



REMETALLICA

REVISTA DEL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
UNIVERSIDAD TECNICA DEL ESTADO - FACULTAD DE INGENIERIA

JULIO DE 1980

SANTIAGO / CHILE

Nº 1



FORJADORES DE UNA NUEVA CIENCIA

F.D. RICHARDSON



Dr. Ing. Nelson Santander
Profesor Jornada Completa
del Departamento de Metalurgia
de la U.T.E.

Frederick Denys Richardson nació el 17 de Septiembre de 1913 y su fructífera obra en el campo de la Metalurgia Extractiva lo cataloga como uno de los más destacados metalurgistas de este siglo. Estudió Química en el University College de Londres donde se graduó en 1933.

En esa misma Casa de Estudios obtuvo su doctorado (Ph.D) el año 1936.

Cuando era estudiante fue muy activo participante de las organizaciones estudiantiles: dirigió la Sociedad Química y Física, y fue Secretario, y más tarde, Vicepresidente de la Federación de Estudiantes. Mostró su habilidad como investigador desde el comienzo de sus trabajos experimentales cuando estudió las propiedades del hexa-óxido de

cloro Cl_2O_6 , y su monómero ClO_3 .

Posteriormente, ganó una beca de la Commonwealth Fund para llevar a cabo un postdoctorado en la Universidad de Princeton en Estados Unidos. Allí trabajó con el profesor Hugh Taylor en problemas fotoquímicos desde 1937 hasta 1939.

Al estallar la Segunda Guerra Mundial, se enroló al grupo de voluntarios de reserva de la Real Marina Británica (RNVR), trabajando en un comienzo en la desactivación y barrido de minas magnéticas en la estación costera H.M.S. Vernon ubicada en Portsmouth. Posteriormente, se trasladó al Departamento de Desarrollo de Armamentos Diversos, donde llegó a ser Vicedirector, alcanzando en 1942 el rango de Comandante. En este



organismo, trabajó en el desarrollo de armas antiaéreas y antisubmarinas, y durante los últimos dos años de la guerra dirigió una organización ocupada principalmente del desarrollo de equipo para el desembarco aliado en el Continente Europeo.

Al término de la Guerra, en 1946 fue cuando Denys Richardson ingresó al mundo metalúrgico al incorporarse a la recientemente formada Asociación Británica de Investigación del Fierro y el Acero (BISRA), siendo allí el creador del Departamento de Química.

Muy pronto se vieron los frutos de sus estudios en Metalurgia Química: en 1948 presentó ante un simposio organizado por la Faraday Society un trabajo que se ha hecho ya un clásico en la teoría de escorias: "La constitución y la Termodinámica de las escorias líquidas", iniciando así una cadena de investigaciones y publicaciones en el área de escorias metalúrgicas. Ese mismo año inició la publicación de una serie de trabajos sobre "La Termodinámica de sustancias de interés en Siderurgia", desarrollados junto con sus colaboradores del Departamento de Química de la BISRA.

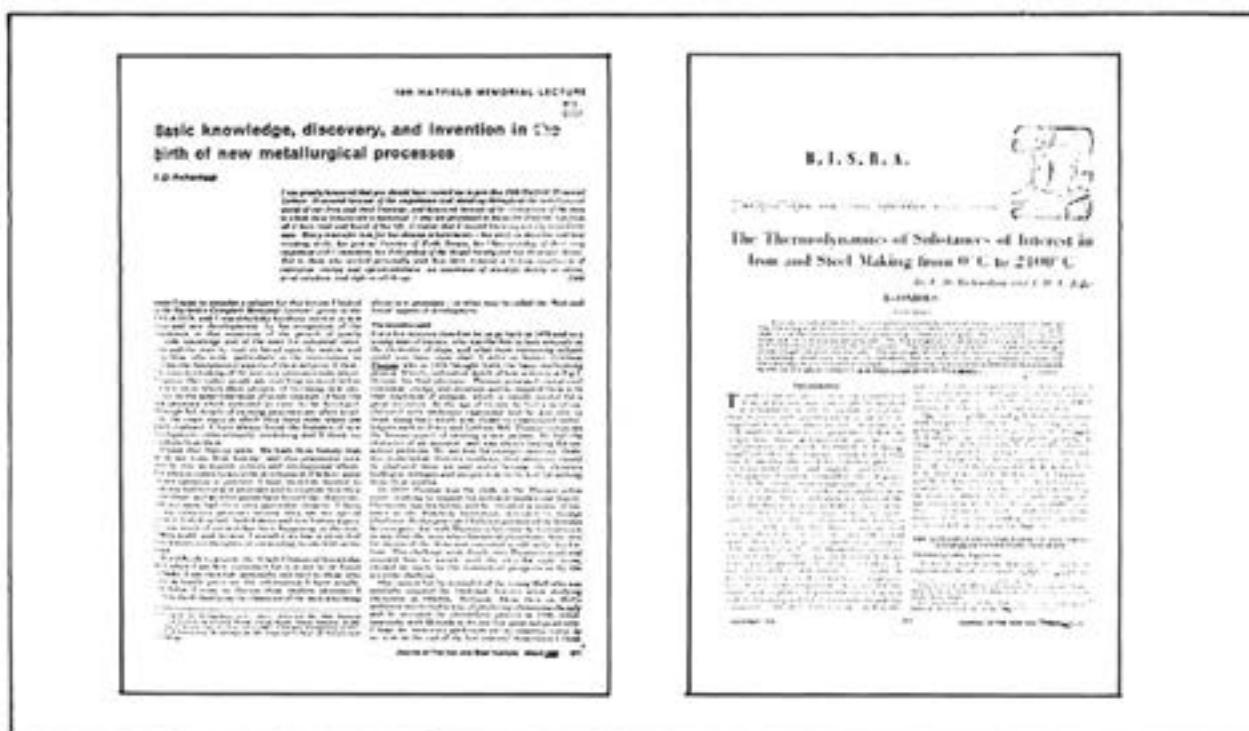
En 1950 le fue otorgada una beca Nuffield auspiciada por la Institución de Minas y Metalurgia (The Institution of Mining and Metallurgy), con el objeto de llevar a cabo investigaciones en Metalurgia Extractiva en el Imperial College de la Universidad de Londres. Esto dio origen a la formación de un selecto grupo de investigadores que se ha conocido como el Grupo de Investigación Nuffield (Nuffield Research Group), en el

que han trabajado o se han graduado muchos de los líderes actuales de investigación en Metalurgia Extractiva y Química que hay en el mundo. Dicho grupo se estableció en la Real Escuela de Minas (Royal School of Mines) de modo de estar integrado por un elenco permanente de especialistas y un selecto grupo de estudiantes de postgrado. Su financiamiento era otorgado por la Fundación Nuffield y era administrado en colaboración con la Institución de Minas y Metalurgia.

En 1955 obtuvo el premio memorativo Sir George Beilby del Real Instituto de Química, del Instituto de Metales, y de la Sociedad de la Industria Química, en reconocimiento por su trabajo sobre las propiedades termodinámicas de sistemas de elevadas temperaturas de interés en Siderurgia.

En 1956, Richardson recibió el grado de Doctor en Ciencias (D.Sc.) en la Universidad de Londres por su trabajo sobre Metalurgia Química a elevadas temperaturas. En 1957 fue designado catedrático de Metalurgia Extractiva en el Imperial College, siendo sus objetivos allí, lograr que el Departamento se estableciera como un centro de investigación para la Metalurgia Química y de Procesos, y desarrollar un curso de Metalurgia en el que estos temas recibieran tanta atención como la Metalurgia Física. En 1962, el Consejo Superior del Imperial College le otorgó la afiliación Honoris causa a la Real Escuela de Minas.

El año 1968, logró la honrosa denominación de Fellow de la Royal Society (F.R.S.), y posteriormente recibió en forma honoraria los doctorados



**Physical Chemistry
of
Melts in Metallurgy**

Volume 1

F. D. RICHARDSON

*Department of Metallurgy and Materials Science,
Imperial College of Science and Technology, London*

1974



ACADEMIC PRESS · LONDON · NEW YORK
A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers

1971 Extractive Metallurgy Lecture
in Pergamon Series of AIME
Drops and Bubbles in Extractive Metallurgy



John D. Richardson

John D. Richardson is a distinguished metallurgist who has made significant contributions to the field of extractive metallurgy. He is currently a professor at the University of London and has been involved in research and teaching for many years. His work has focused on the physical chemistry of melts in metallurgy, particularly the behavior of drops and bubbles in extractive processes.

Richardson's research has led to numerous publications and presentations, including the 1971 Extractive Metallurgy Lecture, which was published in the Pergamon Series of AIME. He has also served as a consultant to industry and government agencies, helping to develop new technologies and processes for the extraction of metals from their ores.

In addition to his academic work, Richardson is a member of several professional societies and has received numerous awards and honors for his contributions to the field. He is a fellow of the Royal Society of Chemistry and the Royal Society of Metals, and has been elected to the Royal Society of London. He is also a member of the Institution of Metallurgical Engineers and the Institute of Materials.

de la Technische Hochschule de Aquisgrán en 1971, y de la Universidad de Lieja en 1973.

Richardson ha tenido el honor de dictar numerosas clases magistrales sobre Metalurgia, entre las cuales citaremos aquí sólo las más relevantes: la clase magistral memorativa Hatfield del Instituto del Fierro y el Acero (Iron and Steel Institute) en 1963, la clase magistral memorativa Howe del AIME en 1964, la clase magistral May del Instituto de Metales en 1965, la clase magistral memorativa Sir Julius Wernher de la Institución de Minas y Metalurgia en 1967, la clase magistral de Metalurgia Extractiva del AIME en 1971, y la primera clase magistral memorativa Yukawa del Instituto Japonés del Fierro y el Acero en 1972.

El Profesor Richardson fue elegido Charter Fellow del AIME en 1962, miembro honorario de la Asociación de Ingenieros de la Universidad de Lieja en 1973, y miembro honorario del Instituto Japonés del Fierro y el Acero ese mismo año.

Entre las muchas distinciones que ha recibido en su dilatada trayectoria académica, podemos destacar: la Medalla de Oro de la Institución de Minas y Metalurgia, y la Medalla Bessemer de Oro del Instituto del Fierro y el Acero.

Fue Presidente de la Institución de Minas y Metalurgia durante el período 1975-1976. En Julio de 1973, dicha Institución lo honró denominando al simposio internacional que ella organizara en esa ocasión en Londres: "Fisicoquímica de la Metalurgia de Procesos: la CONFERENCIA RICHARDSON".

El Profesor Richardson culminó su obra en el campo Metalúrgico con la publicación en 1974 de un interesante compendio titulado "Physical Chemistry of Melts in Metallurgy" (La Fisicoquímica de sistemas fundidos de interés en Metalurgia),

trabajo que editó Pergamon Press en dos volúmenes.

Hoy, cuando el distinguido Profesor Richardson se encuentra retirado, vive rodeado de la admiración y del afecto de muchas generaciones de metalurgistas a los cuales él directa o indirectamente ayudó a formar.

BIBLIOGRAFIA

1. J.H.E. Jeffes y R.J. Tait (editores), "Physical Chemistry of Process Metallurgy: The Richardson Conference", The Instrn. Min. Metall., London, (1974).
2. F.D. Richardson, "Basic knowledge, discovery, and invention in the birth of new metallurgical processes", 16th Hatfield Memorial Lecture, J.I.S.I., vol.203, p.216-226, (1965).
3. F.D. Richardson, "The Constitution and Thermodynamics of Liquid Slags", paper publicado en la edición especial titulada: "The Physical Chemistry of Process Metallurgy", Discussions of the Faraday Society, N°4, p.244-257, (1948).
4. F.D. Richardson, "Thermodynamics aspects of molten slags", paper presentado al Simposio auspiciado por el grupo de investigación Nuffield en 1952, y publicado en: "The Physical Chemistry of Melts", The Instrn. Min. Metall., London, (1953).
5. F.D. Richardson et al., Colección de papers sobre la Termodinámica de Substancias de Interés en Siderurgia, publicados en: J. Iron and Steel Institute, vol.160, p.261-270, (1948); vol.163, p.397-420, (1949); vol.166, p.213-235, (1950); vol.171, p.165-175, (1952).
6. F.D. Richardson, "Drops and Bubbles in Extractive Metallurgy", The 1971 Extractive Metallurgy Lecture, Met. Trans. AIME, vol.2, p.2747-2756, (1971).
7. F.D. Richardson, "Physical Chemistry of Melts in Metallurgy", Vol 1 y 2, Academic Press, London, (1974).



Ing: Jorge Orellana Rubilar

FORMACION DE LOS MANDOS MEDIOS

- "Nos parece positivo que se produzca mayor vinculación con la Facultad de Ingeniería, sobre la base de una relación recíproca".
- "A la UTE no le corresponde reforzar a futuro el área biológica".
- Diez especialidades entrega Escuela Tecnológica en carrera de Técnicos Universitarios.

El Campus de la Recoleta Dominicana ha pasado a ser una de las dos casas con que la UTE funciona en la capital. Afincada en el viejo convento de la Orden de los Padres Dominicos, sin otro contacto con los religiosos que una larga amistad, la Escuela Tecnológica es la otra cara de la Universidad Técnica del Estado. Se forman allí los mandos medios que la industria y la empresa nacional requieren para vertebrar en forma dinámica y moderna su desarrollo.

Al frente de la Escuela está, desde hace seis años, el ingeniero politécnico militar Jorge Julio Orellana Rubilar, curicano, 46 años, casado, cuatro hijos. Desde Curicó pasó a la Escuela Militar (1949-51), y más tarde a la Academia Politécnica Militar (1958-62), logrando el título de ingeniero politécnico militar en la especialidad de electrónica (1962). En los tres años siguientes fue ingeniero jefe de la red sur de telecomunicaciones del Ejército, oportunidad en la que ejerció las cátedras de Cálculo, Algebra y Mecánica racional en la Universidad Austral de Chile, y profesor de Electrotecnia y Análisis de circuitos en la UTE, sede Valdivia. Entre 1971-73 fue profesor de Dispositivos electrónicos y Planificación de sistema de comunicaciones en la ex Escuela de Ingenieros Industriales de nuestra Universidad (Santiago).

DEFINICION DE ACTIVIDADES

Nuestra revista entregó al Director Orellana algunas consultas sobre el trabajo académico y las proyecciones de la unidad a su cargo. Estas fueron sus respuestas:

¿Cuáles son las áreas fundamentales en las cuales la Escuela a su cargo ejerce hoy su actividad académica?

—La actividad académica de la Escuela Tecnológica está dirigida, principalmente a la formación de

los Técnicos Universitarios en las siguientes especialidades: Administración de Personal, Control Industrial, Publicidad, Secretariado Ejecutivo Bilingüe, Mantención de Equipos Industriales, Instrumentación Industrial, Plásticos y Polímeros, Supervisión de Industria Textil, Estructuras Metálicas, Industria de Alimentos.

En el plano de la investigación, ¿qué proyectos concretos realiza la Escuela Tecnológica con auspicio de DICYT en el presente año lectivo?

—En el presente año académico, se efectuarán los siguientes proyectos de investigación con el patrocinio de DICYT: Perfiles Agroindustriales; Obtención y enriquecimiento de nuevos productos alimenticios; Envases para industria de alimentos; Estudio de fuentes de almidón con alto contenido de amilopectina; Niveles de contaminación en productos pecuarios; Criterios para estimar daños provocados por fallas a equipos eléctricos; Proceso de separación de proteínas y almidón en harinas de trigo; Aplicación de micro-computadoras a procesos de la industria nacional, y Proyecto internacional de normalización de símbolos gráficos para la información pública, evaluación empírica de símbolos alternativos.

LOS TECNICOS Y EL MERCADO

¿Cuál es el nivel de ocupación que logran los técnicos que su Escuela gradúa? ¿Se realizan estudios de seguimiento ocupacional (destinos de los egresados?).

—El Técnico Universitario por su formación integral, en que se han conjugado los elementos teóricos con el instrumental operativo correspondiente, está capacitado para desarrollar actividades pertinentes a nivel intermedio, tales como supervisión, mantención, control y operación de los recursos materiales y humanos de las distintas áreas de la empresa en el sector productivo y de servicio. Ahora bien, respecto del seguimiento debo decir que si lo hacemos, dada la naturaleza de estas especialidades que obedecen a requerimientos objetivos de la realidad nacional. Es preocupación principal de esta Dirección mantener una actualizada información sobre el campo ocupacional de nuestros Técnicos. Esto ha permitido desarrollar políticas de perfeccionamiento y de actualización para estos profesionales.

LO TECNICO EN LA UNIVERSIDAD

¿Aspira Ud. a que su Escuela sea reconocida dentro del organigrama futuro de la UTE, como una Facultad de Tecnologías?

—No estoy en antecedentes de un futuro cambio en el organigrama de la Universidad Técnica del Estado. Por otra parte, de existir una reestructuración, dependerá del objetivo de ésta y de las razones que la hayan motivado y no de las aspiraciones de las jefaturas. Las estructuras orgánicas obedecen a políticas y necesidades de funcionamiento de los sistemas específicos y globales de las Instituciones.

¿Qué ha realizado la Escuela Tecnológica bajo su mandato para crear tecnologías intermedias de uso masivo?

—Si bien es cierto la Escuela Tecnológica cumple 11 años desde su creación, ha sido sólo dentro del actual gobierno universitario que ha logrado obtener la implementación de una infraestructura, tanto en términos humanos como materiales.

En concreto, lo que esta Escuela ha realizado para alcanzar el objetivo que se plantea en la pregunta, es dotar a esta unidad con el apoyo de la autoridad universitaria, de talleres, laboratorios, plantas piloto, material audiovisual, construcciones, profesionales docentes especializados, que hoy permiten y permitirán en el corto plazo abordar proyectos de esta naturaleza. Es así como a principios de este año, la Escuela organizó una exposición que mostró los resultados de una investigación sobre obtención de nuevos productos alimenticios de alto poder nutritivo a partir de materias primas de bajo costo, no utilizadas en los procesos productivos actuales.

RETROALIMENTACION

La Escuela Tecnológica tiene como propósito —Usted lo ha recalado en reiteradas oportunidades— preparar los "mandos medios" que la empresa necesita. ¿Quién fija cuáles son estos mandos medios necesarios? ¿De qué forma es la industria (de la construcción, del plástico, metalúrgica, textil, etc.) la que le indica a la Escuela Tecnológica sus requerimientos, o bien, es la Escuela Tecnológica la que estudia el mercado, consulta con los planes nacionales de desarrollo y crea sus carreras?

—En cierto modo ya me he referido al tema, no obstante, podemos señalar que esta Escuela ha promovido y mantenido una interacción Universidad-Empresa, a través del desarrollo de actividades de capacitación, seminarios nacionales e internacionales, asesorías técnicas, convenios, etc., que en definitiva nos han otorgado antecedentes cualitativos y cuantitativos relevantes en torno a la definición de las áreas de formación actuales y futuras.

