



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50<sup>th</sup> anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

## FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

## CONTACT

Please contact [publications@unido.org](mailto:publications@unido.org) for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at [www.unido.org](http://www.unido.org)



15251-S

Distr. LIMITADA

ID/WG.470/4  
17 julio 1987

ESPAÑOL  
Original: INGLES

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial

Primera Consulta sobre la Industria  
de los Metales no Ferrosos

Budapest (Hungria),  
30 de noviembre a 4 de diciembre de 1987

**OPCIONES TECNOLOGICAS EN LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO\***

por

**György Dobos\*\***  
Consultor de la ONUDI

---

\* Las opiniones que el autor expresa en este documento no reflejan necesariamente las de la Secretaría de la ONUDI. El presente documento es traducción de un texto que no ha pasado por los servicios de edición de la Secretaría de la ONUDI.

\*\* Ex funcionario de la ONUDI, Director Adjunto de la División de Operaciones Industriales.

INDICE

	pág.
A. INTRODUCCION	1
B. MARCO DEL ESTUDIO	4
1. LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO	4
2. SELECCION DE TECNOLOGIAS	4
C. SITUACION ACTUAL DE LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO	9
1. DEMANDA Y OFERTA	9
2. CAPACIDADES	11
3. PRECIOS	12
4. EL PAPEL DE LOS PRECIOS DE LA ENERGIA	13
5. RECICLADO	13
6. MATERIALES COMPETIDORES	14
7. PERSPECTIVAS RAZONABLES PARA EL FUTURO	15
8. EL ALUMINIO ¿ES UN METAL QUE HA ALCANZADO EL TECHO DE SUS APLICACIONES?	17
9. CONCLUSION	18
D. ANALISIS DE LA TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO	19
1. BAUXITA	19
1.1 Geología de la bauxita	19

	pág.
1.2 Extracción de la bauxita	23
2. PRODUCCION DE ALUMINA	26
2.1 Generalidades	26
2.2 El procedimiento Bayer	27
2.3 Plantas de alúmina	30
2.3.1 Capacidad de producción y economías de escala	30
2.3.2 Espacio e infraestructura	31
2.3.3 Ubicación	34
2.4 Explotación de las plantas de alúmina	35
2.4.1 Costos de producción	35
2.4.2 Mantenimiento y piezas de repuesto	37
2.5 Transformación de bauxitas de baja calidad y materiales no bauxíticos	38
2.6 Alúmina de calidad no metalúrgica	38
2.7 Subproductos de la producción de alúmina	39
2.8 Residuos (lodos rojos)	41
3. FUNDICION DEL ALUMINIO	42
3.1 Generalidades	42
3.2 El procedimiento Hall-Hèroult	42
3.3 Plantas de fundición de aluminio	46
3.3.1 Capacidad de producción y economías de escala	46
3.3.2 Espacio e infraestructura [23]	48
3.3.3 Emplazamiento	49
3.4 La energía eléctrica en las plantas de fundición	50
3.5 Explotación de las plantas de fundición de aluminio	51
3.5.1 Gastos de producción	51
3.5.2 Mantenimiento y piezas de repuesto	52
3.6 Residuos	53
4. FABRICACION DE PRODUCTOS SEMIMANUFACTURADOS	53

	pág.
4.1 Consumo de aluminio	53
4.2 Fabricación de productos semimanufacturados	55
4.2.1 Colada continua	58
4.2.2 Colada de tochos y desbastes	59
4.2.3 Moldeo	60
4.2.4 Laminación	62
4.2.5 Extrusión	62
4.2.6 Forja	63
4.3 Transformación de productos semimanufacturados	63
4.3.1 Fabricación de papel de aluminio	64
4.3.2 Acabado de la superficie	65
4.4 Aspectos generales de la instalación de plantas de semimanufactura	56
5. MANUFACTURACION DE PRODUCTOS ACABADOS	67
E. PRINCIPALES ORIENTACIONES DE LOS PROGRAMAS DE INVESTIGACION	70
1. ALUMINA	70
1.1 El procedimiento Bayer	70
1.2 Procedimientos distintos del Bayer	72
2. ALUMINIO	73
2.1 El procedimiento Hall-Hèroult	73
2.2 Otros procedimientos	74
3. SEMIMANUFACTURACION	75
3.1 Consideraciones generales	75
3.1.1 Colada continua	76
3.1.2 Fundición de tochos y desbastes	76
3.1.3 Moldeo	78
3.1.4 Laminación	78
3.1.5 Extrusión	78

	pág.
3.1.6 Forja	80
3.1.7 Otras tecnologías	80
3.1.8 Avances en el ámbito de las aleaciones y la microestructura de los productos	80
3.2 Transformación de semimanufacturas de aluminio	81
3.2.1 Papel de aluminio	81
3.2.2 Acabado de la superficie	81
F. OPCIONES TECNOLOGICAS MAS IDONEAS PARA LOS PAISES EN DESARROLLO	82
1. RESUMEN TECNICO	82
2. ALGUNAS CONSIDERACIONES ECONOMICAS	86
3. POSIBILIDADES EN LA COOPERACION NORTE-SUR	92
4. COOPERACION ENTRE PAISES EN DESARROLLO	94
5. ESTABLECIMIENTO DE INSTALACIONES DE FABRICACION EN LOS PAISES EN DESARROLLO	95
6. DISPONIBILIDAD DE TECNOLOGIAS	96
7. COMERCIALIZACION	97
8. ALGUNAS OBSERVACIONES GENERALES	97
9. EL PAPEL DE LA ONUDI [5]	98
G. RECOMENDACIONES	101
1. PAISES EN DESARROLLO	101
2. PAISES EN DESARROLLO	102
3. ONUDI	103
REFERENCIAS	105
ANEXOS (1 a 39)	112 a 153

## GLOSARIO

### Siglas generales y económicas

CGC	Contabilidad de gastos corrientes (Bird, [8])
CGH	Contabilidad de gastos históricos (Bird, [8])
ET	Empresas transnacionales
NU	Naciones Unidas
ONUDI	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
PIB	Producto interno bruto
PNB	Producto nacional bruto

### Unidades de medida

La palabra "tonelada" se refiere a la tonelada métrica (t)  
Todas las temperaturas están expresadas en grados Celsius  
(°C)

C.A.	Corriente alterna
g/l	Gramo/litro
kA	Kiloamperio
kg/h	Kg/habitante
kWh	Kilovatio hora
MN	Meganewton
t/a	toneladas anuales

## A. INTRODUCCION

Una de las principales recomendaciones de la Primera reunión de expertos sobre las industrias de los metales no ferrosos, celebrada en Viena del 18 al 21 de marzo de 1985 [1], fue realizar estudios relativos a la selección de tecnologías más apropiadas para los países en desarrollo en las industrias del aluminio, níquel, zinc, plomo y estaño, con el fin de fomentar un desarrollo más integrado y autosuficiente en esos países.

El primer estudio debía basarse principalmente en los estudios efectuados hasta la fecha, con especial atención a las investigaciones realizadas sobre la reducción de la capacidad de producción de las plantas.

Sobre esa base, la Secretaría de la ONUDI solicitó al redactor que preparara un estudio sobre las "Opciones tecnológicas en la industria del aluminio", con el mandato siguiente:

a) analizar el actual estado de la tecnología en las industrias de los metales no ferrosos estudiadas, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo;

b) examinar los principales programas de investigación que se están realizando actualmente en la esfera de la tecnología y especificar sus objetivos, características, resultados y posible fecha de ejecución. Para entender fácilmente dónde se están implantando actualmente los principales cambios y/u opciones tecnológicas y con el fin de poder hacerse una idea clara del tipo de rutas tecnológicas de las que está hablando el autor, es preciso elaborar esquemas de las etapas de extracción, refinación y transformación ulterior.

c) determinar, sobre la base del análisis de la situación presente y de la investigación que se está realizando en la actualidad, las posibilidades de crear

nuevas opciones tecnológicas que se adapten mejor a los países en desarrollo. Determinar asimismo las principales características técnicas y económicas de las posibles opciones tecnológicas, con especial hincapié en sus principales ventajas y desventajas para los países en desarrollo;

d) proponer un posible programa de cooperación (tanto Norte-Sur como Sur-Sur) orientado a crear tecnologías adecuadas para las industrias de los metales no ferrosos en los países en desarrollo.

La estructura del presente estudio responde al mandato señalado por la Secretaría de la ONUDI. Siguiendo sus sugerencias, se efectuó un detenido análisis de los estudios realizados con anterioridad y se prestó especial atención a los estudios preparados como parte de las actividades de la Subdivisión de Negociaciones [1] y la Subdivisión de Industrias Metalúrgicas [2].

De conformidad con el mandato, el objetivo primordial del estudio consiste en determinar las posibilidades de crear nuevas opciones tecnológicas que se adapten mejor a los países en desarrollo e indicar las principales ventajas y desventajas de las posibles opciones tecnológicas. Con ese fin se efectuó un examen de las publicaciones sobre la materia con miras a estudiar los programas de investigación que se están ejecutando actualmente en la esfera de la tecnología de la industria del aluminio y se hizo una evaluación provisional de las posibilidades de aplicar los resultados previstos en los países en desarrollo. Como es obvio, los resultados presentados requieren cierta cautela, justificada directamente por el carácter de la tarea encomendada pero también por el hecho de que el presente análisis de las posibilidades y opciones tecnológicas se basa exclusivamente en las publicaciones sobre la materia y en la experiencia que posee el redactor en lo referente a la

industria del aluminio. Por consiguiente, es de prever que durante el proceso de preparación de la Reunión de Consulta, la contribución de otros expertos en la industria del aluminio incremente considerablemente el número de opciones tecnológicas más adecuadas para los países en desarrollo y obligue a modificar en consecuencia las conclusiones del presente estudio.

B. MARCO DEL ESTUDIO

1. LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO

La mayor parte de las empresas de aluminio integradas no sólo se dedican a las operaciones extractivas, químicas y metalúrgicas para transformar el mineral en lingotes y productos semimanufacturados de aluminio sino que también convierten el metal en diversos productos (latas de bebida, radiadores para la calefacción doméstica, cables, etc.). Parece ser que una política adoptada con carácter general por la mayoría de los productores primarios es aumentar su participación en los escalones inferiores de la industria manufacturera. A la hora de considerar las opciones tecnológicas más adecuadas para los países en desarrollo en la industria del aluminio es preciso sopesar con sumo cuidado los problemas relativos a la conversión del metal, porque en la mayor parte de los casos el metal llega al usuario final por ese conducto. Por consiguiente, se darán indicaciones acerca del nivel de producción viable de los procesos de conversión y de la calidad y cantidad de productos semimanufacturados que requieren esas tecnologías y se establecerá la relación entre esas cifras y los diversos niveles de consumo de aluminio por habitante que cabe prever en los países en desarrollo en diferentes etapas de desarrollo económico. No obstante, a fin de que el presente estudio no rebase unos límites sustantivos coherentes, se entenderá por industria del aluminio la extracción de bauxita y la producción de alúmina, aluminio y productos semimanufacturados.

2. SELECCION DE TECNOLOGIAS

La mayor parte de los procedimientos e instalaciones que se utilizan actualmente para la

obtención de aluminio a partir de la bauxita pertenecen a un nivel intermedio de complejidad tecnológica. Entre las excepciones, que son relativamente pocas, figuran por ejemplo la regulación automática de algunos procedimientos tecnológicos, la producción de materiales compuestos y el diseño y la fabricación de aleaciones de alta resistencia [3].

La mayoría de los principales componentes del equipo utilizado en esta industria se puede fabricar en cualquier país que cuente con una industria mecánica relativamente desarrollada; la mayor parte de los países en desarrollo realizan actualmente actividades de investigación y desarrollo relacionadas con ese equipo. En lo que se refiere a la aplicación industrial práctica de los resultados de la investigación y el desarrollo en materia de nuevos procedimientos tecnológicos y nuevos tipos de equipo, las grandes empresas son las que gozan de mejores posibilidades. Son las únicas que poseen los medios necesarios para crear e implantar innovaciones importantes a escala industrial y en caso necesario trabajan paralelamente en varios sectores importantes de actividad de investigación y desarrollo. Esto es especialmente cierto para la producción de alúmina y aluminio, con sólo pensar en el nivel de producción de las modernas instalaciones industriales. Por consiguiente, no hay duda alguna de que las seis grandes empresas transnacionales ALCAN, ALCOA, KAISER, REYNOLDS, ALUSUISSE y PECHINEY ostentan hoy por hoy la primacía tecnológica en la industria del aluminio. Hay que señalar, sin embargo, que algunas otras empresas establecidas en diversos países -por ejemplo, RFA, Italia, Japón, Estados Unidos, Unión Soviética- y no relacionadas directamente con las empresas transnacionales apuntadas, poseen un conocimiento tecnológico similar al de aquéllas, ya sea en lo referente a la mayoría de las operaciones de la industria del

aluminio o aparte de ellas. Estas empresas cabe considerarlas como posibles fuentes de tecnología de la industria del aluminio. Hay que señalar también que la tecnología para esta industria se puede adquirir por conducto de los principales asesores industriales.

Cabe suscribir la opinión expresada por el Centro de las Naciones Unidas para empresas transnacionales [4] de que en la mayoría de los casos la adquisición de tecnología de la industria del aluminio no plantea problemas graves. Puede haber excepciones en el caso de innovaciones tecnológicas relativamente recientes que posiblemente se hallen en fase de prueba o que tengan que ver con productos nuevos y muy específicos. En términos generales se puede afirmar que el mercado de las tecnologías normales de la industria del aluminio es más bien un mercado favorable al comprador.

Hay que señalar también que en el costo del aluminio metal que llega al consumidor entran tres insumos cuyo precio viene determinado principalmente por la ubicación de las instalaciones industriales. Son la calidad de la bauxita, el precio de la energía eléctrica utilizada en la planta de fundición y finalmente los costos de transporte que conlleva todo el proceso de transformación del mineral en metal. La influencia individual o conjunta de esos tres factores en el beneficio de las operaciones puede ser más fuerte que la que puedan ejercer pequeñas diferencias en el nivel tecnológico de las instalaciones. Esa puede ser una de las razones que expliquen los resultados relativamente buenos logrados por algunas empresas menores en el mercado del aluminio.

En realidad no existe ninguna metodología aceptada universalmente para elegir la opción tecnológica más idónea en cualesquiera circunstancias.

Aunque el objetivo del presente estudio no es definir criterios en ese sentido, no parece inoportuno hacer algunas consideraciones acerca de una cuestión que se plantea constantemente: la de la "tecnología apropiada" [5].

Según el Sr. Biritz [5], una tecnología es adecuada cuando satisface las cuatro condiciones siguientes:

- limitaciones y parámetros puramente tecnológicos,
- limitaciones impuestas por la capacidad y el know-how del personal encargado de aplicar la tecnología,
- conformidad con las condiciones económicas en las que tiene que operar,
- conformidad con la situación sociopolítica existente.

El Sr. Biritz define asimismo subparámetros de los parámetros apuntados y establece correlaciones entre la tecnología del procedimiento; y el producto y su aplicación; las materias primas; los beneficios económicos; la mano de obra y las limitaciones sociopolíticas.

Los puntos principales de sus conclusiones son los siguientes:

1) La idoneidad de una tecnología sólo se puede definir para una planta industrial u operación concreta y no es directamente aplicable a otra instalación idéntica pero ubicada en otro lugar. La idoneidad de un producto puede ser válida para todo un país o incluso una subregión, siempre y cuando prevalezcan condiciones económicas similares. Por ejemplo, las semimanufacturas fabricadas por fundición de bandas pueden servir para satisfacer la demanda en varios países en desarrollo que comienzan con una aplicación más general del aluminio destinado a diferentes fines.

2) Las condiciones económicas en las que tiene que funcionar la empresa deben estar claramente definidas:

- I) se espera que la planta tenga beneficios;
- II) es preciso subvencionar la planta, al menos durante un tiempo;
- III) la planta debe prestar una contribución social o de otro tipo al país, mientras que los beneficios son de importancia secundaria.

3) Las tecnologías de las industrias de transformación, como por ejemplo las operaciones químicas, petroquímicas y metalúrgicas, no admiten prácticamente ningún cambio; si se quiere satisfacer las condiciones económicas básicas, la única variación que entra en consideración es el nivel de producción de la planta.

4) La definición de la tecnología apropiada es un proceso continuo y sin fin en la industria, cuya misma supervivencia depende de ella, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo.

En la sección dedicada a los procedimientos tecnológicos utilizados en la industria del aluminio (Capítulo D) se intentará concretar más esas cuestiones básicas.

A fin de facilitar la consulta se adjunta en el Anexo I una descripción de la secuencia de operaciones establecida por el Sr. Biritz para definir las tecnologías de la manufacturación industrial.

