



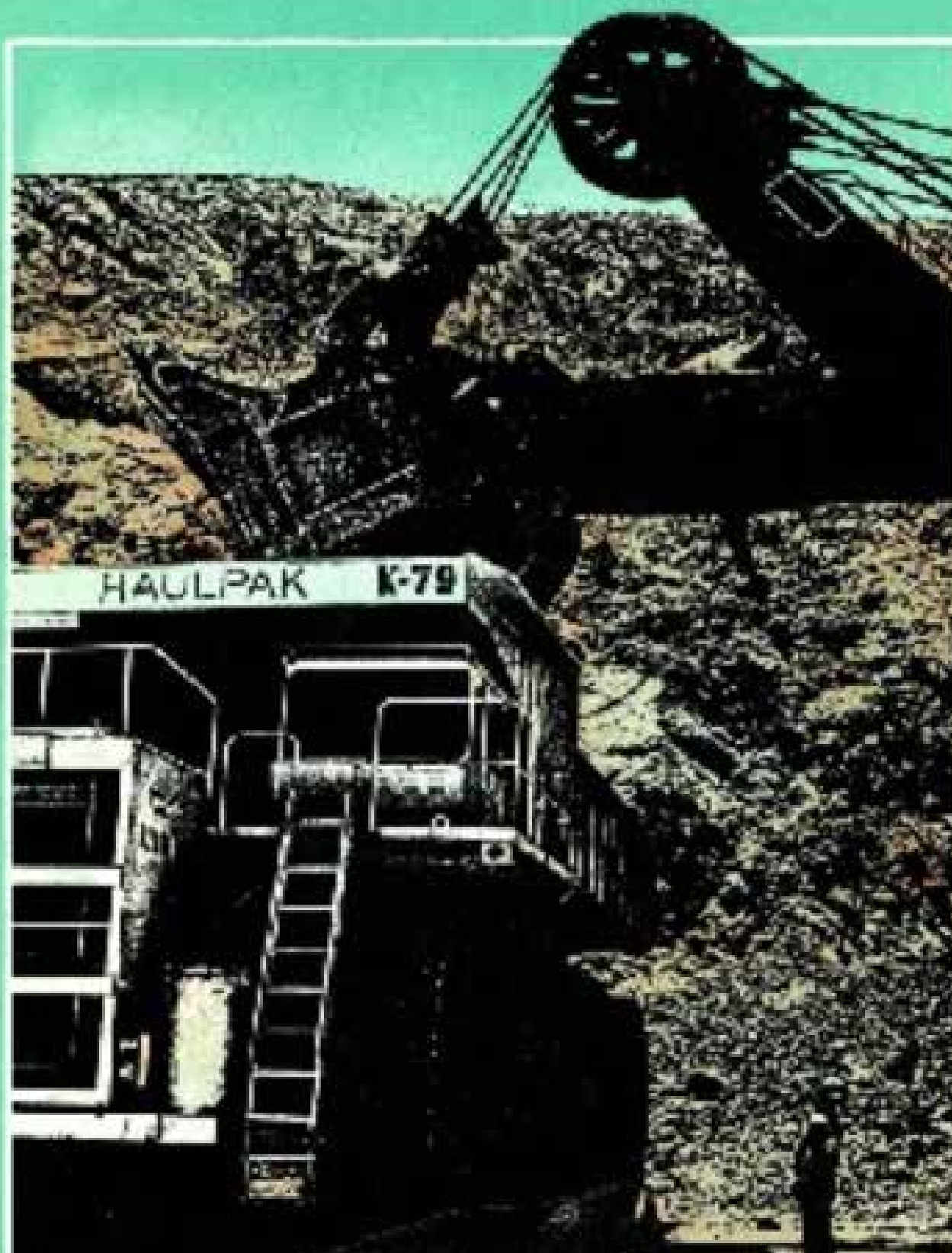
REMETALLICA

REVISTA DEL DEPARTAMENTO DE METALLURGIA
OPERACIONES DE FUNDICIÓN DE METALES — CATORCEavo NÚMERO

NOVIEMBRE 1982

SANTIAGO-CHILE

Nº 1



Chile es un país esencialmente minero". Esta frase ha tomado ya entre nosotros un carácter mitológico. Se está tan convencido de la certeza de su contenido, que todos piensan que seguramente habrá mucha gente preocupada del desarrollo permanente de la minería y la metalurgia de las riquezas minerales que nuestro país tiene.

Como el fruto de la explotación de las riquezas minerales chilenas lo disfrutamos todos, nadie puede permanecer indiferente o ajeno a su cuota de responsabilidad en contribuir donde y cuando sea posible al avance del desarrollo minero y metalúrgico chileno.

El presente número de REMETALLICA ha querido dar la debida relevancia al tema de "LAS INVERSIONES EN LA MINERIA DEL COBRE", por las consecuencias y los resultados que se esperan de todas estas operaciones financieras.

Deseamos agradecer a través de esta Editorial en forma muy particular al Sr. Ex-Ministro de Minería, don José Piñera Echenique, al Sr. Director Técnico de la Comisión Chilena del Cobre, Dr. Guillermo Ugarte Alvarez, y a los distinguidos colegas, quienes con sus excelentes artículos han permitido dar forma a la parte medular de REMETALLICA Nº 4.

A su vez el Directorio de Redacción de la revista desea dejar constancia aquí de la gratitud hacia sus lectores por la gran cantidad de felicitaciones y comunicaciones de estímulo que nos han hecho llegar.

REMETALLICA es esencialmente un órgano de comunicación, diálogo y contacto entre el Departamento de Metalurgia USACH, y la comunidad minero-metalúrgica chilena, por ello constituye una tribuna técnica donde Uds., nuestros queridos lectores, pueden tener mucho que transmitir al resto. Una vez más invitamos cordialmente a nuestros lectores que se integren a REMETALLICA a través de sus artículos, sus comentarios, sus críticas, su apoyo económico en el avisaje, o en cualquier gestión que permita un mejoramiento en los objetivos de la revista.

INGENIERIA, ENERGIA Y DESARROLLO



Raúl Smith Fontana
Decano
Facultad de Ingeniería

1. PANORAMA ENERGETICO MUNDIAL

1.1. Oferta y Demanda de Energía

Varias son las estimaciones y proyecciones de oferta y demanda de energía que han sido realizadas, publicadas y comentadas por diferentes organismos especializados.

En general, todos estos trabajos tratan de determinar, o al menos insinuar:

"Qué tan grande será el déficit de energía alrededor del año 2000 y cómo puede estimarse su proyección más allá de esa fecha".

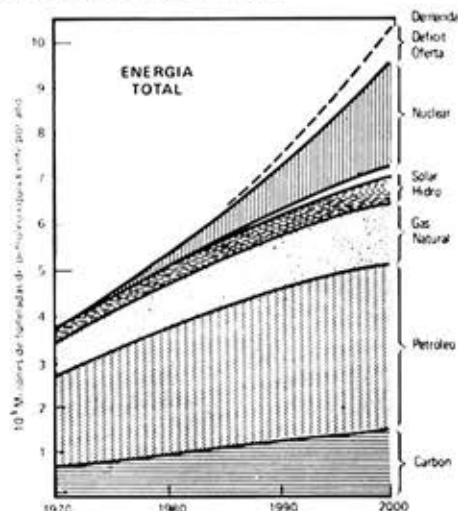


Fig. 1

La figura 1 corresponde a una de las tantas proyecciones globales de Energía Total que asume

ciertas condiciones que podrían ser no suficientes y por consiguiente agudizar el déficit de energía:

- No habrá grandes restricciones en la comercialización internacional de energía. En particular, los principales países exportadores de petróleo no fijarán cantidades límites, como asimismo el carbón se comercializará sin estas restricciones.
- Se considera un crecimiento promedio del PGB de un 4% anual.
- Existe un condicionamiento al parecer transitorio al desarrollo de las instalaciones nucleares.
- Existen y existirán limitaciones para el financiamiento de las instalaciones energéticas.

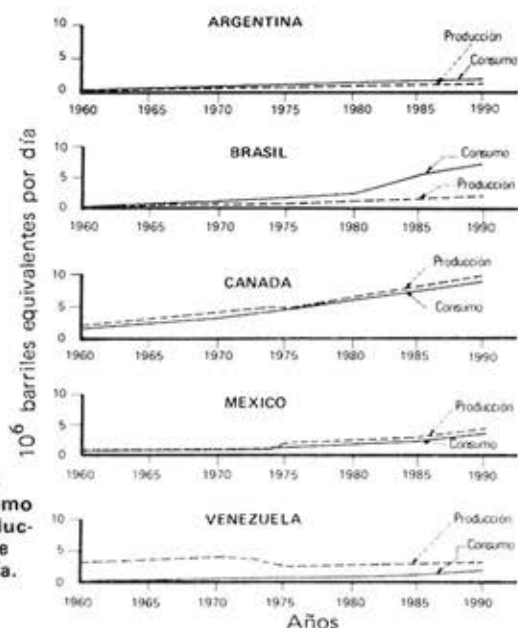
La figura 2 presenta a nivel regional algunas estimaciones de Consumo y Producción de Energía para 5 países ejemplares.

Se ha escogido a Argentina y Brasil como dos países en que la producción es menor que el consumo. A este mismo grupo se asimila Chile y U.S.A. Otros tres países, como ser Canadá, México y Venezuela presentan producciones de energía mayores que sus consumos.

En general, los países mencionados continuarán en su condición de importadores o exportadores de energía probablemente por un largo tiempo.

En particular, como el déficit mundial de energía se prevé cada vez mayor, los países energéticamente dependientes acrecentarán su condición de tal, salvo que descubran nuevos recursos y desarrollen una política energética adecuada.

* Primera parte de la charla dictada, con motivo de las actividades conmemorativas del IX Aniversario de la Facultad de Ingeniería.



1.2. Recursos Energéticos

Generalizaremos el concepto de Recursos Energéticos haciendo caso omiso de la discutida clasificación de recursos energéticos renovables y no renovables, terminología empleada que produce confusión, especialmente cuando se refiere a su cantidad, calidad y economía relacionada.

Para comprender la complejidad de la información y necesaria homogeneidad de datos que permita su comparación, sería útil que todos los recursos, como ser uranio, carbón, petróleo, gas, geotérmico, solar y otros menos representativos, pudieran cuantificarse de acuerdo a la clasificación del cuadro N° 1 (Mc. Kelvey Box).



Es comprensible el grado de dificultad y la magnitud del esfuerzo necesario para conseguir esta información.

En vez de comentar la información que se encuentra disponible sobre este tema en las innume-

rables publicaciones que existen, se tratará de mostrar que un análisis global de los recursos energéticos nos establece que el hombre tiene a su disposición una cuantiosa energía y que lo verdaderamente importante es generar las políticas y estrategias que le permitan desarrollar las tecnologías para que esta energía esté oportunamente al servicio de la humanidad.

En el año 1975 en el mundo se utilizaron 8 Terawatt (TW) de energía o equivalentemente 2 Kilo-watt por persona. (Petróleo 3,8 TW; Carbón 2,2 TW; Gas 1,4 TW. El resto fue suministrado por Hidro 0,6 TW; Nuclear 0,07 TW y cantidades no significativas de madera, eólica, geotérmica y solar).

Para comprender el significado real de estos 8 TW-año conviene compararlos con las estimaciones mundiales de recursos energéticos. (Tabla 1).

TABLA N° 1
RECURSOS ENERGÉTICOS MUNDIALES ESTIMADOS
(TERA WATT-AÑO, TWA)

CARBON	TWA	TNS. EQUIVALENTE
Total	7×10^4	$3,2 \times 10^4$
Recuperable (US\$ 50/T)	1×10^4	$0,5 \times 10^4$
PETROLEO		
< US\$ 25/barril petróleo-equivalente	$0,8 \times 10^4$	$0,2 \times 10^4$
GAS		
< US\$ 25/barril petróleo-equivalente	$0,4 \times 10^4$	$0,29 \times 10^4$
URANIO		
Reactores térmicos < US\$ 130/kg	$0,1 \times 10^4$ a	
	5×10^4	
URANIO		
Reactores reproductores	→ =	

1 TWA Carbón = $1,5 \times 10^8$ bps; 1 TWA Petróleo = 5×10^8 bps;
1 TWA Gas = 10^8 M³

FLUJOS DE ENERGÍA NATURAL, TW

Radiación solar en la superficie de la tierra	120 000
Viento, olas, corrientes oceánicas	375
Fotovoltaicos	40
Gradiente geotérmico en la tierra	8

Estas energías se reconocen como "SOFT ENERGIES", su forma de flujo hace que estén presentes en la naturaleza muy poco concentradas y su captación para aprovechamiento pueda hacerse en forma muy limitada y circunstancial.

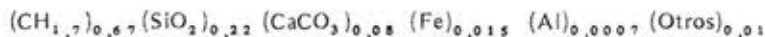
Es razonable pensar que como el esfuerzo en exploración de recursos se ha realizado fundamentalmente en U.S.A., deberían encontrarse nuevas fuentes en el futuro. Como por ejemplo, en U.S.A. se han perforado $2,6 \times 10^6$ orificios en la exploración de petróleo mientras que en el resto del mundo la cifra es de $0,7 \times 10^6$.

Para entender mejor estas cifras, es preciso reconocer que la energía es sólo uno de los recursos que el hombre puede extraer de la tierra.

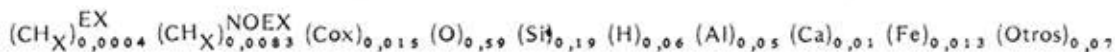
Como ejemplo, consideremos una molécula de mineral que el hombre extrae de la tierra para uso de su civilización industrial, y llamemos a este mineral hipotético "DEMANDITA". Consideremos además la composición de una molécula promedio de la corteza terrestre. (Tabla 2). La comparación de estas moléculas nos dice que existirá una crisis de combustibles fósiles probablemente en 200 a 300 años, y que por otra parte nunca llegará a faltar silicio, calcio, aluminio, fierro y otros.

Tabla Nº 2

COMPOSICION MOLECULA HIPOTETICA DEMANDITA
(Mineral promedio para uso de la civilización industrial)



COMPOSICION MOLECULA HIPOTETICA CORTEZA TERRESTRE
(Mineral promedio contenido en la corteza terrestre)



EX: Extraíble
NO EX: No Extraíble
OX: Oxidado

CH_X : CH → Carbón
 CH_2 → Petróleo
 CH_4 → Gas

Como consecuencia puede inferirse que la crisis energética actual, si así conviniésemos llamarla, es realmente una crisis económica, iniciada por una subida muy rápida de los precios de la energía relacionados con los sistemas energéticos de uso intensivo de capital cuyo origen tiene raíces en aspectos socio-económicos con repercusiones político-estratégicas de desarrollo.

Si para el año 2025 se asume una demanda de energía de 30 TW-año estimada fundamentalmente por el incremento de la población y por el incremento del PGB, aun cuando algunos países desarrollados tiendan a estabilizar estas relaciones, parecería ser claro que eventuales crisis energéticas no tendrán base en escasez absoluta de estos recursos, sino que en el manejo político-estratégico que se haga de ellos. Resulta razonable entonces estar al alcance de las tecnologías más sofisticadas con la experiencia del manejo y gestión para poder aprovechar estos recursos y no sólo limitarse al uso de las más tradicionales.

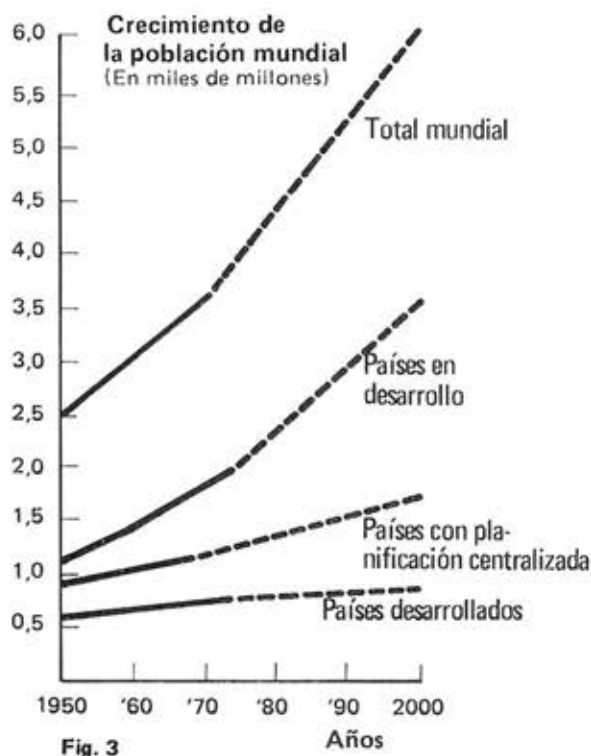
1.3. Crecimiento de la Población y el Producto Geográfico Bruto (P.G.B.).

La población, la fuerza de trabajo, la calidad y estilo de vida, y la conservación de energía, son aspectos claves que proyectan el consumo de energía per-cápita.

Estos conceptos establecen una serie de parámetros que permiten el requerimiento futuro de energía. Probablemente el crecimiento de la población y el producto geográfico bruto son los más utilizados para las estimaciones globales y al mismo tiempo como indicadores de desarrollo económico.

Los países en desarrollo tienen tasas muy altas de crecimiento de población, a diferencia de los

países desarrollados que tienden al crecimiento cero. (Figura 3).



Por otra parte el PGB tiende también a estabilizarse en un crecimiento cero para aquellos países desarrollados que en promedio consideran satisfechas sus aspiraciones materiales, mientras que los países en desarrollo aspiran a elevar estos valores.

En términos de tasas de crecimiento de la demanda energética per-cápita se han establecido tendencias hacia el año 2000, cuyas tasas promedios corresponden a 0% para países desarrollados y 4,83% para países en desarrollo.

Esto significa que los mayores esfuerzos deben ser realizados por los países en desarrollo. Obviamente el concepto de "esfuerzo" tiene aquí especial significación en la incorporación de las nuevas tecnologías y nuevos recursos energéticos.

1.4. Inercia Energética, Impacto.

"Mientras más rápido se desarrolla un proceso, éste genera una entropía mayor y se hace más irreversible".

"El equilibrio termodinámico requiere un máximo de eficiencia en cada etapa y esto es sólo posible si el proceso se desarrolla lentamente".

Estos principios termodinámicos pueden ser globalmente aplicables a los procesos de desarrollo de las energías, en particular cuando en ellos intervienen nuevas tecnologías.

En la práctica la situación es más complicada, ya que la inercia natural a continuar por el desarrollo tradicional puede oscurecer las verdaderas fronteras y no dejar ver con claridad el impacto que producen las nuevas tecnologías.

La figura 4 muestra una configuración idealizada de Energía-PGB en su evolución en tiempo que podría ser representativa de un país en desarrollo.

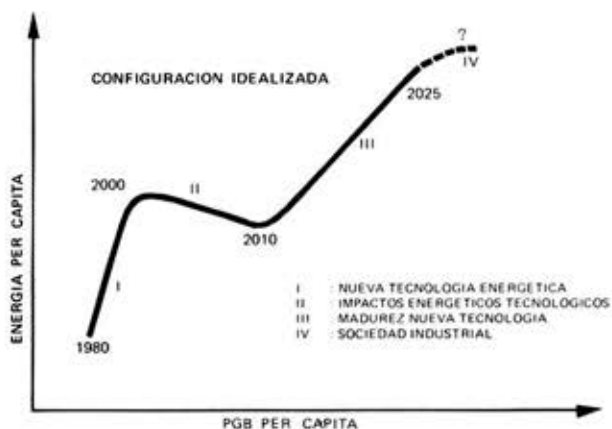


Fig. 4

Parece razonable pensar que en la medida que una nueva tecnología se retrase en su iniciación, la representación de la curva debe aplanarse y el efecto tiempo alargarse notablemente.

No realizar el "esfuerzo" de incorporar sin retraso una nueva tecnología o nuevos recursos significa paralizar de alguna manera el proceso de desarrollo, ya que alcanzar niveles aceptables en la transferencia tecnológica de países desarrollados a países en desarrollo, tiene su tiempo y oportunidad.

Los países en desarrollo no pueden permitirse las cuantiosas inversiones en investigación ni esca-

lación de prototipos de generación energética, sin embargo, deben estar preparados para incorporar estas tecnologías, porque las repercusiones futuras significarán con toda seguridad condiciones muy difíciles de evaluar "culturalmente", por decirlo con una palabra.

1.5. Interacciones: Energía - Sociedad - Medio Ambiente.

En la 11ª Conferencia Mundial de la Energía realizada en Múnich del 8 al 12 de Septiembre de 1980 se utilizó un interesante diagrama de Venn para simbolizar y organizar el desarrollo y discusión de los temas presentados. (Figura 5).

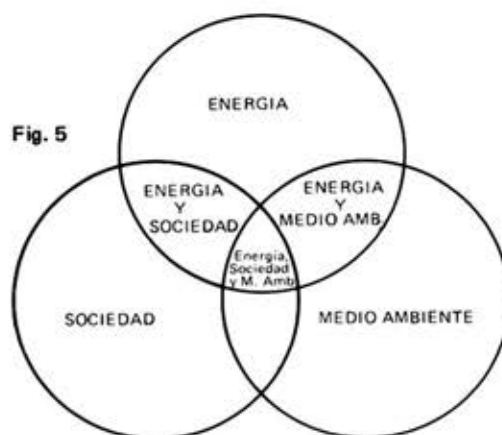


Fig. 5

Energía, Sociedad y Medio Ambiente son los tres elementos principales que interactúan mutuamente.

La complejidad de los problemas que se presentan por esta interacción no son de carácter exclusivamente técnico, sin embargo, no podremos construir, desarrollar y evolucionar una sociedad si no tenemos la energía necesaria y a su vez esta disponibilidad la realizamos conservando razonablemente el medio en que vivimos.

2. ASPECTOS ENERGÉTICOS REGIONALES: RESERVAS, RECURSOS Y CAPACIDAD ENERGÉTICA

2.1. Petróleo.

La tabla Nº 3 muestra las reservas de petróleo y gas. América Latina posee 69.650 millones de barriles y 159.811×10^9 pies cúbicos de gas natural, esto equivale al 10,72 y 6,07% del total mundial, respectivamente.

TABLA Nº 3
Reservas Mundiales de Petróleo y Gas al 1º de Enero/81

ZONA GEOGRAFICA	MMB PETROLEO	%	x 10 ³ PIES ³ GAS	%
TOTAL	648,523.8	100	2,638,501	100
Asia Pacífico	19,630	3.03	126,290	4.78
Europa Occidental	23,085	3.56	159,315	6.04
Medio Oriente	362,071	55.83	752,415	28.51
Africa	55,148	8.57	208,470	7.90
China*	20,500	3.17	24,500	.93
URSS y otros*	65,800	10.12	929,400	35.22
Canadá	6,400	0.99	87,300	3.31
EUA	26,400	4.06	191,000	7.24
América Latina	69,650.8	10.72	159,811	6.07
México	44,161	63.41	64,500	40.36
Venezuela	17,950	25.77	42,000	26.28
Argentina	2,457	3.54	22,000	13.76
Brasil	1,300	1.87	1,500	.94
Ecuador	1,100	1.58	4,000	2.51
Colombia	800	1.15	6,000	3.76
Trinidad T.	700	1.00	12,000	7.51
Perú	650	1.93	1,100	.69
Chile	400	.57	2,500	1.56
Bolivia	112	.16	4,200	2.63
Guatemala	20	.02	10	
Barbados	.8		1	
	69,650.8	100.0%	159,811	100.0

* China, incluye en todas las tablas: Vietnam, Camboya, Tailandia, Corea del Norte y Laos.
* URSS, incluye en todas las tablas: todos los países del COMECON.

La tabla Nº 4 indica que América Latina posee un índice muy bajo de habitantes por Km. cuadrado.

TABLA Nº 4
POBLACION Y TERRITORIO
x 10⁶ x 10³

ZONA GEOGRAFICA	POBLACION	%	TERRITORIO km ²	%	Hab./km ²
Asia Pacífico	1,556	32.90	15,833	13.03	98.27
Europa Occidental	369	7.80	3,811	3.14	96.82
Medio Oriente	121	2.55	5,855	4.82	20.67
Africa	364	7.69	20,862	17.17	17.45
China (1)	1,351	28.57	11,875	9.78	113.77
U.R.S.S. (2)	384	8.11	23,637	19.46	16.25
E.U.A.	222	4.69	9,363	7.71	23.71
Canadá	23	.49	9,976	8.21	2.31
América Latina	351	7.20	20,257	16.68	17.32
	4,741	100.00	121,469	100.00	25.62

La tabla Nº 5 reúne las dos anteriores, puede observarse los barriles de petróleo por habitante que tiene cada una de las regiones del mundo. Se han sumado las reservas de gas convertidas a barriles de petróleo (5882 pie cúbico por cada barril de petróleo).

TABLA Nº 5
RESERVAS POR HABITANTE

ZONA GEOGRAFICA	MMB PETROLEO	MMB Gas Nat.	MMB Total	Hab. x 10 ⁶	B/Hab.
TOTAL	648,523.8	448,571	1,097,094.8	4,741	231.4
Asia Pacífico	19,630	21,470	41,100	1,556	26.4
Europa Occidental	23,085	27,085	50,170	369	136.0
Medio Oriente	362,071	127,918	489,989	121	4,050.6
Africa	55,148	35,442	90,590	364	248.9
China (1)	20,500	4,165	24,665	1,351	18.3
U.R.S.S. y otros	65,800	158,007	223,807	384	582.8
Canadá	6,400	14,842	21,242	23	923.6
E.U.A.	26,400	32,472	58,872	222	265.2
América Latina	69,650.8	27,170	96,820.8	351	275.8
México	44,161	10,968	55,129	68,406	805.9
Venezuela	17,950	7,141	25,091	13,155	1,907.3
Argentina	2,457	3,740	6,197	27,241	227.5
Brasil	1,300	255	1,555	117,671	13.2
Ecuador	1,100	680	1,780	7,686	231.6
Colombia	800	1,020	1,820	25,867	70.4
Trinidad T.	700	2,040	2,740	1,200	2,283.3
Perú	650	187	837	18,836	44.4
Chile	400	425	825	11,104	74.3
Bolivia	112	714	826	5,137	160.8
Guatemala	20	1	21	6,622	3.2
Barbados	.8		.8	265	2.9
	69,650.8	5,411	10,416.8	188,770	55.2

La tabla Nº 6 estima la relación de las reservas versus el consumo donde se ha asumido que los países en desarrollo consumirán más petróleo debido a su crecimiento demográfico e industrial (50/o acumulativo anual).

