VELTMAN, H., WARREN, I.H. and MACKIW, V.N., Copper and elemental sulphur from chalcopyrite by pressure leaching. J. Metals, N.Y., Nov. 1967, pp. 52 - 58.

JUAN ROMO BURTON

Ing. Civil Metalúrgico
USACH

Inter- cambio Tecno- lógico

La importancia del estudio de nuevos diseños en las máquinas actualmente en uso en el área de procesamiento de minerales.

Debido a que la actual tendencia en todo el mundo, es la de optimizar el consumo de energía en todos los procesos, es que se emprendió el estudio de un nuevo tipo de impulsor para las celdas agitair, denominado PIPSA, el cual por ser factible de operar a menor velocidad de agitación que el impulsor STANDARD, es posible ahorrar hasta un 47% de energía eléctrica.

El principio en el cual está basado el diseño del impulsor PIPSA, es un cambio en la hidrodinámica de la celda de flotación.

En la figura 1 se ve el comportamiento del agitador STANDARD, el cual produce un solo vórtice, y en la figura 2 se ve el agitador PIPSA el que produce dos vórtices. Este hecho permite una mejor agitación de la pulpa.

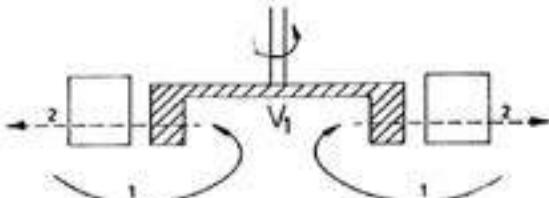


Figura 1.

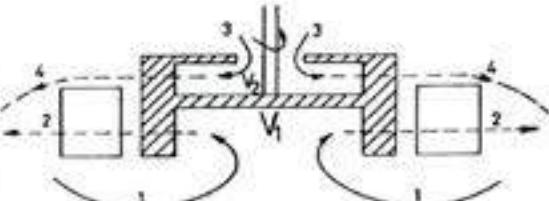


Figura 2.

Partiendo de la premisa de que el agitador PIPSA es capaz de operar a menor velocidad de agitación, es que se implementó en la División Andina de Codelco-Chile un banco de celdas de la sección Rougher de la planta concentradora, con estos nuevos agitadores.

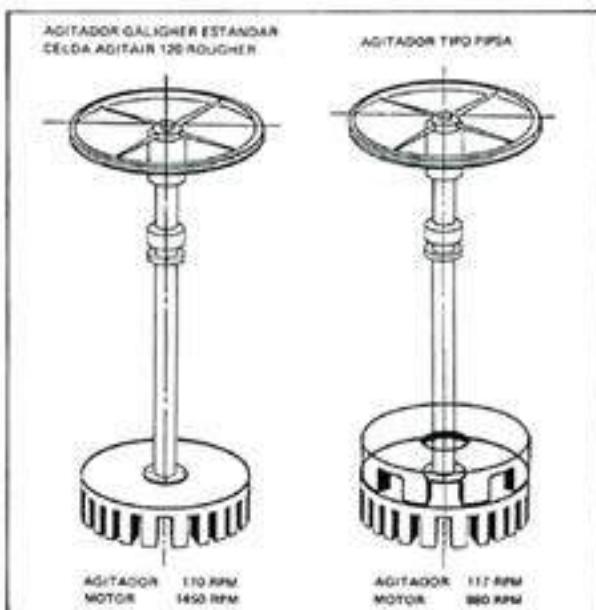


Figura 3.

TABLA 1

| o/o-200 | Tipo de Impulsor | Veloc. de Agitación* (r.p.m.) | Recuperación (%) | Razón de Concentr. (grs/grs) | Ley de Cola (%) | R (o/1) | K (min⁻¹) | Potencia requerida (Watt) |
|---------|------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|-----------------|---------|-----------|---------------------------|
| 51.9 | PIPSA STAND | 450 | 83.9 | 9.5 | 0.27 | 0.87 | 1.90 | 589.6 |
| | | 550 | 82.1 | 9.5 | 0.30 | 0.82 | 2.71 | 651.5 |
| 37.5 | PIPSA STAND | 450 | 75.3 | 10.7 | 0.37 | 0.78 | 2.56 | 579.2 |
| | | 610 | 75.0 | 9.6 | 0.38 | 0.78 | 3.40 | 773.0 |

* Velocidad de agitación de mejor rendimiento.