C. SITUACION ACTUAL DE LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO

1. DEMANDA Y OFERTA

El consumo mundial de aluminio primario experimentó un rápido aumento hacia el decenio de 1950. En 1950 la producción fue de aproximadamente dos millones de toneladas de aluminio primario, mientras que cinco años más tarde alcanzó tres millones de toneladas y en 1960, 4.5 millones. El nivel de producción aumentó rápidamente y alcanzó los 10 millones de toneladas en 1970.

Esta tendencia ha cambiado mucho en años recientes. En el Anexo 2 se ofrece un cuadro de la situación entre 1973 y 1983 [6]. Aunque el consumo mundial total de aluminio (primario + secundario) rebasó los 20 millones de toneladas en 1983, una buena parte era metal secundario (más del 25%) y el aumento no fue más que de 3,8 millones de toneladas en ese período. Sin embargo, más de la mitad de esa cantidad correspondió al consumo secundario adicional, de modo que el aumento total de metal primario fue tan sólo de aproximadamente 1,7 millones de toneladas.

Según Zorn [7], la tasa de aumento del consumo entre 1970 y 1983 fue del 3% anual para el aluminio primario. Pero en relación a períodos de tiempo más cortos, el aumento representó sólo un 1,9% anual en los países con economía de mercado entre 1973 y 1979, e incluso menos, tan sólo el 0,5% anual, durante el período de 1979 a 1985 (Bird [8]). El aumento del consumo en los países con economía de planificación centralizada fue algo mayor, aproximadamente del 3% anual.

Cabe por tanto afirmar que el crecimiento dinámico que tuvo en otro tiempo el consumo de este metal se ha frenado y que la tendencia actual es muy moderada.

Efectivamente, el aumento del consumo de aluminio es por regla general inferior a la tasa de crecimiento

anual de la producción industrial en la mayoría de los países con economía de mercado. Por el contrario, el crecimiento de los usos finales del aluminio es mayor que el de la producción industrial en la mayoría de los países en desarrollo.

La producción de metal primario no siempre siguió los pasos de la demanda. El consumo de aluminio primario disminuyó a principios del decenio de 1980; las reducciones en la producción llegaron sin embargo con cierto retraso, por lo cual las existencias aumentaron rápidamente y alcanzaron un nivel próximo a los tres millones de toneladas. Esta situación originó una rápida caída de los precios, propiciada además por el elevado nivel de los tipos de interés.

El consumo de aluminio difiere mucho según las diversas regiones del mundo. El promedio mundial es de 3,5 kg por habitante y año. Tres países -Estados Unidos, Japón y República Federal de Alemania- consumen más de 20 kg por habitante y año. La cifra correspondiente a la mayoría de los países desarrollados es de 9-15 kg en años recientes. Los países en desarrollo consumen una cantidad mucho menor. Algunos tienen un consumo de aproximadamente 1 a 3 kg por habitante y año (por ejemplo, Brasil 2,9 kg/h; México 1,7 kg/h) y hay casos en los que se alcanzan los cinco kg por habitante y año, por ejemplo Hong Kong y Venezuela; pero la mayoría de los países en desarrollo consumen menos de un kg por habitante y año e incluso menos de 0,5 (por ejemplo, Egipto 0,9 kg/h; India 0,4 kg/h; Ghana 0,5 kg/h) y el consumo de aluminio de la mayoría de los países menos adelantados es incluso inferior a ese nivel.

## 2. CAPACIDADES

En los Anexos 3, 4 y 5 se muestran, respectivamente, la capacidad de producción por continente de las plantas de alúmina de calidad metalúrgica, la capacidad de las plantas de fundición y la capacidad de fabricación de semimanufacturas; los datos corresponden a 1984 en los dos primeros casos y a 1983 en el tercero (King [9] y [10]). Las cifras indican claramente que existe un importante exceso de capacidad en todas las fases de la producción de aluminio. La capacidad total de las plantas de fundición era de más de 18 millones de t/a en 1984, mientras que la demanda de aluminio primario fue únicamente de unos 15 millones de toneladas en todo el mundo durante el mismo período. Esa demanda requeriría menos de 30 millones de toneladas de alúmina de calidad metalúrgica, mientras que la capacidad de producción ascendió aproximadamente a 40 millones de toneladas en 1984. También hubo un exceso de capacidad de fabricación de productos semimanufacturados en 1983.

Para los próximos años se prevé un aumento de estas capacidades. Las predicciones para las plantas de fundición difieren levemente entre sí (por ejemplo, las de King [9] y Bird [8]), pero se prevé que la capacidad de las plantas de fundición de los países con economía de mercado aumente en unos dos millones de t/a hasta 1991. Las diferencias entre las distintas estimaciones del aumento de la capacidad de producción de alúmina son mayores; Bird [8] sólo prevé un aumento pequeño, mientras que King [9] concibe un incremento de hasta tres millones de t/a. Sin embargo, hay que tener también en cuenta posibles cierres, tanto de plantas de fundición como de alúmina. Incluyendo ese factor, las capacidades de las plantas de fundición podrían aumentar en 1,5 millones de t/a solamente y el incremento de las capacidades de producción

de alúmina podría ser muy pequeño. Las expectativas de que las capacidades de fabricación de semimanufacturas aumenten en el futuro próximo (hasta 1987) no son muy grandes.

### 3. PRECIOS

El precio del metal primario subió constantemente -al margen de breves períodos de recesión- hasta 1980. Sin embargo, la fuerte recesión que sobrevino después dio lugar a una caída brusca de los precios, que desde entonces no se han recuperado. Hay plantas de fundición que apenas pueden cubrir siquiera los gastos marginales (variables), por no hablar de los costos totales, incluidas las cargas de capital. Según Bird [8], en 1984 los gastos marginales en el promedio de las plantas de fundición ascendieron a 51,7 centavos por libra (1.137,4 dólares EE.UU./t) y los costos totales a 63,4 centavos por libra (1.394,8 dólares EE.UU./t). Al mismo tiempo, los precios del aluminio en la Bolsa de Metales de Londres han permanecido por debajo del nivel máximo de 52,7 centavos por libra alcanzado en julio de 1984 (aunque anteriormente estuvieron por encima de esta cota).

Bird [8] estableció una curva analítica de la oferta para 1985 a fin de indicar el nivel de capacidad que puede mantenerse en producción en una planta de fundición para ser rentable a diferentes niveles de precio del aluminio (Anexo 6). Esto explica claramente la situación. Como se comprenderá fácilmente, las plantas de fundición que operan muy por encima de sus gastos están recortando la producción.

La situación es parecida, cuando no peor, en las plantas de alúmina.

#### 4. EL PAPEL DE LOS PRECIOS DE LA ENERGIA

Los precios de la energía aumentaron desde 1973. La fusión del aluminio consume una cantidad considerable de energía eléctrica, aproximadamente 14.500 kWh de corriente alterna por tonelada de metal. Sin embargo, el costo de esa energía varía mucho según las regiones del mundo. Según las indicaciones de un estudio efectuado por personal del Banco Mundial [11], los precios del kWh en 1980 para las plantas de fundición de aluminio existentes oscilaban entre 0,3 y 2,6 centavos para fuentes de energía baratas, y se estimaron 2,0-2,5 centavos para las nuevas plantas de fundición. Los precios son actualmente más elevados y varían entre unos 0,8 y 5,0 centavos o incluso más por kWh. Por consiguiente, las plantas de fundición tienen que pagar una factura de energía que fluctúa entre márgenes muy amplios, de unos 116 dólares EE.UU. a unos 725 dólares EE.UU. por tonelada de metal. Eso explica el cierre de algunas empresas así como las tendencias a la reubicación que muestra esta industria hacia fuentes de energía baratas. (como señala también Zonr [7], por ejemplo).

También se han cerrado algunas plantas de producción de alúmina que explotaban depósitos caros de bauxita y funcionaban con tecnología poco satisfactoria desde el punto de vista de la conservación de la energía.

#### 5. RECICLADO

En el Anexo 2 se observa que la participación del metal secundario en el consumo total de aluminio aumentó del 18% en 1973 al 25% en 1983.

En algunos países desarrollados la participación del metal reciclado fue mucho más elevada que el promedio apuntado (Bird [8]):

Italia	41,1%
RFI	30,3%
Japón	26,4%
Estados Unidos	32,4%
Reino Unido	26,1%

Cabe esperar que la participación del metal secundario en el consumo de aluminio siga aumentando.

#### 6. MATERIALES COMPETIDORES

La "propiedad específica" es una característica muy útil a la hora de comparar materiales que compiten entre sí; se puede expresar del modo siguiente:

$$\text{propiedad específica} = \frac{\text{propiedad necesaria en el uso final}}{\text{gravedad específica} \times \text{precio unidad de peso}}$$

La "propiedad necesaria" puede ser alguna de las siguientes: resistencia a la tracción, límite aparente de elasticidad, resistencia a la fatiga, conductividad, módulo de elasticidad, etc.

Con ayuda de la ecuación anterior se puede determinar el material más adecuado para un uso final dado, pero a condición de que se elija una sola propiedad dominante. El aluminio ostenta el primer lugar cuando la propiedad elegida es la conductividad, lo que explica que generalmente se dé preferencia a este metal en el transporte de energía eléctrica.

Sin embargo, el aluminio reúne un conjunto de propiedades excelente o al menos muy bueno que satisface

en alto grado los requisitos de multitud de usos finales. Eso explica su amplio espectro de aplicación en diversas ramas de la industria, aunque también los límites de su uso.

Como ya se ha señalado, el aluminio sólo ocupa el primer lugar de una "propiedad específica", lo cual significa que existen diversos materiales y metales que compiten con él: cobre, madera, acero, acero hipoaleado de gran resistencia, sin olvidar tampoco los plásticos. Los materiales sintéticos parecen ser los principales competidores en el futuro.

El aluminio secundario representa también, hasta cierto punto, una "competencia" para el metal primario.

Los propios productos de aluminio de alta calidad son competidores desde el punto de vista del crecimiento del consumo de aluminio primario.

El peso de los productos acabados se puede reducir mediante la aplicación de aleaciones de aluminio de elevadas características y/o extrusiones de alta calidad. El precio de estos productos es sin embargo mayor, aunque se necesita menos material para fabricar el mismo producto final (por ejemplo, una resistencia superior en un 10% conlleva un ahorro del 3-5% en materiales en el caso de estructuras que soportan cargas mecánicas).

#### 7. PERSPECTIVAS RAZONABLES PARA EL FUTURO

A corto plazo no habrá cambios importantes; tal es, en esencia, la tesis de Bird [8], por ejemplo. Hasta 1990 cabe esperar un aumento muy leve del consumo, quizá de un 2% anual, con una recuperación parcial de los bajos precios del aluminio. Durante ese periodo no será necesario aumentar las capacidades.

Sin embargo, la situación podría cambiar considerablemente a partir de 1990. Bird [8] prevé que la

tasa de crecimiento anual de la producción industrial se aproximará entre 1990 y 1993 a la que existía antes de la crisis petrolera, lo cual traería también consigo un aumento en el consumo de aluminio. Los datos correspondientes se muestran en el Anexo 7.

Ahora bien, la diferencia entre el período de 1964 a 1973 y el de 1990 a 1993 en lo que respecta al aluminio es que en el período anterior a la crisis petrolera la tasa de crecimiento anual del consumo de aluminio fue por término medio mucho más alta que la de la producción industrial, mientras que en el período de 1990 a 1993 se prevé que la tasa de crecimiento anual del consumo de aluminio sea por término medio levemente inferior a la tasa de crecimiento anual de la producción industrial. No obstante, el aumento del 4,2% anual que se prevé como promedio mundial augura un futuro brillante para esta industria.

Ahora bien, ese crecimiento anual significa la plena utilización de las capacidades para el año 1993 y la necesidad de instalar una capacidad mayor a fin de igualar la demanda. Eso sólo sería posible si aumentaran considerablemente los precios tanto del aluminio como de la alúmina. Un aumento excesivo en el precio del metal actuaría en contra de la tasa de crecimiento prevista. Semejante situación podría fomentar aún más la reubicación de la industria del aluminio hacia las bauxitas de buena calidad y las posibilidades de energía eléctrica barata, circunstancias que podrían brindar la oportunidad para que los países en desarrollo incrementaran aún más su participación en diversas operaciones de la industria del aluminio.

8. EL ALUMINIO ¿ES UN METAL QUE HA ALCANZADO EL TECHO DE SUS APLICACIONES;

En comparación con otros metales estructurales, el aluminio es el más joven y el que ha tenido la tasa más elevada de crecimiento en los últimos decenios. El aluminio es el único metal cuya intensidad de uso (es decir, consumo por PIB) se estima que aumentará en todos los grupos de países hasta el año 2000 [12]. En ese sentido, el aluminio no es un metal que haya agotado sus posibilidades de aplicación. Según otras previsiones [8], la tasa media de crecimiento del consumo mundial de aluminio será inferior a la tasa de crecimiento general de la industria. No obstante, cabe esperar que la tasa de crecimiento del consumo de aluminio supere el promedio mundial en los países en desarrollo; por consiguiente, en lo que respecta a esos países no cabe considerar el aluminio como un metal que haya agotado sus aplicaciones.

Las tecnologías utilizadas en la extracción de bauxita y la producción de alúmina y aluminio están bien establecidas y se conoce bien su fundamento teórico. Las principales posibilidades de lograr economías de escala parecen agotadas, y cabe prever una sucesión continua de adelantos menores, sobre todo en lo que concierne a la conservación de la energía. Es muy probable que a lo largo del presente siglo no se produzcan cambios radicales en esos procedimientos. No obstante, el control computadorizado de los procedimientos podría traer consigo resultados económicos importantes.

Los fundamentos teóricos de las tecnologías mecánicas están, por el contrario, menos claros, y lo que prevalece son más bien tecnologías basadas en resultados empíricos. De ahí que en el futuro puedan surgir adelantos de mayor entidad en los procedimientos de

fabricación de productos semimanufacturados. El control computadorizado de los procedimientos podría contribuir también a los resultados económicos.

En cuanto a los productos y su aplicación cabe afirmar que aún no han alcanzado el límite de sus posibilidades. El aluminio no es demasiado "joven", pero quedan aún por explorar vías para una utilización más rentable. El reciclado del aluminio ha alcanzado ya niveles elevados, pero el "diseño con vistas al aprovechamiento de la chatarra" sigue sin ser una realidad en muchos ámbitos de aplicación.

Los nuevos adelantos que se prevén en la tecnología de fabricación y la producción de nuevas aleaciones y materiales compuestos podrán fortalecer la posición del aluminio en su competencia con otros materiales en las distintas esferas de aplicación.

## 9. CONCLUSION

La situación de la industria del aluminio no es, hoy por hoy, brillante, pero podría cambiar; aún teniendo en cuenta los pronósticos poco optimistas, cabe prever un aumento considerable del consumo, principalmente en los países en desarrollo. Para después de 1990 se puede esperar un desplazamiento más marcado de la industria del aluminio hacia las bauxitas de elevada calidad y los recursos energéticos más baratos. Son fenómenos que justifican un examen cuidadoso de las posibilidades de crear nuevas instalaciones de la industria del aluminio en esos países. Especial atención merecen las opciones tecnológicas que probablemente pueden satisfacer las posibles necesidades de esos países.

D. ANALISIS DE LA TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO

1. BAUXITA

1.1 Geología de la bauxita

El aluminio es el metal más abundante en la naturaleza y constituye aproximadamente el 8,2% de la corteza terrestre. Es un constituyente común de muchos minerales, en los que normalmente se halla presente en combinación con silicio y oxígeno, grupos hidróxido, hierro, titanio y calcio y en menor grado con otros elementos. El mineral de aluminio más importante es la bauxita, una roca sedimentaria que contiene como mínimo un 50% de óxidos e hidróxidos de Al, Fe y Ti, con predominancia de los minerales de Al.

En el Manual sobre principios y métodos de prospección de bauxita publicado por la ONUDI se contiene un resumen de la geología, la mineralogía, la espectrografía y los orígenes de las bauxitas y de sus métodos de prospección, con indicaciones relativas a las técnicas de perforación, la organización de campañas de exploración, la preparación de informes de exploración y el cálculo de reservas con computadora [13].

La bauxita, que actualmente es la principal fuente del aluminio, solamente representa una parte pequeña del aluminio que existe en el mundo. Otras posibles fuentes de este metal admiten la clasificación siguiente [11]:

i) rocas ígneas, de las cuales las más importantes son la anortosita, la sienita nefelínica y la fonolita. De ellas, la sienita nefelínica es la de mayor importancia comercial;

ii) rocas sedimentarias, como las arcillas y los esquistos. Las arcillas hiperaluminosas tienen importantes aplicaciones en las industrias de la cerámica, de materiales refractarios, química y del papel;

iii) rocas metamórficas y metasomatizadas, de las que la alunita es la más prometedora.

Técnicamente, el aluminio se puede obtener de fuentes distintas de la bauxita; pero la tecnología Bayer, basada en la bauxita, tiene actualmente en la mayoría de los casos unos costos bastante más bajos que los demás procedimientos [11].