TABLA Nº 6
1980

	Consumo MBPD	Consumo MMBPA	Reserva MMB	Duración Años
TOTAL MUNDO	61,705	22,522	1,097,095	48.7
Asia Pacífico	9,015	3,290	41,100	12.5
Europa Occidental	14,015	5,115	50,170	9.8
Medio Oriente	1,630	595	489,989	823.5
Africa	1,485	542	90,590	167.1
China	1,770	646	24,665	38.2
U.R.S.S.	10,935	3,991	223,807	56.1
Canadá	1,855	677	21,242	31.4
E.U.A.	16,930	6,179	58,872	9.5
América Latina	4,610	1,683	96,821	57.5
México	1,210	441.65	55,129	124.8
Venezuela	353	126.85	25,091	194.7
Argentina	672	245.28	6,197	25.3
Brasil	1,401	514.65	1,555	3.0
Ecuador	78	28.47	1,780	62.5
Colombia	198	72.27	1,820	25.2
Trinidad T.	78	28.47	2,740	96.2
Perú	168	61.32	837	13.6
Chile	173	63.15	825	13.1
Bolivia	30	10.95	826	75.4
Guatemala	20	7.30	21	2.9
Barbados	3	1.10	1	1.0
Resto	4,384	903.75	104,19	8.7
	226	82.49		

La tabla Nº 7 muestra la capacidad instalada de refinación.

Es interesante señalar que recientemente se ha presentado una teoría de "Deep Gas", la cual está sustentada en varias comprobaciones científicas, pero quedando aún mucho por prospectar e investigar.

TABLA Nº 7
CAPACIDAD DE REFINACION

ZONA GEOGRAFICA	Nº de Refinerías	%	Crudo BD	%
TOTAL	847	100.00	79'563,841	100.00
Asia Pacífico	107	12.63	10'386,375	13.05
Europa Occidental	162	19.13	20'243,747	25.44
Medio Oriente	35	4.13	3'518,080	4.42
Africa	40	4.72	1'666,108	2.10
China	20	2.36	1'600,000	2.01
U.R.S.S.	70	8.26	13'746,000	17.28
Canadá	37	4.37	2'222,100	2.80
E.U.A.	295	34.84	19'523,700	24.53
América Latina	81	9.56	6'657,731	8.37
Venezuela	12		1'445,500	21.62
México	10		1'393,500	21.12
Brasil	11		1'205,000	18.00
Argentina	12		676,150	10.15
Bahamas	2		503,000	7.56
Trinidad T.	2		456,000	6.85
Colombia	6		193,500	2.91
Perú	5		170,100	2.55
Chile	2		139,230	2.09
Panamá	1		100,000	1.50
Bolivia	4		74,300	1.13
Ecuador	4		86,090	1.29
Costa Rica	1		11,000	0.16
El Salvador	1		16,000	0.24
Guatemala	1		16,000	0.24
Honduras	1		14,000	0.21
Jamaica	1		48,000	0.72
Nicaragua	1		14,400	0.22
Paraguay	1		7,500	0.11
Rep. Dominicana	2		48,461	0.73
Uruguay	1		40,000	0.60

2.2. Carbón.

La tabla N° 8 nos muestra que la América Latina tiene únicamente el 0,30/o de las reservas mundiales; de este porcentaje tan pequeño, Brasil Colombia, México y Chile poseen el 90/o.

TABLA N° 8
RESERVAS MUNDIALES DE CARBON
(Millones de tons.)

ZONA GEOGRAFICA

TOTAL	10'125,264	100.0
Asia Pacífico	334,600	3.3
Europa Occidental	534,339	5.2
Medio Oriente	---	---
Africa	115,338	1.1
China	1'438,045	14.2
U.R.S.S.	4'985,500	49.3
Canadá	115,352	1.2
E.U.A.	2'570,398	25.4
América Latina	31,692	0.3
Brasil	10,082	100.0
Colombia	8,318	26.3
México	5,448	17.2
Chile	4,585	14.5
Venezuela	1,630	5.1
Perú	1,122	3.5
Otros	507	1.6

2.3. Geotermia.

La tabla N° 9 nos indica que Latino América cuenta con el 9,48/o del total de generación. Únicamente dos países, El Salvador y México generan esta energía. Nicaragua, Costa Rica y Chile tienen planificado hacerlo y están desarrollando proyectos.

TABLA N° 9
GEOTERMICA EN MW.
CAPACIDAD INSTALADA

	1980	%	1985	%	1990
E. U. A.	1.000	46,17	2.000	37,50	---
México	150	6,76	450	8,46	1.240
El Salvador	60	2,72	100	1,87	---
Nicaragua	---	---	200	3,75	---
Costa Rica	---	---	40	0,75	80
Chile	---	---	30	0,56	110
Italia	455	20,55	480	9,03	---
Nueva Zelanda	200	9,03	272	5,11	---
Japón	220	9,94	1.000	18,80	6.050
Islandia	60	2,72	100	1,87	---
Filipinas	60	2,72	440	8,27	---
U.R.S.S.	5	0,22	25	0,47	200
China	3	0,13	50	0,94	---
Turquía	1	0,04	15	0,27	15
Indonesia	---	---	125	2,35	---
TOTAL	2.214	100,00	5.317	100,00	---

2.4. Hidráulica.

La tabla N° 10 indica que América Latina posee el 11,76/o del potencial teórico y que está

utilizando sólo una pequeña parte de lo que realmente puede utilizarse del potencial teórico.

TABLA N° 10
POTENCIAL HIDROELECTRICO
EN kWh x 10¹²

ZONA GEOGRAFICA	Potencia Teórica	%	Potencia usable	%	Potencia usada	%
Asia Pacífico	1,50	3,11	0,39	2,01	0,059	1,84
Europa Occidental	4,36	9,04	1,43	7,37	0,842	26,23
Medio Oriente	---	---	---	---	---	---
Africa	10,118	20,98	3,14	16,19	0,151	4,70
China	3,94	8,17	2,19	11,29	0,265	8,26
U.R.S.S.	16,480	34,19	5,34	27,55	0,465	14,49
América del Norte	6,15	12,75	3,12	16,09	1,129	36,17
América Latina	5,67	11,76	3,78	19,50	0,299	9,31
	48,224	100,00	19,39	100,0	3,210	100,00

Es sabido que Chile está especialmente privilegiado por su potencial teórico, sin embargo, la geografía y clima deja disponible económicamente sólo una fracción menor.

La tabla N° 11 nos muestra la capacidad instalada de energía por habitante. La disponibilidad en Watts/habitante de América Latina en 1972 era 6 veces menos que Japón y 18,24 veces menos que Canadá.

TABLA N° 11
CAPACIDAD INSTALADA
WATTS x HABS.

PAIS SELECCIONADO	1972	1974	1977	1980*
Australia	1225	1391	1461	1534
India	28	31	45	65
Japón	627	839	958	1093
Canadá	1916	2306	2703	3168
E. U. A.	1774	2246	2569	2942
U.R.S.S.	627	727	833	954
América Latina	105	132	157	175

* Datos preliminares.

Nuevos conceptos de conservación de energía muestran tendencia hacia una mayor electrificación en el consumo doméstico y lo que es más significativo, se están realizando estudios que generan todo un nuevo concepto de diseño de ingeniería y desarrollo de tecnología industrial.

2.5. Fuentes renovables en Desarrollo.

2.5.1. Biomasa.

Incluye todos los materiales orgánicos suministrados directa o indirectamente por las plantas, tales como siembras de cultivo, árboles, yerbas, granos, plantas productoras de azúcar, resinas de bosques, desperdicios de animales, aguas residuales de la ciudad, desperdicios industriales. De este material puede obtenerse gas natural, metano, amoníaco, alcohol y otras sustancias químicas.

2.5.2. Solar.

Esta energía puede organizarse y de hecho así se está desarrollando en:

- a) Factor Solar Pasivo, en la utilización del diseño de edificios (ventanas, características estructurales).
- b) Sistemas de Energía Solar de baja temperatura (hasta 150° C), utilizan colectores de placas planas.
- c) Sistemas solares intermedios de alta temperatura (desde 150° C hasta 1.000° C), utilizan platos parabólicos o cóncavos.
- d) Celdas Solares fotovoltaicas para generar energía eléctrica directamente en lugares remotos.

2.5.3. Eólica.

Considera molinos de vientos y otros sistemas aerodinámicos.

Es un área, que aunque muy antigua, está siendo investigada, estudiada y desarrollada últimamente con mucha atención.

2.5.4. Mareas, olas marinas, diferencia de temperatura del mar.

Se está desarrollando principalmente en U.S.A. un importante programa de investigación en los diseños de sistemas que permitan aprovechar económicamente esta energía potencial. ●

EL SPALLING DE LOS REFRACTARIOS



Dr. Ing. Nelson Santander M.
Profesor Jornada Completa
Departamento de Metalurgia
Facultad de Ingeniería USACH.

1. INTRODUCCION

La mayor preocupación de los usuarios de refractarios es el rendimiento que éstos tienen en servicio. Por ello, cualquier tipo de destrucción, sea ésta precoz o normal (para las condiciones dadas de trabajo), constituye tema de inquietud para ellos.

Existe un tipo muy particular de deterioro que se identifica con la palabra inglesa SPALLING, pero ocurre sin embargo, que no siempre se tiene claridad conceptual sobre este fenómeno destructivo, no se conocen sus causas en forma suficientemente exacta, y se ignoran las metodologías de que se dispone para evaluarlo.

Es, sin duda, obvio que sólo conociendo bien este fenómeno será posible controlarlo, minimi-

zarlo, o incluso evitarlo. Es por ello que el propósito del presente artículo es dar una visión lo más didáctica posible acerca de este indeseable mecanismo de deterioro de albañilerías refractarias.

La palabra SPALLING se traduce al español como DESCONCHAMIENTO, DESCONCHADO, o DESGAJAMIENTO, ya que involucra la destrucción del refractario por fractura y consiguiente generación de fragmentos generalmente gruesos. Si la fractura origina fragmentos muy delgados se habla más bien de PEELING, palabra que se traduce al español como DESCASCARAMIENTO, DESCASCARILLADO o DESESCAMADO. Si la fractura genera lonjas de gran superficie se habla

de SLABBING, término que puede traducirse como DESLAJADO. Las palabras DESCOSTRAMIENTO y DESCORTEZAMIENTO se usan también en español, pero no con un sentido tan preciso como las anteriores.

Ante tanta nomenclatura sinónima conviene entonces adoptar una definición práctica para la palabra SPALLING.

Definición: se entiende por SPALLING a la fractura que sufre un material refractario debido a causas térmicas, mecánicas o químicas.

La primera causa produce el llamado SPALLING TERMICO, y se debe a un calentamiento o enfriamiento disparado del refractario, lo que genera gradientes térmicos capaces de originar esfuerzos de tal magnitud que logran fracturar al material.

La segunda causa produce el así llamado SPALLING MECANICO, que se debe a esfuerzos de compresión en estructuras refractarias generados por expansiones térmicas de la mampostería, esfuerzos que llegan a ser capaces de fracturar los refractarios. En general, este efecto se debe casi siempre a un diseño deficiente del horno.

La tercera causa produce el llamado SPALLING QUIMICO, y se debe a diferencias de coeficientes de expansión térmica entre la capa superficial y el cuerpo mismo del ladrillo, lo que a su vez se produce cuando hay penetración de escoria o de metales, o bien, cuando hay cambios estructurales durante la operación; transformaciones todas, que pueden alcanzar niveles capaces de destruir la zona afectada. En particular cuando el spalling químico se debe a un cambio estructural, se habla también de SPALLING ESTRUCTURAL.

La resistencia que ofrece un refractario a un debilitamiento o a la fractura derivada de los esfuerzos térmicos producidos al enfriar o calentar bruscamente el material se conoce con el nombre de RESISTENCIA AL CHOQUE TERMICO. En la práctica es precisamente la susceptibilidad de los materiales cerámicos a los choques térmicos uno de los factores que más limitan su uso, por ello el diseño de refractarios debe considerar casi siempre los factores adecuados que permitan darles una buena resistencia al SPALLING.

En el párrafo que sigue se revisarán algunas situaciones prácticas que ilustran los casos más frecuentes de destrucción de albañilerías debido al spalling.

2. EJEMPLOS MAS COMUNES DE SPALLING

Es interesante conocer algunos casos prácticos en los que con gran frecuencia se detectan los efectos del spalling.

- Quizás el ejemplo más típico lo constituyan aquellos órganos estructurales de los hornos que son de "quita y pon". En este caso se encuentran las bóvedas móviles de los hornos eléctricos de arco, las que es preciso remover para poder efectuar el carguío del horno. Al remover la tapa, ésta queda en contacto directo con el aire, y al finalizar el carguío vuelve a calentarse con rapidez. En una situación similar se encuentran las puertas móviles de hornos tipo reverbero con carguío lateral, tal es el caso de las puertas de carguío de los hornos Siemens Martin.
- Todos aquellos hornos y equipos de operación continua batch, o de operación discontinua que están sujetos a grandes variaciones cíclicas de temperaturas. En el primer caso destacan los hornos con insuflado de aire (o aire enriquecido) como son los hornos Peirce-Smith de cobre y los convertidores LD al oxígeno para aceros, y en el segundo caso están los cubilotos, las cucharas de colada, las piqueras y canales de sangría.
- Todos aquellos hornos continuos que para su reparación son sometidos a enfriamientos bruscos o forzados como ocurre cuando se les enfría con chorros de agua fría; y también aquellos hornos continuos reparados sobre la marcha con refractarios fríos o húmedos, tal es el caso de la reposición de ladrillos de bóvedas colgantes y de muchos parches "en caliente".

3. TEORIA

Resulta curioso observar que pese a lo importante que resulta conocer bien el fenómeno de spalling, la literatura teórica al respecto es escasa.

Estudios experimentales llevados a cabo con modelos de geometrías simples (esferas, discos, prismas), aplicando la técnica fotoelástica, ponen de manifiesto algo muy importante: el spalling térmico se debe a 2 tipos de solicitaciones; esfuerzos de cizalle y esfuerzos de tensión. Pero, estos esfuerzos se manifiestan de manera distinta según se trate de piezas calentadas o bien piezas enfriadas.

La figura 1¹ ilustra los tipos de grietas que se producen al enfriar (1a), o al calentar (1b) bruscamente un ladrillo refractario. Se ve entonces que al enfriar bruscamente el spalling térmico se debe a esfuerzos de tensión (las fracturas por tensión entran por el centro de las caras del

ladrillo, a 90°), y al calentar bruscamente, el spalling térmico se debe casi exclusivamente a esfuerzos de corte (las fracturas entran por las caras a 45°, y tienden a que el ladrillo vaya adquiriendo forma esférica con el tiempo). En todo caso, hay que hacer notar que la fractura no sigue necesariamente la dirección de los esfuerzos en todos los lados, sino que viaja a lo largo del ladrillo de modo de liberar la máxima energía, lo que depende mucho de la microestructura del refractario.

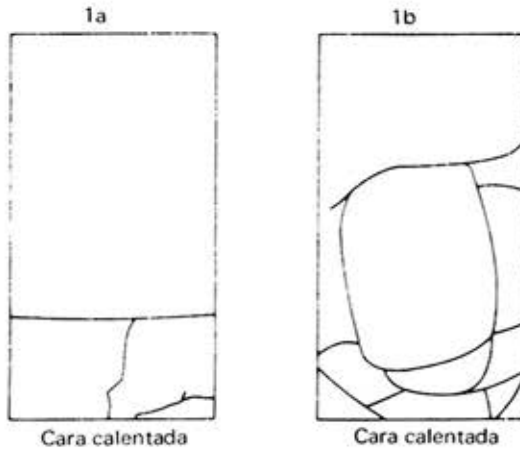


FIG. 1: Tipos de grietas al enfriar o calentar bruscamente ladrillos refractarios.

El análisis teórico que se verá a continuación separará por completo los efectos originados por los esfuerzos de corte o cizalle, de los efectos originados por los esfuerzos de tensión.

- a) Spalling Térmico causado por esfuerzos de corte: Considérese para los efectos de análisis un trozo de ladrillo refractario que se supondrá que es un sólido elástico y homogéneo, en el cual se extrae calor bruscamente desde una de sus caras (supuesta plana e infinita), tal como se ve en la figura 2.

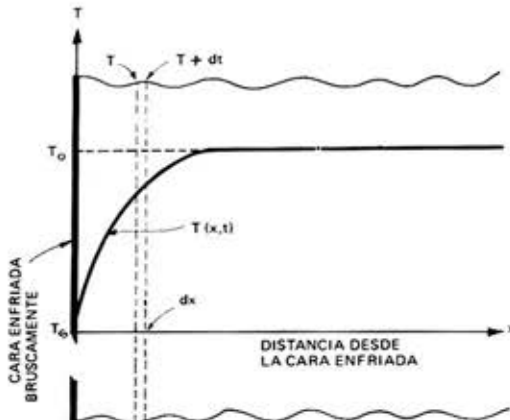


FIG. 2: Perfil térmico de un refractario enfriado bruscamente.

El perfil térmico resultante $T(x, t)$ puede evaluarse a partir de la ley de Fourier de flujo calórico no estacionario:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

con:

$$a^2 = \left(\frac{K}{C_p \rho} \right) = \text{difusividad}$$

Resolviendo la ecuación diferencial anterior se obtiene:

$$T(x, t) = A + B \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right)$$

y derivando esta expresión con respecto a x , manteniendo t constante, se obtiene el gradiente de temperatura en cada punto:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \left(\frac{2 T_0}{\sqrt{\pi}} \right) \cdot e^{-\left(\frac{x^2}{4 a^2 t} \right)} \cdot \left(\frac{1}{2a\sqrt{t}} \right)$$

Por consiguiente, en el interior del refractario aparecerán planos isotérmicos (líneas punteadas en la figura 2), y así entre los planos isotérmicos T y $T + dT$ existirá un gradiente $(\partial T / \partial x)$ que puede evaluarse usando la expresión recién encontrada. Ocurre entonces que como en el plano de mayor temperatura el refractario estará más dilatado, se genera entonces un esfuerzo de corte que quedará evaluado por la deflexión de un plano con respecto a otro, dividido por la distancia entre ellos. Si se considera entonces un eje y ortogonal a x , un trazo que en T tiene una longitud y , en el plano isotérmico $T + dT$ tendrá una longitud $(y + y \alpha dT)$, luego:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{esfuerzo} \\ \text{de corte} \end{array} \right\} = \frac{(y + y \alpha dT) - y}{dx} = y \alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

ecuación que expresa que el esfuerzo cortante generado al enfriar (o calentar) un cuerpo es proporcional a su tamaño, a su coeficiente de

expansión térmica, y al gradiente de temperatura (este último ya evaluado anteriormente). Habrá un cierto valor máximo que puede resistir el refractario antes de ceder al CIZALLE (y se designará como FLEXIBILIDAD F). Puede entonces definirse la tendencia que presenta el refractario al spalling por cizalle S_c , como el cociente entre el esfuerzo considerado dividido por el esfuerzo máximo, o sea:

$$S_c = \left(\frac{\text{esf. corte}}{\text{esf. corte máx.}} \right) = \frac{\gamma \alpha \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)}{F} \approx \frac{\gamma \alpha}{F} \left(\frac{k_1}{a} \right)$$

(ya que $(\partial T / \partial x)$ se hace $\alpha(1/a)$ cuando t se hace muy grande).

b) Spalling Térmico causado por esfuerzos de tensión: al calentar o enfriar bruscamente un ladrillo se generan esfuerzos de compresión o de tracción, los que pueden llegar a fracturar el material. Como la resistencia al cizalle de los materiales frágiles (cerámicas por ejemplo) es mucho mayor que la resistencia a la tensión, el refractario fallará por tensión, cuando se enfría bruscamente.

Aprovechando la misma figura 2, se ve que al enfriar bruscamente, la corteza exterior enfriada trata de contraerse, y como esta contracción queda frenada por el núcleo que está a mayor temperatura, se genera una compresión contra el núcleo, que puede evaluarse por la conocida ley de Hooke:

$$\sigma = E \epsilon$$

pero:

$$\epsilon = \frac{\Delta y}{y} = \alpha \Delta T$$

$$\therefore \sigma = E \alpha \Delta T \approx E \alpha \left(\frac{k_1}{a} \right) \Delta x$$

y si se supone que σ_f es la tensión de fractura del material (resistencia a la ruptura):

$$\sigma_f = E \epsilon_f$$

puede entonces definirse (análogamente al caso anterior) una tendencia al spalling por tensión S_t al dividir la tensión considerada por la tensión de fractura:

$$S_t = \frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{E \alpha \left(\frac{k_1}{a} \right) \Delta x}{E \epsilon_f} = \frac{\Delta x \alpha}{\epsilon_f} \left(\frac{k_1}{a} \right)$$

ecuación que tiene total analogía con la de S_c .

Para verificar experimentalmente las ecuaciones de tendencia al spalling en refractarios comerciales se midieron los ciclos de enfriamiento brusco que eran capaces de soportar diversos ladrillos comerciales y se correlacionaron con el factor (α/aF) y el resultado puede apreciarse en la figura 3. Se aprecia allí una muy buena aproximación a un comportamiento hiperbólico. Aunque no aparecen allí estudiados los refractarios básicos, puede decirse que en general presentan una pobre resistencia al spalling. El carburo de silicio que tampoco aparece evaluado en la gráfica, tiene en cambio una excelente resistencia al spalling.

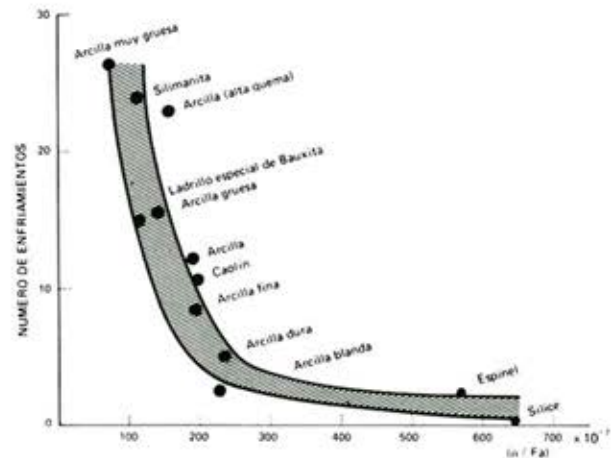


FIG. 3: Resistencia al Spalling vs. Tendencia al Spalling.¹

Resulta muy interesante hacer algunas evaluaciones reales para piezas refractarios o cerámicas sometidas a esfuerzos térmicos.

De acuerdo a la literatura² el coeficiente de dilatación media (entre 0 y 1000°C) para la mayoría de los refractarios es del orden de $10 \times 10^{-6} [K^{-1}]$, luego, al calentar bruscamente entre 0° y 1000° C, y unidireccionalmente, una cerámica cuyo módulo elástico sea del orden de 138 [GPa] (equivalente a 20×10^6 PSI)*, se genera un esfuerzo térmico igual a:

$$\sigma = 138 \times 10 \times 10^{-6} \times 10^3 = 1,38 \text{ [GPa]}$$

valor que es superior a la resistencia a la ruptura de la mayoría de los refractarios.

Este primer ejemplo ilustrativo, para simplicidad de cálculo se hizo suponiendo que el esfuerzo actúa en forma unidireccional. En la práctica, sin embargo, los esfuerzos actúan en las 3 dimensiones, de modo que según sea la geometría del cuerpo considerado, los esfuerzos toman distintos valores según su forma geométrica y según si se trata de esfuerzos en el centro o bien en la superficie, tal como muestra la Tabla 1³.

* Recordar que 1 PSI = $6,8948 \times 10^3$ Pa ; 1 Pa = 1N/m²

TABLA 1

Esfuerzos térmicos en la superficie y en el centro de cuerpos elásticos de formas diversas

Forma	Superficie	Centro
Plancha gruesa infinita	$\begin{cases} \sigma_x = 0 \\ \sigma_y = \sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu} (T_a - T_s) \end{cases}$	$\begin{cases} \sigma_x = 0 \\ \sigma_y = \sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu} (T_a - T_c) \end{cases}$
Placa delgada	$\begin{cases} \sigma_y = \sigma_z = 0 \\ \sigma_x = \alpha E (T_a - T_s) \end{cases}$	$\begin{cases} \sigma_y = \sigma_z = 0 \\ \sigma_x = \alpha E (T_a - T_c) \end{cases}$
Esfera maciza	$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \sigma_t = \frac{E\alpha}{1-\mu} (T_a - T_s) \end{cases}$	$\begin{cases} \sigma_t = \sigma_r = \frac{2E\alpha}{3(1-\mu)} (T_a - T_c) \end{cases}$
Esfera hueca	$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \sigma_t = \frac{\alpha E}{1-\mu} (T_a - T_s) \end{cases}$	$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \sigma_t = \frac{\alpha E}{1-\mu} (T_a - T_c) \end{cases}$

T_a = Temperatura media del cuerpo
 T_s = Temperatura de la superficie
 T_c = Temperatura del centro

A continuación y aprovechando dicha Tabla, se evaluará el esfuerzo que se genera en una barra de vidrio gruesa e infinita, cuando se enfría bruscamente desde 100° C hasta 0° C (en un baño con hielo por ejemplo). Para los efectos de aplicación del modelo de esfuerzo, puede suponerse que si la velocidad de transferencia de calor desde la superficie es alta, ella alcanza la nueva temperatura inmediatamente, pero el interior sigue con una temperatura uniforme de 100° C. Los esfuerzos de compresión que desarrolla la corteza fría contra el núcleo caliente, según la Tabla 1, son iguales en las 2 direcciones de las caras de la barra:

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} (T_{\text{centro}} - T_{\text{sup}})$$

donde:

$$\mu = \left(\frac{E}{2G} - 1 \right) = \text{razón de Poisson} \quad (G = \text{módulo de rigidez})$$

Para un vidrio típico: $E = 70$ [GPa], $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ [K⁻¹], y $\mu = 0,20^{**}$, luego:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{70 \times 10 \times 10^{-6}}{(1 - 0,20)} \times (100 - 0) = 0,875 \text{ [GPa]} = \\ &= 875 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

** Para materiales cerámicos $\mu = 0,2 - 0,3$

valor que es superior a la resistencia del vidrio (≈ 70 MPa), por lo que se puede esperar que se quiebre bajo esas condiciones de trabajo. Ahora si en lugar de vidrio común se emplea vidrio Pyrex, cuyo coeficiente $\alpha = 3 \times 10^{-6}$, se tiene:

$$\sigma = \frac{70 \times 3 \times 10^{-6}}{(1 - 0,2)} \times (100 - 0) \approx 26 \text{ [MPa]}$$

en cuyo caso no hay peligro de fractura.