Aparte del rubro molinero-panadero, en que la Escuela Tecnológica ha recibido importante asistencia técnica foránea, ¿en qué otras líneas se ha entregado apoyo internacional? ; ¿Hay gestiones para canalizar otros tipos de asistencia técnica?

— Una de las principales preocupaciones de esta Escuela ha sido mantener el contacto a nivel internacional con organismos vinculados a las áreas específicas de formación, a fin de obtener este tipo de apoyo y gestionar el intercambio de orden académico. Es así como en lo planificado para el presente se ha participado entre otras, en las siguientes actividades: "Proyecto Internacional de Normalización de símbolos gráficos para la información pública", la reciente visita del destacado experto internacional en Control de Calidad, Dr. Humberto Turello, Director de la Organización Italiana de Control de Calidad y Secretario de la Academia Internacional de la Calidad (EOQ-IAQ), y el Congreso de Directores de Áreas de Comunicación de las Universidades de América Latina, organizado por CIESPAL en Quito-Ecuador.

VINCULOS DE COOPERACION

Tratándose en general de carreras vinculadas o auxiliares de la Ingeniería, el trabajo de la Escuela Tecnológica en lo académico se supone que mantiene alguna vinculación con la Facultad respectiva de la UTE. ¿Existe este nexo para la formulación de planes, programas, investigaciones y/o extensión?

— En lo formal no existe dicha relación aun cuando este Director cree sería positivo que se diera la vinculación mencionada, siempre y cuando sea sobre la base de una relación recíproca.

La Universidad Técnica del Estado mantiene en Puerto Montt, dependiente de su sede Valdivia, un Tecnológico. ¿Tiene la Escuela Tecnológica y en particular usted alguna tuición o vínculo con aquella unidad?

— Como es de amplio conocimiento, los Tecnológicos de provincias dependen directamente de las Vice-Rectorías de Sedes. Sin embargo, esta Dirección ha estado siempre abierta a colaborar en la resolución de los problemas relacionados con estas unidades principalmente en lo académico cuando la autoridad superior así lo ha dispuesto.

Prácticamente el perfeccionamiento molinero y panadero de los últimos cinco años se ha concentrado en académicos de la Escuela Tecnológica. Estadística y prácticamente, ¿cuáles han sido los resultados de dichos servicios?

— Los resultados de esta actividad se pueden apreciar claramente en el alto grado de interés que manifiesta este sector industrial en mantener,

promover y participar en las acciones que programa la Escuela al respecto. Esta gestión también se podría medir a través del apoyo que este sector permanentemente está prestando en instalaciones y equipos, que además de permitir elevar el nivel de la docencia y de la investigación aplicada, contribuyen a fortalecer la asesoría técnica que hasta ahora se ha prestado y que en definitiva va a optimizar estos procesos productivos en beneficio de la población en general.

CIENCIA BASICA

Mirando la Universidad Técnica del Estado globalmente, ¿cuáles estima usted que deberían ser las áreas o carreras que deberían recibir especial desarrollo a futuro? ; ¿le parece que la UTE debería reforzar su área biológica, para intentar equipar lo que realizan hoy las otras tres ciencias básicas?

— La Universidad, en el cumplimiento de su objetivo principal, debe ser consecuente con los planes de desarrollo nacional; es así como las áreas prioritarias deben estar asignadas de acuerdo a las actuales políticas económicas y sociales, y sus proyecciones. Bajo este mismo punto de vista no correspondería reforzar el Área biológica sobre la base de equiparar lo que realizan las otras tres ciencias básicas.



Escuela Tecnológica UTE.

Clase Magistral dictada por el Dr. Nickolas Themelis el día Lunes 5 de Noviembre de 1979, con ocasión del Primer Congreso Nacional de Metalurgia, en el Salón Enrique Froemel de la Facultad de Ingeniería, UTE - Santiago. Traducción del cassette original hecha por el profesor Dr. Nelson Santander.



LA INDUSTRIA DEL COBRE EN SU MADUREZ

Problemas y Oportunidades

Estoy muy complacido y honrado con la invitación del Prof. Garín y de la Comisión Organizadora de este Congreso que es un evento de importancia extraordinaria en la historia Metalúrgica de Chile.

Diecisiete años atrás tuve el placer de participar en el Primer Congreso Metalúrgico de Canadá. Es obvio que en muchos aspectos, el desarrollo de Chile sigue el de esta gran nación del norte. Ocho años atrás visité Chile para ayudar en la formación de un Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, ahora encabezado por mi amigo el Dr. Sutulov y desde esa época he hecho muchos amigos en este país. Los gobiernos pueden cambiar, pero el carácter esencial del pueblo no cambia. Creo que en este sentido Chile tiene un carácter único y un papel importante en el desarrollo de este continente.

Ahora, permítanme continuar en inglés, ya que tenemos un intérprete aquí. El tema de mi

charla es: "La industria del cobre en su madurez: problemas y oportunidades".

Muchos miles de millas de aquí, cerca de la costa israelita del Golfo de Aqabah, y cerca de la ciudad de Eilat (Uds. deben haber escuchado hablar de ella en relación a la exploración del petróleo), hay un valle, el valle de Timna, un lugar muy caluroso y seco que es muy posible que sea la cuna misma de la industria del cobre. Cerca de 30 años atrás, una expedición arqueológica en Timna, encontró los productos de una industria de fundición que data de 6.000 años. Quince años después, los israelíes partieron con una planta de cobre allí, obteniendo este metal por precipitación. Uds. tienen entonces una historia de 6.000 años de producción de cobre. Así es de antigua nuestra industria cuprera.

Revisemos brevemente los pasos de la industria del cobre. Aunque el cobre fue tan impor-

tante que se ha nominado por su causa a una etapa entera de nuestra civilización: la Edad del Bronce. Como industria, sin embargo, sólo emerge en el siglo 16. Pocos años después de la muerte del rey Enrique VIII, se formaron 2 grandes compañías de cobre en Inglaterra. Incluso hasta los comienzos del siglo 19, Inglaterra fue el principal productor de cobre primario del mundo: cerca de tres cuartas partes de la producción de cobre del mundo venía de las Islas Británicas, gran parte del cual era extraído de minas inglesas.

La elevada industrialización en Europa causó un incremento en la búsqueda de depósito de cobre en Japón, Rusia y Chile, y posteriormente en Norteamérica y Australia, sin embargo, hasta la mitad del siglo 19, Inglaterra era aún el primer productor de cobre del mundo, con un 80% de la producción total de la Tierra. Entre 1860 y 1875, Chile superó a Inglaterra y pasó a ser el

primer productor de cobre del mundo. Sólo en 1880, EE.UU. vino a sobreponer a Chile y esa relación se mantiene aún ahora en que EE.UU. es el primer productor y Chile el segundo productor del mundo no comunista.

Examinemos ahora cómo ha variado el consumo del metal con los años, para ver si la industria es realmente madura. En 1810 la producción mundial fue de 16.000 t/año, menos de la tercera parte de lo que Chile usa hoy al año. En 1860 la producción aumentó a 100.000 t/año; en 1910 se llegó a 1 millón t/año, y en nuestros tiempos es cercana a 9.000.000 t/año.

Si consideramos que en los casi 6.000 años antes de 1910 se estima que la producción mundial total fue menos de 5 millones de t, se ve que ahora se consume casi el doble de eso cada año.

Parecería entonces que la industria del cobre ha alcanzado su madurez y puede considerarse como una de las grandes instituciones industriales del mundo. Emplea cientos de miles de hombres, millones de gente directamente y millones de gente en forma indirecta, de modo que ¿cuáles son entonces los problemas de una industria tan grande, si es que tiene problemas?

Existen dos proyecciones de crecimiento de la demanda mundial del cobre, una pesimista de 3% y una optimista de 4,2%. La oferta, en cambio, ha experimentado un nivelamiento en los años recientes y puede haber un gran incremento en los próximos años. Si se observa lo que ocurre entre la oferta y la demanda: en los años 1982-1983, la oferta caerá bajo la demanda, y cuando eso ocurra, el precio del cobre subirá, pero a medida que el precio del cobre sube, aparece nueva producción (adicional) y volvemos a tener el mismo problema que tuvimos como industria en 1975-1976. Como Uds. saben en 1974-1975 el precio del cobre tuvo una caída catastrófica, al-

gunos aun ganaron plata (entre ellos los chilenos), porque los costos operacionales eran suficientemente bajos. La mayoría hizo plata, otros dejaron el negocio.

Podemos ver entonces que hay una falta de disciplina en la industria del cobre y esto representa uno de los mayores problemas, no siendo éste fácil de resolver.

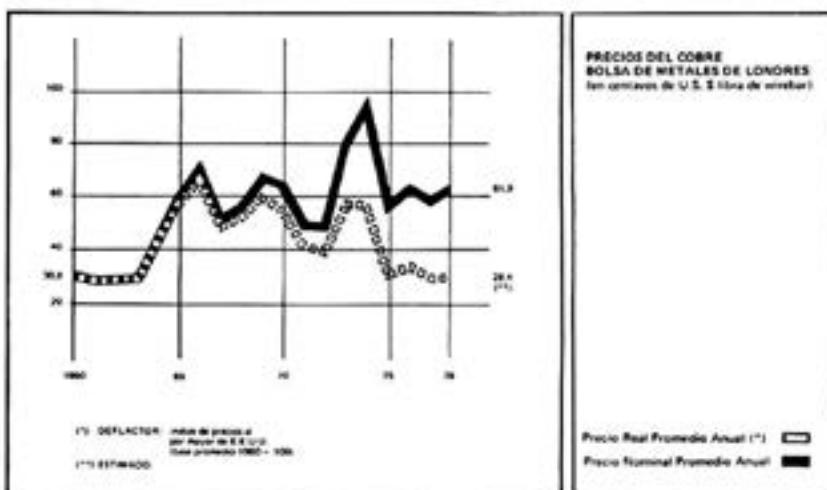
En este momento, las industrias nacionales del cobre son responsables del 40% de la producción del cobre. La política de dichas compañías no sólo están dictadas por consideraciones de lucro, sino por políticas nacionales de empleo, ingreso nacional, cambio exterior, etc. Como Uds. saben, los miembros de CIPEC trataron de desarrollar alguna disciplina y mecanismos de control, pero no han sido capaces en el pasado y es dudoso que lo logren en un futuro próximo.

Hay una vieja teoría en la industria del cobre que funcionó al comienzo del siglo, pero casi queda obsoleta desde 1974. Dicha teoría afirma que la razón que hay entre el precio del cobre y el costo unitario de producción deberá como promedio ser 1,7, al menos 1,7. Es decir, el precio debe ser 70% mayor que el costo de operación dentro de un amplio período de tiempo. Cualquier razón menor de 1,7, si se aplica por un período largo de tiempo, detendrá nuevas inversiones, ya que es el margen de utilidad el incentivo de las nuevas inversiones. Para que sea aplicable en 1985 esta razón 1,7, el precio del cobre deberá llegar a US\$2/lb, pero sin embargo, el pronóstico actual sólo es de US\$1,5/lb. Eso significa que no sólo los nuevos productores, sino que también los ya existentes tendrán dificultades para financiar proyectos de capital. CODELCO, por ejemplo, prevé una declinación de las leyes de cobre en Chuquicamata desde un 20%

actual hasta un 10% de cobre en 1992. Si CODELCO decidiera mantener la producción de cobre al mismo nivel de hoy, al descender la ley tendría que invertir a lo largo así como US\$ 170.000.000/año, en las próximas décadas, o sea, que cada año deberá invertir una gran cantidad de dinero. Yo menciono a CODELCO, porque algunos de Uds. están familiarizados con ella, pero esto vale para Kennecott, y para muchos de los grandes productores. Entonces, tanto los productores nacionales como los privados tendrán problemas en el mercado del dinero (todos competimos en el mismo mercado, vamos a los mismos bancos), a menos que el precio del cobre aumente sustancialmente por sobre la predicción actual. De modo que éste es uno de los problemas de la industria del cobre.

El siguiente problema que enfrenta la industria del cobre es el precio de mano de obra por t de cobre, el que se incrementa rápidamente. Esto se debe al decrecimiento de las leyes minerales, a la mayor profundidad de los ríos, y a las crecientes expectativas de la fuerza de trabajo.

En un depósito típico de cobre porfídico las dos cosas que Uds. quieren extraer son el cobre primario y el cobre secundario. En un tajo nuevo llegamos rápido al mineral, al llegar a un tajo intermedio tendremos que desplazarnos distancias mayores, y cuando se llega al tajo maduro, al ser más grande la cavidad, crece la distancia y la elevación a la que hay que sacar el mineral. Se requiere entonces más mano de obra y más energía. Se puede enfrentar esto poniendo equipos cada vez más grandes: nuestros camiones en Kennecott han variado de 60t a 100t, y a 150t, tenemos incluso camiones de 200t, pero eso cuesta plata y se puede llegar hasta un cierto punto. Las locomotoras enfrentan problemas aún peores, ya que a medida que la cavidad se ahonda



se hace más difícil usar locomotoras. Queda claro entonces que la profundidad constituye uno de los problemas de la mina. Tenemos que mover más material, hay que sacar más mineral, y todo esto requiere mano de obra. En Kennecott la mitad (o casi la mitad) de nuestro costo es mano de obra.

Aquí en Chile, como en otros países en desarrollo o en rápido desarrollo, a medida que crece el estándar de vida (y debo decir que estoy muy impresionado por lo que veo hoy en Chile, en comparación a lo que vi 8 años atrás), crece también el costo de la vida, y con ello las expectativas de los trabajadores, ingenieros, y de todos aquellos asociados a la producción del cobre. Yo, personalmente, creo que debido a este factor, es decir, el aumento de las expectativas y del estándar de vida, en el próximo siglo, Chile perderá parte significativa de la ventaja el costo operativo que tenía hasta aquí. En un tiempo, Japón tenía una ventaja en costo de operación, porque en aquel entonces la mano de obra era barata allá. Ahora, Japón está tan cara como en EE.UU. En Chile, también será cara, ya que esto es inevitable: Uds. quieren aumentar el estándar de vida, y al hacerlo se tornan menos competitivos en el mercado mundial.

Otro factor adverso que ha

afectado particularmente a la industria cuprera de EE.UU. es la legislación de control ambiental. Nosotros, por ejemplo, tuvimos que construir una fundición en Salt Lake City con un costo de US\$300 millones, por razones ambientales. En ese momento no necesitábamos la fundición, pero tuvimos que construirla por razones ambientales.

¿Por cuánto tiempo más podrán seguir otros países sin hacer esto? En Venezuela estamos construyendo una nueva planta de carburo de silicio, y la gente de control ambiental nos exigió que tuviésemos allí los mismos controles que tendríamos si la planta estuviese en EE.UU.

Una fundición totalmente controlada para propósitos ambientales debe contar con observaciones meteorológicas, medidores de SO₂, etc, instrumentos que alimentan su información a la fundición, de manera que ésta controle su producción de modo de no sobrepasar las limitaciones ambientales. Eso significa que muy a menudo se pierde producción, no tanto en las fundiciones recién construidas (ya sea que se ha gastado mucho dinero allí), sino que en nuestras antiguas fundiciones.

Otro factor adverso que afecta a todos los productores de cobre es el rápidamente creciente costo de la energía. La producción del cobre requiere 100 mi-

llones de BTU/t cobre*, es decir, cada tonelada de cobre requiere un total de 100 millones de BTU. El año pasado CODELCO informó que su costo energético era algo así como 7 centavos/lb, lo que es aproximadamente equivalente a US\$1,40/1 millón BTU. De acuerdo a algunas predicciones que tenemos nosotros, en 1985 los costos de combustibles serán de US\$7/1 millón BTU, lo cual es 5 veces más que lo que CODELCO y varios otros tuvieron que pagar el año pasado. Si eso ocurriera, entonces sólo el costo de la energía para CODELCO en 1985 sería de 35 centavos/lb de cobre.

Creo que hemos gastado ya bastante tiempo mirando los problemas y las malas noticias. Demos ahora un vistazo más optimista hacia el futuro.

Primeramente, veamos el abastecimiento del cobre. Como dije anteriormente, los expertos predicen aproximadamente un 3,3% de incremento por año en la próxima década. Esto me dice que ellos no esperan una gran mejoría en el estándar de vida de la gran mayoría del mundo. Digo esto considerando el consumo actual de cobre per cápita.

Antes que nada déjenme decirles algo: se ha relacionado el consumo de cobre con el estándar de vida. Esto no indica civilización cultural, sino civilización material. Mientras más cobre usa un país, más alto es su estándar de vida. El consumo actual de cobre per cápita en los EE.UU. es cerca de 11 kg por persona, es decir, cada hombre, mujer o niño, cada persona usa 11 kg de cobre al año. El mismo índice para Chile es de 5 kg por persona, la mitad. El consumo promedio en el mundo es de sólo 2 kg por persona, por consiguiente, Chile está entre el promedio mundial, y el consumo de EE.UU. Uds. están en la mitad del espectro. Sin embargo, Uds.

* 1 BTU = 1055 J

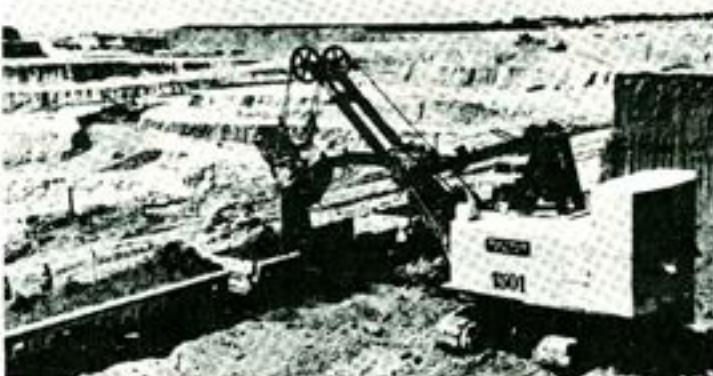
están tratando de mejorar mucho. Uds. no están satisfechos con lo que tienen, quieren desarrollar más su país, y tienen razón en hacerlo.

¿Qué pasa con el resto del mundo? Ellos también tienen sus aspiraciones en cuanto a mejora material. Supongamos que el resto del mundo llegara al estándar de Chile. Eso requeriría un incremento del consumo actual de 9 millones de toneladas al año, a 22 millones. Eso no puede lograrse con un 3,3% de crecimiento. No mientras vivimos, ni tampoco si se considera también el aumento de la población. De manera que si ese 3,3% es verdadero, no lograremos desarrollar este mundo co-

ntrario explotan 0,3 y 0,4% de cobre. No piensen Uds. que todo ya ha sido inventado, no es así. Deben examinarse todos los nuevos conceptos mineros. Por ejemplo, en uno de los cuerpos minerales que pertenece a la Kennecott estamos viendo la perspectiva del hundimiento en pendiente (slope caving), es decir, trabajos subterráneos a través de los cuales los minerales fluyen en forma natural hasta la estación de chancado, y desde allí son transportados al exterior. Esto tiene mucha similitud con lo que se ha hecho por largo tiempo en El Teniente. En el sector minero no podemos ser transportadores de tierra, sino que tenemos que ser más renovadores.

controlada para permitir que el aire pase a través, etc. En el caso de la lixiviación por pilas, hay lugares en que no se puede controlar la geometría. En Utah tenemos esa situación: hay allí montañas creándose así valles muy profundos. La convección natural actúa en no más de 200 pies de profundidad, en cambio, allí se pueden tener 800 pies o más. Se llega así a la conclusión que debe introducirse aire, y como éste no puede introducirse en forma natural, debemos usar convección forzada de aire. De esa manera, se ha aumentado la producción en Utah. Esto lo consideramos como una pequeña mina.