Las reservas mundiales de bauxita identificadas aumentaron de 9.000 millones de toneladas [14] a unos 50.000 millones de toneladas [15] en 10 años; el volumen anual de extracción de bauxita representa actualmente unos 100 millones de toneladas. El ingente aumento de las reservas de bauxita tiene que ver, sin lugar a dudas, con los avances en la utilización de métodos geológicos modernos. Cabe mencionar, por ejemplo, la aplicación de sistemas de teledetección aerotransportados [16] y por satélite [17] y la utilización de la geoestadística [18] en la evaluación de los yacimientos de bauxita.

Los yacimientos de bauxita se pueden dividir en dos clases: cársticos y lateríticos. Las bauxitas cársticas suelen ser de grano fino, están asociadas con calizas y suelen tener un contenido más elevado de hierro. Las bauxitas lateríticas se encuentran asociadas a rocas de silicato de aluminio y son de grano más basto. La estructura de los yacimientos y las impurezas son diferentes en estas dos clases de yacimientos [11].

Los datos reunidos en el Cuadro 1 sirven para caracterizar la composición química y mineralógica de las bauxitas:

Cuadro 1  
CONSTITUYENTES USUALES DE LAS BAUXITAS

Denominación	Composición	
	química	Composición mineralógica
alúmina	40-65%	gibbsita $Al_2O_3, 3H_2O$ boehmita $Al_2O_3, H_2O$ diásporo $Al_2O_3, H_2O$
sílice	0,5-10%	cuarzo $SiO_2$ caolinita $Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$
óxido de hierro	3-30%	hematita $Fe_2O_3$ goethita $Fe_2O_3, H_2O$
óxido de titanio	0,5-8%	anatasa $TiO_2$ rutilo $TiO_2$
agua	10-34%	en la gibbsita, la boehmita, el diásporo, la caolinita y la goethita
elementos trazas	Mn, P, V, Cr, Ni, Ga, Ca, Mg, etc.	
sustancias orgánicas		

La composición mineralógica del mineral reviste una importancia capital desde el punto de vista de la selección de la tecnología. En atención a consideraciones de orden práctico, cabe por tanto clasificar las bauxitas en los cinco tipos siguientes:

i) tipo trihidrato: el mineral principal es la gibbsita; el contenido de monohidrato es inferior al 5% del contenido en alúmina del mineral;

ii) tipo trihidrato con contenido de cuarzo: lo mismo que en el caso anterior, pero con una parte importante del contenido de sílice en forma no reactiva;

iii) tipo trihidrato mixto: la gibbsita es el mineral principal, pero el contenido de monohidrato es superior al 5%;

iv) tipo boehmitico monohidrato: contiene principalmente monohidrato con menos de un 5% de diásporo;

v) tipo monohidrato mixto: bauxita boehmitica con un contenido de diásporo superior al 5%.

En cuanto a la distribución cuantitativa, los tipos trihidrato son los que más abundan; las bauxitas lateríticas, que básicamente pertenecen a ese grupo, representan aproximadamente el 85% de las reservas mundiales [13]. Las bauxitas cársticas son generalmente del tipo monohidrato, aunque también pueden presentar un elevado contenido de gibbsita. Las bauxitas del tipo trihidrato son las más baratas de transformar porque requieren temperaturas y presiones más bajas. De los monohidratos, el diásporo es el de tratamiento más difícil [11].

Aparte de los tipos de bauxita [11], hay que tener en cuenta otros factores importantes al evaluar el valor práctico de un yacimiento determinado. El contenido en alúmina del mineral determina básicamente la cantidad de bauxita que hay que transformar para obtener una cantidad dada de alúmina. La impureza más nociva es la sílice reactiva, que causa pérdidas de alúmina. La sílice no reactiva no reviste ninguna importancia especial. Otras impurezas importantes, como los óxidos de hierro y de titanio, son prácticamente insolubles durante el ataque de la bauxita. Sin embargo, es necesario utilizar equipo

auxiliar para separarlas mecánicamente del licor de aluminato. Las impurezas altamente solubles de la bauxita, como las sustancias orgánicas, los carbonatos, los cloruros y los sulfatos, también influyen en las condiciones de transformación.

Al evaluar los yacimientos de bauxita es preciso tener en cuenta, además del tipo y la calidad del mineral, los costos de extracción, incluidas las necesidades de infraestructura [11]. Hay que subrayar la necesidad de incluir la evaluación tecnológica en el proceso de análisis de la calidad de la bauxita en el laboratorio.

En el Anexo 8 se muestran los recursos mundiales de bauxita en función de su estado de explotación [15], mientras que en el Anexo 9 se ofrece el correspondiente sistema de clasificación de los recursos de bauxita [19]. Se observará que aproximadamente el 70% de las reservas se hallan concentradas en cuatro países: Guinea, Australia, Brasil y Jamaica.

## 1.2 Extracción de la bauxita

El carácter de las operaciones de extracción depende de que el mineral se halle en la superficie o exija operaciones subterráneas.

Explotación a cielo abierto: su aplicación depende de la potencia y las propiedades físicas de los terrenos de recubrimiento y del grado de mecanización disponibles. Por regla general cabe afirmar que la explotación a cielo abierto es un método adecuado si el recubrimiento tiene propiedades físicas favorables (por ejemplo, seco y arenoso) y si la razón de desmonte es inferior a cinco.

La mayor parte de la bauxita producida en el mundo se extrae por métodos de explotación a cielo abierto. En el Anexo 10 se muestran las principales etapas de las operaciones.

La extracción exige desmontar el recubrimiento mediante explanadoras, dragalinas y grandes excavadoras de rueda y utilizar explosivos para los terrenos más duros. La bauxita se extrae por métodos similares, y posteriormente se reintegra el terreno de recubrimiento para restaurar la superficie de la mina y utilizarla como tierra forestal o agrícola [11].

El beneficio del mineral, cuando es necesario, suele consistir en procedimientos húmedos para reducir el contenido de sílice y arcilla [20].

La mayor parte de las bauxitas requieren una trituración previa para facilitar su transformación. La etapa siguiente es el secado, que se puede efectuar a pie de obra o en la planta de refinación. Si la bauxita se tiene que enviar muy lejos, normalmente se seca en la mina a fin de reducir los costos de transporte. El secado se realiza en hornos rotativos a temperaturas moderadas para eliminar la humedad libre [11].

En el caso de operaciones en gran escala plenamente mecanizadas se necesitan 0,4-0,7 horas-hombre por tonelada de bauxita extraída. En el número de noviembre de 1983 de Engineering and Mining Journal [21] se pueden encontrar indicaciones relativas a los procedimientos y equipos modernos que se utilizan actualmente en Australia, por ejemplo.

Los gastos de inversión varían entre límites muy amplios. Los factores principales son la escala de la operación, la razón de desmonte, el eventual tratamiento del mineral en la mina (secado, beneficio, clasificación, etc.), las características del emplazamiento y la infraestructura requerida. En [11] se expone una metodología para estimar los gastos de capital de las minas de bauxita en función de esos factores. Según esa metodología, la apertura, por ejemplo, de una mina de cuatro millones de t/a en el Brasil costaría

aproximadamente 70 dólares EE.UU. por t/a (expresado en dólares de 1980). Una mina de la misma capacidad en Guinea costaría solamente 51 dólares EE.UU. por t/a, debido a la diferencia en la razón de desmonte.

En cuanto a los gastos de explotación, cabe ofrecer, a título de ejemplo, las cifras que se muestran en el Cuadro 2, extraídas de la amplia documentación reunida en [11].

Cuadro 2  
GASTOS DE EXPLOTACION Y CARGAS DE CAPITAL DE LA  
PRODUCCION DE BAUXITA  
Año 2000. Dólares EE.UU. por t/a de bauxita seca

	Australia	Brasil	Guinea	Jamaica
Gastos de explotación	10,20	12,60	10,30	11,00
Cargas de capital	4,20	5,80	4,20	4,20
Total	14,40	18,40	14,50	15,20

El "Total" indicado en el Cuadro 2 da sólo una idea de las diferencias de gastos relacionadas principalmente con las características geológicas de los yacimientos. Para establecer comparaciones en punto a la conveniencia de utilizar una bauxita determinada es preciso tener también en cuenta la información sobre la calidad del mineral, los costos de transporte dentro del país, los impuestos y posiblemente el transporte marítimo.

Explotación subterránea: en algunos países, por ejemplo Francia, Grecia y Hungría, la bauxita se extrae también en minas subterráneas. Si se utiliza una mecanización en gran escala, se ignoran a efectos de la

extracción los filones de mineral de menos de 2 m de potencia. Las necesidades de mano de obra pueden ascender a 1,5-4 horas-hombre/tonelada, según el nivel de mecanización de las operaciones. Las necesidades en materia de inversión son generalmente bastante mayores que en la extracción a cielo abierto. Las condiciones geológicas, en particular la presencia de agua, carbón y gas, pueden acarrear otros gastos y complicaciones.

Una estimación muy grosera de los posibles gastos de inversión reales lleva a la cifra de 80-150 dolares EE.UU. por t/a, excluida la inversión relacionada eventualmente con el bombeo de agua.

## 2. PRODUCCION DE ALUMINA

### 2.1 Generalidades

En 1980 se produjeron en el mundo aproximadamente 35 millones de toneladas de alúmina, y alrededor de 34,5 millones de toneladas en 1984. La producción de alúmina de calidad no metalúrgica se puede estimar en unos 2,5 millones de toneladas en 1984, mientras que la cifra correspondiente a alúminas de calidad metalúrgica fue de 32 millones de toneladas.

Como ya se mencionó en la Sección C, las capacidades de producción de alúmina de calidad metalúrgica eran de unos 40 millones de toneladas en 1984 [9], incluidas las plantas de producción de alúmina a partir de materiales no bauxíticos. Aunque de entonces a esta parte se han cerrado algunas instalaciones, la capacidad de producción sigue siendo abundante.

Aproximadamente el 95% de toda la alúmina se produce a partir de bauxita. Es posible que la situación no cambie significativamente hasta el año 2000 [22].

## 2.2 El procedimiento Bayer

La producción de alúmina a partir de la bauxita se efectúa casi exclusivamente por el procedimiento Bayer [23]. El procedimiento consiste en esencia en el ataque de bauxitas de elevada calidad con una solución de sosa cáustica, la separación de la solución resultante de aluminato de sodio del residuo de lodos rojos, la descomposición del licor de aluminato, la precipitación y separación de los cristales de hidrato resultantes y la calcinación de los mismos. Con el retorno del licor de aluminato precipitado (el licor débil) al ataque de la bauxita se cierra el ciclo del procedimiento.

En el Anexo 11 se adjunta un esquema que especifica las principales operaciones de este procedimiento.

Según el tipo de bauxita que se vaya a transformar, existen dos principales variantes de este procedimiento:

- el procedimiento Bayer americano
- el procedimiento Bayer europeo.

El ataque de la bauxita con trihidrato es sumamente fácil y la temperatura máxima aplicada es de 140 a 145 °C. La transformación de estas bauxitas es característica de las plantas de alúmina de América y Australia. Además, esas bauxitas se pueden atacar con concentraciones cáusticas de aproximadamente 120-140 g de  $\text{Na}_2\text{O}_c$  litro. La precipitación se efectúa a una concentración de 90 a 100 g/l  $\text{Na}_2\text{O}_c$ . El hidrato de alúmina se clasifica. Los granos bastos se transforman en alúmina arenosa por calcinación, con un contenido de alúmina gamma relativamente elevado [24].

El procedimiento Bayer americano se denomina "modificado" si la bauxita que se debe transformar es del tipo trihidrato mixto (gibbsita con cantidades menores de boehmita). En esos casos se eleva la temperatura de ataque hasta 240 °C, con un aumento pequeño (hasta

aproximadamente 150 g/l  $\text{Na}_2\text{O}_c$ ) en la concentración cáustica [11] [24]. Las condiciones de precipitación y calcinación no se modifican, por lo que el producto final es alúmina arenosa.

El ataque de bauxitas con monohidrato requiere temperaturas más elevadas (220-260 °C). Las plantas europeas utilizan frecuentemente ese tipo de bauxitas. Además se necesitan presiones elevadas y se utiliza una solución cáustica más concentrada (180-220 g/l  $\text{Na}_2\text{O}_c$ ). La concentración de precipitación es de 130-160 g/l de  $\text{Na}_2\text{O}_c$ , no hay clasificación, el cebado se efectúa con grandes cantidades de cebo y el producto es por tanto mucho más fino. Este hidrato se calcina a una temperatura más elevada. La alúmina obtenida consiste en gran medida en partículas alfa (alúmina farinácea).

En el Anexo 12 se indican las características de la alúmina arenosa y farinácea.

Sin embargo, las tecnologías de los procedimientos Bayer americano y europeo han convergido últimamente. Los usuarios de la tecnología Bayer europea han reducido las concentraciones de ataque y, hasta cierto punto, las de precipitación con el fin de producir alúmina arenosa. Por otro lado, las plantas que utilizan el procedimiento Bayer americano han elevado hasta cierto punto la concentración de precipitación para ahorrar así energía en el ataque, cuidando evidentemente de que se conservara el tamaño grueso de los granos de hidrato. En el Capítulo E se examinan otros detalles de esa tendencia.

Las temperaturas de ataque de las bauxitas diaspóricas oscilan entre 240 y 260 °C, aunque también serían beneficiosas temperaturas superiores. Sin embargo, a temperaturas muy superiores a 260 °C no son prácticos los autoclaves de ataque debido a que las mayores presiones que conllevan esas temperaturas exigen paredes de espesor también mayor; en esos casos puede ser más

económico y conveniente utilizar tubos de ataque que permiten alcanzar temperaturas de hasta 300 °C (véase Capítulo E). En el ataque de la bauxita diaspórica es preciso utilizar cal.

En la parte D 1.1 del presente informe se han expuesto ya algunas ideas relativas a la influencia de la composición de la bauxita, en particular de las impurezas, en las condiciones de la refinación. Hay que añadir otras dos observaciones:

i) El lodo rojo derivado de bauxitas que contienen goethita muestra generalmente escasa capacidad de decantación y espesamiento. Sin embargo, los problemas derivados de la presencia de goethita se pueden resolver agregando ciertos aditivos durante el ataque [25].

ii) La acumulación de algunas impurezas solubles de las bauxitas es poco deseable porque reduce la eficacia de la tecnología (véase Capítulo E).

La calidad de los materiales y la energía consumida en la producción de alúmina dependen primordialmente de la calidad de la bauxita utilizada, la capacidad de la planta, el tipo de alúmina producido, el nivel de tecnología aplicado y finalmente el equipo utilizado. En el Cuadro 2 se muestra, a título orientativo, el consumo específico [23].

Cuadro 3

CONSUMO ESPECIFICO DE LAS PLANTAS DE ALUMINA

bauxita (peso seco)	2,0-2,5 t/t de alúmina
sosa cáustica	0,07-0,17 t/t de alúmina
fueloil (para producción de vapor y calcinación)	0,28-0,38 t/t de alúmina
energía eléctrica	300-350 kWh/t de alúmina

Hay que señalar que se necesitan también de 7 a 9 toneladas de agua por toneladas de alúmina producida y que

en determinados casos hay que estudiar la utilización de cal y floculantes.

En ciertos casos será posible producir electricidad por cogeneración. La energía eléctrica así obtenida podría cubrir las necesidades de la planta (véase también 2.3.2).

## 2.3 Plantas de alúmina

### 2.3.1 Capacidad de producción y economías de escala

Durante el decenio de 1950 se construyeron modernas plantas de alúmina con cadenas de producción de 120.000 a 150.000 t/a. Las cadenas de producción de las plantas de alúmina construidas recientemente oscilan entre 300.000 y 500.000 t/a. Las capacidades de producción de las plantas llegan hasta un millón de t/a e incluso más. Por ejemplo, la planta de São Luis del Consorcio Alumar en el Brasil tendrá una capacidad inicial de 500.000 t/a que se ampliará después a un millón de t/a. La mayoría de las plantas australianas tienen capacidades de un millón de t/a o incluso más. La planta de Kwinana de Alcoa tiene una capacidad de 1,4 millones de t/a y la de Pinjarra, también de Alcoa, 2,5 millones de t/a; la planta recién construida por Queensland Alumina en Gladstone tiene una capacidad de 2,44 millones de t/a, con el objetivo de ampliarla a 2,74 millones de t/a, etc. [9].

En el Anexo 13 (reproducido de [11]) se muestra la influencia de diversos factores en los gastos de capital de las plantas de refinación de alúmina. El aumento de la capacidad de las cadenas de producción redundante no sólo en una disminución de los gastos de inversión específicos sino también de los gastos de explotación (por ejemplo, consumo específico de calor y energía eléctrica, así como necesidades de mano de obra) [23]. El factor de ubicación a que se alude en el Anexo 13 oscila entre 1,00 en los

países en desarrollo y 1,25 en los países desarrollados. La variación se debe en parte a diferencias en la infraestructura general existente.