RESISTENCIA AL CHOQUE TERMICO

Conocidos y evaluados hasta aquí algunos esfuerzos térmicos que pueden generar o no fracturas, interesa ahora evaluar la resistencia al choque térmico. Para tal efecto, conviene definir 2 parámetros de gran importancia:

$\Delta T_f \equiv$ variación térmica necesaria para la fractura

$\sigma_f \equiv$ resistencia a la fractura

Si se considera por ejemplo la barra del cálculo anterior:

$$\sigma_f = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \Delta T_f$$

y reescribiendo:

$$\Delta T_f = \frac{\sigma_f (1 - \mu)}{E \alpha}$$

Si en lugar de la barra anterior se emplea otra de geometría diferente, como se puede ver en la Tabla 1, la ecuación anterior se vería afectada por un "factor de forma FF", y se tendría:

$$\Delta T_f = \left[\frac{\sigma_f (1 - \mu)}{E \alpha} \right] \cdot FF$$

pero resulta que todo el factor que multiplica a FF es una constante del material, entonces conviene definirlo como:

$R \equiv$ factor de resistencia del material al choque térmico.

Luego:

$$\Delta T_f = R \cdot FF$$

Se puede concluir entonces que la resistencia al choque térmico R se ve favorecida con una alta resistencia a la compresión, con un bajo módulo de elasticidad, y un bajo coeficiente de expansión térmica. Las expresiones anteriores sólo son válidas cuando el enfriamiento es lo suficientemente rápido como para que la temperatura superficial alcance su valor final antes que cambie la temperatura media del cuerpo.

Toda la teoría anterior se ha basado en suponer que el inicio de la fractura del refractario (nucleación de las grietas) ocurre cuando las condiciones de flujo calórico son tales que la tensión térmica producida alcanza el valor de la tensión de fractura del material. Ocurre, sin embargo, que los refractarios en general contienen, desde su fabricación, diversas grietas que son capaces de actuar como concentradoras de esfuerzos, de modo que las fracturas producidas pueden sólo tener efectos locales. Lo que sí preocupa es la propagación catastrófica de las grietas, y para esto la teoría de fracturas predice que la resistencia a la propagación de las grietas toma la forma:

$$R' = \frac{E}{\sigma_f^2 (1 - \mu)}$$

relación que expresa un efecto totalmente inverso de los factores E , σ y μ . Por ello, la selección de las características del material refractario para evitar la iniciación de las grietas es opuesta al caso en que la selección pretenda evitar la propagación de dichas grietas.

Por consiguiente, ya que en refractarios se tolera la existencia de pequeñas grietas, se puede mejorar la resistencia a la propagación catastrófica de ellas, introduciendo heterogeneidades microestructurales que sean capaces de absorber las tensiones que deben liberarse cuando el material se somete a esfuerzos térmicos. Dicho sea de paso, ésta es una de las razones por la que los ladrillos aislantes (muy porosos) tienen alta resistencia al spalling térmico.

Queda en claro que la microestructura tiene mucha importancia en la resistencia de los refractarios al spalling, al igual que la distribución granulométrica. La figura 4^a ilustra por ejemplo, la incidencia de la granulometría en la resistencia al choque térmico de probetas de cromo-magnesita en proporción 75/25. Los granos se han agrupado en 3 rangos: gruesos (7-25 mallas), medianos (25-72 mallas) y finos (bajo 72 mallas). Como tope se ha tomado aquí 30 ciclos térmicos. En general se aprecia que los granos gruesos mejoran la resistencia al spalling.

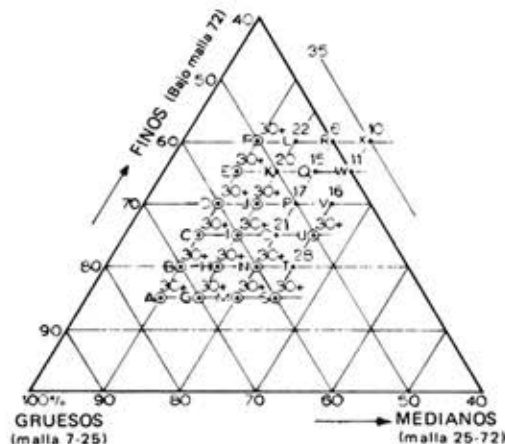


FIG. 4: Influencia de la granulometría sobre la resistencia al choque térmico en probetas de cromo-magnesita 75/25.

4. ENSAYOS

Conocidas ya las causas del fenómeno de spalling de refractarios, interesa conocer ahora las metodologías existentes para evaluar en laboratorio el comportamiento de estos materiales frente al spalling térmico.

Para este efecto, se han revisado las normas más usuales y se han resumido en la Tabla 2 con objetivos de comparación. Como complemento se ha añadido a esta tabla, en la última columna, las características más importantes de una metodología desarrollada en los Laboratorios del Departamento de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago.

TABLA 2. Cuadro Comparativo de las Normas sobre Ensayos de Spalling

	DIN 51068-1 ⁵	ASTN C38-68 ⁶	BS ⁷	USACH-Met.80 ⁸
Método	Probeta aislada, enfriada en agua	panel enfriado con agua fría pulverizada	probeta aislada, enfriamiento al aire	probeta aislada, enfriamiento en agua
Rango de temperatura	950-10 a 20° C	Variable	1000 ó 1200° C. -T. ambiente	1000° C - 0° C
Probetas	Cilíndricas: 50 mm ± 0,5 mmφ 50 mm ± 0,5 mmH	ladrillos de: g"x 2 1/2 ó 3" x 4 1/2" (230x65 ó 76x165mm)	prismas 3"Hx2"x2" (76x51x51mm)	prismas 1" x 1" x 1" (25 mm por lado)
Evaluación	según número de ciclos soportados (máximo 30)	por pérdida de peso después de N° ciclos específico	según número de ciclos hasta que se rompe al flectarla (máximo 30)	según número de ciclos hasta que se rompe al flectarla (máximo 20)
Costo	ensayo corto y barato; no requiere horno especial	ensayo largo y caro; requiere horno especial y anexos	ensayo corto y barato; no requiere equipo especial	ensayo corto y barato; no requiere equipo especial

Existen además otros ensayos especializados que no se han popularizado, tal es el caso del ensayo con hornos giratorios, empleo de descarga de gases, etc.

REFERENCIAS

1. F.H. NORTON: "Refractories", p. 251, Mc Graw-Hill, N.Y., (1968).
2. L.H. Van VLACK: "Physical ceramics for Engineers", p. 143-144, Addison-Wesley, (1964).
3. W.D. KINGERY et al.: "Introduction to Ceramics", p. 819, John Wiley, N.Y., (1976).
4. J.H. CHESTERS: "Refractories: Production and Properties", p. 234, The Iron and Steel Institute, London, (1973).
5. ANONIMO: Norma DIN 51068-1.
6. ANONIMO: Norma ASTM C 38-68.
7. ANONIMO: Norma BS.
8. J. BALLESTEROS: Tesis Ing. Ejec. Met., Depto. Metalurgia U.T.E., (1980).





**KUPFER
HNOS. S.A.**

LIBERTAD 58 - CASILLA 294 V - CORREO 21 - FONO 98821

Un Siglo de Experiencia al Servicio del Progreso

PROVEEDORES DE LA INDUSTRIA

ACEROS • FERRETERIA INDUSTRIAL
SOLDADURAS • SEGURIDAD INDUSTRIAL

VALPARAISO
Salvador Dimoso 1477
Fono 52891

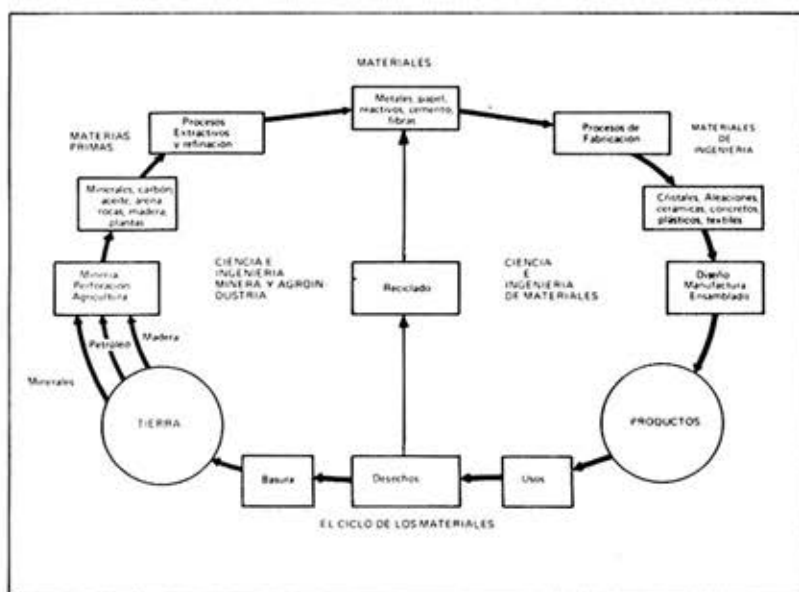
ANTOFAGASTA
Alconegui 923
Fono 72532

CONCEPCION
Licoyan 601
Fono 22287

COPIAPO
Villa L.D. Bdo. O'Higgins 111
Fono 3317

GP Servicios Publicitarios

CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES, UNA multidisciplina universal



Dr. Jorge Garín C.
Profesor del Departamento
de Metalurgia, USACH.



Introducción.

El desarrollo de los materiales ha estado siempre estrechamente relacionado con el progreso humano. En efecto, su estudio rudimentario se ha practicado a través de la historia misma del hombre, como lo evidencian los nombres asignados a distintos períodos de ésta, conocidos como las edades de piedra, bronce y hierro.

La historia de los materiales y el progreso del hombre a lo largo de la edad de bronce, es interesante porque muestra una serie de ejemplos en los cuales nuevos desarrollos de materiales posibilitaron un gran paso en el avance de la civilización. Las necesidades de materiales de esas sociedades nacientes impulsaron el establecimiento de centros de comercio, sistemas monetarios rudimentarios, exploraciones, avances en el transporte, sistemas políticos e incluso guerras.

Las transiciones de la edad de piedra a la de bronce y de ésta a la de hierro, fueron revolucionarias en impacto, pero relativamente lentas en lo que a período de tiempo se refiere. Por el contrario, las innovaciones y aplicaciones de los materiales durante el último siglo, han ocurrido en un lapso de tiempo que las caracteriza como revolucionarias más bien que evolucionarias.

El creciente progreso de los materiales continuó su decisiva marcha, dando origen a una gran gama de posibilidades que, durante el siglo pasado, comenzaron a marcar hitos importantes en la revolución industrial. Por el relevante papel que ha jugado en el desarrollo tecnológico, cabe destacar el advenimiento del acero en la década de 1850.

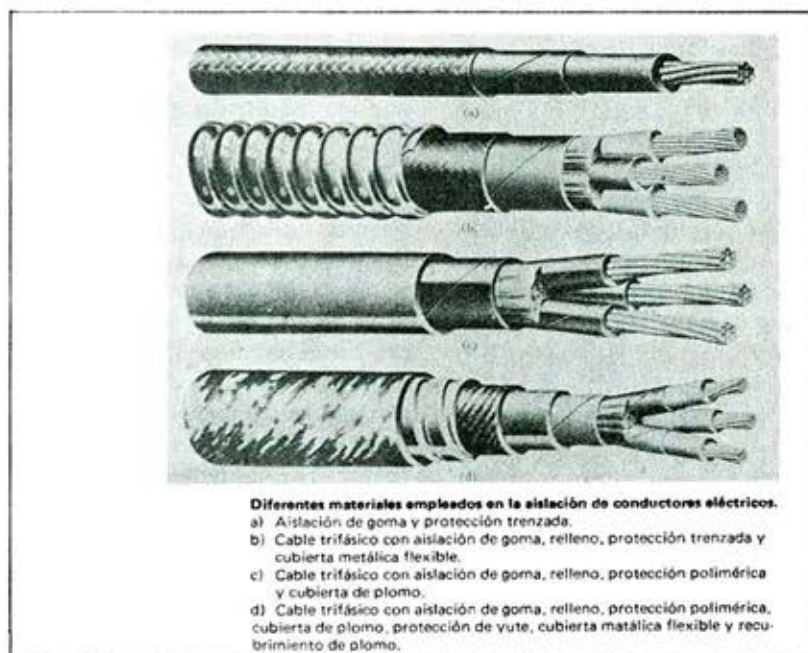
En efecto, hasta mediados del pasado siglo, el hierro, uno de los metales más baratos de que se disponía para su utilización comercial en grandes cantidades,

se obtenía en forma de "hierro pudelado", consistente en una fase ferrítica blanda y cantidades apreciables de escoria incluida en la masa metálica, debido a que el proceso de fabricación no alcanzaba el punto de fusión de la masa, sino que la reducción procedía directamente desde el mineral sólido al metal sólido. El proceso finalizaba con una etapa de laminación, para producir un material de propiedades mecánicas deficientes en cuanto a sus posibilidades de aplicación.

En la búsqueda de un proceso que lograra elevar la temperatura de un acero de bajo carbono sobre su punto de fusión, para separación de la escoria, producción de lingotes y subsecuente procesamiento, destacaron los aportes de Kelly en Estados Unidos (1847) y Bessemer en Inglaterra (1856), quienes desarrollaron en forma independiente el famoso proceso neumático que permite un aumento apreciable de la temperatura, por oxidación de las impurezas del hierro. Los avances en la tecnología del acero a partir del proceso Bessemer, desde el año 1870, lograron aumentar la producción mundial en cantidades considerablemente mayores a las obtenidas con anterioridad, originando así grandes consecuencias geográficas, económicas, agrícolas y sociológicas.

Otro ejemplo que ha sentado historia en el desarrollo de los materiales, en competencia con el acero en lo que se refiere a la trascendencia de sus aplicaciones, es el caso del cobre.

En la misma época en que Kelly y Bessemer patentaron su proceso, se manifestaba ya una necesidad urgente por materiales de alta conductividad eléctrica, como el cobre, lo que era prácticamente imposible de lograrse, por cuanto la pureza de ese metal variaba en forma significativa, alcanzando valores máximos de aproximadamente



99,20/o. Debieron transcurrir 70 años para que se desarrollaran y perfeccionaran procesos industriales que permitiesen remover en forma más efectiva las impurezas del cobre y, sobre todo, las últimas trazas de oxígeno residual, lográndose así la calidad del producto requerido por una industria eléctrica en expansión exponencial.

El cobre OFHC (Oxygen Free High Conductivity) obtenido de esa manera no sólo presenta la alta conductividad y ductilidad características del cobre electrolítico, sino que también está exento de la fragilidad debida al hidrógeno, y que produce fallas del material a mayores temperaturas de servicio. Este ejemplo es característico de un proceso relacionado a una serie de especificaciones o garantías de calidad, y que se puede considerar como el inicio de la "ingeniería de materiales", en la cual el diseño del material es tan importante como el diseño del producto.

De la infinidad de ejemplos de materiales que conforman las características requeridas por determinado producto, el silicio es probablemente uno de los más interesantes, mejor conocido y

que mayor progreso ha impulsado en la sociedad contemporánea. El silicio, como elemento semiconductor de múltiples aplicaciones a la ingeniería eléctrica y electrónica, estableció la transición de la "electrónica a tubos" a la electrónica de estado sólido, al constituir el elemento principal en la teoría y práctica del desarrollo del transistor en 1948. A pesar de ser, junto con el oxígeno, uno de los elementos más abundantes del planeta, su aplicación a la electrónica no se alcanzó hasta que pudo ser purificado químicamente y elaborado en forma cristalográficamente perfecta. Para tales fines, los procesos de refinamiento zonal y crecimiento de monocristales fueron desarrollados por metalurgistas e ingenieros que poseían conocimientos adecuados acerca de los principios fundamentales de los materiales.

El caso del silicio también ilustra el impacto del avance tecnológico en áreas no técnicas. En términos económicos, por ejemplo, ha derivado en una industria multibillonaria: comunicaciones desde un simple tranceptor hasta telemetría espacial, computadores, celdas solares pa-

ra conversión de energía, y microprocesadores de todo tipo, que ofrecen una gran variedad de aplicaciones casi sin límite en todos los aspectos de manufactura, negocios, transporte y modo de vida del individuo.

Los ejemplos citados anteriormente son sólo una muestra del amplio espectro de los materiales que, gracias a las innumerables aplicaciones que ofrecen, han mejorado enormemente el patrón de vida del hombre moderno.

CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES

De las posibles definiciones de materiales, aquella adoptada por COSMAT (Committee on the Survey of Materials Science and Engineering), establece que son substancias que exhiben propiedades útiles para su aplicación a la fabricación de máquinas, estructuras, dispositivos y productos. En otras palabras, los materiales conforman un subconjunto de la materia en el universo, que el hombre utiliza para hacer cosas.

Hasta hace aproximadamente tres décadas, el campo de los materiales abarcaba varias áreas separadas, como principalmente, metalurgia física, cerámicas, polímeros y física y química del estado sólido. Una característica común a todas esas disciplinas fue la clara relación existente entre la estructura y las propiedades de los materiales involucrados. A partir de 1950 se hizo evidente que había bastantes fundamentos comunes entre las áreas mencionadas, naciendo entonces un nuevo campo interdisciplinario que las englobó a todas y se bautizó con el nombre de "Ciencia de Materiales".

La ciencia de materiales, como un área multidisciplinaria de investigación, estudia la relación

entre composición, estructura y procesamiento de los materiales con sus propiedades y usos. Todos los materiales experimentan por lo menos algunos de los siguientes procesos: extracción desde el medio natural, refinamiento, purificación, transformación en constituyentes básicos, y modificación para lograr la composición y configuración del producto final requerido. Al cabo de la vida útil del producto, el material se devuelve al medio ambiente como desecho o, preferentemente, se recupera para proporcionar nuevos constituyentes básicos.

La ciencia e ingeniería de los materiales contribuye a cada uno de esos procesos, particularmente a la secuencia desde la formación de los constituyentes básicos hasta la recuperación de nuevas materias primas mediante métodos adecuados de reciclado. Un aspecto importante del ciclo es el hecho de que revela muchas interacciones entre materiales, energía y medio ambiente, de tal modo que estos factores deben ser considerados en el planeamiento y evaluación tecnológica a gran escala.

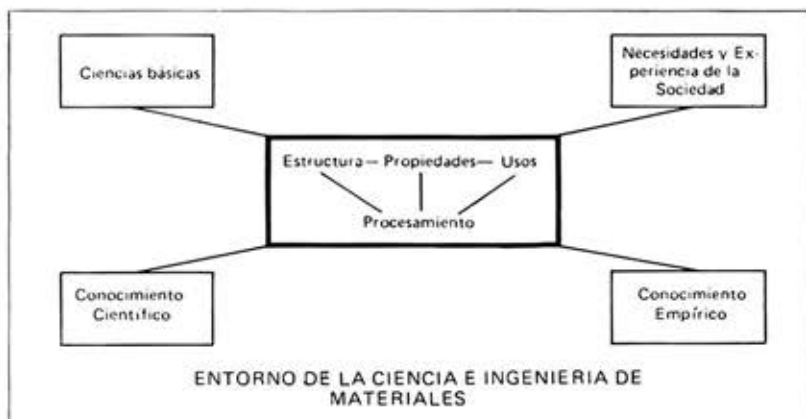
El tema se hace aún más crítico si se toma en cuenta la creciente escasez de energía y materiales, en una época en que la población mundial manifiesta un interés más marcado por la calidad del espacio que habita. A modo de ejemplo específico, si los desperdicios de aluminio fuesen completamente reciclados, se consumiría sólo una fracción de la energía necesaria para extraer una cantidad equivalente del metal, desde sus minerales, con la consecuencia favorable de que las huellas dejadas por el proceso de extracción en la tierra se reducirían notablemente.

Los materiales más importantes se pueden clasificar, de acuerdo a su uso principal, en eléctricos, electrónicos, plásticos, nu-

cleares, magnéticos, biomédicos, de construcción y aeroespaciales. El silicio, por ejemplo, se clasifica en el grupo de los materiales electrónicos (semiconductores). El concierto de conocimientos teóricos y empíricos que conducen a una adecuada tecnología para su preparación, aporta un ejemplo clásico de la "simbiosis" requerida entre ciencia e ingeniería en la tecnología de materiales. Así, es posible ilustrar la disciplina como un amplio espectro de generación y transmisión de conocimientos, que abarca desde las ciencias básicas y la investigación fundamental, hasta las necesidades humanas y la experiencia de la sociedad. Las primeras nutren el conocimiento científico, mientras que las últimas aportan como conocimiento empírico al seno de la disciplina, esto es, las relaciones entre estructura y propiedad y sus consecuencias en el procesamiento y posterior comportamiento en servicio.

Claramente, entonces, no debe sorprender el hecho de comprobar que en el desarrollo del conocimiento humano, una ciencia e ingeniería de materiales está tomando su lugar entre todos los otros conjuntos de investigación y esfuerzo que amplían el alcance material del hombre.

Es difícil establecer una frontera entre ciencia de materiales e ingeniería de materiales, ya que la distinción depende fundamentalmente del punto de vista con que se enfoque cada problema. Hay muchos científicos e ingenieros que son especialistas en materiales y están totalmente dedicados a esta disciplina. En la práctica, la ciencia e ingeniería de materiales conforman un marco en el cual los profesionales en muchas áreas trabajan creativamente para dilucidar fenómenos de la naturaleza y, al mismo tiempo, generar nuevos conocimientos en respuesta a la demanda de las necesidades humanas.



LA CRISTALOGRAFIA COMO HERRAMIENTA FUNDAMENTAL EN EL ESTUDIO DE LOS MATERIALES

Dado que en la mayor parte de las etapas del ciclo de vida de los materiales se manifiestan las fases cristalinas, la cristalografía de rayos X ha resultado ser un aporte fundamental a la investigación, marcando dos influencias principales, a saber: proporciona un nuevo punto de vista en el estudio de la estructura a nivel de arreglos atómicos y, como una ciencia en sí misma interdisciplinaria, deriva en una apreciación mejorada de los principios comunes a todos los materiales.

La cristalografía es una disciplina científica de gran aplicación. A grandes rasgos, involucra la investigación de la estructura de la materia, esto es, los arreglos atómicos que presentan los diferentes estados de ella, las herramientas usadas en la determinación de esas estructuras, particularmente las técnicas de difracción de rayos X, neutrones y electrones, y los métodos analíticos que se aplican a los diagramas de difracción. En un sentido más profundo, sin embargo, las técnicas y resultados de la cristalografía se conjugan con aquellos de varias otras disciplinas científicas, resultando en desarrollos significativos y, a veces, de extraordinaria importancia en

esos campos. En lo referente al área de los materiales, proporciona información estructural en una gran gama de tópicos, en relación con la temperatura, presión y cambios de fases. Constituye, en consecuencia, una herramienta valiosa para el aporte de nuevos conocimientos a la ciencia de materiales. Las técnicas de difracción de rayos X, a su vez, juegan un papel central en el avance del conocimiento básico, gracias a su habilidad para determinar los arreglos estáticos y dinámicos de los átomos en la materia, y relacionar esa arquitectura atómica con las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales.

Las prioridades asignadas por COSMAT a la investigación de los materiales, frecuentemente involucran agregados policristalinos, muchos de los cuales son compósitos, y se caracterizan por contener maclas, dominios de toda clase y alta densidad de dislocaciones. Las periodicidades en cristales imperfectos son características cristalográficas que influyen en el crecimiento cristallino, las transformaciones de fases, procesamiento y muchas de las propiedades físicas. Resulta difícil imaginar cómo esas propiedades se podrían estudiar sin la aplicación de los métodos y conceptos cristalográficos. Por otro lado, no es fácil estimar la potencialidad de la cristalografía en la ciencia de materiales, debi-

do a que forma parte del esfuerzo total desplegado en las investigaciones. Sólo es posible decir que cada profesional, experto o científico en materiales aplicará alguna vez en su trabajo los conceptos y herramientas cristalográficas.

MATERIALES Y ENERGIA

Desde que el hombre paleolítico aprendió a hacer y a controlar el fuego, la energía ha permanecido estrechamente asociada al ámbito de los materiales. En forma de calor, por ejemplo, modifica las propiedades de la arcilla, lo que desde un comienzo se aplicó a la manufacturación de utensilios de cocina y, por otro lado, dio origen a los primeros rudimentos del arte de las cerámicas. De allí en adelante, las puertas del progreso se abrieron a muchas potenciales tecnologías, como el trabajo del vidrio y las primeras extracciones de metales, usando el hecho de que el carbón encendido era capaz de reducir el cobre, estaño, plomo y varios otros metales a partir de sus minerales.

Cada paso en el procesamiento de los materiales requiere de energía. La obtención de los metales contempla varias etapas, desde la extracción mineral, molienda y concentración, hasta la fusión, refinamiento y operaciones de conformado, todas las cuales se realizan con gran consumo de energía. Los materiales no metálicos, particularmente las cerámicas, también la necesitan en sus procesos de calcinación, sinterización y vitrificación. Los plásticos, por su lado, adoptan su forma permanente por aplicación de calor y posterior moldeo por inyección, extrusión, laminación, etc.

