



REMÉTALLICA

REVISTA DEL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE - FACULTAD DE INGENIERÍA

El ingeniero metalurgista se ve abocado en la actualidad a grandes desafíos originados por la realidad industrial. Conocido es el hecho de las limitaciones que impone al país el precio del cobre en los mercados internacionales. Ello produce la necesidad de que los profesionales del área enfrenten esta realidad con una óptica diferente. El mejorar las propiedades de los productos de cobre que se exportan, es uno de los desafíos que debe enfrentar, para no perder mercados. El promover nuevos usos para el metal rojo y el desarrollo de nuevas tecnologías para el sector manufacturero metal-mecánico, necesitan ser considerados como líneas de acción, no sólo de nuestros profesionales, sino que también deben ser tomados como un desafío por las autoridades y por la industria nacional. Sabemos los esfuerzos que hacen organismos gubernamentales, como el caso de la CORFO, para fomentar la manufactura de partes y repuestos en el país, produciendo con ello importantes ahorros de divisas, pero no es suficiente. Se necesitan más acciones que pasen por la colaboración estrecha entre los grupos universitarios del área y la interacción de éstos con la industria nacional, con el fin de hacer un uso más eficiente de los limitados recursos dispuestos para la investigación.

El Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile, consciente del problema, entrega a sus estudiantes la formación requerida para enfrentar estos desafíos, además de buscar permanentemente la colaboración mutua con Departamentos afines de otras universidades y con la industria estatal y privada del país.

* CONFERENCIA:

La industria del COBRE

Ing. GABRIEL GUTIERREZ C.
Subgerente General
Codelco-Chile
División El Teniente



Es especialmente grato para el que habla, participar en esta ceremonia de conmemoración del XIV Aniversario de la Facultad de Ingeniería, de nuestra Universidad. Quiero aprovechar de agradecer esta invitación, para dirigirme a ustedes en esta oportunidad, lo cual creo es una forma de ratificar el lazo profundo que existe y debe existir entre la industria, sus ingenieros y la Universidad, como formadora de estos profesionales y como organismo de apoyo científico y tecnológico a su gestión industrial.

Específicamente y dado que es el campo en el cual me he desempeñado en mi vida profesional, hablaremos de la industria del cobre, área que para nuestro país, como es de todos conocido, es de vital importancia para su desarrollo económico y social.

Prueba de esto es que en la última década su presencia ha implicado un promedio de 70% en las exportaciones, 15% del ingreso fiscal, 10% del producto geográfico bruto, 90% del presupuesto fiscal en moneda extranjera y una actividad, que en 1985, alcanzó a los 2.500 millones de dólares.

El cobre es, sin lugar a dudas, un metal que por sus propiedades ha estado íntimamente ligado al bienestar y desarrollo de la humanidad.

Antecedentes de su utilización se remontan a los años 4.000 a. de C., donde como mudos testigos del consumo de cobre se conoce la existencia de las fundiciones de Timna y Elam y el continuo hallazgo de innumerables objetos de uso diverso encontrados en las excavaciones del mundo antiguo y prácticamente en todos los continentes.

La civilización romana contribuyó al desarrollo de la minería y metalurgia universal, estableciendo la base de su explotación a nivel artesanal en los diez siglos siguientes.

La revolución industrial diversifica e intensifica la demanda de productos de consumo masivo, lo que significó un importante incremento en el consumo de cobre y su elaboración.

En la actualidad, los avances en electricidad, electrónica, comunicaciones, urbanización y transporte, constituyen las fuentes de demanda principales de este metal.

Hoy, el mundo emerge de una depresión, conocida por todos, entendida por pocos, no independiente de ésta la industria del cobre sufre una demanda deprimida, stock de productos refinados y chatarra crecientes y la razón precio/costo más bajo de su historia.

Por todos, es aceptado, que atravesamos una etapa difícil, declarando la industria en crisis, se detienen la exploración y el desarrollo de nuevos proyectos, e innumerables productores de altos costos deben cerrar o paralizar las operaciones menos rentables.

Los ministros de Hacienda de países productores en desarrollo, suman a sus preocupaciones, un deterioro acentuado de los términos de intercambio.

En la actualidad, han quedado de manifiesto una serie de tendencias, que serán determinantes en la evolución futura de nuestra actividad, especialmente en el largo plazo. Es difícil precisar desde cuándo y en qué intensidad estas tendencias se han comenzado a manifestar, como infructuoso es calificar el sentido de anticipación y percepción de quienes forjaron la industria a su actual estado. Las amenazas y oportunidades del entorno, definidas por estas tendencias, se presentan como una realidad para el cobre requiriendo intransablemente una respuesta. Esto conlleva la necesidad de enfrentar el futuro, iniciando o reforzando un esquema de administración y plani-

* Desarrollada en la ceremonia inaugural de conmemoración del XIV Aniversario de la Facultad de Ingeniería.



ficación que permita retornar a niveles de rentabilidad aceptables, que aseguren la permanencia de nuestra industria.

Me referiré, brevemente, a continuación, al análisis de las tendencias observadas.

Los recursos y reservas mundiales registran los más altos niveles de inventario de su historia, con 481 millones de toneladas de cobre como reservas medidas y 1.800 millones como recursos estimados.

El horizonte de satisfacción de la demanda, creciente en un 2% anual, se ha duplicado desde 1960, excediendo la perspectiva de los próximos 50 años.

Un 70% de las reservas mundiales se encuentran en minas actualmente en operación o en puesta en marcha.

El incremento de las reservas mundiales de 367 millones de toneladas de cobre, desde 1960, corresponden mayoritariamente a mega-yacimientos porfíricos ubicados en zonas aisladas con escasa infraestructura que posibilite un desarrollo adecuado de los proyectos.

La realidad chilena, en este aspecto, es comparativamente superior, al disponer de una reserva de 174 millones de toneladas, correspondiente a un 26% del total mundial, de las cuales un 60% pertenecen a minas en operación.

La estructura de la industria, en los últimos quince años, especialmente en la etapa de producción primaria, se ha caracterizado por una reducción en el aporte al total de la producción mundial, de los grandes productores.

En 1950 el aporte de siete productores principales alcanzaba al 70% de la producción de libre mercado, a mediados de la década del 60, su participación era de 54% y, los años 80 las compañías originales participan con un 20% en la producción mina.

Los demás segmentos de la industria, reflejan una tendencia de los países exportadores a integrar verticalmente su producción hasta la etapa de fundición y explorar en los mercados de semimanufacturas.

Los países industrializados, por su parte, expanden su industria de cobre secundario, manteniendo sin alteración su dominio absoluto del mercado de productos finales, restando toda posibilidad de participación, en este campo, a los países exportadores.

Difícil es substraerse a los intereses de cada participante en la industria, para lograr una opinión entre las tendencias observadas y lo simplemente deseable, pudiendo destacarse objetivamente sólo lo siguiente:

—El acceso de nuevos participantes en la industria será facilitado en forma creciente.

—El criterio empresarial vigente tiende a la maximización de beneficios en el largo plazo.

—Se estimulará la coordinación del desarrollo de la industria, mecanismo hoy inexistente.

El éxito o fracaso de estas acciones será el destino de la industria.

La demanda de cobre, presenta un ritmo de crecimiento en descenso.

El nivel de crecimiento de la demanda de 5% anual, alcanzado entre los años 60 y mediados de los 70,

disminuye a partir de 1975, a niveles levemente inferiores al 2% anual, lo que significa un quiebre en el comportamiento habitual de ésta. Creo no necesario insistir, en los efectos negativos en el largo plazo, para la industria del cobre, el que esta situación se mantenga invariable.

Los predictores, cuantitativos y cualitativos, comúnmente usados para estimar la demanda futura, son cada vez más ineficientes. La permanente amenaza de la sustitución, sea ésta tecnológica o cuantitativa, física o invisible: fiel reflejo del progreso y desarrollo industrial: contribuye a la demanda incierta, de cobre, en el futuro.

La innovación tecnológica, investigación y promoción del uso de cobre, constituye una imperiosa necesidad, de la cual depende en gran medida el éxito futuro de nuestra industria, lo cual corresponde a lo expresado por el señor ministro de Minería, don Samuel Lira Ovalle, a su regreso de la reciente reunión del "CIPEC", en la cual ésta fue una de las conclusiones más importantes.

La tecnología fue uno de nuestros principales aliados en el pasado, en el presente, es poco favorable, pero es nuestra gran, y tal vez, única esperanza para el futuro.

La oferta de cobre primario superó, en los años 1984 y 1985, los 8 millones de toneladas, con un aporte del mundo libre cercano a los 6 millones 400 mil toneladas anuales de cobre.

La capacidad total de occidente se estima, en la etapa mina, en unos 8 millones 200 mil toneladas anuales, con una utilización cercana al 80%, levemente inferior a la observada en la década pasada, pero con un potencial capaz de satisfacer la demanda del próximo quinquenio.

En general, la producción mundial ha evolucionado de acuerdo a la demanda, demostrando la inconsistencia de los alarmistas anuncios del pasado respecto a la escasez del recurso.

Si bien es cierto, el volumen de producción se estima como suficiente, para satisfacer la demanda, es de vital importancia maximizar la eficiencia del proceso, reflejada a través de los recursos empleados, y que en el fondo nos llevan al tema de maximizar la productividad, como único medio de evitar, que el triste presente de algunos sea el mañana de muchos.

Chile, en este mercado, y especialmente CODELCO, destaca como productor líder en este campo, tanto por el volumen, como por sus bajos costos y calidad de su producción. La producción durante 1985, alcanzó a un millón 350 mil toneladas, representando un 21% del total occidental, operando a su capacidad de diseño, anunciada desde los años 70.

El costo de capital, por tonelada de cobre fino anual, según estudios sobre la materia, se estima en 12.000 dólares, como valor referencial, para proyectos nuevos y en 5.200 dólares las expansiones de

facilidades existentes, cifras que incluyen un incremento promedio anual de 10 a 11%, de los últimos años.

Si consideramos la inflación, disminución de las leyes del mineral y el tamaño requerido de las operaciones para el uso de las nuevas tecnologías disponibles, estimo que el costo de capital ha sostenido un incremento real de 1,3% por año, camino que no conduce a ninguna parte.

Chile ha aumentado su producción en 619.000 toneladas desde 1973, con un costo de capital estimado en 2.700 dólares por tonelada adicional. Expansiones límites futuras en CODELCO, se estima, no sobrepasarán los 3.500 dólares por tonelada refinada adicional y expansiones en otros sectores de la minería nacional se materializarán con costos de capital a un nivel de 4.100 dólares hasta la etapa de concentrados.

El potencial de nuevos proyectos bordean las 360.000 toneladas anuales, con inversiones que varían entre 4.200 a 5.800 dólares por tonelada.

El costo de operación promedio en los últimos 10 años ha aumentado de aproximadamente 31.4 CU\$/LB a 58 CU\$/LB, cifra a la que debemos agregar, en promedio, 12 CU\$/LB por concepto de intereses y depreciación.

La variación entre Norte y Sudamérica es de 68.5 a 43.5 U\$/LB, respectivamente, para el valor promedio de 50 CU\$/LB alcanzado en 1984.

Esta información de incremento en el costo es alarmante, pero corresponde a valores nominales.

Al comparar con moneda de igual valor, aparecen reflejadas inmediatamente las mejoras en productividad, que han significado una disminución real de 25% en los costos de operación a nivel mundial, correspondiendo un 14% a los productores de más alto costo y un 48% para los productores latino-americanos.

Sin lugar a dudas las tendencias, aquí analizadas, otorgan a Chile un nivel de privilegio relativo y de potencial liderazgo, que lo ponen en una posición menos dramática que la realidad que enfrenta el resto del mundo del cobre.

Las tendencias a nivel local, en lo que corresponde a nivel y calidad de producción, costos de capital y de operación, dejan de manifiesto sin lugar a dudas, el esfuerzo desplegado por nuestra industria del cobre, que ha significado los importantes logros que en esta materia hemos alcanzado.

Tras esto, está claramente reflejado un proceso coordinado y planificado de las empresas del cobre de Chile y el esfuerzo, iniciativa y creatividad de sus profesionales, centros de investigación y universidades, que de una u otra forma han cooperado para que Chile haya alcanzado el sitio de liderazgo, como productor de cobre, a nivel mundial.

En el caso particular de CODELCO, creo impor-

tante destacar y hacer un breve recuento de su historia en los últimos años.

CODELCO se hace cargo de las operaciones que derivan de la chilénización y posterior nacionalización del cobre, con instalaciones y tecnologías antiguas y programas de expansión estancados.

En primer lugar, CODELCO procede a una etapa de racionalización operacional, con el objetivo de adecuar la infraestructura y modernizar las instalaciones existentes, para posteriormente, sobre esta base sólida, iniciar las expansiones mina, concentrador y fundición, necesarias para compensar la disminución de ley y aumentos en la dureza del mineral.

En una forma, que nos llena de orgullo profesional, se suceden la ampliación de nuestras reservas, la tecnificación de las operaciones, innovaciones, mejoras de eficiencia e implementación de sucesivos proyectos marginales de alta rentabilidad, que permitieron el máximo aprovechamiento de las instalaciones existentes, mediante la sucesiva ruptura de cuellos de botella.

Concretamente esta acción ha significado para CODELCO una tasa de crecimiento de un 4.8% anual, desde su creación, hace ya diez años.

La inversión de sobre 2 mil millones de dólares, en este período ha permitido, a pesar del descenso de ley, disminuir nuestros costos en un 24% desde 1979. El destino de las inversiones se ha distribuido en un 54% a los programas de reducción de costos, 22% a los aumentos de producción y 24% para adecuar la infraestructura de servicios y administración.

Innumerables serían los ejemplos que podría exponer y que reflejan la tarea realizada, y que con seguridad, además, gran parte de ellos son conocidos por ustedes.

Sólo quiero manifestar, que lo mucho hecho hasta la fecha, corresponde a una etapa en que hemos cumplido una meta, sólo para imponernos otra más alta y más difícil.

El futuro para CODELCO está orientado hacia la mantención de nuestra posición en la industria, en términos de producción y costos, además asegurar y extender los mercados de nuestros productos principales. Esto se logrará en la medida que nuestras organizaciones técnicas y administrativas continúen con un esquema de planificación de largo plazo y estratégica, insistiendo en la innovación y desarrollo tecnológico transformando potencialidades en incrementos de productividad. De esta forma creo sabremos solucionar efectivamente los problemas que son comunes en nuestra industria en el largo plazo como, nuevos usos del cobre y molibdeno, disposición y beneficio de desechos industriales, aprovechamiento de recursos hidráulicos, geotécnica y disminución de la intensidad de capital de procesos alternativos.

El futuro inmediato estará caracterizado por el aporte de nuestras campañas de exploración, nuevos

diseños y tecnologías mineras, automatización en las operaciones, desarrollo de proyectos hidrometalúrgicos, los cuales se suman a las expansiones graduales de las etapas mina y beneficio, las que se proyectan sin incrementos significativos en dotación de personal, pero sí de una cada vez mayor especialización.

En esta última parte de mi exposición quiero insistir en un aspecto que considero de vital importancia.

Si bien es cierto que la investigación tecnológica aplicada a la solución de problemas operacionales se ha demostrado exitosa hasta la fecha. Se hace indispensable la generación de ideas creativas e innovadoras, las que debidamente canalizadas y ejecutadas, utilizando la infraestructura nacional disponible de origen a la tecnología del futuro, pilar fundamental del desarrollo con que el país deberá competir para su supervivencia en el ámbito minero, no sólo del cobre sino también del salitre, carbón, hierro, etc.

Lo logrado no es producto de la improvisación. Chile ha centrado su estrategia y posición de mercado —reconociendo la competencia no sólo en los mercados internacionales del cobre y financieros, sino que también la influencia de los sustitutos.

La sobrevivencia de la industria como un todo requiere que se asuma la realidad —de que los consumidores toman decisiones de largo plazo— en base a los precios proyectados de sus insumos.

En este contexto, los oligopolios o protecciones de cualquier tipo que perturben los precios en forma anormal —además de ser aventuras de corta vida tendrán consecuencias irreparables para la industria.

Existe un ejemplo reciente, que demuestra la veracidad de esta afirmación. En efecto, el mundo ha presenciado la conmoción que en las economías más estables y desarrolladas produjeron los acuerdos de los productores de petróleo. Se cree que después de esta década de sucesivos y vertiginosos cambios, nadie volverá a ser igual que antes de los acuerdos de precio del combustible. Después de 10 años de tal acontecimiento los países desarrollados han vuelto a controlar la situación y en gran medida han contrarrestado los efectos del alza, tras invertir millonarios presupuestos en investigación y desarrollo, que hoy les reportan el liderazgo en las más altas tecnologías. Hemos presenciado entonces cómo una ventaja natural puede disminuirse y debilitarse.

El propio decano de la Escuela de Minas de Colorado, en reciente visita a nuestro país, confirmó la necesidad de un esfuerzo estructurado de cooperación y colaboración entre los organismos estatales interesados, las empresas mineras y las universidades, para enfrentar los problemas de la industria, del cobre en nuestro caso.

Al respecto deseo dejar en claro que las investigaciones a largo plazo en tecnologías de base para la

minería que realicemos, deben considerar la responsabilidad de entregar nuestro aporte pragmático a estos centros de estudio, con los que debemos mantener estrecha y permanente colaboración, para formar así profesionales con pleno conocimiento de la realidad, lo que les será inestimablemente valioso en el ejercicio de sus funciones. Ello, porque sin duda que los ingenieros con esta formación integral, son hoy indispensables para acortar y más aún, cerrar la brecha entre la investigación universitaria y la aplicación industrial.

Más aún, creemos que el rol del ingeniero es tan importante que éste debe tomar conciencia que de su aporte y visión depende en gran medida el éxito futuro.

Esto, queda graficado, en la certera estimación que la mitad de los conocimientos que tiene un ingeniero en un instante dado, quedan obsoletos en ocho o menos años, lo que representa una responsabilidad y desafío ineludibles.

Como reafirmación de lo anterior, se ha señalado que cuando un joven egresa de la universidad, con su título bajo el brazo, en ese momento la mitad o más de lo que va a necesitar saber 10 años más tarde en el ejercicio de su profesión, todavía no ha sido descubierto.

Es decir, nos vemos frente a tal ritmo de cambios,

que el estudio permanente, el perfeccionamiento y la actualización son una dinámica indispensable y un desafío profesional, que se debe enfrentar con perspectiva y la responsabilidad de saberse artífices del futuro de un país, que nos ha brindado la oportunidad de formarnos y ser luego, los profesionales que tenemos en nuestras manos la responsabilidad de preocuparnos de la riqueza minera.

No quiero finalizar mis palabras sin antes dejar ante todos ustedes de manifiesto el orgullo que experimento de haberme formado profesionalmente en esta facultad y casa de estudios, por lo que personalmente me ha proporcionado, y porque con satisfacción día a día la he visto crecer en prestigio y consideración, por su valiosa tarea y quehacer académico, científico y tecnológico.

También señalar, que estoy cierto que mantendrá y más aún, acrecentará, este importante sitio alcanzado, con la mancomunidad de las capacidades y voluntad de todos ustedes y la contribución de quienes en algo podamos aportar a su gran tarea.

Mi mejor deseo de éxito futuro para la Universidad y cada uno de ustedes y muchas gracias por haberme permitido volver a estas aulas, en las que me formé y a las que me siento tan ligado por el afecto y el recuerdo.

Muchas gracias.



Adaptación y creación de nuevas tecnologías industriales

Prof. HUGO LEVY SALAZAR

INTRODUCCION

En la actualidad, la llamada civilización material, producto de las actividades de investigación, desarrollo e innovación tecnológica, forma parte de la personalidad misma del hombre y es allí donde expresa sus ideas, sus sueños, sus aspiraciones y sus valores, y no puede ser separada de su cultura. Esta civilización tiene directa relación con las herramientas y materiales que el hombre utiliza, con sus instituciones y su organización y con la forma en la cual trabaja, se gana el sustento y un lugar en la sociedad.

A través de la historia, sin embargo, la ciencia, la tecnología, el humanismo y los valores éticos, que son partes vitales de la cultura, han adquirido trayectorias plenas de separaciones y reencuentros, interactuando y compitiendo permanentemente entre sí, alterando nuestra cultura, a la vez que siendo continuamente afectadas por ella.

Del mismo modo, el impacto real de la ciencia y la tecnología sobre las culturas de las naciones, depende altamente del grado de desarrollo de las sociedades en las que se desenvuelven. A la vez se producen continuos desequilibrios entre estas disciplinas y las instituciones y las sociedades que las sustentan. Estas desvinculaciones se profundizan o aminoran como un resultado también del nivel social y económico existentes. Es así como un aumento considerable en la entrada per cápita de un país provoca cambios culturales, como también mutaciones en estilos de vida y en actitudes; aumentando del mismo modo, la disposición e interés de la sociedad por la ciencia y la tecnología, y su impacto sobre el desarrollo.

Por ello no es suficiente considerar la ciencia y la tecnología como la única base necesaria para que la innovación tecnológica sea incorporada en los sectores productivos y de servicio de un país, ya que ello depende también de las tradiciones culturales y éticas, y ciertas características sociológicas de las sociedades en las que las innovaciones tratan de ser introducidas.

Es así como, para alcanzar el desarrollo no basta que un país tenga un avance adecuado y armónico de las ciencias básicas o sea capaz de producir invenciones tecnológicas, aunque éstas sean patentables, ya

que la falta fundamental, algunas veces, es el no poseer capacidad en cuanto a recursos humanos que tengan experiencia en actividades de desarrollo, que los habiliten para transformar estos resultados en innovaciones prácticas incorporadas a los sistemas productivos y de servicios. En este contexto, se debe comprender que es la empresa el lugar en donde se detecta la necesidad y se toma la decisión de innovar, asumiendo los riesgos involucrados en ello.

Una vez que esto se produce, la dirección que toma el desarrollo de la empresa es el resultado de la interacción entre la oferta y la demanda de conocimiento tecnológico que el país o el exterior ofrecen.

Sin embargo, en los países en desarrollo no se han gestado los cambios de mentalidad necesarios, ni han existido las presiones competitivas requeridas, para que las empresas se interesen en innovar y crear una infraestructura capaz de exteriorizar su demanda.

Tampoco la oferta tecnológica nacional cuenta con la experiencia ni los medios de difusión técnica adecuados para identificar esta demanda y satisfacerla.

En algunos países latinoamericanos, como un resultado del exagerado proteccionismo a que han estado sujetas las empresas durante muchos años, su tradición étnica y valorativa, la desvinculación que ha existido entre la educación y la vida práctica y un cierto manifiesto desprecio hacia la artesanía, el comercio y la industria, no se ha gestado una tradición empresarial que es el punto de partida de todo desarrollo industrial.

Asimismo, la inflación crónica, la falta de políticas claras y estables en materias relacionadas con el desarrollo industrial, no han estimulado la audacia para innovar, ni el espíritu de ahorro, sin lo cual no puede existir mentalidad ni tradición empresarial. Esto a lo único que ha contribuido es al estímulo de la mentalidad especulativa, en donde se espera hacer fortuna, no a fuerza del trabajo y el sacrificio, si no que a través del ingenio y la maniobra rápida.

Por otra parte, el alto precio de las materias primas, explotadas con tecnología extranjera durante muchos años, también contribuyó a que estos países, muchas veces en calidad de monoprodutores, no produjeran los cambios estructurales económicos, sociales, educativos y tecnológicos necesarios para superar su condición de subdesarrollo, ni elaboraran e implementaran políticas coherentes y estables para este efecto.

Estos problemas tradicionales han sido acentuados en los últimos años, entre otras causas, por la crisis del petróleo de 1973 que agudizó la recesión económica mundial, iniciada a fines de la década del sesenta, y que fue agravada por la nueva alza del precio de esa fuente energética en 1978. Esto ha hecho que casi la mitad de la deuda del tercer mundo la tenga América Latina, lo que limita aún más sus perspectivas de desarrollo.

La espiral recesiva mundial descrita, ha llevado a los países desarrollados a poner restricciones a las importaciones, a disminuir el volumen demandado y a pagar precios inferiores por ellas. Esto es especialmente crítico en el caso de las materias primas, para las cuales han aumentado ostensiblemente los costos de explotación y bajado los precios de venta.

Debido a los antecedentes descritos, se percibe que, independientemente de la evolución política y social que estos países experimenten, existen factores que estarán siempre presentes en su desarrollo. En efecto, dada la falta de divisas, de ahorro interno y de inversiones que existen, estas naciones requerirán tomar medidas que estimulen las exportaciones en mercados dinámicos y competitivos y sustituyan importaciones que hagan uso de las ventajas comparativas, en cuanto a capitales, tecnología, materias primas y la disponibilidad de fuentes energéticas. Se hará también necesario obtener nuevas fuentes de trabajo y mejorar la calidad de vida de la población, creando actividades productivas intensivas en mano de obra que hagan uso de materias primas nacionales, aminorando la dependencia energética y tendiendo a mejorar los términos de intercambio, que se han deteriorado notablemente en los últimos tiempos.

En este contexto, se requerirá estimular el fortalecimiento y la creación de pequeñas y medianas empresas en las áreas que otorguen ventajas comparativas de producción y comercialización, que den flexibilidad al sistema industrial y que incrementen la capacidad nacional para la innovación, el ahorro energético, el diseño y construcción de partes, y la sustitución de insumos.

Es evidente que el empuje empresarial será indispensable para obtener resultados positivos en los terrenos descritos, y las universidades deberán contribuir directamente a ello cumpliendo con su función de formar los recursos humanos que se requerirán a futuro y, generando, adaptando y transfiriendo cono-



cimientos y experiencias en las áreas que se perfilen como ventajosas; ofreciendo además alternativas de desarrollo en ellas. Sin embargo, es necesario comprender que no basta introducir innovaciones tecnológicas o mejorar la producción; es igualmente importante el dominar su comercialización. Además, no existe futuro para los países que basan su desarrollo sólo en la exportación de materias primas y las naciones con una genuina intención de progreso deberán incorporar valor agregado en sus productos amparados en una avanzada tecnología, bajos costos de producción y agresividad exportadora.

Un aspecto esencial para asegurar el éxito de las exportaciones es el riguroso control de calidad de los productos que se envían al extranjero, puesto que es imposible conquistar mercados estables si no se garantiza su calidad.

De los antecedentes analizados se desprende que el problema del subdesarrollo tiene raíces culturales y es rol fundamental de las instituciones de educación preocuparse de ayudar a disolver las barreras que impone esta limitación.

Asimismo, las relaciones sociales de la ciencia y la tecnología son altamente complejas, las instituciones dedicadas a ellas y al empleo de sus resultados prácticos, reflejan en parte la historia y la estructura social de la sociedad que la soporta. Por tanto la ciencia y la tecnología se encuentran en constante cambio y estas actividades, y la explotación de sus frutos, están estrechamente vinculadas a la destreza de los científicos,

ingenieros y técnicos para interactuar con la sociedad.

Es así como, para convertir la ciencia y la tecnología en un factor de desarrollo, se requieren hombres de mucha versatilidad y adaptabilidad. El progreso de un país, promovido por su desarrollo técnico, depende cada vez más de las actividades de investigación y desarrollo que ellos ejecuten, y dada su naturaleza inter y multidisciplinaria, se requiere de equipos de investigadores en ingeniería entrenados en diferentes campos, y también de científicos que se han movido a través de los bordes tradicionales de la ciencia. Para producir un avance equilibrado, estos profesionales deberán tener una gran preocupación y conocimiento acerca del impacto social que pueda tener la aplicación de los conocimientos generados, a los problemas prácticos que se presentan en industria, defensa, agricultura, organización, comunicación, entre otros.

Las actividades científicas y tecnológicas tienen su base en la generación y aplicación creativa del conocimiento o la investigación. En esta actividad, lo único que podemos asegurar, es que existe una investigación orientada por la curiosidad y otra orientada por una misión, y que entre ellas no existe un borde definido. Entre más nos desplazamos desde la actividad motivada por curiosidad a aquella promovida por una misión, van cambiando paulatinamente la escala de valores y el tipo de preparación requerida del personal que la impulsa; se hace más honerosa y de impacto social y económico más directo, y sus resultados son menos publicables. Tanto es así, que tratándose de las actividades de investigación y desarrollo industrial o en defensa, en algunos casos los resultados son mantenidos como "secretos", jamás son dados a conocer y su existencia sólo es detectada cuando estos conocimientos son incorporados como técnicas, procesos o productos. No obstante, tanto la investigación cultural como la operativa, como también suele llamárseles, se interactúan y retroalimentan constantemente y por tanto su desarrollo no es lineal.

En algunos casos, la tecnología, dado lo alejada que está de su posible base teórica, ya no es la aplicación de la ciencia a los procesos y productos, puesto que allí los esfuerzos productivos todavía están primordialmente relacionados con problemas puramente tecnológicos de base empírica, y tienen muy poca relación con la ciencia misma, como es el caso de los problemas relacionados con la tecnología de la soldadura y la construcción y diseño de maquinarias. Sin embargo, en otros campos, como la química de los polímeros, la biotecnología, la farmacología y la computación, la línea entre la ciencia y la tecnología es difusa y el científico básico que genera conocimiento nuevo, y el tecnólogo que desarrolla procesos productivos específicos, pueden ser la misma persona.

Los antecedentes entregados avalan la tesis de que las actividades en ciencia y tecnología deban ser consideradas como un sistema, esto es, una colección de

unidades y actividades intercomunicadas e interrelacionadas. Es evidente que esta unidad sólo la puede otorgar el recurso humano que participa en ellas, ya que es él quien proporciona la integración de todas las variables. Sin embargo, a pesar de esta unidad, debe reconocerse que las motivaciones y evaluación de estas labores difieren totalmente en los extremos de la amplia gama de actividades, que van desde la investigación básica a la innovación tecnológica.



En efecto, el descubrimiento científico, en su forma más básica, ha sido siempre medido por su contribución al conocimiento de los fenómenos naturales. La prueba de la innovación tecnológica es su impacto en la forma de vida y se utiliza como un medio para producir cambios económicos, sociales, educativos o en defensa.

La investigación tecnológica entonces conduce a la innovación tecnológica, que es el intento concretado para producir un cambio en la forma que el hombre vive y trabaja.

Sin embargo, es necesario enfatizar que el desarrollar una capacidad científica y tecnológica en un país atrasado técnica y culturalmente, no basta para provocar un impacto social y económico en el mismo, ya que la mayor parte de las veces lo que impide la introducción de una innovación tecnológica no son sólo los problemas técnicos involucrados, sino que más bien, un conocimiento inadecuado del mercado, la falta de interacción entre las empresas y los tecnólogos, la ignorancia acerca de los requerimientos de los usuarios o simplemente, la falta de tradición o incentivos del sector productivo para concretarla.

Se debe también reconocer que el trabajo tecnológico ha llegado a ser un esfuerzo de grupos en el cual los conocimientos y experiencias de un gran número de especialistas de una institución se enfrenta a un problema común, con el objeto de obtener un resultado tecnológico, en conjunto.

Sin embargo, la sociedad se encuentra sometida a estímulos locales y temporales que no siempre le han permitido visualizar el futuro con claridad, sobre todo cuando los factores que lo afectan son de origen interdisciplinario, contemplando aspectos tecnológicos, ecológicos y de estudio del hombre. En este contexto, no ha sido reconocido adecuadamente que la evolución tecnológica en el presente ha adquirido su propia dinámica y metodologías, y que se ha constituido en un trabajo sistemático y organizado; movido por la necesidad de "hacer" más bien que la de "conocer" y que usa la ciencia muchas veces como su punto de partida.

No obstante, un país para promover un progreso estable debe impulsar un desarrollo armónico de las ciencias básicas, naturales, sociales y de ingeniería, de modo de poder auscultar el conocimiento internacional y ponerlo al servicio de los grupos humanos encargados de determinar la factibilidad técnica, a nivel de laboratorio, para la producción de bienes y servicios en la forma de nuevos productos, procesos y técnicas o la mejora de los mismos. Esto es vital para que luego los grupos humanos encargados del desarrollo experimental vinculados a las empresas y a otros organismos, empleen en forma sistemática los resultados de estas investigaciones científicas y tecnológicas y los conocimientos empíricos requeridos, de modo de convertirlos en innovaciones tecnológicas incorporadas a los sectores productivos y de servicios, realizando estudios de factibilidad técnica y económica, en mayor escala, y construyendo instalaciones experimentales, prototipos y plantas pilotos, que conduzcan finalmente a la implementación de plantas industriales.

Este proceso global de investigación, desarrollo e innovación tecnológica debe ser claramente comprendido de modo de poder implementar, en el país, la capacidad tecnológica requerida para su progreso, ya que la formación y los valores que debe poseer un tecnólogo creativo, difieren de aquellos que se otorgan al científico. Este último, en general, tiende a interesarse primordialmente en el reconocimiento que pueda tener su trabajo, al darlo a conocer en la forma de publicación, ya que ello contribuye notablemente al status que él alcanza en la "sociedad científica internacional" y como un resultado de ello, en su propio país. Muchas veces sin reconocer que estas publicaciones, aunque importantes, más bien constituyen un mecanismo de control de calidad de la investigación básica que se realiza, y no pueden transformarse en la única razón de ser de esa actividad.