### 2.3.2 Espacio e infraestructura

La producción de alúmina exige un espacio relativamente amplio; por ejemplo, una capacidad de 600.000 t/a requiere una extensión de 80-100 hectáreas (terreno cercado solamente), más el espacio destinado a los estanques de lodos rojos, que podría ser incluso de dos a cuatro veces mayor según las circunstancias [23].

Los principales servicios e infraestructura que requiere una planta de producción de alúmina son los siguientes:

- a) puerto
- b) suministro de energía
- c) suministro de agua
- d) estanque de lodos rojos
- e) terreno para viviendas
- f) ferrocarril, carretera.

Ad a) Para producir 1 tonelada de alúmina es necesario mover 3,5-4 toneladas de materiales. Ese es uno de los motivos de que las plantas de alúmina se ubiquen frecuentemente lo más cerca posible de un puerto de mar. Los costos de las instalaciones portuarias varían con las condiciones locales. Para una planta de 600.000 t/a, los costos de construcción del puerto se estimaron en 10-20 millones de dólares EE.UU. en 1978 [23].

Ad b) Para el suministro de energía térmica y eléctrica de las plantas de alúmina existen varias posibilidades, según la tecnología aplicada y las condiciones que reúna el emplazamiento de la planta:

- i) En el lugar de emplazamiento existe una red de energía eléctrica fiable:

En ese caso, la elección -basada en consideraciones económicas- se debe hacer entre dos posibilidades:

- Compra de la energía eléctrica y producción de vapor en la propia planta: las necesidades de energía eléctrica de la planta se cubren en su totalidad con energía de la red. Se instalan las calderas de modo que el suministro de vapor se efectúe a la presión correspondiente a la tecnología de ataque. El vapor a baja presión se produce por reducción de la presión;
- Cogeneración: dentro del recinto de la planta se instala una planta de producción de energía por turbina de contrapresión. Esta variante permite aprovechar el contenido térmico del vapor generado en la caldera, en parte para su conversión en potencia motriz en la turbina y en parte para calor de los procesos de baja temperatura. La ventaja de la generación de energía por contrapresión depende por entero de las necesidades de calor de baja temperatura de la planta.

En el caso de que se utilice una tecnología de ataque a baja temperatura, la mayor parte de las necesidades totales de energía eléctrica se puede cubrir por cogeneración. Para ello hay que seleccionar una presión adecuada de caldera e instalar una turbina de extracción/contrapresión. La red se utiliza entonces para compensar posibles fluctuaciones de carga y en casos de emergencia.

ii) En el lugar de emplazamiento no existe una red de energía eléctrica fiable.

En ese caso es preciso construir una planta de energía independiente, con las opciones tecnológicas apuntadas anteriormente. Como es obvio, a fin de cubrir aquella parte de la demanda de electricidad de la planta

de alúmina que no se puede suministrar por cogeneración y asegurar la necesaria capacidad de reserva es preciso prever instalaciones adecuadas de generación de energía por condensación.

En cuanto a los gastos de inversión de una planta de energía hay que mencionar que en gran medida varían en función de la solución técnica elegida. Para una central de cogeneración al servicio de una planta de 300.000 t/a con ataque a elevada presión y temperatura, los gastos representaban a principios del decenio de 1970 el 17% de los gastos totales de inversión.

Ad c) El consumo específico de agua tecnológica de una planta de alúmina es generalmente de 7-9 m<sup>3</sup> por tonelada de alúmina, más el agua potable para la planta y las viviendas.

Ad d) Desde el punto de vista de la protección del medio ambiente, el estanque de lodos rojos es uno de los elementos críticos de una planta de producción de alúmina. La cantidad de lodos rojos producidos es igual a la de alúmina o incluso mayor. En algunas plantas de alúmina se vierten los lodos rojos al mar, pero es una práctica que actualmente está cada vez más prohibida. Si se utilizan estanques hay que tener cuidado de que no haya filtraciones que permitan el paso de los ingredientes del lodo rojo al suelo. Por otro lado, los estanques no deben estar demasiado lejos de la planta, por su repercusión en los costos de bombeo del lodo. Por consiguiente, la posibilidad de disponer de un sistema barato de eliminación del lodo rojo podría influir también en la selección del emplazamiento.

Ad e) A fin de garantizar un funcionamiento ininterrumpido es necesario contar con terrenos para viviendas, aun en el caso de que existan poblaciones de cierto tamaño en las proximidades de la planta [23]. Con frecuencia es preciso crear asentamientos totalmente

nuevos que además de viviendas comprendan comercios, escuelas, centros educativos y de recreo, servicios sanitarios y otros servicios.

Ad f) En el caso de que la planta de alúmina no se halle ubicada al borde del mar, puede que sea necesario contar con un enlace adecuado por ferrocarril. En cualquier caso, la planta de alúmina debe estar conectada con la red interior de carreteras.

### 2.3.3 Ubicación

Originalmente las plantas de alúmina formaban parte de un complejo integrado que comprendía desde la extracción de bauxita hasta la fundición de aluminio. Sin embargo, las minas integradas no eran capaces de satisfacer la creciente demanda de metal, por lo cual había que importar la bauxita (principalmente de los países en desarrollo) y/o producir la alúmina en el mismo lugar donde se hallaba situada la mina, para luego enviarla a las plantas de fundición. La tendencia más reciente vuelve a ser la de construir complejos que abarquen desde la extracción hasta la fundición (por ejemplo en el Brasil, Venezuela y Australia).

Al margen de esos aspectos importantes, los factores de ubicación más destacados son los siguientes [23]:

- Proximidad de puertos de mar, vías navegables, ferrocarriles y carreteras. (La cantidad de materiales que hay que transportar, sin contar los lodos rojos, es de 3,5 a 4 veces superior a la producción de la planta.)
- Solución satisfactoria (independiente de las estaciones del año) del abastecimiento de agua tecnológica y potable.

- Posibilidad de una eliminación barata de los lodos rojos y otros materiales residuales.
- Condiciones meteorológicas y del suelo.
- Posibilidad de construir la infraestructura requerida.
- Ubicación del mercado para la alúmina producida. (Esta cuestión se examina con detalle en el Capítulo F.)

## 2.4 Explotación de las plantas de alúmina

### 2.4.1 Costos de producción

Sobre la base de las cifras de consumo mencionadas en el Cuadro 3, los costos de producción de 1 tonelada de alúmina se estimaron en 147 dólares EE.UU. para 1978 [23]. En esa cifra se hallaban incluidos 57,6 dólares en concepto de costo de la bauxita por tonelada de alúmina (o bien 24 dólares/t de bauxita), con la observación de que en el caso de que la planta de alúmina contara con su propia mina de bauxita a cielo abierto y sólo se contabilizaran los costos netos de extracción de la bauxita, cabría reducir considerablemente los costos de producción. Para la sosa caústica se calculó 150 dólares EE.UU./t y para el fueloil, 65 dólares/t.

Los costos de producción de la alúmina son actualmente bastante más elevados debido a que los precios del fueloil también lo son. En el Anexo 14 se muestran los costos de producción de 10 plantas de alúmina más antiguas y 6 más modernas, con inclusión de los gastos variables y los gastos de capital, para el decenio de 1980 [26]. El análisis de esos datos revela que los gastos variables alcanzan su nivel más bajo en Australia (124-126 dólares de los EE.UU./t) y que en algunas plantas superan los 200 dólares/t.

Bird [8] cita un estudio de James F. King sobre los costos de producción y los precios contractuales de la alúmina. Según Bird, King clasifica todas las plantas de fundición en cinco bandas de costos, como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4  
BANDAS DE COSTOS DE LAS PLANTAS DE FUNDICION PARA  
COMPRAS DE ALUMINA

muy bajos	menos de 175 dólares de los EE.UU. por t suministrada
bajos	de 175 a 199 dólares de los EE.UU. por t suministrada
medianos	de 200 a 224 dólares de los EE.UU. por t suministrada
altos	de 225 a 249 dólares de los EE.UU. por t suministrada
muy altos	más de 250 dólares de los EE.UU. por t suministrada

A mediados de 1984 -agrega Bird- el costo cif medio ponderado de la alúmina para las empresas de aluminio era de 204 dólares EE.UU. por tonelada. Al mismo tiempo, los precios de la alúmina en el mercado al contado eran mucho más bajos, de 150 dólares, o incluso menos en 1985.

En un documento más reciente [27] se afirma claramente que no existe un nivel de costos característico en la producción de alúmina. Los componentes de costos al contado para la producción de alúmina difieren según las plantas y pueden variar entre 60 dólares EE.UU. (como mínimo) y 313 (como máximo) por tonelada de alúmina. Estas cifras dan un promedio simple de 186,50 dólares por tonelada de alúmina, que casualmente se aproxima mucho al promedio ponderado de 204 dólares que se mencionó antes.

A eso hay que agregar los gastos de capital, que varían entre 70 y 190 dólares por tonelada de alúmina.

En la referencia [11] se explican las estimaciones de los costos de producción de la alúmina para el año 2000. Según esa fuente, los costos totales de producción (incluidos los gastos de capital), expresados en dólares de 1980 sobre base fob, oscilarán entre 292 dólares EE.UU./t y 378 dólares EE.UU./t en emplazamientos seleccionados, según el tipo de bauxita transformada y la ubicación elegida. La cifra inferior corresponde a la transformación local de bauxita brasileña y la superior a la transformación de mineral diaspórico griego. A eso hay que agregar los gastos de transporte de la alúmina, siempre y cuando no se transforme localmente en aluminio. Los gastos de transporte varían entre 6 dólares EE.UU./t de alúmina (entre Jamaica y la costa oriental de los Estados Unidos) y 43 dólares EE.UU./t de alúmina (para el envío de la alúmina australiana a la Europa occidental).

Los gastos de la transformación local de las bauxitas australianas y brasileñas son muy parecidos; pero cuando hay que enviarlas a la costa oriental de los Estados Unidos, la brasileña resulta mucho más barata (309 dólares EE.UU./t frente a 335 dólares EE.UU./t).

#### 2.4.2 Mantenimiento y piezas de repuesto

En la mayor parte de los casos, el trabajo de mantenimiento corre a cargo del personal de la planta, aunque en los países desarrollados siempre existe la posibilidad de contratar los servicios de una empresa para que se ocupe de ese cometido o al menos de una parte de él. En los países en desarrollo, por el contrario, la planta tiene que encargarse de todo el mantenimiento en la mayoría de los casos. Con ese fin es preciso instalar

talleres adecuados en la planta y estudiar también la posibilidad de contratar personal de mantenimiento.

Según un modelo sobre el precio/costo del aluminio estadounidense para el año 1984 [28], los gastos de mantenimiento más los costos de las materias primas ascienden aproximadamente al 8-9% del costo de la alúmina producida en la planta. La cifra real de 19,1 dólares EE.UU. se desglosa a partes iguales entre mantenimiento, costo de las materias primas y otros gastos.

Respecto a las plantas ubicadas en los países en desarrollo, parece indicado disponer de una reserva de piezas de repuesto que represente aproximadamente el 3% del valor total del equipo instalado.

#### 2.5 Transformación de bauxitas de baja calidad y materiales no bauxíticos

Existen varios métodos para transformar las bauxitas de baja calidad y los materiales no bauxíticos [29]. Entre los procedimientos posibles hay que mencionar, por su aplicación industrial, la tecnología del sinterizado, los procedimientos combinados y la transformación de nefelina y alunita. En el Anexo 15 se hace una descripción sucinta de esos procedimientos. En el Capítulo E se examinan más a fondo algunos aspectos de los procedimientos de cloruro.

#### 2.6 Alúmina de calidad no metalúrgica

La expresión "alúmina de calidad no metalúrgica" o "alúmina especial" abarca diversos productos de alúmina cuyas características especiales (pureza, forma del grano, tamaño del grano, etc.) permiten utilizarlos en distintos ámbitos de aplicación. Su precio es más elevado que el de la alúmina de calidad metalúrgica, con un factor de

incremento que oscila entre 2 y 100. La demanda disminuye al aumentar el valor del producto.

Las capacidades de producción de alúminas especiales se pueden estimar en unos tres millones de t/a en todo el mundo; la inmensa mayoría de esas instalaciones producen alúminas especiales cuyo precio no es más de dos o tres veces superior al de la alúmina metalúrgica. Se utilizan, por ejemplo, como abrasivos, cerámicas y refractarios. La mayor parte de ellos se pueden producir por el procedimiento Bayer, con algunas modificaciones [30]:

- eliminación de impurezas, en primer lugar el sodio. Modificando la precipitación Bayer (con precipitación en caliente) se puede reducir el contenido en  $\text{Na}_2\text{O}$  de la alúmina hasta el 0,2%; caso de necesitarse cifras aún menores, conviene efectuar un lavado parcial después de la semicalcinación;
- ajuste del contenido alfa-gamma y la superficie específica de los granos por calcinación;
- clasificación o micronización para obtener tamaños de partículas seleccionados.

Los problemas relativos a la aplicación y producción de alúminas de elevado valor caen fuera del ámbito del presente estudio.

## 2.7 Subproductos de la producción de alúmina

Los dos subproductos principales de la producción de alúmina son el vanadio y el galio. Su separación es posible del modo siguiente [24], [30]:

Una proporción elevada del contenido en  $\text{V}_2\text{O}_5$  de las bauxitas se disuelve durante el ataque y se acumula en el circuito líquido del proceso. Las sales ricas en  $\text{V}_2\text{O}_5$  se

separan por cristalización del licor débil, antes o después de su evaporación.

En el caso de utilizar la tecnología de cal en el ataque, la separación del contenido de vanadio sólo es posible en cantidades reducidas. Sin embargo, existe la posibilidad de separar el vanadio después de concentrar el licor débil hasta aproximadamente 200 g/l, aunque conviene separar primero una sal de sosa con bajo contenido de  $V_2O_5$ , enfriar el licor libre de sosa para ajustar su contenido de P, V y F hasta la proporción adecuada y separar de ese licor cristales de alto contenido en V.

Las sales de V separadas se transforman generalmente en productos de pureza variable que contienen  $V_2O_5$  o bien en ferrovanadio... La mayoría de los procedimientos de producción de  $V_2O_5$  se caracterizan por las etapas de transformación siguientes:

- beneficio (generalmente una cristalización fraccionada);
- disolución del cristal y obtención de una solución de vanadato;
- purificación de la solución de vanadato por diversas vías [24].

Los polivanadatos se pueden transformar en  $V_2O_5$  lamelar mediante un procedimiento polietápico.

La producción de alúmina es prácticamente la única fuente de producción de galio. La rentabilidad de la producción de Ga depende de la cantidad de Ga que pasa de la bauxita a la solución, es decir, del nivel de Ga de la solución, de la pureza del licor y de la tecnología utilizada en la separación. La extracción se realiza a partir del licor débil concentrado (licor fuerte). Su purificación es necesaria para obtener buenos rendimientos en la separación del metal.

Para la separación del Ga se utilizan las tecnologías de cementación con mercurio y aluminio. Se

prefiere esta última por motivos de protección del medio ambiente. El procedimiento del mercurio funciona realmente con pérdidas inferiores a 1 kg Hg/1 kg Ga, aunque podría volver a ser competitivo.

## 2.8 Residuos (lodos rojos)

El único residuo importante de la producción de alúmina son los lodos rojos. Su composición química y mineralógica viene determinada básicamente por la calidad de la bauxita y la tecnología del procedimiento. Los componentes principales oscilan generalmente en los intervalos que se indican en el Cuadro 5 [31]:

Cuadro 5  
LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS LODOS ROJOS

	Peso † (en seco)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de 30 a 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	de 5 a 20
SiO <sub>2</sub>	de 1 a 20
Na <sub>2</sub> O	de 1 a 10
CaO	de 2 a 8

Los principales componentes de la fase líquida que acompaña al residuo son sosa cáustica y ceniza de sosa (de 0,5 a 8 g/l de concentración total de Na<sub>2</sub>O) y aproximadamente de 0,5 a 8 g/l de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

En el apartado 2.3.2 d) se subrayó ya la importancia de eliminar los lodos rojos sin infligir daños al medio ambiente. Para más detalles véase [31].

Los lodos rojos siguen siendo un residuo y su utilización no está aún resuelta. Existen algunas posibilidades prometedoras [31], pero ninguna de ellas se aplica a escala industrial. La recuperación del contenido en sodio y alúmina de los lodos rojos no resuelve más que

una parte del problema. La recuperación del contenido en hierro es viable, pero ha perdido importancia por motivos económicos. Se pueden utilizar los lodos rojos como aditivo en la producción de hierro y para la sustitución del sinterizado de pirita en la fabricación de cemento; sin embargo, las cantidades utilizadas no son importantes. Su aplicación a la mejora del suelo, la construcción de carreteras, etc., también es de importancia secundaria. Su transformación en cerámica pesada podría ser un método prometedor por exigir grandes cantidades de lodos rojos y satisfacer al mismo tiempo las exigencias crecientes de la industria de la construcción.