Un aspecto importante de la relación materiales-energía, son las tecnologías de conversión de energía disponible, en formas

directamente utilizables. Ejemplo bastante conocido es el uso de la gasolina para motores de combustión interna. Los esfuerzos orientados a mejorar el rendimiento de esas máquinas, plantean toda una problemática en torno a los materiales involucrados, como lubricantes, empaquetaduras, nuevas aleaciones, dispositivos eléctricos y otros similares.

En relación con la energía nuclear, la investigación de materiales se dirige principalmente a obtener el mejor comportamiento de resistencia y durabilidad en el medio adverso de los reactores de potencia. El control de calidad juega entonces un papel importantísimo en la selección de los materiales más apropiados. Más complejo resultará aún el problema en el diseño de los reactores de fusión, donde las temperaturas de trabajo son considerablemente mayores a las alcanzadas hasta ahora.

Dos procesos de conversión de energía que han atraído considerablemente la atención, desde el punto de vista de la investigación y desarrollo tecnológico, son la conversión fotovoltaica de energía solar y el almacenamiento electroquímico en baterías. El proceso fotovoltaico o captación de energía solar mediante celdas utiliza como componente principal materiales semi conductores, principalmente silicio. A pesar de que la tecnología de las celdas solares está bastante desarrollada, presenta aún problemas serios en lo que se refiere a la fabricación de silicio monocristalino, que debe obtenerse en tiras extremadamente delgadas y cristalográficamente perfectas. Aunque la conversión fotovoltaica de energía solar ha experimentado un gran avance, impulsado en buena forma por la realización de los programas espaciales durante la década pasada, su incidencia en el cuadro energético actual es prácticamente despreciable, ya que hasta ahora su

tecnología la limita a aplicaciones de corta escala.

Considerable esfuerzo se ha realizado en la investigación de materiales para baterías de alta capacidad de almacenamiento de energía eléctrica, y bajo peso. La popular batería de plomo-ácido y la vieja batería de hierro-óxido de níquel, han prestado gran utilidad durante largo tiempo, pero para efectos de propulsión automotriz adolecen de serias limitantes, siendo el exceso de peso la principal de ellas. Una posibilidad de obviar esa dificultad es la batería de sulfuro de sodio que, sin embargo, debe operar a altas temperaturas. El dispositivo requiere de un electrolito sólido que muestre alta conductividad iónica. Para tales fines, el material que más ha captado la atención es el $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11 \text{Al}_2\text{O}_3$, compuesto rico en óxido de aluminio beta. La conductividad iónica del sodio es posible debido a que el cristal presenta "canales" relativamente abiertos en su estructura. Los procesos de manufacturación son, sin embargo, complejos y sensibles al control de calidad, de modo que el perfeccionamiento de su diseño debe concentrar el concurso de ceramistas, electroquímicos, ingenieros y otros expertos.

La conversión de energía en todas sus formas es uno de los mayores desafíos que deberá afrontar la humanidad. Es razonable esperar que los avances en la ciencia e ingeniería de materiales, proporcionarán los medios para responder en la mejor forma posible a tamaño desafío.

EDUCACION E INVESTIGACION EN CIENCIA DE MATERIALES

La ciencia e ingeniería de los materiales, como cada campo profesional, requiere de individuos suficientemente preparados, cuyos rasgos personales in-

cluyan una buena dosis de inteligencia, creatividad, iniciativa y motivación. Un experto en determinada área de los materiales debe poseer, además, un conocimiento adecuado para poder apreciar las contribuciones que pueden aportar otras disciplinas y especialidades. Es importante distinguir entre aquellos profesionales que generan nuevos conocimientos y los que los aplican. La diferencia básica entre las dos actividades es un reflejo del entrenamiento que el individuo ha recibido.

La creación de nuevos conocimientos implica que el investigador está totalmente informado del trabajo previamente realizado en su especialidad. Además, debe dominar las técnicas analíticas y experimentales propias de su línea de investigación y, por sobre todo, ser capaz de llevar a cabo mediciones cuidadosas y proceder a un análisis crítico de los resultados obtenidos. La preparación necesaria para cumplir con esas condiciones la entrega, sin lugar a dudas, un programa de doctorado, que debe constituirse en un entrenamiento natural para aquellos que ataquen los problemas fundamentales de la disciplina. Entonces el alto grado de realizaciones alcanzado por la ciencia de materiales, no sólo se debe mantener o superar, sino que también se debe reflejar en nuevos programas de la educación superior.

El experto, cuya función principal es la aplicación de conocimientos para relacionar la estructura, propiedades y procesamiento de los materiales con sus usos, requiere de un entrenamiento más amplio y menos especializado. Su principal preocupación debe ser, por lo tanto, entender el conocimiento existente en la ciencia de materiales, y determinar sus posibles aplicaciones a nuevos diseños y productos. Tal objetivo lo orientará en forma natural hacia la ingeniería de materiales. Debido a la amplitud



Monocrystal de Silicio utilizado en la fabricación de componentes microelectrónicos.

y complejidad de esa ciencia, la preparación ofrecida por un programa de ingeniería y, más aún, por uno de magister, será la apropiada para quienes desean abordar las aplicaciones ya señaladas.

Aunque la investigación en materiales es interdisciplinaria por definición, en la práctica las Universidades no se han caracterizado por desarrollarse en ellas una total relación interdepartamental en lo que a ese campo se refiere. Una razón fundamental es la más que centenaria organización en ramas del saber, como Física, Química y Metalurgia, entre otras, que representan una infraestructura humana y material sólidamente establecida, de tal modo que la cooperación es más fácil y probable dentro de cada disciplina que entre ellas. Por su naturaleza interdisciplinaria, los programas cooperativos en investigación de materiales tienen mayor probabilidad de realización exitosa con el apoyo de una infraestructura compuesta por facilidades centrales, como microscopía electrónica, difracción automática de rayos X, análisis instrumental y otras similares. Sólo así se podrán interconectar los objetivos académicos tradicionales con las

metas planificadas en el campo de los materiales.

PERSPECTIVAS

De acuerdo a todo lo expuesto anteriormente, la ciencia e ingeniería de materiales ha respondido a las necesidades de la sociedad, cuando aquellas han sido claramente planteadas y adecuadamente financiadas. Sin embargo, desde el punto de vista actual, la comunidad de los materiales podría ser criticada por no haber prestado durante el pasado la necesaria atención a elementos del ciclo, tales como contaminación y reciclado, pero existe suficiente evidencia como

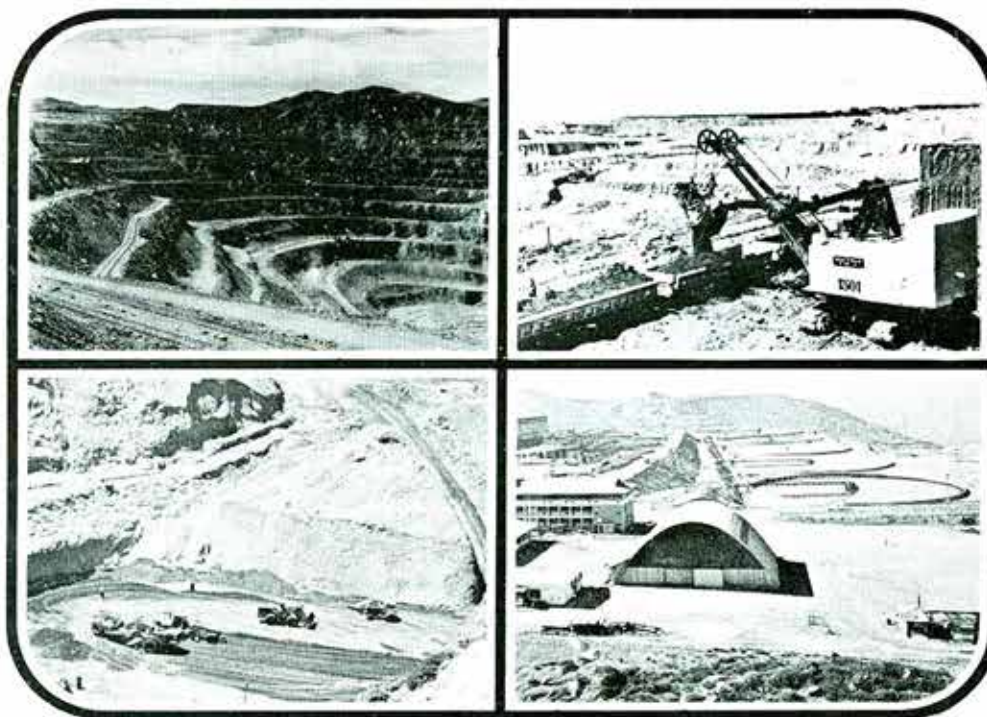
para asegurar que la disciplina responderá a esas nuevas metas con el mismo impacto con que lo ha hecho hasta la fecha.

La aceptación de nuevos materiales puede encontrar dificultades y obstáculos, traducidos en cualidades humanas como hábitos e inercia, o barreras organizacionales que impidan la innovación y el progreso. En programas de investigación donde se busca algo nuevo, el desarrollo de los materiales es ampliamente reconocido porque el éxito depende de su aceptación. La situación en el ámbito industrial puede llegar a ser completamente diferente, ya que materiales y procesos largamente conocidos son familiares y cómodos de obtener, mientras que nuevas posibilidades representan riesgos técnicos desconocidos.

Es ahora el momento de reconocer que el rol de la ciencia e ingeniería de materiales en el logro de nuevas metas y aplicaciones, requerirá algo más que soluciones elegantes a problemas tecnológicos. En efecto, la disciplina debe aprender a unir esfuerzos con la investigación sociológica para alcanzar sus mayores objetivos. Sin menoscabar los esfuerzos que se puedan llevar a cabo en laboratorios, industrias y centros de investigación, la Universidad parece y debe ser el lugar ideal para realizar ese tipo de actividad multidisciplinaria.

REFERENCIAS

1. L. Van Vlack, "Materials and Progress". Anales Primer Congreso Nacional de Metalurgia, Santiago, Chile, p. 5, (1979).
2. S.C. Abrahams, "Crystallographic Methods Applied to Materials Science", Collected Abstracts, Twelfth International Congress of Crystallography, p. C-345, (1981).
3. "Materials Science and Engineering: Its Evolution, Practice and Prospects". Materials Science and Engineering, Special Issue, Vol. 37, Nº 1 (1979).
4. "Status and Future Potential of Crystallography". Report of a Conference National Academy of Sciences, Washington, D.C., (1976).
5. J.L. Garín, "Impacto y Perspectivas de la Ciencia de Materiales en la Conversión de Energía Solar". REMETALLICA Nº 3, p. 16, (1981).



Situación de la inversión extranjera en minería del cobre en Chile

Dr. Guillermo Ugarte A.
Director Técnico Comisión
Chilena del Cobre,
Prof. Depto. Metalurgia, USACH.



1. INTRODUCCION

La inversión extranjera es necesaria para el país. Chile no tiene los recursos propios suficientes para lograr el desarrollo global de la economía. La inversión extranjera permite obtener las cuantiosas sumas necesarias para el desarrollo del sector minero, que a su vez generará los excedentes que requiere el desarrollo económico del país.

Para el inversionista, por otro lado, existen

varios atractivos para invertir en la minería del cobre de Chile:

- Legislación clara y no discriminatoria para los inversionistas (Decreto 600).
- Gran potencial minero (cantidad y calidad de los recursos).
- No existen severos problemas de infraestructura.

- Tradición minera y existencia de know-how técnico y gerencial.

Actualmente se están desarrollando varios proyectos de inversión extranjera en minería del cobre. Con la excepción de El Indio y la ampliación de Mantos Blancos que ya se han concretado, el resto de los proyectos aún no han llegado a la etapa de toma de decisión definitiva. Cabe tener presente que los proyectos mineros en general requieren de varios años para entrar en producción. Entre las razones de la lentitud aparente del desarrollo de estos proyectos podemos mencionar:

- Naturaleza intrínseca de los proyectos mineros (largo período de maduración de las etapas de prospección, reconocimiento y desarrollo).
- Situación actual, deprimida, de los mercados de metales básicos.
- Período de ajuste de la economía mundial (incertidumbre para inversionistas y altas tasas de interés).
- Cambios estructurales de la industria minera mundial (adquisiciones y fusiones de grandes conglomerados mineros, lo que inmoviliza en el corto plazo grandes capitales y provoca dificultades de financiamiento).

A continuación se presenta un breve resumen de la situación de cada uno de los proyectos. La tabla adjunta muestra en forma esquemática los tamaños esperados y la probabilidad de que entren en producción antes de 1990.

2. MOCHA

El prospecto Mocha se ubica a 157 km al NE. de Iquique (I Región) a una altura de 2200 m sobre el nivel del mar. El distrito de Mocha ha sido antiguo productor de cobre, plomo, zinc y oro (ejemplo: minas Caupolicán, San Enrique y La Española). El proyecto ha sido objeto de varios estudios, entre ellos uno de Naciones Unidas, que en base a 6 sondeos constató la existencia de sulfuros primarios bajo un horizonte lixiviado de 20 m de espesor medio. En 1980, Continental Oil Co. (CONOCO) firmó un contrato de exploración con los dueños de las pertenencias particulares, con opción de compra, por un lapso de 5 años. El programa de reconocimiento contempla un presupuesto anual de US\$ 5 millones por 3 años.

3. CERRO COLORADO

El yacimiento Cerro Colorado se ubica a unos 97 km al NE de Iquique, en la I Región, y a una altura de 2.500 m sobre el nivel del mar.

Entre 1975 y 1980 la Nippon Mining Co. Ltd. de Japón invirtió US\$ 2.428.000 en exploración y estudios, habiendo realizado 24 sondeos con más de 6 mil metros perforados y socavones por un total de 1.350 metros. Se calcularon reservas superiores a 50 millones de toneladas con 1.330/o Cu fino.

Actualmente los dueños de las pertenencias llegaron a un acuerdo con la empresa Rio Algom, subsidiaria de la Rio Tinto Zinc Corp., para un contrato de opción de exploración. Esta empresa solicitó autorización al Comité de Inversiones Extranjeras por US\$ 250 millones para llevar a cabo un proyecto que permitiría producir 60.000 toneladas métricas de cobre fino al año.

4. QUEBRADA BLANCA

El yacimiento Quebrada Blanca está ubicado en la I Región, a unos 160 km al SE de Iquique, entre 4.000 y 4.500 metros de altura sobre el nivel del mar.

Se trata de un proyecto conjunto entre el Estado de Chile (490/o) y un grupo de inversionistas formado por The Superior Oil Co., Falconbridge Nickel Mines Ltd., Canadian Superior Oil Ltd., y Mc Intyre Mines Nevada Ltd. (510/o). En 1977 se firmó un Convenio General y un Contrato de Inversión Extranjera por US\$ 500 millones.

Entre esta fecha y mediados de 1981 se han realizado más de 30.000 metros de sondeos, un túnel de 2.500 metros de corrida y 12 chimeneas. Las reservas se calcularon en 230 millones de toneladas con 0,90/o de cobre y molibdeno contenido. A fines del año pasado se completó el Estudio de Prefactibilidad. El Estudio de Factibilidad se terminará a fines del próximo año, tomándose la decisión definitiva a comienzos de 1983.

Se estima una producción anual de 100.000 toneladas métricas de cobre fino como concentrados.

A la fecha se ha invertido en el proyecto alrededor de US\$ 20 millones.

5. EL ABRA

El yacimiento El Abra se encuentra en la II Región, a 42 km al norte de Chuquicamata, a una altura aproximada de 4.000 metros sobre el nivel del mar. Este depósito ha sido objeto de explotación a pequeña escala y de diversos estudios en el pasado. Desde 1965 hasta 1968 Chile Exploration Co. realizó 7 sondeos que demostraron la existencia de mineralización hasta profundidades de 400 metros. Entre mediados de 1972 y mediados de 1975 el "Proyecto El Abra" realizado por la

División de Geología de Chuquicamata, completó las fases fundamentales de la evaluación del yacimiento.

Se realizaron 33.000 metros de sondajes y 1.350 metros de labores subterráneas, estimándose recursos globales de 1.368 millones de toneladas de mineral, 190 millones correspondientes a minerales oxidados de 0,66% Cu soluble y 1.178 millones de toneladas de sulfuros con ley media de 0,59% Cu insoluble.

Actualmente, CODELCO Chile está preparando los antecedentes técnicos a fin de proceder a una eventual licitación del yacimiento.

6. MANTOS BLANCOS

El yacimiento de Mantos Blancos está ubicado en la II Región, a 45 km al NE de Antofagasta.

La Empresa Minera Mantos Blancos opera las minas, plantas de beneficio de minerales de cobre oxidados de 8.000 toneladas métricas de mineral por día y, desde el 6 de marzo de este año, la planta de sulfuros de 3.500 toneladas métricas por día, de capacidad. Esta planta se diseñó y construyó con la inversión de la firma South American Consolidated Enterprises S.A. de Panamá, propietaria de la Empresa, por US\$ 18,5 millones, acogidas al Estatuto de Inversión Extranjera.

La planta trata minerales mixtos de 1,5% cobre insoluble, 0,5% de cobre soluble y 21 gr/TM de plata. La planta consiste en un proceso convencional de flotación de las especies sulfuradas (calcosina, covelina, bornita y calcopirita), incluyendo además una etapa de flotación sulfurante destinada a recuperar parte de los minerales oxidados (atacamita y malaquita).

La lixiviación por agitación de este último concentrado permite obtener soluciones cúpricas que son enviadas a la planta de óxidos para su precipitación.

7. EL INDIO

El yacimiento El Indio está ubicado en la Alta Cordillera de los Andes, en la zona límite de la III y IV Región, a unos 100 km a NE de Vicuña y a unos 4.000 metros sobre el nivel del mar.

El 15 de julio de 1977 la Compañía Minera San José firmó con el Estado de Chile un contrato de inversión extranjera por la suma de hasta US\$ 100 millones para realizar uno o más proyectos mineros.

En diciembre del presente año entró en operación la mina y planta que producirán 6.500 kg de oro, 50.000 kg de plata, 12.000 toneladas de cobre y 7.000 toneladas de trióxido de arsénico al año. La



inversión total realizada llega a US\$ 220 millones. La mina considera una operación subterránea y a rajo abierto y una producción diaria de 1.250 toneladas métricas de mineral. La planta de tratamiento incluye chancado primario y secundario, lavado del mineral, molienda, flotación, tostación del concentrado para eliminación y recuperación de arsénico, cianuración de las colas de flotación, adsorción del oro y la plata, disueltos, en carbón activado y electroobtención del oro y plata.

Las reservas actuales de El Indio alcanzan a sobre 3 millones de toneladas métricas con 12 g TM de oro, 144 g TM de plata y 3,520/o de cobre. Adicionalmente existen cerca de 70.000 toneladas de mineral de alta ley, con 277 g TM de oro, 116 g TM de plata y 2,24 o/o de cobre, que es exportado directamente.

8. ANDACOLLO

El yacimiento Andacollo está situado en la IV Región, a unos 40 km al SE de Coquimbo y a una altura de 1.050 metros sobre el nivel del mar.

En 1977 se firmó un contrato de inversión extranjera y un convenio complementario entre el Estado de Chile y Noranda Mines Limited por la suma de hasta US\$ 350 millones. La contraparte del inversionista extranjero sería ENAMI (490/o).

Noranda realizó entre 1975 y 1980 la exploración completa del yacimiento, el estudio de factibilidad, la ingeniería básica y parte de la ingeniería de diseño del proyecto, que permitiría producir 70.000 toneladas métricas de cobre fino al año. La inversión necesaria para el proyecto se estimó en más de US\$ 400 millones.

Las reservas calculadas son 230 millones de toneladas de mineral con ley media de 0,550/o de Cu total y contenidos de oro y plata.

En 1980 el Estado de Chile y ENAMI comunican a Noranda su no conformidad con el financiamiento conseguido y expresan su voluntad de realizar libremente el proyecto, de acuerdo a las cláusulas pertinentes de los convenios, reembolsando a Noranda los gastos incurridos en el proyecto. Una vez que se publique el Código de Minería se entregarán las bases para la licitación de este yacimiento.

9. LOS PELAMBRES

El yacimiento Los Pelambres se encuentra ubicado a 79 km al este del pueblo de Salamanca, en la IV Región y a una altura sobre el nivel del mar entre 3000 y 3600 metros.

El yacimiento Los Pelambres pertenecía a un grupo de particulares quienes llamaron a licitación

en 1979, adjudicándose el yacimiento la Empresa Anaconda.

En octubre de ese año, Anaconda Chile Inc. firmó un contrato de inversión extranjera por la suma de hasta US\$ 1500 millones para la adquisición, exploración y posible explotación de dicho depósito.

El total de la inversión de Anaconda S.A. en el proyecto Los Pelambres, al 31 de diciembre de 1981, alcanzará a US\$ 47 millones aproximadamente.

Hasta la fecha se han perforado alrededor de 49.000 metros de sondajes y se ha construido 800 metros de túneles. La planificación de la mina se está desarrollando en Denver U.S.A. En Chile se están efectuando pruebas metalúrgicas con minerales del túnel y varios estudios sobre abastecimiento de agua, puerto, control de avalanchas, tranque de relaves, meteorológicos, etc. Durante el presente año se han suscrito 31 contratos de ingeniería, 29 de los cuales son con firmas nacionales.

10. DISPUTADA

En 1978 Exxon Minerals Chile Inc. firmó un contrato de inversión extranjera con el Estado de Chile por la suma de hasta US\$ 1.200 millones para explorar y explotar el complejo Disputada de Las Condes. Este se compone del Grupo Cordillera, a 70 km al N.E. de Santiago, 3.500 metros sobre el nivel del mar (Mina Los Bronces y Planta Concentradora San Francisco), Grupo Norte, a 130 km al N.O. de Santiago, 800 metros sobre el nivel del mar (Mina El Soldado y Planta Concentradora El Cobre). Este grupo también incluye la fundición de Chagres situada a 92 km al N.O. de Santiago.

10.1. Grupo Cordillera

La planta San Francisco tenía una capacidad de procesamiento de 6.500 TM de mineral/día. En julio de 1978 fue seriamente dañada por un alud, hecho que la mantuvo fuera de operaciones hasta julio de 1979, en que entró en operación la nueva planta, con una capacidad de 4.800 TM de mineral/día. Actualmente se ha puesto en marcha la ampliación a 8.400 TM de mineral/día, que utiliza molienda semiautógena, transporte de mineral por tubería y celdas de flotación de gran volumen.

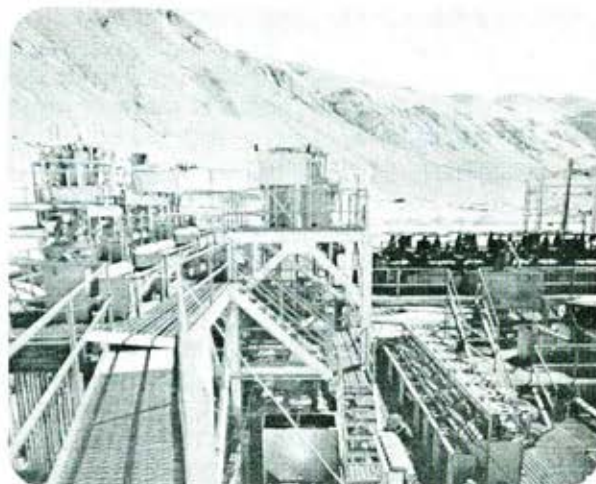
Paralelamente se está llevando a cabo la exploración y estudios para elevar la producción de Los Bronces hasta 80.000 TM de mineral/día. La exploración ha sido muy intensa, con más de 120.000 metros perforados de sondajes que han demostrado reservas de más de 1000 millones de toneladas de mineral con ley media de 1,00/o aproximadamente.

La decisión definitiva sobre este proyecto será tomada antes de 1984. La inversión estimada es superior a los US\$ 2000 millones.

10.2. Grupo Norte

La planta El Cobre procesa 3.300 TM de mineral/día y ha sido objeto de varias modificaciones por parte de Exxon para optimizar su producción. Las reservas alcanzan a los 25 millones de toneladas con una ley media de 1,79% de cobre. Paralelamente a las mejoras de operación se ha realizado cerca de 16.000 metros de sondajes.

La inversión total, a la fecha, realizada por Exxon Minerals Chile Inc. alcanza a cerca de US\$ 450 millones.



PROYECTOS DE INVERSION EXTRANJERA EN MINERIA DEL COBRE

Proyectos	Producción Estimada TM/año Cu fino	Inversión Autorizada US\$ x 10 ⁶	Inversión Adicional US\$ x 10 ⁶	Probabilidad de entrar en producción antes de 1990
1. Concretados				
1.1. El Indio	14.000	100	~160	(1981)
1.2. Mantos Blancos ¹	13.500	18,5	-----	(1981)
2. En Marcha				
2.1. Quebrada Blanca	100.000	500	~200	100%/o
2.2. Pelambres	150.000	1.500	~500	60%/o
2.3. Disputada	240.000	1.200	~800	70%/o
2.4. Cerro Colorado	60.000	250 ²	-----	80%/o
3. En licitación				
3.1. Andacollo	70.000	600 ³	-----	60%/o
3.2. El Abra	100.000	900 ³	-----	40%/o
4. Nuevos				
4.1. La Escondida	100.000	1.500	-----	60%/o
5. Prospectos				
5.1. Mocha	40.000 ⁴	-----	-----	30%/o

NOTAS:

1 Planta de sulfuros.

2 En trámite.

3 Estimaciones en base a información de la Comisión Chilena del Cobre.

4 Información preliminar (en exploración de reconocimiento).

Dr. Marco A. Solar B.
Profesor del Depto. Metalurgia
USACH



FLUIDIZACIÓN: diseño de reactores de lecho fluidizado 1ª parte

En artículos anteriores hemos analizado las aplicaciones industriales del lecho fluidizado y sus parámetros físicos de funcionamiento. En el presente, iniciamos una serie destinada a entregar los fundamentos para su dimensionamiento o diseño.