El tecnólogo debe poseer una formación amplia, complementada con el desarrollo de destrezas sociales y técnicas y una especialización, además de tener habilidad para el diseño y construcción de equipos, prototipos y aparatos, así como también talento para planificar e implementar aspectos tecnológicos del

desarrollo, muchas veces como integrante o conductor de equipos humanos multidisciplinarios. Ante todo debe comprender que entre mayor sea el impacto socioeconómico de su trabajo, menos publicables serán los resultados y más anónima será su labor. Su motivación y satisfacción fundamental será el ver los problemas resueltos y el vencer desafíos.

En este contexto la preparación del personal adecuado para realizar investigación tecnológica, e incorporar innovaciones en las empresas es de enorme importancia y para ello las universidades deben conocer adecuadamente los perfiles de los científicos, ingenieros y técnicos requeridos para estos efectos a futuro.

Es necesario que un país que pretende incorporar valor agregado a sus recursos naturales y a sus productos y procesos industriales, conozca e implemente la cadena de recursos humanos necesarios, que parte con el científico básico y que pasando por el investigador tecnológico, el ingeniero de desarrollo, el ingeniero de diseño, el ingeniero de producción, conduce a los profesionales expertos en marketing.

Los países en desarrollo que compran tecnología llave en mano, sólo han formado y requerido el ingeniero de producción, que adquiere la tecnología y la hace productiva, y el ingeniero de mantención, que es quien se preocupa de que los equipos se encuentren en buenas condiciones de operación. Es por esto que el problema fundamental de los países subdesarrollados, en general, no es tanto su falta de capacidad para crear conocimientos, sino que más bien, su incapacidad para aplicarlos adecuadamente.

En general, las sociedades de estos países atrasados aceptan a veces a regañadientes, que es posible que exista urgencia de generar en el país la necesaria capacidad para afrontar problemas de investigación científica, pero no comprenden que se deben hacer esfuerzos sistemáticos similares para generar una capacidad para el desarrollo experimental y la producción de innovaciones para la industria, la medicina y la agricultura, ya que es precisamente la no existencia de esta "capacidad tecnológica", en estos países, una de las causas fundamentales de su retraso.

Además se debe comprender allí que el impacto de la ciencia, y de la tecnología permanecerán inefectivos, mientras no se desarrolle en estas naciones una adecuada infraestructura y un cambio en la disposición y actitud de la demanda tecnológica local.

La falta de experiencia y tradición en investigación tecnológica, desarrollo experimental e innovación tecnológica, es precisamente lo que profundiza el "vacío tecnológico" en los países subdesarrollados. Es así como algunas veces los conocimientos generados y publicados internacionalmente por los investigadores de los países en desarrollo, son incorporados a los sistemas científicos de los países avanzados, los cuales luego de someterlos a procesos de estudios de factibi-

lidad tecnológica y económica, los introducen en productos, equipos, aparatos e instrumentos o asistencia técnica, que luego venden a estos países atrasados tecnológicamente. Parece hasta contradictorio que a pesar de ello, los sectores productivos, de servicios o de defensa de éstos, muchas veces ni siquiera han desarrollado una capacidad tecnológica para adquirir adecuadamente el equipamiento necesario.

En el fomento de las capacidades innovadoras, están involucradas un gran número de habilidades y destrezas que no existen en estos países y se requiere además diseñar procesos de evaluación de algunos hábitos y modalidades tradicionales en el ámbito de la educación, la gestión y el consumo que de no efectuarse no será posible conocer las limitaciones que nos impone nuestra condición de subdesarrollo, ni concretar la formación de los recursos humanos y provocar los cambios culturales necesarios para evadirnos de este retraso. Es decir, el proceso de innovación tecnológica no podrá visualizarse ni concretarse con éxito, si no se comprende y valora adecuadamente la dimensión cultural y educativa que este fenómeno conlleva.

Es evidente, por tanto, que para lograr la incorporación efectiva de las innovaciones tecnológicas en las empresas, se hace indispensable contar con los científicos, ingenieros y técnicos y mano de obra especializada adecuadamente preparados, con personal con habilidad para la gestión y coordinación tecnológica y con una capacidad empresarial dispuesta a gestar innovaciones.

Es así como dentro de esta secuencia de recursos humanos necesarios, para alcanzar la innovación tecnológica, se hace notoria la ausencia de ingenieros de desarrollo, ingenieros de diseño, técnicos eficientes, mano de obra altamente especializada y confiable, expertos en comercialización y control de calidad y ejecutivos eficientes.

En nuestro medio, debido a la tradicional adquisición de tecnología llave en mano, es crítica la falta de recurso humano con preparación en ingeniería de desarrollo, que es el tipo de profesional que emplea en forma sistemática los resultados de la investigación científica y tecnológica, y resultados empíricos, con el fin de convertir un invento en una innovación tecnológica incorporada al medio productivo. Del mismo modo, es igualmente crítica la carencia, en nuestro medio, de la ingeniería de diseño, que es la que vincula a la ingeniería de desarrollo con la ingeniería de producción.

Es responsabilidad del ingeniero de diseño el transformar los modelos establecidos por los ingenieros de desarrollo y transformarlos en elementos de producción económica dentro de la empresa. Debe dominar ampliamente las propiedades de los materiales y su comportamiento bajo la acción de fuerzas estáticas y dinámicas, y debe conocer la capacidad o limitación de los procesos de fabricación, teniendo en cuenta

costos, ahorro energético, así también como la utilidad y la satisfacción estéticas de los productos.

Finalmente, en un medio de innovación tecnológica dinámica, los profesionales a cargo del marketing son quienes conociendo el mercado y la competencia, están continuamente sugiriendo cambios en calidades, diseños y producción.

Es posible que dada la característica del mundo actual la universidad deba entregar estas especializaciones a nivel de postgrado, postítulo o educación continua.

Es obvio, entonces, que para que las innovaciones puedan concretarse, se requiere una combinación de esfuerzos de científicos, ingenieros de desarrollo, ingenieros de diseño, ingenieros de producción, además de técnicos, empresarios y ejecutivos y es papel del sistema educativo nacional, el asumir con eficiencia esta tarea de formación de recursos humanos.

Se sabe, por otra parte, que las grandes empresas, en Chile, recurren para resolver sus problemas de investigación, desarrollo e innovación tecnológica a sus casas matrices en los países avanzados, las que cuentan con recursos humanos, físicos y financieros enormes para resolver sus problemas, en forma pronta y certera; medios y experiencia que es muy difícil que disponga algún centro nacional de investigación.

Sin embargo, estas empresas nacionales grandes no cuentan con recursos humanos, ni equipos para realizar tareas que a las empresas extranjeras no les interesa ni conviene resolver, como es el introducir y adaptar materias primas nacionales a los procesos de producción que emplean insumos importados. Por ello, es importante contar con información de las grandes empresas que utilicen alta tecnología con el propósito de visualizar sus requerimientos de desarrollo presentes y sus tendencias futuras en aspectos tecnológicos, así como también sus planes de desarrollo de largo y mediano plazo de modo de poder preparar profesionales que se interesen por explicitar estos requerimientos e incorporar innovaciones que reemplacen equipos e insumos importados por nacionales.

Sin embargo, las pequeñas y medianas empresas orientadas a la exportación y la sustitución de importaciones, que son las que ofrecen las mejores perspectivas de contribuir a desarrollar en el país las condiciones propicias para robustecer la capacidad de innovación técnica, a través del ejercicio mismo de esta actividad, no pueden dado su tamaño, recurrir a la asistencia técnica extranjera para incorporar innovaciones en sus procesos productivos y deberán apoyarse en la oferta nacional para estos efectos. Este tipo de empresa es altamente importante, ya que otorga a la industria nacional flexibilidad para atender pedidos especializados, tanto del país como del extranjero, e incrementa la capacidad nacional para la innovación, ayudando a promover la diversificación de productos en el país, para afrontar la incertidumbre del mercado de exportación.

Es así como las personas que están al frente de estas empresas medianas y pequeñas deberán poseer una mentalidad empresarial y disposición para afrontar riesgos en la innovación tecnológica. Las universidades deberán velar por que el país pueda disponer de este tipo de profesional y no preocuparse sólo de preparar profesional—funcionario para las grandes empresas, como lo hacen en el presente.

Es posible que en una primera etapa, para crear y ejercitar una capacidad de innovación tecnológica en el país, se deba transferir y adaptar innovaciones tecnológicas generadas en los países desarrollados que hagan uso de nuestras materias primas y en un menor grado crear tecnologías enteramente nuevas en áreas muy especiales debido al alto costo que ello tiene, y la falta de interés que existe para financiarla.

Esto iría gestando en el país una capacidad nacional para buscar, entender, evaluar, relacionar, negociar y adaptar tecnologías generadas en el exterior, lo que serviría como experiencia y base para ayudar a que las empresas se interesen en incorporar tecnologías totalmente nuevas en sus procesos productivos. Es decir, que la copia inteligente y adaptativa para la pequeña y mediana expresa podría ser el punto de partida del desarrollo de una capacidad innovadora nacional, ya que ello contribuiría a que se estrecharan los lazos entre las actividades de investigación, desarrollo e innovación tecnológica y los de producción y mercados, que promuevan además el establecimiento en el país del control indispensable de calidad, de productos y materias primas y una infraestructura ágil y eficiente en comercialización de bienes y servicios.

La tecnología hoy en día unifica el universo del "hacer" con el universo del "saber", relacionando la historia intelectual del hombre con la historia natural. Por ello, se requieren ante todo reglas del juego adecuadas y estables, de parte de los estados, en materias relacionadas con el desarrollo industrial.

También se hace necesario el suministro de conocimiento y experiencias sistematizadas, que ayuden a tomar las decisiones correctas y afrontar riesgos en las empresas, incorporando innovaciones tecnológicas, en



un mundo de cambios, complejos y acelerados, que contemplan aspectos tanto científico—tecnológicos como culturales, económicos y sociales.

Sin embargo, ante todo se deberá alcanzar una visión común con respecto al desarrollo, de parte de científicos, ingenieros, técnicos, empresarios y funcionarios públicos, cada cual aportando con su propio conocimiento, lógica y lenguaje, procurando que su combinado esfuerzo lleve a tomar las decisiones adecuadas, para producir las innovaciones tecnológicas necesarias y alcanzar los resultados productivos eficientes para el progreso del país.

Finalmente, se hace necesario indicar que la acción conjunta y armónica de las actividades de investigación, desarrollo e innovación tecnológica y gestión empresarial será estéril, si no existe una actitud de estímulo y fomento de parte del Estado, que considere el avance tecnológico como un área vital del desarrollo social del país.

REMETALLICA

DISCURSO

Inauguración

IV JORNADAS DE ANALISIS DE LA INVESTIGACION Y POST GRADO

Ing. LAUTARO RETAMALES A., Decano de la Facultad de Ingeniería

Chile es un país pequeño, pero aun para su tamaño, está escasamente poblado, y lo que evidentemente no es un punto positivo es que esta pequeña población está mal distribuida geográfica y ocupacionalmente. Desde luego que existen otros factores negativos que no es del caso analizar para los planteamientos que en esta oportunidad deseo presentar.

Algunos estudiosos del problema de establecer una política de desarrollo científico - tecnológico - productivo en Chile, coinciden en señalar que, mientras más reducida es la población de un país, mayor debe ser el grado de especialización de su economía. Esta premisa obliga a ser muy cuidadoso y preciso en la definición de estrategias de desarrollo y en la asignación de las áreas prioritarias de acción y de los recursos que a ellas se destinen.

Resulta un hecho impactante que la tasa de crecimiento que ha permitido la exportación de recursos naturales, tanto renovables como no-renovables, ya sea en la forma de materia prima o semielaborados, todavía sea positiva y, diría, casi satisfactoria, pero la tendencia histórica es preocupante, pues seguirá siendo de deterioro al compararla, en sus términos de intercambio, con los productos manufacturados y de servicios que se importan. Esta diferencia de valores entre lo que podemos exportar y lo que debemos importar está fundamentalmente en el mayor valor agregado de la contribución tecnológica en el producto o servicio que proviene del exterior.

Resulta significativo entonces, y me permito, compulsivamente, a pedirles que reflexionen sobre la reiterada tendencia, que una parte importante de nuestra comunidad científica tiene para especializarse en estas materias primas. Si bien ninguno de nosotros haría objeciones a iniciativas de esta importancia y naturaleza, no es posible cerrar los ojos a la verdad: lo que para nosotros se consideran exportaciones "no tradicionales", para los ojos del resto del mundo, receptor de ellas, sólo serán exportaciones tradicionales. Luego, será muy difícil que puedan contribuir, de manera substancial, a resolver los graves problemas ocupacionales del país.

Hace un par de días pude ver un video producido

por Sudáfrica, un país enormemente rico en recursos minerales. En dicho video resalta un hecho impactante: Japón importa un porcentaje enorme de minerales de hierro, vanadio, cromo, níquel, cobre, etc. Y sin embargo, es uno de los mayores productores de aceros especiales; y para qué hablar de su industria electrónica.

Con estas reflexiones quiero plantear la urgente necesidad de abandonar las generalidades, en un esfuerzo generoso, personal y colectivo. Esto significa definir prioridades y opciones en la investigación científica y tecnológica.

Aun cuando respetamos las decisiones que cada departamento adopte o señale para orientar las investigaciones que realiza o desea realizar, creemos necesario que ellas deben enmarcarse y apuntar hacia objetivos comunes que contribuyan y conduzcan al progreso de nuestra patria.

Señalaremos aquí algunos objetivos que a nuestro juicio deben alcanzarse:

- a) Mejorar la capacidad de creación de nuevas tecnologías.
- b) Mejorar la capacidad de adaptación y perfeccionamiento de tecnologías.
- c) Ayudar al fortalecimiento de la capacidad científico-tecnológica de la industria.
- d) Cooperar al desarrollo de tecnologías para la producción de insumos intermedios y de bienes de capital necesarios para la explotación y desarrollo de los recursos naturales y para la cobertura de necesidades básicas.
- e) Ayudar al desarrollo de una capacidad para combinar tecnologías nuevas y tradicionales.
- f) Fomentar la adquisición de conocimientos y desarrollos propios en áreas relativamente nuevas como la biotecnología, la robótica y otras.

De estos planteamientos se colige que se requerirán ingentes recursos económicos y humanos.

Estoy cierto que contamos con personal suficientemente capacitado para enfrentar este doble desafío. Conociendo la calidad científica y moral de los colegas investigadores aquí presentes, reitero mi invitación a ser generosos y humildes. Debemos integrar grupos de investigación sólidos y eficientes como respuesta al doble desafío ya mencionado.

La charla del doctor Osvaldo Cory, presidente de CONICYT, junto a otras indicaciones externas, nos muestra que se avecinan tiempos de competencia para lograr fondos de investigación.

Más que nunca, nuestra obligación es prepararnos para ser más efectivos en investigación. Deberíamos verificar la capacidad real de la Facultad para presentar proyectos pidiéndose que éstos se completen varios meses antes que se cumpla el plazo de presentación a FONDECYT. De esta manera podremos saber cuántos proyectos puede efectivamente generar la Facultad y ello nos daría tiempo para mejorarlos y revisarlos.

Las presentes jornadas dirigirán la atención preferentemente a los siguientes temas:

- La política actual del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico y de su proyección en nuestra Facultad.
- El programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería.
- La orientación y política de la investigación en la Universidad de Santiago de Chile, y
- El perfeccionamiento en la Facultad.

En relación al programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería, éste se encuentra en su primer semestre de operación. Hay algunos alumnos que iniciarán sus actividades este semestre. Pido a ustedes su apoyo para esta actividad, que es de trascendencia para nuestro desarrollo institucional. Tenemos por delante la doble tarea de reforzar nuestra labor de investigación y de difundir el programa debidamente para obtener postulantes del mejor nivel posible.

La Vicerrectoría Académica, a través del Departamento de Investigación Científica y Tecnológica, elaboró un documento de elementos básicos de política de investigación. En su elaboración participaron los jefes de Investigación de todas las Facultades. Ha sido aprobado por el Consejo Académico de la Universidad y distribuido a todos los investigadores. En el momento presente se trabaja en su implementación práctica.

En materia de perfeccionamiento académico, se hace necesario concebirlo como una actividad permanente e integral, que considere un mejoramiento de la capacidad pedagógica, de los conocimientos disciplinarios, de la competencia en investigación, de la realización de asistencia técnica y extensión, de la administración académica y, por último, también de la visión cultural de los profesores, que no es lo menos



importante en una Universidad que aspira a formar profesionales integrales, proceso en el cual es fundamental el ejemplo y nivel académico y cultural de los profesores.

Por esta razón se ha generado en la Facultad un documento que contiene la visión general del perfeccionamiento, el cual se ha hecho llegar a todos los Departamentos. Se espera transformar estas ideas en hechos concretos en un futuro próximo.

Muchos otros temas serían posibles de considerar en estas jornadas, pero por diversas razones de índole práctico, se han elegido aquellos temas que parecen de más trascendencia en el momento presente.

Los invito a participar en todas las sesiones de trabajo y estoy seguro de poder contar con su colaboración y preocupación en temas de los que en gran medida depende el futuro desarrollo en nuestra Facultad.



Aspectos teórico-prácticos de la refinación a fuego del cobre

Ingeniero Civil Metalurgista (USACH). Investigador de la División Metalurgia Extractiva del Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM). Profesor Jornada Parcial, Departamento de Ingeniería Metalúrgica (USACH).

MANUEL DEVIA PEREZ



RESUMEN

Se presentan algunos aspectos históricos de la producción de cobre, así como la producción mundial de mina, consumo mundial y usos de este metal. Se realiza una revisión de la metalurgia extractiva de minerales sulfurados y oxidados de cobre, sólo de procesos probados a nivel industrial, y del control de calidad a que se somete el metal de acuerdo a la utilización en la industria eléctrica - electrónica.

Se revisan la termodinámica y cinética de las etapas de oxidación del cobre blister y la desoxidación del set copper durante la refinación a fuego. Además, se presentan antecedentes relevantes de eliminación de impurezas mediante escorificación y refinación reductora durante las etapas de oxidación y reducción del proceso de refinación a fuego del cobre.

1. INTRODUCCION¹

El cobre ha sido uno de los metales de mayor importancia en el desarrollo de la civilización, pues es el único que se ha encontrado en la naturaleza en estado nativo apropiado para la producción de herramientas y utensilios. La relativa facilidad que poseen los óxidos de cobre para reducirse al metal y la tendencia de éste a alearse con otros metales, permitió al hombre la promoción de su amplia utilización en los diferentes estadios de la civilización. En la actualidad, las altas conductividades térmicas y eléctricas y la resistencia a la corrosión que posee el cobre debido a la pureza con que se puede obtener, además de su fácil trabajabilidad, dan a este metal un amplio rango de aplicaciones comerciales.

El uso del cobre por el hombre data de alrededor del año 8500 a. de C, en el norte de Iraq, y luego en Asia Menor y Egipto alrededor del año 7000 a. de C. Posteriormente se encontraron depósitos de cobre en la Península del Sinaí alrededor del año 3800 a. de C. Los depósitos de Chipre se descubrieron cerca del año 3000 a. de C. y durante este período los egipcios

desarrollaron la metalurgia como un arte siendo común la utilización del bronce. Posteriormente, las minas de Chipre fueron la principal fuente de abastecimiento del metal para el Imperio Romano. El metal se denominó cyprium y después cuprum, desde donde derivó la palabra cobre y su símbolo Cu.

En 1556, Georgius Agrícola (Georg Bauer) describe en De Re Metallica desarrollos en la metalurgia del cobre y sus aleaciones. En esta época se iniciaron las operaciones de fundición en Mansfeld, Alemania, y en Swansea, Gales. Ambas fundiciones emplearon oxidaciones y reducciones sucesivas de minerales a fin de eliminar azufre. El proceso utilizado en la fundición de Swansea era muy similar a las técnicas actuales.

Entre 1851 y 1880 Chile fue el primer productor de cobre del mundo en la denominada época de gloria del cobre chileno; sin embargo, a partir de 1881 fue desplazado definitivamente por Estados Unidos, debido a una disminución progresiva de la producción de cobre de Chile por una parte, y al aumento significativo de la producción de cobre en los Estados Unidos a partir de 1881, por otra. En el período 1851 - 1880 Chile produjo 1.078.000 TM que correspondió al

36,8% de la producción mundial en ese período².

Entre 1869 y 1877, Calumet and Hecla Company (Michigan, EE.UU.) produce cerca de 6.200 TM/año de cobre. En 1877, las minas de cobre en Río Tinto (Huelva, España) producen 24.000 TM/año. En la década de 1890, Anaconda Copper Company (Montana, EE.UU.) aumentó su producción desde 34.000 a más de 50.000 TM/año. La figura 1 muestra la variación de la producción de cobre en el siglo pasado de las empresas mencionadas.

El desarrollo de la flotación como medio de beneficio de minerales sulfurados de cobre durante la década de 1920 mejora la recuperación del metal y permite la explotación de depósitos porfíricos de baja ley en Arizona (EE.UU.). Esto permite que este país llegue a ser el mayor productor de cobre del mundo.

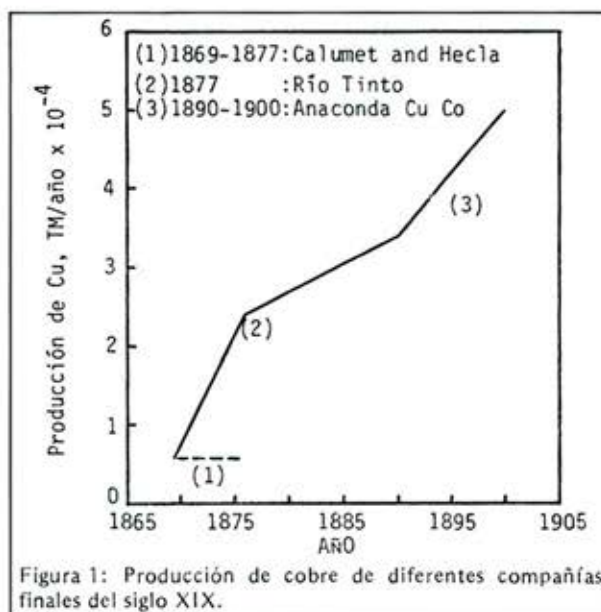
Por otra parte, en esta misma época comienza la explotación de las minas de cobre porfírico en Chile, Perú, Zaire y Zambia y en la actualidad, Chile pasó a liderar la producción mundial de cobre, debido a que posee grandes recursos minerales de buena ley y bajos costos de producción, lo que incide en las políticas de producción, aún cuando el precio del cobre está deprimido. Los bajos costos de producción en Chile se deben fundamentalmente a los siguientes aspectos: reservas abundantes, buena ley de los minerales, mano de obra barata, certanía de los puertos de embarque, infraestructura adecuada, desarrollo de tecnología y recursos humanos especializados.

2. GENERALIDADES

2.1. Propiedades Diversas del Cobre.

El cobre es el primer elemento del subgrupo IB de la tabla periódica inmediatamente sobre la plata y el oro. Se clasifica, junto con estos últimos, como metal noble y al igual que ellos se encuentra en la naturaleza en forma elemental.

La tabla I muestra diversas propiedades del cobre con sus respectivos valores de interés para el área de la pirometalurgia.



2.2. Metalurgia Extractiva de los Minerales de Cobre.

Dependiendo de la profundidad en que se encuentran en la corteza terrestre, los minerales de cobre se clasifican en sulfurados y oxidados, considerándose los minerales sulfurados depósitos naturales, mientras que los minerales oxidados se consideraron formados por oxidación de los sulfuros.

La tabla II presenta los diversos tipos de minerales sulfurados y oxidados presentes en la corteza terrestre y sus respectivas fórmulas químicas. Además, para el caso de los minerales sulfurados de cobre se incluyen algunos acompañantes naturales de estos minerales, como son los sulfuros de hierro.

TABLA I: Propiedades del Cobre

Peso atómico	63,54	(g/mol)
Temperatura de fusión	1.083	(°C)
Entalpía de fusión	~3.100	(cal/mol)
Temperatura de ebullición	2.594	(°C)
Entalpía de ebullición	~73.300	(cal/mol)
Calor específico, Cu(s)	(5,41 + 1,5 x 10 ⁻³ T)	(cal/mol . K)
Calor específico, Cu(l)	7,5	(cal/mol . K)
Densidad, Cu(s)	8,96	(g/cm ³)
Densidad, Cu(l)	8,4	(g/cm ³)
Conductividad térmica a 1.100°C	3,5	(W/cm . K)
Resistividad eléctrica	1,673	(μ Ω/cm)
Log p ^o Cu (1.083 - 2.595°C)	($-\frac{17520}{T} - 1,21 \log T + 13,21$)	(mm Hg)
Viscosidad a 1.200°C	13,21	(cP)

TABLA II: Diversos Minerales Sulfurados y Oxidados de Cobre

Minerales Oxidados

Cuprita	Cu_2O
Tenorita	CuO
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_3$
Brocantita	$\text{CuSO}_4 \cdot (\text{OH})_6$
Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl(OH)}_3$
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Cobre Nativo	Cu

Minerales Sulfurados

Bornita	Cu_5FeS_4
Calcopirita	CuFeS_2
Tetraedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$
Tenanita	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Calcosita	Cu_2S
Covelina	CuS
Enargita	Cu_3AsS_4
Pirita	FeS_2
Pirrotita	FeS

Por otra parte, en Estados Unidos, Canadá y otros países se está aplicando en la actualidad la lixiviación in situ y en botaderos de sulfuros de cobre de baja ley³, correspondiendo en el caso de Estados Unidos aproximadamente al 15% de la producción primaria de cobre.

La figura 3⁴ muestra los principales procesos para la fusión—conversión—refinación de cobre, considerando sólo aquellos que están establecidos a escala industrial. Las principales alternativas para la primera etapa de fusión de concentrados a eje son el horno de reverbero y la fusión flash. Por otra parte, existen los procesos continuos y/o en una sola etapa, tales como el Mitsubishi y Noranda, cuyo objetivo es la producción continua de blister, ya sea en una etapa (Noranda) o varias etapas (Mitsubishi). En nuestro país se desarrolló el proceso de Convertidor Modificado Teniente (CMT), alternativa intermedia que usa el calor de la conversión para fundir concentrados sin combustible.

2.3. Producción y Consumo Mundial de Cobre.

La figura 4 muestra la producción mundial de

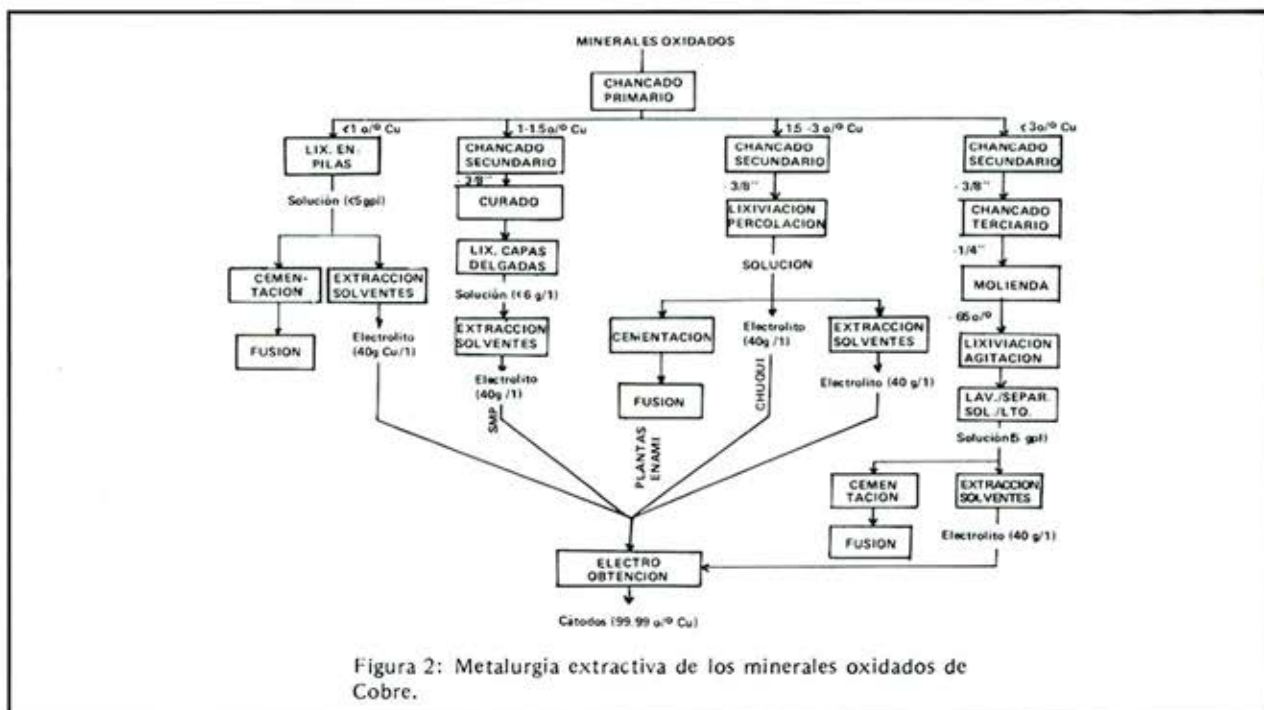


Figura 2: Metalurgia extractiva de los minerales oxidados de Cobre.

La figura 2 presenta los principales procesos a los que pueden ser sometidos los minerales oxidados de cobre de acuerdo a las diferentes leyes que presentan estos minerales. Además, el esquema planteado está diseñado de manera tal que de izquierda a derecha se presentan los procesos con un incremento en la recuperación y el costo de inversión y operación. Se puede apreciar que la técnica de cementación para producir cemento de cobre, conduce a una vía posterior pirometalúrgica para obtener el cobre metálico.

cobre de mina⁵ y la figura 5 el consumo mundial de cobre⁶. Se puede apreciar en la figura 5 que, aunque Chile es el primer productor de cobre del mundo, el consumo de este metal en el país es magro; mientras que otros países, como Estados Unidos y la Unión Soviética, consumen más cobre del que producen. También se observa que casi un 45% de la producción mundial de cobre de mina es aportada por América, mientras que Europa, no siendo un potencial productor del metal, consume un tanto más que América o

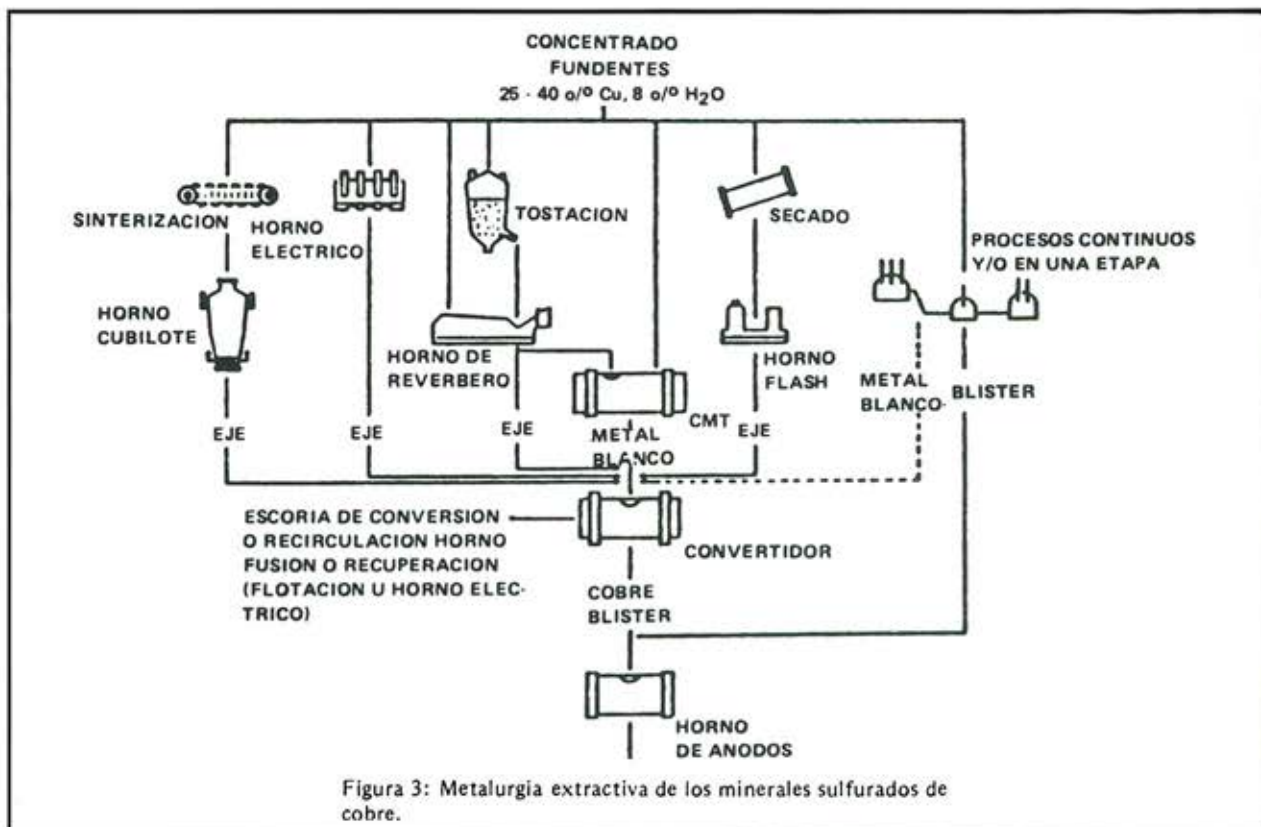


Figura 3: Metalurgia extractiva de los minerales sulfurados de cobre.