La lixiviación por pilas es el



mo deberíamos, a no ser que prestemos atención a otras cosas.

Puesto que no somos ni economistas ni sociólogos, en el resto de mi charla me concentraré en torno a las oportunidades que quedan abiertas mediante tecnología. Y esto es realmente lo único que nosotros podemos afectar.

Consideremos primeramente que es mediante tecnología como los depósitos pueden llegar a ser reservas minerales. Desde comienzos de siglo, la flotación, que todos consideramos como un hecho, ha creado una tremenda diferencia en la Metalurgia del Cobre. Fue la flotación junto a la minería a rajo abierto lo que nos permitió trabajar minerales con menos del 1%. Hay que-

Con respecto a la lixiviación, podemos decir que hace algunas décadas la Kennecott no tenía producción alguna que viniese de la lixiviación. Ahora, en cambio, una parte sustancial de la producción, 1/6 de su producción, viene de la lixiviación. La lixiviación depende de la interacción del mineral con el aire y con el agua que llega desde arriba. La lixiviación es una ciencia, pero la hemos venido usando como un arte, hay mucho que hacer allí.

Estimamos que la recuperación del cobre por lixiviación puede ser tan alta como un 50%, pero por el momento sólo llegamos al 25%. Hay artificios que han ayudado notablemente: diseño de pilas en forma de "peine", uso de geometría

método más primitivo de lixiviar, sin embargo, se justifica económicamente. La lixiviación en bateas ha sido muy económica en minerales oxidados que otra gente bota. Para lixiviar finos se emplea el estanque Pachuca. Hubo un tiempo en que todos los minerales se lixivian en bateas, tanto los finos como los gruesos. Hoy, en cambio, separamos los finos de los gruesos y se logran mejores recuperaciones enviando los finos al Pachuca y los gruesos a bateas.

La extracción por solventes será un importante proceso de extracción en la Metalurgia del Cobre, permite ir directamente desde una solución lixiviada hasta un producto final.

¿Qué puede hacerse con las concentradoras? Aquí se requiere un gasto masivo de capital. Uds. han oído hablar de la molienda semiautógena. Con ella se bajan los costos de mano de obra, pero aumentan los gastos de inversión. En el caso de molinos ya en operación puede introducirse el control automático de la producción, tanto en molienda como en flotación. Por ejemplo, pueden usarse determinadores de tamaños de partículas para controlar el grado de molienda, o bien, controles de los reactivos que van a las celdas de flotación, etc. Estimo que la automatización de las concentradoras es una gran oportunidad con capital relativamente pequeño.

En cuanto a nuevos procesos de fundición, pueden hacerse mejoras al usar capitales masivos. Para reducir los consumos energéticos, no hay que usar nuevos procesos, ya que puede innovarse tal como lo han demostrado los ingenieros chilenos. Y eso puede lograrse con los procesos ya existentes. Por ejemplo, en un reverbero de cobre con inyección de oxígeno, incluso considerando todo el combustible y todo el oxígeno, el consumo total de energía logra bajarse sustancialmente.

Otra área en que pueden hacerse mejorías es en la recuperación de metales. En el caso de la recuperación del cobre de las escorias, eso se puede lograr de 2 maneras: mediante molienda de la escoria que ha sido enfriada lentamente en pozos, o bien, mediante pirometalurgia (asunto que discutiremos mañana en CO-DELCO). Como ejemplo puedo citar a Uds. el horno de fusión agitada de Kennecott para recuperar el Mo y el Cu de las escorias. Se recupera aquí 95% del Mo y 77% del Cu, en un proceso en 2 etapas.

Mencioné anteriormente la instrumentalización en relación con las concentradoras, sin em-

bargo, es algo que puede aplicarse dentro de un espectro de operaciones en el cobre. Creo que no hemos hecho suficiente en cuanto a controlar los procesos.

Ha habido un problema por años en la industria metalúrgica (y del cobre), y este es que no se ha tenido fe en los aspectos científicos de cómo hacer las cosas. Así hay gentes que confían sus vidas a un nuevo avión lleno de instrumentos, y cuando les hablan de colocar un pirómetro en su horno creen que se va a caer el mundo.

En resumen, la industria del cobre está enfrentando tiempos difíciles: costos continuamente crecientes y precios inadecuados. Los metalurgistas como Uds. no pueden hacer mucho por el precio (ya que esto está fuera de consideración), pero sí pueden encontrar soluciones significativas a los costos de operación. Yo he indicado algunas áreas prometedoras y estoy seguro que Uds. conocen muchas otras.

¡Muchas gracias!

Pregunta:

¿En qué parte del mercado (bolsa de comercio) está Chile libre?

Respuesta:

40% de la producción del cobre está controlada por el Estado.

Pregunta:

.....pero hay acuerdos entre grandes compañías y consumidores tradicionales.....

Respuesta:

Es contra la ley controlar los precios, incluso en los EE.UU., puede irse a la cárcel por eso. Cuando Kennecott comenzó en 1978 a vender en el mercado de Londres (London Market Exchange) tampoco hubo un precio del productor... Tal vez yo no entienda bien su pregunta...

Pregunta:

....hay cobre que va a Londres, y a otro simplemente se le aplica

el precio de Londres....

Respuesta:

Sólo una parte del cobre se vende en Londres, pero esto es igual que un reloj en el que todo el mundo ve la hora. Hasta 1974 estuvo el precio de Londres y el de los productores. Chile ya iba a Londres. De modo que el que realmente controla es el de Londres. Por ejemplo, Western Electric le compra a Kennecott el precio del LOMEX.

Pregunta:

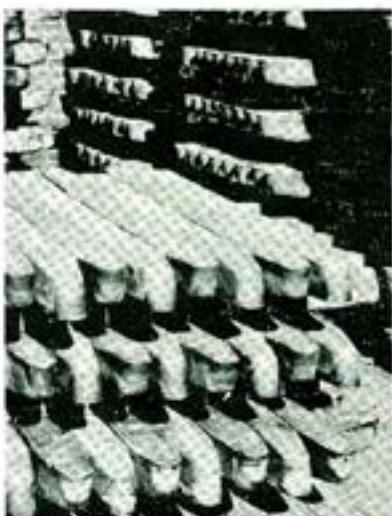
Yo sólo quería confirmar que un gran porcentaje no va nunca al mercado.

Pregunta:

¿Ha hecho algo la Kennecott en torno al problema de la contaminación por SO₂?

Respuesta:

Ya hemos gastado US\$500 millones. En Utah tenemos el proceso de fusión continua donde captamos 90% del SO₂, el resto se va por altísimas chimeneas. En Salt Lake (Trail Mines) es diferente. Allí se instaló una planta de ácido para los gases de tostadores y de convertidores. En Chino sólo se capta el SO₂ de los convertidores, el resto va a chimenea, igual cosa en Nevada. En Chino pondrámos una nueva fundición sólo si se expande la nueva.





Lawrence H. Van Vlack
Profesor de Ciencia e
Ingeniería de Materiales
Universidad de Michigan
Ann Arbor, Mich. U.S.A.

Traducción del
Trabajo Original
Realizado por el
Dr. Jorge Garín C.

LAS CERAMICAS DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL METALURGISTA

Históricamente, las cerámicas han sido materiales basados en la arcilla, como ladrillos, baldosas, gredas, cemento, etc. En efecto, la palabra griega "keramos", se relaciona directamente con arcilla. Los productos mencionados continúan teniendo una gran aplicación tecnológica. Además, nuevos tipos de cerámicas han logrado importancia. Estos varían desde refractarios básicos a transductores piezoelectrónicos y componentes para motores a turbina de gas. Esta expansión de nuevos materiales ha guiado a los metalurgistas y ceramistas hacia actividades de proceso y diseño relacionadas entre sí. Las dos disciplinas no pueden funcionar por mayor tiempo independientemente la una de la otra.

Los metales y las cerámicas difieren entre sí. Sin embargo, son gobernados por las mismas leyes de la naturaleza, y tienen muchas características en común. De este modo, es posible entender muchas de las propiedades de las cerámicas, con una formación metalúrgica. Este artículo enfoca esas comparaciones. Además, se llamará la atención hacia los factores que diferencian el comportamiento en servicio de estos dos tipos de materiales.

COMPONENTES

METALES

Los componentes elementales de los metales son aquellos con 1 a 4 electrones de valencia. Estos electrones no están físicamente sujetos a átomos específicos. Ello se traduce en una alta conductividad cuando los metales se exponen a un campo eléctrico, o a un gradiente térmico.

Ejemplos:

- Al - Aluminio
- Ti - Titánio
- Cd - Cadmio

CERAMICAS

Las cerámicas son compuestos de materiales y elementos no metálicos. Así, los materiales cerámicos más simples requieren por lo menos de dos tipos de elementos. Típicamente, los átomos metálicos pierden electrones, transformándose en iones positivos. Los elementos no metálicos reciben electrones extras, o comparten electrones en conjunto.

Ejemplos:

- | | |
|-----------|----------------------|
| Al_2O_3 | - Oxido de aluminio |
| TiN | - Nitruro de titanio |
| CdS | - Sulfuro de cadmio |

FASES

Las fases metálicas pueden ser realmente simples si todos los átomos son similares. Cada uno está coordinado con 8 a 12 átomos adyacentes de la misma clase.

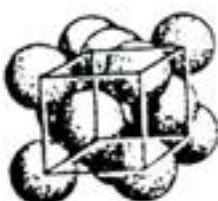
Ejemplos:

- Coordinado con 8 átomos - Hierro Bcc
- Coordinado con 12 átomos - Aluminio Fcc
- Coordinado con 12 átomos - Magnesio Hcp

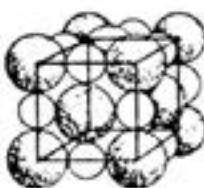
Dado que las fases cerámicas son compuestos, cada átomo debe estar coordinado con vecinos diferentes. Debido a que iones metálicos más grandes pueden estar coordinados con más aniones, el número de átomos vecinos depende de la razón entre el tamaño de los iones. Las cargas positivas y negativas deben balancearse.

Ejemplos:

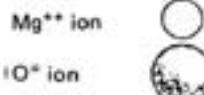
- Oxido de magnesio (ver figura)
- Ortosilicato de hierro (Fayalita)



FCC METAL



PERICLASE (MgO)



DESIGNACION DE LAS FASES

Es conveniente asignar nombres a las fases. Esto es particularmente cierto cuando más de una fase puede existir para una composición.

Ejemplos:

- *Ferrita - Hierro Bcc
- Austenita - Hierro Fcc
- Martensita - Hierro Bct

También se asignan nombres a las fases cerámicas. Con dos o más tipos de átomos, son posibles más permutaciones y combinaciones estructurales. Así, se hace uso extensivo de designaciones.

Ejemplos:

- Tridimita - SiO₂
- Olivina - Mg₂SiO₄
- Blenda - ZnS

TRANSFORMACIONES DE FASES

Un cambio en temperatura (o presión) puede alterar la estructura cristalina de los metales. Relativamente pocos metales poseen esta característica. Sin embargo, cuando ocurren, estos cambios polimórficos tienen un impacto técnico fundamental.

Ejemplos:

Ferrita	$\frac{912^\circ\text{C}}{\frac{\neq}{\neq}}$	Austenita	$\frac{1400^\circ\text{C}}{\frac{\neq}{\neq}}$	Ferrita-δ
Ti Hcp	$\frac{880^\circ\text{C}}{\frac{\neq}{\neq}}$	Ti Bcc		
Zr Hcp	$\frac{850^\circ\text{C}}{\frac{\neq}{\neq}}$	Zr Bcc		

Un cambio en temperatura (o presión) puede producir cambios polimórficos en cerámicas. En efecto, tales transiciones son más comunes en cerámicas que en metales, porque hay un mayor número de permutaciones posibles entre los elementos presentes.

Ejemplos:

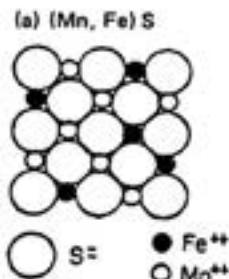
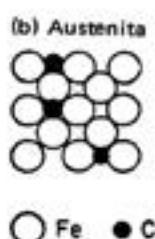
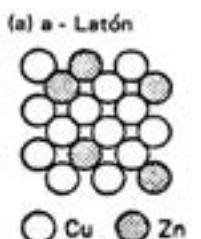
Carga	$\frac{523^\circ\text{C}}{\frac{\neq}{\sim 1\text{ kB}}}$	Tridina	$\frac{1470^\circ\text{C}}{\frac{\neq}{\sim 30\text{ kB}}}$	Cristobalita
Cuarzo	$\frac{\sim 1\text{ kB}}{\frac{\neq}{\neq}}$	Ceata	$\frac{\sim 30\text{ kB}}{\frac{\neq}{\neq}}$	Coesita
1 kB = un kilo bar				

N.T. Otros autores definen la Ferrita, Austenita, y Martensita como soluciones sólidas de Carbono en hierro Bcc, Fcc y Bct, respectivamente.

SOLUCIONES SOLIDAS

- a) En los metales, los átomos pueden ser reemplazados por átomos similares para formar soluciones sólidas substitucionales. El átomo introducido debe equiparar estrechamente el tamaño y las características eléctricas del átomo substituido.
- b) Atomos muy pequeños pueden introducirse intersticialmente dentro de la estructura base.

- a) Los iones se pueden substituir por otros (1) de similar tamaño, y (2) de similar carga. Esto conduce a un intercambio de iones como un proceso reversible.
- b) Para equiparar cargas, un ion divalente puede reemplazarse por dos iones monovalentes. Esto deja una vacancia 0, dos iones monovalentes pueden reemplazar uno divalente introduciendo un intersticial.

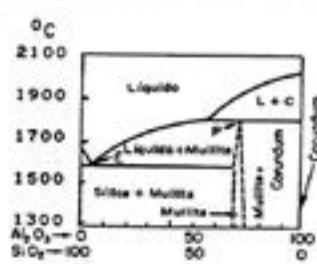
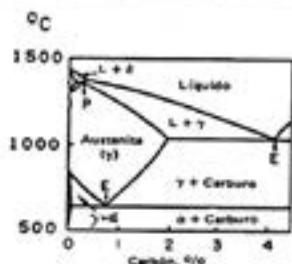


(b) Intercambio Iónico
 Ca^{++} bentonita + 2 Na^{+} \rightarrow
 Na^{+} bentonita + Ca^{++}
 2 Na^{+} son equivalentes
 a 1 Ca^{++} . Uno de Na^{+}
 debe tomar una nueva
 ubicación.

El prototipo para estudios metalúrgicos es el sistema Fe-C.

El prototipo para estudios de refractarios es el sistema $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

VELOCIDAD DE REACCION



Las reacciones no son inmediatas. La austenita en un acero 1080 requiere algunos segundos para transformarse en (α + Cm) (ver figura).

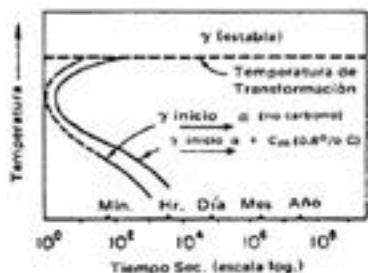
Las reacciones son más rápidas a temperaturas más altas que a temperaturas bajas, a menos que una nueva fase deba ser nucleada cerca de la temperatura de equilibrio.

Las reacciones son más rápidas cuando se requiere menor difusión (por ejemplo, un acero con 0,45% de carbono se transforma más rápidamente que un acero con 0,80% de carbono, porque se debe reubicar menos carbono desde la austenita a la cementita).

Las velocidades de reacción son menores en cerámicas que en metales, porque (1) se deben romper enlaces más fuertes entre los átomos individuales, y (2) una estructura más compleja requiere reordenamientos más difíciles.

Las velocidades de reacción son mayores a temperaturas más altas que a temperaturas más bajas, a menos que una nueva fase deba nuclear cerca de la temperatura de equilibrio (ver figura).

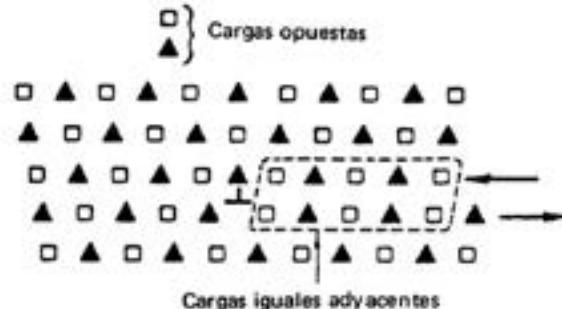
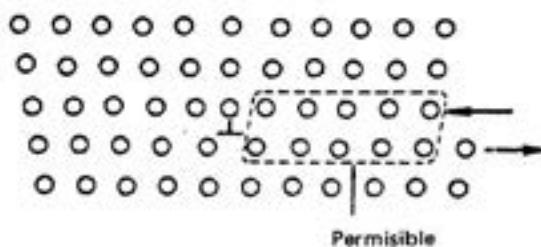
Las reacciones son más rápidas cuando están involucrados iones menores (por ejemplo, el FeO líquido con Fe^{++} y O^{--} cristaliza rápidamente en el enfriamiento sin formar un vidrio; la fayalita Fe_2SiO_4 con iones SiO_4^{4-} no se puede formar desde el líquido en enfriamiento rápido; el SiO_2 con una compleja red estructural requiere períodos de tiempo muy grandes a altas temperaturas para la cristalización).



DEFORMACION

La deformación plástica requiere deslizamiento de un plano cristalino sobre otro. Esto ocurre a través de dislocaciones que producen desplazamientos escalonados (ver esquema). Estos movimientos ocurren fácilmente en estructuras altamente simétricas exhibidas por la mayoría de los metales, donde todos los átomos son similares.

El deslizamiento de un plano sobre otro es más difícil en las cerámicas porque (1) estructuras más complicadas y menos simétricas poseen pocos planos de deslizamiento y (2) un desplazamiento escalonado no es permisible, debido a que átomos que se repelen (iones cargados) pueden llegar a ser adyacentes. (ver esquema). El deslizamiento es fuertemente resistido.