### 3. FUNDICION DEL ALUMINIO

#### 3.1 Generalidades

La producción mundial de aluminio primario fue de aproximadamente 16 millones de toneladas en 1984. Además se produjeron más de cinco millones de toneladas de aluminio secundario.

Las capacidades de producción de aluminio primario eran de 18,5 millones de toneladas en 1984; por consiguiente, quedaron sin utilizar aproximadamente 2,5 millones de toneladas de capacidad.

#### 3.2 El procedimiento Hall-Hèroult

El único procedimiento que se utiliza actualmente a escala industrial para la producción de aluminio primario es el procedimiento Hall-Hèroult, que data de hace 100 años. El procedimiento consiste esencialmente en la electrólisis de  $Al_2O_3$  (alúmina) en un baño de  $Na_3AlF_6$  en fusión a  $960^{\circ}C$ , en pilas de 50-230 kA con ánodo de carbono consumible y cátodo líquido de aluminio.

La unidad básica de una planta de fundición de aluminio es la cuba electrolítica. En cuanto a la estructura del ánodo se han fabricado pilas de dos tipos fundamentales: las de ánodos continuos (Söderberg) y las de ánodos precocidos. Existen ánodos continuos con cuñas horizontales y verticales.

El recinto principal en las cubas de ánodo Söderberg con cuñas horizontales es cerrado y dispone de un sistema eficiente de evacuación local de los gases, pero son difíciles de utilizar con amperajes superiores a 100 kA. Hoy día ya no se fabrica ese modelo antiguo, aunque aproximadamente una sexta parte de las instalaciones de producción de aluminio del mundo utilizaban aún ese tipo de ánodos en 1978 [23]. Su participación está decreciendo.

Las cubas de ánodo Söderberg con cuñas verticales no se pueden cerrar completamente, por lo cual la eficiencia en la evacuación local de los gases es únicamente del 60 al 80% [23]. En 1978, aproximadamente un tercio de las instalaciones de producción estaban equipadas con cubas de ese tipo; su proporción también está disminuyendo, pese a la notable evolución que experimentó ese tipo de cubas en el decenio de 1970 (amperajes de hasta 160 kA y una productividad notablemente elevada).

Una de las ventajas de los ánodos Söderberg es que no necesitan talleres especiales para cocer los ánodos, con lo cual los gastos específicos de inversión son menores para capacidades menores.

Sin embargo, para cumplir las normas y disposiciones dictadas recientemente en materia de protección del medio ambiente y del lugar de trabajo con este tipo de cubas ha sido necesario recurrir a una ventilación intensiva de la sala de hornos y a sistemas de lavado de la totalidad de los gases en su interior.

En la mitad, como mínimo, de las instalaciones de producción de aluminio del mundo se utilizan actualmente cubas con ánodos precocidos. Estas cubas se fabrican en dos variantes: de abertura lateral y de abertura central. Las de abertura lateral tenían originalmente un recinto de operaciones completamente abierto; mas tarde se cubrieron con una tapadera, pero era necesario levantarla para cargar la alúmina. Esta operación daba lugar a una intensa contaminación de la sala con los gases de la pila, lo que exigió reforzar el sistema de lavado.

Las cubas de abertura central están consideradas como las más modernas. Funcionan con un recinto de operaciones relativamente bien cerrado, que se abre sólo en parte y muy pocas veces. La operación de carga de la alúmina se efectúa automáticamente en posición cerrada. La captación local de los humos de la pila es efectiva y no exige utilizar sistemas de lavado de los gases desde el techo [23].

Los ánodos se fabrican con coque de petróleo y brea. La fabricación de la pasta para ánodos Söderberg y para ánodos precocidos es similar en ambos casos, pero en el segundo hay que añadir el prensado y la cocción. En el Anexo 16 se muestra un diagrama de las etapas de producción de ambos.

La contaminación ambiental es un problema grave en las plantas de fundición de aluminio. La contaminación proviene de los compuestos de flúor. En el caso de los ánodos Söderberg también existen compuestos de la destilación de la brea entre los principales componentes contaminantes de los humos de la pila y de los gases del techo.

La cantidad de emisión de flúor es de 15-18 kg/t de metal producido, es decir, una planta de fundición con una capacidad de 100.000 t/a emitiría aproximadamente 1.500 t/a de flúor si no se aplicara sistema alguno de lavado de

gases. El nivel máximo permitido para la emisión de flúor del medio ambiente es actualmente de 0,5-2 kg por t de aluminio en la mayoría de los países. Por consiguiente, la construcción de la pila y la tecnología aplicada deben garantizar una captación adecuada de los humos y el lavado de los gases recolectados antes de su expulsión.

El tipo de pila de abertura central y ánodos precocidos parece ser el más apropiado para una captación satisfactoria de los gases. El lavado de los gases se efectuaba antes en torres de lavado en húmedo; pero es un sistema costoso, y la recuperación del flúor también es cara. Recientemente ha empezado a imponerse el lavado de gases en seco, basado en la adsorción del flúor por alúmina de gran superficie activa (alúmina arenosa). La alúmina arenosa, después de estar en contacto con el gas en la torre de lavado y haber adsorbido el compuesto de flúor, se vuelve a cargar en las cubas a través de alimentadores, reintegrando así el flúor adsorbido al proceso.

En el Cuadro 6 se indican los parámetros de una planta de fundición de aluminio (expresados como cantidades necesarias de materias primas y energía por t de metal) para 1978 [23]:

Cuadro 6  
PARAMETROS DE UNA PLANTA DE FUNDICION  
DE ALUMINIO (1978)

alúmina	1,93-1,96 t/t de metal
coque de petróleo	0,44-0,47 t/t de metal
brea	0,11-1,12 t/t de metal
fluoruros	0,025-0,03 t/t de metal
energía eléctrica	15.000-16.000 kWh/t de metal

No obstante, las plantas de fundición más recientes, con ánodos precocidos, presentan características más favorables (véase Cuadro 7) [8]:

Cuadro 7

PARAMETROS DE LAS PLANTAS DE FUNDICION DE ANODOS  
PRECOCIDOS DE RECIENTE CONSTRUCCION

alúmina	1,925 t/t de metal
coque de petróleo	0,34 t/t de metal
brea	0,09 t/t de metal
fluoruros	sin datos
energía eléctrica	13.693 kWh/t de metal

En el Anexo 17 se dan cifras extrapoladas relativas a la posible evolución del consumo específico de energía de las plantas de fundición [11].

3.3 Plantas de fundición de aluminio

3.3.1 Capacidad de producción y economías de escala

En la actualidad se utilizan cubas de 160 a 230 kA. Una cuba de ese amperaje produce de 300 a 550 t/a de aluminio. Las cubas se instalan en serie; el número de cubas de cada serie puede variar entre 120 y 240. Por consiguiente, una línea produce por término medio de 50.000 a 130.000 t/a de aluminio. En términos generales cabe decir que hoy día es preciso instalar como mínimo dos líneas de cubas para lograr capacidades de producción rentables [23]. Eso significa que 100.000 t/a es la capacidad mínima para que la planta sea rentable.

Las líneas más reducidas requieren una inversión algo mayor en equipo eléctrico para lograr la misma capacidad; pero las condiciones de trabajo son más seguras cuando el voltaje total de la línea de cubas es más bajo.

Por otro lado, más de dos líneas de cubas con una capacidad de 130.000 t/a cada una podrían causar, aun con sistemas de captación y lavado de gases, problemas de contaminación ambiental como consecuencia de su elevada capacidad de fundición, superior a un total de 260-300.000 t/a [23, págs. 31 y 32]. No obstante, la elección del nivel de producción de la planta depende en último término de las condiciones locales específicas, las consideraciones de orden financiero, la disponibilidad de energía barata y el mercado disponible.

Con todo, en el caso de que se utilicen ánodos precocidos no están justificadas las capacidades inferiores a unas 100.000 t/a. Este tipo de ánodos hay que fabricarlos en la propia planta de fundición, porque de otro modo cuestan más, su transporte es difícil y no se puede resolver el problema de aprovechar los residuos, que representan del 20 al 30% en peso. La capacidad mínima para una planta que utilice este tipo de ánodos es de 100.000 t/a aproximadamente.

Como en toda planta industrial, los gastos unitarios de capital de las plantas de fundición de aluminio disminuyen al aumentar la capacidad de la planta [11]. Sin embargo, el ahorro derivado de economías de escala es muy limitado, porque las plantas grandes únicamente difieren de las pequeñas en el número de líneas de cubas instaladas. Si se tienen en cuenta los factores de ubicación mencionados en el punto 2.3.1 así como otros datos [11], una planta de fundición de 100.000 t/a instalada en un país desarrollado costaría 3.400 dólares EE.UU. por t de capacidad, mientras que una planta de 200.000 t/a costaría 2.900 dólares por t de capacidad en las mismas condiciones. Las cifras correspondientes a un emplazamiento remoto en un país en desarrollo son las siguientes: 4.100 dólares EE.UU. por t de capacidad para

un nivel de producción de 100.000 t/a y 3.600 dólares por t de capacidad para una planta de doble nivel de producción.

### 3.3.2 Espacio e infraestructura [23]

Una planta de fundición con una capacidad de 100.000 t/a requiere una extensión de 30-40 hectáreas, más el espacio necesario para una posible ampliación. No se debe ubicar a menos de 500 m del centro de población más cercano, ni siquiera en el caso de que se prevean sistemas de protección ambiental adecuados.

Las principales necesidades en materia de infraestructura son las siguientes:

- a) medios de transporte
- b) energía eléctrica
- c) agua
- d) terrenos para viviendas

Ad a) Las cantidades de material que hay que transportar a la planta y desde la planta representan cuatro veces su capacidad de producción. Es preciso contar con una línea de ferrocarril y/o un sistema de carreteras apto para el transporte pesado, o bien con un puerto de mar para buques de gran calado.

Se necesitan asimismo instalaciones especiales de descarga para la alúmina y los materiales carbonados.

Ad b) Las cuestiones importantes relativas al suministro de energía eléctrica se examinan por separado en el apartado 3.4.

Ad c) La explotación de una planta de fundición requiere una cantidad de agua industrial equivalente a 3.000 ó 4.000 m<sup>3</sup> anuales por cada 100.000 t de metal, aun en el caso de que exista un sistema de recirculación. Además es preciso prever el abastecimiento de agua potable y sanitaria.

Ad d) El establecimiento del personal de explotación puede exigir también condiciones previas de infraestructura (viviendas, transporte, etc.).

### 3.3.3 Emplazamiento

La situación ideal es que existan fuentes baratas de energía cerca de las reservas de bauxita de calidad y que el aluminio producido tenga posibilidades de venta en el mercado nacional o se pueda transportar a bajo costo por mar hasta el mercado comprador [23].

Esas condiciones ideales no se dan con frecuencia.

En tiempos pasados, las plantas de fundición se construían generalmente en los países desarrollados, cerca del mercado de aluminio y lo más lejos posible de fuentes de energía eléctrica eventualmente baratas. La bauxita o la alúmina se importaba. La creciente demanda de aluminio exigió construir centrales de energía eléctrica cada vez más potentes para las nuevas plantas de fundición, pese a que en los países desarrollados no se disponía muchas veces de fuentes de energía baratas en la cantidad que interesaba. El aumento de los costos de transporte contribuyó también a establecer la situación actual: procurar ubicar las nuevas plantas industriales en lugares especialmente ventajosos o estudiar emplazamientos que gocen de precios energéticos favorables y bajos costos de transporte.

En el caso de que se disponga de energía barata pero haya que importar la alúmina y/o la bauxita, la condición que debe reunir una planta de fundición es que cuente con medios de transporte baratos. Ese es el motivo de construir las plantas en la costa o a orillas de vías navegables. En efecto, los costos del transporte de las

materias primas por tierra pueden ser tan elevados que contrarresten gran parte de las ventajas del bajo costo de la energía.

Los problemas de ubicación se complican cuando la fuente de energía barata está relativamente lejos de la costa o de vías navegables. En esos casos, para hallar la solución óptima es necesario tener en cuenta, además de los costos del transporte de las materias primas y del metal producido, el costo de la energía. Sin embargo, la mejor solución en la mayoría de los casos sigue siendo la de tender una línea de energía eléctrica, aunque aumente los gastos de inversión en infraestructura. En efecto, no hay que olvidar que la energía eléctrica, una vez en la costa, se puede utilizar también para otras instalaciones industriales.

#### 3.4 La energía eléctrica en las plantas de fundición

Habida cuenta que el aluminio requiere un consumo intensivo de energía eléctrica, los productores necesitan fuentes de energía baratas. En el cuadro incluido en el Anexo 18 se muestra el costo de la energía eléctrica para las plantas de fundición de aluminio (calculado en el lugar donde se genera) en dólares de los EE.UU. de 1980 por kilovatio-hora [11]. Se indican las posibles variaciones de las fuentes de energía de bajo costo existentes, así como los costos previstos de la energía en nuevos proyectos. La energía hidroeléctrica y el gas son los que ofrecen mejores perspectivas para la generación de energía barata: de 0,6 centavos/kWh para proyectos específicos hasta 2 centavos/kWh para la energía hidroeléctrica de salto grande o el gas y 3 centavos/kWh para la energía hidroeléctrica de salto pequeño. La energía de carbón y nuclear conllevan un costo más elevado, 5 centavos/kWh, excepto en Australia.

En el mundo existen aún vastos recursos energéticos no explotados, en su mayor parte de energía hidroeléctrica y gas. Oceanía posee además recursos de carbón transformables en energía eléctrica [11].

En el Anexo 19 se indican los suministros de energía eléctrica actuales para la fundición de aluminio, así como los posibles suministros nuevos de bajo costo [11]. De este cuadro cabe extraer algunas conclusiones acerca de la ubicación de la industria del aluminio en el futuro, cuestión que ya se mencionó en los apartados 4 y 7 del Capítulo C.

### 3.5 Explotación de las plantas de fundición de aluminio

#### 3.5.1 Gastos de producción

La alúmina, la energía eléctrica y los gastos de capital son los capítulos más importantes del costo de la fusión del aluminio [11], [23]. Sin embargo, si se comparan los datos de 1978 [23] con los de 1983 [11] se observa que tienen un peso algo dispar:

	1978 [23]	1983 [11]
- alúmina	25-30%	30%
- energía eléctrica	20-25%	16-30%
- gastos de capital	25-30%	16-35%

Bird da datos más precisos [8] en relación con el estudio de tres plantas nuevas. En el Anexo 20 se reproducen los resultados del estudio de uno de los casos (Australia). Los otros dos casos corresponden respectivamente a una planta de fundición en el Canadá y a otra en el Brasil, con los mismos parámetros. Existen leves diferencias tanto en los gastos variables como en los costos totales, como se observa en el cuadro siguiente:

	Costos en dólares EE.UU./t de aluminio		
	Canadá	Australia	Brasil
Gastos variables 1987	1.456,1	1.506,8	1.373,9
Costos totales 1987	1.954,8	2.041,5	2.034,8

Las diferencias en los costos se deben en parte a diferencias en los costos de la electricidad y los gastos de capital. Los costos de la electricidad en el Brasil son los más bajos (2,21 centavos), pero ese país soporta en cambio los gastos de capital más elevados (660,9 dólares/t); el costo de la electricidad es un poco más alto en el Canadá (2,28 centavos), que en cambio muestra los gastos de capital más bajos (498,7 dólares/t); y los costos de la electricidad son máximos en el caso de Australia (2,81 centavos), con gastos de capital intermedios (534,7 dólares/t) para 1987.

En el Anexo 21 se muestra un pronóstico de los costos de producción de nuevas plantas de fundición en emplazamientos seleccionados para el año 2000 [11]. Parece ser que el Brasil y Australia son los países que podrán producir el aluminio más barato en plantas de nueva construcción en el año 2000.

### 3.5.2 Mantenimiento y piezas de repuesto

En el Anexo 20 se muestran los gastos de personal y material de mantenimiento. Si se tienen además en cuenta los gastos de mantenimiento de los casos del Brasil y el Canadá, cabe decir que esos gastos ascienden aproximadamente al 5% de los gastos variables.

### 3.6 Residuos

Las plantas de fundición tienen varios residuos. Los restos de los ánodos consumidos constituyen la parte más importante, que equivale aproximadamente al 20-30% del material anódico utilizado. Estos residuos se pueden aprovechar plenamente en aquellas plantas de fundición que cuentan con un taller de fabricación de ánodos (véase el Anexo 16).

El recubrimiento del cátodo está constituido por material carbonado que absorbe fluoruros con el uso. Por término medio es preciso cambiar el recubrimiento cada cinco años. En cubas modernas de más de 200 kA, la cantidad de recubrimiento representa aproximadamente 30-35 toneladas. Por consiguiente, con 200 cubas de esas características hay que contar con unas 1.500 t de residuos al año. O bien se procede a extraer el flúor si la cantidad es suficiente o bien es preciso desechar los residuos en estanques impermeables.