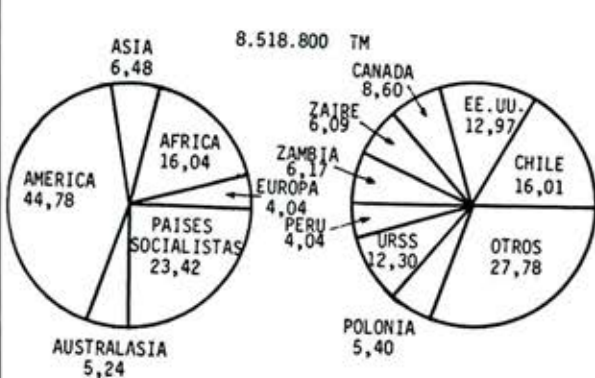


Figura 4: Producción mundial de cobre de mina en 1985.

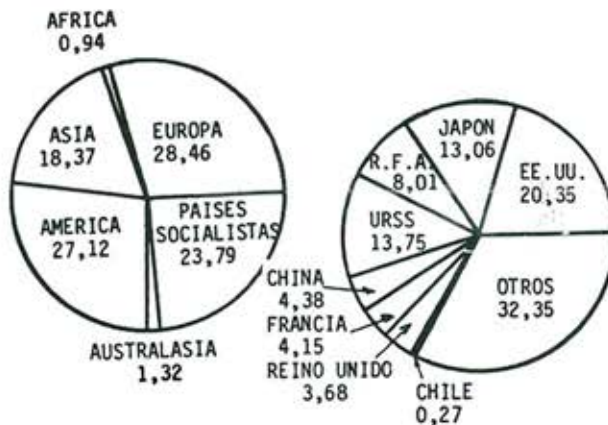


Figura 5: Consumo mundial de cobre en 1985.

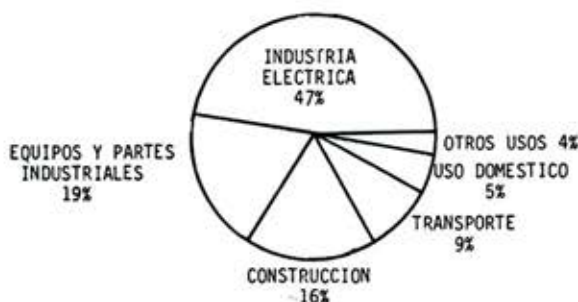
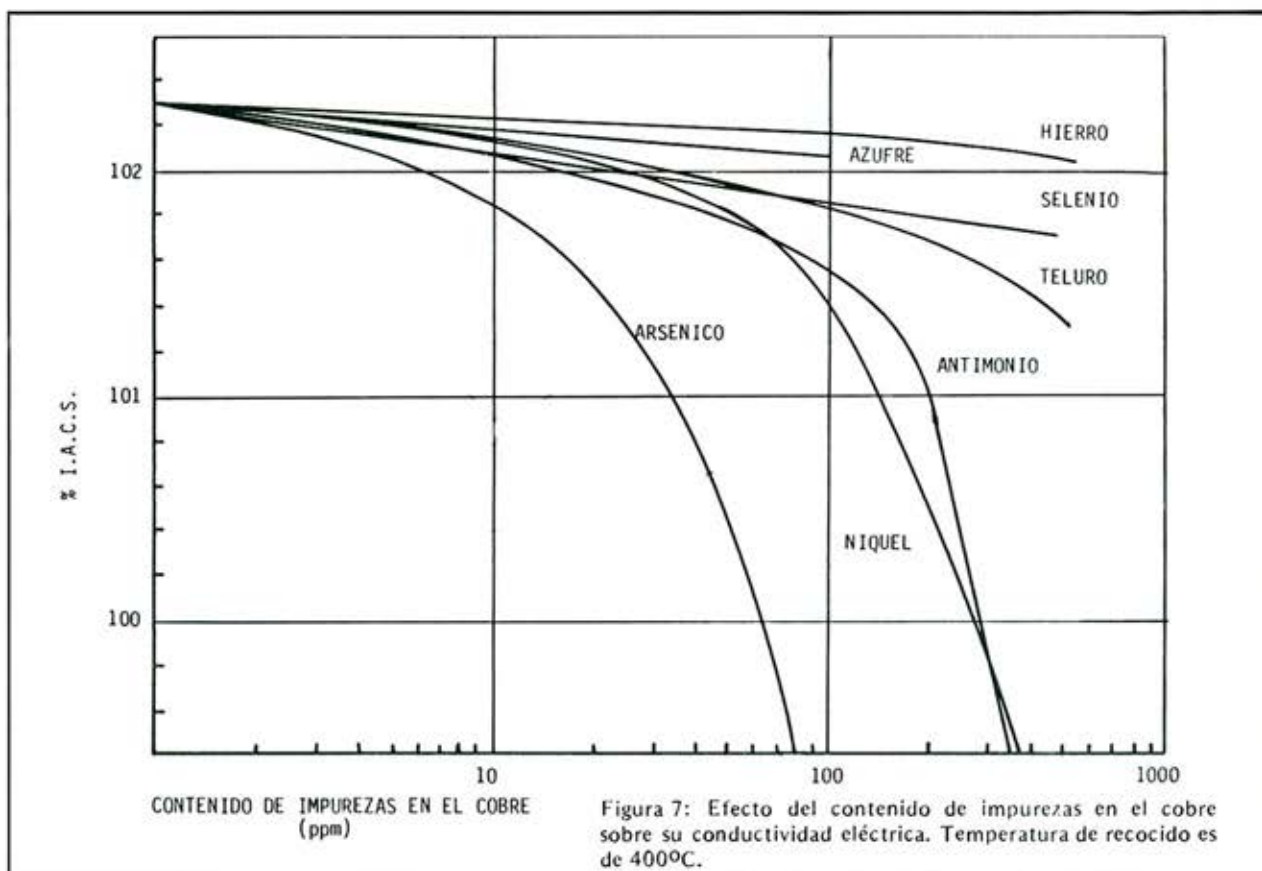


Figura 6: Distribución del consumo de cobre.



los países socialistas.

En la figura 5 se puede apreciar que el consumo para el año 1985 es mayor que la producción mundial, mostrada por la figura 4. Este fenómeno se puede explicar al considerar que en la producción no se incluye el tratamiento de cobre secundario.

La figura 6 presenta una distribución del consumo de cobre en diversos rubros⁷. Se puede suponer que las mayores exigencias del control de calidad para el cobre están dirigidas hacia la utilización de éste en la industria eléctrica y electrónica, fundamentalmente.

2.4. Control de Calidad del Cobre.

El cobre blister, tal como es producido en la práctica convencional y alternativas de fusión—conversión, no tiene una utilización directa dada la baja pureza que posee. Es por esta razón que es necesario recurrir a un proceso pirometalúrgico posterior de refinación de este tipo de cobre, para su venta o para proceder a su refinación electrolítica.

La refinación a fuego del cobre blister es un proceso de oxidación—reducción a que es sometido éste con el fin de eliminar impurezas, principalmente aquellas que se oxidan selectivamente. Esta práctica convencional de oxidación selectiva con posterior reducción del oxígeno retenido, conduce a la obtención de cobre tipo anódico el que es sometido posteriormente a un proceso de refinación electrolítica para obtener un producto denominado cátodo. Alternati-

vamente, existe la posibilidad de eliminar algunas impurezas del cobre mediante escorificación con fundentes adecuados a fin de obtener un producto final denominado cobre refinado a fuego.

En 1913, dadas las aplicaciones de su época en energía eléctrica, se acordó utilizar como base de las cotizaciones un cobre recocido de pureza relativamente alta como el International Annealed Copper Standard (IACS). Su resistividad a 20°C era 0,017241 (ohm mm²/m), que significa la resistencia de un alambre de 1 m de largo y 1 mm² de área transversal. Esto es equivalente a 1,7241 (micro-ohm . cm) y corresponde a 100% IACS.

Ya que la pureza del cobre se ha ido mejorando a través de los años, debido al perfeccionamiento tecnológico, la resistividad también ha ido en disminución, de manera que hoy se aplica la siguiente fórmula para determinar la conductividad eléctrica del cobre:

$$\% \text{ IACS} = \frac{1,7241}{\text{probeta}} \times 100$$

El valor de la conductividad eléctrica del cobre medida en % IACS es muy sensible a la composición del cobre. La figura 7 muestra la variación de la conductividad eléctrica con diversos contenidos de varias impurezas en el cobre. En todas las curvas de la figura 7, el cobre fue recocido a 400°C y las aleaciones contienen oxígeno entre 200 - 400 ppm.

En las tablas III y IV se presentan las especificaciones de cobre refinado a fuego según las normas ASTM (American Standard Testing Material) y BS (British Standard) y cobre catódico Copper-Higher Grade según la norma IWCC (International Wrought Copper Council).

3. REFINACION A FUEGO DEL COBRE

3.1. Etapa de Oxidación del Cobre Blister.

La oxidación del cobre blister es una etapa de la refinación a fuego que consiste esencialmente en remover las impurezas contenidas en éste. De acuerdo al

TABLA III.
Especificaciones de cobre refinado a fuego según normas ASTM y BS

Elementos		Normas ASTM B-216	Norma BS - 1038
Cu + Ag	(mín) %	99,8	99,85
As	(máx) ppm	120	200
Sb	(máx) ppm	30	50
Bi	(máx) ppm	30	30
Pb	(máx) ppm	40	100
Fe	(máx) ppm	—	100
Ni	(máx) ppm	500	500
Se + Te	(máx) ppm	250	300
Sn	(máx) ppm	—	100
O	(máx) ppm	550	1.000

En Chile, la Fundición Caletónes de la División El Teniente de CODELCO-CHILE produce cobre RAF satisficiendo ampliamente la especificación más estricta para este tipo de cobre, vale decir, la norma ASTM B-216 de la tabla III. La producción de cobre RAF varía entre 120.000 a 150.000 TM/año, la que se comercializa en su totalidad.

tipo de impurezas disueltas en el cobre blister líquido, existen dos técnicas de oxidación a fin de eliminar estas impurezas: oxidación selectiva y escorificación.

3.1.1. Oxidación Selectiva.

Es una técnica que consiste en insuflar aire al cobre blister líquido ($\sim 1.200^{\circ}\text{C}$) mediante lanzas de

TABLA IV
Especificación de cobre catódico Copper-Higher Grade según International Wrought Copper Council

Grupo 1			
Se, Te, Bi	Se + Te + Bi	:	3 ppm máx.
	Se + Te	:	3 ppm máx.
	Se, Te, Bi	:	2 ppm máx.
Grupo 2			
Cr, Mn, Sb	Total grupo	:	15 ppm máx.
Cd, As, P	Sb	:	4 ppm máx.
	As	:	5 ppm máx.
Grupo 3			
Pb	Pb	:	5 ppm máx.
Grupo 4			
Si, Sn, Ni	Total grupo	:	20 ppm máx.
Fe, Zn, Co	Fe	:	10 ppm máx.
Grupo 5			
S	S	:	15 ppm máx.
Grupo 6			
Ag	Ag	:	25 ppm máx.
TOTAL IMPUREZAS (EXCL. OXIGENO)		:	65 ppm máx.
CONDUCTIVIDAD		:	101% IACS mín.
NUMERO ELONGACION DE RESORTE		:	350

hierro (horno de reverbero de refinación) o toberas (horno basculante), a fin de eliminar principalmente azufre a la fase gaseosa y otras impurezas, como Fe, Pb, etc., a una escoria del tipo fayalítica. Estas últimas impurezas se oxidan selectivamente respecto del cobre, es decir, tienen una afinidad por el oxígeno mayor que el cobre.

La figura 8 muestra el diagrama de equilibrio de fases para el sistema Cobre—Oxígeno. En la práctica habitual de oxidación durante la refinación a fuego se trabaja en la región del líquido homogéneo L_1 a una temperatura cercana a los 1.200°C y presiones parciales de oxígeno en las vecindades de 10^{-5} atm. En la figura 9 se presenta el diagrama de Ellingham para la refinación a fuego del cobre mostrando las isóbaras de presión parcial de oxígeno de equilibrio. Al igual que en el caso de la figura 8, en la 9 se observa que la región de trabajo a la temperatura y presión parciales de oxígeno, corresponde a la del líquido homogéneo L_1 , que es una solución de cobre con oxígeno disuelto.

Respecto de la velocidad de oxidación del cobre⁸ se han planteado dos mecanismos posibles a fin de explicar la cinética del proceso:

a) Control por velocidad de suministro de oxígeno, en el cual la cinética de oxidación está dada por la expresión:

$$\frac{d\%O}{dt} = 0,938 \frac{MO_2}{m_{Cu}} Q_A \quad (1)$$

donde MO_2 es el peso molecular del oxígeno, m_{Cu} es la masa de cobre y Q_A es el flujo volumétrico de aire.

b) Control por difusión del oxígeno en las burbujas, en el cual la cinética de oxidación está dada por la expresión:

$$\frac{d\%O}{dt} = \frac{1 - \exp(-0,181 \cdot k_{d,g} \frac{O_2}{m_{Cu}})}{1,08 m_{Cu}} \quad (2)$$

donde $k_{d,g}$ es el coeficiente de transferencia de masa del oxígeno por difusión en fase gaseosa, es decir, en las burbujas.

Para verificar cuál de los posibles mecanismos propuestos es el verdaderamente controlante del proceso de oxidación del cobre, se integraron las ecuaciones (1) y (2) y se graficó el contenido de oxígeno en el cobre versus el tiempo de oxidación, resultando lo mostrado en la figura 10.⁹ En esta última figura se puede observar que la velocidad de oxidación está efectivamente controlada por la difusión del oxígeno en las burbujas de aire.

De acuerdo con lo anterior, y considerando la reacción de disolución del oxígeno en el cobre líquido,

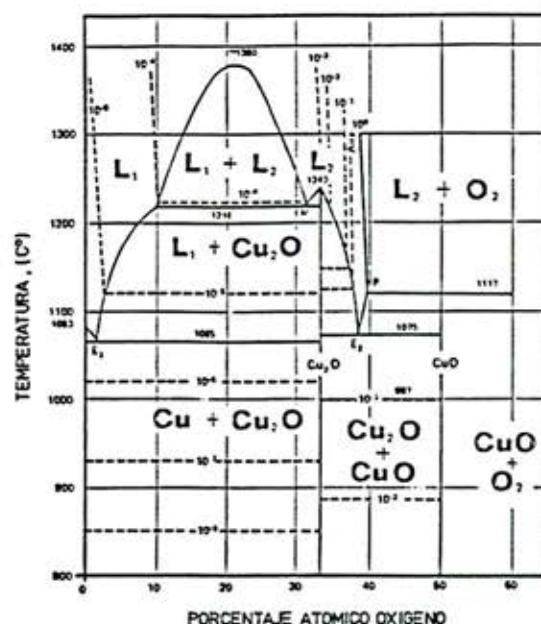


Figura 8: Diagrama de fases del Sistema Cobre—Oxígeno.

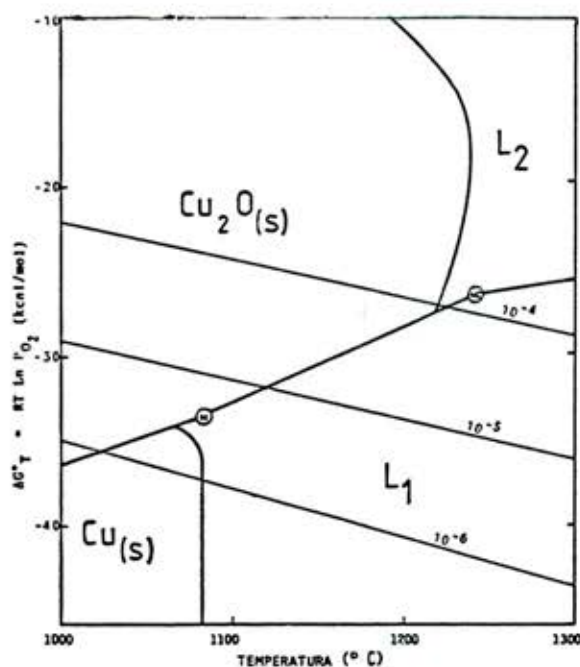
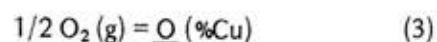
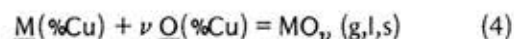


Figura 9: Diagrama de Ellingham para la refinación a fuego del cobre.



el mecanismo de oxidación selectiva de impurezas estaría dado por la reacción:



donde M representa la impureza disuelta en el cobre líquido y MO_v es el producto de la oxidación de la impureza, que puede ser un gas, por ejemplo SO_2 , un líquido o un sólido que eventualmente pasarían a formar parte de la escoria. La figura 11 muestra una burbuja de aire ascendiendo por el cobre líquido, produciéndose la reacción de disolución (3) y la reacción de oxidación selectiva de impurezas.⁴

3.1.2. Escorificación.

Es una técnica que consiste en oxidar el cobre mediante inyección de aire y agregar fundentes apropiados (inyectados o sobre baño) a fin de eliminar las impurezas, que no se oxidan selectivamente durante la oxidación del cobre líquido, mediante escorificación. Entre estas impurezas se pueden mencionar el arsénico, el antimonio y el níquel.

La elección de un fundente de composición apropiada, permite disminuir el coeficiente de actividad del óxido impureza en la escoria. La efectividad química de un fundente se demuestra considerando la basicidad de los óxidos que lo componen y de los óxidos de las impurezas que van a ser transferidas a la escoria. La tendencia a formar compuestos está referida a la fuerza de atracción electrostática anión-catión¹⁰ y tal tendencia disminuye el coeficiente de actividad de un óxido impureza en la escoria.

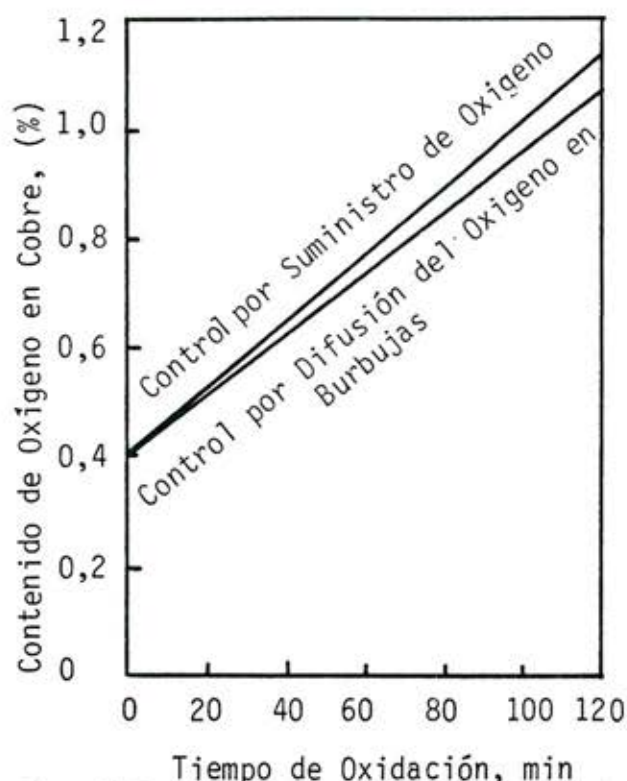


Figura 10: Determinación de la etapa controlante de la velocidad de oxidación del cobre líquido (1.200°C).

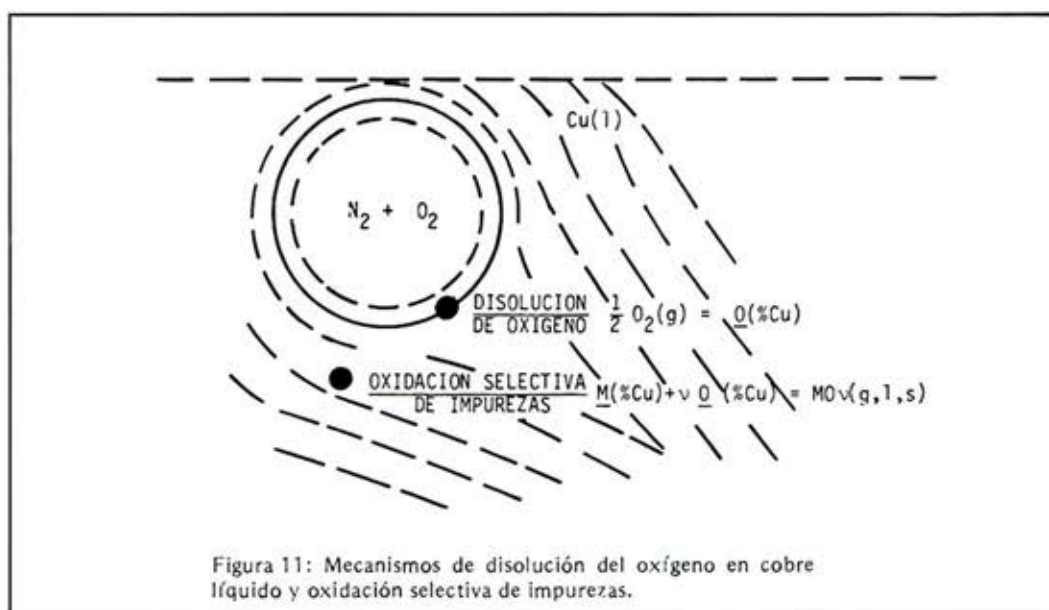


Figura 11: Mecanismos de disolución del oxígeno en cobre líquido y oxidación selectiva de impurezas.

Los mecanismos que se pudieran postular como controlantes de la cinética de la eliminación de impurezas mediante escorificación son:

a) Difusión del oxígeno en la capa límite metálica, dada por la reacción:

$$\underline{O}(\%Cu) = \underline{O}^*(\%Cu) \quad (5)$$

lo que equivale a decir, la difusión del oxígeno desde

el seno del cobre líquido hasta la interfase de reacción metal-escoria.

b) Difusión de la impureza en la capa límite metálica, dada por la reacción:

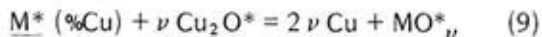
$$\underline{M}(\%Cu) = \underline{M}^*(\%Cu) \quad (6)$$

es decir, la difusión de la impureza desde el seno del cobre líquido hasta la interfase metal-escoria.

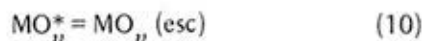
c) Reacción de oxidación del cobre en la interfase, dada por:



d) Reacción de oxidación de la impureza en la interfase, dada por las siguientes alternativas:



e) Escorificación del óxido impureza, según la reacción:



Por otra parte es inevitable, dado los niveles de oxígeno alcanzados durante la oxidación, la escorificación del óxido cuproso, según la reacción:



La figura 12 muestra esquemáticamente los diversos mecanismos planteados y que pudieran controlar la cinética de eliminación de impurezas durante la etapa de oxidación con agregado de fundentes.

Considerando como etapa controlante la difusión del arsénico en la capa límite metálica, se postuló el siguiente modelo para explicar la cinética de eliminación de esta impureza desde el cobre líquido oxidado:⁸

$$\left(\frac{3160 m_{\text{Cu}} \% \text{O}}{A_i k_d \rho_{\text{Cu}}} - \frac{m_{\text{S}} M_{\text{AsO1,5}}}{A_i k_d \rho_{\text{S}} M_{\text{As}}} \right) \frac{d\% \text{As}}{dt} +$$

$$(3160 \% \text{O} + \frac{m_{\text{Cu}} M_{\text{AsO1,5}}}{m_{\text{S}} M_{\text{As}}}) \% \text{As} -$$

$$- \frac{m_{\text{Cu}} M_{\text{AsO1,5}}}{m_{\text{S}} M_{\text{As}}} \% \text{As}^0 = 0 \quad (12)$$

donde m_{Cu} y m_{S} son las masas de cobre y escoria, ρ_{Cu} y ρ_{S} son las densidades del cobre y la escoria, M_{As} y $M_{\text{AsO1,5}}$ son los pesos moleculares del

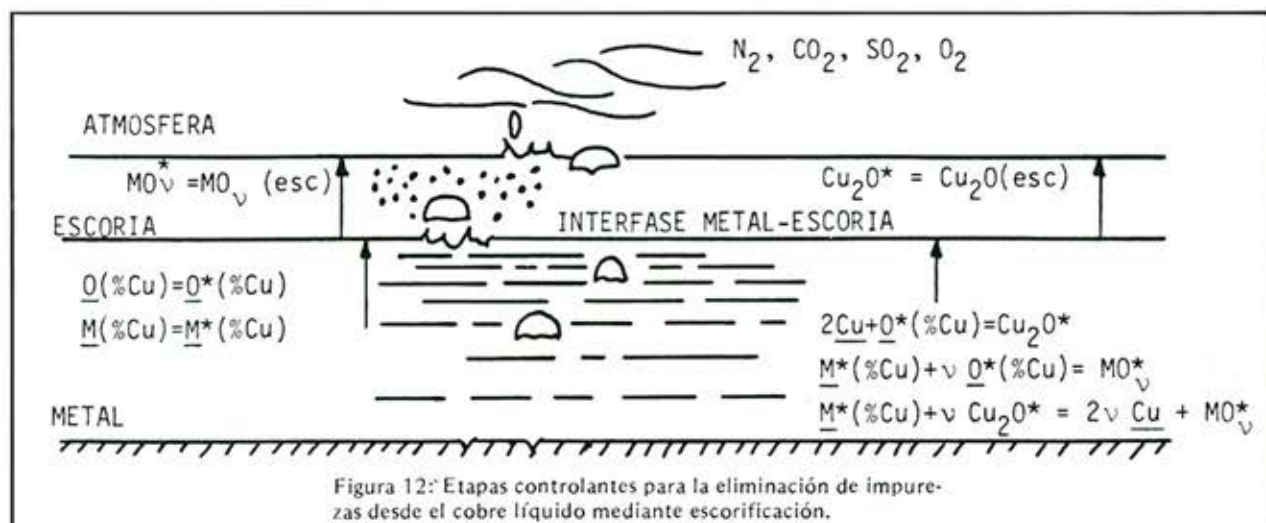
arsénico y su óxido, k_d^{As} y $k_d^{\text{AsO1,5}}$ son los coeficientes de transferencia de masa por difusión del arsénico y su óxido en el cobre y la escoria, respectivamente, $\% \text{As}$ y $\% \text{O}$ son los contenidos de arsénico y oxígeno disueltos en el cobre en función del tiempo, A_i es el área interfasial metal-escoria y $\% \text{As}^0$ es el contenido inicial del arsénico disuelto en el cobre. Este modelo cinético correlacionó adecuadamente resultados experimentales a nivel de laboratorio.⁸

Para el caso del antimonio, se postuló que puede eliminarse significativamente sólo después que el arsénico haya sido oxidado a un nivel suficientemente bajo de manera que deje oxígeno libre en la interfase de reacción metal-escoria, para oxidar el antimonio. Esto se explicó adecuadamente mediante un modelo que asume pseudoequilibrio del arsénico y el antimonio entre el metal y la escoria.⁸

3.2. Etapa de Reducción del Set Copper.

La desoxidación del Set Copper es la etapa subsecuente de la oxidación del cobre blister que consiste esencialmente en contactar algún agente reductor, sea sólido (troncos de eucaliptos, carbón vegetal, coque, etc.), líquido (parafina, petróleo, etc.), o gaseoso (amoníaco, gas natural reformado, etc.), con el cobre saturado en oxígeno o set copper a fin de reducir este elemento a niveles adecuados para las etapas futuras de procesamiento, sea obtención de cobre tipo RAF o cobre anódico para refinación electrolítica posterior.

En base al análisis de los resultados de un estudio a nivel de laboratorio realizado en el Centro de Investigación Minera y Metalúrgica¹¹ y de otros anteriores,

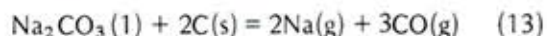


se postuló un esquema de zonas de predominancia de diferentes mecanismos controlantes de la desoxidación de cobre por gases reductores, el cual se muestra en la figura 13, en que las variables de interés son la concentración de oxígeno en el cobre y el número de Reynolds en el orificio de la tobera o lanza de inyección.

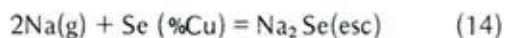
De estos estudios se concluyó que la velocidad de desoxidación del cobre líquido mediante jets de gases reductores, provenientes del amoníaco, kerosene—vapor de agua, gas licuado—vapor de agua y monóxido de carbono tendrían cuatro mecanismos de control claramente definidos: estequiométrico, fase gaseosa, difusión en el líquido y reacción química.

Algunas impurezas aún presentes en el cobre, que no son factibles de oxidar y/o escorificar en la etapa anterior de la oxidación, es posible eliminarlas mediante acomplejamiento hacia el final de la etapa de reducción del cobre, donde prevalece una condición extremadamente reductora debido a los bajos contenidos de oxígeno disueltos en el metal. Este tipo de refinación reductora es posible aplicarlo para la eliminación de Se y Te disueltos en cobre y se justifica plenamente para la obtención de cobre refinado a fuego.

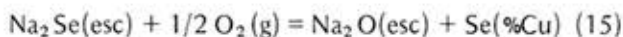
La técnica consiste en agregar carbonato de sodio, en presencia de carbón, de manera de producir la siguiente reacción:



El sodio, debido a la temperatura del proceso, se vaporiza y reacciona con el selenio disuelto según:



El seleniuro de sodio que se transfiere a la escoria es muy inestable si no se mantiene la condición reductora en la atmósfera del horno de refinación. Cuando no prevalece dicha condición, el selenio se redisuelve en el cobre de acuerdo a:



Por lo tanto, manteniendo una condición fuertemente reductora en la atmósfera del horno y retirando la escoria generada, es posible obtener un cobre con bajos contenidos de selenio.

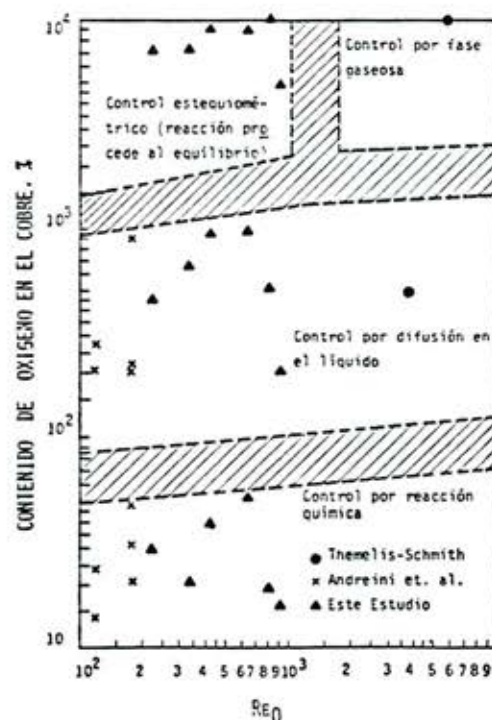


Figura 13: Etapas controlantes en la reducción del set cop-per.

REFERENCIAS

1. W.M. Tuddenham and P.A. Dougall: Copper. En "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", tercera edición, 1980, vol. 6, p. 819 - 869.
2. A. Sutulov. "Antecedentes Históricos de la Producción de Cobre en Chile". En "El Cobre Chileno". Corporación del Cobre, Santiago de Chile, 1975.
3. G. Ugarte: Apuntes de Curso: Hidrometalurgia.
4. A.A. Luraschi: "Revisión sobre Procesos Pirometalúrgicos del Cobre". Charla dictada en el Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, CIMM, en conmemoración del 150 aniversario de CIMM, agosto 1985.
5. Bureau of World Metal Statistics, 1985, p. 33.
6. Bureau of World Metal Statistics, 1985, p. 36.
7. W. Schlein: "Calidad del Cobre Chileno". Revista Chilena de Educación Química, Vol. 2, Nº 4, 1977, p. 191 - 193.
8. M.I. Devia: "Estudio de la Cinética de Oxidación de la Refinación a Fuego". Tesis Ingeniero Civil Metalurgista. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Santiago de Chile, 1983.
9. M.I. Devia and A.A. Luraschi: "Kinetics of Arsenic and Antimony Elimination by Slagging in Copper Refining". TMS-AIME International Symposium on Metallurgical Slags and Fluxes, Lake Tahoe, Nevada, Nov. 11-14, 1984.
10. J.G. Peacey, et al.: "Arsenic and antimony Removal from Copper by Blowing and Fluxing". 109th AIME Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, Feb. 24-28, 1980.
11. G. Riveros, et al.: "Estudio de la Cinética de Desoxidación de Cobre en la Refinación a Fuego de Cobre Blister Utilizando Amoníaco, Gas Licuado y Kerosene". Congreso Cincuentenario Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Santiago, Sept. 1980.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Dirección Ejecutiva del Centro de Investigación Minera y Metalúrgica las facilidades otorgadas para hacer posible esta publicación.