El cálculo o dimensionamiento de un reactor de lecho fluidizado es, en su aspecto general, un problema complejo donde intervienen, entre otros, los balances clásicos encontrados en Ingeniería.

Balance de Materia: que considera la cinética química de las reacciones involucradas y las velocidades de transferencia de materia entre las distintas fases presentes en el proceso.

Balance de Energía: donde intervienen en particular los efectos térmicos de la reacción y las transferencias de calor.

Balance de Cantidad de Movimiento: cuyo papel principal es el de determinar la pérdida de carga a través del reactor.

Junto a estos balances tenemos además:

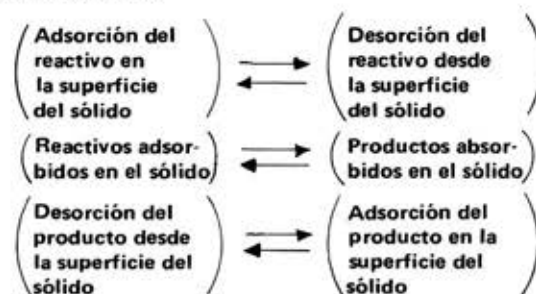
Ecuaciones de Optimización: donde se indica qué respuesta se desea optimizar, obtención máxima de un producto en el volumen mínimo, producción máxima horaria, producción al costo mínimo, etc.

Ecuaciones Dinámicas: que definen la estabilidad del proceso, las características del régimen transitorio, las posibilidades de control y de regulación de la operación del reactor, etc.

Cuando este problema se plantea en su generalidad, su resolución es sólo posible por métodos de simulación, por computación o por métodos numéricos, salvo raras excepciones en que puede resolverse analíticamente.

Los reactores de lecho fluidizado son intrínsecamente heterogéneos, ya que siempre hay dos o más fases presentes: la fase fluida y una o más fases sólidas. En todos los sistemas heterogéneos fluido-sólido en reacción, existen dos tipos de procesos:

Procesos de transformación química: ocurren en la interfase o en el interior del grano, es el acto químico mismo; estos procesos comprenden las etapas siguientes:



Procesos físicos o procesos de transporte de materia y calor: estos procesos ocurren:

- En el interior de las fases (transporte de masa y calor).
- Entre las fases (transferencia de masa y calor).

- Entre las paredes del reactor y el sistema reaccionante.

Los procesos de transformación química son independientes del tipo de reactor utilizado, dependen solamente de la naturaleza y composición de las fases, de la temperatura y presión total de trabajo.

Al igual, los procesos de transporte en el interior de las fases son normalmente independientes del tipo de reactor utilizado.

Los procesos de transferencia entre las fases y entre el sistema reaccionante y las paredes son fuertemente tributarios del tipo de reactor utilizado y de la velocidad relativa entre las fases.

De acuerdo a la naturaleza del escurrimiento de las fases en el interior del reactor, depende el grado de homogeneidad de la fase durante su paso por el reactor. Este factor tiene gran importancia en el grado de conversión que se puede alcanzar. Existen dos tipos de escurrimiento límites que dan origen a su vez a otros dos tipos de grado de mezcla en el interior de las fases:

Fase Perfectamente Agitada: la consecuencia de la agitación es que la composición de la fase es la misma en cualquier punto dentro del reactor e igual a la composición en la corriente de salida del reactor. El grado de mezcla en el interior de la fase es máximo y los coeficientes de difusión de todas las especies que se encuentran en ella es infinito.

Fase en Escurrimiento Pistón: esta expresión significa que los reactivos y productos fluyen en bloque a través del reactor en franjas paralelas sucesivas no intercambiando materia entre ellas. El grado de mezcla es nulo dentro de la fase al igual que los coeficientes de difusión en la dirección del flujo. La composición de la fase varía continuamente a lo largo del reactor.

Los reactores industriales presentan a menudo un comportamiento intermedio a los ya señalados: mezcla parcial en las fases, agitación imperfecta, mal contacto entre las fases, etc.

Sin embargo, siempre se puede relacionar con uno de los dos tipos límites de escurrimiento indicados y aproximar su comportamiento, ya sea al de un reactor o al de una asociación de varios reactores tipos, funcionando en condiciones ideales. Estos reactores tipos son:

Reactor Perfectamente Agitado: puede ser un reactor cerrado, semi-cerrado o abierto, trabajando en régimen isotérmico y/o isobárico; se desprecian las pérdidas de carga y los gradientes de concentración, el coeficiente de difusión es infinito para todas las especies.

Reactor en Escurrimiento Pistón: reactor trabajando en régimen isotérmico y/o isobárico, se desprecian las pérdidas de carga y los fenómenos de difusión axial. Para todas las especies, el coeficiente de difusión axial es nulo y el de difusión radial es infinito. Existe gradiente de concentración sólo a lo largo del reactor y no en el sentido transversal. El reactor es abierto.

A estos tipos de reactores se les llama reactores ideales. Estos modelos ideales permiten comprender cuáles son los parámetros críticos del funcionamiento del reactor real que se les asemeja.

Si conociéramos las velocidades a las cuales se efectúan los procesos de transformación química y los procesos de transporte de materia y calor en función de las variables que las afectan, ya sea como una expresión analítica o en forma gráfica, sería posible determinar, en forma simple, el volumen del reactor ideal necesario para obtener una conversión dada.

Desgraciadamente, los modelos de reactores ideales enunciados anteriormente, se alejan bastante de la realidad para el caso de sistemas heterogéneos, dando como resultado una conversión distinta a la predicha. Para este tipo de sistemas, es necesario determinar el tiempo de contacto entre las fases, es decir, es preciso conocer la distribución de tiempos de residencia de cada fase dentro del reactor.

Vemos, entonces, que en el cálculo de un reactor heterogéneo debemos tener en cuenta tres aspectos:

- La cinética química
- Las velocidades de transferencia y transporte
- La distribución de tiempos de residencia.

FILOSOFIA DEL DISEÑO DE UN REACTOR HETEROGENEO

Cuando se plantea el problema de diseñar un reactor para efectuar una reacción a escala industrial, éste puede abordarse de varios modos.

Un primer modo consiste en mirar el reactor como una "caja negra", en la cual se efectúa la reacción, pero sin entrar a conocer lo que sucede dentro de él, se busca entonces las condiciones óptimas de operación de dicho reactor a fin de optimizar alguna respuesta. Se sabe así cuáles son las mejores condiciones de operación, pero no se ha ganado nada en la comprensión de su funcionamiento, las conclusiones sacadas son sólo válidas para el tipo y tamaño de reactor considerado, no pudiendo por lo tanto extrapolar dichas conclusiones a otros reactores. La etapa siguiente consiste

en pasar a una unidad mayor, del mismo tipo que la primera y partiendo de las condiciones halladas anteriormente buscar nuevamente las condiciones óptimas; con estos nuevos datos se pasa entonces a un reactor mayor, hasta llegar finalmente a la instalación industrial.

Un segundo modo, considera el reactor como una región del espacio donde existe un campo de velocidades, gradientes de concentración, de temperatura, etc. Se parte entonces de los balances puntuales de materia, energía y cantidad de movimiento, tomando en consideración las transferencias correspondientes entre fases y el estado transiente.

Aunque este método, es en efecto el que representaría realmente al reactor, es imposible aplicarlo rigurosamente, salvo en el caso de los reactores ideales, ya que para su uso es necesario conocer los campos de velocidades, concentración y temperatura dentro del reactor, además si esto fuera conocido, las complejidades matemáticas que resultan hacen impracticable el método.

A fin de obviar estas complejidades pueden hacerse suposiciones simplificadoras, lo que al final lleva a un modelo de reactor particular que no representa fehacientemente el comportamiento del reactor real.

Un tercer método consiste en considerar al reactor como formado por varias zonas o regiones macroscópicas de comportamiento diferente, y donde este comportamiento así como las relaciones entre las diferentes zonas pueden ser descritos analíticamente. Estas regiones pueden determinarse en base a las respuestas obtenidas para las diferentes condiciones de operación y principalmente en base al estudio hidrodinámico del reactor. Se busca entonces un modelo del funcionamiento interno del reactor y al así hacerlo, es posible determinar qué factores del funcionamiento interno, dependen del tipo de reactor y cuáles son los intrínsecos a la reacción o proceso mismo; conociendo esto es posible pasar a la etapa de planta piloto, a fin de determinar entre otras cosas, cómo varían los factores que dependen del reactor a causa del escalamiento.

Este tercer método implica el estudio de los siguientes aspectos:

- Procesos de transformación química
- Procesos de transferencia:
 - a) Entre el sistema reaccionante y el ambiente a través de superficies de contacto y por las corrientes de entrada y salida.
 - b) Entre las fases.
 - c) En el interior de las fases.

De acuerdo a esta metodología el camino a seguir en el diseño de una instalación para un proceso heterogéneo sería el siguiente:

I. Estudio de la transformación química

Determinación de la cinética y mecanismo de la reacción química involucrada. Si no existe en la literatura la información suficiente sobre la reacción particular, es necesario hacer la determinación experimentalmente.

Este estudio cinético y mecanístico no tiene sólo un mero interés académico, sino que es necesario conocer la velocidad para poder dimensionar, y además, conociendo el mecanismo, es posible, determinar qué camino seguirá la reacción, de acuerdo a las condiciones en que se efectúa, es decir, a qué productos dará origen si cambian las condiciones de trabajo, por lo tanto, se puede predecir qué factores físico-químicos influyen, cómo influyen y cómo lo hacen en la distribución de productos de la reacción.

Al estudiar el proceso químico es necesario verificar si en el equipo utilizado se han eliminado o no, los problemas de transferencias. Esto es válido tanto en la parte experimental como en el análisis de los resultados que aparecen en la literatura.

II. Estudio de los procesos de transferencia

Determinación de los coeficientes de transferencia de materia y calor. Afortunadamente existen correlaciones empíricas para determinar dichos coeficientes, sin embargo, es recomendable verificar dichos valores. Estos coeficientes dependen del tipo de reactor utilizado, es decir, del modo de escurrimiento, y en el caso de los reactores heterogéneos, del modo de puesta en contacto de las fases.

En general, es difícil aislar experimentalmente, para su estudio, los dos tipos de procesos, por lo que el análisis de los resultados experimentales requiere de una información recíproca.

III. Estudio hidrodinámico del reactor

Elegido el tipo de reactor, el modo de puesta en contacto de las fases co o contra corriente, flujo cruzado y el modo de operación: continuo, semi-continuo, discontinuo, se determina la distribución de tiempos de residencia o tiempos de contacto y los perfiles de concentración y temperatura.

Desgraciadamente para esta parte no existen correlaciones empíricas, por lo tanto, es necesario, entonces hacer la determinación experimentalmente.

IV. Escalamiento

Conociendo los procesos ya mencionados, se procede al dimensionamiento de una planta piloto, a fin de estudiar los problemas tecnológicos de operación y prefactibilidad económica del proceso. En algunos casos, cuando los costos de instalación

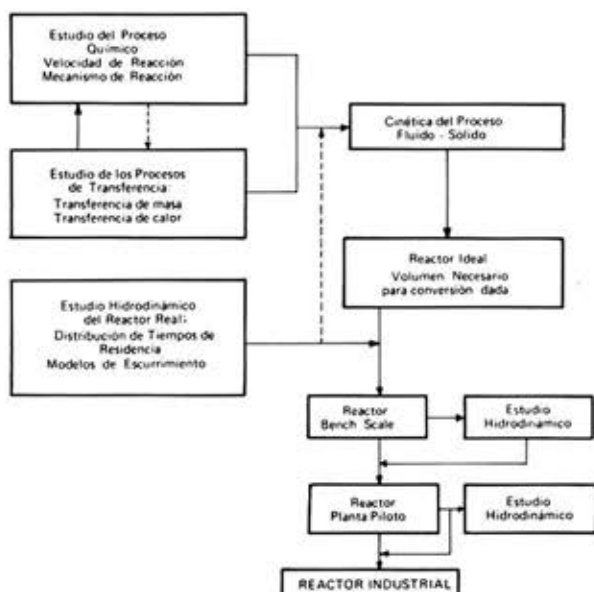
u operación de la planta piloto son elevados, se recomienda la etapa de equipo "bench-scale", que es menor en tamaño que una planta piloto, pero que es mayor que un equipo de laboratorio. En esta etapa se detectan las dificultades, tanto tecnológicas, como de operación que presentaría una instalación de mayor envergadura.

Desde el punto de vista del escalamiento del reactor, los procesos de transformación química, así como las transferencias en el interior de las fases, no presentan problemas, ya que son independientes del reactor utilizado.

Las transferencias entre las fases dependen principalmente de los números adimensionales Re , Pe , Nu , Fr , por lo que tampoco presentan gran problema para el escalamiento. Sin embargo, para la distribución de tiempos de residencia, no se conocen exactamente aún, los números adimensionales de los cuales depende. Se sabe que los números adimensionales que rigen el escurrimiento y el grado de agitación o mezcla, juegan un papel importante, igualmente influyen algunos números adimensionales de origen geométrico, pero lamentablemente, en algunos casos, al respetar estos números se originan contraposiciones con los números adimensionales de los procesos de transferencia.

Por lo tanto, es necesario estudiar en cada etapa el efecto que tiene el escalamiento en la distribución de tiempos de residencia, para poder escalar así hasta la instalación industrial.

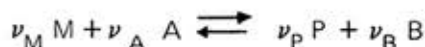
Diagrama de flujo del diseño de un reactor industrial



CARACTERISTICAS DE LOS PROCESOS HETEROGENEOS FLUIDO-SOLIDO

Para mostrar la complejidad e interrelación de las etapas físicas y químicas de un proceso heterogéneo, hemos resumido a continuación todas las etapas elementales que intervienen cuando un fluido reacciona con un lecho de partículas porosas.

Supondremos que realizamos la reacción en un lecho fluidizado en el cual el componente M de la mezcla fluida, reacciona con el reactivo sólido A para dar origen al producto fluido P y al producto sólido B, de acuerdo a la siguiente reacción:



Las etapas elementales en las cuales se puede subdividir este proceso heterogéneo fluido-sólido son las siguientes:

1. Transporte forzado del reactivo M a través del lecho fluidizado, por escurrimiento de la masa de fluido.
2. Difusión externa de la molécula M, desde el seno de la fase fluida, hasta la frontera de la partícula, a través de la capa límite estacionaria que se crea alrededor de la partícula. Si $\nu_M = \nu_P$ la difusión es equimolecular.
3. Difusión interna en la partícula, avance de la molécula M desde la frontera de la partícula hacia el interior de ella por difusión molecular a lo largo de los poros.
Las tres etapas siguientes conforman el proceso de transformación química:
4. Quimisorción de M sobre un sitio activo, ya sea en la superficie externa de la partícula o en la superficie interna de los poros.
5. Transformación química de los reactivos M y A en los productos P y B en la fase adsorbida.
6. Desorción de P desde la superficie externa e interna de la partícula.
7. Difusión interna de la molécula P, desde el interior de la partícula hacia la frontera de ella, por difusión molecular a lo largo de los poros.
8. Difusión externa de P, desde la frontera de la partícula hasta el seno de la fase fluida, a través de la capa límite que rodea a la partícula.
9. Transporte forzado de P hacia el exterior del lecho fluidizado por escurrimiento de la masa de fluido.

10. Generación y transferencia de calor en el interior del grano.

Pueden ocurrir también las siguientes etapas secundarias:

11. Transformaciones químicas secundarias de M o P tanto en la fase gaseosa como en la fase adsorbida.
12. Difusiones en la fase sólida, particularmente importante, cuando ciertos constituyentes de la fase sólida participan en la reacción y la porosidad de la partícula es muy pequeña.
13. Intercambio del calor de reacción con el ambiente, en parte por la corriente de fluido y en parte por las superficies en contacto con el sistema reaccionante (serpientes, paredes del reactor, etc.).
14. Pérdida de carga del fluido por su escurrimiento a través del lecho fluidizado.

Las etapas elementales principales, vistas anteriormente, se realizan en su mayoría en serie como se indica en el diagrama adjunto.

La etapa más lenta, es decir, la de mayor resistencia en las condiciones de operación, será la que controla la transformación global; es la etapa controlante.

Las etapas de flujo forzado (1 y 9) en el interior del reactor dependen principalmente del tipo de reactor utilizado, del tamaño y forma de la partícula y del caudal de la fase fluida.

Las etapas exteriores al grano, transferencias externas (2 y 8), dependen del tamaño y forma de la partícula, de la velocidad relativa entre el fluido y las partículas y del modo de puesta en contacto de ambas fases, es decir, del tipo de reactor utilizado. Las etapas interiores del grano (3 al 7) dependen de la naturaleza física y química del sólido y de la composición de la fase fluida. Estos procesos no dependen del tipo de reactor utilizado.

Las etapas de transferencia en el interior del grano (3 y 7) dependen del tamaño y forma de las partículas y de la porosidad y tamaño de los poros.

Las etapas de transformación química (4 al 6), dependen de la composición del sólido y del fluido y de la presión y temperatura.

La difusión en los poros depende del diámetro y de la longitud del poro (mientras más largo y estrecho es el poro, más difícil es la difusión) y de las características de las moléculas que difunden.

Las etapas de transformación química dependen de la temperatura y de la afinidad química de A y M; además, el sólido puede tener un tercer cuerpo (X) que puede catalizar o inhibir la reacción.

EXPRESIONES ANALITICAS DE LAS ETAPAS

Flujo forzado de reactivos y productos

Existen dos tipos de flujo a través de un lecho fluidizado:

Flujo convectivo: es el escurrimiento de conjunto de la masa de fluido y vale para un componente cualquiera de la mezcla fluida QC donde Q es el flujo volumétrico y C la concentración promedio en la sección considerada.

Flujo por difusión: debido al gradiente de concentración que se produce en la dirección del flujo en el interior del reactor, este flujo se debe principalmente a una difusión turbulenta y se expresa por la ley de Fick:

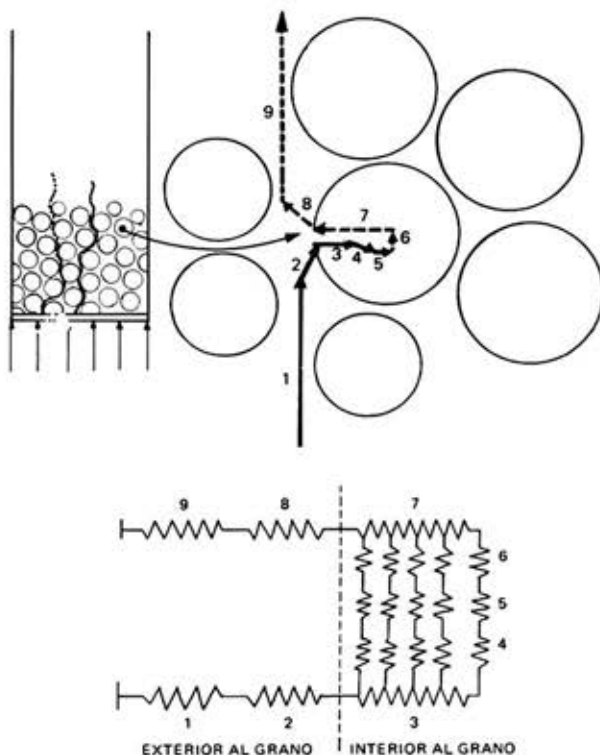
$$J = D \Omega \frac{\partial C}{\partial Z}$$

donde D es el coeficiente de difusión del componente en el interior del reactor, Ω es el área de la sección considerada perpendicularmente al sentido del flujo y Z la distancia en la dirección del flujo.

El flujo total para el reactivo M es:

$$\Phi_M = Q C_{M0} - D_M \Omega \frac{\partial C_{M0}}{\partial Z}$$

LOS PROCESOS ELEMENTALES



y para el producto P

$$\Phi_P = Q C_{Po} - D_P \Omega \frac{\partial C_{Po}}{\partial Z}$$

Donde C_{Mo} y C_{Po} son las concentraciones de M y P en el seno del gas.

Flujo a través de la capa límite

El flujo por difusión molecular del reactivo M a través de la capa límite está dado por la expresión:

$$\Phi_M = k_{GM} a (C_{Mo} - C_{Ms})$$

Donde: C_{Ms} es la concentración de M en la frontera de la partícula.

El coeficiente de transferencia de materia $k_{GM} a$ es una función de los números adimensionales Re, Sh y Sc.

Para un sistema fluido-sólido específico, los únicos factores de operación que se pueden alterar son el tamaño de la partícula y la velocidad relativa entre la fase fluida y la sólida; a mayor velocidad aumenta k_G y una disminución del diámetro de la partícula produce un aumento del producto $k_G a$, aumentando por lo tanto el flujo a través de la capa límite.

Las correlaciones para $Nu = f(Re, Sh, Sc)$ se encuentran en la literatura especializada para los diferentes modos de puesta en contacto de un fluido con un sólido.

Difusión en los poros

Dependiendo de los valores relativos del libre recorrido medio de las moléculas y del diámetro de los poros, la difusión a través de estos puede efectuarse por uno de los siguientes mecanismos elementales:

Difusión de Fick o difusión ordinaria: Se cumple cuando el libre recorrido medio de las moléculas (λ) es mucho menor que el diámetro de los poros (dp). En este caso, el número de choques de las moléculas entre sí es mucho mayor que los choques de las moléculas con la pared de los poros, por lo tanto, las especies difunden libremente, se aplica entonces la ley de Fick:

$$j_M = -D_M^* \frac{\partial C_M}{\partial x}$$

donde j_M es el flujo específico en los poros, D_M^* el coeficiente de difusión molecular ordinaria, C_M la concentración de M en el poro y " " la

distancia medida desde la frontera de la partícula hacia el interior de ella.

Difusión de Knudsen: Se cumple cuando el libre recorrido medio es mucho mayor que el diámetro de los poros, por lo tanto, el número de choques entre las moléculas es despreciable frente a los choques entre las moléculas y la superficie de los poros.

La experiencia muestra que el flujo específico está dado por la expresión de Fick con:

$$j_M = -D_K \frac{\partial C_M}{\partial x}$$

donde D_K es la difusividad de Knudsen, la cual, de acuerdo a la teoría cinética para el caso de los gases vale:

$$D_K = \frac{\bar{V} dp}{3}$$

donde \bar{V} es la velocidad media de agitación molecular.

Rango intermedio: En el dominio intermedio, cuando λ y dp son del mismo orden de magnitud, se han propuesto fórmulas empíricas para el coeficiente de difusión, como la de Wheeler:

$$D = \frac{\bar{V} \lambda}{3} [1 - \exp(-dp/\lambda)]$$

Proceso de transformación química.

Las tres etapas que conforman este proceso, es decir, adsorción del reactivo sólido, transformación del reactivo adsorbido en producto adsorbido y finalmente desorción del producto, son etapas sucesivas, o sea, se realizan en serie. En forma simplificada podemos dar una expresión global, para el conjunto de las tres etapas, de la forma cinética tradicional:

$$r = k C_M^n$$

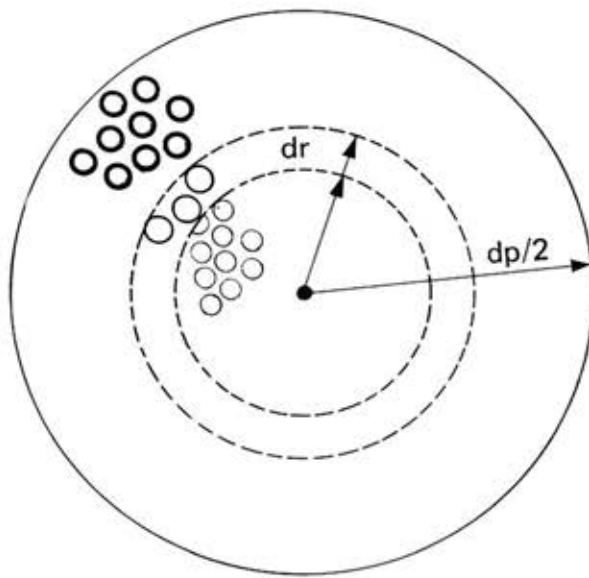
donde r es la velocidad de reacción química específica referida a una magnitud extensiva tal como masa o volumen de sólido, superficie interfásica, etc., k es la constante de velocidad específica referida igualmente que r a la misma propiedad extensiva del sistema, C_M la concentración de M en el poro y n el orden aparente de la reacción, que debe determinarse por vía experimental y cuyo valor está influenciado por las velocidades relativas de las tres etapas que conforman este proceso global.

Efecto combinado de la difusión y reacción en una partícula porosa

Como hemos indicado, la difusión y reacción son etapas que ocurren en forma simultánea en el interior de la partícula, es decir, a medida que el fluido difunde, se produce la reacción.

Para establecer analíticamente la interrelación entre ambas etapas debe plantearse el balance de materia correspondiente.

Con respecto a la partícula porosa, esquematizada en la figura 2, tenemos que la variación del flujo de reactivo por difusión en el interior del grano, en la distancia dr , en régimen pseudo estacionario, es igual a la cantidad que ha reaccionado en el volumen dV .



$$\left(\begin{array}{c} \text{Variación del} \\ \text{flujo por difusión} \\ \text{en la distancia } dr \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cantidad} \\ \text{reaccionada en} \\ \text{el volumen } dV \end{array} \right)$$

$$\frac{d}{dr} \left(4 r^2 \pi D_M \frac{dC_M}{dr} \right) dr = k_V C_M^n dV \quad (1)$$

pero

$$dV = 4 \pi r^2 dr \quad (2)$$

Reemplazando y simplificando obtenemos

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{dC_M}{dr} \right] = \frac{k_V C_M^n}{D_M} \quad (3)$$

Donde r es la distancia medida desde el centro hacia la superficie, C_M la concentración de M en el interior del grano, D_M el coeficiente de difusión de M en el grano y k_V la constante de velocidad específica de reacción por unidad de volumen del sólido poroso y n el pseudo orden de reacción como señaláramos anteriormente.