(Y COMPUESTOS INTERMETALICOS)

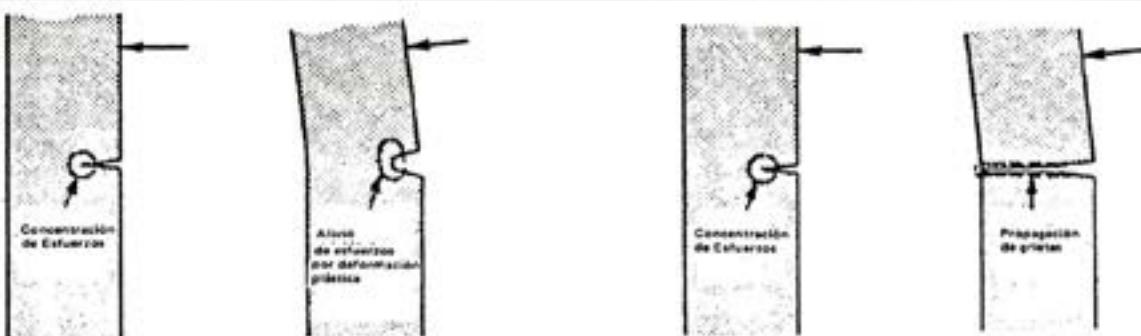
Las fases intermetálicas (por ejemplo, Cu₂Al, latón-β, y FeCr-α) son comparables a compuestos cerámicos en el sentido de que cada átomo está ordenado entre átomos diferentes. De este modo, al igual que en las cerámicas, estos compuestos resisten la deformación.

TENACIDAD

La mayoría de los metales son dúctiles. Una concentración de esfuerzos produce ajustes plásticos y alivio de esos esfuerzos. Se requiere energía para la fractura.

Sin embargo, los compuestos intermetálicos no obstaculizan la propagación de la grieta por deformación plástica. Ya que son duros y rígidos, no se pueden deformar fácilmente. En consecuencia, son frágiles.

Una concentración de esfuerzos no encuentra alivio a través de deformación plástica. Entonces, si la concentración de esfuerzos excede la resistencia a la tracción, se origina una grieta acentuando la concentración. Se requiere poca energía para completar la fractura. Dado que la tenacidad es una medida de la energía necesaria para la fractura, estos materiales son frágiles más bien que tenaces.



RESISTENCIA Y DUREZA

Los metales dúctiles se deforman por cizalle. Dado que los esfuerzos de tracción y de compresión se pueden descomponer en esfuerzos de cizalle es comparable en cada caso. De esta manera, la resistencia a la tracción es comparable con la resistencia a la compresión.

Los enlaces entre átomos en cerámicas son generalmente más fuertes que los enlaces en metales. Sin embargo, una concentración de esfuerzos de tracción no se puede aliviar por deformación plástica. De este modo, la carga aplicada para falla por tracción puede ser pequeña si hay irregularidades geométricas. El material cerámico acepta una carga de compresión grande, porque la falla por cizalle no ocurre con irregularidades estructurales.



TEMPERATURA DE FUSIÓN

La temperatura de fusión es un índice de la resistencia de los enlaces entre átomos. A un átomo fuertemente ligado se le debe proporcionar mayor energía térmica (esto es, mayor temperatura) antes de que pueda ser removido de su ubicación en el cristal.

Dado que la energía de enlace en diferentes metales varía ampliamente, se encuentra un gran rango de temperaturas de fusión.

Ejemplos:

Baja energía de enlace y baja temperatura de fusión	Mercurio (-40°C)
Intermedio	Aluminio (660°C)
Alta energía de enlace y alta temperatura de fusión	Hierro (1.538°C)

Así como en los metales, los enlaces atómicos en diferentes cerámicas no son idénticos. Sin embargo, las resistencias promedio de los enlaces son mayores en cerámicas que en metales. En consecuencia, se debe esperar un rango de temperaturas de fusión más altas (ver ejemplos).

Un material con grandes fuerzas de atracción entre átomos tendrá alta dureza así como también alto punto de fusión.

Materiales tales como carburo de silicio Al_2O_3 y sílice se consideran como refractarios y abrasivos.

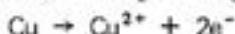
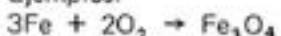
Ejemplos:

Energía de enlace intermedio y temperatura de fusión intermedia	criolita $(\text{Na}_3\text{AlF}_6)$ (980°C)
Alta energía de enlace y alta temperatura de fusión	sílice (SiO_2) (1.700°C)
Energía de enlace muy alta y temperaturas de fusión muy altas.	Periclasa (MgO) (2.800°C)

ESTABILIDAD QUIMICA

Todos los metales (excepto el oro) reaccionan con la atmósfera bajo condiciones ambientales normales para formar compuestos con elementos no metálicos, o para formar iones solubles. Sin embargo, las velocidades de reacción varían marcadamente. Cuando se forma una costra, la velocidad es afectada significativamente por las propiedades del compuesto, que es en realidad una cerámica.

Ejemplos:



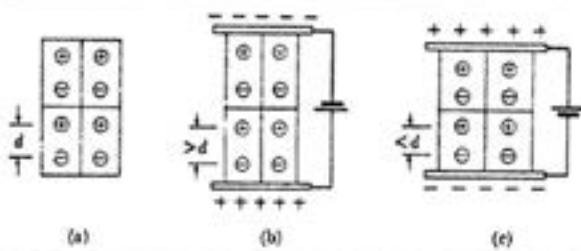
Los materiales cerámicos son realmente compuestos, de tal modo que son estables bajo condiciones ambientales. Ello no impide, por supuesto, la reducción, hidratación, o solución bajo condiciones extremas.

Ejemplos:



COMPORTAMIENTO DIELECTRICO

Los metales no exhiben características dieléctricas, por cuanto son siempre conductores electrónicos.



En muchos materiales cerámicos, los electrones están fuertemente asociados con los átomos, por ejemplo, Al_2O_3 , MgO , y SiO_2 . En consecuencia, estas cerámicas son excelentes aisladores de cargas eléctricas.

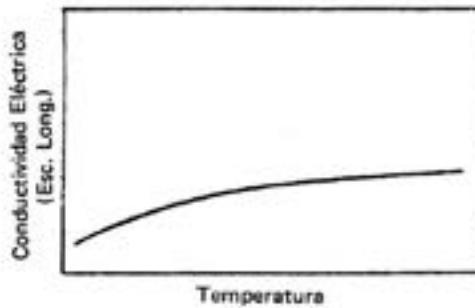
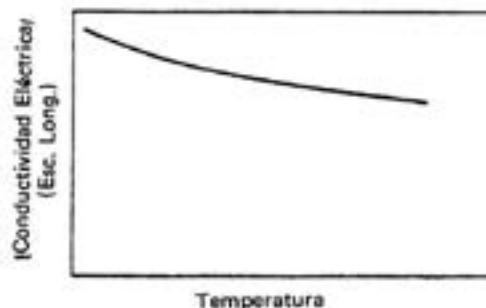
Ciertos compuestos cerámicos pueden jugar un papel funcional en circuitos eléctricos, como por ejemplo PbZrO_3 y Ba TiO_3 . Estos materiales poseen un dipolo eléctrico que es sensible a la presión. Esto conduce a nuevos y útiles dispositivos, tales como transductores electromecánicos.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Los átomos metálicos tienen un limitado número de electrones de valencia que no se encuentran firmemente asociados a ningún átomo. Si se aplica una diferencia de potencial, los electrones negativos pueden moverse fácilmente al electrodo positivo. Esto es conducción electrónica.

Los electrones se mueven con mayor facilidad en una estructura cristalina perfecta. Cuando se eleva la temperatura del metal, y los átomos se agitan térmicamente para dar una estructura menos perfecta, el movimiento electrónico es interferido. De ese modo, la conductividad eléctrica se reduce a mayores temperaturas (ver esquema). La propiedad más característica de un metal es la disminución en conductividad a temperaturas más altas.

Las cerámicas exhiben conductividad eléctrica si (1) tienen imperfecciones cristalinas o canales que permiten el movimiento iónico, por ejemplo, circonio estabilizado con vacancias aniónicas, o (2) hay iones de metales de transición presentes con valencias múltiples, por ejemplo, $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}) < 10$. Estos se pueden adaptar para proporcionar una conductividad controlada por difusión de iones o por transferencia de electrones, por ejemplo, de Fe^{2+} a Fe^{3+} . El aumento de temperatura facilita los movimientos de cargas. En contraste con los metales, la conductividad de las cerámicas aumenta exponencialmente con la temperatura (ver figura).



CONDUCTIVIDAD TERMICA

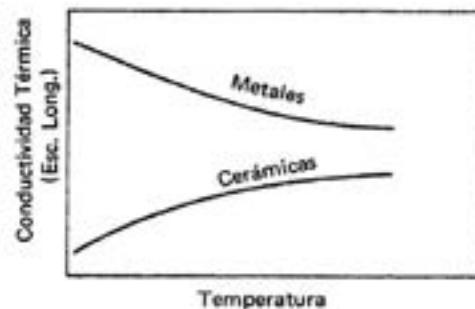
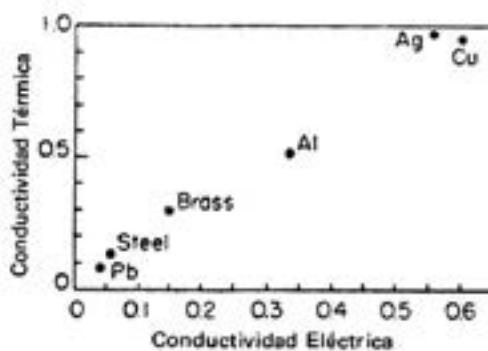
La energía térmica se puede transferir por agitación de los átomos adyacentes o por movimiento de electrones. El último mecanismo es significativo en metales, porque los electrones están libres para viajar de átomo en átomo. Los materiales, con alta conductividad eléctrica generalmente tienen alta conductividad térmica (ver figura).

La transferencia térmica a través de los metales, generalmente disminuye cuando aumenta la temperatura, como ocurre también con la conductividad eléctrica.

La mayoría de las cerámicas, particularmente a bajas temperaturas, no tienen electrones libres. En consecuencia, la energía térmica puede ser transferida únicamente por los átomos e iones más grandes, que vibran lentamente.

Cuando aumenta la temperatura, la transferencia de energía térmica aumenta porque (1) se dispone de electrones y (2) se hace significativa la transmisión por radiación, la cual aumenta con la cuarta potencia de la temperatura.

El aumento de temperatura inicialmente disminuye la conductividad térmica de las cerámicas cristalinas, al igual que en los metales. Sin embargo, la razón de transferencia térmica aumenta a temperaturas más altas debido a la radiación (ver figura).



RESUMEN

Dado que los metales y las cerámicas tienen similitud, pueden ser materiales competitivos para muchas aplicaciones. Debido a que muestran también diferencias, frecuentemente hay una preferencia para uno sobre el otro donde se requieren propiedades específicas. Si se requiere menores temperaturas de fusión (para fundición), mayores deformaciones (para conformado), o conductividades más altas, se prefieren los metales. Si es necesaria mayor refractibilidad (para moldes) durezas más altas (para abrasivos), o características de aislación, se especifican las cerámicas.

Si el metalurgista entiende las similitudes y diferencias entre los varios tipos de materiales, se encuentra mejor preparado para desplegar su competencia y poder reducir los costos de diseño y producción.

REFRACTARIOS USADOS EN PLANTA DE PELETS

Dr. Ing. Nelson Santander
Profesor Jornada Completa
del Departamento de Metalurgia
de la U.T.E.



1. INTRODUCCION

Con el agotamiento progresivo de fuentes naturales de minerales de fierro de leyes suficientemente elevadas como para cargar éstos directamente en los altos hornos, ha ido tomando un auge creciente la concentración de minerales no tan ricos, lo que genera un concentrado fino que es imprescindible someter a peletización y endurecimiento, previo a su utilización en los hornos de reducción.

En la actualidad, la única planta de peletización y endurecimiento que existe en Chile es la que posee CAP en Huasco. En dicha planta, el mineral preconcentrado y molido se concentra magnéticamente en húmedo y se aglomera en verde en forma de bolitas conocidas con el nombre de pelets.¹

En lo que aquí nos preocupa, podemos decir que el tratamiento pirometalúrgico que sufren a continuación los pelets involucra 3 alteraciones que es fundamental tener presente al analizar los equipos que en ellas ocurren: secado, oxidación y endurecimiento. El equipo de alta temperatura en que se llevan a cabo estas transformaciones está constituido por 3 unidades básicas:

- a) Una parrilla móvil para el secado y el precalentamiento de los pelets.
- b) Un horno rotatorio para el endurecimiento de los pelets.
- c) Un enfriador anular de la carga de pelets.

Se trata aquí de un equipo Allis-Chalmers capaz de producir 3.500.000 t/año, que se puso en funcionamiento en 1979. Las 3 unidades básicas emplean materiales refractarios convencionales, siendo hecho el revestimiento refractario inicial de dichas unidades, con refractarios fabricados por la firma japonesa Shinagawa.²

Es el objetivo del material que sigue a continuación efectuar un análisis de los equipos de alta temperatura utilizados en la planta de pelets de Huasco, estudiar sus revestimientos, y analizar finalmente los consumos en cuanto a materiales refractarios se refiere.

2. EQUIPOS

En la literatura correspondiente^{3,4} pueden encontrarse varios tipos de equipos normalmente utilizados en el tratamiento de los pelets a elevada temperatura, sin embargo, en lo que sigue restringi-

remos el estudio sólo a aquellos equipos que dispone CAP en su planta de Huasco.

La materia prima que se somete a tratamiento en estas unidades es una carga de pelets verdes muy ricos en Fe_3O_4 y que llevan como aditivo CaO dosificada de tal manera de dar una proporción $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.5$.

2.1 Parrilla Móvil:

Esta primera unidad es de 4,71 m de ancho por 55,5 m de largo, con área efectiva de trabajo de 230 m^2 , y formando una capa de 18 cm de espesor. Para los efectos de su operación puede dividirse en 3 zonas:

- Zona de secado ascendente mediante aire precalentado a 370°C . Los pelets en esta zona llegan hasta 120°C , eliminándose un 50% de la humedad.

2.2 Horno Rotatorio:

Este es un gigantesco cilindro de acero revestido completamente en su interior por material refractario. Sus dimensiones principales son 6,4 m de diámetro y 50 m de largo, operando ligeramente inclinado (pendiente de 50/0), en forma continua y en contracorriente. En su extremo de descarga opera un potente quemador a petróleo, que calefacciona esta unidad.

El objetivo de este horno es dar a los pelets características de resistencia mecánica que permitan su manipulación, transporte y cargado a los hornos de reducción. El horno gira a unas 2 RPM y la carga va descendiendo progresivamente a lo largo del horno aumentando su temperatura hasta los valores prefijados. El tratamiento térmico que recibe la carga es bastante uniforme debido a la

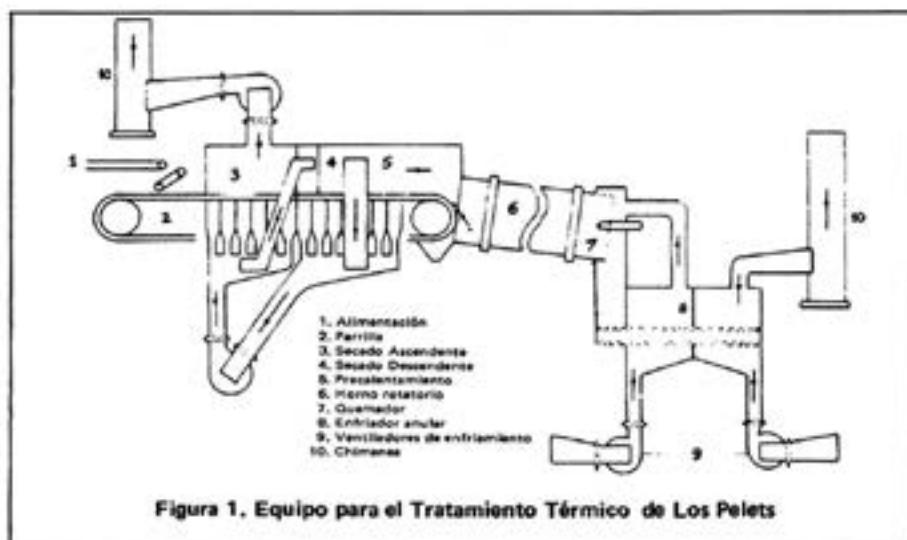


Figura 1. Equipo para el Tratamiento Térmico de Los Pelets

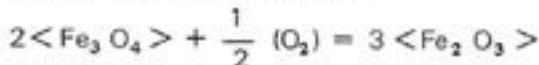
- Zona de secado descendente mediante aire precalentado a 370°C . Los pelets abandonan esta zona totalmente secos y alcanzan una temperatura aproximada a los 290°C .
- Zona de precalentamiento mediante la circulación de aire a 1.100°C en forma descendente. A la salida de esta zona los pelets van a 1.000°C .

En las zonas (ii) y (iii) ocurre un 70% de la reacción de oxidación de la magnetita del mineral a Fe_2O_3 , óxido que facilita la formación de la liga cerámica de los pelets.

En general, se puede decir que el objetivo de la parrilla es dar condiciones de estabilidad física a los pelets de modo que sean capaces de soportar el trabajo mecánico a que son sometidos al pasar por el horno rotatorio.

La Figura 1 nos muestra esquemáticamente el sistema de flujos de aire y de gases en un equipo análogo al de Huasco.