Metalurgia de la soldadura

Mi interés es discutir aspectos metalúrgicos generales comprometidos en los procesos de soldadura por fusión que son ampliamente usados en nuestros días, considerando la estructura primaria, estructura secundaria y algunos defectos, para finalizar mencionando el concepto de carbono equivalente y su uso en soldadura.

En la última edición de la AWS* sobre términos y definiciones de soldadura, se define soldadura como una coalescencia localizada de metales o no metales, que se produce por calentamiento del material, hasta temperaturas adecuadas, con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso del metal de aporte. El metal de aporte tiene el punto de fusión aproximadamente igual o menor al del metal base pero superior a 4270 C.

En esta definición es de vital importancia el término coalescer que significa crecer juntos en un solo cuerpo.

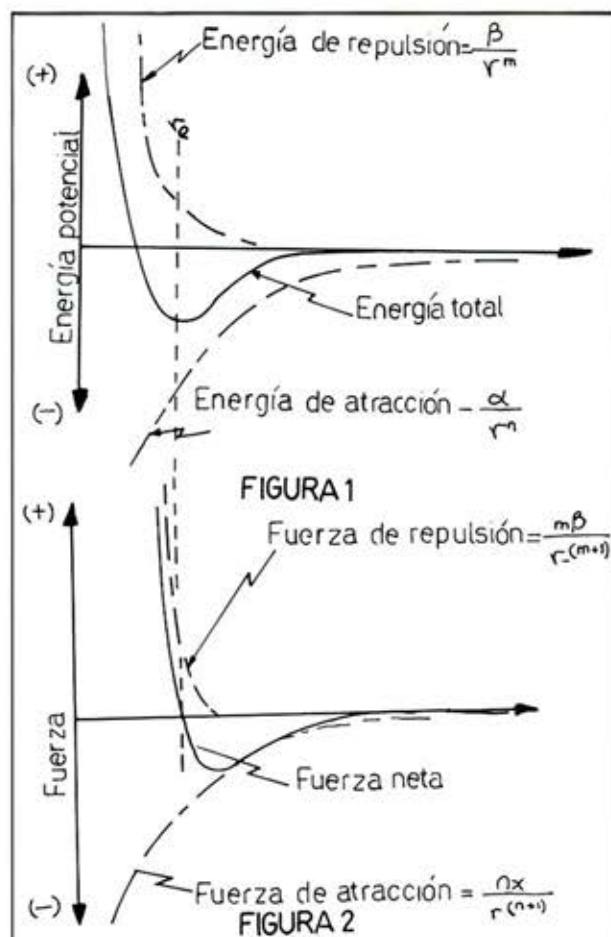
Bien sabemos que los metales en estado sólido son cristalinos, formados por un conjunto de granos que tienen diferentes formas y tamaños en función de la historia previa del metal. Estos granos poseen una estructura cristalina, donde los átomos están ordenados en un arreglo tridimensional. Las fuerzas actuantes sobre un par de átomos en un metal cristalino son función de la distancia interatómica como se puede apreciar en las figuras 1 y 2. Estas fuerzas atractivas y repulsivas entre los átomos logran un equilibrio para una distancia interatómica determinada r_e que corresponde a la posición de mínima energía potencial. Puesto que la fuerza entre átomos es proporcional a la derivada de la energía potencial con respecto a la distancia, entonces la fuerza será nula a la distancia mencionada anteriormente.

Mediante este modelo simplificado, podemos visualizar las fuerzas que mantienen los átomos en equilibrio en un cristal. Si consideramos dos cuerpos sólidos ideales, consistentes en planos atómicos espaciados regularmente y si se procede gradualmente a aproximar las superficies libres de los dos cuerpos considerados, llegará un instante en que cada átomo de dichas superficies experimentará una fuerza de atracción generada por la presencia de los átomos de la superficie del cristal vecino. Esta fuerza actuando cooperativamente sobre todos los átomos superficia-

* AWS = American Welding Society.



M. Sc.
VICTOR OSORIO L.



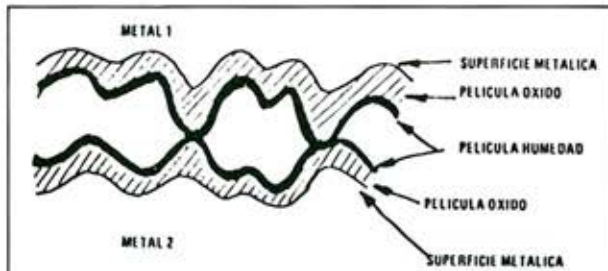


Figura 3. Metales en contacto ligero.

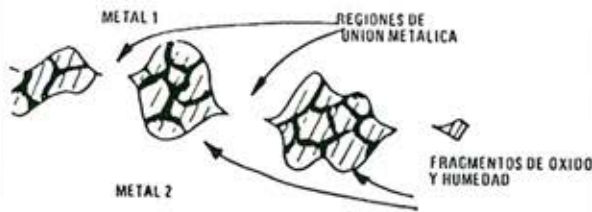


Figura 4. Metales en contacto con una gran fuerza aplicada.

Desafortunadamente, las superficies metálicas reales no pueden ser preparadas de manera tal que sus superficies sean perfectamente lisas a escala atómica, lo que significa que no podemos llegar con los átomos superficiales de los dos metales a esta distancia de equilibrio; para complicar aún más el panorama una capa de óxido continuo u otras películas superficiales que se encuentran en toda superficie metálica expuesta a un ambiente normal, dificultan esta unión. Además, moléculas de agua o gases provenientes de la atmósfera tienden a ser absorbidos sobre la superficie para crear una capa adicional, como se muestra en la figura 3, que es una ampliación de dos superficies reales en contacto.

Si a estos dos cuerpos se les aplica una fuerza, las irregularidades superficiales se pueden eliminar por un flujo plástico de las irregularidades sobresalientes, de esta manera se fragmenta la capa intermedia no metálica formada por óxidos frágiles, apareciendo regiones donde el contacto metal-metal es efectivo,

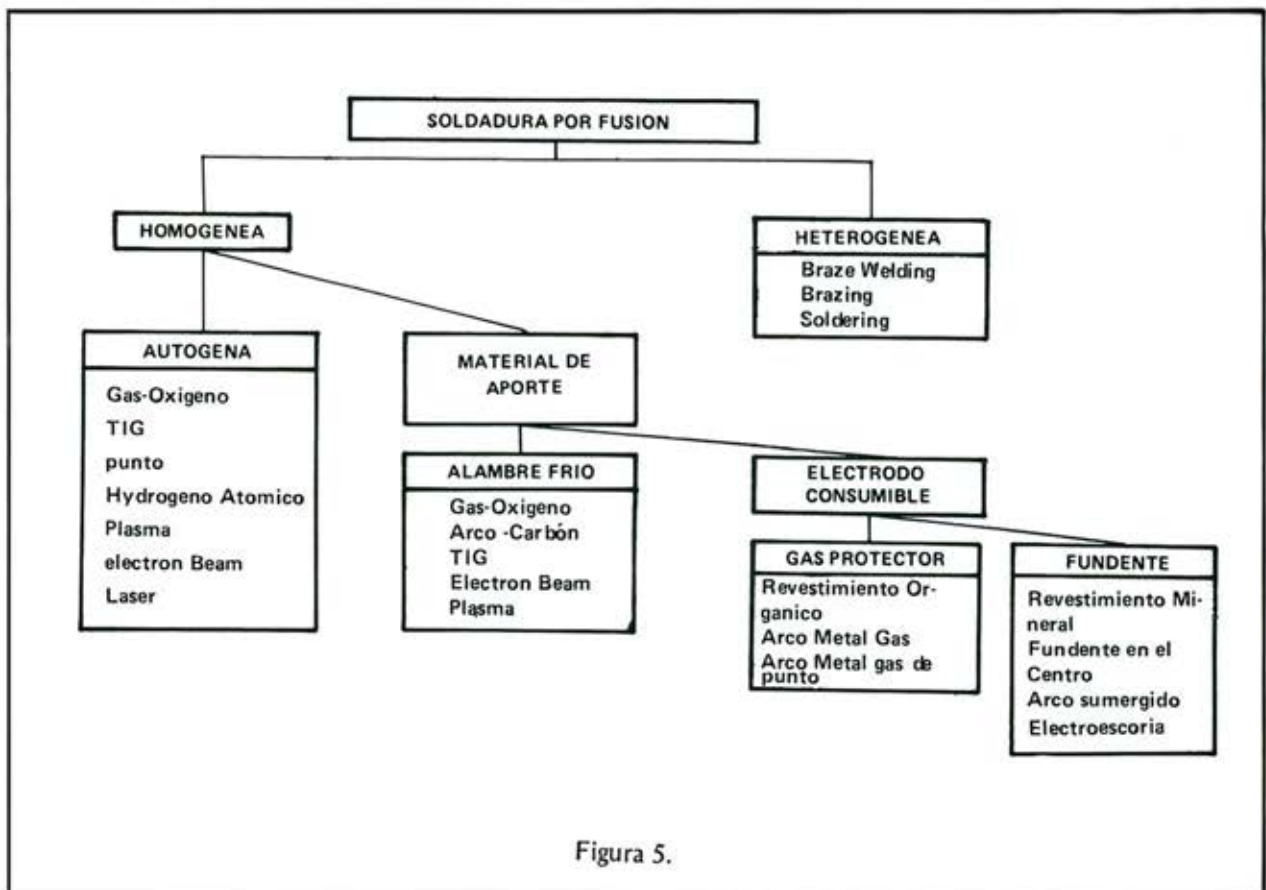


Figura 5.

les tenderá a ubicar a éstos de modo tal que sus distancias correspondan al valor de equilibrio r_e ; cumpliéndose esta condición los metales habrán perdido su identidad para convertirse en un cuerpo único y de esta manera se ha creado una soldadura ideal con perfecta coalescencia.

como se puede apreciar en la figura 4 pero existirán pequeños volúmenes de óxido que no fueron eliminados.

Al descargarse estas superficies, se recuperan las fuerzas elásticas actuantes tanto en los óxidos como en el metal, que tratarán de romper las pequeñas

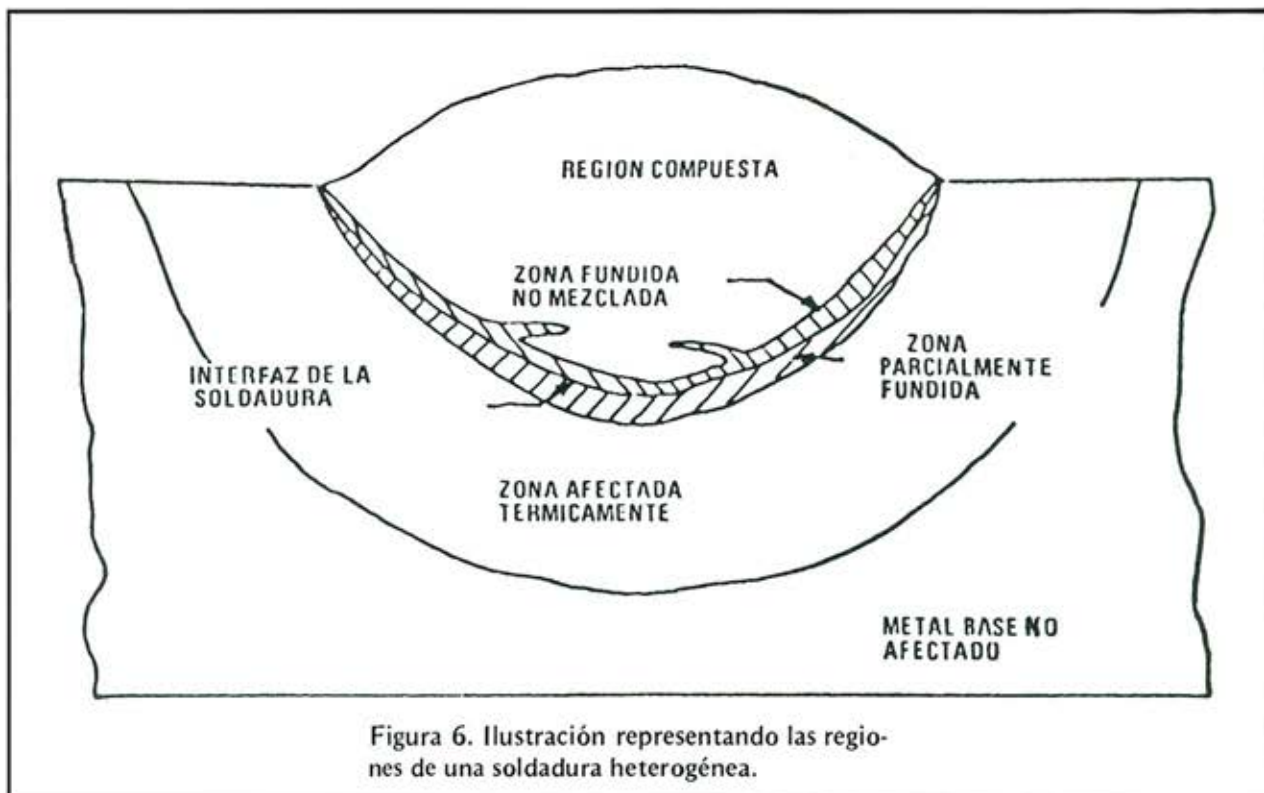


Figura 6. Ilustración representando las regiones de una soldadura heterogénea.

zonas donde se logró una unión efectiva.

De lo anterior se puede concluir que lo importante para producir una perfecta coalescencia es que se remuevan o dispersen las películas no metálicas de las áreas a soldar y que la distancia que separa a los átomos metálicos de las superficies, se aproximen al valor del espaciado atómico de equilibrio del metal, produciendo una unión metálica.

Basado en lo anterior, podemos decir que desde el punto de vista metalúrgico, tenemos dos mecanismos que nos pueden producir una unión metálica; el primero es unión en estado sólido, que requiere de fuerzas externas para lograr la coalescencia (normalmente en los procesos comerciales, las fuerzas externas son suplementadas con aplicación de calor), y el segundo, es fusión y solidificación epitaxial. En este caso, un metal fundido es mantenido en contacto con un metal sólido durante un tiempo adecuado para fundir parcialmente la superficie del metal base y luego solidificar. Lo importante es que el metal líquido al fundir la capa superficial, que corresponde al film no metálico, éste se disperse a través del volumen por difusión y se obtiene una nucleación epitaxial debido a que los granos semifundidos de las paredes se comportan como un sustrato nucleante. Con esta nucleación epitaxial, tanto la orientación cristalina como el espaciado interatómico, son continuos a través de la interfaz sólido-líquido.

Podemos clasificar los procesos de soldadura de acuerdo al mecanismo que nos produce la coalescencia en: soldadura por presión y las soldaduras por

fusión, centrando en esta última nuestra atención.

La soldadura por fusión implica fusión y solidificación epitaxial y ninguna fuerza aplicada juega un papel activo en producir la coalescencia. En la figura 5 se muestran las subdivisiones de la soldadura por fusión.

La soldadura por fusión homogénea se caracteriza por tener composición química y propiedades mecánicas similares al metal base, y se puede clasificar en: autógenas, en cuyo caso los metales base se funden para solidificar juntos, y con material de aporte en el cual tenemos una adición de metal externo llamado metal de aporte.

Las distintas zonas que se forman en la soldadura por fusión heterogénea se muestran en la figura 6.

Las estructuras resultantes, producto del enfriamiento en los procesos de soldadura son: la estructura primaria, que resulta de la solidificación y la estructura secundaria, producto de las transformaciones de fase en estado sólido.

El inicio de toda solidificación exige la formación de embriones, que en condiciones termodinámicamente favorables, forman los núcleos que comienzan a crecer. Es sabido que en la mayoría de los procesos, la solidificación es heterogénea, originándose en algunos sustratos presentes en el líquido que ha de solidificar. En general, cuanto mejor es el mojado del líquido en el sustrato, más efectivo será el nucleante. En el caso específico de la soldadura, este mojado es perfecto puesto que el sustrato es provisto por la fusión parcial de los granos de metal base a partir de

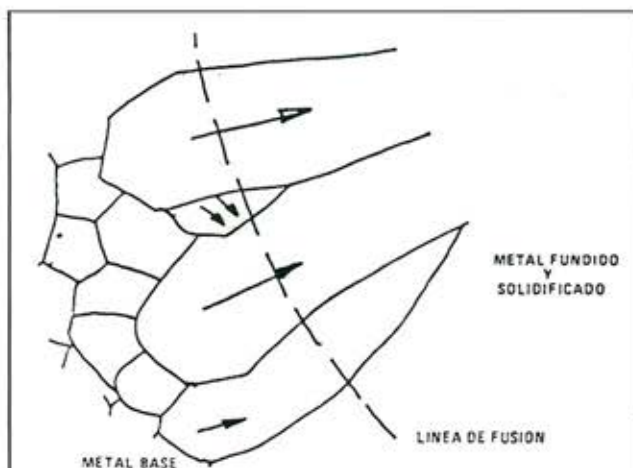


Figura 7. Crecimiento epitaxial.

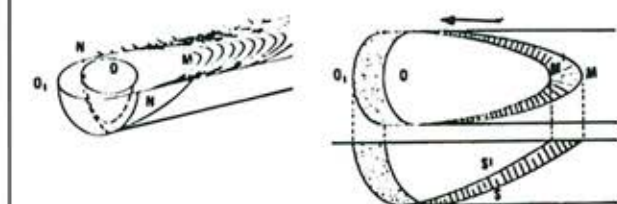


Figura 8. Forma de la pileta líquida.

los cuales se produce la solidificación del metal líquido. Este crecimiento se realiza con la misma orientación cristalina que los granos de metal base parcialmente fundido y recibe el nombre de crecimiento epitaxial competitivo, que es mostrado en la figura 7; este fenómeno es común en todos los procesos de soldadura por fusión.

Durante el crecimiento de estos granos de origen epitaxial, se produce una selección de los diferentes granos, sobreviviendo unos a expensas de otros. Este crecimiento competitivo es debido a que cada cristal o grano posee direcciones preferenciales de crecimiento y aquellos mejor orientados, tendrán un crecimiento mayor. Este crecimiento, además, depende de la extracción calórica, que para un material determinado, está relacionada con la velocidad con que se mueve el arco, lo que origina las distintas formas de pileta.

La pileta líquida está constituida por una fracción de metal líquido, en una fracción de tiempo, en el curso de ejecución de la soldadura, como se muestra en la figura 8. Las más usadas son las soldaduras realizadas con desplazamiento de una fuente de calor, donde el baño adquiere rápidamente una forma dimensional estacionaria, mientras el movimiento sea uniforme. La geometría de la pileta es importante porque condiciona la macroestructura resultante y las tensiones residuales, producto estas últimas, del cambio de volumen por concentración líquido-sólido

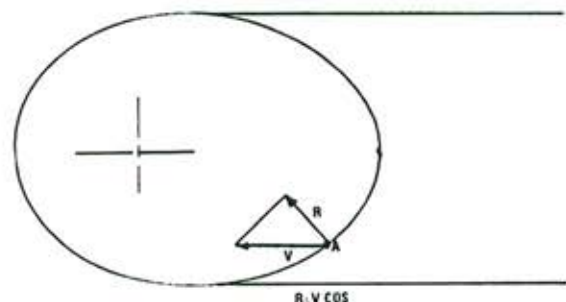


Figura 9. Pileta líquida.

más la contracción térmica, que es diferente en las distintas regiones alrededor de la pileta fundida.

El avance del arco, generándonos el metal líquido, causa el clásico ondeado superficial que nos dan una idea de la forma que tuvo la pileta líquida.

La velocidad de avance del cordón de soldadura, el calor aportado y las condiciones de enfriamiento nos determinan la forma de la pileta líquida, figura 9. Podemos encontrar dos tipos de formas que son características: la elíptica donde la velocidad de avance es lenta, figura 10, y la forma de gota que se caracteriza por una velocidad mayor, figura 11.

El otro factor que juega un papel importante en el tipo de solidificación resultante es el gradiente térmico. En la figura 12 se relaciona la concentración nominal de soluto, el gradiente térmico y la velocidad de solidificación con la estructura.

De éstas mostraremos las que normalmente encontramos en las soldaduras:

- Crecimiento celular mostrado en la figura, 13.
- Crecimiento celular dendrítico mostrado en la figura 14, y
- Crecimiento columnar dendrítico mostrado en la figura 15.

Producto del sobreenfriamiento constitucional imperante durante el crecimiento, podemos encontrar defectos estructurales tales como:

- Microsegregación que se produce en un frente celular o dendrítico que rechaza soluto a los límites de grano.
- Inclusiones no metálicas como son los óxidos de aluminio y silicio.
- Microporosidades, evolución de gases disueltos durante la solidificación.
- Macrosegrecaciones producto de una reyección de soluto de largo alcance.
- Bandeado: marcas correspondientes a la interfaz sólido-líquido y que nos da una imagen de la forma de la pileta líquida.

Estos defectos estructurales se pueden ver en la figura 16 que representa la estructura de un cordón solidificado.

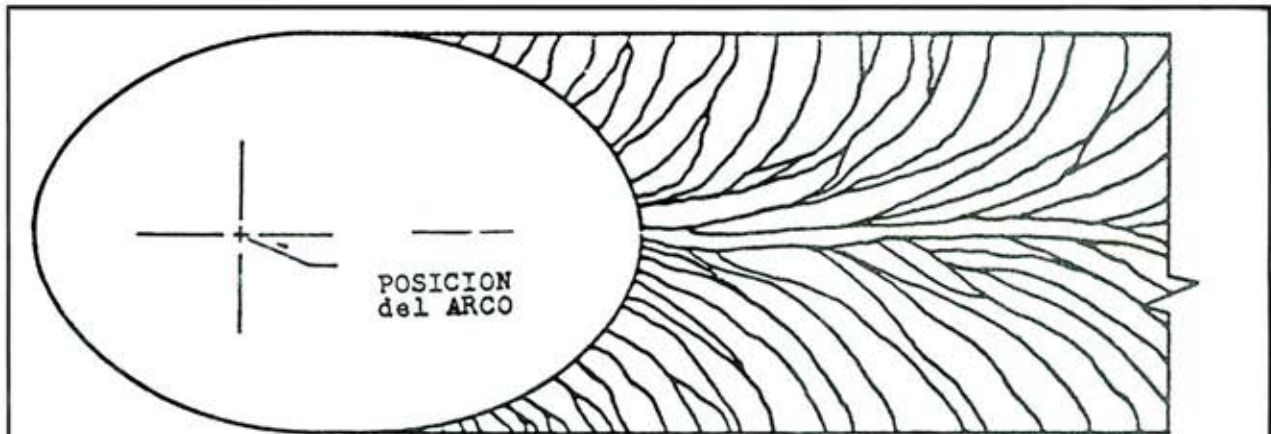


Figura 10. Piletta líquida de forma elíptica.

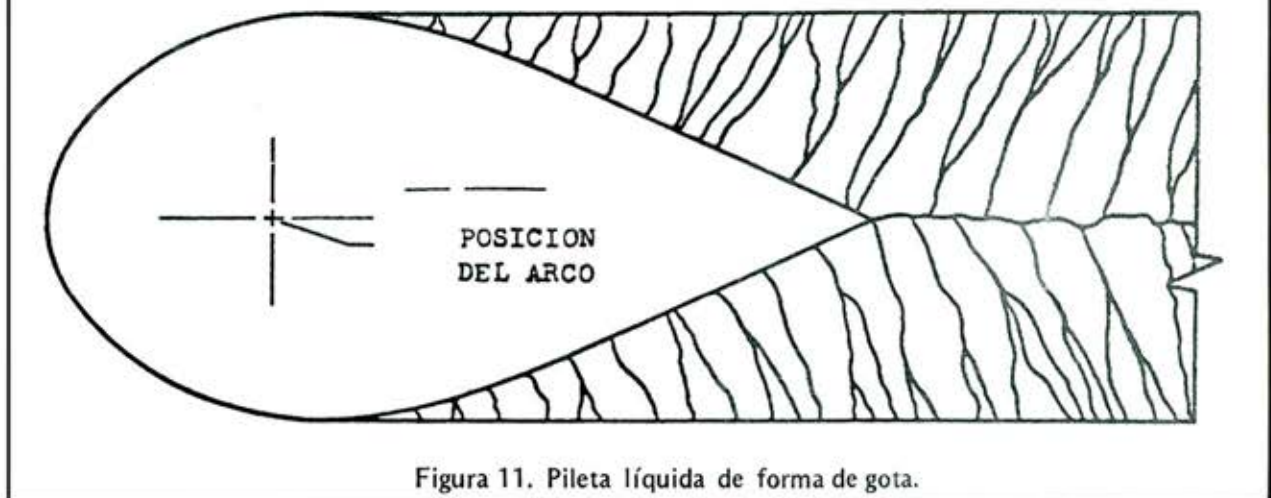


Figura 11. Piletta líquida de forma de gota.

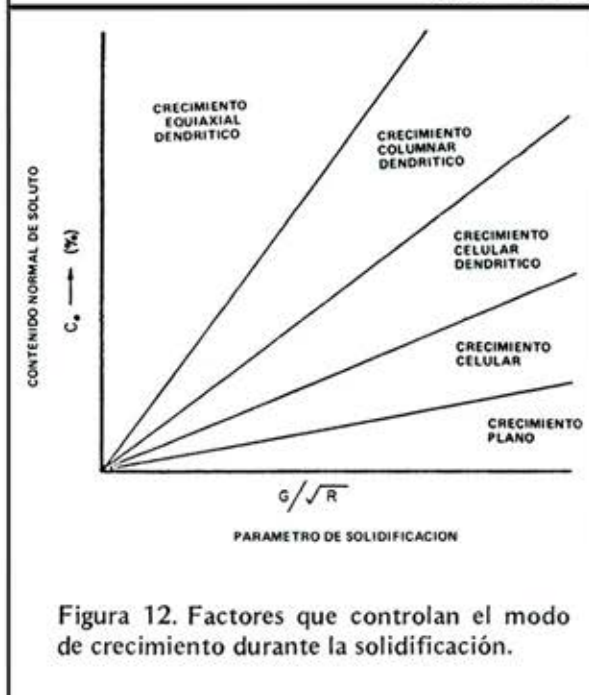


Figura 12. Factores que controlan el modo de crecimiento durante la solidificación.

ESTRUCTURA SECUNDARIA

Las estructuras secundarias son transformaciones de fase en estado sólido.

Según el diagrama de equilibrio hierro-carbono, figura 17, la estructura de solidificación corresponde a ferrita α o austenita γ , según sea el tenor de carbono y las condiciones de solidificación cuando la temperatura desciende, la estructura estable es la austenita.

Estando toda la estructura austenizada se pueden dar dos efectos:

- Homogenización del carbono por su alta difusividad en γ , y
- Migración de bordes de grano.

Desaparece en esta etapa la segregación de carbono originada durante la solidificación. Los otros elementos segregados durante la solidificación se conservan en su lugar y continúan dando una imagen del esqueleto dendrítico, esto es en la zona fundida.

La austenita es estable hasta la temperatura A_3 del

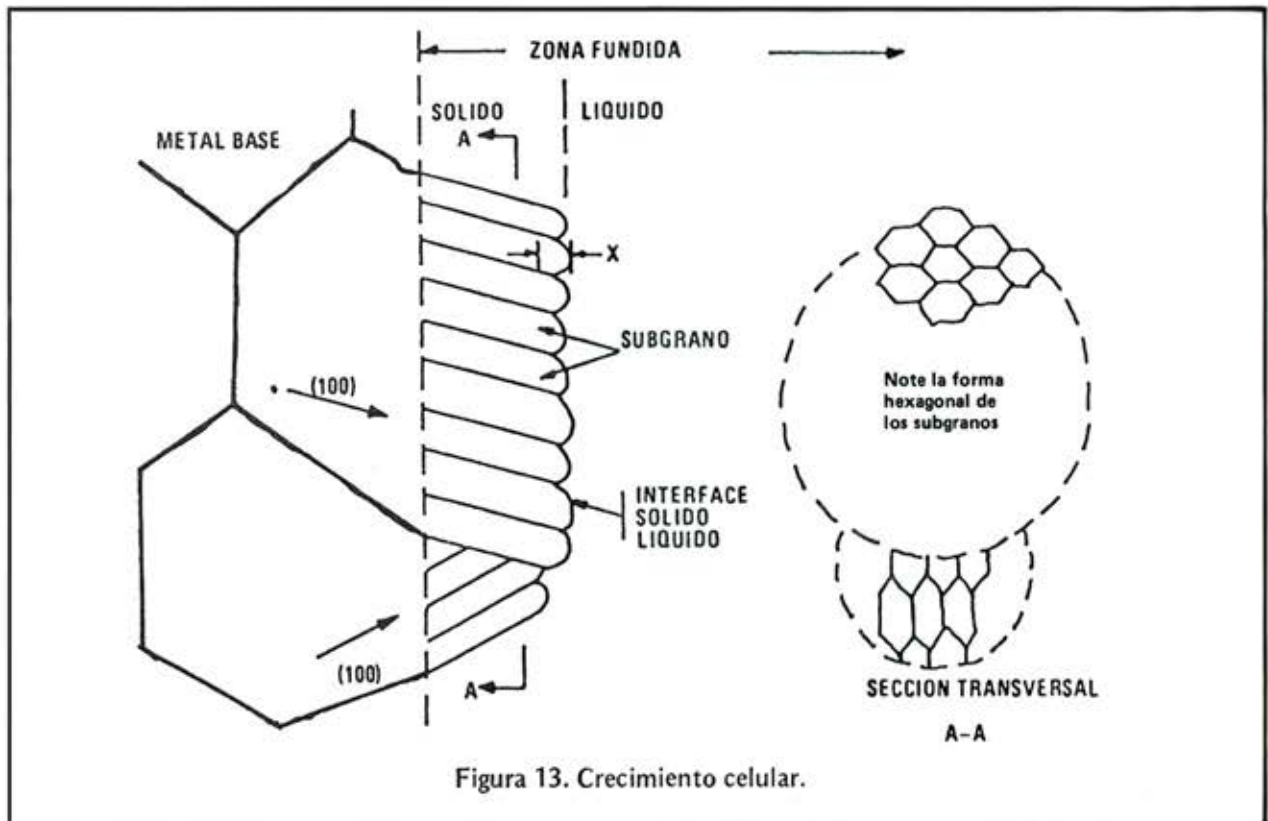


Figura 13. Crecimiento celular.

diagrama de equilibrio donde comienza la descomposición de la austenita en fases que dependerán de la velocidad de enfriamiento. Importancia relevante en la explicación de las microestructuras finales tienen los ciclos térmicos que se producen en el proceso de soldadura.

La velocidad de enfriamiento tiene un efecto significativo en las transformaciones, es así como la austenita que contiene carbono suficiente, se descompone con velocidades de enfriamiento lenta o bajo condiciones de equilibrio a perlita. La transformación a perlita requiere una gran difusión de los átomos con un arreglo en la ferrita y Fe_3C .

Si se aumenta la velocidad de enfriamiento del acero austenítico hay cambios marcados en la transformación:

1.— Las transformaciones ocurren a temperaturas menores.

2.— La microestructura resultante es cambiada drásticamente y la dureza y resistencia a la tracción del acero crece con una baja en la ductilidad.

Los elementos que nos dan una predicción razonable de la microestructura final son los diagramas de enfriamiento continuo como el que se muestra en la figura 18. Conviene recordar que la velocidad de enfriamiento en la zona calentada más lejos del intervalo crítico en el proceso de soldadura, puede ser lo suficientemente rápido para mantener la austenita en equilibrio inestable bajo $600^{\circ}C$ y formar la martensita.

Expresado en términos metalúrgicos significa que la velocidad de enfriamiento en la zona afectada por el calor, puede ser superior a la velocidad crítica de temple martensítico Z , del acero.

Si el aporte de calor en el curso de la soldadura es débil y el enfriamiento tiene lugar con una velocidad más rápida que la velocidad de enfriamiento Z , la zona afectada por el calor será totalmente martensítica y su dureza sobrepasará los 450 HV. Si el enfriamiento se produce a una velocidad intermedia entre la curva de enfriamiento Z y la curva de enfriamiento F , tendrá lugar la transformación de la austenita en una estructura intermedia bainítica, y

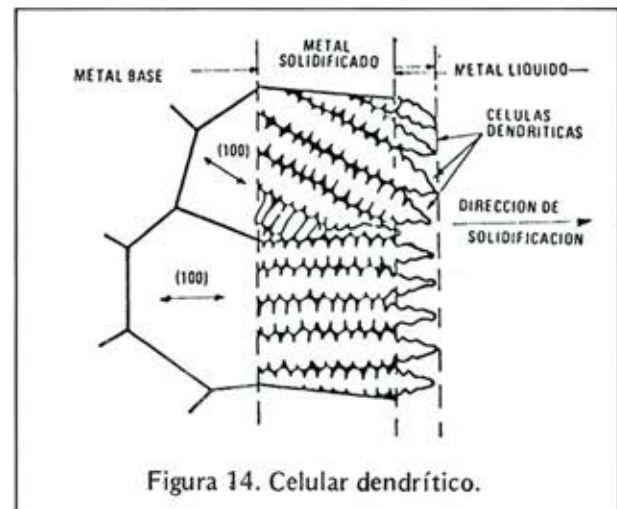


Figura 14. Celular dendrítico.