Las condiciones de borde de esta ecuación diferencial son:

$$C_M = C_{Ms} \quad \text{para } r = dp/2 \quad (4)$$

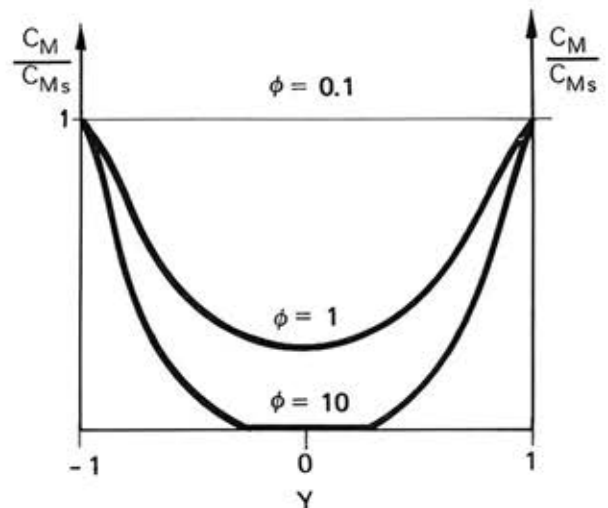
$$\frac{dC_M}{dr} = 0 \quad \text{para } r = 0$$

Para $n = 1$, la solución analítica de (3) es:

$$\frac{C_M}{C_{Ms}} = \frac{\text{sen } h(\Phi_s y)}{y \text{ sen } h \Phi_s}$$

donde $y = 2r/dp$ distancia adimensional y $\Phi_s = dp/2 \sqrt{k_V/D_M}$ es el módulo de Thiele y da la importancia relativa entre las velocidades de difusión y reacción en el interior de la partícula.

La forma del perfil de la concentración de M en función de la distancia adimensional " y " depende del valor del módulo de Thiele tal como se observa en la figura 3.



Para valores pequeños del módulo, es decir, cuando la difusión es muy superior a la reacción, la concentración de M en la partícula es uniforme e igual a la concentración en la frontera de la partícula.

Cuando la reacción es muy superior a la difusión, la molécula M no alcanza a difundir hacia el

interior de la partícula, la reacción ocurre sólo en una delgada capa, el perfil decae a cero en una distancia pequeña, que es cada vez menor a medida que el módulo crece.

La velocidad de transformación de la partícula está dada por:

$$\text{Velocidad de transformación de la partícula} = 4 dp^2 \sqrt{k_V D} [\cotg h \Phi_s - 1/\Phi_s] C_{Ms}$$

Para valores de $\Phi_s < 0,3$ la expresión se transforma en

$$\left(\text{Velocidad de transformación de la partícula} \right) = \frac{4}{3} \pi dp^3 k_V C_{Ms}$$

y para valores de $\Phi_s > 15$ la expresión se transforma en

$$\left(\text{Velocidad de transformación de la partícula} \right) = 4 \pi dp^2 \sqrt{k_V D} C_{Ms}$$

MODELOS CINETICOS

Dependiendo de los valores relativos de la velocidad de reacción entre el fluido y el sólido y de la velocidad de difusión del fluido en los poros del sólido, se tienen dos casos extremos.

Reacción en régimen químico: $\Phi_s < 0,3$

La velocidad del proceso de transformación química es muy inferior a la velocidad de difusión. En este caso la partícula está completamente saturada con el reactivo M y su concentración es C_{Ms} . La partícula reacciona homogéneamente en toda la masa. Este modelo cinético se llama: no topoquímico, homogéneo en la masa o reacción continua.

Si en un instante cualquiera se detuviera la reacción, se hiciera un corte de la partícula a lo largo de un diámetro se observaría que la sección está uniformemente reaccionada.

Reacción en régimen difusional: $\Phi_s > 15$

La velocidad del proceso de transformación química es muy superior a la velocidad de difusión. En este caso la reacción se produce en un frente que va avanzando hacia el interior de la partícula a medida que transcurre el tiempo. Podemos suponer, que la reacción se produce en la interfase que separa el producto del reactivo sólido. Este modelo se llama: modelo de núcleo no reaccionado o reacción topoquímica. Si en un instante cualquiera se hace un corte del grano siguiendo un diámetro, se observaría una capa de producto que envuelve un núcleo de reactivo que todavía no ha reaccionado y que conserva la misma figura geométrica que la partícula original.

Resumiendo, podemos escribir en forma general que la velocidad de transformación química en el interior de una partícula está dada por:

$$\left(\text{Velocidad de transformación de la partícula} \right) = 4 \pi dp^2 K C_{Ms}$$

donde dependiendo del valor de Φ_s , K vale:

$$0 < \Phi_s < 0,5 \quad K = \frac{dp k_V}{3}$$

$$0,5 < \Phi_s < 15 \quad K = \sqrt{k_V D_M} [\cotg h \Phi_s - 1/\Phi_s]$$

$$15 < \Phi_s < \infty \quad K = \sqrt{k_V D_M}$$

Las expresiones vistas hasta el momento dan sólo la velocidad a la que se realiza la etapa respectiva; sin embargo, para el diseño del reactor de lecho fluidizado, se requieren relaciones para el grado de conversión de la partícula en función del tiempo de reacción, las cuales serán desarrolladas en la segunda parte de este artículo. ●

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



los metales en la OPERA



Los metales han estado siempre presentes en las manifestaciones artísticas del hombre a lo largo de la Historia. Ya la Biblia, en el Génesis 4,18, nos describe a Tubalcáin como "forjador de todo género de objetos de bronce y de hierro".

En muchas esculturas y monumentos, los metales han sido vehículos de expresión artística. Muchos cañones, más allá de su mortífero objetivo, reflejan un verdadero talento artístico en sus fabricantes. Igual cosa ocurriría con las armaduras de los ricos señores feudales.

También en la arquitectura los metales le han permitido al hombre exteriorizar su vocación artística. La monumental y hermosa torre de acero diseñada por Eiffel para el centenario de la revolución francesa, es sólo una muestra.

En la ópera, "máxima expresión artística de todos los tiempos" (según especialistas), los metales hacen su aparición, ya sea en forma fugaz, o bien (y esto es lo que más nos importa en el presente artículo), en forma temática.

Quien revise con cierta detención los libretos de la gran mayo-

ría de las óperas comúnmente escuchadas, encontrará que en verdad los metales no pasan más allá de constituir meros objetos o implementos de uso corriente: joyas, monedas, objetos para comer y beber, cuchillos, dagas, espadas, lanzas, y diversos otros armamentos, carruajes, ornamentos, etc.

No obstante, hay pequeños trozos operáticos en los que los metales toman una participación más activa en el texto o en la escena. Un ejemplo muy conocido es la apología que el peluquero Fígaro hace del ORO en el

primer acto de "El Barbero de Sevilla", de Rossini:

*"All' idea di quel METALLO
portentoso, onnipossente..."*

o bien, la pintoresca escena en que el coro de gitanos inicia el segundo acto de "El trovador", de Verdi:

"... dagli, martella"

resonando un hermoso fondo musical que simula el trabajo de los herreros en sus yunques.

Pero sin duda que donde más en evidencia queda la participación activa de los metales en la temática misma, es en la obra maestra de Richard Wagner "El anillo de los Nibelungos".

Deseamos aclarar aquí eso sí, que más allá de cualquier juicio previo que el lector tenga en pro o en contra de Wagner, el objetivo del presente artículo no es otro que mostrar el rol de los metales en el ciclo particular de óperas, conocido como el Anillo.

Antes que nada es necesario decir algunas palabras sobre el Anillo, en general:

El Anillo de los Nibelungos es una tetralogía (o trilogía con prólogo) constituida por cuatro óperas: El oro del Rin, Las Valkirias, Sigfrido, y El Ocaso de los Dioses. El Anillo es un parabólico mensaje acerca de la futilidad de cualquier intento de gobernar al mundo por la fuerza. En esta obra, Wagner combinó la leyenda de Sigfrido y del tesoro de los Nibelungos, con el mito escandinavo del crepúsculo de los Dioses.

En la temática el ORO juega un rol trascendental. El oro juega un papel físico, y a la vez un papel lleno de simbolismo. El oro gobierna la filosofía del anillo.

Si el ORO del Rin se forja en un anillo, su dueño, renunciando al amor, puede tener poder sobre el mundo, sin embargo, el Nibelungo Alberico, quien ha robado

el oro a sus damas guardianas (las ninfas del Rin), maldice el anillo al verse obligado a entregarlo a los astutos dioses. Desde allí el anillo sólo trae desastre a quien lo posee. La muerte de los dioses del Valhala deja finalmente libre a la humanidad de la maldición del oro.

En lo que sigue veremos realmente hasta qué punto el ORO y el FIERRO participan activamente en el texto, en la música, y en la escena del Anillo, en particular en El oro del Rin, y en Sigfrido.

EL ORO DEL RIN (DAS RHEINGOLD)

Esta es quizás la única ópera escrita por el hombre en la cual el tema de fondo lo juega un metal.

En la primera escena las Ninfas del Rin custodian el oro en las profundidades del río. Dialogan con el Nibelungo Alberico relatándole a éste las bondades de este tesoro. El gnomo renuncia al amor para poseer el oro, y se lo roba.

L'OR DU RHIN

DAS RHEINGOLD L'OR DU RHIN
vorabend zu dem Bühnenfestspiel prologue au festival scénique
DER RING DES NIBELUNGEN L'ANNEAU DU NIBELUNG

Poème et musique de Richard Wagner
créé au Théâtre Royal de Munich
le 22 septembre 1869



Livret original intégral
Nouvelle traduction française d'Antoine Golka
Commentaire musical et littéraire d'André Boucourechliev

PERSONEN PERSONNAGES

Götter **les dieux**
Wotan (hoher bass) Wotan (baryton)
Loge (tenor) Loge (ténor)
Donner (hoher bass) Donner (baryton)
Froh (tenor) Froh (ténor)

Riesen **les géants**
Fasolt (hoher bass) Fasolt (baryton)
Fafner (tiefer bass) Fafner (basse)

Nibelungen **les Nibelungen**
Alberich (hoher bass) Alberich (baryton)
Mime (tenor) Mime (ténor)

Göttinnen **les déesses**
Fricka (tiefer soprano) Fricka (mezzo-soprano)
Freia (soprano) Freia (soprano)
Erda (alt) Erda (contralto)

Rheintöchter **les Filles du Rhin**
Woglinde (soprano) Woglinde (soprano)
Wellgunde (soprano) Wellgunde (soprano)
Flosshilde (alt) Flosshilde (contralto)

Nibelungen **Nibelungen**

En la segunda escena dialogan el dios Wotan y el enano Loge. El enano le pide a Wotan que logre devolver el oro a las ninfas, sin embargo, al saber Wotan los mágicos poderes que tendría un anillo forjado de ese oro, pregunta a Loge cómo aprender el mágico arte de transformar el oro en anillo. Pero ocurre que los gigantes que acababan de construir un castillo para Wotan, piden a éste que el pago por su trabajo debería ser precisamente ese ansiado oro. Termina la escena con la invitación de Wotan a Loge: ¡Vamos a buscar el oro, a la tierra de los Nibelungos!

La tercera escena de esta ópera podríamos calificarla como la escena "metalúrgica". En ella el gnomo Alberico exige al herrero enano, Mime, que le entregue pronto la joya forjada con el oro del Rin. El herrero se lamenta que Alberico tenga a los Nibelungos herreros en trabajos forzados para "fundir el botín y forjar el metal". Aquí sin duda que Wagner quiso dar un sentido

figurado a lo que ocurre realmente en el proceso metalúrgico que involucra el forjado de metales. Pero el enano ha forjado además, un casco mágico para Alberico, el que le sirve para transfigurarse: primero se transforma en gigantesco dragón y luego en diminuta tortuga. De esta última transfiguración se aprovechan para derrotarlo y quitarle el casco mágico.

En la cuarta y última escena de este prólogo lírico, Alberico, derrotado y encadenado, se ve obligado a ordenar a sus súbditos Nibelungos que traigan el oro a Wotan, quien incluso se lleva el casco mágico. Al verse obligado también el gnomo a entregar el anillo, lanza sobre él una maldición para quien lo posea. Con el oro recibido, Wotan cancela su deuda a los gigantes. Estos le exigen hasta el anillo. La ambición de los gigantes al recibir el oro los hace pelear entre ellos y es así como Fafner mata a Fasolt para quitarle el anillo.

Termina la escena, y con ello este prólogo operático, con los lamentos de las Ninfas del Rin ante el oro perdido.

LAS VALQUIRIAS (DIE WALKÜRE)

Desde el punto de vista que estamos enfocando las óperas, no cabe duda que ésta es la menos metalúrgica del Anillo.

El dios Wotan engendra una pareja humana, Sigmundo y Siglinda, de cuya unión nace el héroe máximo del Anillo: Sigfrido. Lo más relevante en metales aquí, es la espada de acero que Wotan entrega a su hijo Sigmundo. La ironía del destino lleva a Wotan a enfrentar a su propio hijo, y con su poderosa lanza derrota a Sigmundo destruyéndole la espada.

De los restos de esta espada, en la ópera Sigfrido, éste reconstruye una espada invencible.



SIGFRIDO (SIEGFRID)

En su autobiografía Wagner relata que cuando él vivió en Zurich y se encontraba precisamente escribiendo el primer acto de Sigfrido, ocurría que el ruido de una herrería cercana lo distraía fuertemente.

Sigfrido, hijo de Sigmundo y Siglinda fue concebido como una especie de superhéroe actual. Simboliza la gloriosa encarnación de la nueva humanidad. Vive en estrecha relación con la naturaleza: él mismo es todo naturaleza. Al quedar huérfano de sus padres creció bajo la tutela de su padre tutor, el enano Mime, quien en el fondo hipócritamente deseaba usarlo como medio para lograr lo que él anhelaba: el anillo.

En esta ópera el metal que sirve de fondo temático (aparte del oro que está en toda la temática del Anillo), es el FIERRO. No exageramos si afirmamos que ésta es la ópera metalúrgica por excelencia. Es a tal grado cierto esto que al tutor de Sigfrido, Wagner lo describe en forma comparable a la descripción que la mitología da de Vulcano: dios romano del FUEGO y del METAL, feo y deforme (quedó cojo al ser precipitado desde el Olimpo por su madre), al que le correspondía el sucio y agotador trabajo de forjador en las herrerías de los cíclopes.

La primera escena del primer acto se desarrolla en la foresta. Hay una cueva rocosa, y contra los muros se observa una gran fragua de herrero formada en piedra natural. Sólo los fuelles que se ven en el escenario son artificiales. La chimenea conduce al tope de la cueva. Se ve un gran yunque y herramientas de herrero. El enano Mime, sentado al yunque, martillea (con poco entusiasmo) una espada. Finalmente, desesperado, se detiene e

inicia la parte cantada de la ópera diciendo:

"Este es un trabajo estéril, es un esfuerzo vano. La mejor espada que yo haya forjado (en mi vida) estaría firme en los puños de un gigante, pero en las manos del que la usará (Sigfrido) será como juguete que romperá en dos partes".

Y más adelante, relata el objetivo real del esfuerzo:

"Sólo una espada basta para que la fuerza de Sigfrido derrote al gigante Fafner y obtenga así para mí el anillo del Nibelungo".

Sigfrido, muy insatisfecho con el trabajo del enano, le dice:

"¿Para qué sirve el filo brillante si el acero no es duro y resistente! ¿Llamas tú espada a este frágil palito? "



y termina casi insultándolo:

"... lo que él (Mime) ha martillado lo destrozó yo de un solo manotazo. ¡Si no fuera este villano tan malvado, lo fundiría junto a su espada! "

Más adelante Mime le dice a Sigfrido que su madre (Siglinda) le dejó un regalo como pago:

"Mira aquí, una espada destrozada. Tu madre me dijo que tu padre la usó cuando murió en su última batalla".

Al saber esto, Sigfrido le responde:

"Tú debes forjar para mí todos estos trozos, y entonces sí que yo manejaré una espada de verdad",

y le amenaza:

"Si te veo flojear y no unes bien los trozos de acero, ¡ya verás! "

Finaliza esta escena en forma tan "metalúrgica" como comenzó; al ver Mime que Sigfrido se aleja:

"¿Cómo uniré los trozos de este porfiado acero? ...

No hay fragua que caliente estos trozos, no hay martillo de enano que pueda manejar esta dureza. ...El esfuerzo y el trabajo no sirven para forjar la espada Notung, ni tampoco para forjar para mí una espada, ¡jamás! "

En la segunda escena, el herrero enano se encuentra con Wotan, quien viene oculto tras la imagen de un errante. En un largo diálogo, Mime le cuenta que la espada que Sigfrido usará para matar a Fafner es la espada llamada Notung y que es la que Wotan rompió con su lanza al derrotar al heroico Sigmundo. Y se lamenta:

"¿Quién puede volver a unir los restos de esa espada milagrosa? ¡Maldito acero que me

tortura! ni el herrero más sabio sabe cómo soldarla... ¿Quién podría forjarla, si yo no puedo? "

En la tercera escena, se encuentra Sigfrido con Mime y le pregunta acerca de la espada que le está forjando. Mime le responde que él no puede forjarla. Indignado, Sigfrido le pide los trozos y decide que él la soldará.

Al son de gritos semi-salvajes, Sigfrido lanza frases muy metalúrgicas:

*"ilos trozos los fundiré en el crisol!
isoplad fuelles! iatizad el fuego!
i ya preparé el carbón vegetal
que se apila en el fogón!
¡qué bien brilla ese carbón!
¡cómo centellean sus chispas! "*

y más adelante, ante el humillado Mime:

"¡Martilla, forja una espada resistente! "

mientras la orquesta simula soberbiamente el martilleo en un yunque. Una vez forjada la espada termina diciendo:

*"¡Jamás un golpe te destruirá de nuevo!
iel acero arrebatado al padre,
fue recuperado por su hijo!
¡Mira, herrero Mime:
qué afilada es la espada de Sigfrido! "*

En el segundo acto, el gigante Fafner (en forma de dragón) cuida el oro, pero es ultimado por la espada de Sigfrido. Moribundo, Fafner reconoce que mató a su hermano Fasolt para quitarle el oro. Antes de morir advierte a Sigfrido de su futuro.

Los pájaros guían a Sigfrido a la cueva donde está el tesoro. Llega a la cueva donde está Mime, quien le dice que ha cumplido la tarea que él deseaba, se mofa de él, y Sigfrido final-

mente lo mata, ante la macabra risotada de Alberico a lo lejos. Queda así Sigfrido como cuidador del tesoro.

El tercer y último acto de Sigfrido no es tan metalúrgico. En la segunda escena Wotan (como errante) le pregunta a Sigfrido:

*"¿Quién te hizo esa espada?
...¿de dónde salieron los trozos de acero? "*

Sigfrido le pide al errante que le enseñe el camino para llegar a la roca rodeada de llamas, pero Wotan no lo deja pasar advirtiéndole que ya una vez su lanza destruyó esa espada. Sigfrido descubre así que Wotan es el mortal enemigo de su padre, y le destroza la lanza con su espada.



La tercera y última escena muestra el romántico encuentro de Sigfrido con Brunilda. En un comienzo él cree que se trata de

un hombre con armadura de fierro. Ella despierta, y finaliza la ópera con un hermoso dúo de amor.

EL OCASO DE LOS DIOSES (GÖTTERDÄMMERUNG)

Es el tercer y último acto de esta ópera, el que más significación metalúrgica tiene.

La primera escena es preciosa. En ella las tres Ninfas del Rin cantan a coro una oda a la belleza del oro que una vez brilló al fondo del río, cual estrella majestuosa. Piden al sol que les envíe el héroe que les pueda devolver el oro. Al ver que Sigfrido tiene el anillo, le advierten del peligro que significa poseerlo:

*"El anillo está forjado de oro del Rin,
sólo las aguas del Rin pueden limpiar la maldición que tiene".*

(Wagner usa en el texto la palabra "geglüht" en esa frase, lo que en términos metalúrgicos sería algo así como "recocido" en lugar de "forjado", o bien, en sentido figurado, "calentado para forjar").

En la segunda escena Sigfrido se encuentra con Hagen y le relata cómo hizo su espada y cómo conquistó el anillo. Pero esta escena termina en forma impresionante al sucumbir Sigfrido a la maldición, bajo las armas de Hagen.

En la tercera y última escena, Brunilda quita el anillo de la mano del cadáver de Sigfrido, y para purificarlo de la maldición se pone ella el anillo y se lanza a la pira.

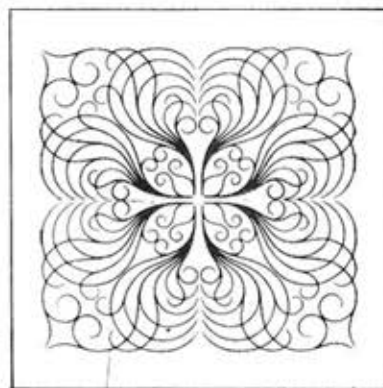
Aterrado Hagen ante la espeluznante escena, bota su espada, escudo y casco, y se lanza al agua exclamando la simbólica frase final:

"iZurück vom Ring! "
(iAlejaos del anillo!)

Es preciso reconocer aquí que Wagner, a diferencia de la mayoría de los autores operáticos, escribió tanto el texto como la música de sus obras. Este hecho da a Wagner el mérito de haberse interiorizado de aspectos técnicos, que en el caso de nuestro enfoque metalúrgico, son interesantísimos, siendo muy probable

que los pequeños errores que se deducen de la traducción del texto original, sólo sean aparentes, fruto de la simbolización propia de la prosa, tal es el caso de calificar al oro como "rotes Gold" (oro rojizo), cuando bien sabemos que debería ser "gelbes Gold" (oro amarillento).

iWagner fue, sin duda, un compositor operático metalurgista!



■ El Comité de Redacción de REMETALLICA invita cordialmente a sus lectores a canalizar en sus páginas cualquier expresión artística en que intervengan prioritariamente los METALES.

RUTEO AL COBRE

Ing.
Germán López D.

1er Premio en el Primer Concurso Nacional de Cuentos ENAMI 1976.

Montaña, valle, desierto,
Mula, cateo, sendero,
Quimera, cansancio, sueño,
Mina, explosivo, tolueno.

Oro, plata, cobre bueno,
colpa, llampo, granza, tierra.
Apir, camiones, fletos,
avíos, aval, agencia.

Pesaje, descarga, muestra,
humedad, ley y molienda.
Tarifa, anticipo, vuelta.
Chancado, reactivo, celda.

Cabeza, cola, secado,
carguío, guía, traslado.
Lote, sondas, concentrado,
canchas, tolvas, ensacado.

Ensayes, camada y mezcla,
fundición y reverbero.
Calderas, operador,
en grúa al convertidor.

Mangueras, aire, soplado.
El gas, el fierro, el azufre,
escorial, ollas, el Jefe.
Rojo cobre, mucho eje.

Vaciado, carbón, briqueta,
Refino. Fuego, la nave.
Anodos, poste, apaleo,
canales, rueda, moldeo.

Ducha, tecla, enfriamiento,
horquilla, patio, romana,
cadena, racket, lingada,
cubas, ácido, estirada.

Placa madre, electrólito,
titanio, inspección, sablazo,
renovación y planchado,
orejas, corte y lavado.

Cátodos, restos y malos,
fallados, se unen, retorno.
Nave de Horno, ahora wire bars,
alta ley, finos y barras.

Pilas, marcada, embarque,
boletas, seguro, Puerto,
buques, grúas, marinero,
dólar, divisa, extranjero.

Puro Chile, puro cobre:
El nortino Salvador,
Chuquicamata, la puna,
Exótica, mina, esplendor,

subterráneo Teniente,
huasos, victorias, Rancagua,
Potrerillos, sol ardiente,
Andina, nieve, Aconcagua,

ENAMI es un pirquinero,
Arica, Iquique, Pisagua,
Kilómetro seis de Chuqui,
Agencias de Antofagasta,
Taltal, arena, Altamira,
Inca de Oro, aún no basta,
sufre El Salado, Paipote,
Carrera Pinto y la Matta,
Aguirre Cerda: un jote,
Vallenar, muy regional,
Domeyko, una Planta al trote
Serena, Coquimbo, el mar.
En Illapel, Arenal,
En Andacollo, El Sauce,
y su Virgen pa' implorar,
Ovalle, campo naciente,
Tambillo y Combarbalá,
Llego a Cabildo sonriente,
veo el humo, voy allá...
Es Ventana, la primera,
Es mi novia que me espera.

GELO

Ing. Patricio Navarro D.*
Profesor del Departamento de
Metalurgia, USACH.



alternativas de remoción de arsénico desde soluciones de descartes de refinерías electrolíticas de cobre

1. Introducción.

La producción de cobre en Chile se obtiene mayoritariamente a partir de la explotación y beneficio de minerales sulfurados por la vía convencional de concentración por flotación, fusión a eje y conversión, refinación a fuego y electrolítica.

A futuro, la producción nacional de cobre electrolítico debe aumentar por ser fácil su comercialización debido a su mayor pureza, la cual a su vez se ve condicionada por el contenido de impurezas que afectan substancialmente las propiedades mecánicas y eléctricas del alambrón producido a partir del cátodo.

De las diversas impurezas que contiene normalmente un cátodo, el arsénico y el antimonio se encuentran entre las más frecuentes y perniciosas.

Es por esto que durante el proceso de electrorrefinación de cobre, se descartan diariamente alrededor de $0.2M^3$ de solución electrolítica por tonelada métrica de cátodo producido, a fin de mantener los niveles de arsénico, antimonio y níquel dentro de ciertos márgenes de operación. En general, las soluciones de descarte son sometidas a tratamientos metalúrgicos con el propósito de:

- Recuperar el cobre contenido.
- Purificar el electrolito descobrizado y recircular el ácido sulfúrico y el agua.

Los volúmenes de electrolito que las refinерías nacionales descartan, se indican en la tabla 1.1, conjuntamente con la magnitud y concentración de los compuestos contenidos.