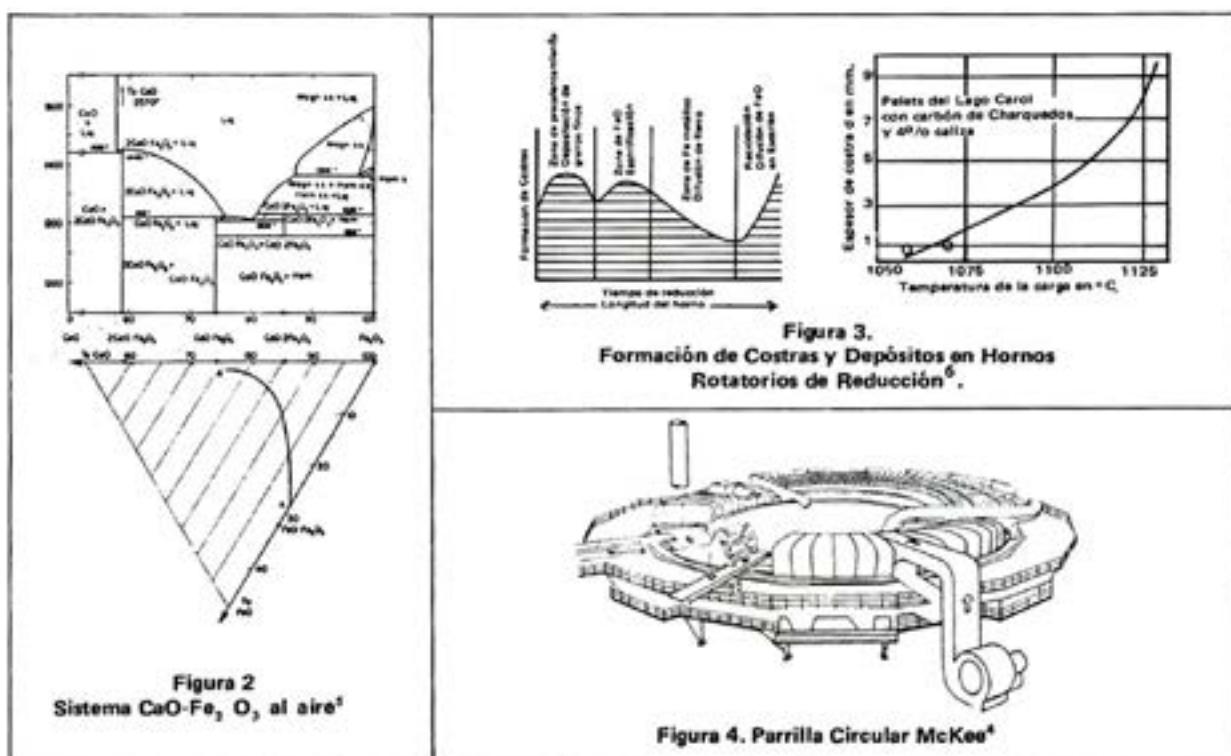
permanente revoltura de ella. Aquí sólo ocurre un 50% de la reacción a Fe_2O_3 . Desde el punto de vista químico, podemos decir, que la hematita generada en la parrilla móvil según:



da origen a ferrita cárquica en la interfase fundente/mineral según:



y esta película es capaz de originar fases líquidas a $\sim 1.200^\circ\text{C}$ tal como muestra la Figura 2⁵, e incluso a temperaturas inferiores si se piensa que la sílice participa para formar una fase silicato que constituye el ligante cerámico del pelet. El pelet ya en el horno rotatorio comienza a generar escoria. Dada la relación $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.5$ puede decirse que el pelet es autofundente.



En la zona de máxima temperatura dentro de este horno, se logra llegar a 1.340°C, temperatura suficiente como para garantizar una buena reacción de formación de la liga cerámica mediante los silicatos. Sin embargo, debido a las altas temperaturas ocurren también fenómenos indeseables. Así por ejemplo, se forman conglomerados de pelets que es necesario romperlos periódicamente en la parrilla de barras dispuesta a la salida del horno. Otro efecto nocivo también es el efecto de aglutinación de los finos a las paredes del horno originando anillos que deben ser removidos periódicamente.

A modo de ilustración comparativa, la Figura 3 muestra, las alteraciones físicas y químicas que ocurren en el perfil de un horno rotatorio de reducción directa, y también como se ve afectada la formación de costras y depósitos en función de la temperatura de la carga.⁶

2.3 Enfriador Anular:

Esta unidad es un componente inseparable del sistema, ya que de no existir, los pelets sufrirían un enfriamiento tan brusco que les originaría grietas y fracturas que los destruirían considerablemente. La geometría de esta unidad es la de un gigantesco anillo de sección rectangular, en muchos aspectos semejante a la parrilla circular del diseño McKee como la que muestra la Figura 4. La gran diferencia con la parrilla McKee es que ésta permite realizar en una sola unidad lo que en nuestro sistema efectuamos en 3.

El enfriador de Huasco tiene un φ medio de 18,5 m, un ancho de 2,8 m y un lecho de aprox. 70 cm de altura. El enfriamiento de los pelets ocurre aquí mediante una corriente de aire frío que atraviesa el lecho de pelets con un flujo ascendente. En esta unidad ocurre el llamado enfriamiento primario. El aire caliente que sale del enfriador se introduce como aire de combustión en el horno rotatorio.

Al salir del enfriador anular los pelets pasan a un enfriador recto de 38 m de largo donde se enfrian a aprox. 50°C mediante circulación de aire en flujo cruzado ascendente.

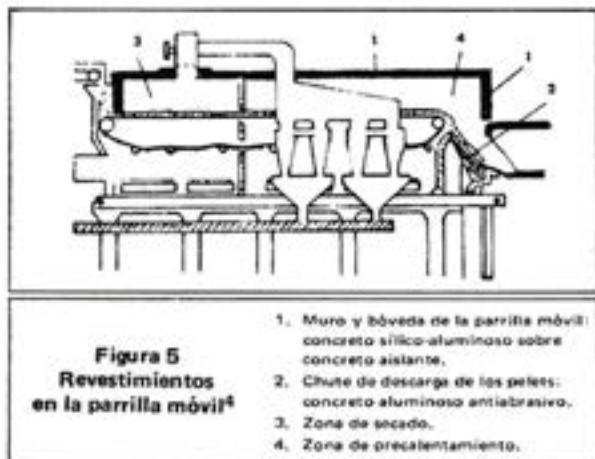
3. REVESTIMIENTOS

Exceptuando el piso de la parrilla móvil, y el piso del enfriador anular, el resto de la estructura interior de estas dos unidades están íntegramente protegidas por revestimientos refractarios. Está casi de más decir que todo el interior del horno rotatorio está revestido por mampostería refractiva. En lo que sigue analizaremos los revestimientos en cada unidad por separado.

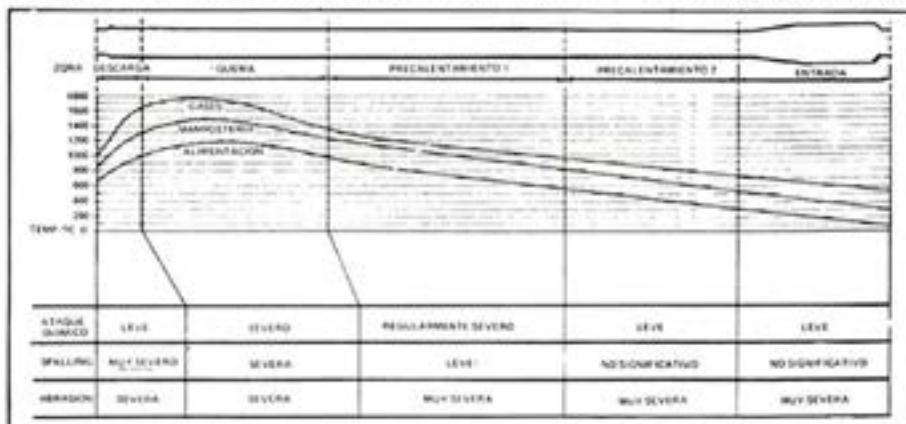
3.1 Parrilla Móvil:

Tal como se aprecia en el sencillo esquema de la Figura 5, el revestimiento es bastante simple, y no ofrece problemas serios ya que las temperaturas son aún relativamente bajas, con un máximo cercano a 400°C en el secado, y de poco más de 1.000°C en el precalentamiento.

Las paredes son planas y no existe ningún



contacto entre las paredes y los pelets. El revestimiento puede hacerse aquí proyectando concreto sílico-aluminoso hacia la pared donde se sostiene gracias a anclajes metálicos tipo Y o tipo V, y dejando una camada de concreto aislante de baja densidad entre este concreto y la chapa metálica



de la pared. En la bóveda, el revestimiento es similar, sin ser necesario el uso de bóveda suspendida. Las paredes en el caso nuestro están constituidas por ladrillos y sólo en la zona inferior donde existe roce con la carga se ha colocado concreto.

El diseño original contemplaba el empleo de plástico refractario en esta zona, pero no dio buenos resultados.

Algunos diseños incluyen un quemador extra al final de la zona de precalentamiento. En estos casos, para mayor seguridad, el revestimiento puede fijarse a anclajes cerámicos, así como también puede colocarse concreto con mayor contenido de alúmina.

La descarga de los pelets desde la parrilla hacia el horno rotatorio se hace a través de un chute revestido con refractario antiabrasivo. En el caso de la Figura 5, el chute es de concreto aluminoso, sin embargo, hay varias alternativas en cuanto a materiales: SiC sinterizado o fundido, alúmina fundida, o bien, basalto fundido.

3.2 Horno Rotatorio:

El revestimiento de este tipo de horno es diferente del de los hornos de cemento o los de cal, ya que no existen aquí ni la zona de precalentamiento ni la de calcinación, sin embargo, hay ciertas similitudes, y en general puede decirse que mucho se puede aprender de aquellos, por lo cual usaremos algunos datos de ellos, por ser más conocidos, para lograr una mejor comprensión de los rotatorios para pelets.

Los pelets entran al horno rotatorio a más de 1.000°C, variando la temperatura de la carga, de la pared, y de la llama a lo largo del horno de una manera similar a los perfiles mostrados en las zonas de la izquierda de la Figura 6, tomada de la operatoria de un horno rotatorio para cal.⁷

Junto con los perfiles térmicos que se tienen para la llama, para la pared, y para la carga, se ha seccionado el horno de modo de poder evaluar cualitativamente las 3 solicitudes más importantes en este tipo de hornos, es decir, el ataque químico, el spalling térmico, y la abrasión.⁸

Figura 6
Condiciones de Operación Típicas en Hornos Rotatorios para Cal⁷

En la práctica no existe un tipo de refractario que, en forma económica pueda usarse de modo que resista todas las condiciones exigidas a lo largo del horno. Para obtener los mejores resultados se hace necesario usar refractarios específicos para cada una de las zonas. Pueden usarse ladrillos de arcilla high-duty, y en la zona de servicio más severo pueden usarse ladrillos de arcilla superduty. En el caso que las condiciones químicas y térmicas sean demasiado severas para los refractarios de arcilla, se usan revestimientos de alta alúmina o bien ladrillos básicos.⁹

El revestimiento original está hecho de ladrillos de alta alúmina resistente a la abrasión y con un espesor de ~ 23 cm. El refractario está fuertemente sometido a abrasión generada al rozar los pelets contra las paredes, y también debido al ataque del polvo, ya que los finos generados en el proceso se van aglomerando a las paredes formando anillos que es preciso remover periódicamente. La Figura 7 muestra muy esquemáticamente la formación de

anillos de desgaste en el interior del horno rotatorio.

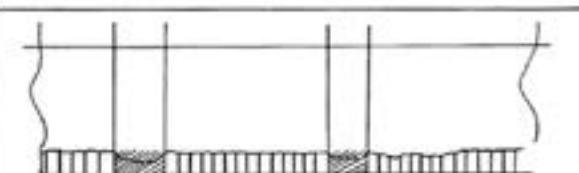


Figura 7. Formación de Anillos de Desgaste en interior Horno Rotatorio.

Estos anillos de desgaste constituyen irregularidades muy nítidas y se supone que ha habido influencia del spalling térmico en su formación, motivado por repentinhas variaciones de la llama del quemador. De hecho, en la práctica, para remover las anillos se enfria el horno, lo que genera spalling en la albañilería. En la última reparación se ha empleado en esta zona concreto refractario. A propósito, en Inglaterra se han probado con éxito las reparaciones de hornos rotatorios de cal con concretos proyectables, tal como se ve en la Figura 8.¹⁰

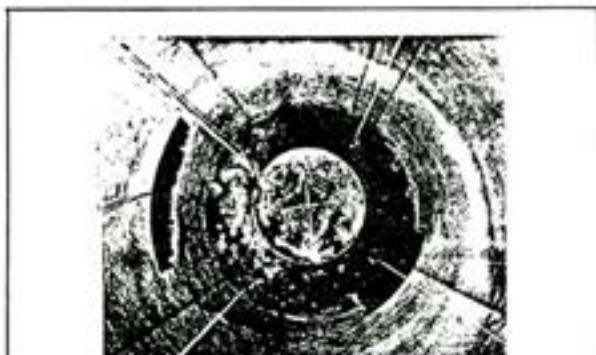


Figura 8. Reparación con Concreto Proyectable en Horno Rotatorio de Cal¹⁰.

El deterioro provocado por los anillos de desgaste puede llegar a ser tan dramático que localmente pueden producirse deformaciones y hasta roturas de la carcasa metálica. La Figura 9 muestra cómo habría que enladrillar en forma correcta (e incorrecta) una región de palastro deformado.

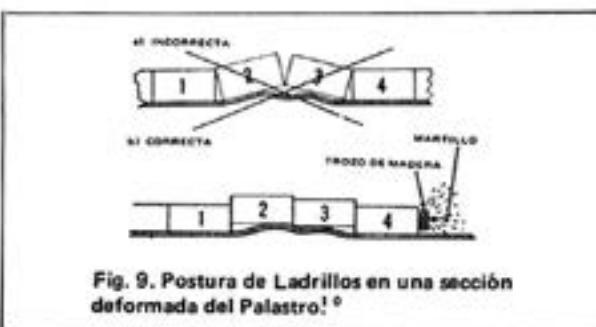


Fig. 9. Postura de Ladrillos en una sección deformada del Palastro.¹⁰

El usuario debe tener presente que incluso para los mejores palastros no puede evitarse la tendencia que tiene la carcasa a tomar una forma ligeramente ovalada a medida que el horno gira.

En cuanto a los extremos del horno podemos decir que la boca de carga sigue enladrillada, pero la boca de descarga, tal como se ve en la Figura 10, se ha construido ahora con concreto refractario en el horno de Huasco, en una longitud de ~ 1,35 m.

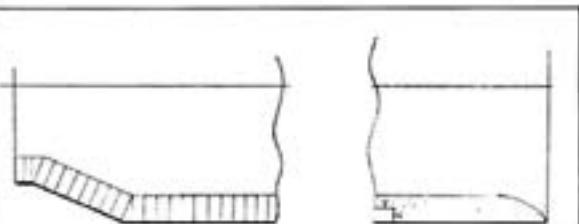


Figura 10. Detalle Revestimiento Carga (Izq.) y Descarga (Der.) Horno Rotatorio

Para mejorar la eficiencia térmica de los hornos rotatorios, y con ello obviamente ahorrar combustible, se ha empleado en muchos diseños de ellos, una capa aislante entre el palastro y el revestimiento de trabajo. Una manera de colocar los ladrillos aislantes en este tipo de construcción, es usando un panelizado radial y longitudinal de modo que las tablillas de apoyo térmico que conforman la aislación, no sufren tanto mecánicamente. Este tipo de panelizado se ilustra en la Figura 11.



Figura 11. Panelizado para el Uso de Aislación de Hornos Rotatorios¹⁰

Los revestimientos aislantes han ido evolucionando de modo que hoy existe una tendencia a usar concretos aislantes de vermiculita, disminuyendo con ello el uso de ladrillos aislantes estándar.

3.3 Enfriador Anular:

Ya se mencionó anteriormente que el piso del enfriador no va revestido en refractarios, luego son las paredes y la bóveda las que tanto en la parte más caliente como en la más fría se revisten con concreto sílico-aluminoso antiabrasivo.

Adicionalmente, y según el tipo de diseño, los equipos para el tratamiento térmico de pelets pueden llevar accesorios tales como caja de fuego para el quemador, cajas receptoras de descarga, cámaras de polvo, y retenedores de carga e intercambiadores térmicos dentro del horno rotatorio.

4. CONSUMOS

No cabe dudas que los consumos de refractarios en las plantas de pelets son relativamente muy bajos, sobre todo si se compara con los consumos de otros procesos involucrados en la Siderurgia, como se ve claramente en la Figura 12.

En EE.UU. dichos consumos son incluso más bajos debido a que las plantas utilizan normalmente gas de petróleo como combustible. Al usar petróleo se aprecia una disminución de las campañas de los hornos, ya que este combustible deja residuos que atacan al revestimiento. Igual cosa ocurre al usar carboncillo.

En general, el consumo puede clasificarse en dos categorías:

- puesta en marcha, o reparación total
- reparaciones menores, parciales, o medias.

Dicho sea de paso, dadas las dimensiones colosales de los equipos empleados, deben tomarse medidas y precauciones especiales en los desmantelamientos.

De acuerdo a los datos estadísticos de América Latina⁴ se tiene índice medios de consumo del orden de ~ 0.1 kg/t pelets. Para el caso particular de la planta de pelets de Huasco las estimaciones hechas dan un valor de ~ 0.17 kg/t pelets. Ahora

bien, las estadísticas señalan que en América Latina se consume mayor proporción de ladrillos más caros como son los básicos, en cambio, en Chile en la reciente reparación por ejemplo, no se han empleado ladrillos básicos, pero en cambio se ha hecho uso abundante de concretos refractarios y ladrillos sílico-aluminosos.

REFERENCIAS

- ANONIMO, "Complejo Minero-Industrial del Huasco", p.1-26, CAP-Vallenar, (1978).
- ANONIMO, Catálogo Técnico de Productos, Shingawa Refractories Co., Ltd.
- D.F. BALL et al., "Agglomeration of Iron Ores", Heinemann Educational Books Ltd., London, (1973).
- J.A. CHARTOUNI y J.V. NUNES, en "Refractories in Siderurgia de América Latina", p. 7-17, ILAFA, Santiago, (1977).
- E.M. LEVIN et al., "Phase Diagrams for Ceramists", Fig. 43, p. 49, The Am. Ceram. Soc., Columbus, Ohio, (1974).
- H.W. GUDENAU et al., Stahl u. Eisen, 99, Nº 17, p. 908-913, (1979).
- ANONIMO, "Refractories for the Lime Industry", Catálogo Técnico de GR-Stein Refractories Ltd.
- I. CACERES, "Hornos para fabricar cal", Boletín Informativo Recsa Nº 4, p. 4-16, (1976).
- ANONIMO, "Modern Refractory Practice", p. 446-453, Harbison-Walker Refractories Co., Pittsburgh, (1963).
- ANONIMO, "Insulation of Refractories in Rotary Kilns", Catálogo Técnico de GR-Stein Refractories Ltd.
- W.S. MISKA, "Refractory Use Patterns in the Iron and Steel Industry of the United States", Bureau of Mines I.C. Nº 8382.
- J.H. CHESTERS, "Refractories for Iron and Steelmaking", The Metals Soc., London (1974).

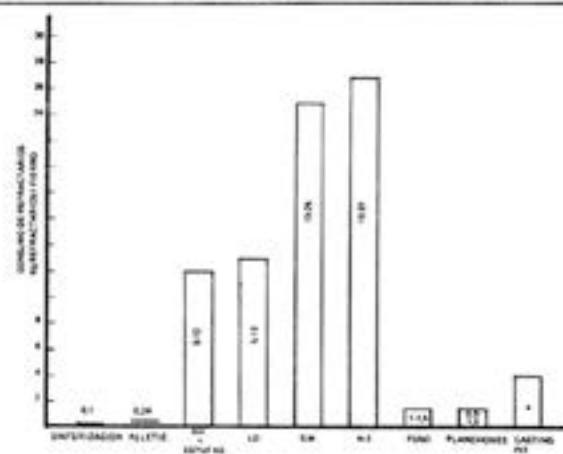


Figura 12
Consumos de Refractarios
en Procesos Siderúrgicos^{11, 12}

AS CEN SORES



Por Juan A. Valencia V.