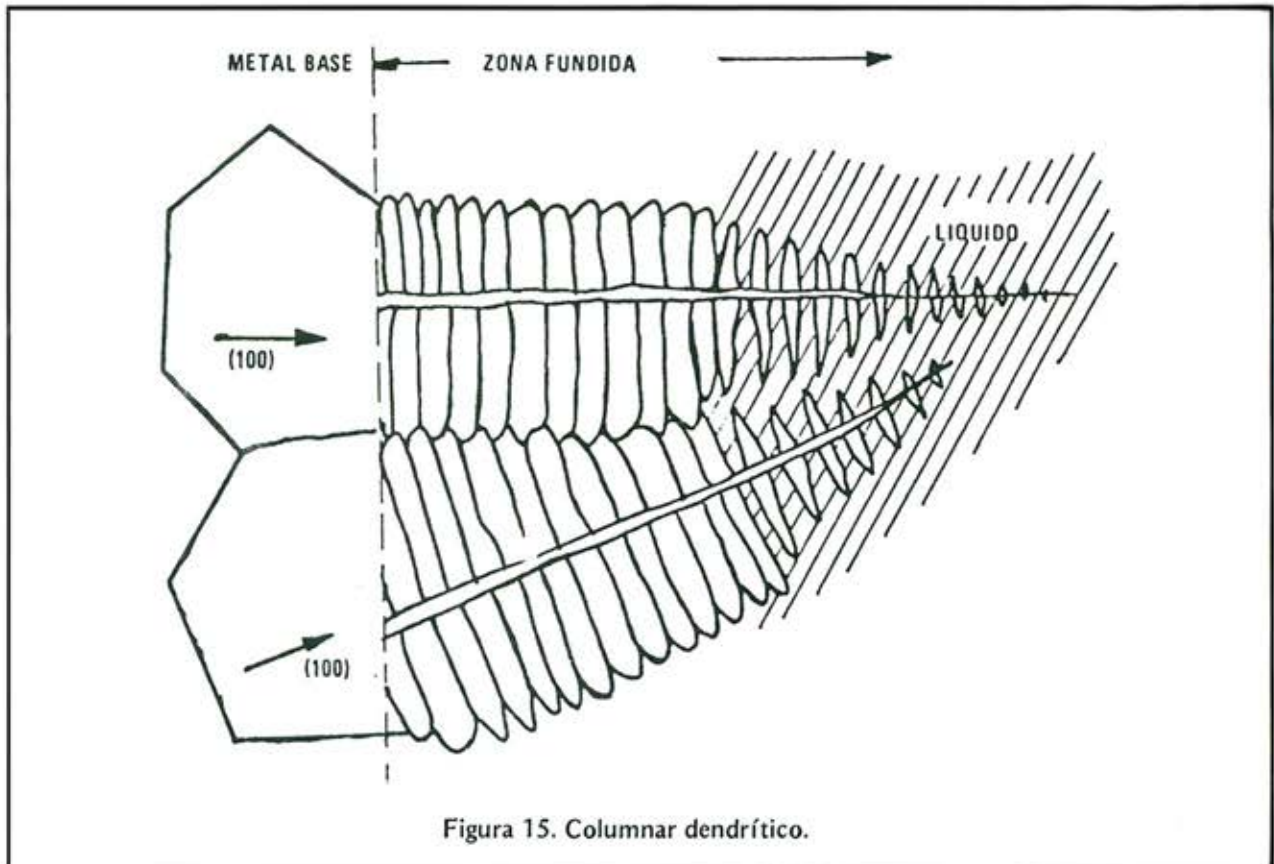


Figura 15. Columnar dendrítico.

esta zona afectada por el calor tendrá como estructura final una mezcla de martensita y bainita. La dureza de esta zona será inferior a 415 HV. En el otro extremo, una disminución de la velocidad de enfriamiento representado por la línea E permite que la zona afectada por el calor (ZAC) se transforme enteramente en ferrita y perlita. Se ha comprobado que en la ZAC existen regiones que se enfrían a una velocidad suficientemente lenta para producir por lo menos una parte de la transformación de la austenita en ferrita pro-eutectoide, que presenta un grado razonable de ductilidad y tenacidad. Otro elemento que nos permite predecir las estructuras metalúrgicas con menos exactitud, son las curvas TTT isotérmicas.

La ZAC es la porción de metal base que no ha sido fundida, pero sus propiedades mecánicas o microestructuras han sido alteradas por el calor del proceso de soldadura.

Esta zona, íntimamente relacionada con los ciclos térmicos del proceso de soldadura, tiene particular importancia en relación a las propiedades de la unión soldada. Esta zona incluye al metal base que ha sido calentado a temperaturas cercanas a 2.400° F, que es justo la temperatura bajo la cual el metal empieza a fundirse. La mayor parte de esta zona ha sido calentada sobre la temperatura A_1 y parcial o totalmente transformada a austenita como se indica en la figura 19 que nos muestra la temperatura

máxima, en varios puntos de la zona afectada térmicamente en la soldadura de un acero con 0.3% de carbono. Lo que se obtiene es lo siguiente:

Punto 1: ha sido calentado sobre 2.400° F. La austenita formada es de grano grosero porque los granos crecen a esta temperatura.

Punto 2: ha sido calentado a 1.800° F y totalmente austenizado. No crece el grano, puede refinarse.

Punto 3: ha sido calentada justo sobre A_3 que no es suficientemente alta para homogenizar la austenita.

Punto 4: esta área ha sido calentada a aproximadamente 1.400° F, que está entre A_1 y A_3 . Parte de la estructura se ha convertido en austenita.

Punto 5: este punto ha sido calentado hasta 1.200° F, que está bajo A_1 y no se formó austenita.

Zona fundida no mezclada es la región que corresponde al metal base fundido, perteneciente a la capa laminar que no llegó a mezclarse con el baño metálico, formado por los metales de aporte y base.

La figura 20 esquematiza la presencia de esta zona fundida no mezclada. El avance del baño de presión provoca una erosión en el metal base que origina zonas fundidas no mezcladas tal como se observa en la figura 21. En el curso de este proceso, el metal base fundido se desliza dentro de la capa límite siguiendo la forma del frente de solidificación.

Zona parcialmente fundida puede ser considerada parte de la ZAC y es una porción de metal

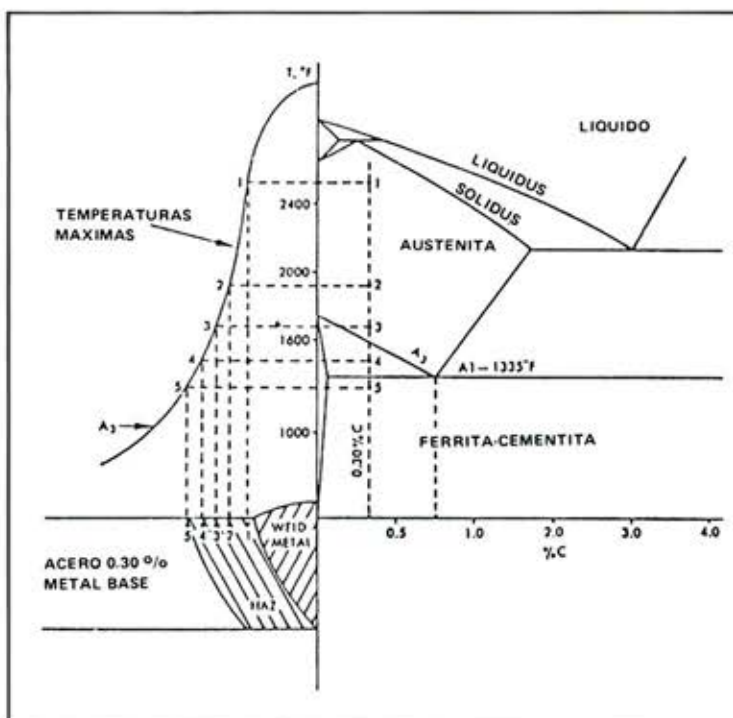


Figura 19. Relación entre temperaturas máximas experimentadas en varias regiones de la soldadura y el diagrama de fase hierro-carbono.

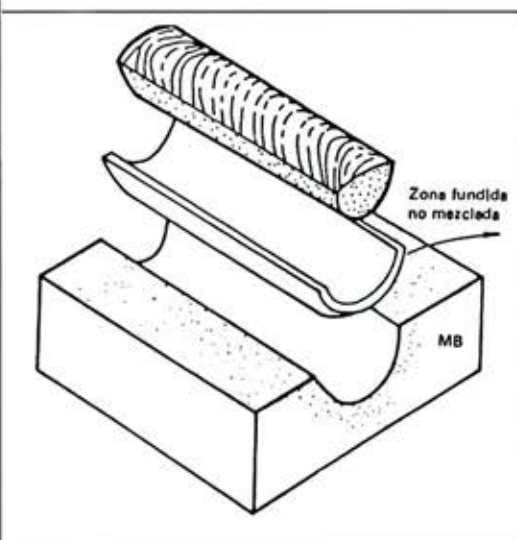


Figura 20. Zona fundida no mezclada.

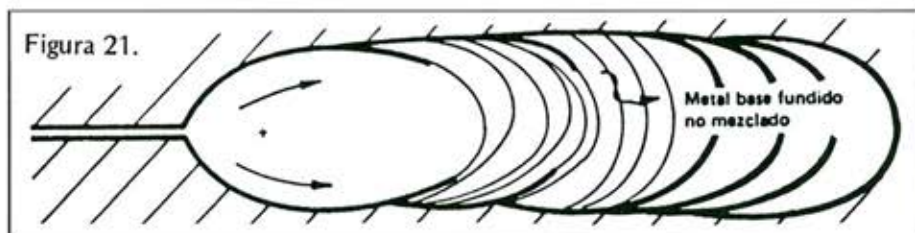


Figura 21.

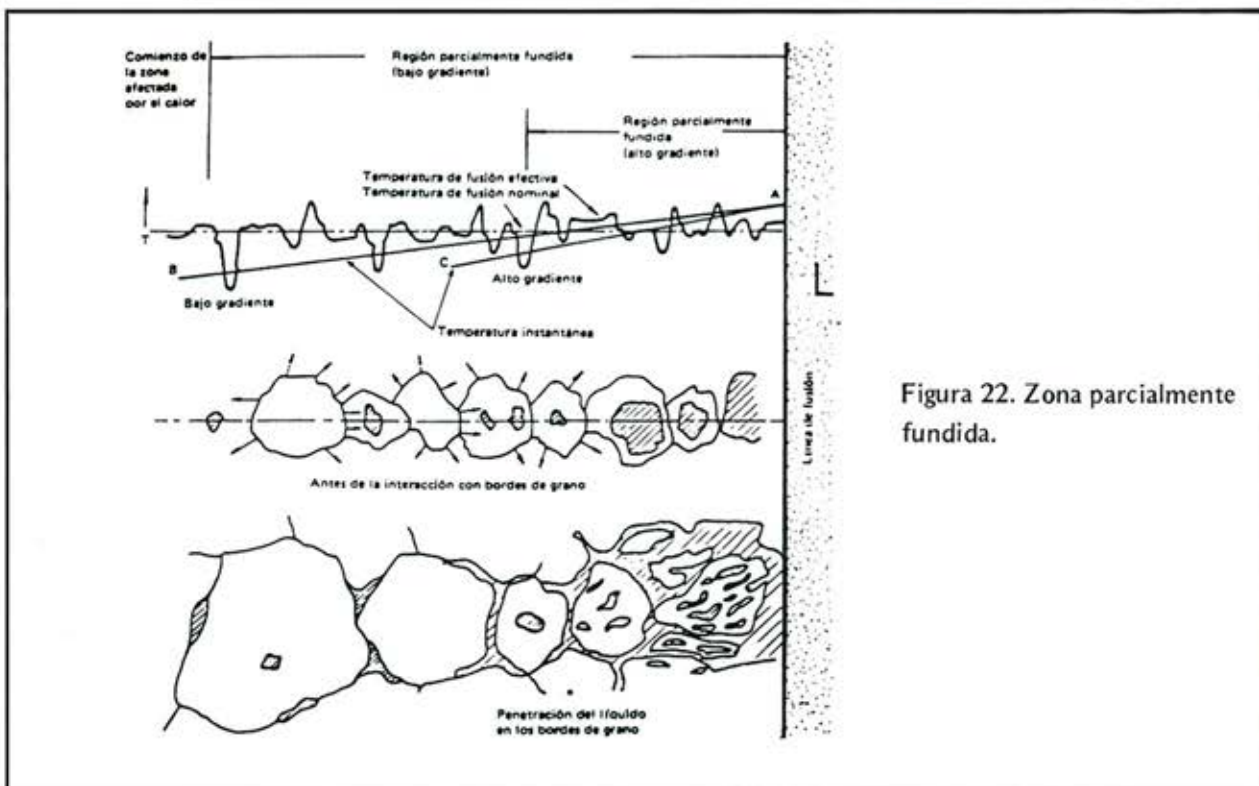


Figura 22. Zona parcialmente fundida.

Historia de la producción del oro en el mundo



Sr. MANUEL FELIU J.
Ex-Presidente Sociedad Nacional
de Minería (F.G.)

Desde la antigüedad, el oro ha sido apreciado como adorno, como forma concentrada de riqueza y para el uso en monedas. El afán que siempre ha tenido el hombre por este metal lo ha conducido al trueque, a la invasión y conquista, a la colonización y a la exploración de varias regiones y continentes. En la Mitología se destaca ya la primera "fiebre del oro", dirigida por Jasón tras el "vellocino de oro". El hombre ha recorrido el mundo entero en su busca, explorando lejanos lugares de la tierra, sufriendo muchas veces penalidades y privaciones casi increíbles.

El oro, que hasta hace pocos años fue solamente un elemento decorativo o monetario, es el metal que ha causado mayores horrores y miserias provocados por su conquista y posesión, pero a su vez también ha traído mucho bien a la humanidad, especialmente por todas las transformaciones que su descubrimiento ha causado; como la creación de nuevas comunidades, la aparición de la agricultura y la industria, etc. Se puede decir que en muchas tierras remotas ha sido el precursor de la civilización.

Hasta el descubrimiento de América en 1492 la producción mundial de oro tenía un ritmo de lenta progresión y sólo a partir del año 1500, en América del Sur, con Méjico, Perú y Chile a la cabeza, se inicia una producción masiva de este metal que, como un verdadero río amarillo va a enriquecer algunas capitales de Europa.

Durante los tres siglos que siguieron, la única fuente productora en volúmenes no imaginados anteriormente, fue esa región del Nuevo Mundo.

Recién, en el siglo XIX, se hacen importantes descubrimientos en los Estados Unidos (Carolina del Norte en 1801, Georgia en 1829, California en 1848 y Alaska en 1896), que incorporaron a esa nación al grupo de los productores más importantes de oro y ya a comienzos de la segunda mitad del siglo llega a ocupar el primer lugar.

Otras regiones del mundo se incorporan durante ese siglo a ese grupo de grandes productores; son Australia en 1852 y Sudáfrica en 1896.

Se estima que durante ese siglo se produjo el doble del oro que la humanidad entera había producido anteriormente.

Durante el presente siglo se han incorporado

muchas nuevas naciones al "Club del Oro", pero sólo Canadá y Rusia han alcanzado un nivel de importancia. Recientemente Brasil se encuentra en una etapa de fuerte crecimiento en el descubrimiento de los placeres en Pará, Amazonas, Rodohia, etc.

PRODUCCION HISTORICA

Por razones obvias no existen informaciones muy confiables sobre la producción de oro con anterioridad al siglo XVI, pero estudios estimativos permiten llegar a una cifra que parece ser más o menos representativa.

Período	Toneladas oro	
	Parcial	Acumulado
Antes del año 1500	5.000	5.000
Siglo XVI	500	5.500
Siglo XVII	700	6.200
Siglo XVIII	1.500	7.700
Siglo XIX	11.670	19.370
Siglo XX (hasta 1983)	77.390	96.760

Puede decirse entonces que el hombre ha producido hasta cerca del fin del siglo XX casi cien toneladas de este metal.

Si se quisiera representar en forma física toda la producción de oro hasta 1983, fundiéndola y formando un cubo, esta figura tendría un volumen aproximado de 5.013 metros cúbicos y su arista sería de 17,1 metros aproximadamente.

Otra forma de comparar el total de lo producido es

relacionarlo con la deuda externa de Latinoamérica. Aunque esta comparación resulta desalentadora.

Esta deuda externa es actualmente del orden de 370 mil millones de dólares, en diciembre de 1984. Si se considera el valor de la onza de oro de US\$ 336, el gramo resulta a US\$ 10,80. En consecuencia, la deuda representa el valor de 34.260 toneladas de oro, lo cual corresponde a algo más de un tercio de todo el metal producido en el mundo por el hombre hasta la fecha.

chatarra nueva casi en su totalidad no necesita ser refinada.

Resulta así que la cantidad de oro que se procesa para la fabricación de todos los elementos que lo contienen es siempre notablemente mayor que el que se produce como "nuevo", o sea el proveniente de minas y placeres.

Tomando el caso particular de Estados Unidos, en el año 1982 el oro de que se dispuso para diferentes

Principales países productores

	1982 Toneladas	1984 (estimada)	Costos por onza US\$
República de Sudáfrica	664,2	678,0	232,50 (105 a 595)
Rusia	264,4	300,0	?
Canadá	62,5	70,0	250 a 275
China (Continental)	56,0	40,0	?
U.S.A.	45,0	62,0	250 a 275
Brasil	44,9	55,00	?
57 países	191,5	185,0	?
TOTAL	1.328,5	1.390,0	

Chile ocupa el 10º lugar con 17,0 toneladas anuales. En 1983 la producción chilena fue de 17,8 toneladas.

RECICLAJE Y USOS DEL ORO

Reciclaje del Oro. Antes de hablar del consumo del oro es necesario mencionar el reciclaje de este metal.

Resulta evidente que las 96 mil toneladas en que se ha estimado la producción en el mundo no se encuentra actualmente su totalidad en calidad de tal ni tampoco en manos de los hombres. Una parte ha sido extraviada en los océanos, otra se encuentra enterrada en lugares desconocidos y una parte menor ha sido transformada en productos químicos (sales y otros compuestos). En todo caso, existe todavía una parte importante de esa producción en poder de países, empresas y personas en calidad de oro atesorado. (Cuadro 1).

Otra parte importante está en forma de joyas y obras de arte.

Partes menores se encuentran en diferentes otras formas. El reciclaje o reúso del oro se origina en dos fuentes: los recortes y sobrantes en la fabricación de joyas y partes industriales y la fundición de joyas, monedas y otros elementos o aleaciones que lo contienen.

El oro proveniente de la primera fuente se denomina "chatarra nueva" y el segundo se llama "chatarra vieja".

Toda la chatarra vieja que se recicla es generalmente refinada antes de su reúso. En cambio, la

usos fue el siguiente:

Oro nuevo (de minas y placeres)	22,3 Tons.
Chatarra vieja	44,2 "
Chatarra nueva	49,6 "
TOTAL	116,1 Tons.

No se ha considerado el que el Gobierno destinó a lingotes monetarios para incrementar sus reservas y fabricar monedas. Este oro nuevo alcanzó a cerca de 23 toneladas.

Usos. Dejando al margen el oro que se destina a lingotes monetarios, medallas conmemorativas, etc., su empleo (oro nuevo y chatarra) puede clasificarse en tres grandes grupos:

- Joyería y obras de arte
- Industria (electrónica, química, etc.)
- Dental

Tomando nuevamente como ejemplo el caso de Estados Unidos, se tiene para el año 1982:

Joyería y obras de arte	62,1 Tons.	57,9%
Industria	33,7 Tons.	31,4%
Dental	11,1 Tons.	10,4%
Investigación	0,3 Tons.	0,3%
	107,2 Tons.	100,0%

En otros países industrializados varía la relación de los consumos, especialmente en algunos países europeos.

HISTORIA DEL ORO EN CHILE

Durante la dominación por los incas de la parte central-sur y norte de Chile, la explotación del oro de placeres fue bastante intensa y ella continuó durante el período de dominación española.

Hasta principios del siglo XX la mayor parte de éste provenía de placeres, pero en esa época comenzó la explotación de minerales para su amalgamación.

Se han publicado diferentes cifras para mostrar la producción desde el siglo XVI; a continuación se indican las más aceptadas:

	Total siglo	T ^o M ^o anual
Siglo XVI	72.000 Kgs.	720 Kgs.
Siglo XVII	35.000 "	350 "
Siglo XVIII	92.000 "	920 "
Siglo XIX	122.000 "	1.220 "
	321.000 "	T ^o M ^o 803 Kgs/año

Hasta el siglo XVIII es muy probable que la producción fuese mayor, pero el estanco que mantenía el Gobierno español originó, seguramente, un importante contrabando al exterior, por lo cual las cifras deberían ser mayores (algunos autores mencionan un promedio anual de 1.800 kgs.).

Durante la segunda mitad del siglo XIX la producción debió ser mayor, pero el rápido auge que alcanzó la explotación de la plata absorbió la mayor parte de la mano de obra minera.

En el presente siglo, la producción durante los primeros 30 años se mantuvo en un nivel similar al de fines del siglo anterior, pues las salitreras absorbían la

mayor parte de la gente disponible. Como consecuencia de la gran crisis mundial que se iniciara en 1929 se produjo la paralización casi total de la industria salitrera, originando una fuerte cesantía en el país.

Con el objeto de paliar en gran parte este problema, el Gobierno de la época devaluó fuertemente la moneda nacional. El dólar estaba en 1931 a \$ 8,27, en 1932 se llevó a \$ 14,19 y a fines de ese año, el dólar libre se fijó prácticamente en \$ 25.

El 25 de julio de 1932 se dictó el decreto ley N° 280 que creó el cargo de "Jefe de Lavaderos de Oro", el que se complementó por el N° 550 del 6 de septiembre del mismo año, con lo cual se dio origen, en definitiva, a la llamada "Jefatura de Lavaderos de Oro".

Esta institución organizó un sistema para la explotación de oro en los innumerables placeres que existían a lo largo de todo el país.

Los resultados que se obtuvieron fueron exitosos, pues la absorción de cesantes fue importantísima, llegándose a tener en trabajo a más de 45.000 operarios.

Durante los diez años que la Jefatura de Lavaderos operó (dejó de actuar en octubre de 1942) se alcanzó una producción de oro fino total de cerca de 15 toneladas, con una ocupación media anual de 14.824 hombres.

El rendimiento medio fue de 0,31 gr de oro fino por hombre/día.

Antofagasta/Atacama	3,8%
Coquimbo	61,1%
Valparaíso/Biobío	5,1%
Malleco/Cautín	8,6%
Valdivia/Chiloé	9,5%
Magallanes	11,9%
	100,0%

Año	Meses	Produc. en gr. brutos	Oo. en trabajo	Rendimiento medio
1932	Sep./Dic.	265.539,00	29.240	0,092
1933	Ene./Dic.	1.932.267,70	31.437	0,205
1934	Ene./Dic.	2.233.819,90	22.844	0,326
1935	Ene./Dic.	1.833.860,97	19.275	0,317
1936	Ene./Dic.	1.657.303,56	16.532	0,334
1937	Ene./Dic.	2.007.960,69	11.287	0,593
1938	Ene./Dic.	2.510.073,35	11.519	0,726
1939	Ene./Dic.	2.004.725,72	8.962	0,746
1940	Ene./Dic.	1.323.205,70	8.375	0,527
1941	Ene./Dic.	708.996,38	6.717	0,352
1942	Ene./Oct.	317.360,75	3.380	0,376
		16.799.072,72	14.824	0,360

Los salarios medios anuales, en moneda de la época, comparados con los términos medios de otras actividades fue de \$ 9,63 diarios para lavaderos y \$ 14,56 para otras actividades, lo que representa el 66%.

Salarios, Valor nominal		Año
Lavador/día	Obr. Indust./día	
\$	\$	
1,97	4,97	1932
2,00	6,03	33
3,26	7,48	34
6,29	9,12	35
6,65	11,30	36
11,80	12,60	37
16,23	14,16	38
18,30	16,62	39
16,09	20,23	1940
11,20	24,98	41
12,24	32,67	42
T ^o M ^o 9,63	14,56	

Durante los 10 años que funcionó la Jefatura de Lavaderos se llevó un control estadístico bastante completo, pero actualmente sobrevive muy poca información. En todo caso es posible reconstruir la distribución de la producción por zonas (10 años).

Con la devaluación realizada en 1932 también se benefició el oro de minas, pero por su mayor tiempo para entrar a producirse sólo se notó un aumento importante a partir del año 1933 en que, sumado el oro de lavaderos, se llegó a 4.459 kilos de oro fino alcanzando su máximo en 1939 con un total de 7.243 kgs./fino.

Con el objeto de mejorar las condiciones de precio del oro, cuya producción estaba descendiendo, el 2 de diciembre de 1948 se dictó la Ley 9.270 llamada "Ley del Oro", la que inyectó nueva vitalidad a esa explotación. Esta ley se reglamentó por el Decreto N° 381, del 16 de marzo de 1950.

La Ley del Oro funcionó normalmente hasta 1954 y en 1955, prácticamente quedó inactiva.

A partir del año 1955 la minería netamente aurífera comenzó a decrecer hasta que el año 1966 llegó apenas a 76,1 kgs.

En el año 1967 comenzó el alza internacional del oro que había permanecido por más de 30 años en US\$ 35 la onza. Ya en el año 1975 había alcanzado la producción a 1.837 kgs. Se mantuvo en estas condiciones hasta 1980 en que comenzó a producir el yacimiento El Indio, hasta alcanzar en 1983 a 14.049 kgs. de los cuales 12.000 corresponden a ese mineral.

Hay que dejar constancia que durante estos últimos años, especialmente por falta de suficientes poderes compradores de ENAMI, por una parte, y por su sistema tarifario por otra, gran número de pequeños mineros amalgaman en trapiches su producción y venden a compradores privados el oro obtenido. Se puede estimar que esta producción no controlada debe llegar fácilmente a 3.000 kgs. finos anuales.

PROGRAMA PARA INCENTIVAR LA PRODUCCION DE ORO

Placeres auríferos. La Empresa Nacional de Minería ha comenzado este año a desarrollar un plan aurífero que contempla en su primera etapa el desarrollo de la producción de lavaderos de oro, orientado fundamentalmente a generar una fuente de trabajo que, por la experiencia del año 1932, se sabe que puede llegar a ser importante.

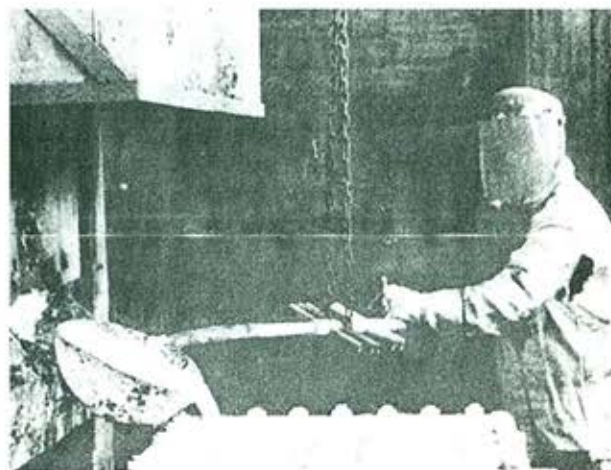
Las actividades las ha centrado desde la III Región al sur.

El sistema establecido se puede resumir como sigue:

- 1) ENAMI con el SERNAGEOMIN realizan las prospecciones de las zonas que pueden ser potencialmente aptas.
- 2) ENAMI constituye concesiones mineras en los sectores libres y de interés, y en los que ya están concedidos, convienen condiciones con los propietarios para su explotación.
- 3) La Empresa proporciona asesoría técnica y elementos de trabajo así como una ayuda económica para la sustentación en las etapas iniciales.
- 4) Mantiene control sobre los trabajos y la producción, pero el operario está en libertad de vender su producción al comprador que desee.

Los rendimientos promedios que se están obteniendo actualmente por hombre/día se aproximan bastante a los que se obtuvieron anteriormente.

Lo más interesante que se ha encontrado es la



existencia en la zona sur, especialmente de Valdivia hasta Tierra del Fuego, de placeres auríferos nuevos.

En la Zona de los Canales existen placeres que tienen acceso ahora por la Carretera Austral, y que presentan condiciones de explotación muy favorables.

También se han desarrollado trabajos exitosos en arenas de la playa en diferentes sectores.

Actualmente existe un promedio de 4.500 trabajadores dedicados a esta actividad y conforme avance el plan y se complemente con sistemas de apoyo mejorados, cabe esperar que se llegue a absorber una cantidad de trabajadores bastante superior a la actual.

Minería Artesanal y Pequeña Minería. Esta actividad necesita un fuerte impulso para alcanzar el nivel que le corresponde de acuerdo a las reservas potenciales existentes a lo largo del país, especialmente entre la I y V regiones.

Este tipo explotación aurífera para lograr un incremento importante debe recibir ayuda estatal en la forma que al Estado le corresponde cumplir el papel subsidiario. Especialmente porque esa actividad prácticamente no tiene acceso al crédito privado.

Los organismos estatales que actualmente deben cumplir con esa función: ENAMI y CORFO, además de la limitada disponibilidad financiera, especialmente la primera, establecen exigencias de garantías reales que muy raras veces pueden cumplir los mineros.

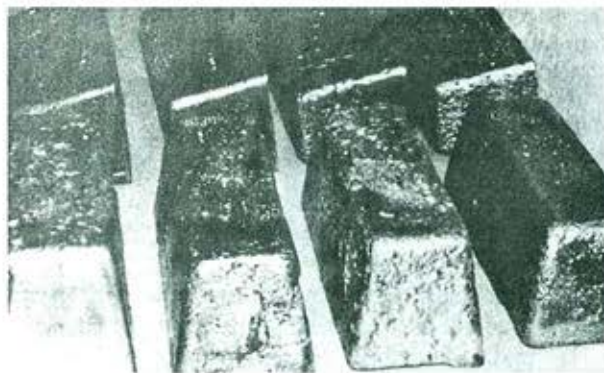
Por otra parte, los yacimientos, por lo general, no son aceptados como garantía, salvo en casos que presenten reservas totalmente cubiertas en la calidad de máxima seguridad (mineral medido o a la vista) y sólo como complemento de las garantías reales.

En consecuencia, los mineros de la categoría artesanal o pequeña minería no tienen posibilidad alguna de obtener apoyo financiero para desarrollar minas reconocidas y menos todavía para las etapas de reconocimiento y prospección.

Antiguamente los "cateadores" recibían apoyo de algunos pequeños y medianos comerciantes o capitalistas por medio del sistema de asociación temporal en el producto minero que se pudiera extraer. Este mecanismo legal ha existido en los diferentes códigos de minería, inclusive en el de reciente dictación, bajo el nombre de "Avío minero".

Desafortunadamente la aplicación de este sistema ha caído en el desuso y actualmente no se practica. Ahora que la Contraloría General de la República le ha reconocido a ENAMI la calidad de intermediario financiero, podría ser la oportunidad de orientar el sistema de créditos hacia el avío minero, lo cual haría más flexible el mecanismo y podrían tener acceso a él los mineros que, disponiendo de yacimientos de interés, no están en condiciones de trabajarlos.

Otro campo que puede abordarse con apoyo es el de beneficio o tratamiento de minerales auríferos por medio de la "cianuración en pila". Las experiencias que se han realizado en nuestro país, tanto en escala



de laboratorios como industrial, han permitido establecer que existen sectores en las regiones mineras que resultan aptos para la aplicación del proceso; pero que deben cumplirse ciertas condiciones fundamentales para que la operación, con desmontes o minerales frescos, puede alcanzar resultados exitosos:

- 1º Minerales con un alto porcentaje del oro en estado libre.
- 2º Ausencia casi total de cianicidas (cobre oxidado, fierro, etc.).
- 3º Mineral con cantidades de finos reducidas.
- 4º Mineral con buena permeabilidad.

Además es necesario que se cumplan otros tipos de condiciones:

- 1º Disponibilidad de agua.
- 2º Seguridad que no se puedan producir contaminaciones que atenten a la seguridad de las personas.
- 3º Control del sistema por personal técnico o de suficiente experiencia. Esto, prácticamente, deja fuera al minero artesanal.
- 4º Que exista una organización que no sólo supervise las faenas que apliquen el sistema, sino que permita al productor la recuperación del oro absorbido por el carbón.