El lavado en seco de los gases que contienen flúor no deja ningún residuo.

## 4. FABRICACION DE PRODUCTOS SEMIMANUFACTURADOS

### 4.1 Consumo de aluminio

El consumo de aluminio está estrechamente relacionado con el nivel general de desarrollo industrial y, a través de él, con el producto interno bruto (PIB) por habitante del país [12]. Aunque esas correlaciones pueden venir gobernadas también por multitud de otros factores (por ejemplo, los recursos naturales, las tradiciones, etc., de la región), pueden constituir una base útil para preparar investigaciones analíticas y formular pronósticos.

Como ya se apuntó en otro lugar, la aparición de nuevos materiales estructurales y/o el nivel relativo de

precios de los materiales competidores pueden influir poderosamente en el consumo de aluminio. La competencia procedente de esas fuentes hace que la correlación entre el producto nacional bruto (PNB) o el producto interno bruto (PIB) y el consumo de aluminio por habitante sufra a veces desfases en el tiempo. Los primeros estudios analíticos se efectuaron en una época de aumento constante de la tasa de aumento del consumo de aluminio, sin tener apenas en cuenta que las relaciones establecidas no eran del todo válidas en el caso de los países cuyo consumo de aluminio por habitante era extremadamente elevado o extremadamente bajo [32-35].

Hasta la etapa de fundición resulta más o menos fácil seguir los movimientos de los materiales, dado que normalmente responden a acuerdos a largo plazo; pero de la etapa de semimanufacturación en adelante, la superposición estadística de algunas cifras (como por ejemplo en la fabricación de papel de aluminio) o la disparidad de las metodologías utilizadas para agrupar los materiales desde el punto de vista estadístico puede equivocar fácilmente al analista.

A la hora de efectuar una evaluación realista del consumo de aluminio habría que tener también en cuenta el contenido real en aluminio de todos los productos acabados exportados e importados; la tarea, sin embargo, es prácticamente imposible.

Como ya se apuntó antes, los países en desarrollo son por regla general consumidores menores de aluminio y su consumo de este metal es muy inferior al promedio mundial. Es preciso alcanzar un cierto nivel de PNB para que el consumo de aluminio muestre una tendencia continuamente ascendente hasta llegar a un "estado de saturación". Mediante consideraciones teóricas se puede lograr una aproximación a la forma de la así llamada curva S, válida para un año determinado (Anexo 22).

En el Anexo 23 se muestra el PNB [36] en función del consumo por habitante [37-39] para 1981; se utiliza una escala logarítmica debido a la disparidad de los órdenes de magnitud.

Las cifras excesivamente elevadas (Bélgica, Noruega, Hungría) cabe atribuir las al elevado contenido en aluminio de los productos acabados exportados. En el caso de cifras muy bajas, es muy probable que se haya ignorado el contenido en aluminio de los productos de aluminio importados. El Anexo 23 representa una compilación estadística estática; por consiguiente, para extrapolar el consumo de aluminio de un país determinado es preciso investigar previamente a fondo las características del desarrollo previsto para la economía nacional. Pese a las desviaciones que pueda haber en el valor de la correlación apuntada, parece confirmar la tesis de que para finales de siglo habrá un cambio notable en el consumo de aluminio a favor de los países en desarrollo [12]. A conclusiones similares llega también otro autor, quien sin embargo sugiere que se tengan en cuenta muchas más correlaciones a la hora de pronosticar el consumo de aluminio [8].

#### 4.2 Fabricación de productos semimanufacturados

En contraste con la fabricación de alúmina y la fusión de aluminio, la variedad de productos en la industria de semimanufactura es grande. Aun dentro de una misma clase de productos semimanufacturados (por ejemplo, bandas), las tecnologías utilizadas en la práctica pueden ser muy variadas.

En 1983 el consumo mundial de aluminio (primario, secundario y utilización directa de chatarra) fue aproximadamente de 20,6 millones de toneladas [6]. Esa cifra es casi idéntica a la de productos semimanufacturados, incluidas las piezas de fundición.

Sin contar las zonas de economías de planificación centralizada, en 1983 había 74 países que poseían instalaciones -de mayor o menor entidad- para fabricar productos semimanufacturados; el número de plantas era superior a 1.000, sin contar las fundiciones de metales ligeros de menor importancia.

Según los datos disponibles [8], y excluyendo las piezas de fundición, cabe estimar que las capacidades mundiales de fabricación de productos semimanufacturados de aluminio son de 21,1 millones de toneladas [40]. Si se atribuye a la fundición y a la pulvimetalurgia un 25%, cabe estimar que la utilización real de esa capacidad mundial es del orden de 70-75%. Varios estudios concretos efectuados al respecto parecen confirmar esa cifra.

De acuerdo con la experiencia, los proyectos de fabricación de productos semimanufacturados se ejecutan principalmente en zonas donde la demanda interna de productos acabados es ya elevada y se tiene normalmente que satisfacer mediante importaciones. La instalación de nuevas capacidades permite también exportar en la mayoría de los casos.

La decisión relativa a dónde y cuándo es viable emprender un proyecto de fabricación de productos semimanufacturados es un asunto complejo que requiere sopesar con cuidado diversos factores y efectuar simultáneamente una investigación efectiva del mercado. La investigación del mercado tiene que explorar no sólo la demanda interna sino también las perspectivas de exportar a países cercanos, con la posibilidad de exportar también -especialmente en el caso de productos laminados- a regiones más lejanas y abastecer los mercados mundiales. Como es lógico, al considerar esas exportaciones será necesario tener en cuenta los aranceles y los costos de transporte que prevalecen en los posibles países de destino.

La cuestión se complica aún más por el hecho de que en la mayoría de los países desarrollados los productos de calidad comercial se fabrican en líneas de producción de elevado rendimiento que repercuten en la fijación de precios en general y en un pequeño margen de diferencias de precios en particular. En el Anexo 24, compilado sobre la base de las referencias disponibles [41] [42], se muestra el nivel relativo y aproximado de precios de varios productos. Además de los costos de transporte, otro factor que puede influir mucho en la magnitud de los beneficios son los derechos de importación, que en el caso de los productos semimanufacturados pueden ser relativamente elevados, según el país de destino. Por otra parte, los beneficios marginales pueden ser importantes en el caso de que los productos suministrados tengan un alto valor agregado y cumplan normas estrictas o presenten, si se desea un elevado acabado de la superficie (por ejemplo, perfiles anodizados de aleaciones de resistencia mediana), o bien cuando el tonelaje solicitado por el cliente sea inferior al que es normal en artículos de especificaciones más convencionales.

En el Anexo 25 se resumen las tecnologías básicas utilizadas en la fabricación de los diversos productos manufacturados. En el Cuadro 8 se muestra el desglose tecnológico de la producción de semimanufacturas para tres zonas desarrolladas [43].

Cuadro 8  
COMPOSICION TECNOLOGICA DE LA FABRICACION  
DE SEMIMANUFACTURAS  
(En porcentajes)

	Estados Unidos	Europa Occidental	Japón
Productos laminados	65,8	54,7	34,1
Productos extruidos y embutidos	23,4	33,0	57,4
Estampados en caliente	1,3	0,6	0,1
Alambre y cable	9,5	11,7	8,4

Se observará que los laminados y los perfiles extruidos representan la mayor parte de la producción, mientras que la producción de piezas forjadas es relativamente pequeña. No se prevén cambios importantes en esa composición hasta finales de siglo.

A continuación se sigue el esquema del Anexo 25 para examinar las principales tecnologías utilizadas.

De las operaciones de segunda transformación y acabado (enmarcadas por una línea discontinua en el Anexo 25) hay que hacer mención especial de las dos más importantes: fabricación de papel de aluminio y anodización. (En el Anexo se incluyen también referencias a los subcapítulos correspondientes.)

#### 4.2.1 Colada continua

Las ventajas fundamentales de este procedimiento son manifiestas cuando el metal se recibe directamente de la planta de fundición en estado líquido y no es necesario proceder a una segunda fusión del lingote. Por ese motivo, el equipo se halla ubicado generalmente en la

planta de fundición propiamente dicha o al menos no muy lejos de ella. En el caso de que exista una red de carreteras adecuada puede ser también perfectamente rentable el transporte del metal líquido a distancias de 500-600 kilómetros; pero si se tienen en cuenta las capacidades de las instalaciones de colada continua, la tarea no resulta ni mucho menos fácil. Normalmente, las instalaciones de colada continua para bandas anchas están diseñadas para fabricar bandas de hasta 2.300 mm de anchura y espesores de 4 a 40 milímetros; su capacidad anual es normalmente de 8-12.000 toneladas, aunque existen algunas con capacidad de 40 toneladas/hora y más. Como es lógico, al aumentar la capacidad aumenta también la rentabilidad. En cuanto a las bandas delgadas fabricadas por colada continua, generalmente se producen en anchuras que oscilan entre 200 y 300 milímetros; el volumen mínimo para que la planta sea rentable es de 2.500 toneladas al año.

El equipo para la colada continua de alambre de barra se diseña normalmente para capacidades de 10-20.000 toneladas al año, aunque algunos tienen capacidades anuales de hasta 50.000 toneladas.

#### 4.2.2 Colada de tochos y desbastes

Las máquinas actuales de colada, asistidas por hornos modernos, son capaces de extruir simultáneamente más de 50 tochos de 150 mm de diámetro. Los desbastes de gran tamaño (por ejemplo, de 450 mm por 2.000 mm) se pueden colar en lotes de 10 a la vez. En los Anexos 26 y 27 se muestra el esquema de un taller de fundición de aproximadamente 10.000 toneladas de capacidad anual [42] y de otro más pequeño [44], respectivamente. El diseño del equipo auxiliar para acoplar a la máquina de fundir viene determinado por las propiedades del sistema de

alimentación y por la pureza y las propiedades mecánicas que debe reunir el producto fabricado.

#### 4.2.3 Moldeo

Las piezas de aluminio moldeadas se utilizan ampliamente en las industrias del transporte, el automóvil, la construcción, la electrotecnia y la mecánica así como en la manufacturación de muchos artículos fabricados en masa. En la mayoría de los casos se trata de productos terminados y listos para el uso, y rara vez necesitan un acabado suplementario. Aunque la materia prima puede ser cara en comparación con otros metales, los productos moldeados pueden competir con muchísimos artículos fabricados con otros materiales estructurales.

El moldeo es un término colectivo que designa varias tecnologías de fundición diferentes. Cuatro de ellas revisten especial importancia; son las que se indican en el Cuadro 9, donde se señala, a título comparativo, sus características esenciales: el número mínimo de piezas que es necesario fabricar para que su producción sea rentable, su peso usual, la resistencia mecánica que se consigue normalmente al moldear una aleación AlSi<sub>12</sub> y su resistencia a la presión.

**Cuadro 9**  
**CARACTERISTICAS DE LOS PROCEDIMIENTOS DE MOLDEO**

Procedimientos	Cantidad usual para que la producción sea rentable piezas/año	Peso de las piezas fundidas kg/pieza	Resistencia a la tracción (aleación AlSi <sub>12</sub> ) MPa	Resistencia a la presión
Moldeo en arena	1 - 5.000	5 - 300	160	mediana
Moldeo en matriz	100 - 100.000	0,1 - 50	180	buena
Moldeo a baja presión	500 - 100.000	1 - 50	185	excelente
Moldeo a elevada presión	10.000 - 1.000.000	0,01 - 20	200	aceptable

Obsérvese que los talleres de moldeo necesitan capacidades anuales menores que las plantas de semimanufactura para ser rentables. En el caso del moldeo en arena pueden bastar capacidades muy modestas, mientras que los diferentes procedimientos de moldeo en matriz requieren una capacidad anual de 1.000 toneladas como mínimo para que sean rentables, debido al tiempo y los costos que entraña la fabricación del molde. Como es lógico, actualmente se están instalando capacidades que oscilan entre 10.000 y 50.000 toneladas anuales, especialmente en la industria del automóvil.

A fin de facilitar el moldeo, el aluminio que se utiliza para esos fines contiene generalmente entre un 5 y un 15% de aleantes cuyas tolerancias abarcan una gama bastante amplia. Para ese fin se presta especialmente bien el aluminio secundario. El reciclado del metal comienza por la recolección de chatarra, seguida de su clasificación, tratamiento preliminar y transformación final en aluminio secundario mediante un proceso metalúrgico de segunda fusión. La nueva fusión de la chatarra es un procedimiento economizador de energía. La energía necesaria para transformar la chatarra representa aproximadamente el 5% de la energía que requiere la producción del metal primario [45]. La recolección y clasificación efectivas de la chatarra exigen ciertas capacidades de organización. Una planta de segunda fusión que transforme como mínimo 1.000 toneladas de chatarra al año puede ser ya un proyecto rentable. De acuerdo con la experiencia, el consumo de aluminio secundario está aumentando más rápidamente que el consumo de aluminio en general.

#### 4.2.4 Laminación

Actualmente funcionan en el mundo unas 200 plantas de laminación en caliente. Muchas de ellas tienen un capacidad anual de 100-500.000 toneladas, pero en los países en desarrollo funcionan algunas con capacidades bastantes menores.

Por regla general, junto a los laminadores en caliente se suele instalar también laminadores en frío. Sin embargo, en muchos casos el producto laminado en caliente -incluidas las bandas fabricadas por colada continua- se transporta muy lejos hasta otros puntos de destino para transformarlo allí por laminación en frío. Eso explica la existencia de aproximadamente un 50% más de laminadores en frío que de laminadores en caliente en el mundo. Cuando se dispone de ambos, normalmente la capacidad de laminación en frío es alrededor del 60 o el 100% de la laminación en caliente. En los casos en que solamente se instalan laminadores en frío, las capacidades varían entre límites muy amplios.

Como es lógico, las cifras de rendimiento técnico (productividad por empleado o unidad de área) son menores para capacidades pequeñas que para plantas más grandes (Anexo 28 y [42]).

#### 4.2.5 Extrusión

Aunque en otros tiempos se utilizaba casi exclusivamente el así llamado procedimiento directo de extrusión, hoy día se está imponiendo cada vez más la extrusión inversa; con todo, la extrusión directa seguirá gozando de mayor difusión durante mucho tiempo. En el Anexo 29 se muestra una comparación de las dos tecnologías. En la referencia [46] se examinan las ventajas de la extrusión inversa, que permite condiciones

de rozamiento más favorables, y se dan ejemplos concretos. Existen aproximadamente 700 plantas de extrusión en el mundo. Su capacidad anual instalada varía normalmente entre 3.000 y 10.000 toneladas, pero también las hay mayores (80.000-100.000 t/a) y menores (500-1.000 t/a). La mayor parte de las plantas pequeñas ubicadas en los países desarrollados están concebidas para fabricar perfiles de elevada precisión.

En el Anexo 30 se muestra el diagrama simplificado de una planta de extrusión. La capacidad de cada una de las prensas de extrusión es directamente proporcional a la fuerza de compresión aplicada en ella. En la producción de piezas de características comerciales estándar la capacidad es de 200-300 t/MN/año; si se trata de perfiles de diseño más complejos la cifra es de 150-200 t/MN/año. Por consiguiente, si se instala una sola prensa de extrusión se puede obtener una capacidad anual de 1.000-3.000 toneladas. Pero, salvo casos excepcionales, es raro que una planta funcione con una sola prensa.

#### 4.2.6 Forja

Habida cuenta que las piezas de aluminio forjadas son relativamente caras y que la fabricación de piezas de tamaño absolutamente exacto exige utilizar matrices de precio muy elevado, la tecnología de la forja solamente merece la pena cuando hay que fabricar grandes series. Los principales clientes de los forjados de aluminio son las industrias aeronáutica y automovilística.

#### 4.3. Transformación de productos semimanufacturados

Una parte considerable de los productos semimanufacturados que se han examinado en el apartado D 4.2 llegan al cliente después de haber sufrido otras

operaciones de transformación. Una característica común a esas operaciones es que se suelen realizar con equipos de productividad relativamente elevada. Durante ese proceso de transformación, el fabricante de productos acabados se limita cada vez más a simples operaciones de mecanizado, corte de formatos, taladrado, etc., así como a la unión (principalmente mediante soldadura) de los productos semiacabados comprados a las fábricas. Entre las tecnologías de transformación de productos semimanufacturados figuran la laminación de papel de aluminio, la fabricación de perfiles ondulados, chapas con circuitos impresos, tubos con aletas, tubos soldados, pigmentos y diversos procedimientos de acabado de la superficie.

De esas técnicas de transformación merecen especial atención la fabricación de papel de aluminio y las técnicas de acabado de la superficie.

#### 4.3.1 Fabricación de papel de aluminio

Generalmente las bandas de 800-1.600 mm de anchura y 0,2-0,5 mm de espesor se prestan bien para su transporte en bobinas de 4-10 toneladas. Por consiguiente, las plantas de fabricación de papel de aluminio no tienen necesariamente que estar adyacentes a una planta de laminación en frío.