Ilustraciones/Eugenio Sarmiento



Estoy seguro, he mirado la dirección varias veces, es en este edificio, en el octavo piso, departamento 826, eso es. Me detengo frente a la entrada de los ascensores; hay varios cristianos esperando y sus miradas vagan de los números iluminados que indican la posición del ascensor a las personas que por un breve momento serán compañeros de viaje; somos muchos, me asalta la duda si tendremos cabida, varios con la misma duda se acercan más a la puerta dispuestos a ser los primeros en meterse. No digo entrar, porque la expresión de los rostros sólo da que pensar que se meterán de cabeza. La nueva posición de ataque, tan cercana a la puerta, los obliga a quebrarse el cogote para seguir la trayectoria del ascensor en los números. Está en el décimo primer piso, es el último y hace rato que está detenido. Las miradas y los cuellos torcidos; me pregunto si estos viejos podrán enderezar el pescuezo o tendrán que entrar mirando el cielo cuando se abra la puerta.

El número once sigue encendido. ¿Se habrá descompuesto, o el encargado terminaría su turno? ¿O iría a las casitas? Nos miramos unos a otros, menos los del cogote chueco; pensamos lo mismo, idan ganas de hacer una polla!

¡Al fin se apagó el número! Hay un momento de complacencia hacia adelante. El ascensor comienza a descender: diez, ocho, ¡qué pasó! quedó nuevamente detenido.

¡Puchas que se juntó gente! Aquí va a quedar la crema; todos muestran claros deseos de no perderse el viaje. Me dan ganas de subir a patas los ocho pisos, pero es cosa seria. La última vez, hace como cinco años, subí nada más que cinco pisos y me costó media hora la recuperación. Cuando se va subiendo no se siente, es al final el queso. No se puede hablar ni respirar, parece



que las costillas se achican o el corazón se agranda; las piernas tiritan y una extraña nube helada rodea el rostro. Lo peor es que todos se fijan y una leve sonrisa se dibuja en sus labios. Por lo menos podrían mover la cabeza de arriba hacia abajo. Me carga el movimiento de lado, pues entre otras cosas, puede significar: que uno ya no se la puede, que está sonando o que es un tarado.

Ahora quedó pegado en el cuarto. El ascensor del lado llegó, vomitó su carga, absorbió la otra y partió. Si me hubiera parado cerca de ése, ya estaría subiendo. Pero habría sido feo cambiarse de lugar; los de este grupo se sentirían traicionados y los otros me tomarían como invasor.

Lo que más rabia me da en estas esperas son unos chatos que nunca esperan, son unos afortunados de miéchica que llegan justo cuando el ascensor va a partir, ¡y los esperan! Agréguese a esto, que los pesados no apuran el tranco y menos agradecen la atención al ascensorista. Se meten y miran a los enjaulados como ordenándoles que se corran para darles espacio. Esta clase de tipejos es el mismo que aparece en una esquina y toma el taxi que después de larga espera lo vemos acercarse con tanto cariño. Una vez llegué a una esquina justo cuando venía un taxi, le hice señas y en el momento de tomarlo me di cuenta que otro fiato hacía rato esperaba; me dio vergüenza y le cedí el lugar: —Señor, usted tiene el derecho,

adelante. Recibí las gracias y quedé esperando mientras gozaba, recordando la mirada de sorpresa que me dieron el caballero y el chofer. Deben haber creído que era marciano.

Ya el ascensor viene en el entresuelo, los rostros se ponen tensos y cada cual se acerca más a la puerta, los del cogote torcido tratan de enderezarlo. Tendremos la guerra mundial cuando se abra la puerta. En realidad, los ascensores debieran tener dos puertas, una adelante para la carga y una trasera para la descarga (?), así se evitarían los choques como el que dentro de segundos se va a producir. ¡Se produjo! Las dos fuerzas quedan frente a frente, mirándose, no se ve señal de iniciar un diálogo, se miran fríamente; parece una película de Gansters. Si sacaran sendas pistolas no me sorprendería, quisiera cerrar los ojos o tirarme al suelo, pero no me atrevo. ¡Capaz que crean que soy alharaco!

¡Sucedió lo que temía! Ambas fuerzas emprenden el ataque y se lanzan adelante, resueltamente. Si no queda el desparrollo se debe a que con el último barniz de civilizados, se cruzan; mientras unos salen, los más descontrolados se meten hasta el fondo, simultáneamente. De los que venían en el ascensor, los últimos en salir, se les nota en la cara el susto ante el peligro de



quedar atrapados y tener que volver arriba. Trato de no quedar afuera y apechugo metiéndome de lado, ¡puchas! apenas alcancé; es increíble la capacidad de estas jaulas, casi entraron todos. Los que quedaron afuera nos tiran miradas de odio, nosotros se las devolvemos con la indiferencia del vencedor. Una señora abundante que viene apareciendo recién, trata de entrar como si este viaje fuera el último. Nos apretamos un poco y, ¡cabal! Claro que los chicos quedaron prácticamente ocultos por el resto. Se van a fregar porque no podrán, durante la subida, disfrutar del hermoso cambio de luces en el indicador interior y al cual todos elevamos miradas como fieles que adoran a un Dios pagano.

Aprovecho de echar una mirada antes que las vísceras me llenen a los talones. Hay un chato con un puchero encendido, como estamos tan estrechos tiene que llevar la mano levantada para no quemar al fiato del lado. Dos damas reanudan la conversación interrumpida por la entrada; como hablan fuerte y las dos al mismo tiempo, escuché lo siguiente:

La nunca María he se visto compró mujer un con vestido más feísimo mal fijaté gusto.



Esto fue lo que quedó grabado en mi mente. Como creí que estaba volviéndome loco, no quise escuchar más. Posteriormente, en casa y como tengo memoria de elefante, anoté la conversación en un papel. Me

puse lívido, en verdad algo me estaba fallando, no podía ser, así, tenía que ser! Las dos viejas se entendían perfectamente y era difícil pensar que las dos estuvieran locas. Al final, hice un descubrimiento. Cuando hablan dos damas creemos que lo hacen al mismo tiempo y que no se entienden, pero se entienden. Lo que pasa es que se intercalan las palabras como un engranaje. Si no me cree, léanlo alternado y verán que tengo razón.

Llegamos al tercer piso, todos cierran bien la boca para que no se les escape nada con la frenada de la jaula. Para ser ascensorista creo que hay que tener resistencia de marinero, si no, estos pobres viejos mueren desnutridos.

Naturalmente, los que se metieron primero y quedaron comprimidos en el fondo, son los primeros en salir y para ello se agitan desesperadamente mientras tratan de llegar a la puerta. Se produce algo así como una ebullición y quedamos un poquito más holgados. Los chicos que habían quedado comprimidos por las caderas de los no tan chicos, respiran e ingresan al grupo adorador de los números luminosos. ¡Qué tiernos!, se les ve alegría en el rostro.

¡Qué desconsiderada es la gente!, salen como escapando del ascensor; nadie le dirige una sonrisa o un "gracias" al chofer de la jaula. Con razón cuando parten o frenan, lo hacen violentemente;

también; me dan ganas de apretarme más el cinturón, por siaca. No sé qué haría con los pantalones en los tobillos.

El ascensor se detiene en el quinto piso y salen las damas cotorras, pero entran tres ñatos conversando como si hubieran entrado a una habitación privada. Deben ser de la casa, porque no miran ni indican el piso. ¡A lo mejor son los dueños! Nos imponemos de unas importantes trans-



sacciones comerciales y la inversión de varios millones con el agregado de un inminente viaje a Francia e Inglaterra en la mejor línea aérea. Pareciera que todo el resto hubiera dejado de hablar. Es cierto que cuando subíamos solamente lo hacían las cotorras, pero con estos ñatos quedamos más silenciosos, solamente podemos mirarnos entre sí, pero estamos todos de acuerdo. ¡A propósito!, yo creo que la transmisión del pensamiento o telepatía debiera estudiarse dentro de una jaula de ascensor. Es increíble la comunicación que se desarrolla entre los pasajeros. Si se conectara un alta voz a cada uno se podría escuchar frases como estas:

— ¡Puchas, la lola pa' buena!
— ¡De acuerdo!

— Esta vieja se echó un litro de colonia, iapestal —A mí me recuerda a la suegra.

— ¡Desgraciado, crees que el ascensor es tuyo, no te corres ni por un quesito! — ¡No me da la gana, y qué fue!



— Pueda ser que hoy día encuentre al abogado, este fresco es más difícil de pillar que el gordo de la lota.

Por suerte los "Management International" salieron en el séptimo piso. Ya estamos sueltos, solamente entra un colega o amigo del ascensorista y escucha:

— ¡Hola!

— ¡Hola!

— ¿Fuiste?

— No, ¿y tú?

— Tampoco. Debe haber estado buena.

— Sí, yo supe que estuvo buena.

— Mañana voy.

— Yo también, nos vemos, ichao!

Nos miramos entre sí y estamos de acuerdo que nos han dejado contra metidos. Se enciende el ocho y me acerco a la puerta, pero el ascensor sigue subiendo.

— ¡Oiga, yo le pedí el ocho!

— Señor, este ascensor para en los impares, el del lado se detiene en el ocho.

¡Por la pucha!, por estar mirando a estos cristianos no me fijé. ¡Qué diablos! Salgo por el nueve y bajo por la escala, mientras tanto siento que me pongo coloradito mientras escucho mentalmente:

— ¡Aturdido! Viejo ciego, fíjate donde te metes.





Dr. Amado Cabo

INSTITUCION:
Comisión Nacional de Energía Atómica
(Dept. de Materiales) Avda. Libertador
8250-1429 Buenos Aires-ARGENTINA.

tratamientos térmicos y termoquímicos a presión subatmosférica

RESUMEN

Los procesos de tratamientos térmicos y termoquímicos a presión subatmosférica ($10-10^5$ Torr) permiten reemplazar con ventaja a varios procesos convencionales, particularmente cuando se requiere el uso de atmósferas controladas, en el tratamiento de piezas fabricadas con aceros especiales o con aleaciones de materiales tales como circonio, titanio, etc.

En este trabajo, se describen las características principales de estos procesos desde el punto de vista metalúrgico, destacándose detalles constructivos del equipamiento necesario. Se describen diferentes diseños de hornos y sus aplicaciones en el tratamiento térmico de aceros y de aleaciones para uso nuclear. Finalmente, se destacan los desarrollos más recientes en tratamientos termoquímicos por bombardeo iónico aplicados a la nitruración de aceros.

En cada caso se discuten las ventajas y limitaciones de la tecnología, teniendo en cuenta los aspectos técnicos y de contaminación ambiental que condicionan su desarrollo y aplicación industrial.

INTRODUCCION

Hasta 1960 aproximadamente, los tratamientos térmicos en vacío de metales y aleaciones, eran todavía en la mayoría de los casos procesos de laboratorio o reservados a productos muy especiales y en pequeña escala. Sin embargo, en los últimos años, las industrias aeroespacial y la nuclear, principalmente, han exigido la aplicación de esta tecnología a escala industrial. En la actualidad, su aplicación se está extendiendo también a varios procesos de tratamiento térmico, aun de materiales convencionales, pues se ha demostrado que es técnica

y económicamente conveniente. Entre los materiales a los que se aplica esta tecnología, pueden citarse: aleaciones base cobre, aceros de mediana y baja aleación, aceros de herramientas, aceros inoxidables y materiales refractarios y reactivos en general. Los procesos desarrollados abarcan: tratamientos de recocido, temple y revenido y tratamientos termoquímicos, con la mayoría de las variantes establecidas por los procesos convencionales.

Conceptualmente, "vacío" significa un estado físico en que no existe materia, sin embargo, desde el punto de vista práctico "vacío" se usa para definir un estado en que la cantidad de materia en fase gaseosa es menor que la existente a presión atmosférica, por lo tanto en este trabajo se mencionará "presión subatmosférica", en lugar de "vacío". Dado que a presión atmosférica (760 Torr), la densidad de partículas es de aproximadamente 10^{19} partículas/cm³, y a una presión de 10^{-3} Torr, la densidad es de 10^{13} partículas/cm³, resulta que a presión subatmosférica, las reacciones gas-sólido en la superficie de los materiales a tratar son más lentas, lo cual permite obtener superficies inalteradas por el tratamiento.

Con el objeto de evitar la contaminación de la superficie durante el tratamiento, se podría utilizar una atmósfera de gas inerte, como por ejemplo, He, Ar, N₂ o en algunos casos H₂, los cuales pueden formar una atmósfera protectora equivalente a la obtenida a presión subatmosférica; esto es cierto en principio, pero desde el punto de vista económico, no resulta conveniente a escala industrial, debido a que sería necesario consumir gases de alta pureza, para obtener una atmósfera con contenido de impurezas equivalente.

Los equipos de bombeo convencionales permiten obtener sin problemas presiones del orden

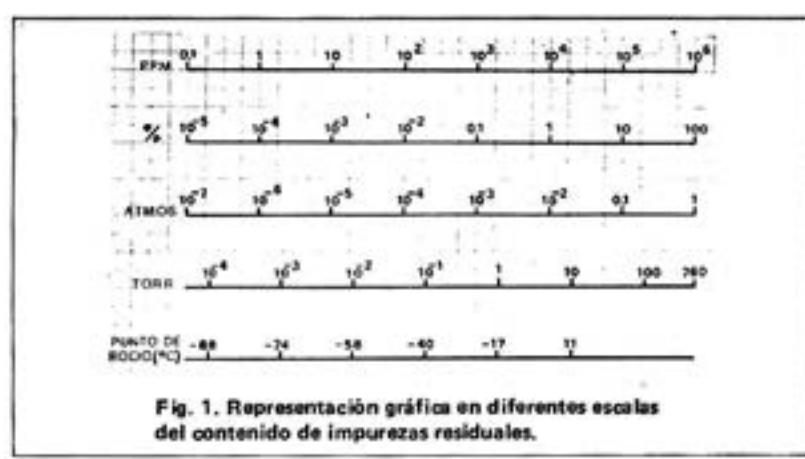


Fig. 1. Representación gráfica en diferentes escalas del contenido de impurezas residuales.

de 10^{-3} a 10^{-5} Torr,² lo cual implica que en el recinto evacuado quedan de 1 a 0,01 ppm del gas original. Esta concentración de impurezas, es de algunos órdenes de magnitud menor que la de los gases puros de uso industrial.

En la figura 1 se muestra gráficamente el contenido de "impurezas residuales" de una atmósfera a presión subatmosférica expresada en diferentes unidades.

Otro aspecto relevante de los tratamientos térmicos en atmósfera inerte es el relativo a su circulación, pues, cuando los componentes que se tratan son de geometría compleja, suele ser difícil y a veces prácticamente imposible lograr una circulación del gas adecuada para obtener un resultado uniforme en toda la superficie. Sin embargo, cuando el horno es evacuado, la salida de los gases se produce en todos los lugares y, por lo tanto, es posible una circulación adecuada provocando variaciones de presión o usando sistemas de agitación relativamente simples.

En general, durante los tratamientos térmicos a presión subatmosférica, se reduce el contenido de gases en la superficie y en zonas próximas a la superficie disociándose y reduciéndose algunos óxidos, lo cual da una superficie limpia y en algunos casos brillante. La reducción del contenido de gases mejora las

propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a la fatiga, y en general también mejora la resistencia a la corrosión.

El tratamiento térmico de componentes de acero, como por ejemplo fresas, brocas y herramientas de corte en general, se puede realizar con éxito a presión subatmosférica, porque no se produce descarburación superficial y se minimiza la distorsión, lo cual permite hacer el tratamiento del componente terminado. En las aleaciones base titanio y base circonio, el contenido de oxígeno y de hidrógeno debe limitarse a unas pocas ppm, de lo contrario las propiedades mecánicas y de corrosión se ven desmejoradas. El cambio de propiedades es tal que se pueden usar medidas de dureza para estimar el contenido de oxígeno que puede haberse incorporado durante la fusión de lingotes. Esta es la razón fundamental por la cual inclusive la fusión de estos materiales, lo mismo que la de algunos aceros de alta calidad, debe hacerse a presión subatmosférica.

1. Limitación de la aplicación de procesos a presión subatmosférica.

Una de las limitaciones que se pueden presentar es la presión de vapor demasiado elevada a la temperatura del proceso. La presión debe ser inferior a la existente en la zona de trabajo, de lo contrario, se producirá una desti-

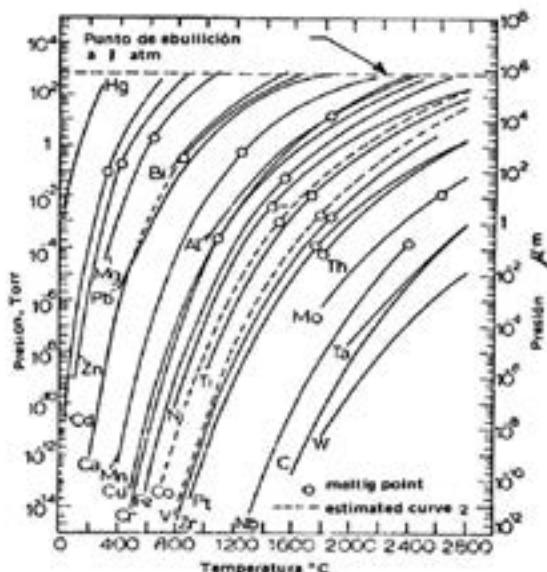


Fig. 2. Presión de vapor en función de la Temperatura para diferentes elementos¹

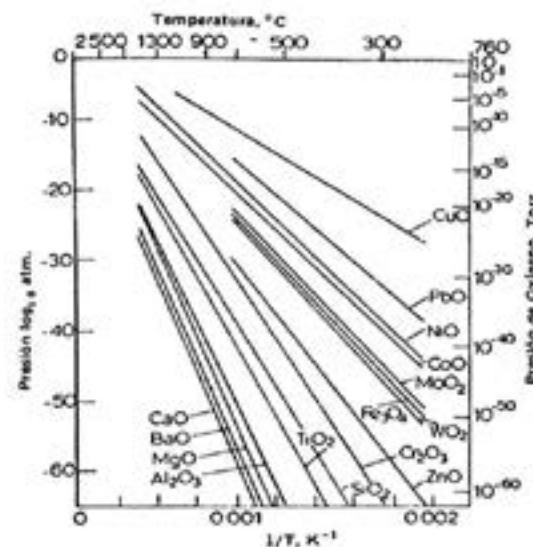


Fig. 3. Presiones de disociación de óxidos en función de la Temperatura²

lación o volatilización con los consiguientes problemas. Si bien resulta difícil conocer la presión de vapor en equilibrio de un elemento dado, cuando el mismo está formado aleación, es posible estimarla a priori a través de datos obtenidos para los elementos en estado puro.¹

En la figura 2 se muestra las curvas de presión de vapor en función de la temperatura para diferentes elementos. Conviene destacar que la presión de vapor de un elemento puro es en general mayor que cuando él mismo está formando aleación.