No resulta recomendable el tratar por este método minerales de diferentes procedencias en faenas centrales, pues la experiencia ha demostrado que la heterogeneidad de los minerales afecta fuertemente a la recuperación y al consumo de cianuro.

En todo caso, para la instalación de una faena de cianuración en pila, el minero necesita un capital para instalación y de trabajo, con el cual, por lo general, no cuenta con apoyo crediticio.

Otro sistema que ha sido aplicado exitosamente por muchos años para el tratamiento de minerales es el de molienda en trapiches para amalgamación, cuando se trata de minerales de oro grueso, especialmente libre, o para flotación cuando el oro es muy fino o se encuentra incluido en piratas.

Se calcula que actualmente existen en el país alrededor de 350 trapiches trabajando y que es posible aumentar esa cantidad en un número importante.

Sobre estos dos sistemas de beneficio de minerales

auríferos y auríferos con sulfuros de cobre, la Sociedad Nacional de Minería está realizando un estudio de factibilidad técnico-económico que hará llegar próximamente al Supremo Gobierno.

Minería de Oro de Alta Cordillera. Estos yacimientos de alta cordillera tienen un origen geológico diferente a los minerales de oro explotados tradicionalmente y se caracterizan por su alto tonelaje y elevadas leyes de oro.

La producción del mineral El Indio en 1983 alcanzó a cerca de 12 toneladas de oro fino, además de la plata y cobre contenido, con un valor aproximado de US\$130.000.000 en oro, y US\$ 20.000.000 en plata y cobre.

Hasta la fecha se han detectado y están en etapa de reconocimiento una serie de otros yacimientos de características geológicas similares (La Coipa, Nevada, Sancarrón, El Tambo, Libra, Vacas, Heladas, Coipita, etc.). Estos yacimientos abarcan desde la alta cordillera de Copiapó hasta la cordillera frente a Ovalle. Por lo demás, no existen razones geológicas para que esta faja no se extienda tanto hacia el sur como hacia el norte.

En lo que a reservas mineras con diferentes grados de seguridad puede estimarse que actualmente alcanzan a varios cientos de toneladas de oro, lo cual puede convertir a Chile, a corto plazo, en un productor de oro que ocupe el tercer o cuarto lugar en el mundo.

Importancia social de la minería. En un país, especialmente como el nuestro, con un nivel de cesantía alto, las actividades productoras de exportación no sólo deben medirse por las divisas que producen, sino por el potencial laboral que originan.

A continuación se indican, en grandes promedios, la cantidad de hombres/días necesarios para producir US\$ 1 en las diferentes actividades mineras.

1. Lavaderos	0,3	hombres/día
2. Minería artesanal	0,1 a 0,15	"
3. Pequeña minería	0,03 a 0,07	"
4. Minería de oro de alta cordillera	0,004	"
5. Gran minería del cobre	0,006	"

Si se parte de la base que en las actividades 1 y 2 la remuneración del trabajador le permite la sustentación de él y los suyos, resulta evidente que desde el punto de vista social son las actividades que, juntos con exigir un apoyo mínimo, constituyen una fuente ocupacional de alto volumen.



Refractarios de carburo de Silicio



Dr. Ing. Nelson Santander M.

RESUMEN

Se analizan los problemas termodinámicos y cinéticos de la fabricación del carburo de silicio. Se estudian los diversos tipos de ligado de granos de SiC.

Para justificar el comportamiento químico de este material se propone un posible diagrama de fases Si-C a elevada temperatura, y se analiza la conducta química del SiC frente a diversos ambientes gaseosos, líquidos y sólidos.

Se representa un resumen de propiedades físicas y se hace una descripción de los usos de los refractarios de SiC con énfasis en siderurgia y hornos para cobre.

FABRICACION

El carburo de silicio, de fórmula SiC, conocido comúnmente por el nombre de la marca registrada "carborundum", es un compuesto refractario obtenido por primera vez en forma comercial en 1891 por el Dr. Edward Acheson, quien fue el fundador de la empresa norteamericana Carborundum Company.

Este compuesto pertenece a la familia de refractarios artificiales con la cual se fue abriendo una nueva era en la tecnología de los materiales refractarios.

La figura 1 muestra esquemáticamente el horno desarrollado por Acheson para la obtención de SiC comercial. Se trata de un largo equipo con geometría rectangular que se calienta mediante una resistencia interna de grafito. La carga sólida constituida de arena silicosa de alta pureza y coke rodea al electrodo reaccionando en la zona de alta temperatura para producir el SiC.

Un análisis químico típico de carburo de silicio comercial es el siguiente (en % en peso):

SiC	96,5 – 99,0
SiO ₂ libre	0,3 – 1,3
Si libre	0,2 – 1,0
C libre	0,2 – 1,0
Fe	0,1 – 0,3
Al	0,1 – 0,3
Ca + Mg	0,1

Los cristales obtenidos varían en coloración desde un verde pálido al negro. Los usos globales del SiC

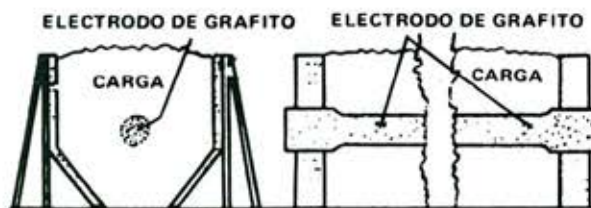
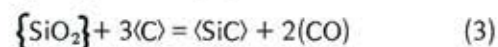
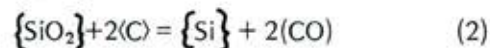
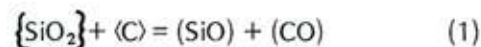


Figura 1: Esquema del horno tipo Acheson para fabricar SiC. son en forma aproximada: 40% como refractario, 30% como abrasivos y 30% en usos diversos.

La transformación de la sílice en carburo de silicio mediante carboterminia no es tan simple como pueden aparentar las sencillas ecuaciones químicas de reducción mediante carbón. Tal como lo predice el conocido diagrama de Ellingham de estabilidad de óxidos, el equilibrio CO/CO₂ no es aplicable a la reducción de la sílice a 2.500°C por tener mucho mayor estabilidad la cupla C/CO. Sin embargo entran a competir 3 reacciones carbotérmicas a elevada temperatura.



La primera reacción, utiliza 33% del "carbono teórico" requerido para formar carburo, es fuente de pérdida en la fase gaseosa. La segunda reacción, que ocurre al emplear 67% del "carbono teórico", presenta una temperatura de inversión cercana a los 1.550°C e interesa en la obtención de silicio, ferrosi-

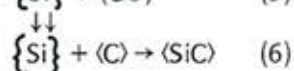
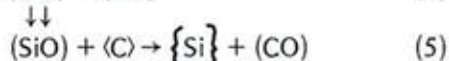
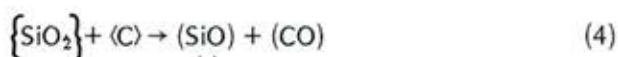
licio y otras aleaciones como el sílico - calcio - manganeso. La tercera reacción, con el 100% del "carbono teórico" es una reacción líquido-sólido factible termodinámicamente por sobre los 1.250°C. La tabla 1 resume las energías de Gibbs estándar asociadas a las 3 reacciones anteriores según los datos disponibles en la literatura.

TABLA 1:
Energías de Gibbs estándar para las reacciones de reducción carbotérmica de la sílice

REACCION	ΔG°_T (J/mol)
$\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{SiO} + \text{CO}$	630.195 - 323,41T
$\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$	666.578 - 361,14T
$\text{SiO}_2 + 3\text{C} = \text{SiC} + 2\text{CO}$	516.984 - 339,36T

De una reacción líquido-sólido como la carbotermia de la sílice no puede esperarse una cinética muy favorable de manera que una primera aproximación para favorecer el contacto entre los reactivos es trabajar con sílice granular en forma de arena cuarzosa, y con carbón en forma de carbón activo o en granos pequeños. Podría especularse que la ruptura de enlaces Si-O mediante el carbono sólido se logra primeramente mediante la pequeña sublimación del carbono a elevada temperatura (~2.500°C) formando moléculas de vapor SiO mucho más activas que en una segunda etapa de reducción forman silicio metálico líquido (y presente también en forma de vapor) el que finalmente nuclearía los cristales de SiC que crecerían con el tiempo.

En principio, es aceptable el mecanismo siguiente:



Como no existe mojabilidad entre la sílice fundida y el carbono sólido, existe un factor negativo para favorecer al contacto líquido-sólido, no obstante, también la sílice a 2.500°C presenta ya una volatilización pequeña que puede facilitar la formación de SiO.

Los textos de química técnica recomiendan que es necesario añadir, una mezcla de NaCl y aserrín a los reactivos. La presencia de NaCl cambia bastante el análisis cinético por cuanto cabe pensar en la formación de un cloruro de silicio (SiCl_4) que puede transformarse a SiC con una mayor velocidad. De hecho, experimentos efectuados a más bajas temperaturas (~1.500°C) señalan la obtención de SiC a partir de la reacción entre SiCl_4 y C. Además, la presencia de NaCl permite la volatilización de metales extraños tales como el hierro y el titanio, en forma de cloruros. El aserrín es necesario porque al arder mantiene la

carga porosa para permitir el escape de los gases generados.

CRISTALOQUIMICA Y LIGADO

El carburo de silicio es cristalográficamente interesante en virtud de su polimorfismo, ya que a lo menos se conocen 6 estructuras. Tal como cabe esperar en este compuesto covalente donde cada tipo de átomos dispone de 4 electrones enlazantes, cada átomo de carbono y cada átomo de silicio se encuentra coordinado tetraédricamente con 4 átomos del otro elemento, teniendo una de las formas más comunes del SiC la estructura cúbica tipo blenda de cinc. Esta variedad se conoce como la modificación $\text{SiC}\beta$ (tiene una densidad teórica de 3,21 g/cm³). La otra variedad común del SiC es la estructura hexagonal tipo wurzita, conocida como modificación $\text{SiC}\alpha$, estable sobre el rango 2.100 - 2.400°C (tiene la misma densidad teórica que la forma β). En estas 2 estructuras los apilamientos de las capas de tetraedros pueden simbolizarse: ... AAAA ... y ... ABAB ... respectivamente. Las otras 4 estructuras del carburo de silicio se forman mediante la superposición de estos mismos tipos de capas, pero en secuencias más complejas tales como: ... AABBAAB-B... o bien ... AAABBBAAABB ..., donde A representa la capa desde la cual comienza a repetirse la unidad. Como curiosidad, existe una forma en que la estructura se repite sólo cada 33 capas llegando entonces al parámetro c de la celda unitaria hexagonal a medir 8,29 nm.

La Figura 2 muestra el estrecho parentesco que existe entre la wurzita, la blenda de cinc y los carburos de silicio III - II - I.

El ligado de granos de un material tan refractario y duro como el carburo de silicio hace prácticamente imprescindible recurrir a fases ligantes que no deterioren significativamente las propiedades del material.

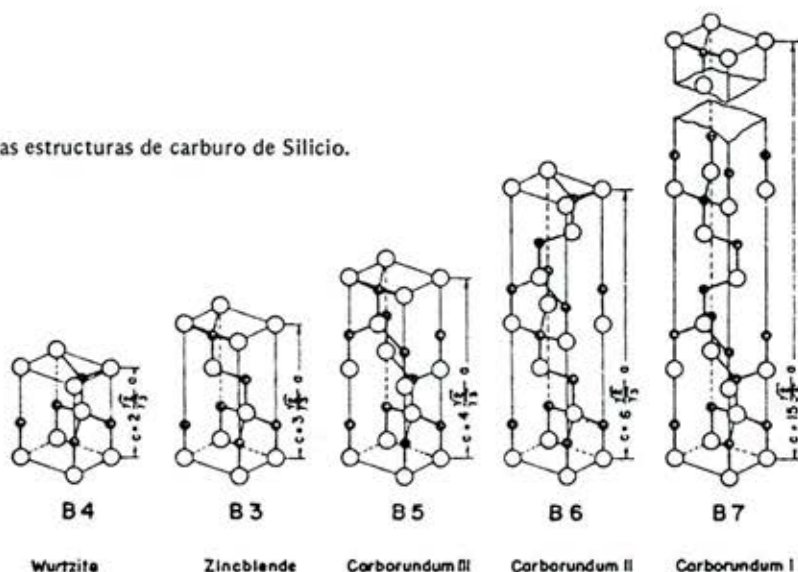
La tabla 2 da una idea sobre las composiciones químicas de carburos de silicio comerciales utilizando diferentes tipos de ligantes.

El sistema más antiguo y el más usual de ligar los granos de carburo de silicio para fabricar refractarios es añadir arcilla plástica (~15% en peso) a la mezcla de granos secos de granulometrías adecuadas. Al producir el quemado de los refractarios (sobre los 1.300°C) se genera una liga cerámica entre la sílice producida en la superficie de los granos de SiC y el alúmino - silicato de la arcilla.

Como fruto de continua experimentación se han propuesto los diversos tipos de ligado a que hace referencia la Tabla 2. En lo que sigue se verá cómo se obtienen estos ligados.

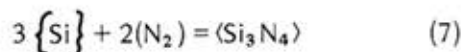
a) SiC ligado con nitrato de silicio (Si_3N_4): esta liga se obtiene mezclando íntimamente granos de carburo de silicio, de granulometría adecuada para lograr una densidad óptima, con silicio metálico. Las

Figura 2: Parentesco de las estructuras de carburo de Silicio.


 TABLA 2:
Análisis Químicos Típicos de SiC (en %) con diferentes ligantes.

	Ligado de Si ₃ N ₄	Ligado de C-Si	Ligado de Al ₂ O ₃	Ligado de Si ₂ ON ₂	Ligado de Silicato
SiC	72 - 76	89 - 94	72 - 87	83 - 87	86 - 90
Si ₃ N ₄	20 - 23	0 - 1	—	2 - 3	—
Si ₂ ON ₂	0 - 3	2 - 3	—	7 - 10	—
Al ₂ O ₃	—	—	9 - 22	—	—
C	—	3 - 4	—	0,5 - 1	—
Si	—	2 - 3	—	0,5 - 1	—
SiO ₂	—	—	2	—	8 - 9
Otros óxidos	0,5 - 1	1	4 - 6	1	1 - 2

piezas refractarias preparadas en base a estas mezclas se someten a quemado (1.400 - 1.450°) en hornos sellados de aire y con excedente de nitrógeno gaseoso en su interior. A elevada temperatura se produce en el interior de las piezas refractarias la reacción:



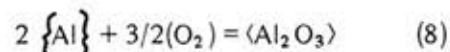
este nitruro formado ayuda a proteger la superficie de los cristales de SiC particularmente de gases oxidantes como CO₂ y H₂O, y de vapores de cinc, de aluminio o alcalinos.

Para los efectos de estudios sobre refractarios es conveniente tener presente que el nitruro de silicio presenta dos modificaciones hexagonales cuyas celdas unitarias tienen dimensiones sólo ligeramente diferentes: Si₃N₄α, estable a baja temperatura, y Si₃N₄β estable sobre los 1.550°C, sublimando a los 1.900°C.

b) SiC ligado con carbono-silicio ("autoligado"): el calificativo "autoligado" involucra la formación de uniones SiC-SiC, la cual se forma a partir de mezclas de silicio metálico y alquitranes (resinas u otros) ricos

en carbono, en el rango de temperaturas de 1.400 a 1.600°C. La ceramografía demuestra que la liga así obtenida no es de ningún modo continua. Quedan residuales de Si y C sin reaccionar en la estructura tal como se aprecia en la Tabla 2. Desafortunadamente estos elementos residuales son fáciles de atacar, con lo cual exponen las zonas ligadas a riesgos químicos.

c) SiC ligado con alúmina ("autoligado"): también se emplea en este caso el concepto de "autoligado". Este tipo de material se ha producido en el Japón quemando una mezcla de carburo de silicio y polvo de metal aluminio. Durante el quemado, en el interior de las piezas refractarias se produce la reacción:



y como el proceso ocurre en presencia de aire, se produce también una película de SiO₂ en los granos de SiC con lo cual es posible generar una liga de alúmino-silicato entre los granos de carburo de silicio.

los hornos de quemado.

La siderurgia, tal como se comentó anteriormente, tiene limitaciones para el uso de refractarios de SiC, no obstante, ya ha encontrado uso en los etalajes, vientre y baja cuba de altos hornos tal como se aprecia en la Figura 5a. El carburo de silicio ha demostrado ser un buen sustituto para los patines de deslizamiento en hornos de recalentamiento.

En el campo de la metalurgia no ferrosa se usa en forma de crisoles y muflas. Un uso más exótico lo ha encontrado en la construcción de bombas de alta temperatura diseñadas para manipular metales líquidos como cinc y aluminio.

En la metalurgia del cobre ha encontrado una

excelente aplicación en el revestimiento de trabajo del horno vertical de fusión de cátodos para colada continua, tal como lo ilustra la Figura 5b. Otra aplicación interesante es en el piso de deslizamiento de los hornos de precalentamiento de barras "wirebars".

Se han desarrollado productos más elaborados como espuma usada como aislante hasta $\sim 2.000^{\circ}\text{C}$, y fibras monocristalinas en forma de filamentos, agujones de menos de $1\ \mu\text{m}\phi$. Aprovechando su excelente conductividad eléctrica se fabrican elementos calefactores en forma de barras, tubos y espirales, para trabajar en forma continuada hasta temperaturas de 1.500°C .

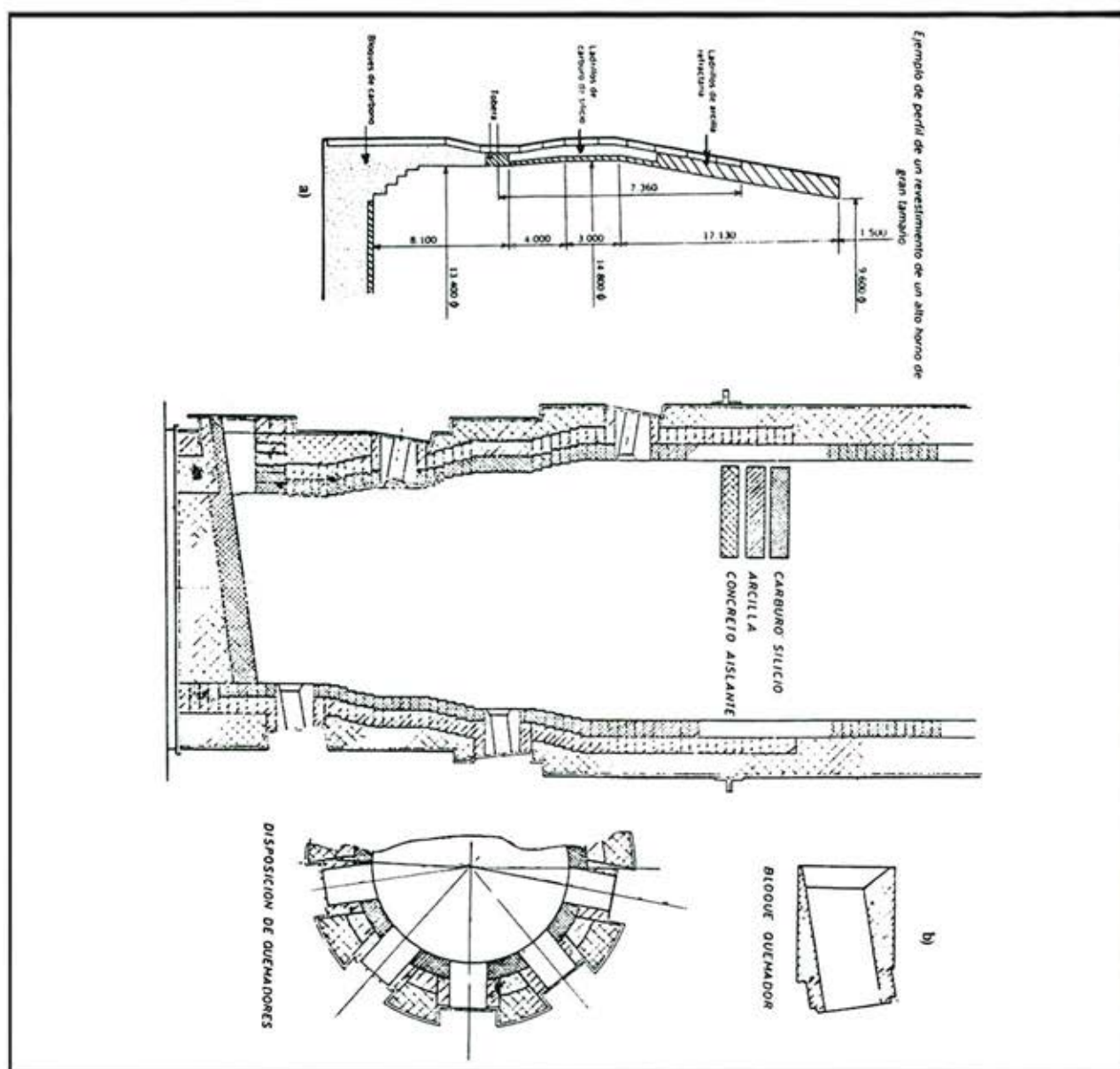
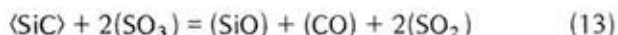


Figura 5: Usos del SiC (a) en siderurgia; (b) en metalurgia del cobre.

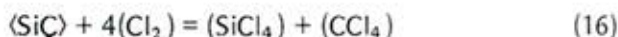
ataque con H_2S y SO_2 y SO_3 , con estos últimos se sufre el efecto oxidante según:



b) Gases reductores: de los 3 más importantes gases reductores, CO , H_2 y NH_3 , los dos últimos no muestran efecto aparente hasta los $1.400^\circ C$, sin embargo el monóxido ataca una superficie limpia de SiC sobre los $1.050^\circ C$ formando carbono, presumiblemente según un mecanismo que involucre la inversión de la reacción de reducción de la sílice:



c) Otros gases reactivos: es significativo el ataque que sufre el SiC en presencia de cloro; bajo los $900^\circ C$ se forma el tricloruro de silicio, y en el rango $1.050 - 1.100^\circ C$ se forman los tetracloruros de carbono y de silicio:

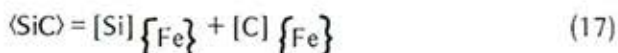


d) Gases inertes: ya sea por la naturaleza de la obtención del SiC como por la naturaleza de la liga, siempre es factible que exista silicio y carbono libres, de manera que al ser el silicio reactivo frente al nitrógeno, cabe la formación de nitruros y oxinitruros. Los gases nobles son entonces los únicos verdaderamente inertes frente al SiC .

Estabilidad frente a líquidos: este tipo de comportamiento es el más relevante en metalurgia por cuanto es el contacto directo con metales o aleaciones, escorias, matas y sales fundidas lo más frecuente en hornos y procesos metalúrgicos.

a) Metales y aleaciones: la formación de carburos metálicos constituye una limitante para el uso del SiC como crisol o recipiente que contenga metales y/o aleaciones.

- Con metales industriales importantes como el hierro y el aluminio existe formación de carburos, de manera que no se recomienda el uso de crisoles de SiC para aceros, ni ferroaleaciones ya que tanto el silicio como el carbono tienen gran poder de disolución en estos materiales cuando están líquidos según:



Con aluminio líquido, en contactos por tiempo breves (como en sistemas de trasvasije por ejemplo) es totalmente factible su uso.

- Con metales nobles y cobre, el carburo de silicio se comporta en forma inerte, de allí su empleo en forma industrial en hornos y equipos de contacto directo con dichos metales líquidos.

b) Escorias: al tener en general las escorias un poder oxidante, mientras que el carburo de silicio tiene poder reductor, la experiencia señala que este material es atacado por una gran variedad de materiales oxidicos líquidos. Este ataque depende también de la naturaleza y cantidad del ligante. El ligante común de arcilla es indudablemente más propenso al ataque que el de alúmina por ejemplo. El ataque por escorias oxidadas se ve favorecido en presencia de aire.

c) Matas, cloruros y otros no oxidados: el comportamiento es tan diverso como diversos son los materiales en contacto, pero en general se espera un buen comportamiento con matas que contienen poco hierro oxidado, con cloruros estables que no liberen (Cl_2), y con materiales que no generen los gases o vapores reactivos citados más arriba.

Estabilidad frente a sólidos: de acuerdo a lo visto anteriormente, cabe esperar con los sólidos un comportamiento mucho más atenuado que con los mismos materiales, pero en estado líquido. Es entonces posible por ejemplo poner en contacto acero sólido en forma temporal con SiC , sin peligro serio. La combinación peligrosa eso sí es la existencia de sólidos en condiciones abrasivas (roce, deslizamiento, caídas, etc.), en ambiente oxidante.

PROPIEDADES

El carburo de silicio es un material que destaca por sus peculiares propiedades: elevada conductividad térmica y eléctrica, baja expansión térmica y baja tendencia al spalling, con una altísima resistencia a la abrasión.

La tabla 3 muestra en forma resumida algunas de las más relevantes propiedades físicas de los ladrillos comunes de carburo de silicio.

TABLA 3:
Propiedades relevantes de ladrillos de SiC

Densidad específica verdadera	3,00 - 3,15 g/cm ³
Expansión Térmica	0,40 - 0,45%
Conductividad Térmica	3,6 - 16,5 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Conductividad Eléctrica	10 ⁰ - 10 ² Ω cm ⁻¹

USOS

El alto costo del carburo de silicio tanto como materia prima como producto conformado, ha sido y es un constante agravante para su uso en muchas aplicaciones refractarias. A eso debe añadirse que las piezas refractarias de SiC , debido a su abrasividad elevada, no admiten (al menos en condiciones económicas) corte para adaptar o acomodar albañilerías, de manera que las piezas deben usarse tal cual salen de

los hornos de quemado.

La siderurgia, tal como se comentó anteriormente, tiene limitaciones para el uso de refractarios de SiC, no obstante, ya ha encontrado uso en los etalajes, vientre y baja cuba de altos hornos tal como se aprecia en la Figura 5a. El carburo de silicio ha demostrado ser un buen sustituto para los patines de deslizamiento en hornos de recalentamiento.

En el campo de la metalurgia no ferrosa se usa en forma de crisoles y muflas. Un uso más exótico lo ha encontrado en la construcción de bombas de alta temperatura diseñadas para manipular metales líquidos como cinc y aluminio.

En la metalurgia del cobre ha encontrado una

excelente aplicación en el revestimiento de trabajo del horno vertical de fusión de cátodos para colada continua, tal como lo ilustra la Figura 5b. Otra aplicación interesante es en el piso de deslizamiento de los hornos de precalentamiento de barras "wirebars".

Se han desarrollado productos más elaborados como espuma usada como aislante hasta $\sim 2.000^{\circ}\text{C}$, y fibras monocristalinas en forma de filamentos, agujones de menos de $1\text{ }\mu\text{m}\phi$. Aprovechando su excelente conductividad eléctrica se fabrican elementos calefactores en forma de barras, tubos y espirales, para trabajar en forma continuada hasta temperaturas de 1.500°C .

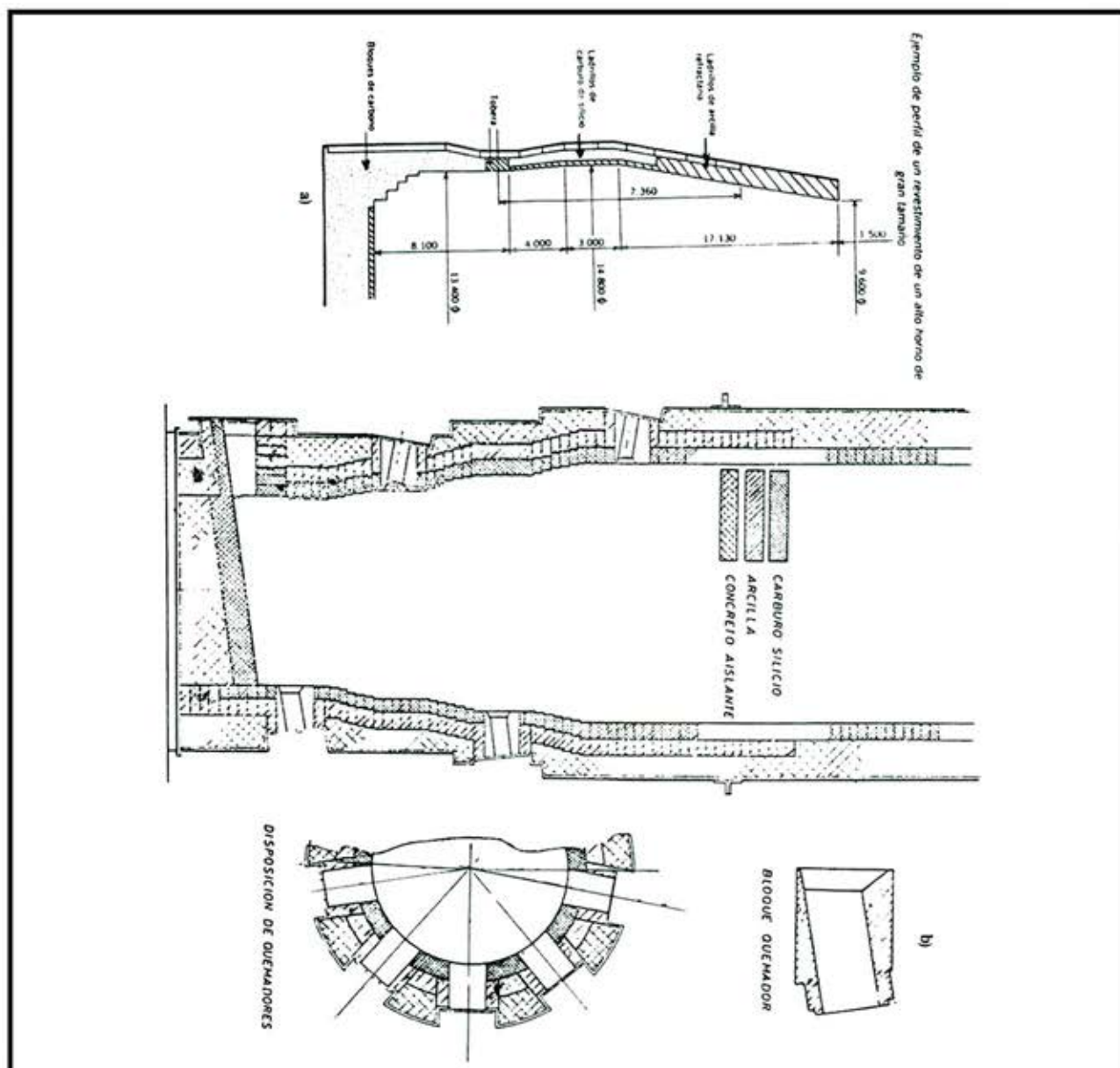


Figura 5: Usos del SiC (a) en siderurgia; (b) en metalurgia del cobre.

Iniciación del programa de magister en Ciencias de la Ingeniería*



Dr. Mario Letelier S.

INTRODUCCION

Se tiene programado para el segundo semestre del presente año el comienzo del postgrado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. El programa ha nacido luego de un largo período de estudio y definiciones. Se han planteado objetivos académicos, evaluando recursos humanos y materiales e implementando los reglamentos y procedimientos para su puesta en marcha.

El principal objetivo es entregar una formación sistemática destinada a dar a sus candidatos las herramientas para participar creativa y eficientemente en actividades de investigación en determinadas áreas de las ciencias de la ingeniería. El campo de desempeño de los graduados se proyecta hacia la investigación industrial y hacia las actividades académicas en instituciones de enseñanza superior.

Las actividades docentes se realizan en los departamentos académicos de la Facultad, y son coordinadas y supervisadas por la Dirección de Estudios de Graduados e Investigación de la Facultad. Un comité de profesores regulares tiene a su cargo el estudio de normas y postulaciones.

Los candidatos deben realizar un programa individual de estudios que incluye cursos de profundización-especialización y una tesis de investigación bajo la supervisión de un profesor regular del programa. La tesis debe nacer de alguna de las líneas de investigación oficiales de la Facultad.