La fabricación de papel de aluminio consta de dos tipos distintos de operaciones: la laminación del papel propiamente dicha y el acabado del producto así obtenido. Este último reviste especial importancia, porque solamente una parte de los encargos recibidos exigirán el papel con su acabado plateado natural, mientras que la mayoría de los clientes piden papel coloreado, estampado o impreso, o bien papel laminado con otros materiales para su uso en embalajes. Hoy día existen unos 150 fabricantes de papel

de aluminio en el mundo. Sus capacidades anuales características oscilan entre 3.000 y 50.000 toneladas, aunque existen plantas con capacidades menores y mayores que éstas.

#### 4.3.2 Acabado de la superficie

Cuando el objetivo es lograr la resistencia a la corrosión o un efecto decorativo en productos laminados (planos), se suele añadir un recubrimiento de pintura, plástico o laca. En el caso de superficies desiguales o extruidas se utiliza a menudo un procedimiento de anodización.

En el primer caso, el efecto apetecido se consigue mediante la elección del color adecuado; en el segundo, depositando por electrólisis una película superficial anodizada de color o una película directamente obtenida en el proceso de anodización (anodizado integral en color).

Habida cuenta que los trenes de pintura de bandas anchas funcionan en régimen continuo, es preciso diseñarlos para grandes capacidades (cada unidad debe tratar 10.000 toneladas al año o incluso bastante más). La instalación de equipos de este tipo es costosa y únicamente resulta rentable con niveles de producción elevados.

La operación de depositar una película de óxido anodizada es un procedimiento que exige mucho tiempo. Por ese motivo -y prescindiendo de algunas excepciones- el funcionamiento de estos equipos es intermitente y permite instalar capacidades menores sin pérdida de rentabilidad (1.000-3.000 t/a).

#### 4.4 Aspectos generales de la instalación de plantas de semimanufactura

Comparada con la obtención y fundición de alúmina, la fabricación de productos semimanufacturados es, en términos específicos, un proceso que requiere más mano de obra pero bastante menos energía. Dentro de los costos de producción de los productos semimanufacturados, la participación de los costos de las materias primas y la de la amortización del capital invertido son dos factores dominantes. La primera varía con el carácter del producto, pero puede representar hasta un 80%, e incluso en el caso de productos sometidos a una segunda transformación suele ser bastante superior al 40% (Anexo 24).

Los datos relativos a las capacidades óptimas en función del tipo de tecnología utilizado se hallan sujetos a variaciones considerables (por ejemplo laminación o forja). Pero aun dentro de un mismo tipo general de tecnología dependen mucho de las especificaciones reales del producto de que se trate (por ejemplo, proporción de aluminio sin alear, el espesor de la banda, etc.). Indicar únicamente los gastos de inversión sin especificar detalladamente los productos correspondientes no proporciona más que una estimación muy provisional del posible gasto que puede entrañar la realización del proyecto.

En el Anexo 31 se muestran estimaciones provisionales de los gastos de inversión de instalaciones de manufacturación, comparados con los gastos de una planta de fundición [34], [47]. Habida cuenta que la capacidad mínima que ha de poseer una planta de semimanufactura para que sea rentable puede ser relativamente pequeña, la participación en ese sector se

puede iniciar con medios de inversión relativamente modestos.

##### 5. MANUFACTURACION DE PRODUCTOS ACABADOS

Los fabricantes de productos acabados se hallan en contacto directo con los usuarios finales y dependen principalmente de los mercados. De ahí se puede obtener seguramente la información acerca de la competencia de otros materiales, mientras que una labor efectiva de comercialización puede contribuir sustancialmente a satisfacer esas exigencias y a que siga aumentando el consumo de aluminio.

El número de productos acabados de aluminio o de productos que contienen ese metal en proporciones variables se calcula actualmente en varias decenas de miles. La situación se complica aún más por el hecho de que muchos productos no contienen más que pequeñas cantidades de aluminio, circunstancia que, aunque aparentemente insignificante para el usuario final, reviste gran importancia desde el punto de vista de la industria del aluminio. (Un ejemplo que hace al caso es la industria del automóvil).

Con vistas a mejorar los productos existentes y crear otros nuevos resulta útil, a título de guía, preparar análisis de funciones y valores por separado. Su comparación puede revelar, por una parte, las expectativas del consumidor en punto a los parámetros técnicos que desea, y por otra la viabilidad económica de que el productor satisfaga esas demandas. Ese tipo de ejercicios puede también servir de orientación en la elección del material adecuado (un material competidor, o aleaciones de aluminio).

El ciclo vital de los productos acabados de aluminio es sumamente variable, pero una estimación

aceptable podría ser cinco años por término medio. De tiempo en tiempo se plantea por tanto la necesidad de poner al día los diseños o crear otros completamente nuevos. Esa permanente necesidad de desarrollo técnico e innovación de los productos obliga a contratar equipos de especialistas bastante más nutridos que en los demás sectores de la industria del aluminio. En caso necesario, las innovaciones realizadas dentro del propio país se pueden sustituir de vez en cuando por la compra de licencias extranjeras, especialmente cuando se trata de la introducción de un nuevo producto en el mercado.

Los precios por unidad de volumen están sujetos a grandes variaciones, aun en el caso de que el producto consista en su mayor parte de estructuras de aluminio. Lo mismo vale también para objetos de pequeño tamaño (por ejemplo artefactos) cuya manufacturación -pese a que se realiza en series pequeñas- puede ser perfectamente rentable. Hay que señalar que en el caso de productos más sencillos, en cuya fabricación intervienen operaciones relativamente escasas y simples (por ejemplo, recipientes), generalmente sólo merece la pena la producción en gran escala. Sin embargo, en contraposición con lo anterior, la fabricación de artículos de cocina embutidos puede ser rentable aun en pequeña escala cuando los salarios son bajos y los medios de inversión moderados.

En el Anexo 32 [47] se examinan las capacidades óptimas aproximadas para la fabricación en gran escala de algunos productos acabados.

Los gastos de capital se dan, también en este caso, en función de los correspondientes a la construcción de una planta de fundición. Comparando las cifras correspondientes se observará que los gastos específicos de inversión por tonelada de producto acabado varían mucho con el tipo de producto de que se trate; pueden ser 5 ó 6 veces superiores al costo del lingote (por ejemplo, en el

caso de los artículos de cocina) o bien únicamente una fracción de ese costo (por ejemplo en el caso de marcos de puertas y ventanas, escalas o andamios). Pero hay un punto que reviste especial importancia: para ese tipo de productos se pueden encontrar capacidades razonables en el intervalo de 500-5.000 t/a.

E. PRINCIPALES ORIENTACIONES DE LOS PROGRAMAS DE INVESTIGACION

1. ALUMINA

El Comité científico del Simposio ICSOBA celebrado en Tihany [48] afirmó que a la vuelta del milenio el procedimiento Bayer seguiría proporcionando la mayor parte de la producción mundial de aluminio. En consonancia con esa declaración, el estudio que se efectúa a continuación se centra principalmente en las tendencias en el desarrollo de ese procedimiento.

1.1. El procedimiento Bayer

Aunque el procedimiento Bayer se utiliza desde hace tiempo para la producción de alúmina, ha experimentado constantes modificaciones e innovaciones que han sido objeto de examen en diversas reuniones de ICSOBA y AIME, por su parte el Comité científico de la reunión de ICSOBA celebrada en Tihany expuso las principales tendencias de desarrollo en los términos siguientes [48]:

- crear tecnología que economice energía
- potenciar el papel del ataque a temperaturas elevadas
- implantar equipos de elevada capacidad
- aplicar procedimientos completamente automatizados y sistemas de control por computadora

A esas tendencias cabría agregar otra de carácter global: como consecuencia de los costos crecientes de los bienes de capital, el factor que promoverá el perfeccionamiento técnico será cada vez más la mejor explotación de los bienes de capital y el aumento de la eficiencia de la planta [49].

En el Anexo 33 se resumen los principales objetivos del perfeccionamiento técnico de las plantas de producción de alúmina por el procedimiento Bayer. En ese resumen se indican las cinco principales orientaciones de investigación y desarrollo, sus objetivos y las posibles soluciones (basado en [49]).

Como se puede observar en ese Anexo, las principales líneas de actividad de investigación y desarrollo corresponden a las etapas de precipitación y ataque del procedimiento.

En lo que respecta a la precipitación, la principal línea de desarrollo consiste en esfuerzos encaminados a garantizar, junto a los elevados rendimientos del licor que se consiguen en el procedimiento Bayer europeo (70-80 g/dm<sup>3</sup>), las propiedades del producto Bayer americano, es decir, una alúmina arenosa. Con ese fin es necesario purificar la solución mediante la eliminación de sales carbonatadas y sustancias orgánicas (cuando las haya). La totalidad de la tecnología de la precipitación se halla en permanente desarrollo con el fin de lograr rendimientos óptimos de precipitación con alúmina arenosa.

En lo que atañe al ataque cabe distinguir dos tendencias. En el caso de las bauxitas con monohidrato, la tendencia es a incrementar las temperaturas de ataque. Con ese fin se pueden utilizar también los tubos de ataque que han aparecido recientemente, en especial si se trata de bauxitas diaspóricas. También es posible influir en la eficacia del ataque mediante el uso de aditivos cuando las bauxitas utilizadas lo exijan.

El ajuste del ataque y la precipitación y de la cantidad de agua evaporada contribuye a conseguir condiciones óptimas en todo el procedimiento al aumentar la productividad y mantener los costos en un nivel mínimo. Los intentos de reducir el consumo de sosa cáustica responden también al objetivo de disminuir los

costos, mientras que el lavado de los lodos rojos se efectúa no sólo con esa finalidad sino también para lograr lodos que contaminen menos el medio ambiente.

## 1.2 Procedimientos distintos del Bayer

Actualmente se está intentando también mejorar al máximo otros procedimientos distintos del Bayer aunque son esfuerzos de importancia meramente local. Una actividad que reviste más interés son los trabajos de investigación y desarrollo encaminados a producir cloruro de aluminio.

La producción de cloruro de aluminio sirve para varios fines. Es un material que se puede utilizar per se en la industria química (aunque las cantidades que se necesitan son relativamente pequeñas) o bien para producir algunas alúminas especiales; pero también podría servir como producto intermedio en la producción de aluminio.

El cloruro de aluminio se puede fabricar a partir de arcillas pobres en hierro (procedimiento Toth) [50] o bauxita o bien alúmina gamma (procedimiento Alcoa) [51].

Si la materia prima son arcillas pobres en hierro, primero se sinterizan éstas con coque, para efectuar después una clorización en presencia de azufre. Se obtienen varios cloruros, que se separan por destilación.

En el caso de utilizar alúmina gamma reactiva, se craquea fueloil en ella en un lecho fluidificado y a continuación se clorizan las partículas de alúmina-coque en un lecho fluidificado a unos 650 °C en presencia de  $\text{NaAlCl}_4$  [51].

La bauxita se calcina primero y se somete después a una clorización en lecho fluidificado utilizando una mezcla gaseosa de  $\text{CO} + \text{Cl}_2$  [51].

Además de éstas se han diseñado otras técnicas de clorización, que sin embargo se encuentran aún en diversas

fases de prueba. (Sobre la producción de aluminio a partir de cloruro, véase E 2.2)

## 2. ALUMINIO

Así como en la fabricación de alúmina se están buscando soluciones más rentables dentro del procedimiento Bayer, también en torno al procedimiento Hall-Hèroult existe una actividad constante de investigación y desarrollo. Al mismo tiempo se trabaja intensamente en la creación de otros procedimientos distintos de ése.

### 2.1 El procedimiento Hall-Hèroult

Los objetivos de las actividades de investigación y desarrollo en esta esfera son una mayor rentabilidad y el cumplimiento de normas ambientales estrictas. En un primer momento se aumentó el tamaño de las cubas, pero por encima de los 200 kA (230-250 kA) los resultados no son demasiado satisfactorios.

El resultado acumulado de diversos avances -por ejemplo, ánodos más grandes, mejor composición del electrólito, temperaturas de funcionamiento más bajas, control computadorizado del funcionamiento de la pila, diseño y vida de la pila, control de las emisiones y control de los efectos magnéticos -fue un menor consumo de energía; sin embargo, no se prevé reducirlo muy por debajo de 12.200 kWh/t de metal [52].

No obstante, se hallan en marcha actividades de investigación y desarrollo encaminadas a implantar modificaciones importantes [52], concretamente en los ámbitos siguientes:

i) desarrollo de nuevos materiales y diseños de los electrodos;

ii) modificación de la composición del electrólito.

En lo que respecta al primer punto, Kaiser está estudiando un cátodo de  $TiB_2$ , mientras que Alcoa investiga un ánodo permanente en el que se descargue el oxígeno. El resultado de ambas innovaciones sería la reducción del consumo de energía eléctrica. Aún es pronto para enjuiciar su viabilidad.

En lo que atañe a la composición del electrólito, la tendencia actual es a utilizar sales de litio para reducir la resistividad del electrólito. El resultado podría ser un menor consumo de energía, una mayor eficiencia de la corriente, niveles más bajos de emisión de fluoruros y gastos de explotación más bajos. Sin embargo, los resultados no son todavía claros.

Bird prevé que el perfeccionamiento gradual de los procedimientos utilizados en las plantas de fundición existentes traerán consigo una reducción de costos del 0,5% anual por término medio [8].

## 2.2 Otros procedimientos

Entre los demás procedimientos que se han investigado hay dos que merecen especial atención:

- el procedimiento del cloruro
- la reducción carbotérmica directa.

El procedimiento del cloruro, de la empresa Alcoa (Alcoa Smelting Process o ASP), consiste en la electrólisis de  $AlCl_3$  en un baño de  $LiCl \cdot NaCl$  fundido a  $700^\circ C$  con una pila bipolar de electrodos de grafito y ánodo no consumible. (Sobre la fabricación de  $AlCl_3$  véase E 1.2). Aunque el consumo de energía eléctrica es menor en el ASP que en el procedimiento Hall-Héroult, la reducción de los gastos totales es sólo levemente menor por incluir los gastos correspondientes a la producción del cloro, mientras que los riesgos que entraña el procedimiento parecen ser mayores. No obstante, si se

perfecciona el procedimiento de clorización y se reducen los costos, podría ser un procedimiento interesante [51]. Se han cerrado las plantas de prueba que estaban en funcionamiento [51].

La reducción carbotérmica directa de arcillas pobres en hierro para transformarlas en una aleación Al-Si es viable y podría ser un procedimiento practicable.

El procedimiento Kuwahara consiste en la briquetación de minerales aluminosos (por ejemplo, bauxita o arcilla con algo de alúmina Bayer añadida) con coque, su reducción a una aleación Al-Si-Fe-Ti en un reactor que combina combustión y calentamiento el arco eléctrico a 2.000 °C, la separación del aluminio por extracción utilizando plomo como solvente, seguida de la destilización al vacío de la fase rica en aluminio. Los costos se han estimado en 1.000 dólares EE.UU./t aproximadamente [52]. La planta de alúmina de Mitsui construyó una instalación de prueba bastante grande, pero recientemente se han interrumpido los experimentos.

### 3. SEMIMANUFACTURACION

#### 3.1 Consideraciones generales

Aunque las operaciones tecnológicas básicas de la fabricación de productos semimanufacturados (colada semicontinua, laminación, colada continua, extrusión, embutición, forja, moldeo en matriz) vienen evolucionando desde hace muchos decenios, desde entonces se ha mejorado sustancialmente el nivel de productividad y tecnológico. Una innovación más reciente es la fabricación, relativamente difundida, de productos pulvimetalúrgicos, aunque las tecnologías básicas en este ámbito son las mismas que se vienen utilizando durante decenios en la transformación de otros metales y aleaciones.

A continuación se ofrece un resumen de las tendencias que prevalecen en el desarrollo de las principales tecnologías; en él se indican las referencias a la bibliografía sobre la materia y se sigue la estructura general del capítulo anterior.

### 3.1.1 Colada continua

Al igual que en años anteriores, la mayor parte de la colada continua se realiza con equipo diseñado por Properzi de Italia, SCR (Southwire Continuous Rod) de los Estados Unidos, SECIM de Francia y tipos manufacturados en la Unión Soviética.

Una característica especial de los avances recientes es el aumento de la productividad (aumento del diámetro de las bobinas). En lo que atañe a la colada continua de bandas anchas y delgadas se ha dedicado especial atención a mejorar la calidad y ampliar la gama de aleaciones fabricadas con esa técnica.

### 3.1.2 Fundición de tochos y desbastes

Las tecnologías efectivas utilizadas en la fundición de tochos y desbastes determinan fundamentalmente la calidad y las características de los productos semimanufacturados.

En las operaciones preliminares se ha impuesto la utilización del filtrado. En el Anexo 34 se ofrece una descripción del equipo y su empleo. El diseño y la implantación de filtros de alto rendimiento más modernos se prevén para un futuro no demasiado lejano [53].