2. Disociación de óxidos a presión subatmosférica

Los diagramas de Richardson² describen para diferentes óxidos la presión de oxígeno en equilibrio con el óxido en función de la temperatura; si a una dada temperatura, el material está en contacto con una atmós-

fera cuya presión parcial es superior a la de equilibrio, se producirá una reacción de oxidación y viceversa. La información de los diagramas ha sido obtenida para una presión total de una atmósfera y diferentes presiones parciales de oxígeno, esto la hace valiosa, cuando se consideran reacciones de oxidación-reducción en atmósferas inertes "convencionales"; sin embargo, los resultados obtenidos a presión subatmosférica³ indican que la información sigue siendo válida. Por ejemplo, el hierro puro a 850°C, a una presión parcial de oxígeno de 10^{-7} Torr, debería oxidarse y sin embargo, la experiencia muestra que la superficie de hierro después de ser recocida en las condiciones indicadas aparece limpia y brillante. Investigaciones realizadas con microscopía electrónica han mostrado que efectivamente se produce oxidación, pero la reacción es demasiado lenta como

para poder observar los resultados a simple vista. Durante las experiencias mencionadas, también se encontró que aparentemente el hierro impuro con carbono en solución sólida es más difícil de oxidar que el hierro puro. Esto se explica por el hecho de que el oxígeno de la atmósfera reacciona con el carbono formándose CO_2 . Este es el mecanismo por el cual se produce decarburoación superficial, cuando el recocido se hace bajo una presión de oxígeno relativamente alta dando como resultado superficies brillantes. En la figura 3 se muestra el diagrama de Richardson para óxidos.

3. Equipos y Procesos de tratamiento térmico a presión sub-atmosférica.

Los equipos usados actualmente en tratamientos térmicos

pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Hornos de pared caliente:
 - Retorta de pared simple
 - Retorta de pared doble
- b) Hornos de pared fría.

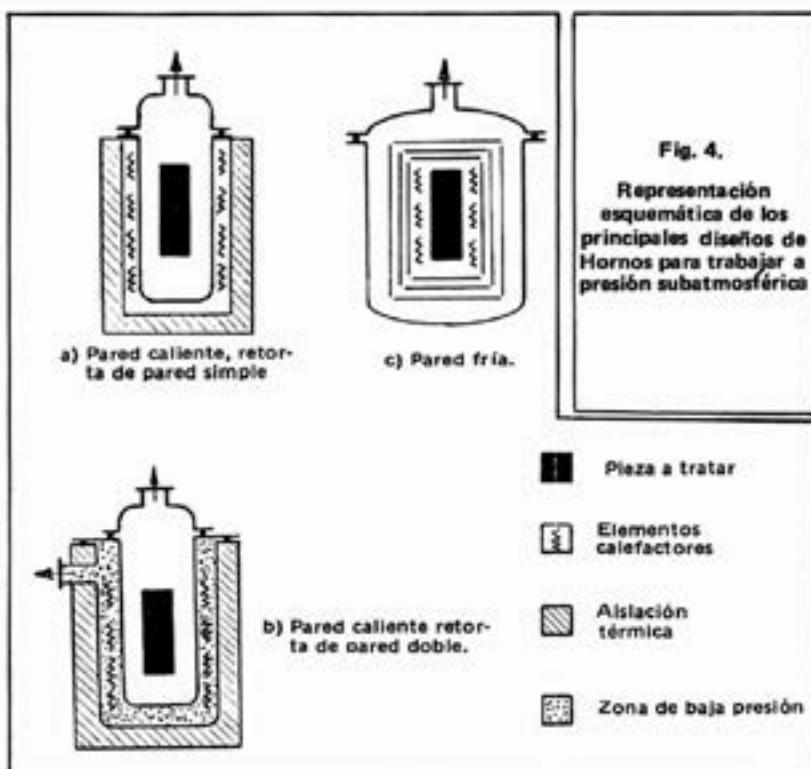
En la figura 4 se muestra esquemáticamente la distribución de los elementos principales de cada grupo y luego se describen sus principales características de construcción y operación.

a) Hornos de pared caliente (con retorta de pared simple):

Estos hornos están constituidos básicamente por una retorta dentro de la cual se realiza el tratamiento del material. El sistema de calentamiento puede ser de diferentes tipos y diseños, caracterizándose por tener los elementos calefactores y sistemas de aislación térmica en el exterior de la retorta, lo cual facilita el desgasado y el mantenimiento limpio de la zona útil del horno. Otro aspecto favorable es la uniformidad de temperatura que puede alcanzarse, ya que la retorta tiende a reducir los gradientes térmicos. La principal limitación de este diseño consiste en que la retorta debe soportar a la temperatura de trabajo, la carga proveniente de la presión atmosférica. Esto limita la máxima temperatura de trabajo y hace necesario usar los materiales resistentes, tanto mecánicamente como a la oxidación; normalmente se usan aleaciones con alto contenido de cromo y níquel, por ejemplo, aceros del tipo AISI 310.

Hornos de pared caliente (con retorta de pared doble) Fig. 4b.:

Para reducir las exigencias de trabajo de la retorta se han diseñado retortas con pared doble, haciendo vacío del orden de 10^{-2} Torr., en el espacio com-



c) Hornos de pared fría:

Este diseño figura 4c consiste esencialmente en un recipiente con pared refrigerada por agua, usándose en general una doble pared que sirve de camisa refrigerante. Dentro del recipiente se ubica la carga, el sistema de aislación térmica, que está formado generalmente⁸ por deflectores o pantallas de radiación térmica.

El recipiente es evacuado a la presión de trabajo y eventualmente se puede inyectar y recircular gas que puede actuar como intercambiador de calor. Al ser refrigerada la cámara principal, no se presentan problemas estructurales ni limitaciones en el rango de temperatura que pueden alcanzarse en la zona de trabajo.

La temperatura máxima está determinada esencialmente por el material de los elementos calefactores, los cuales se construyen generalmente con molibdeno, grafito, tantalio o tungsteno, siendo las temperaturas de trabajo crecientes en ese orden. La ten-

dencia en el diseño es a colocar la menor cantidad posible de material aislante térmico (apantallado), a los efectos de reducir el tiempo de desgasado y por lo tanto bajar el costo del tratamiento. En el caso de un horno para un proceso repetitivo, conviene fijar con criterio económico el grado y tipo de apantallamiento en función del ciclo de trabajo. Si el proceso es rápido (menos de una hora), puede convenir el apantallamiento mínimo; en cambio, si es de varias horas de duración puede ser más adecuado uno mayor, que reduzca las pérdidas de calor más eficientemente.

Actualmente, se fabrican hornos de pared fría, que permiten realizar procesos de recocido, temple y revenido, usando como medio de enfriamiento gas o aceite. Lo mismo que en el caso del horno de pared caliente, para lograr enfriamientos rápidos es necesario transferir la carga a una cámara fría separada de la zona de calentamiento; de todos modos, el diseño de pared fría se caracteriza por tener menor inercia térmica que el de pared caliente. Esta característica puede ser muy importante cuando es necesario cambios rápidos en el proceso.

Ambos grupos de hornos se caracterizan por un mantenimiento simple y económico, y por su limpieza y facilidad de operación, cuando se los compara con equipos convencionales de tratamiento térmico y de generación de atmósferas controladas. El tratamiento térmico a presión subatmosférica, una vez puesto a punto, puede repetirse y controlarse de manera más precisa que cuando se utilizan los métodos convencionales.

4. Horno de pared caliente para tratamiento térmico de aleaciones base circonio.

La fabricación de tubos y barras de aleaciones de circonio para uso nuclear requiere hacer

tratamientos de recocido en un rango de temperaturas entre 500 y 750°C aproximadamente; para el caso particular de tubos para elementos combustibles, el proceso requiere deformaciones en frío superiores al 60%, luego es necesario recocer a temperaturas de 700°C aproximadamente durante tiempos que pueden variar de 1 a 5 horas. Durante el recocido, la presión debe ser menor de 10^{-4} Torr, a los efectos de evitar contaminación superficial, particularmente con hidrógeno, el cual no debe superar un contenido de 25 ppm.

El último recocido dura de 2 a 6 horas y se realiza a temperaturas de aproximadamente 500°C siendo la temperatura constante en $\pm 2^\circ\text{C}$ en toda la zona de trabajo y durante todo el proceso. Teniendo en cuenta estos requerimientos se diseñó y construyó un horno de las siguientes características:

- tipo horizontal de pared caliente (retorta de pared simple).
- temperatura de trabajo de 400 a 800°C.
- la retorta tiene las siguientes dimensiones: diámetro interior 157 mm, longitud 3.200 mm, espesor 6 mm, material acero inoxidable tipo AISI 304, longitud útil 2.000 mm aproximadamente.

- calentamiento eléctrico por resistencia de alambre tipo Kanthal, con 5 zonas de calefacción. Las 3 zonas centrales pueden disipar una potencia de 13 KVA cada una. Las dos zonas extremas pueden disipar una potencia de 11 KVA cada una.
- el desplazamiento de la carga es manual, mediante una bandeja transportadora que se desplaza arrastrada por cable.
- el equipo de bombeo está constituido por: una bomba mecánica de 120 m³/hora, una bomba tipo Roots de 600 m³/h, 2 bombas difusoras de aceite de 2.000 l/seg cada una.

El valor de pérdidas (estanqueidad) medido fue del orden de 5×10^{-5} Torr. litro/seg, lo cual está dentro de los límites aceptados para este tipo de equipos.

En la figura 5 se muestra una vista general de la instalación y en la figura 6 se muestra la evolución de la presión y temperatura hasta alcanzar un estado de régimen estacionario.

El proceso de recocido descrito es posiblemente uno de los más exigentes en cuanto al cumplimiento de sus especificaciones. Una dificultad importante radica en la transferencia de calor a la carga, cuando las

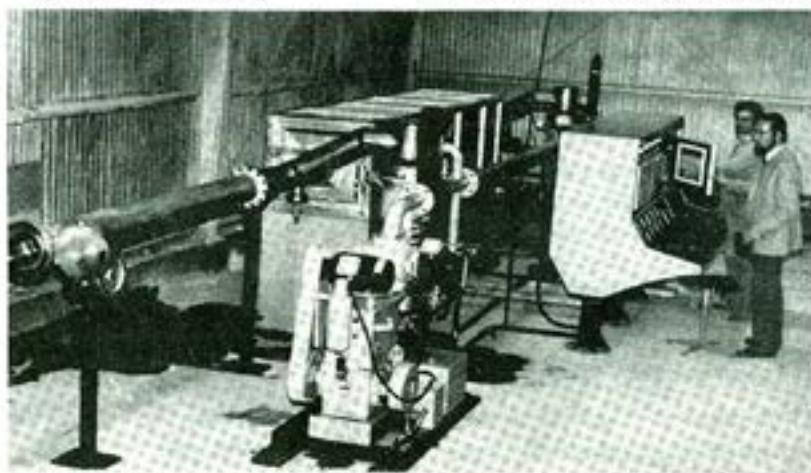


Fig. 5. Horno para recocido de aleaciones base circonio. En primer plano, de izquierda a derecha, se ve la cámara fría, el equipo de bombeo y la consola de control. Atrás se ve el Horno propiamente dicho.

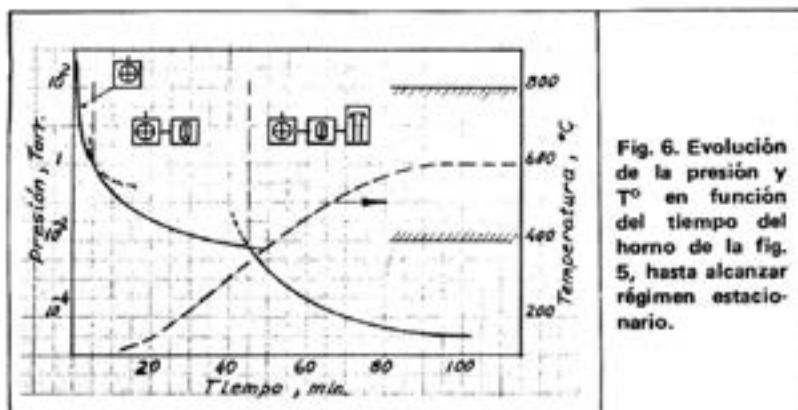


Fig. 6. Evolución de la presión y T° en función del tiempo del horno de la fig. 5, hasta alcanzar régimen estacionario.

temperaturas son inferiores a 700°C aproximadamente y la presión es de 10⁻⁴ Torr. o menor. En estas condiciones, la transmisión de calor se hace fundamentalmente por radiación y por lo tanto sigue una ley del tipo $w = \sigma T^4$ donde: w es el flujo de calor por unidad de área a la temperatura T expresada en °K; σ es una constante física. Además cuando la transmisión de calor se realiza por radiación es muy importante el grado de emisividad de la superficie y eventualmente la disposición geométrica.⁵

Los resultados obtenidos con el horno descripto (figura 5), han mostrado que se alcanza la uniformidad de temperatura exigida por las especificaciones si se hace una adecuada distribución de la carga, de modo de reducir las "sombra térmicas".

El comportamiento observado del horno descripto (figura 5) asegura que los recocidos a presión subatmosférica pueden aplicarse sin dificultad al tratamiento térmico de aceros, pues las especificaciones aun en los casos más comprometidos son menos estrictas que cuando se trata de aleaciones base circonio para uso nuclear.

5. Tratamiento térmico de aceros

En principio, todos los aceros pueden ser tratados a presión subatmosférica, obteniéndose resultados favorables, sin embargo,

esta tecnología tiene una importancia relativamente mayor cuando se aplica a piezas construidas con los denominados aceros especiales. A modo de ejemplo, se mencionan a continuación algunos aceros en los que se han obtenido buenos resultados con tratamientos térmicos a presión subatmosférica.

a) Aceros para trabajado en frío (AISI serie A y D):

Cuando se tempila con gas en movimiento, la velocidad de enfriamiento puede ser aproximadamente un 30% mayor que cuando se realiza en el aire en calma, por lo tanto será posible recocer y templar a presión subatmosférica enfriando con gas. Esto ha sido confirmado⁶ para el caso particular de rodillos de 70 Kg de peso y un diámetro de 203 mm fabricados con un acero tipo D4. Los rodillos fueron calentados a 970°C durante un tiempo equivalente a 20 min/25 mm de sección y la dureza final fue de 60/61 HRc.; con un enfriamiento subcero posterior se alcanzó una dureza de 63 HRc.

b) Aceros de herramientas base cromo para trabajado en caliente (AISI serie H):

Estos aceros son muy usados en la fabricación de estampas y matrices para trabajado en caliente, fundición a presión y en general para matricería en la industria del plástico. Utilizando

estos aceros se han fabricado herramientas cuyo peso llega a 1.500 Kg, las cuales han sido templadas y revenidas, obteniéndose una dureza de 45/47 HRc. Se observó una uniformidad mayor en la dureza que cuando se tempila en baño de sales.

c) Aceros de herramientas para trabajado en caliente base tungsteno y molibdeno (serie H):

Este grupo de aceros no es muy usado, excepto para fabricar piezas de forja, estrusión y fundición en coquilla de latones. Los de base molibdeno son usados principalmente para el forjado en caliente y en frío del cobre y sus aleaciones. Las limitaciones en el tamaño de las piezas son similares a las que se presentan cuando se realiza el tratamiento térmico de martempering en sales fundidas, con enfriamiento al aire. Por lo tanto, puede suponerse factible la aplicación de tratamientos térmicos a presión subatmosférica a los aceros de herramientas base tungsteno y base molibdeno.

d) Aceros rápidos de herramientas, base molibdeno y tungsteno (AISI serie M y T):

Investigaciones realizadas con aceros tipo M2 y T1 han demostrado que la velocidad de enfriamiento afecta a la máxima dureza obtenible, lo cual puede explicarse por el hecho de que durante el enfriamiento tiene lugar la precipitación de carburos en los bordes de grano. Por lo tanto, la dureza máxima podrá obtenerse para una relación adecuada entre tamaño de pieza y velocidad de enfriamiento. Esto implica que para templar aceros rápidos conviene poner a punto el proceso en cada caso particular.

e) Aceros para matricería de la industria del plástico:

Cuando se hace el tratamiento térmico con métodos conven-

cionales, la fabricación de matrices exige previo al tratamiento, el pulido de las caras con pasta de diamante, usando hasta cuatro granulometrias sucesivas. Luego del tratamiento, las caras deben ser pulidas nuevamente en la misma forma que se hizo antes. En cambio, cuando el tratamiento térmico se realiza a presión subatmosférica, el pulido final puede hacerse solamente con la pasta de diamante más fina, lo que representa una importante ventaja económica; otra ventaja es el hecho de que la distorsión y cambios dimensionales resultan mínimos.

En conclusión, todos los ejemplos descriptos muestran que los tratamientos térmicos a presión subatmosférica, pueden ser aplicados con éxito a piezas fabricadas con aceros especiales y lograr calidad superior a un costo menor o equivalente al del producto obtenido con los tratamientos convencionales.

Tratamientos termoquímicos a presión subatmosférica.

Los tratamientos termoquímicos pueden clasificarse en dos grupos principales:

- Tratamientos austeníticos: cementación y carbunitruración.
- Tratamientos ferríticos: nitrucción y nitrocarburación.

En ambos grupos se provee a la superficie de la pieza, carbono y/o nitrógeno a una temperatura tal que el material se encuentra en fase austenítica o ferrítica respectivamente. Actualmente, la industria realiza tratamientos termoquímicos, usando atmósferas controladas (exotérmicas, endotérmicas o neutras) sales fundidas, sin embargo ya están siendo aplicados en escala industrial los tratamientos termoquímicos a presión subatmosférica. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de los hornos de pared fría provistos de dispositivos pa-

ra enfriamiento controlado en gas o en baño de aceite⁸. Los hornos de pared fría así equipados, permiten realizar tratamientos de cementación. A modo de ejemplo, se describe a continuación un proceso típico de cementación⁹ de ejes fabricados con un acero tipo AISI 8620. Las principales etapas son las siguientes:

- Carga del horno y evacuación hasta 10^{-3} Torr., luego calentamiento hasta una temperatura de 1038°C durante un tiempo de 30 min. aproximadamente. Durante este tiempo se produce el precalentamiento, limpieza y desgasado de la carga.
- Se inyecta el gas de cementación (usualmente gas natural purificado) a una presión de aprox. 20 Torr. y hace la cementación durante 2 horas.
- Se hace un enfriamiento rápido en nitrógeno hasta 538°C, luego se eleva la temperatura hasta 816°C aproximadamente, durante una hora.
- Se templa en baño de aceite.

El proceso descripto produce una capa cementada de aproximadamente 1,2 mm de espesor, con una dureza superficial de 63 HRc. El tiempo total del tratamiento es inferior que cuando se utilizan métodos de cementación convencionales. La causa de esta reducción en el tiempo, radica principalmente en que se usan mayores temperaturas. El tratamiento de doble temple descripto permite reducir los riesgos de crecimiento de grano a 1038°C y la atmósfera a una presión de 10^{-3} Torr. evita la contaminación superficial. La cementación a presión subatmosférica ofrece otras ventajas aparte de la reducción del tiempo de proceso ya mencionada. Algunas de estas ventajas son las siguientes:

- Obtención de piezas limpias y brillantes, lo cual puede reducir o eliminar costosas operaciones posteriores.