Tabla 1.1.
Volúmenes de electrolitos descartados
en Refinerías Nacionales^{1,2}

REFINERIA	Volumen de electrolito descartado m ³ /día	ELEMENTOS CONTENIDOS							
		As		Sb		Cu		H ₂ SO ₄	
		gpl	TM/día	gpl	TM/día	gpl	TM/día	gpl	TM/día
LAS VENTANAS	18	5.6	0.1	0.6	0.011	40	0.72	180	3.24
POTRERILLOS	50	3.6	0.18	0.012	0.0004	44	2.2	200	10
CHUQUICAMATA	200 ¹	3.6	0.72	0.4	0.08	41	8.2	190	38

1. Volumen estimado de descarte.

* Colaboraron los Sres.: Pedro Morales C., CIMM; Marco Solar B., USACH; Gabriel Zárate., CIMM.

No se han llevado a cabo trabajos específicos que establezcan una relación entre el arsénico contenido en el electrolito y el arsénico contenido en el cátodo, sin embargo, es evidente que mientras menor sea el contenido de éste en la solución, el cátodo resultará de una calidad superior.

En base a antecedentes de operaciones recogidos tanto en refinerías electrolíticas de cobre nacionales como extranjeras, se ha logrado establecer una relación de tipo operacional, entre el arsénico en el electrolítico y en el cátodo, figura 1.1.

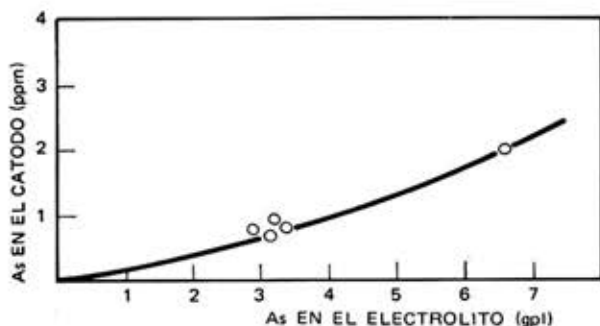


Fig. 1.1. Relación entre Arsénico en el electrolito y Arsénico en el cátodo.¹

De la figura 1.1., se desprende que para asegurar un contenido de arsénico menor que 2 ppm. en el cátodo, el contenido de dicho elemento en el electrolito deberá ser inferior a 6 gpl.

2. Comportamiento del Arsénico durante la Electrorrefinación de cobre.

El arsénico se encuentra muy cercano al cobre en la serie electromotriz, luego se disuelve conjuntamente con éste y se acumula en el electrolito, encontrándose principalmente en la forma de AsO_4^{3-} en la solución electrolítica.

En ausencia de antimonio, bismuto y otras impurezas, el arsénico contamina el cátodo sólo por oclusión de electrolito. Sin embargo, si el antimonio, bismuto, níquel, plomo y plata están presentes en la solución, el arsénico puede formar compuestos tales como: PbHAsO_4 , $3\text{PbO} \cdot \text{As}_2\text{O}_5$, SbAsO_4 , BiAsO_4 , sulfuros complejos de plata-plomo-bismuto, etc.

Algunos de estos compuestos permanecen en el electrolito en la forma de partículas finas, recibiendo el nombre de "barros flotantes", que son partículas de SbAsO_4 y BiAsO_4 , los cuales son la principal causa de contaminación de arsénico en los cátodos por oclusión de barros anódicos.

Por lo tanto, es importante preocuparse de las condiciones bajo las cuales se forman dichas partículas. Al respecto no se pretende hacer un análisis

del mecanismo de formación de los arseniatos de antimonio y bismuto (SbAsO_4 y BiAsO_4), sino ilustrar la fuerte dependencia de la temperatura de operación y de las concentraciones de arsénico, antimonio y bismuto en la formación de los respectivos arseniatos.

En las figuras 2.1. y 2.2., se enfrentan las solubilidades de arsénico-antimonio y arsénico-bismuto en un electrolito a diferentes temperaturas.

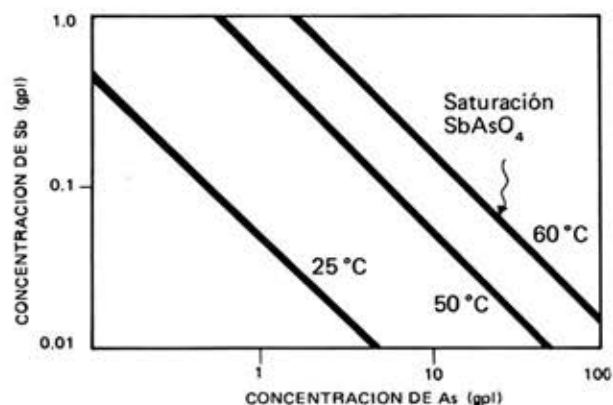


Fig. 2.1. Solubilidades de Arsénico y Antimonio a diferentes temperaturas de Electrolito.³

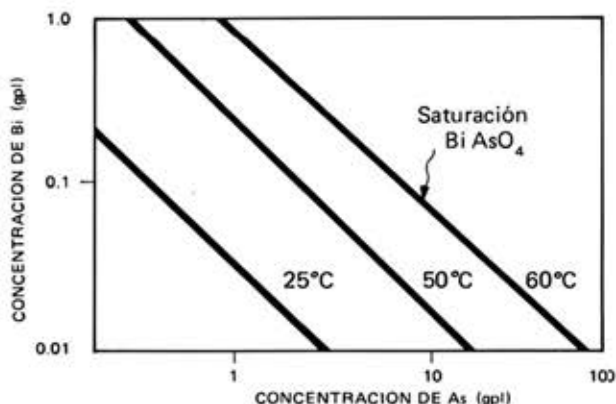


Fig. 2.2. Solubilidades de Arsénico y Bismuto a diferentes temperaturas de Electrolito.³

De acuerdo a las figuras anteriores se puede ver que las curvas de saturación se ven desplazadas considerablemente con una pequeña disminución de la temperatura. Si se piensa en un electrolito que tenga 6 gpl de arsénico, el nivel de antimonio debe ser ajustado de manera que no sobrepase de 0.2 gpl a 60°C.

Sin embargo, si la temperatura baja a 50°C, el nivel de antimonio no debería pasar de 0.1 gpl para evitar la formación de barros flotantes. El caso del bismuto no es tan dramático, pues en los electrolitos nacionales la presencia de este elemento es casi despreciable.

De lo expuesto, se deduce que mientras más

estricto sea el control que evite la formación de los barros flotantes, menor será la contaminación de arsénico a los cátodos y esto se logra evitando enfriamientos localizados en las celdas de electrorrefinación y purificando diariamente un cierto volumen de solución electrolítica, de modo de mantener el nivel de arsénico lo más bajo posible.

3. Análisis de alternativas de Remoción de Arsénico.

Dentro de las alternativas posibles de remoción de arsénico desde soluciones electrolíticas de descarte de refineries de cobre, analizaremos: el proceso convencional de descobrizado como método de desarsenificación, precipitación con H_2S y extracción por solvente (intercambio iónico con resinas líquidas).

3.1. Proceso Convencional de Descobrización.

Actualmente el proceso de descobrización de electrólito que se realiza en las refineries nacionales es llevado a cabo en etapas sucesivas, las cuales son:

- electroobtención de cobre
- electroobtención de cobre y arsénico.

La electroobtención de cobre se efectúa en las llamadas celdas liberadoras; los ánodos usados normalmente son aleaciones del tipo 930/o plomo, 60/o antimonio y 10/o plata; como cátodos se usan las hojas madres tradicionales de electrorrefinación hasta que la concentración de cobre baja a aproximadamente 10 gpl, una vez alcanzada dicha concentración se usan como cátodos scrap de ánodos en buen estado. Las celdas liberadoras (electroobtención de cobre) tienen como objetivo principal: mantener un nivel de concentración de cobre óptimo en el electrólito de los circuitos comerciales y preparar un volumen de electrólito para ser alimentado a las celdas de purificación (electroobtención de cobre y arsénico), con el objeto de extraer el arsénico y de este modo mantener la concentración de dicho elemento en niveles que no produzcan problemas en los circuitos comerciales.

Con el objeto de poder cuantificar mejor esta alternativa, se hará una descripción más detallada de lo que ocurre en la Refinería Electrolítica de Potrerillos.²

Se estima que se descartan diariamente alrededor de $50m^3$ de electrólito, los cuales son enviados a las celdas liberadoras de cobre.

En una primera etapa se obtienen cátodos comerciales, luego la solución sigue a una segunda etapa de descobrización, obteniéndose cátodos con más elevados contenidos de impurezas, debido a lo cual son llevados a los hornos de fusión de ánodos.

Finalmente, se envían $30m^3$ /día de electrólito a las celdas de purificación, el excedente es recirculado a la refinería. El depósito obtenido es de tipo granular y disgregable, al cual se le denomina "Barro Arseniacal" (400/o cobre, 200/o arsénico) y es retornado a la fundición o bien es almacenado y vendido. El contenido de otras impurezas en el electrólito, tales como hierro y níquel es bajo, pero cuando la concentración de níquel se acerca a 2,5 gpl y la de hierro a las 5 gpl se purga un pequeño volumen de solución en la Planta de Purificación; mensualmente se descartan entre 60 y $80m^3$. En la figura 3.1, se resume toda la operación anteriormente descrita.

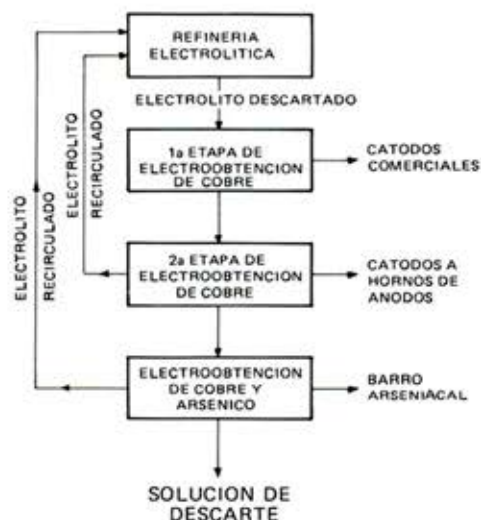


Fig. 3.1. Proceso de purificación de electrólito en Potrerillos.

En la Tabla 3.1, se presenta un cuadro resumen con las concentraciones típicas de cobre y arsénico en el electrólito, tanto a la entrada como a la salida de cada etapa.

Tabla 3.1.
Concentraciones típicas a la entrada y salida de cada etapa de descobrización y desarsenificación en la refinería de Potrerillos.⁴

	DESCOBRI- ZACION 1a. Etapa		DESCOBRI- ZACION 2a. Etapa		PURIFICACION		
	Cu	As	Cu	As	Cu	As	Sb
ENTRADA (gpl)	43	3.6	34	3.6	12	3.5	0.5
SALIDA (gpl)	34	3.6	12	3.5	0.01	0.1	0.05

Durante el año 1979 en la sección Purificación se alcanzaron los siguientes índices operacionales:

Volumen de solución tratada (m ³)	: 8.842
O/o As eliminado	: 87
O/o Cu eliminado	: 96,9
Volumen descartado (m ³)	: 818,3
Consumo de Energía (kWh)	: 3.304.924
Barro Arseniacal producido (ton)	: 184.940

De acuerdo a los índices operacionales que se alcanzaron en 1979 en la sección de Purificación, el consumo de kWh por tonelada de cobre producido fue de 24.067, lo cual es 10 a 12 veces mayor que el consumo en un proceso normal de electro-obtención de cobre.

3.2. Precipitación de Sulfuros.

La precipitación de arsénico como sulfuro es una alternativa que se ha estudiado a nivel de planta piloto en la mayoría de las refinerías electrolíticas de Japón. El diagrama de flujo de esta alternativa se presenta en la figura 3.2.

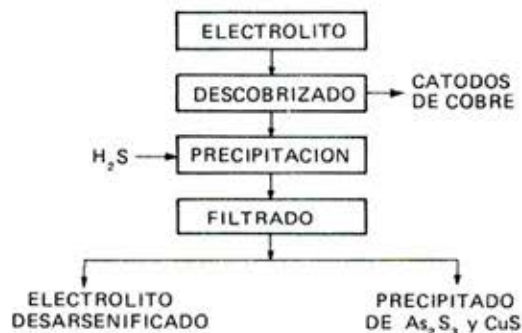
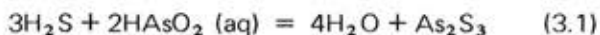
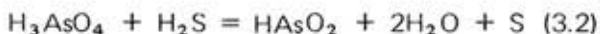


Fig. 3.2. Desarsenificación de electrolito con H₂S⁵

Dadas las concentraciones de ácido sulfúrico en el electrolito (aproximadamente 200 gpl), es necesario reducir el arsénico a la forma de As³⁺, pues la precipitación de As₂S₃ se lleva a cabo mediante la reacción (3.1.).



la reducción de As⁵⁺ a As³⁺ se produce con el mismo H₂S, mediante la reacción (3.2)



luego es necesario agregar H₂S en exceso, a fin de producir la reducción y precipitación a la vez.

Las condiciones bajo las cuales se produce la precipitación de As₂S₃ están dadas por las ecuaciones (3.3) y (3.4).

$$m_{\text{S}^{-2}} = \text{H}_2\text{S} \left\{ 1 + 10^{\text{pH}-7} + 10^{2\text{pH}-21} \right\} + 2(\text{H}_2\text{S})^{1/2} \cdot 10^{\text{pH}-7} + 4(\text{H}_2\text{S})^{5/2} \cdot 10^{5\text{pH}-28,5} \quad (3.3)$$

$$m_{\text{As}} = (\text{H}_2\text{S})^{-3/2} \left\{ 10^{-16,9} + 10^{-16,9-\text{pH}} + 10^{\text{pH}-23,9} \right\} + (\text{H}_2\text{S})^{1/2} \cdot 10^{\text{pH}-7} + (\text{H}_2\text{S})^{5/2} \cdot 10^{5\text{pH}-28,5} \quad (3.4)$$

donde

$m_{\text{S}^{-2}}$ = moles de S⁻²/lt. de electrolito

m_{As} = moles de As/lt. de electrolito

Para concentraciones de S⁻² que fluctúan entre 10⁻¹ y 10⁻⁶ moles por litro, una buena precipitación se produce a pH menores que 5. En la Tabla 3.2., se muestran las condiciones teóricas bajo las cuales se produce una buena eficiencia de precipitación de arsénico (las concentraciones de arsénico dadas en la tabla son las que quedan en solución).

Tabla 3.2.
Condiciones teóricas de precipitación de As₂S₃

pH	10 ⁻¹			10 ⁻⁶		
	H ₂ S	m _{As}	As(gpl)	H ₂ S	m _{As}	As(gpl)
1	10 ⁻¹	0.3 × 10 ⁻⁸	2.25 × 10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	7.49 × 10 ⁻⁸
4	10 ⁻¹	0.3 × 10 ⁻³	2.25 × 10 ⁻²	2.5 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁷	3.75 × 10 ⁻⁵
5	10 ⁻¹	3.1 × 10 ⁻³	2.32 × 10 ⁻¹	2.5 × 10 ⁻⁸	1 × 10 ⁻⁸	7.49 × 10 ⁻³
6	0.057	2.45 × 10 ⁻²	1.84	2.5 × 10 ⁻¹¹	0.1	7.49

Obviamente el rango de trabajo de pH dependerá de la mayor o menor eficiencia que se requiera en la precipitación.

El problema que presenta esta alternativa, es la de producir simultáneamente la precipitación de arsénico y cobre en forma de sulfuros. Luego, antes de llevar a cabo la precipitación de arsénico se debe descorrizar parcialmente la solución. Esto se puede ver con el análisis de los productos de solubilidad.

El Kps del CuS es de 8 × 10⁻³⁶ (moles/lt)², y como Kps = [Cu²⁺] · [S⁻²]
entonces 8 × 10⁻³⁶ = [Cu²⁺] · [S⁻²]

Si se supone que se ha sacado el cobre mediante electroobtención, hasta llegar a una concentración de 10 gpl (a niveles más bajos comienza a depositarse el arsénico).

$$\text{S}^{-2} = 5,12 \times 10^{-35} \text{ (mol/lt)}$$

mientras que Kps de As₂S₃ es de 1.57 × 10⁻²⁴ (moles/lt)², y como

$$\text{KpsAs}_2\text{S}_3 = [\text{As}^{+3}]^2 [\text{S}^{-2}]^3$$

tomando una concentración de 6 gpl de arsénico en la solución

$$S^{-2} = 6.25 \times 10^{-8} \text{ (mol/lit).}$$

de acuerdo a esto, para concentraciones muy bajas de S^{-2} en el electrólito se va a producir la precipitación de As_2S_3 y CuS en forma simultánea.

3.3. Extracción por Solvente.

Desde un tiempo a esta parte se ha venido estudiando la extracción por solvente de arsénico, usando como agente intercambiador el extractante tributilfosfato (TBP) el cual es un extractante del tipo solvatante, pues posee un par de átomos de oxígeno con un par de electrones libres, los cuales interactúan con moléculas eléctricamente neutras formando un compuesto de adición.

De Schepper ha estudiado la extracción por solvente de arsénico desde soluciones de descarte de refineras, utilizando TBP en distintas concentraciones. Del estudio ya mencionado se han recopilado algunas condiciones de operación interesantes:⁶

- El electrólito debe ser sometido a un proceso de descobrizado previo, de modo de bajar la concentración de cobre a niveles tales que no pueda ser coextraído, alrededor de 20 gpl.
- Se necesita una elevada concentración (mayor que 300 gpl) de H_2SO_4 en el electrólito de modo de aumentar el coeficiente de distribución del arsénico, definiendo como coeficiente de distribución a la razón entre la concentración de As en el orgánico (TBP) y en el acuoso.
- La diferencia de densidades entre el orgánico y la solución acuosa es suficientemente grande como para esperar una buena separación de fases.
- El TBP puede ser utilizado en forma pura o diluida en algún tipo de diluyente, tal como tridecano, kerosene, etc.

Con estos antecedentes, CIMM estudia un proceso de desarsenificación de soluciones de descarte de refineras parcialmente descobrizadas,⁷ el cual está constituido por:

- evaporación de la solución y cristalización parcial de sulfato de cobre pentahidratado.
- extracción por solvente de arsénico para producir un compuesto de arsénico susceptible de tener un mayor valor comercial, o bien como producto descartable.

El diagrama de flujo de esta alternativa está dado en la figura 3.3.



Fig. 3.3. Alternativa de remoción de As a través de extracción por solvente.

La parte correspondiente a extracción por solvente estaría dada por un diagrama de flujo mostrado en la figura 3.4.

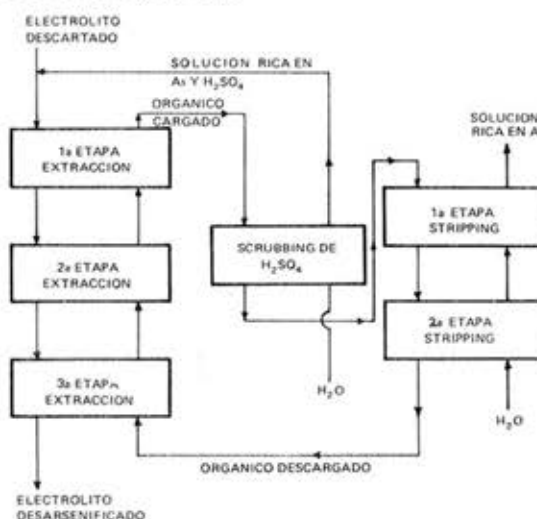


Fig. 3.4. Diagrama de flujo en extracción por solvente.

Esta alternativa produce una recirculación de sólo un 40% del arsénico descartado, si se trabaja con una solución de 600 gpl de H_2SO_4 , 10 gpl de As y 7 gpl de Cu y TBP puro como orgánico, requiriendo teóricamente 3 etapas de extracción para remover el 96% de As, siendo el tiempo de contacto de 2 minutos con una razón orgánico/acuoso del orden de 1/1. El Stripping se realiza con H_2O requiriendo teóricamente dos etapas, para reextraer el 86,6% del arsénico, con un tiempo de contacto de 1,5 minutos y la razón orgánico/acuoso del orden de 0,96 a 0,97.

El TBP, también extrae H_2SO_4 , por lo tanto, para disminuir la concentración de éste en el orgánico es necesario una etapa de Scrubbing, previo a Stripping. Si se utiliza una razón orgánico/acuoso igual a 6 se extrae el 65% del H_2SO_4 y sólo un 23% del arsénico para un tiempo de contacto de 3,5 minutos.

Hernán Cuadro E.
Ing. Civil Metalúrgico



GENERALIDADES SOBRE SOLIDIFICACION EN LINGOTES DE ACERO

En la solidificación del acero interactúan simultáneamente varios fenómenos, entre ellos tenemos:

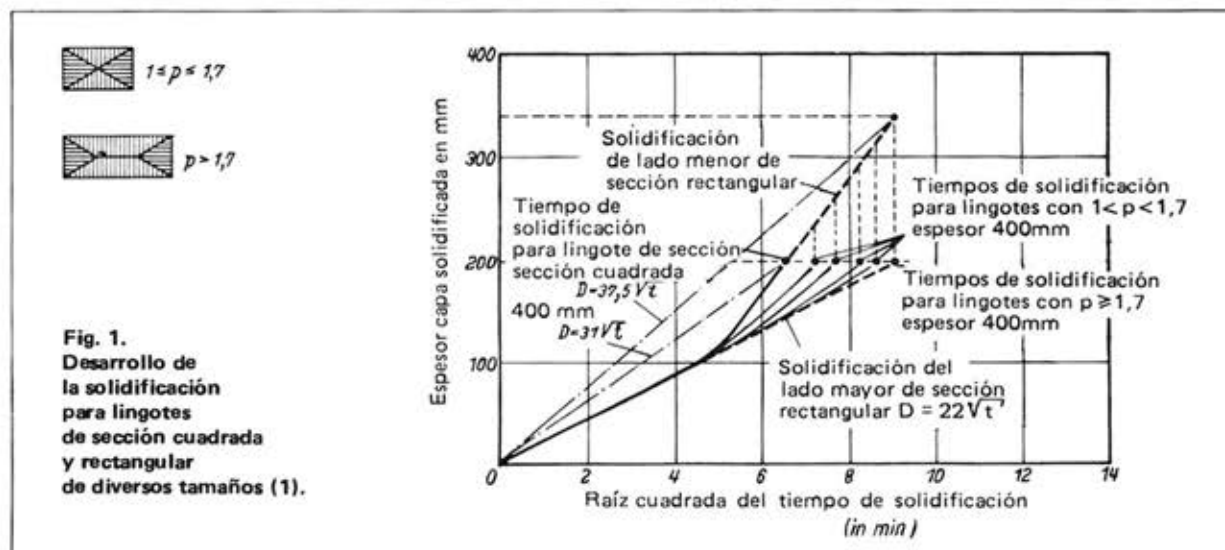
- a) Extracción del calor a través de las paredes de la lingotera; esto delimita en el espacio y en el tiempo el desarrollo de la solidificación.
- b) Contracción volumétrica; que junto con la eliminación del calor tiene influencia en el desenvolvimiento espacial de la solidificación. Ella genera la formación de "rechupes" y zonas porosas.
- c) Reyección de soluto delante del frente de solidificación. Este fenómeno se produce porque las solubilidades de los elementos aleantes del acero disminuyen al pasar el hierro del estado líquido al sólido. La reyección de soluto es la causante de la segregación, de la formación de burbujas de monóxido de carbono y de las inclusiones no metálicas.

d) La acción conjunta de la reyección de soluto y la extracción del calor determina, inmediatamente delante del frente de solidificación, el fenómeno conocido como Sobrentriamiento Constitucional, que tiene una gran influencia sobre el tipo de cristalización de la estructura de colada de lingotes de acero.

a) La extracción calórica a través de las paredes de la lingotera ha sido estudiada en modelos unidimensionales donde el calor fluye sólo en una dirección, la que es perpendicular al frente de solidificación, siendo una solución muy conocida la ley \sqrt{t} . (Para un tiempo t el espesor de la capa solidificada l está dado por $l = K\sqrt{t}$, siendo K la constante de solidificación. Ella toma, para aceros colados en lingoteras, valores entre 22 y 26 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$). La ley \sqrt{t} es la solución de las ecuaciones de Fourier para la conducción del calor en modelos unidimensiona-

les de extremos infinitos y su rigurosa y exacta resolución depende de una cantidad de supuestos, los que en la práctica pocos se cumplen, sin embargo, la ley describe el proceso de solidificación bastante bien.

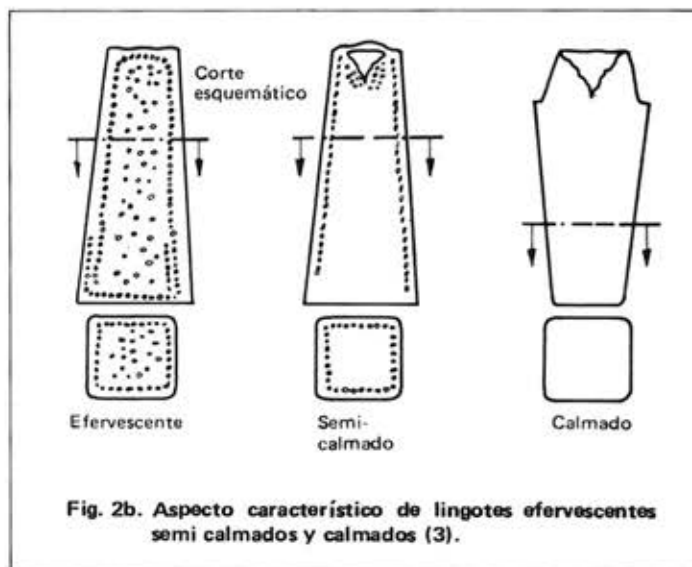
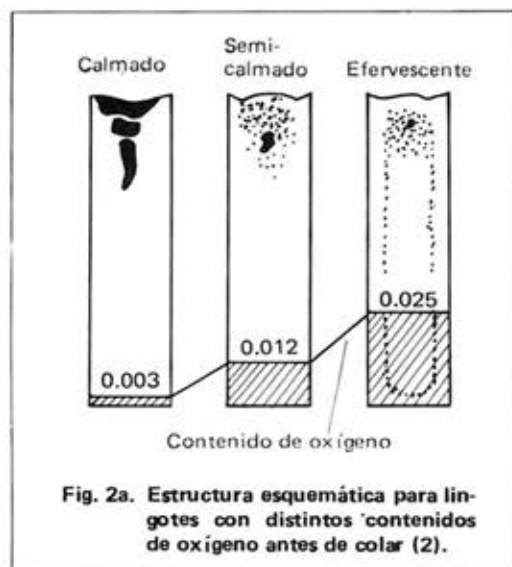
En la parte central del lingote, la solidificación transcurre más rápido que lo calculado con la relación \sqrt{t} , pues en esta zona el calor no fluye unidireccionalmente hacia las paredes de la lingotera. El gráfico 1¹ indica los tiempos de solidificación para lingotes de sección cuadrada y rectangular de diversos tamaños. Este tipo de gráfico se puede realizar inclusive para lingotes con secciones transversales de diversas formas. Estos gráficos permiten determinar cuándo un lingote aún caliente puede ser extraído de la lingotera, sin peligro de derrames, aprovechándose el calor remanente de los lingotes en procesos posteriores, así como logrando un alto rendimiento de las lingoteras.