El presente trabajo es un resumen de la evaluación técnico-económica de la alternativa de cambio de los actuales impulsores STANDARD por los del tipo PIPSA, y tiene como objetivo el mostrar la importancia del estudio de nuevos diseños en las máquinas actualmente en uso.

La parte experimental de la evaluación se llevó a cabo tanto en planta como en laboratorio.

En la planta se usó la técnica de evaluación en paralelo, ya que la concentradora de División Andina posee dos secciones iguales.

Las experiencias de laboratorio fueron de tipo batch y se realizaron en celdas agitair N° 15 y LA-500 mediante un procedimiento standard de flotación.

Como herramientas de evaluación se usaron las variables metalúrgicas normales en este tipo de trabajo y el modelo de Richard Klimpel.

$$r = R[1 - 1/Kt (1 - \exp - Kt)]$$

r: recuperación a tiempo t (%)

R: recuperación a tiempo ∞ (%)

K: constante de remoción de masa (min⁻¹)

t: tiempo

La tabla 1 muestra un resumen de resultados de experiencias realizadas en la celda agitair N° 15.

De estos resultados se ve que existe una reducción en el consumo de energía y se mantiene el rendimiento metalúrgico aproximadamente igual.

La tabla 2 muestra un resumen con los resultados obtenidos de planta.

TABLA 2

| | Seción implementada con impulsores PIPSA (1117 r.p.m.) | Seción con impulsor STANDARD (1170 r.p.m.) |
|------------------------------------|--|--|
| Concentrado (T.M.H.S.I.) | 7.77 | 7.09 |
| Tasa de concentrado (Pto/Cu total) | 3.60 | 3.49 |
| Ley de Cola (Pto/Cu total) | 0.21 | 0.26 |
| Recuperación (Pto) | 45.06 | 36.34 |
| Razón de concentración | 22.50 | 25.59 |
| Potencia requerida | 77.80 | 150.70 |

Con los resultados obtenidos de la evaluación técnica, se desarrolló la evaluación económica, obteniéndose los siguientes resultados:

| | Antes de impuesto | Después de impuesto |
|--|-------------------|---------------------|
| Valor presente (miles US\$ 1.980) | 393.4 | 283.4 |
| Tasa interna de retorno (%) | 97.9 | 64.5 |
| Período de recuperación del capital (años) | 2.5 | 3.0 |

Estos resultados fueron categóricos y en ellos se puede ver claramente el mejor rendimiento de los impulsores PIPSA frente a los STANDARD.

La figura 4 muestra la recuperación en función del número de celdas para los dos impulsores, el modelo usado en este caso es el de Richard Klimpel.

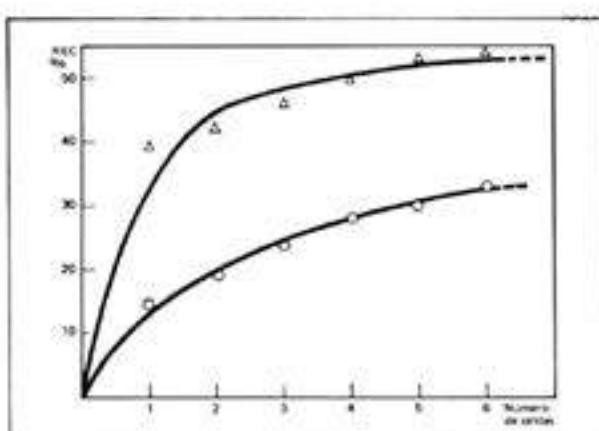


Fig. 4. Recuperación acumulativa versus número de celdas para los bancos Arenas de Planta.

A: Impulsor PIPSA (Banco Arenas A) 117 R.P.M. R = 0.56 K = 2.79
 B: Impulsor Standard (Banco Arenas B) 1170 R.P.M. R = 0.41 K = 0.80
 -: Modelo de R. Klimpel.

Esta solución se obtuvo considerando que el rendimiento metalúrgico se mantiene, y sólo se obtiene una disminución costos por concepto de ahorro de energía eléctrica.

Finalmente, se concluyó que el cambio de impulsores STANDARD por los nuevos impulsores PIPSA, es técnica y económicamente factible para la concentradora de División Andina.

Como se ve, este trabajo muestra, otro ejemplo como el estudio de nuevos diseños en las máquinas actualmente en uso en el área de procesamiento de minerales, permiten optimizar el consumo de energía, produciendo un beneficioso ahorro en los costos de producción.



REMETALLICA

Industria de metales y minerales - Chile - United States

OCTUBRE 90

22MT/260/CHILE

66-3