- Cambios rápidos de parámetros tales como velocidad de calentamiento y enfriamiento en una atmósfera de potencial químico bien controlado, lo cual permite optimizar el proceso desde el punto de vista metalúrgico.
- La eliminación de contaminación superficial como por ejemplo oxidación.

Nitrocarburación

Los tratamientos de nitrocarburación en fase líquida consisten básicamente en colocar las piezas a tratar en un baño de sales a base de cianuros a temperaturas de aproximadamente 570°C, durante tiempos en general menores a 2 horas y luego templar en agua. Mediante este tratamiento se mejora la resistencia a la fatiga y sobre todo se aumenta la resistencia al desgaste. En los procesos de nitrocarburación por vía gaseosa¹⁰ se obtienen resultados semejantes, pero con una reducción de la contaminación ambiental. El tratamiento en fase gaseosa, al igual que el realizado en sales produce una capa superficial muy delgada de un compuesto e. $\text{Fe}_3(\text{CN})$, el cual se ha probado que es responsable del aumento de resistencia al desgaste, mientras que el nitrógeno, que penetra por difusión en la matriz ferrítica sería el responsable del aumento de resistencia a la fatiga.

Davis y Tranter¹¹ realizaron tratamiento de nitrocarburación a presión subatmosférica. El proceso fue realizado de la siguiente manera: el horno fue evacuado a 10^{-1} Torr. y luego se elevó la temperatura hasta 570°C manteniendo en circulación un pequeño flujo de NH_3 a una presión dinámica de 10-20 Torr. Luego se evacuó el horno nuevamente y se introdujeron gases premezclados a 400 Torr. de presión. Durante el proceso, la presión se hizo variar entre 400 y 100 Torr. con intervalos de 10 min a 400 Torr. Como resultado se obtuvo

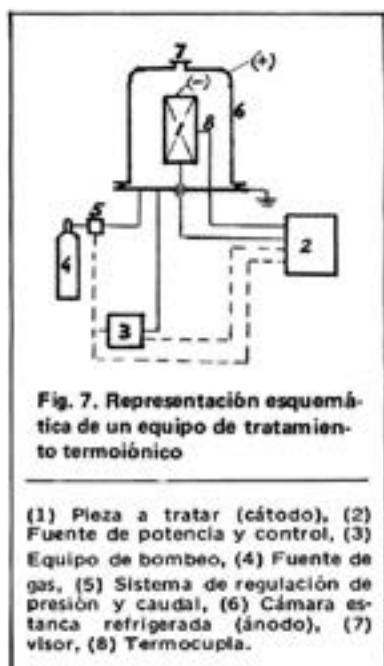


Fig. 7. Representación esquemática de un equipo de tratamiento termoiónico

- (1) Pieza a tratar (cátodo), (2) Fuente de potencia y control, (3) Equipo de bombeo, (4) Fuente de gas, (5) Sistema de regulación de presión y caudal, (6) Cámara estanca refrigerada (ánodo), (7) visor, (8) Termocupla.

una capa uniforme del compuesto e con buen comportamiento al desgaste. En base a resultados de experimentos como el descrito, se ha encontrado que es posible carbunitrurar a presión subatmosférica logrando un mejor control metalúrgico y tiempos de procesos más cortos.

Tratamientos termoquímicos por Bombardeo iónico

En los procesos por bombardeo iónico, el componente se coloca dentro de una cámara, (semejante al horno de pared fría), en la cual luego de ser evacuada se introduce una mezcla controlada de gases, a una presión que puede variar entre 1 y 20 Torr. La pieza está eléctricamente aislada de la cámara y constituye el cátodo, mientras que la cámara constituye el ánodo. Entre ánodo y cátodo, se establece una diferencia de potencial que puede variar según el caso entre 400 y 1.100 volts. En la figura 7 se muestra esquemáticamente los principales componentes de un equipo para tratamiento por bombardeo iónico. Cuando se establecen las condiciones de trabajo se forma un plasma (capa luminiscente) que envuelve to-

talmente a la pieza y sigue sus contornos penetrando en cavidades y agujeros. El espesor de la capa luminiscente próxima a la superficie es en general menor de 20 mm; dicho espesor aumenta con la tensión eléctrica aplicada y se reduce al aumentar la presión. Es precisamente en la zona luminiscente donde la actividad química es máxima y donde se producen los fenómenos de bombardeo iónico que generan el aumento de temperatura y dan como resultado la incorporación a la superficie y posterior difusión en volumen de elementos tales como carbono, nitrógeno, u otros provistos por la atmósfera.

En el caso de la nitruración^{12,13} el proceso ha alcanzado escala industrial, mientras que los procesos de carbonitruración y cementación, todavía están en la etapa de desarrollo. En los procesos por bombardeo iónico, es posible controlar en forma independiente, relativamente simple y precisa las variables siguientes: presión (Torr.), composición del gas (%), voltaje (volts), densidad de corriente (mA/cm^2), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), tiempo (seg.).

En el caso de nitruración, el control preciso de las variables mencionadas permite obtener una capa superficial con las siguientes características:

- control del espesor y composición de la llamada "capa blanca";
- control del espesor y microestructura de la llamada "zona de difusión";
- posibilidad de realizar el proceso a baja temperatura (hasta 350°C), lo cual permite obtener máxima dureza y amplia enormemente el número de materiales que pueden ser tratados;
- mínima distorsión, debido a las bajas temperaturas y calentamiento y enfriamiento a presión subatmosférica;

- reducción del tiempo de proceso, aproximadamente la mitad para un espesor de capa equivalente;
- posibilidad de tratar desde componentes pequeños hasta componentes de grandes dimensiones, en forma eficiente, pues el consumo de energía depende únicamente de la cantidad de superficie a tratar, y no principalmente del tamaño de la instalación como es en los procesos convencionales;
- no contaminación ambiental y seguridad total para el personal de operación.

En la figura 8 se muestra a modo de ejemplo una curva de dureza de una acero tipo LK

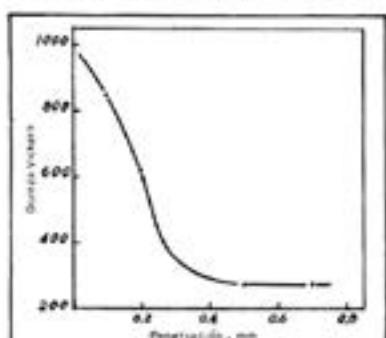


Fig. 8. Dureza vs. penetración obtenida por nitruración termoiónica a 450°C , durante 10 horas en un acero tipo LK3; 0,41%, 0,55% Mn; 0,20% Si, 1,64% Cr, 0,19% Mo y 1,03% Al.

Discusiones, conclusiones, recomendaciones.

La tecnología de tratamientos térmicos y termoquímicos a presión subatmosférica permite reemplazar varios procesos "clásicos", tales como recocido, temple, revenido, cementación, carbonitruración y nitruración, obteniéndose ventajas principalmente en calidad, costo y control del medio ambiente.

Los tipos de hornos desarrollados y que han alcanzado aplicación industrial pueden clasificarse principalmente en dos grupos:

- a) de pared caliente con retorta de pared simple o con retorta de doble pared;
- b) de pared fría.

En el caso a) los hornos se caracterizan por tener una zona útil que puede conservarse libre de contaminación; la limitación principal de este diseño es que no pueden alcanzarse temperaturas muy elevadas. La máxima temperatura es del orden de los 1.000°C, para la cual es necesario emplear retorta de doble pared con evacuación intermedia. La principal aplicación de los hornos de pared caliente es el recocido de cobre y en el recocido de aleaciones base circonio y base titanio. En el caso de aleaciones de circonio para uso nuclear se han realizado recocidos a temperaturas del orden de 500°C, cumpliendo las especificaciones más estrictas en cuanto a uniformidad de temperatura y contaminación de la superficie.

En el caso b) los hornos se caracterizan por tener baja inercia térmica y por poder alcanzar temperaturas muy altas; con calentadores de tungsteno se puede llegar hasta temperaturas del orden de 3.000°C.

Para realizar tratamientos de temple, revenido etc., ambos tipos de hornos se fabrican provistos de sistemas que permiten realizar el enfriamiento en gas o en aceite. Sin embargo, ha sido el diseño de pared fría⁴ el que ha permitido un mayor número

de aplicaciones.

La utilización de esta tecnología ofrece ventajas en el tratamiento térmico de aceros, ya que la superficie de las piezas no sufre alteraciones de ningún tipo (decarburación, oxidación etc.). Esto es particularmente importante cuando se trata a piezas de alto valor agregado fabricadas con aceros especiales. Su aplicación todavía limitada se puede explicar por razones económicas (costo de inversión inicial) ya que para el tratamiento de grandes series, la industria tiene normalmente disponibles los equipos convencionales, en muchos casos todavía en período de amortización.

La aplicación del horno de pared fría a procesos termoquímicos como cementación⁹ ha sido demostrada y ofrece ventajas en calidad y costo, con respecto a procesos de nitrocarburación¹¹, aparentemente todavía no hay suficiente experiencia como para alcanzar nivel industrial.

El desarrollo más reciente de la tecnología de tratamientos a presión subatmosférica es la nitrucción por bombardeo iónico. En este proceso es posible un control preciso de las reacciones físico-químicas que tienen lugar en la superficie de la pieza a tratar, lo cual permite obtener una calidad superior a la obtenida con los métodos convencionales. Las principales ventajas son las siguientes:

- Mayor dureza de la capa superficial y mejor control de la denominada "capa blanca".
- Mayor resistencia a la fatiga, al desgaste y a la corrosión.
- Menor distorsión.
- Menor tiempo de proceso.
- Menor consumo de energía.
- No contaminación ambiental.
- Menores gastos de mantenimiento.

El retraso en la aplicación de los tratamientos por bombardeo iónico se debe esencialmente a que la construcción del equipamiento exige la complementación de disciplinas tan diferentes como son, electrónica (control de potencia y fenómenos de descarga en gases), tecnología de vacío y metalurgia física. Cada disciplina en sí misma ha alcanzado un desarrollo muy superior al necesario por esta tecnología, por lo tanto, sólo se requiere una "integración armónica" de los distintos componentes.

Teniendo en cuenta las características de la tecnología de tratamientos térmicos y termoquímicos a presión subatmosférica descriptas en este trabajo, se considera apropiado recomendar a la industria su consideración, pues es razonable suponer que tendrá reservada una posición de privilegio en el futuro inmediato, y en varias aplicaciones donde los parámetros principales sean innovación, calidad y costos.

REFERENCIAS

1. Scientific fundations of Vacuum technique, S. Dushman, N.Y., John Wiley & sons Inc.
2. F.D. RICHARDSON and J.H.E. JEFFES, JISI, 1948, 160, 261.
3. W.R. MCMILLAN and C.A. GULBRANSEN, "Vacuum metallurgy" 72, 1955, The Electrochemical Society.
4. R.I. BIRD and K.C. HARRIS, Metallurgia, 1978, p. 155.
5. A. SARCE y A. CABO, CNEA, PMM/I-193, Buenos Aires, 1976.
6. Idem 4.
7. T. BELL, Metals Technology, may 1974, p. 209.
8. R.W. REYNOLSON, Metals and Materials, 1973, p. 401.
9. H.W. WESTERN, Metal Progress, 1972, p. 101.
10. S.Y. LEE, tesis University of Liverpool, 1971.
11. C. DAVES and D.F. TRANTER, Metallurgia Met. Form., feb. 1973.
12. C. YONES, et al., Heat Treatment 73', The Metals Society p. 71.
13. B. EDENHOFER and T.J. BEWLEY, Heat Treatment 76', The Metals Society, p. 7.

INTERCAMBIO TECNOLÓGICO



Fernando Díaz J.
Ing. Civil Metalúrgico
Asesor de Estudios y Procedimientos
Departamento de Materiales
Compañía Minera Disputada de
Las Condes

CONSULTA: ¿Cuáles son las causas y riesgos de la emanación de gases en la fundición de fierro?

RESPUESTA: Muchas son las causales de emanación de gases en el proceso de fusión y otros procesos de producción en una fundición, pero debe centrarse toda la respuesta en el gas más nocivo que se genera: el monóxido de carbono y en el principal generador: el Horno Cubilote.

(CO) Monóxido de Carbono en las Fundiciones de Hierro.

Introducción

El monóxido de carbono se produce en todas las fundiciones de fierro, fundamentalmente en las empresas que operan con hornos de cubilote. Este gas debe ser reducido o eliminado para evitar riesgos de salud a los trabajadores.

Características

Aunque el monóxido de carbono es incoloro, inodoro e insípido, no hay indicadores de su presencia, por lo que el operador, al respirar en atmósfera contaminada, lo detecta sólo cuando se producen ciertos síntomas de envenenamiento. Este gas produce envenenamiento al combinarse con la hemoglobina en la sangre, algo más de 300 veces más fuerte que el oxígeno, formando carboxihemoglobina. Su concentración se mide en % cuyo 100% ocurriría con una sangre saturada con monóxido. Así, un 17% no produce efectos notorios. Entre el 17 y 37% produce efectos como dolor de cabeza, respiración entrecortada, pérdida de visión, lentitud en reacciones, náuseas, y pérdida de fuerza en las extremidades. Entre 37% y completa saturación ocurre un colapso y estado inconsciente. Sobre 60% produce muerte.

Para cada concentración de monóxido en la atmósfera hay un correspondiente valor de carboxihemoglobina concentrado en la sangre. Afortunadamente la absorción de monóxido en la sangre no es rápida y está directamente asociada con su contenido en la atmósfera.

La concentración máxima permitida de monóxido en países industriales es de 0.010% en la atmósfera.

Medición

Existen varios métodos para medir el monóxido en la atmósfera:

- Tubo detector DRAEGER: Contiene una columna de sílica-gel impregnada con pentóxido yódico y aceite.
- Detector SIEBE-GORMAN P.S.
- Detector M.S.A.
- Detector KITIGAWA
- Indicador MONOXOR, etc.

Origen

Fundamentalmente, el CO se forma por la combustión incompleta de materiales carbónicos, tales como coke, petróleo, gas o en materiales presentes en el moldeo,

tales como polvillo de carbón, fibras orgánicas, dextrina, almidón, aceites y resinas.

Horno de Cubilote

Es imposible operar un Horno de Cubilote sin producir una gran cantidad de monóxido de carbono y es este tipo de proceso de fusión el que produce más riesgos a la salud.

El gas contenido entre el nivel de toberas y el de puerta de carga alcanza a 200% y bajo el nivel de toberas llega hasta 350%.

La presión del gas en la parte baja del Cubilote podría ser hasta 40 W.G. Así el riesgo potencial del monóxido se encuentra en la plataforma de carga y se suma el que escapa a través de fracturas del revestimiento y la puerta de descarga.

El exceso de monóxido en la plataforma de carga (a veces alcanza concentraciones sobre 0.020%) puede ser causado por una altura inadecuada de la chimenea, excesiva reducción en el diámetro o que el apaga-chispas ofrece demasiada resistencia al escape de gases.

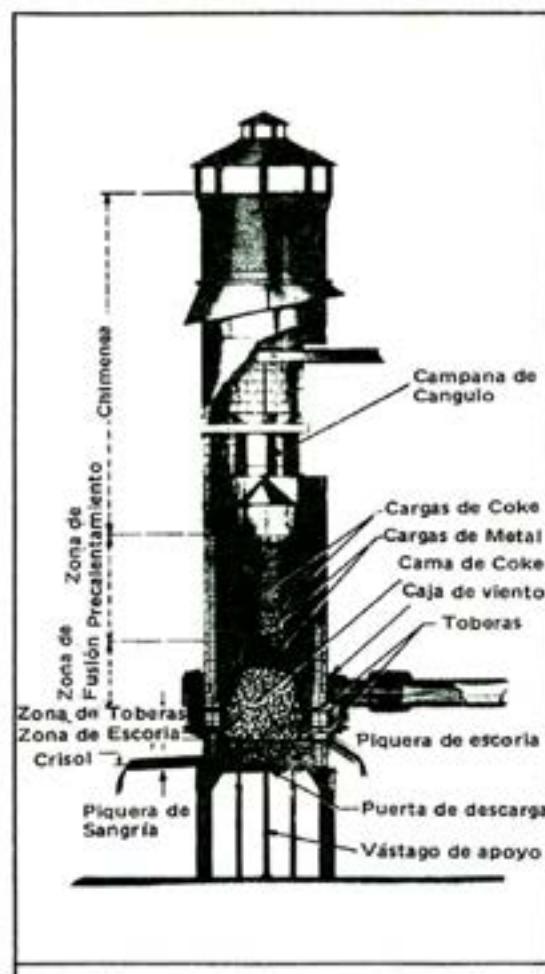
Actualmente, se ha ido incrementando la tendencia a operar con Cubilotes que queman el gas en la puerta de carga convirtiendo el monóxido en dióxido, que reduce los riesgos de envenenamiento.

Si el calor irradiado en la puerta de carga es extremadamente alto, se debe decidir por utilizar un sistema de "puerta-cortina" o en Cubilotes grandes por sistema de carga mecanizada.

Moldeo y Estufas de Secado

En el moldeo con proceso Shell, se produce una apreciable cantidad de monóxido, por lo tanto, se hace necesario utilizar sistemas que permitan extraer los gases para evitar contaminación.

Estufas de secado que emplean coke como combustible aumentan riesgos de monóxido al utilizar coke menor de 1 1/4 a 3", o bien, inadecuado control del aire primario utilizado.



VISTA ESQUEMATICA DE UN HORNO CUBILOTE



DEUSTER & CIA. LTDA.

INGENIERIA-REPRESENTACIONES
ASESORIAS TECNICAS

Representantes de: DORR OLIVER, DORR OLIVER LONG, KOPPERS HARDINGE, KOPPERS COMPANY INC., THE DUCON COMPANY, DUCON FLUID TRANSPORT, MIKROPUL, A.R. WILFLEY & SONS, WALTHWORTH COMPANY EXPRESS INTERNATIONAL, CANADA WORKS, MIDWEST CORPORATION,

Arzobispo Vicuña 21 Depto 313
Fono: 746333

CASILLA (P.O. BOX) 13779
SANTIAGO-CHILE

METALURGICA OSSA LTDA.

FUNDICION DE HIERRO, BRONCE
ALUMINIO Y COBRE

- Moldeo mecanizado y manual.
- Fundición gris.
- Fundición de aleados especiales.
- Fundición no ferrosa de cualquier tipo de aleación.
- Plataforma cromado y niquelado.

Santa Rosa 3954

Fono: 511085



REMETALLICA

UNIVERSIDAD TECNICA DEL ESTADO - FACULTAD DE INGENIERIA

JULIO DE 1980

SANTIAGO / CHILE

NO 1