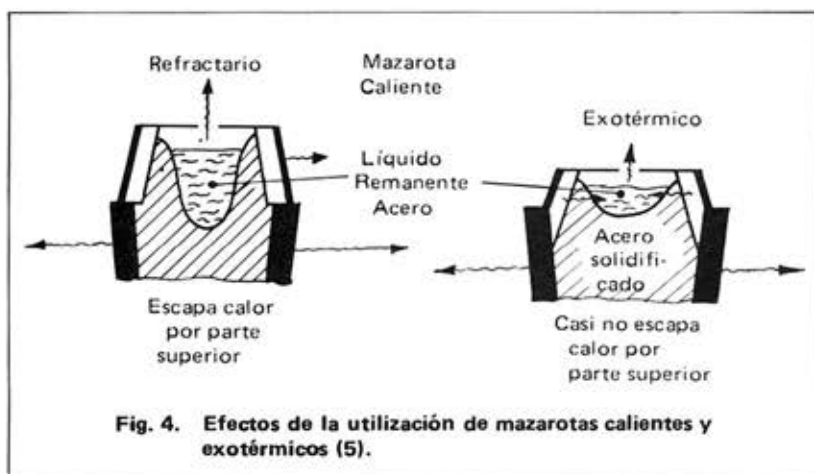
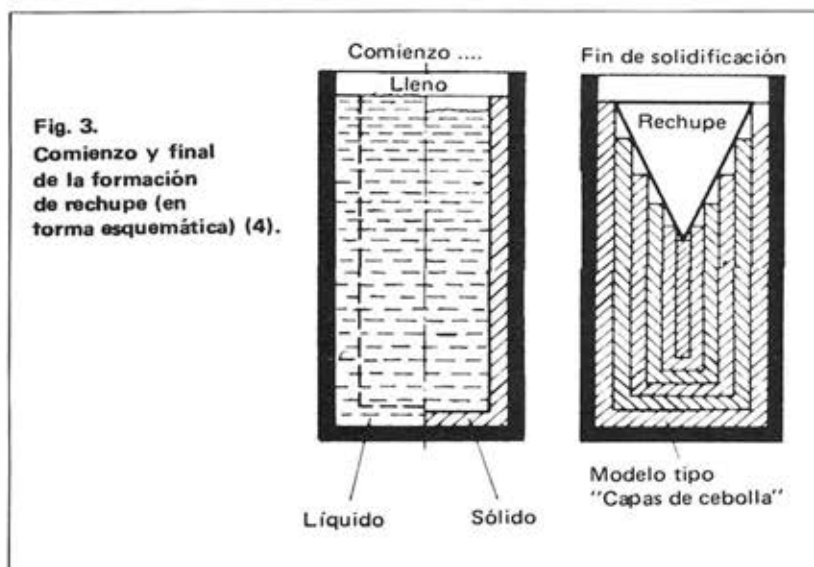


b) La contracción volumétrica provoca en aceros calmadados, rechupes y en aceros efervescentes una estructura porosa (ver figura 2^{2,3}). El rechupe es generado por la acción conjunta de la contracción de volumen y la fuerza de gravedad. El acero comienza a solidificarse desde las paredes de la lingotera hacia el interior. La capa de acero ya solidificado se contrae en dirección de las paredes de la lingotera y por lo tanto el líquido remanente no puede seguir llenando el volumen original de metal líquido y baja continuamente de nivel a medida que la

solidificación avanza formándose una típica cavidad cónica (ver figura 3⁴). Las paredes de esta cavidad en contacto con el oxígeno del aire se oxidan, lo que impide posteriormente, durante la laminación, la unión de ellas. Debido a esto la parte correspondiente al rechupe debe ser eliminada, significando una pérdida considerable, representando incluso en algunos casos casi el 50% del lingote. Con el fin de minimizar las consecuencias del rechupe, se usan normalmente lingoteras que tienen la parte superior recubierta con refractario formando una "mazarota calien-

te" con el fin de mantener bastante metal líquido, que permita compensar las pérdidas por contracción. También se adiciona material exotérmico (ver figura 4⁵). Con estos métodos se pueden reducir las pérdidas entre un 5 a 10% del peso total del lingote. En lingotes de gran tamaño, los cuales presentan tiempos totales de solidificación de varias horas, se calienta el interior del lingote eléctricamente y en algunos casos se hacen adiciones de metal líquido, manteniendo así una reserva adecuada para compensar pérdidas debido a la contracción.





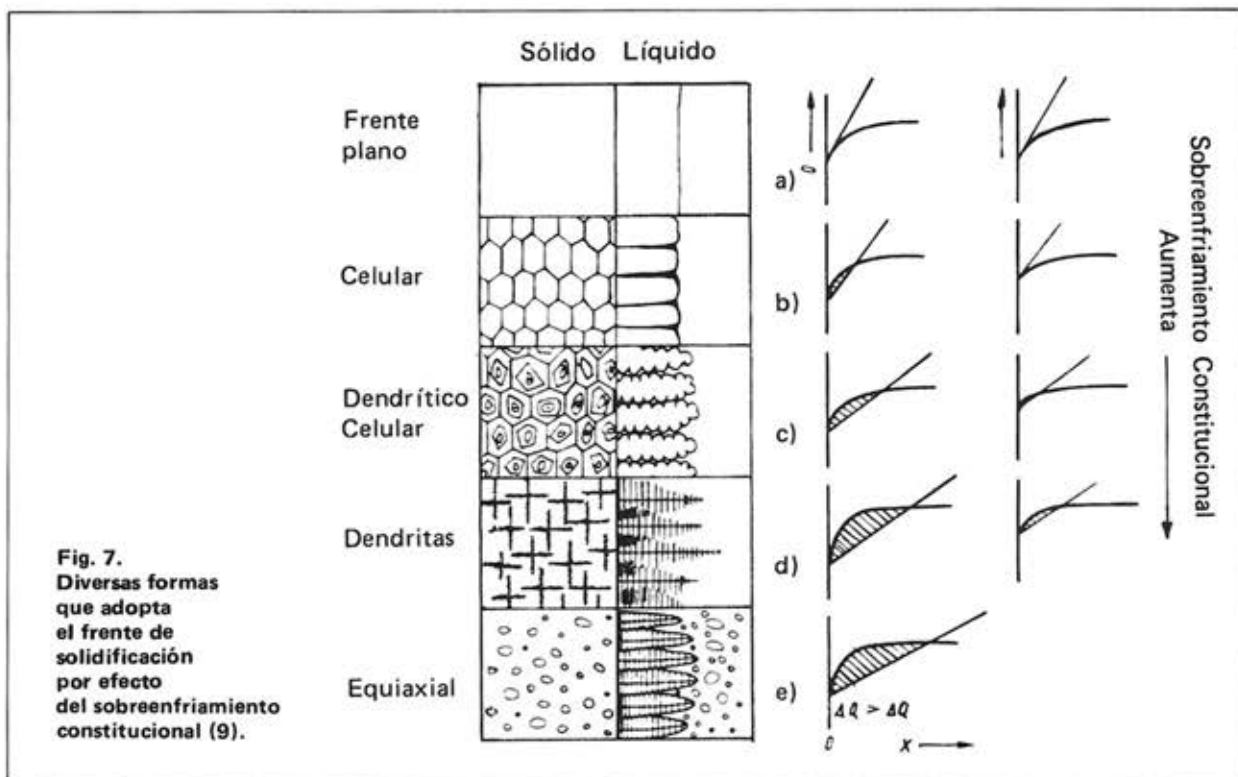
c) El fenómeno de inmiscibilidad en la solidificación del acero se puede aclarar de la observación del diagrama hierro-carbono (ver figura 5⁶). Cuando un acero se enfría desde la zona líquida cambia su composición química según la línea liquidus A, B, C. Al mismo tiempo el hierro sólido tiene a la misma temperatura una composición dada por la línea A, H, J, E. Se puede apreciar que el hierro al solidificarse presenta una solubilidad menor con respecto al carbono, esto significa que durante la solidificación del acero, el líquido remanente delante del frente de solidificación se va enriqueciendo de carbono, esto se repite para todos los demás elementos

aleantes del acero. La reyección de los elementos aleantes delante del frente de solidificación tiene por consecuencia, una vez terminada la solidificación, una distribución desuniforme de elementos aleantes en el lingote, fenómeno conocido como segregación. La relación entre las solubilidades de los elementos aleantes en el hierro sólido y líquido es conocida como coeficiente de segregación. En la tabla 1⁷ se entregan los valores de los coeficientes de segregación de los elementos aleantes más importantes del acero, se puede observar que el oxígeno y el azufre presentan los valores más grandes. Los elementos reyeccionados delante del frente de solidifica-

ción se distribuyen paulatinamente mediante difusión y convección en el líquido, por lo tanto, mientras el frente avanza, delante de él, la concentración de soluto aumenta permanentemente; este enriquecimiento de soluto continúa hasta que alcanza valores lo suficientemente altos, como para formar nuevas fases, especialmente óxidos, ya sea en forma gaseosa o sólida, los que pueden trasladarse delante del frente de solidificación o bien quedar atrapados en la zona ya solidificada, dependiendo de que la velocidad con que se desplazan sea menor o mayor que la del frente de solidificación. En la mayoría de los casos, el avance del frente es lo bastante lento como para que los óxidos formados durante la solidificación, conocidos como productos de desoxidación secundaria, se desplacen en el líquido y junto con los óxidos ya existentes en él (desoxidación primaria) se ubiquen en determinadas zonas del lingote, principalmente en el centro y la zona inferior, donde finalmente los alcanza la solidificación. El oxígeno y el carbono reyeccionado delante del frente de solidificación reaccionan entre sí formando monóxido de carbono que burbujeando abandona el baño metálico, generando una fuerte ebullición del baño. Según el contenido de oxígeno del acero al momento de ser colado y, por lo tanto, la

TABLA 1
Coeficientes de segregación para diversos elementos en el acero (7).

Oxígeno	0,02
Boro	0,03
Azufre	0,04 - 0,05
Fósforo	0,15 - 0,18
Carbono	0,20 (Fe - δ)
	0,35 (Fe - γ)
Hidrógeno	0,27
Nitrógeno	0,38
Zirconio	0,50
Titanio	0,60
Aluminio	0,60
Molibdeno	0,70
Silicio	0,84
Manganeso	0,80 - 0,90
Cromo	0,97



tucional y también la inestabilidad del frente de solidificación aumenta desde la zona en contacto con las paredes de la lingotera hasta el centro del lingote, generando diversas estructuras a medida que avanza la solidificación. En un comienzo el frente de solidificación es plano, generando granos columnares; a medida que el frente avanza y pierde estabilidad se van generando estructuras de tipo celular, celular dendrítica y finalmente en el núcleo del lingote se producen granos dendríticos libres (equiaxiales). (Ver figura 7). La formación de dendritas tiene como consecuencia la microsegregación, ya que el líquido que rodea a las dendritas se enriquece de soluto rechazado al crecer las dendritas, produciéndose una marcada diferencia de concentración entre las dendritas (pobre en soluto) y su contorno (rico en soluto). Al formarse dendritas libres, estas debido a su mayor densidad respecto al metal líquido, se desplazan en él hacia la parte infe-

rior del lingote, pero al mismo tiempo debido al progreso de la solidificación, el volumen de líquido, que sigue enriqueciéndose de soluto, se reduce hacia el centro y parte superior del lingote, generándose de esta forma una marcada diferencia de concentración entre la parte inferior y superior del lingote (ver figura 8).

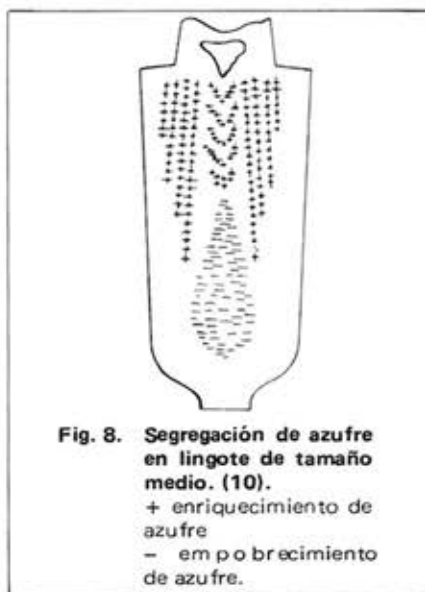


Fig. 8. Segregación de azufre en lingote de tamaño medio. (10).
+ enriquecimiento de azufre
- empobrecimiento de azufre.

Aceros Calmados

El acero calmado se origina cuando el oxígeno disuelto en él, es totalmente eliminado mediante desoxidación. El calmado se realiza principalmente haciendo adiciones de silicio o aluminio o ambos a la vez, al acero antes de la colada. Para lograr una total desoxidación, el contenido de silicio no debe ser menor al 0,30% y el contenido de aluminio disuelto en el baño debe ser entre 0,02 a 0,06%. Sólo un pequeño porcentaje de la producción de aceros calmados es vacuo desoxidados.

Los lingotes de aceros calmados presentan un marcado rechupe, por lo tanto, deben ser colados en lingoteras con mazarota caliente, obteniéndose así, un rendimiento entre el 80 y 85%.

Todos los aceros aleados son totalmente desoxidados, disminuyendo de esta forma la macrosegregación. En aceros con contenidos de carbono mayores al 0,20%, la solubilidad de oxígeno

en el baño metálico es baja, lo que permite colarlos sin problemas. En aceros con porcentaje de carbono bajo el 0,10%, que se requieren desoxidados y libres de inclusiones, se les adiciona aluminio hasta alcanzar valores del 0,020% en solución, lográndose una rápida y total desoxidación.

La velocidad de solidificación de aceros calmados depende del tamaño del lingote; de la figura 1 se puede determinar que lingotes con una sección transversal cuadrada de 600 mm² (espesor de la capa solidificada es de 300 mm) tienen tiempos de solidificación de 72 minutos, pero debido a la mazarota caliente, el metal permanece líquido en la parte superior del lingote por más tiempo que en las lingoteras corrientes, por lo tanto, lingotes con la sección transversal anterior (tamaño habitual en la producción de acero) son extraídos de las lingoteras, sólo después de dos horas, sin peligro de derrame.

En la actualidad la más importante aplicación del acero calmado es en la colada continua (este proceso es realizable sólo con aceros calmados).

Aceros Semi calmados y Efervescentes.

La figura 2a muestra en forma esquemática el aspecto interno, que presentan lingotes de aceros con diverso contenido de oxígeno disuelto al momento de ser colados (la figura es válida para aceros con contenidos promedios de 0,060% de carbono). Al comenzar la solidificación de un acero semi calmado no se forman burbujas de monóxido de carbono. La parte superior del lingote se solidifica rápidamente debido a la evacuación del calor por radiación (los aceros semi calmados son colados en lingoteras sin mazarota caliente). Una vez que el carbono y el

oxígeno reyectado delante del frente de solidificación alcanzan los valores estequiométricos requeridos para reaccionar, se forma una pequeña cantidad de monóxido de carbono que sube burbujeando hacia la parte superior del lingote chocando con la capa ya solidificada, las burbujas son ahí retenidas formando una estructura de tipo esponjoso (Ver figura 2a, centro). En la parte inferior del lingote debido a la alta presión ferroestática, no se forma monóxido de carbono. Los aceros semi calmados presentan una estructura de colada poco segregada al igual que los aceros calmados y su aprovechamiento es similar a estos últimos. La obtención de lingotes de aceros semi calmados es dificultosa, puesto que, el controlar el contenido adecuado de oxígeno no es fácil, igualmente se debe tener un buen control del manganeso y el silicio.

Los aceros semi calmados son especialmente utilizados para la fabricación de acero estructural de calidad media.

En los aceros efervescentes, debido a sus altos contenidos de oxígeno, se producen burbujas de monóxido de carbono desde que comienza la solidificación, generando efervescencia en la parte superior del lingote. Durante la efervescencia el acero continúa absorbiendo oxígeno del aire, el cual realimenta el burbujeo del baño metálico, al mismo tiempo, los óxidos de hierro y manganeso que se están formando suben y originan una capa de escoria, que debido al burbujeo adquiere la forma de espuma. La efervescencia produce un intenso movimiento y mezcla del metal líquido generando una marcada macrosegregación.

La primera capa solidificada (la que está en contacto con las paredes de la lingotera) en aceros efervescentes es de gran pureza y de calidad muy semejante a la de

lingotes de aceros calmados. Una vez que la capa solidificada alcanza un espesor determinado, se tapa la lingotera con una plancha de acero, impidiendo que las burbujas de monóxido de carbono escapen a la atmósfera, formando una estructura de tipo esponjoso en la parte superior del lingote (ver figura 9).

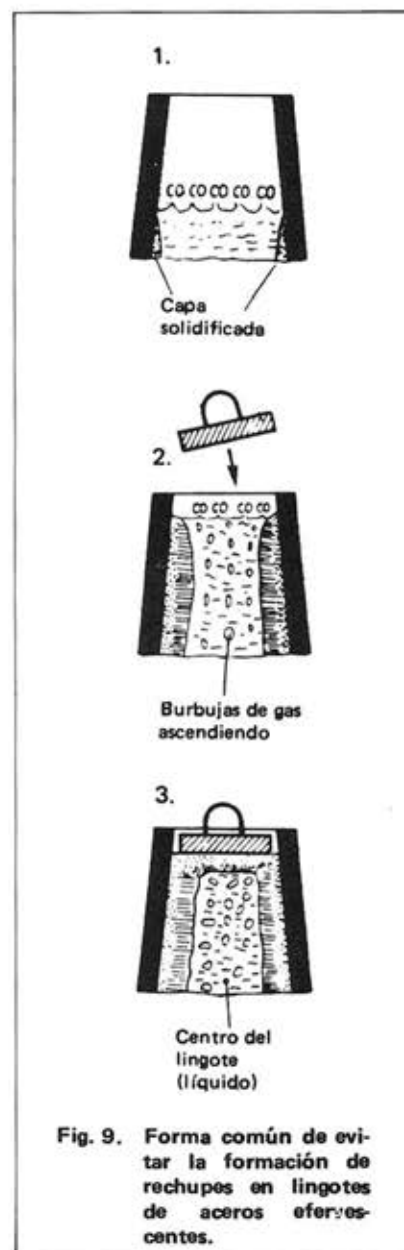


Fig. 9. Forma común de evitar la formación de rechupes en lingotes de aceros efervescentes.

La potencia de la efervescencia debe ser exactamente controlada. Con una ebullición muy fuerte se producen pérdidas por

eyección del metal y mala formación en general del lingote. Con una agitación débil, puede suceder que algunas burbujas permanezcan ocluidas muy cerca de la superficie del lingote, las que al oxidarse producen problemas durante el proceso de laminación. Una efervescencia debidamente controlada puede incluso lograr la eliminación de los productos de desoxidación secundaria. Los lingotes de aceros efervescentes presentan en su zona central más óxidos que en las zonas cercanas a la superficie. La correcta determinación del grado de efervescencia exige un adecuado control de los contenidos de carbono, manganeso y oxígeno, pues el oxígeno disuelto durante la solidificación, además de reaccionar con el carbono lo hace con el manganeso. Si la ebullición es demasiado enérgica, se hacen pequeñas adiciones de aluminio. Otro factor importante para la obtención de lingotes de aceros efervescentes de calidad, es la forma y tamaño de la lingotera. Es debido a todos estos factores que la obtención de lingotes de aceros efervescentes y semi calmados sigue teniendo, hoy, mucho de empírico, a pesar que, los funda-

mentos teóricos de estos procesos están totalmente aclarados.

Los contenidos de manganeso, carbono y oxígeno en acero efervescente están respectivamente entre los siguientes rangos: 0,25 a 0,450/o; 0,03 a 0,20/o y 0,02 a 0,040/o.

Una variedad especial de acero efervescente es el llamado acero calmado en lingotera. En este proceso, el acero es colado en lingotera de igual forma que un acero efervescente, posteriormente cuando ya ha solidificado una delgada capa, se adiciona suficiente aluminio, como para calmar totalmente el baño, continuando la solidificación de éste, como la de un acero calmado. Se logra así un lingote que tiene una superficie de buena calidad y gran pureza y, además, que presente poca segregación en su interior. La desventaja de este proceso es la posibilidad de obtener una alta cantidad de óxidos en el centro del lingote. Puesto que los aceros efervescentes y semi calmados no presentan rechupes se pueden utilizar totalmente (la parte superior esponjosa se soldará en el proceso de laminación), en general para estos tipos de aceros se estiman pérdidas no mayores al 100/o. ●

BIBLIOGRAFIA

1. Giessen und Erstarren von Stahl, Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Verlag Stahleisen mbH. Düsseldorf, 1967, pág. 5.
2. Referencia 1, pág. 63.
3. Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, pág. 258.
4. Referencia 3, pág. 252.
5. Referencia 3, pág. 254.
6. Horstmann, E., otros autores. 3er. Congreso Internacional de Siderurgia, Luxemburgo, 1962.
7. Oeters, F.K. Rüttiger, A. Diener y G. Zahs. Arch. Eisenhüttenwesen, 40 (1969), pág. 63.
8. Parker, Charles. Metalurgia de los Aceros de Calidad. Editorial Aguilar, pág. 65.
9. Tiller, W.A. J. Iron Steel Inst. 196, (1958), pág. 338.
10. Ohno, A. The Solidification of Metals. Iron and Steel Inst. Publication Nº 110. Londres, 1968, pág. 349.
11. Referencia 3, pág. 253.

INTER-CAMBIO TECNOLÓGICO

(Crónica preparada por Dr. Nelson Santander)

peritaje metalúrgico a cable submarino



El Ministro de Bienes Nacionales solicitó al Departamento de Metalurgia USACH llevar a cabo un peritaje de caracterización de un antiguo cable telegráfico dado de baja por la West Coast, y que se encontraba sumergido a lo largo de más de 3.000 kilómetros en el Pacífico, uniendo una gran parte del territorio nacional mediante esta vía de comunicación.

Una fotografía de un trozo de este cable submarino se muestra en la figura adjunta.

Como todas las estructuras o materiales que permanecen por largo tiempo sumergidos en aguas marinas, lo primero que se distingue es una gruesa e irregular capa de residuos calcáreos depositados en la superficie del cable.

El blindaje metálico exterior,

constituido por un alambro en envolvente de acero de bajo carbono y que se ubicaba inmediatamente debajo de la capa calcárea, se encontraba prácticamente transformado en su totalidad en residuos de corrosión, a pesar de la impregnación con pastas alquitranosas que aún daban al trozo un olor característico.

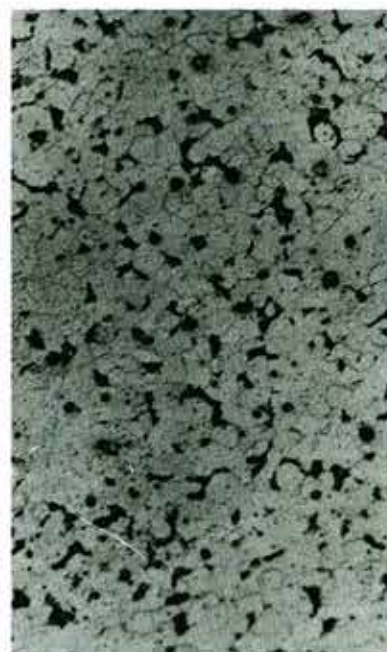
Los conductores telegráficos mismos estaban constituidos por 2 polos de alambre de cobre de alta pureza, formados por un trenzado de 14 alambres de 0,75 mm. de diámetro. Cada uno de estos conductores iba envainado dentro de un medio aislante, en una lámina envolvente de latón de 0,06 mm de espesor. Todo este núcleo conductor, debidamente aislado, iba sumergido en aislante y protegido por un

blindaje primario constituido por 20 alambres de acero de 2,39 mm. de diámetro. La observación metalográfica del acero de estos alambres señalaba que éstos correspondían a un acero hipoeutectoide.

El blindaje secundario estaba diseñado en base a un trenzado de 14 varillas de acero de bajo carbono y de 12,6 mm. de diámetro cada una.

Este blindaje se encontraba muy sano. Según los antecedentes disponibles, este cable telegráfico funcionó durante la guerra del Pacífico, lo que junto con darle un carácter histórico, justifica la observación metalográfica hecha, en el sentido de haber encontrado que los aceros eran de aceración por pudelado, presentando inclusiones típicas de escoria en la matriz fina ferrítica. Recordemos que sólo en las últimas décadas del siglo pasado creció sustancialmente la fabricación de aceros en base al tratamiento Bessemer o al Thomas.

El cable pasó a ser de propiedad fiscal al efectuar la West Coast su donación al Estado. ●





REMETALLICA

REVISTA DEL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE - CASILLA 1361-89 SANTIAGO

NOVIEMBRE

SANTIAGO-CHILE

Nº 1