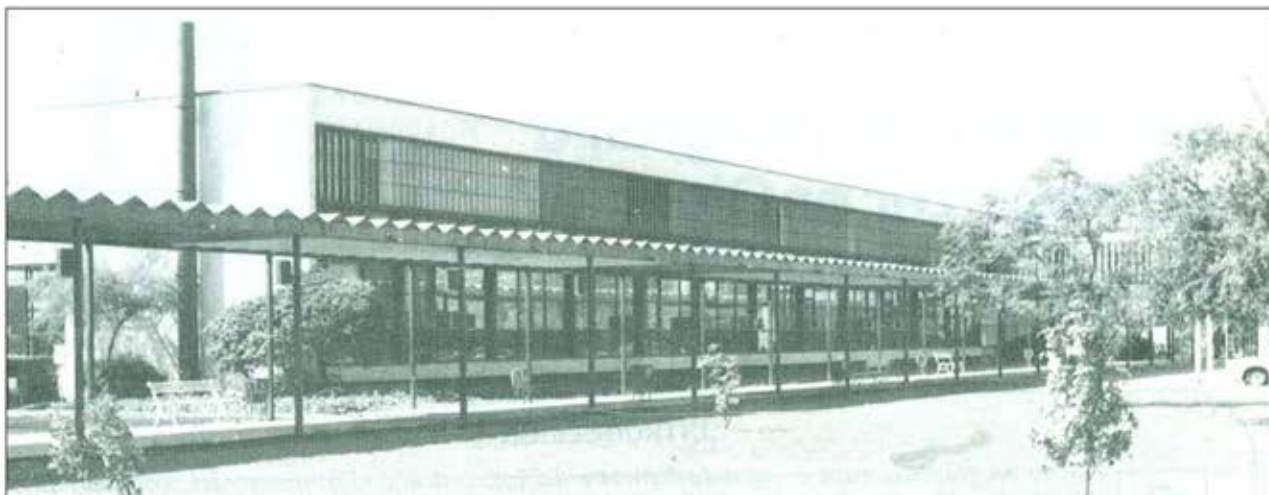
Los cursos serán a nivel superior a los de las carreras de Ingeniería Civil, constituyendo así un efectivo apoyo a la profundización de conocimientos. En ellos se entregarán materias generales avanzadas, una visión del estado del conocimiento actual y un entrenamiento en solución de problemas y formulación de modelos a nivel de frontera. El período de trabajo en cursos se estima en promedio de un año, sin considerar cursos de nivelación, posiblemente necesarios en casos especiales.

Tres clases de cursos se incluirán en el programa de cada candidato, a saber:

- I. Asignaturas generales: son temas de interés formativo general, destinados a ampliar el horizonte científico del estudiante. En esta perspectiva se exigirán temas fuera del ámbito de la tesis. Ejem-

* Artículo publicado en la revista "Presencia" de Septiembre de 1986.-





plos de estos cursos son: Teoría de Sistemas, Informática, Sistemas Dinámicos, Teoría de Control, etc.

II. Asignaturas fundamentales de la especialidad: son aquellas que profundizan las ciencias de ingeniería relacionadas con la especialización del candidato. Fenómenos de Transporte, Transferencia de Calor, Electromagnetismo y Mecánica de Fluidos son ejemplos característicos de esta segunda clase.

III. Asignaturas orientadas a la tesis: son asignaturas muy especializadas de apoyo directo al trabajo de investigación de los estudiantes. Temas ilustrativos son: Inteligencia Artificial, Aerodinámica, Combustión, etc.

La Universidad de Santiago de Chile espera así contribuir a promover las actividades académicas y profesionales de nivel avanzado a través de un aporte educacional que comprende la entrega de conocimientos especializados, el entrenamiento en metodología de trabajo científico-tecnológico tanto teórico como experimental, y el desarrollo de capacidades intelectuales orientadas al análisis, evaluación e innovación.

REQUISITOS DE POSTULACION

Para postular al programa se requiere el grado académico de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería o un grado o título profesional, cuyo nivel y contenido de estudios sean equivalentes a aquél.

El ingreso de los ingenieros de Ejecución se rige por un reglamento especial, debiendo éstos cumplir un plan de estudios de nivelación al grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Dicho plan comprende el orden de un año de cursos del plan de Ingeniería Civil para ingenieros de Ejecución sin especialización adicional.

El proceso de ingreso consta de las siguientes etapas:

- a) Postulación
- b) Selección
- c) Matrícula

Documentos que se deben presentar:

- a) Solicitud de admisión
- b) Formulario de antecedentes curriculares
- c) Dos cartas de recomendación
- d) Certificados de grados académicos y títulos obtenidos
- e) Certificados de calificaciones de estudios superiores
- f) Certificados de desempeño académico y profesional (no necesario para ingenieros civiles).

Existen las categorías de alumno regular y alumno especial. El alumno regular es un candidato al MCI. El alumno especial cursa asignaturas del programa, obteniendo un certificado de calificaciones por los cursos aprobados.

LINEAS DE INVESTIGACION

La actividad de investigación de los departamentos académicos de la Facultad de Ingeniería se expresa a través de líneas de investigación dirigidas por los profesores regulares del programa. Dichas líneas se orientan al avance y aplicación del conocimiento en las áreas fundamentales de especialización de los correspondientes departamentos.

La Facultad se esfuerza por lograr contribuir al desarrollo científico y tecnológico en materias que aúnan el estudio de principios fundamentales, su aplicación a problemas de interés nacional en el ámbito de la ingeniería, y una definida capacidad educativa.

La actual lista de líneas de investigación ofrecidas en este programa es la siguiente:

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

- Redes de área local
- Fibras ópticas
- Control con microcomputadores
- Robótica e inteligencia artificial.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

- Energía
- Técnicas numéricas en problemas de ingeniería
- Desarrollo de modelos de sistemas mecánicos.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA

- Fundición y solidificación de metales y aleaciones
- Estudio estructural de materiales de ingeniería
- Refractarios en la pirometalurgia
- Obtención de compuestos de molibdeno de alta pureza.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA

- Desarrollo, procesamiento y conservación de alimentos
- Procesos de separación.

PROFESORES DEL PROGRAMA

Participan en el programa los profesores regulares, quienes tienen a su cargo la supervisión del plan de trabajo de los candidatos y colabora un cuerpo de profesores adjuntos, quienes dictan asignaturas y apoyan el trabajo de aquéllos.

PROFESORES REGULARES

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

- Felisa Córdova G., Dr. Ing., Universidad de París Sud.
- Eligius Vancek K., Dr. Ing., Universidad Técnica de München.
- Miguel de la Sotta C., M. Sc., Universidad Federal Río de Janeiro.
- Manuel Vega P., M. Eng., Universidad McGill.
- Francisco Watkins O., M. Sc., Universidad de Manchester.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

- Bruno Lértora D., Dr. Ing., Universidad Técnica Federico Santa María.
- Mario Letelier S., Ph. D., Universidad de Toronto.

- Pedro Navarrete A., Dr. Ing., Universidad de Karlsruhe.
- César Rozas Z., M. Sc., Universidad de Arizona.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA

- Jorge Garín C., Ph. D., Universidad de Pennsylvania.
- Rodolfo Mannheim C., Dr. Ing., Universidad de Berlín.
- Nelson Santander M., Ph. D., Universidad de Toronto.
- Marco Solar B., Dr. Ing., Universidad de Nancy.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA

- Pedro Alvarez G., Dr. Ing., Universidad Técnica Federico Santa María.
- Horacio Correa H., Dr. Ing., Universidad Técnica Federico Santa María.

PROFESORES ADJUNTOS

- Gastón Jáuregui M., Ph. D., Universidad de Exeter.
- Pedro Muñoz C., Ph. D., Universidad de Utah.
- Rodolfo Reyes G., Ph. D., Universidad de Pennsylvania.
- Claudio Romo R., Ph. D., Universidad de Reading.
- Carlos Carrasco C., M.A. Sc., Universidad de Dayton.
- Pedro Moyano G., Mag., Universidad de Chile.
- Oscar Páez R., Mag., Universidad de Chile.
- Alejandro Reyes S., Mag., Universidad de Concepción.
- Renato Salinas S., M.A. Sc., Universidad de Tennessee.
- Gonzalo Téllez F., M. Sc., Universidad Federal de Río de Janeiro.
- Ubaldo Zúñiga Q., M. Sc., Universidad de Tennessee.



Evolución del ensayo Varestraint



M. Sc. VICTOR OSORIO L.

A medida que pasa el tiempo los requerimientos que se le exigen a los materiales son cada vez mayores, para resolver esto el hombre ha desarrollado nuevas aleaciones y nuevas técnicas que han acarreado problemas no conocidos que a su vez han tenido que ser resueltos, existiendo de esta manera un constante cambio en los procesos y ensayos, haciéndose éstos cada vez más rigurosos y tendientes a obtener el máximo de información de cada probeta.

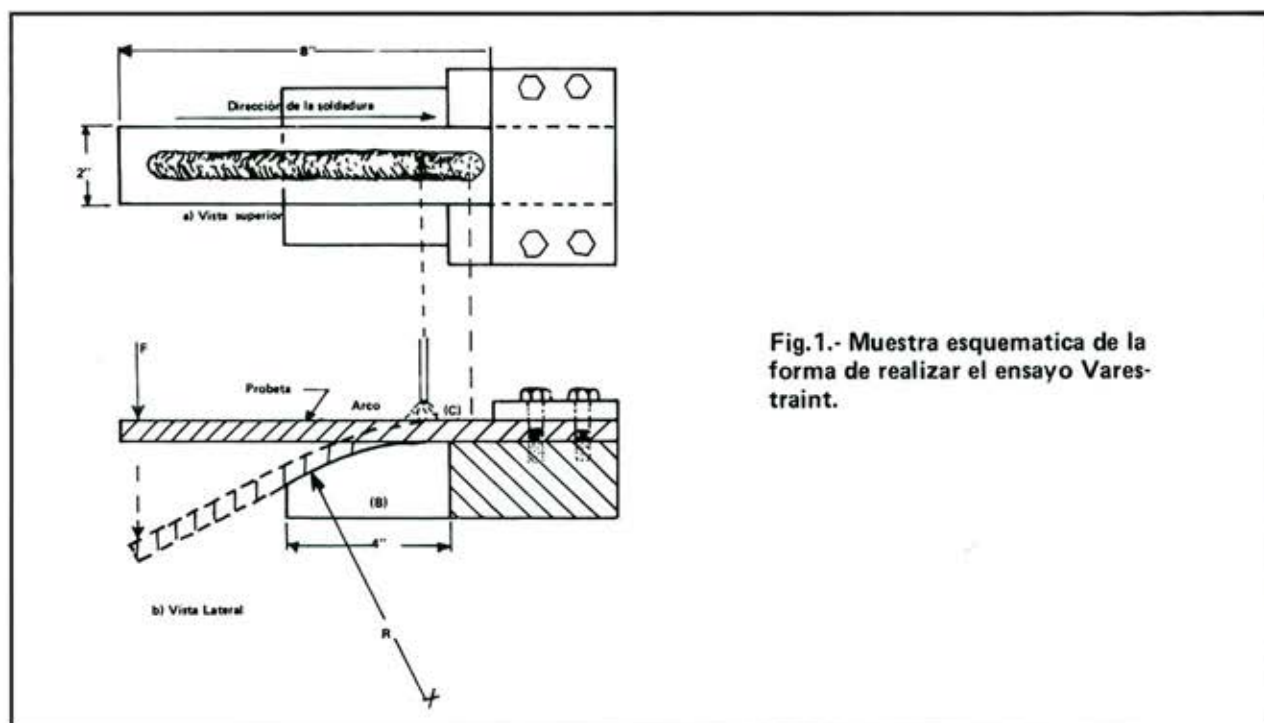


Fig.1.- Muestra esquemática de la forma de realizar el ensayo Varestraint.

En soldadura, se han desarrollado diferentes ensayos para investigar los tipos de grietas que en este proceso aparecen, como son: las grietas en frío y grietas en caliente, estas últimas generadas en la zona afectada térmicamente (ZAT), en el metal de aporte y/o en la ZAT del metal de aporte en soldadura de multipasadas.

Muchos ensayos se han desarrollado para investigar las grietas en caliente. La mayoría de éstos tiene por finalidad evaluar grietas en caliente de un tipo determinado como son: grietas en la ZAT, grietas de

solidificación, grietas por pérdida de ductilidad o grietas que se forman al ser tratadas térmicamente las uniones soldadas.

Centraremos nuestra atención en el ensayo varestraint y su evolución. El ensayo Varestraint se originó en la necesidad de determinar la susceptibilidad al agrietamiento en caliente de los materiales cuando son soldados. En 1965 Lundin y Savage (1) desarrollan el ensayo denominado Varestraint para ser usado en estudios de soldabilidad, como se muestra en la figura 1. Este ensayo sintetiza las condiciones respon-

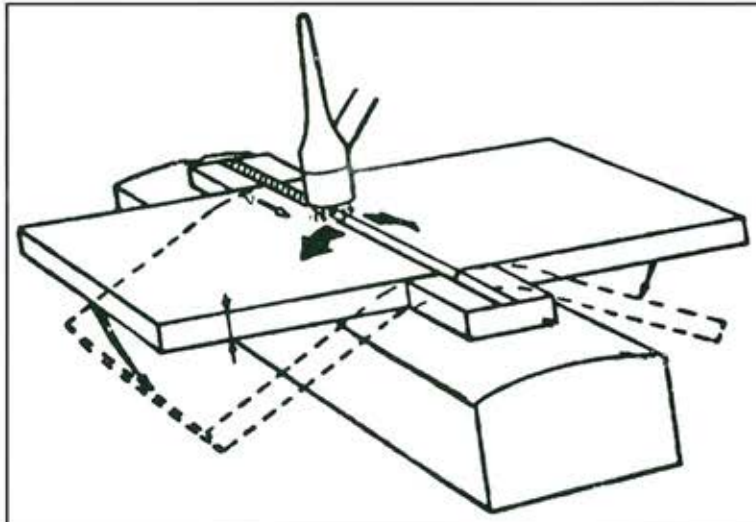
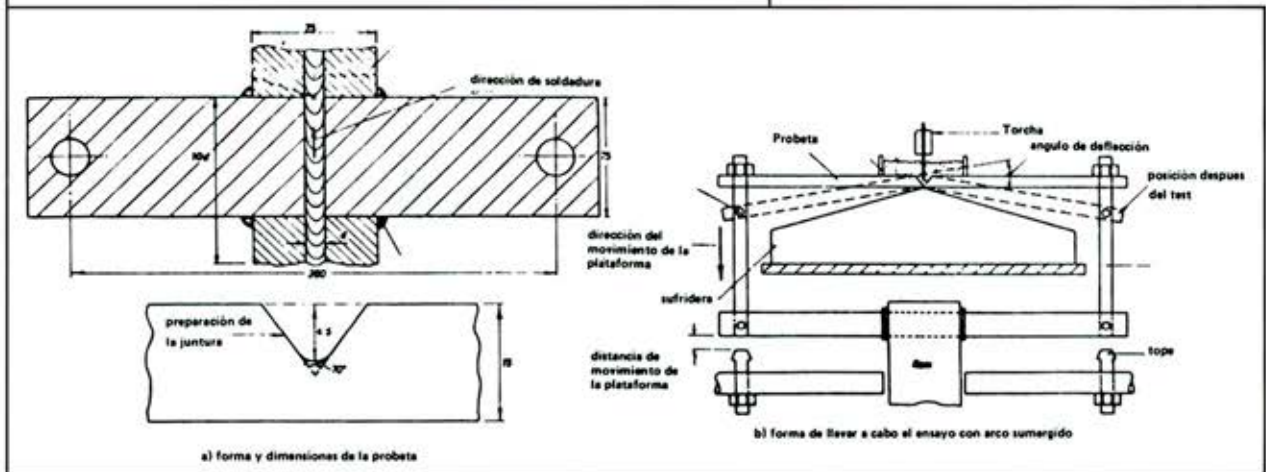


Fig. 2.- Representación esquemática del ensayo Varestaint en forma transversal.

Fig. 3.- Modificación del ensayo Varestaint transversal de acuerdo a Farrar y Garland.



sables de las grietas en caliente que suceden en estructuras soldadas reales pero en probetas a escala de laboratorio. Es realizado en un equipo de laboratorio con las ventajas de ser rápido, económico y reproducible.

El ensayo Varestaint usa una pasada de soldadura de penetración incompleta para establecer las características de distribución de temperatura y microestructura en el material que se está investigando y simula los requerimientos mecánicos mediante un aumento de la deformación. Permite dar a cada material ensayado, un índice de susceptibilidad al agrietamiento en caliente que nos proporciona una comparación directa en una amplia gama de materiales. Como los parámetros de soldadura y la magnitud del aumento en deformación pueden ser variados en forma independiente, este ensayo da la flexibilidad de evaluar con facilidad los factores mecánicos y metalúrgicos.

La probeta es fijada en un extremo y el cordón de soldadura se realiza paralelo a la longitud, empezando cerca del extremo que no está sujeto; cuando el arco llega al punto "A" en la figura 1 la fuerza es aplicada en el extremo F que se encuentra libre, con lo cual la

probeta es doblada rápidamente y toma la curvatura de la matriz intercambiable "B". El arco se mantiene hasta que llega a la posición "C". Dos platinas son usadas para forzar a la probeta a tomar correctamente la curvatura de la matriz.

Dada la geometría del sistema, el valor nominal de la deformación en la superficie externa de la probeta se puede calcular mediante la relación aproximada:

$$E \approx \frac{t}{2R}$$

donde:

t: espesor de la probeta, y

R: radio de curvatura de la matriz.

Se seleccionan valores para los parámetros de soldadura y se estudia la influencia de la variación de éstos en la respuesta a las grietas en caliente.

Las probetas usadas son de dos pulgadas de ancho, doce pulgadas de largo y espesores que varían entre un cuarto y media pulgada. Lundin y Savage finalmente, afirman que es posible usar este ensayo con

atmósfera controlada con el objeto de obtener una superficie libre de óxidos que nos permita estudiar directamente el crecimiento de la subestructura de solidificación.

Posteriormente en 1981 dado los costos que significaba tanto, el valor del material como preparar las probetas, Lessmann y Gold (2) informan de resultados obtenidos en materiales refractarios evaluados por intermedio del ensayo Varestraint en probetas en miniatura de una pulgada de ancho por seis pulgadas de longitud y un cuarto de pulgada de espesor.

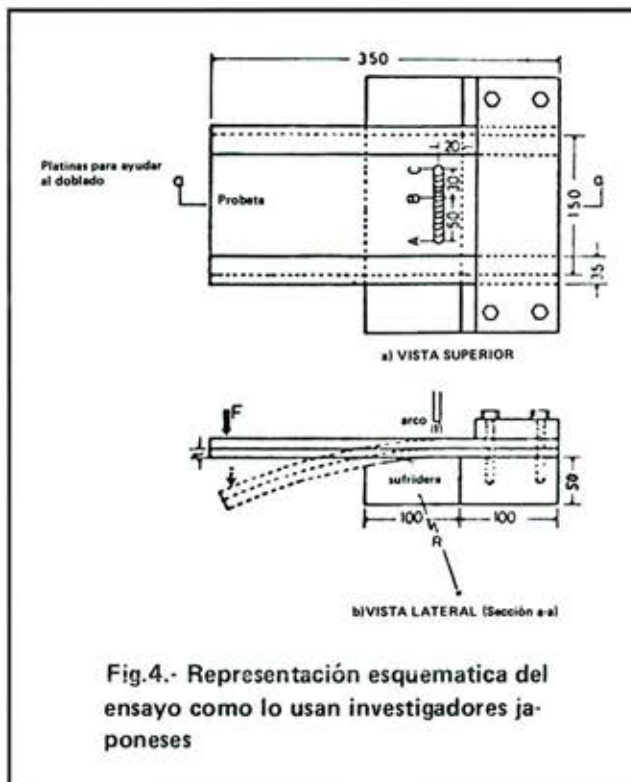


Fig.4.- Representación esquemática del ensayo como lo usan investigadores japoneses

Otra de las modificaciones hecha a este ensayo fue hacer el cordón de soldadura transversal a la longitud de la probeta como se muestra en la figura 2, que fue descrito originalmente por Mc Keown (3). Esta modificación, para que el arco sea estable en la probeta, al momento de aplicar la deformación, se prolonga la dimensión en su ancho mediante un trozo de metal soldado en el medio y para impedir la concentración de calor en el otro extremo de la probeta se adiciona otro trozo de metal al igual que el primero, este segundo trozo de metal es donde se detiene el arco.

Farrar y Garland (4) en 1973 hacen modificaciones al ensayo varestraint transversal aumentando la longitud de la probeta para alcanzar solidificación estable en la poza fundida en el momento de aplicar la deformación (fig. 3). La longitud de la soldadura tiene que ser por lo menos diez veces el ancho del cordón antes de aplicar la deformación.

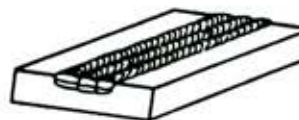
El doblado es provocado por un rápido movimiento hacia abajo de la plataforma a la cual está sujeta la probeta.

La deformación aplicada se varía ajustando la distancia de movimiento de la plataforma mediante los topes mostrados en la figura 3b. Farrar y Garland aseguran que adoptando esta técnica aumenta la sensibilidad del ensayo en comparación con las prácticas anteriores en que el movimiento lo hace la matriz.

Investigadores Japoneses (5), usan probetas de 150 mm de ancho por 350 mm de longitud y espe-



a) Visel preparado para depositar el metal de aporte



b) Metal de aporte depositado en el visel preparado



c) Superficie de la probeta preparada antes de ensayarla

Fig.5.- Preparación de una probeta para ser sometido al ensayo Vares-traint para metal de aporte

sores de 6 o 9 mm con láminas adicionales que ayudan a la conformación de la probeta en el contorno de la matriz. Estas probetas son ensayadas en forma transversal como se muestra en la figura 4.

Savage y Lundin (6) y Kihara y Mutanda (7) han utilizado este ensayo en forma longitudinal para determinar susceptibilidad a las grietas en caliente del metal de aporte fabricando una probeta como la mostrada en la figura 5 donde inicialmente se prepara un visel para posteriormente depositar el metal de aporte que deseamos ensayar, para luego preparar la superficie a las condiciones que el ensayo requiere. En este caso el ensayo se puede conducir en forma longitudinal o transversal.

Una segunda generación de este ensayo surgió con el llamado "Spot-Varestraint Test". Este consiste en hacer en forma autógena con el proceso TIG una pileta líquida de penetración incompleta en el medio de una probeta de seis pulgadas de longitud, 1

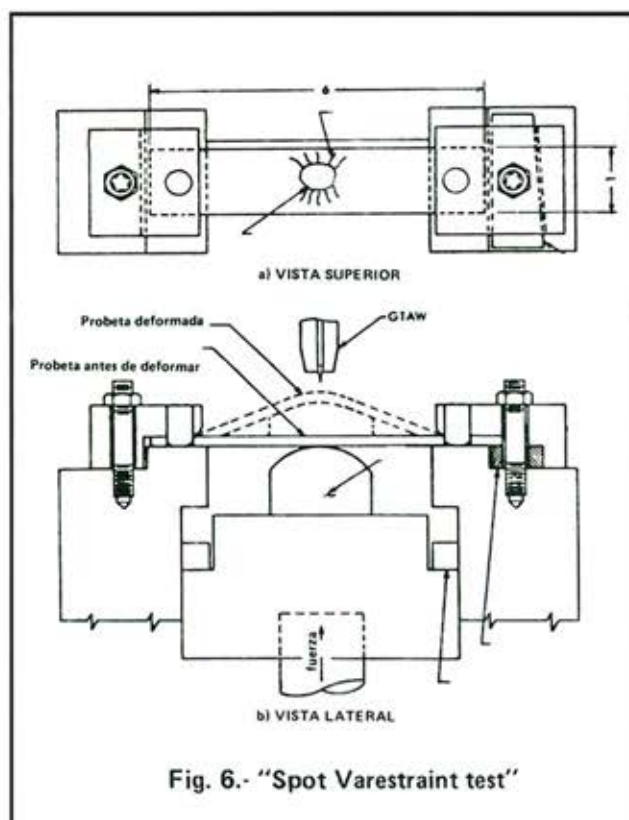


Fig. 6.- "Spot Vareststraint test"

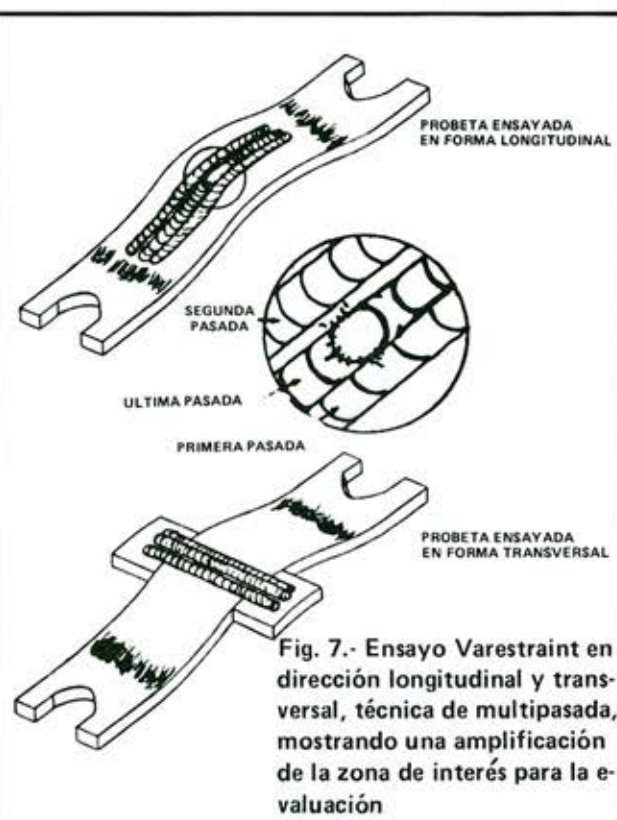


Fig. 7.- Ensayo Vareststraint en dirección longitudinal y transversal, técnica de multipasada, mostrando una ampliación de la zona de interés para la evaluación

pulgada de ancho y un cuarto de pulgada de espesor, sujeta por los dos extremos. Después de algunos segundos la probeta es deformada tomando la forma del contorno de la matriz que está montada en una base móvil como se muestra en la figura 6. Esta modificación trata de resolver la imposibilidad del ensayo original para acomodar sus dimensiones a una escala pequeña.

La cara del spot es doblada en tensión mientras la zona fundida está todavía líquida. Este ensayo evalúa la susceptibilidad a las grietas en caliente del material base o del material previamente depositado. La zona cercana al spot está sujeta a la distribución térmica producida en una operación de soldadura. Este permite el control de los cambios metalúrgicos mientras aumenta la deformación. El objetivo es la creación de una zona fundida y una ZAT sujetas a una variación de la deformación.

Finalmente, en 1985 (8, 9, 10) la habilidad de este ensayo se ha complementado con la posibilidad de ensayar las probetas en forma longitudinal y/o transversal evaluando la ZAT del metal base, ZAT del cordón de soldadura con la técnica de multipasada y la zona fundida como se muestra en la figura 7. Para tal efecto dos cordones paralelos son hechos en forma autógena con una distancia predeterminada, entre ellos, que dependen de la entrada de energía, el espesor de la pieza y la composición química del material a ensayar. El tercer pase es posicionado de tal manera que produce la ZAT en el metal base

como una superimposición de las ZAT del segundo pase y el tercero simultáneamente y produciendo una ZAT en el cordón de la primera pasada con el objeto de evaluar en el metal del cordón y en la ZAT del metal base el cuarto y quinto cordón son ubicado sobre el tercero. La deformación es aplicada en el último pase al momento en que la torcha pasa el centro de la probeta.

Vista la evolución que ha tenido este ensayo, describiremos alguno de los criterios que se han utilizado en la evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento en caliente. (La medición de las grietas se hace en condiciones de soldado).—El Cracking Threshold, es la mínima deformación requerida para provocar grietas en caliente para determinados valores de los parámetros de soldadura y que proporciona valores cuantitativos para comparar materiales y procedimientos de soldadura.

—Grietas combinadas, es la longitud total obtenida al adicionar las longitudes de las grietas encontradas en el material depositado y en la zona afectada térmicamente además se puede encontrar el largo promedio de las grietas.

—Rango de temperatura frágil es otro criterio usado para evaluar la sensibilidad a las grietas en caliente de los materiales y es mostrado en la figura 8. La susceptibilidad al agrietamiento en caliente en la aleación es definida por la combinación del largo máximo de grieta con el ensayo vareststraint y la distribución de temperatura a través del cordón de

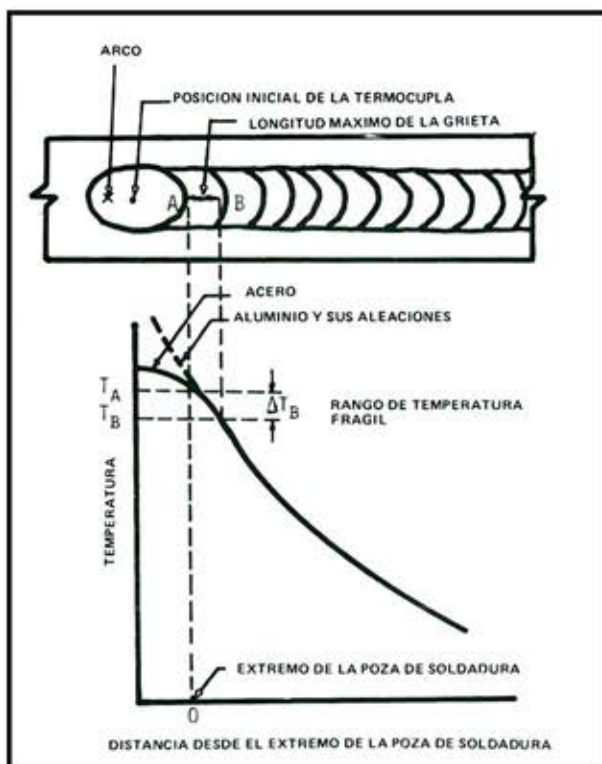
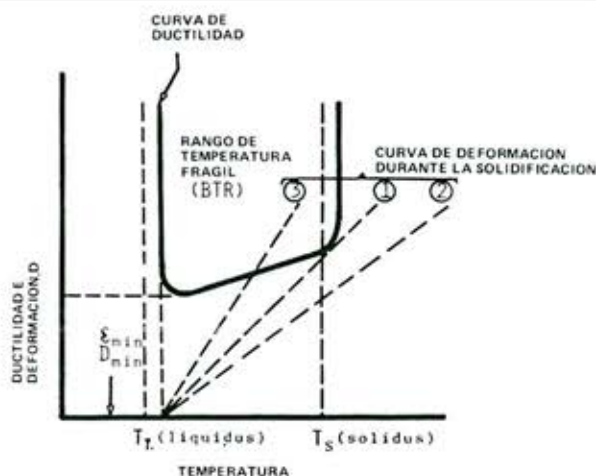


Fig.8.- Representación esquemática para determinar el rango de T° frágil para las grietas

Fig.9.- Explicación de las grietas de solidificación, por la relación entre ductilidad y deformación durante la soldadura



soldadura, el cual es medido a lo largo de la línea central en el cordón soldado mediante la introducción de una termocupla en la pileta fundida directamente detrás del arco.

—Rango crítico de deformación, la caída de temperatura (CST) es un índice para evaluar la susceptibilidad a las grietas de solidificación del metal aportado, el cual es medido por la línea recta tangente 1 de la figura 9. Las grietas de solidificación se van a formar si la magnitud de deformación del metal solidificado excede la curva de ductilidad en el rango de temperatura frágil (BTR), esto es mayor deformación que la lineal en la figura 9. La curva de ductilidad para las grietas en el rango de temperatura frágil puede ser determinada para cada material utilizando la máxima magnitud de grietas en el ensayo transvarestraint.

REFERENCIAS

1. W. Savage and C. Lundin. "The varestraint test". *Welding Journal Reprint* Oct. (1965).
2. G. Lesmann y R. Gold. "The Varestraint Test for Refractory Metals". *Welding Journal* 50 (1) 1-8, (1976).
3. D. Mc Keown. "Versatility Weld Metal Cracking Tests". *Metal construction and Welding Journal* (8) 351 - 352, (1970).
4. J. Farrar and J. Garland. "Developments in the transvarestraint test for Assessing Solidification Cracks. Susceptibility of weld Metals". *The Welding Institute Research Bulletin M/77/73*, Dec. (1973).
5. I. Senda, F. Matsuda, G. Takano, K. Watanabe, T. Kobayoshi and T. Natsuzaka. "Fundamental Investigation of Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Transvarestraint Test". *Transaction of JWS* 2 (9), 1-22 (1971).
6. W. Savage and C. Lundin. "Application of the varestraint Technique to the study of Weldability". *Reprint from welding Journal Research Supplement*. Nov. (1966).
7. H. Kihara and F. Matzuda. "Varestraint Test for Hot Crack susceptibility of HY-Type High strength steel", "Transaction of JWRI". Vol. 2 (2) 83-95, (1973).
8. C. Lundin, V. Osorio and R. Menon. "The Hot Ductility and hot cracking Resistance of Modified 347 and 316 NG Stainless steels". *The Professional Program of the American Welding Society's 66th. Annual Convention in Las Vegas, Nevada, April 29-May 3. 1984.*
9. C. Landin, V. Osorio and R. Menon. "New Concepts in varestraint testing for hot cracking". *Material Week's 85 Toronto, Ontario, Canadá, 12-17 October 1985.*
10. C. Landin, C.H. Lee, R. Menon and V. Osorio. "The Hot Ductility and hot cracking Resistance of Modified 347 and 316 stainless steels". *Materials week 85 Toronto, Ontario, Canadá, 12-17 october 1985.*

Dr. RODOLFO MANNHEIM C.



Aleaciones con memoria

INTRODUCCION

En los últimos quince años se han hecho conocidas, aleaciones que después de una deformación plástica a baja temperatura, vuelven a su forma original cuando son calentadas sobre una temperatura crítica. Por medio de trabajos de investigación posteriores, fueron descubiertos otros procesos, en los cuales, después de una primera deformación aparece un cambio reversible en la forma, debido a un calentamiento y posterior enfriamiento. Estas propiedades son denominadas "efecto de memoria en una dirección o bien en dos direcciones" y son ilustradas en la fig. 1. Los pasos de "deformación" y "regreso a la forma por calentamiento" pueden ser repetidos a voluntad para el efecto de memoria en una dirección.

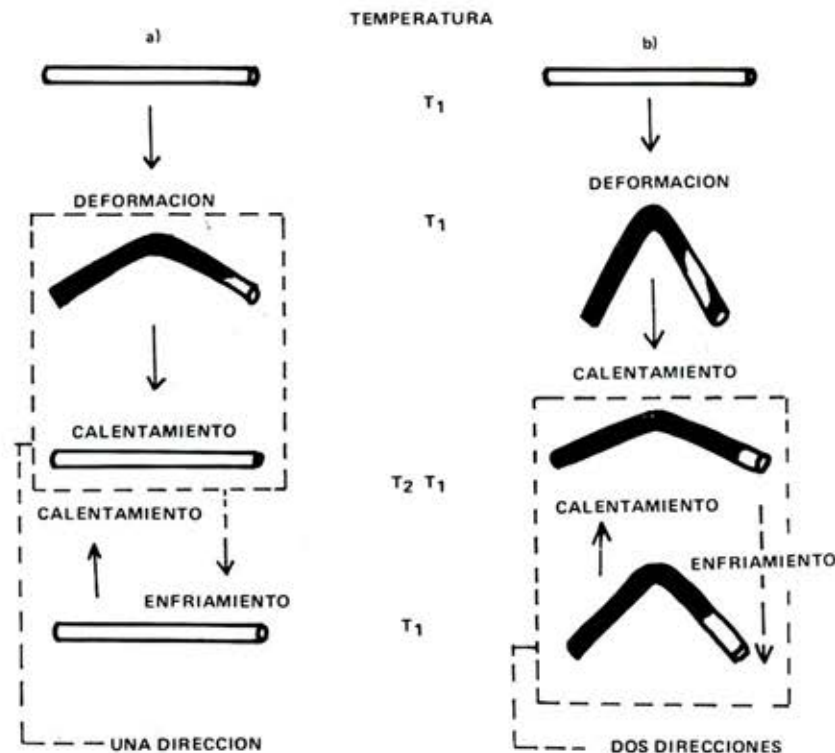


Figura 1: Principio del efecto de memoria en la forma a) El efecto en una dirección se desarrolla bajo un valor crítico de deformación que debe ser sobrepasado, de manera que la contracción no sea totalmente regresiva al calentar.

Otra representación del efecto de memoria se observa en la fig. 2. Dependiendo de la aleación, para el "efecto de memoria en una dirección" se logran de-

formaciones de hasta un 8% al calentar en un intervalo de temperatura entre 30°C y 100°C, mientras que para el "efecto de memoria en dos direcciones" se

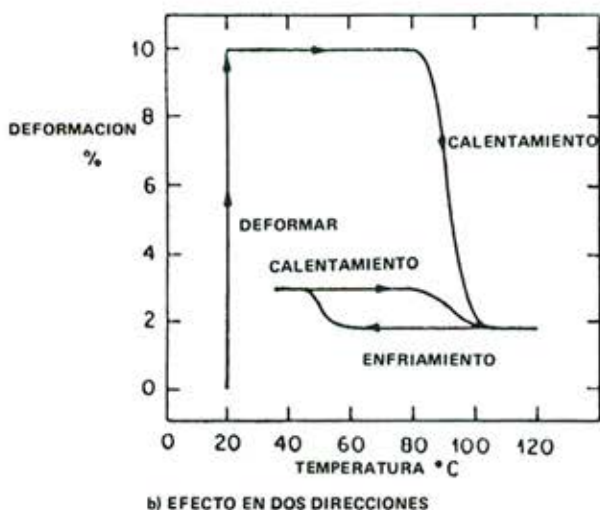
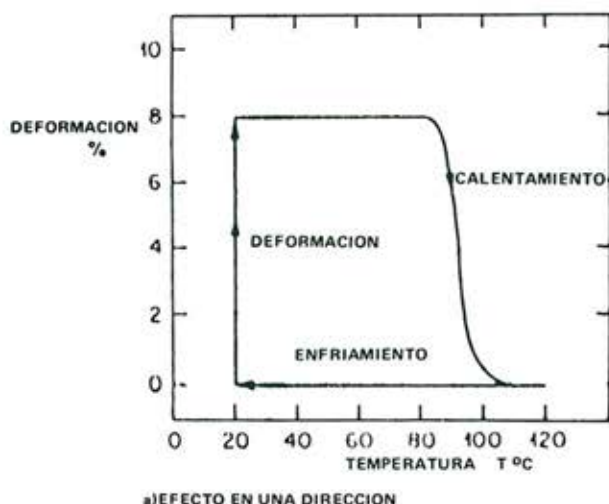


Figura 2: Deformación como función de la temperatura. a) Efecto en una dirección; b) En dos direcciones.

debe alcanzar una deformación crítica de 10%. En comparación con un bimetálico, se podría, según lo anterior, lograr un gran cambio de forma para un pequeño intervalo de temperatura. El cambio de forma al calentar se lleva a cabo, en una aleación con memoria Ni Ti, con un esfuerzo de 700 Nmm^{-2} . El comienzo de la transformación al calentar puede fluctuar, dependiendo de la aleación y composición, entre -180°C y $+150^\circ\text{C}$.

EFFECTO DEL MECANISMO

Transformación de la fase martensita.

Debido a que no todos los metales muestran un efecto de memoria, nos referiremos ahora a las propiedades que se requieren del material para alcanzar tal efecto. La exigencia fundamental es que la aleación deberá acusar una transformación martensítica.

La transformación martensítica se basa en un proceso de cizalle y toma lugar al disminuir la tempera-

tura. La relación entre la fase de alta temperatura, la que normalmente se le denomina austenita y la martensita se muestra esquemáticamente en la fig. 3. Al enfriar la red de la austenita se deforma por cizalle, en donde los átomos se mueven cooperativamente y por ello se origina la estructura de la nueva fase. Una consecuencia del movimiento cooperativo es que el sector del cristal que migra cambia su forma exterior. En el caso que un bloque, en el interior de un cristal, fuese cizallado homogéneamente al producirse el cambio de la estructura del cristal, aparecerán grandes cambios de forma y con ello también tensiones. No obstante para bajar la energía elástica a un mínimo se requiere que ocurra un segundo cizalle, por el cual la estructura cristalina permanece invariable y el cambio de forma será pequeño. Los dos cizalles posibles se

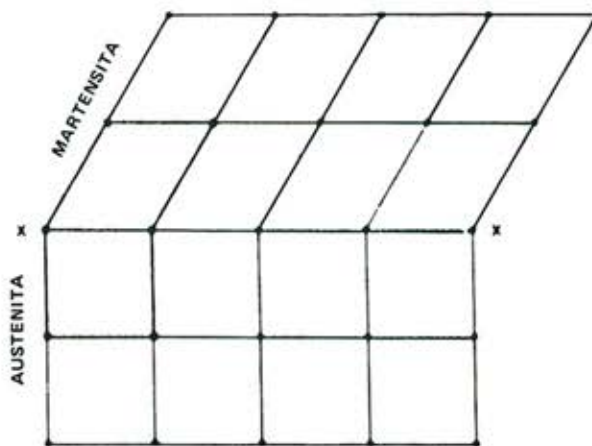


Figura 3: La relación entre la estructura de la fase austenita y martensita. Por medio de un cizalle paralelo a XX se producirá martensita.

observan en la fig. 4. En todo caso habrá siempre una pequeña diferencia de volumen entre las fases, y también en realidad, la transformación no es un proceso de cizallamiento puro, sino que una parte de los átomos tienen movimientos que no son paralelos a la dirección del cizalle. Se origina por ello una diferencia de volumen transversal a la superficie interfacial.

Al analizar la energía libre como función de la temperatura, fig. 5, observamos que a altas temperaturas la austenita posee la energía libre más baja y a bajas temperaturas la tendrá la martensita. A una temperatura T_0 las dos fases tendrán la misma energía libre, es decir, que una unidad de volumen de martensita estará en equilibrio termodinámico con una unidad de volumen de austenita. Cuando nosotros, al enfriar deseamos generar martensita en la austenita, debemos enfriar bajo T_0 , debido a que la diferencia de volumen debe proveernos la energía elástica, o dicho de otra manera, hay una energía de nucleación.

En la fig. 6 se observa la unidad en volumen de martensita como función de la temperatura. Podemos

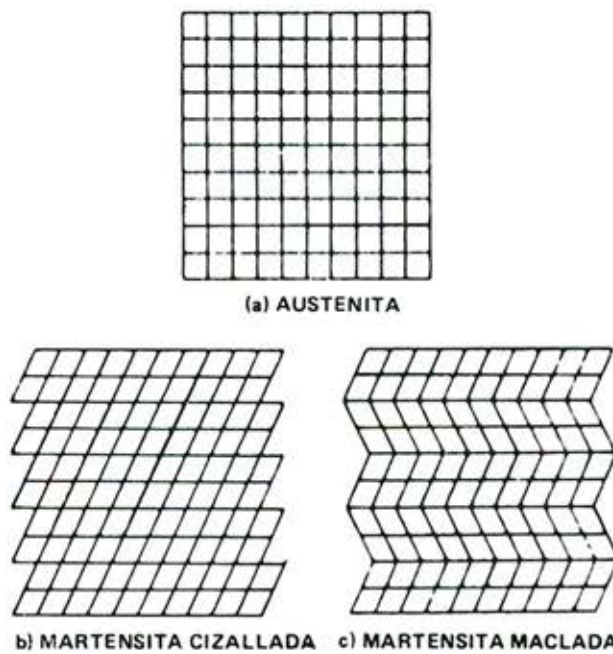


Figura 4: Los dos cizalles posibles con lo cual permanece inalterada la estructura de la martensita y el cambio de forma será pequeño.

ver que la austenita debe ser enfriada bajo T_0 antes de que se hayan formado núcleos de martensita. La martensita se producirá recién a una temperatura M_s y a M_f habrá finalizado la transformación, es decir, no habrá austenita remanente.

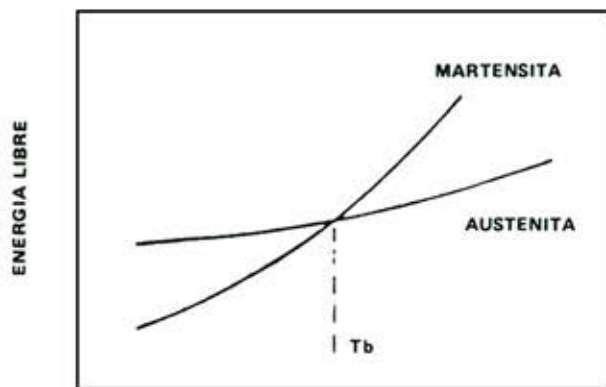


Figura 5: La energía libre en función de la temperatura para las dos fases (esquemático).

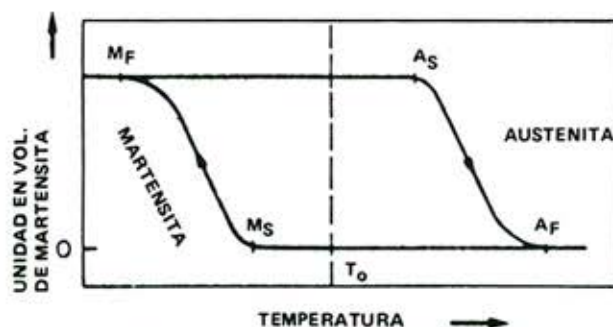


Figura 6. Unidad de volumen de martensita en función de la temperatura. Se produce un ciclo de histéresis.

Esta descripción es válida para todas las transformaciones martensíticas independientes de la aparición de un efecto de memoria. Para temperaturas ligeramente superiores a M_s , la tensión aportada puede contribuir a proveer la energía de nucleación para la martensita. Según eso, se puede, en un rango de temperatura sobre M_s , producirse martensita inducida por tensión, mientras que en ausencia de una tensión no se puede llegar a la formación de martensita.

Para aleaciones con memoria las restricciones cristalográficas constituyen el número de grados de libertad disponibles, de tal manera que al calentar la martensita sólo se podrá producir la orientación original de la austenita. En una martensita inducida por esfuerzo, se puede recuperar el cambio de forma producido por deformación, al calentar el material. El efecto de memoria se basa en la obtención de una nueva fase (martensita) por deformación y por la involución de la fase original por calentamiento (ver fig. 7).

Pero cuando la aleación está recién enfriada bajo M_f , se forman numerosas orientaciones de martensita, de manera que los cambios de forma son, en lo posible, pequeños. Debido a una deformación se favorecerá una orientación en la martensita y por medio de distintos mecanismos, entre otros un proceso de cizalle-maclado, toma lugar una reorientación, después de la cual sólo permanecen las orientaciones preferenciales. Al calentar, toma lugar al mismo tiempo, una transformación restauradora y un cambio de forma hasta que el cristal retorne a la orientación y forma original de la austenita (fig. 8).

Resumiendo: las principales exigencias para producir el efecto de memoria son:

a) El material debe sufrir una transformación martensítica. La diferencia de volumen entre las dos fases debe ser pequeña. Cuando esta diferencia es muy grande como por ejemplo; en aceros, entonces se producirán muchas dislocaciones para que ajuste la diferencia de volumen. Debido al fuerte aumento de la densidad de dislocaciones se compactará la martensita y ya no será posible una reorientación por la tensión aplicada. Para los aceros la transformación martensítica juega un papel primordial en el endurecimiento. En contraposición, la formación de martensita no nos conduce a ningún endurecimiento en las aleaciones con memoria, porque la diferencia de volumen es muy pequeña.

b) La estructura debe ser ordenada. En la transformación reversible de martensita a austenita el número de grados de libertad disponibles dependerá de las restricciones cristalográficas; además, sólo la orientación original de austenita podrá ser obtenida al calentarse. Durante la transformación reversible las direcciones de movimiento de los átomos no deberán ser arbitrarios, de lo contrario se tendrá un reordenamiento de la austenita.

Las exigencias anteriores son cumplidas por numerosas aleaciones, pero sólo aleaciones del tipo NiTi, CuZn y CuAl tienen importancia técnica. Las características de estas aleaciones se aprecian en la tabla 1.

Hasta el momento sólo hemos descrito el efecto en una dirección. Tal como se explicó antes, la deformación aplicada tendrá que ser sobre un valor crítico para que se produzca el efecto de dos direcciones.

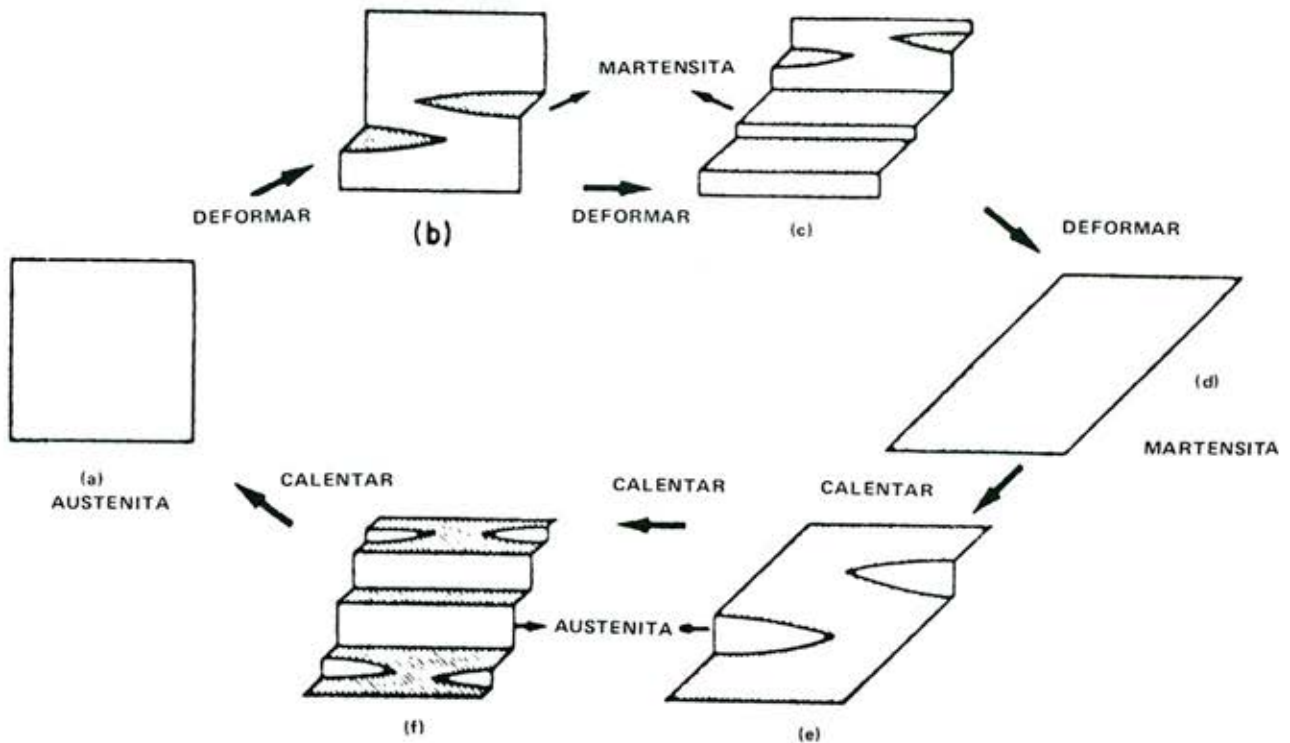


TABLA 1:
Propiedades de las aleaciones con memoria

Propiedades	NiTi	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Densidad (g/cm ³)	6,4 - 6,5	7,8 - 8,0	7,1 - 7,2
Conductividad eléctrica (10 ⁶ $\frac{S}{m}$)	1 - 1,5	8 - 13	7 - 9
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	800 - 1000	400 - 700	700 - 800
Alargamiento de ruptura (%)	40 - 50	10 - 15	5 - 6
Máx. temperatura A _s (°C)	120	120	170
Máx. efecto en una dirección (%)	8	4	5
Máx. efecto en dos direcciones (%)	5	1	1,2
Sobrecalentamiento hasta (°C)	400	160	300

Figura 7: Representación esquemática de la obtención de martensita por deformación e involución de la fase primitiva (y forma) por calentamiento.

En la fig. 9 se observa la curva esfuerzo—deformación para una aleación NiTi. A bajos esfuerzos se producirá una reorientación de la martensita, luego al aumentar el esfuerzo nuevamente y después del punto A, toma lugar una deformación plástica irreversible. Esta parte de deformación normal no será recuperada con un calentamiento; es decir, prevalece una deformación irreversible. Al enfriar nuevamente se favorece el campo de tensiones propias de las irregularidades de la estructura que producirá una involución en la orientación de la martensita, que a su vez, se debió a las tensiones originales aplicadas; esto producirá que al enfriar tome lugar un pequeño cambio de forma en dirección de la deformación original. En sucesivos ciclos térmicos se producirá un pequeño efecto en dos direcciones. Este efecto está esquematizado en la fig. 10.

COMPARACION CON UN BIMETAL

Un bimetálico es un elemento que entrega una determinada fuerza en función de la temperatura, lo cual lo hará reemplazable por una aleación con memoria.

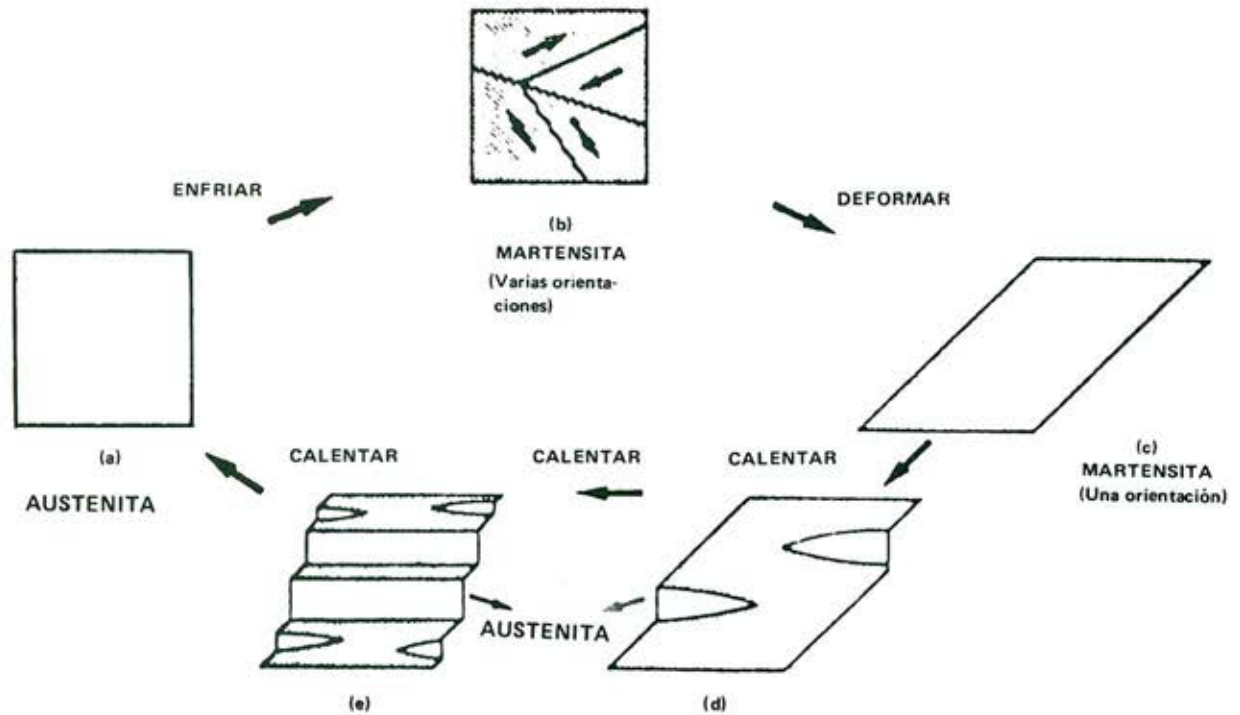


Figura 8: Representación esquemática de la reorientación de martensita por medio de una deformación e involución de la fase primitiva (y forma) por calentamiento.

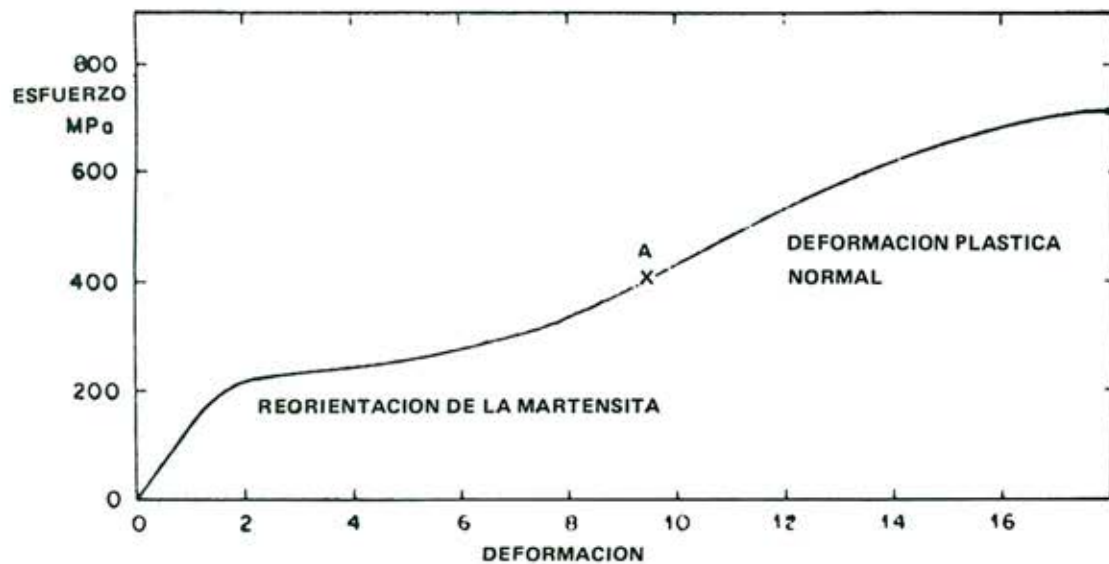


Figura 9: Curva esfuerzo-deformación para una aleación NiTi con $M_s \approx 70^\circ\text{C}$, a temperatura ambiente.

Existen, en todo caso, diferencias importantes entre ellos:

1. Las aleaciones con memoria proporcionan más trabajo por unidad de volumen (hasta un factor 100 o un factor 500 según el uso), lo que significa que puede utilizarse una menor masa que proporcionará el mismo trabajo que un bimetálico.

2. Distintos tipos de movimientos pueden ser utilizados con las aleaciones con memoria (a diferencia de sólo flexión en los bimetálicos) ya que dichas aleaciones pueden manufacturarse de distintas formas.

3. El trabajo en una aleación con memoria es realizado en un pequeño intervalo de temperatura, mientras que un bimetálico el trabajo es proporcional a

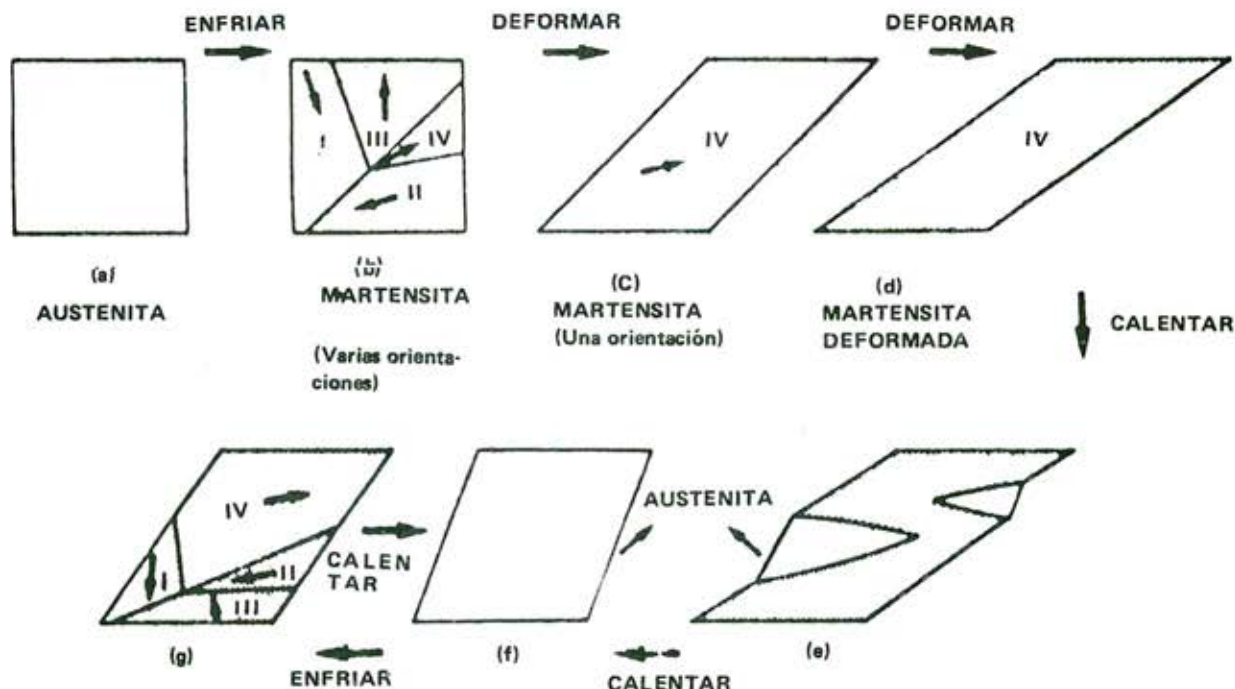


Figura 10: Representación esquemática del efecto en dos direcciones para el caso de una martensita tensionada y reorientada (análogo a la fig. 7, se puede producir el efecto de dos direcciones cuando la martensita se obtiene por deformación). Después de la reorientación (c) se seguirá deformando, y al calentar permanece esta deformación como austenita (comparar a y f). Al enfriar se producirá con una orientación de martensítica, la que fue obtenida por una tensión de reorientación y así obtenemos un cambio de forma (comparar b y g).

la diferencia al cuadrado entre la temperatura del bimetálico y la ambiente.

APLICACIONES DE LAS ALEACIONES CON MEMORIA

Las aleaciones con memoria pueden dar origen a productos cuyos usos abarcan gran variedad de mercados. La real potencialidad de estas aleaciones no se conoce, ya que sus usos han empezado a desarrollarse y diversificarse sólo en los últimos años.

Normalmente estas aleaciones con memoria son utilizadas, en forma de resortes. Este se expande al calentarse por sobre la temperatura de transición (la cual es función de la composición de la aleación) y se contrae al enfriarse por debajo de dicha temperatura. También estas aleaciones pueden ser manufacturadas en otras formas; por ej. como simples actuadores lineales, utilizándolas en funciones tales como: dispositivo para abrir y cerrar ventanas de invernaderos, reguladores de ductos de aire, puertas de seguridad contra fuego y muchos otros usos como controladores de temperatura.

La industria automotriz representa un vasto mercado potencial para las aleaciones con memoria, diseñándose, p. ej., un ventilador de automóvil cuya velo-

cidad de rotación es proporcional al enfriamiento demandado, y válvulas de control de combustible en motores diésel, sistemas en los cuales los cambios de temperatura activan los mecanismos gracias al efecto de memoria. Pero, no sólo en dispositivos, válvulas y mecanismos en general puede ser usada esta propiedad, ya que es posible la fabricación de materiales para usos específicos a partir de aleaciones con el efecto de memoria. Una muestra de ello es la utilización de remaches (con memoria en una dirección) que ajustan al ser calentadas sus cabezas, y son especialmente empleables cuando es difícil fijar los remaches convencionales.

Otros usos relevantes se encuentran en todos los tipos de sistema para alerta, control y regulación, los cuales se activan térmicamente. Algunos ejemplos son:

Sensores de temperatura

— Indicador de temperatura en estanques de electrólisis.

En la electrorrefinación de metales, la detección de cortocircuitos es efectuada por un equipo termográfico infrarrojo.

Sin embargo, este medio de detección no es factible en pequeños estanques, así como en celdas de electroobtención, en las que los accidentes térmicos

son muy frecuentes, especialmente en la puesta en marcha de ellas. Un dispositivo dotado del efecto de memoria representa una buena solución.

— Válvulas de seguridad para líneas de gas

Un mecanismo de seguridad activado con un resorte con efecto de memoria en su posición de equilibrio, permitirá flujo constante de gas, pero cualquier variación de temperatura sobre el nivel activa el resorte, expandiéndolo, y produciendo el cierre de la válvula.

APLICACIONES MEDICAS

Las aleaciones con memoria pueden ser convenientemente utilizadas en el campo de la ortopedia, en la fabricación de equipos para ejercicios ki-

nesiterápicos de músculos y articulaciones, los cuales funcionan por conducción alternada de agua caliente y fría.

BIBLIOGRAFIA

1. L. Mc Donald Schetky, "Shape Memory Effect Alloys". Canadian Copper N° 90, p. 22. Fall 82.
2. P. Tautzenberger y D. Stöckel, "Bauteile mit Formgedächtniseffekt". Konstruktion Elemente Methoden, octubre 1983, año 20. p. 69.
3. W. Vermeersch, "Proteus Shape Memory alloy Applications", Copper'83 Royal Lancaster Hotel, London, 1 - 2 Nov. 1983, P. 39.1.
4. K.N. Melton y O. Mercier, "Mechanismus und Anwendungen des Formgedächtniseffektes", Material + Technik, 6 (1978), Nr. 2, p. 59.

BREVISIMO

ALUMNOS DISTINGUIDOS

La Facultad distinguió a Mario García Alvarado, de la carrera de Ingeniería Civil Metalúrgica y a Carlos San Martín Ayala, de la carrera de Ingeniería de Ejecución Mecánica, como los mejores alumnos de la Facultad. Además, el ingeniero García Alvarado recibió un premio especial por su rendimiento académico y cualidades personales, de la Fundación Enrique Froemel.

La entidad antes mencionada también otorgó premios a los estudiantes destacados en cada especialidad en el orden que sigue:

Ingeniería Eléctrica: Esteban Vuchetich de Cheney Chirino.

Ingeniería Industrial: Miguel González Lorenzo.

Ingeniería Mecánica: Eduardo Astorquiza Becker.

Ingeniería Metalúrgica: Luis Manzor Pavez.

Alumnos de la promoción 1985-1986, durante la ceremonia de graduación

Ingeniería de Minas: René Oliva Saldías.

Ingeniería en Obras Civiles: Pedro Bernabé Alday.

Ingeniería Química: Luz Olcese Garcés.