En cuanto a la colada semicontinua, la utilización de moldes provistos de revestimientos termoaislantes representa una novedad relativamente reciente y hoy día ya muy difundida. El objetivo principal en esta técnica es

la disipación controlada del calor, gracias a la cual se pueden obtener tochos y desbastes de alta calidad. Los procedimientos y el equipo correspondientes están descritos en el Anexo 35.

Hoy día existen ya fabricantes (por ejemplo ALCAN) que han implantado el control computadorizado de las técnicas convencionales de colada semicontinua de tochos y desbastes; al trabajar con parámetros óptimos, se obtienen tochos y desbastes homogéneos, de gran tamaño y excelente calidad.

Kaiser Aluminum Company ha creado un procedimiento de fundición para ciertas aleaciones susceptibles de fisuración. El sistema consiste en una escobilla inflable en el molde, que elimina el agua de los tochos y desbastes en puntos críticos; la tasa de enfriamiento sólo es intensiva hasta los 320 °C [54].

En un procedimiento creado por British Aluminium Company para la fundición de desbastes, la posición de las inserciones termoaislantes dentro del molde es variable y facilita así la automatización del proceso. (De ahí su nombre: Variable Chill Depth Mould [VCDP] System, o Sistema de molde con profundidad de enfriamiento variable) [55].

En el caso de aleaciones de elevada resistencia y difíciles de moldear se utilizan moldes electromagnéticos. Este método elimina las operaciones de desbarbado y rectificado de la superficie de los tochos y desbastes y permite reducir también los tiempos de homogeneización [56].

Las tecnologías de fundición avanzadas permiten obtener rendimientos de aproximadamente el 90%, economizar energía y manejar aleaciones de elevada resistencia y difícil tratamiento.

### 3.1.3 Moldeo

En esta esfera se observa una marcada tendencia hacia la reducción del espesor de las paredes, especialmente en el caso del moldeo a elevada presión. Cada vez son más las máquinas de moldeo a elevada presión que van equipadas con sistemas de vacío, y se está imponiendo gradualmente el sistema de sopladura de oxígeno. Se han obtenido buenos resultados en ensayos encaminados a controlar la tasa inyección del metal. En las fundiciones más modernas se utilizan asimismo robots, que aumentan la productividad y mejoran la calidad de las piezas.

Un procedimiento novedoso consiste en extruir metal líquido y enfriarlo a elevada presión (fundición por extrusión, reofundición) [57] [58].

### 3.1.4 Laminación

La investigación realizada en los últimos tiempos se ha orientado en primer lugar a incrementar los rendimientos, mejorar la calidad y lograr uniformidad en el producto. Con vistas a ese objetivo se está imponiendo progresivamente el control electrónico de las cajas del laminador y del equipo auxiliar, lo que permite reducir al personal que lo atiende. En lo que respecta a productos laminados semiacabados se observa asimismo una marcada tendencia hacia especificaciones más complejas (elevada resistencia, estrecho margen de tolerancias, etc.).

### 3.1.5 Extrusión

En lo que concierne a las técnicas de extrusión no hay ningún cambio espectacular que reseñar, aunque se ha progresado considerablemente en algunas operaciones

concretas del procedimiento convencional, sobre todo en las técnicas de control. Actualmente existe la posibilidad de satisfacer la demanda de productos de resistencia mecánica más elevada, junto a una reducción del grosor medio de las paredes. Por otra parte, un porcentaje creciente de la producción se suministra hoy día con acabado de la superficie. En lo referente a los procedimientos utilizados, se prevé que la extrusión directa conserve a medio plazo su posición dominante, aunque puede que la extrusión inversa, pese a la mayor complejidad en el diseño de las prensas, pase a desempeñar un papel más central gracias a sus mejores propiedades de rozamiento.

A plazo corto puede tener buenas perspectivas la extrusión de piezas pequeñas por el procedimiento de conformación [59] [60]. Se trata de una tecnología barata, con la ventaja de que al aprovechar la fuerza de rozamiento existente el proceso de extrusión se puede tornar continuo. De esa manera es posible fabricar perfiles y formas de paredes delgadas a partir de secciones transversales relativamente pequeñas. En el Anexo 36 se muestra un diagrama del proceso. En principio, el procedimiento de extrusión conforme sirve también para fabricar barras mediante la extrusión continua de polvos.

El control electrónico del proceso de extrusión, además de mejorar la productividad y el rendimiento, reviste importancia capital a la hora de conferir al producto propiedades homogéneamente distribuidas, porque si las condiciones de funcionamiento son otras puede que no se llegue o que se llegue muy tarde a un estado "cuasi-estacionario".

### 3.1.6 Forja

Los avances técnicos en esta esfera son poco llamativos dado que la demanda de piezas forjadas en el mercado es relativamente modesta.

Las tecnologías actuales tratan de aproximarse lo más posible a las formas y dimensiones finales con objeto de lograr productos listos para su uso.

### 3.1.7 Otras tecnologías

Una de las tecnologías más fundamentales en la manufacturación en masa -sobre todo en el caso de diseños de cierta complejidad- es la pulvimetalurgia. En el sector del aluminio se implantó a escala industrial en el decenio pasado, especialmente en los países con gran producción de automóviles.

En ese ámbito cabe prever nuevos progresos en el futuro, especialmente en aquellos casos en que las tecnologías convencionales no pueden proporcionar las propiedades exigidas (las así llamadas "pseudoaleaciones", materiales compuestos).

### 3.1.8 Avances en el ámbito de las aleaciones y la microestructura de los productos

Las tecnologías de la semimanufacturación y el comportamiento de los elementos constituyentes de las aleaciones determinan de un modo interrelacionado la microestructura de un producto y por consiguiente sus propiedades.

Las nuevas soluciones tecnológicas en la fundición y el filtrado, una combinación convenientemente calculada de las operaciones de conformación y tratamiento térmico y la satisfacción de la demanda de clientes y consumidores

han contribuido a mejorar notablemente las propiedades del producto final, que en el momento actual se aproximan más a las expectativas generales. Gracias a esos esfuerzos denodados y a los buenos resultados obtenidos cabe afirmar que el concepto de productos semimanufacturados "a la medida" está cerca de hacerse realidad [61].

La combinación efectiva de tratamiento térmico y conformación (tratamiento termomecánico) redundará no sólo en ahorros de energía sino también en la obtención de una microestructura con propiedades superiores a las de los productos usuales.

Una tendencia nueva en el ámbito de las aleaciones es la combinación Al-Li-X, donde "X" es otro elemento de la aleación. Se utiliza hoy día con bastante frecuencia en la industria aeronáutica y la tecnología espacial.

### 3.2 Transformación de semimanufacturas de aluminio

#### 3.2.1 Papel de aluminio

Actualmente existe una marcada tendencia a reducir el espesor del papel de aluminio e implantar métodos automáticos para controlar y comprobar espesores. Los esfuerzos se centran en aumentar las velocidades de laminación, un aspecto que exige mayor desarrollo técnico en el diseño de equipo y tecnología, junto a modificaciones de las propiedades de la materia prima.

#### 3.2.2 Acabado de la superficie

Las tendencias de la demanda apuntan hacia productos con superficies más agradables y una mayor resistencia de los recubrimientos y películas superficiales. Otro objetivo es el aumento de la productividad, aunque siempre dentro de las normas de protección ambientales.

F. OPCIONES TECNOLOGICAS MAS IDONEAS PARA LOS PAISES  
EN DESARROLLO

1. RESUMEN TECNICO

En los Capítulos D y E se indicó que la extracción de bauxita, su refinación en alúmina y la fabricación del metal por electrólisis son tecnologías bien establecidas. Aunque son procedimientos que están experimentando un perfeccionamiento constante, no se prevén cambios fundamentales para antes de finales de siglo. Los recursos de bauxita que se conocen en el momento presente no constituirán un factor limitante para el crecimiento futuro de la industria del aluminio [48]. La aplicación de métodos modernos de teledetección podrían facilitar la identificación de nuevos yacimientos de mineral, especialmente en los países en desarrollo. No obstante, la transformación de bauxitas de baja calidad y materiales no bauxíticos en aluminio podría revestir importancia en algunos países que quizá quieran transformar la materia prima con que cuentan [48].

El aspecto energético predomina tanto en la producción como en el consumo de aluminio y determina la tendencia evolutiva [48]. Ese factor y la mejor explotación de los bienes de capital -debido a su costo creciente- son los promotores del desarrollo de los procedimientos Bayer y Hall-Hèroult. Al margen del factor climático no existe ninguna limitación técnica para utilizar esos procedimientos en cualquier lugar, ya sea en su forma actual o en formas más perfeccionadas; la única condición es que el país de que se trate pueda hacer funcionar y mantener las instalaciones construidas, porque al diseñar la planta se hace una elección razonable de la automatización y la mecanización y se prevé una capacitación adecuada del personal.

Debido a la importancia cada vez mayor de la protección del medio ambiente, las nuevas plantas de fundición de aluminio son del tipo de ánodos precocidos con utilización de alúmina arenosa. Por ese motivo, las plantas de nueva construcción se basan en la producción de ese tipo de alúmina, mientras que algunas de las antiguas -caso de no fabricar ya alúmina arenosa- están siendo transformadas para fabricar esa variedad de alúmina. La mayor parte de los países en desarrollo poseen bauxita del tipo trihidrato, materia prima que no plantea ningún problema para la fabricación de alúmina arenosa.

La evolución en la fabricación de productos semimanufacturados parece más dinámica. Aunque los métodos básicos de producción son bien conocidos desde hace decenios, los avances recientes han estado constantemente presididos por la eficiencia de los procedimientos y la fabricación de productos con parámetros de calidad cada vez más elevados. El éxito del aluminio en su competencia con otros materiales depende de la mejora constante de las propiedades de sus productos semimanufacturados a fin de satisfacer mejor los múltiples requisitos del usuario final. Ese objetivo y la mayor rentabilidad de la producción son las principales tendencias del desarrollo en esa esfera. Por consiguiente, a la hora de construir instalaciones de fabricación reviste una importancia esencial el diseño idóneo de la mezcla de productos.

La capacidad de las instalaciones desempeña un papel importante en la economía de la producción. Como ya se mencionó en el Capítulo D, el nivel de capacidad de las plantas de alúmina pasó de 120.000-150.000 t/a a 300.000-500.000 t/a por línea de producción. De ahí que la capacidad de las plantas sobrepase frecuentemente el millón de t/a. En el otro extremo, se están construyendo actualmente plantas de fundición con capacidades de

aproximadamente 100.000 a 300.000 t/a; la capacidad real depende de la capacidad de la línea de producción.

Sin embargo, las capacidades apuntadas para las plantas de alúmina y las plantas de fundición no siempre coinciden. Habida cuenta que se necesita aproximadamente 1,95 t de alúmina para producir una tonelada de metal, una planta de alúmina de 600.000 t/a exigiría una planta de fundición de aproximadamente 300.000 t/a para absorber su producción. Muchas veces no existe posibilidad alguna -por diversas razones, como por ejemplo la falta de energía eléctrica o de recursos financieros- de construir un complejo de ese tipo en un solo lugar. En esos casos es preciso que la planta de alúmina disponga de más de una planta de fundición para absorber la producción: una ubicada cerca y la otra u otras, más lejos. En otros casos se podrán aceptar soluciones de transacción, y el factor primordial en la decisión de inversión sería la rentabilidad de la planta integrada. Otra solución es instalar por ejemplo una sola línea de producción en la planta de alúmina, con la intención de ampliarla más tarde. Sin embargo, es importante tener ya previsto el consumidor de la alúmina antes de adoptar la decisión de construir una planta, porque la alúmina de calidad metalúrgica sólo se puede utilizar para transformarla en aluminio en una planta de fundición.

Las reservas de bauxita desempeñan también un papel importante a la hora de decidir sobre la capacidad de una planta de alúmina. Una capacidad nueva de 600.000 t/a debería contar con una reserva de 50 a 60 millones de toneladas de bauxita como mínimo, lo que permitiría que la planta funcionara durante 30 años como mínimo.

El dimensionamiento de las líneas de semimanufactura es un asunto aún más complejo. Hay productos semimanufacturados cuyo transporte sólo resulta rentable dentro de zonas muy limitadas, aunque

afortunadamente son productos que se pueden fabricar en plantas de capacidad relativamente pequeña. Es lo que normalmente ocurre con los productos extruidos, para los que pueden ser rentables las plantas de producción de 1.000 a 3.000 t/a. En el otro extremo están los productos laminados, que se pueden transportar a grandes distancias pero exigen capacidades de producción mucho mayores para que sean rentables. Las instalaciones de fusión-laminado pueden tener capacidades menores y ser viables hasta las de 10.000 t/a. Sin embargo, las líneas de producción de ese tipo tienen que funcionar en conjunción con una planta de fundición; el espectro de semimanufacturas que se puede lograr con ese tipo de equipo es menor que con los trenes de laminación usuales y no es posible fabricar algunos productos de aluminio hiperaleado. El nivel de producción mínimo para trenes de laminación rentables -independientes de una planta de fundición -es mucho mayor, de 40.000 t/a como mínimo; y la rentabilidad es proporcional a la capacidad. Los trenes de laminación en frío admiten una capacidad de producción menor que los laminadores en caliente. Lo ideal, sin embargo, es disponer de ambos en la misma planta, porque si no es necesario transportar el producto intermedio hasta la planta de laminación en frío; pero también es una práctica común instalar plantas de laminación en frío para la transformación de bobinas. En lo que atañe a los niveles de capacidad viables de otras instalaciones de semimanufacturación se remite al Capítulo D 4.

La mayoría de las plantas de laminación están ubicadas en el centro de consumo y abastecen a zonas relativamente amplias. En cambio, las instalaciones de extrusión suelen ubicarse más cerca de los clientes, por razones de transporte.

La ubicación de las instalaciones de manufacturación de productos acabados depende del tipo de

producto y de la tecnología utilizada. En el caso de productos acabados con un contenido predominante de aluminio se puede realizar una campaña especial de comercialización y promoción. La fabricación de alambre y cable, las instalaciones para la fabricación de utensilios de cocina o similares, contenedores y ciertos productos de aluminio destinados a la industria de la construcción son algunos ejemplos característicos. En la mayoría de los casos, el establecimiento de esas instalaciones depende únicamente del mercado, los precios del producto dentro del país y la tecnología elegida, mientras que la producción nacional de otros tipos de productos acabados depende en mayor medida del nivel general de desarrollo de la zona de que se trate.

## 2. ALGUNAS CONSIDERACIONES ECONOMICAS

En el Capítulo C se mencionó, ya que la industria del aluminio está experimentando ciertas tendencias a la reubicación, que probablemente persistirán en el futuro. Sin embargo, los motivos de esa reubicación son múltiples. Cuando empezó a ser imposible seguir cubriendo la demanda de aluminio con la bauxita disponible en los países desarrollados, se comenzó a utilizar los recursos de materias primas de los países en desarrollo. Inicialmente se optó por enviar la bauxita a las plantas de alúmina ya existentes; posteriormente se construyeron plantas nuevas en las proximidades de las minas en los países en desarrollo. El paso siguiente es instalar una planta integrada en el lugar donde se halla el yacimiento de bauxita, siempre y cuando se disponga allí de energía eléctrica relativamente barata. En ese caso se transporta el metal hasta los consumidores.

Del análisis de la actual situación de la industria del aluminio en todo el mundo cabe extraer la conclusión

de que en el próximo decenio podría acentuarse la tendencia a la reubicación geográfica de esta industria.

Los siguientes factores podrían avalar esa opinión:

- la existencia de un importante nivel de capacidades inutilizadas en las plantas de refinación, fundición y fabricación,
- la evolución desfavorable de la demanda de aluminio en los principales mercados, pese al bajo nivel de precios actual,
- la participación decreciente de los metales, entre ellos el aluminio, en los costos unitarios de la producción industrial como consecuencia de cambios estructurales,
- el aumento de la competencia de otros materiales, en particular de los plásticos, que podría acentuarse aún más por la evolución de los precios del petróleo,
- el reciclado y la aplicación de aleaciones de elevadas características, que reducen la demanda de metal primario,
- el establecimiento, como consecuencia de los cambios estructurales que se han operado mundialmente en la industria, de una pauta posiblemente nueva de evolución de la economía de los países en desarrollo, quizá con menos necesidad de materiales y con una mezcla que se desvía fuertemente de lo que indican las correlaciones establecidas.

Los fenómenos que se acaban de apuntar permiten afirmar que las actuales dificultades de la industria del aluminio no son de carácter temporal sino que muy probablemente persistirán durante la primera mitad del próximo decenio como mínimo. Esa situación lleva asimismo a la conclusión de que las actividades de refinación y fundición se concentrarán cada vez más en importantes

complejos industriales ubicados en los lugares más favorables, que en su mayor parte están en los países en desarrollo.

En el Anexo 37 se muestra la distribución regional de la estructura de la industria del aluminio por continente en 1983-1984, así como pronósticos para el futuro. Se observa claramente que una porción considerable de la bauxita procede de regiones en las que su transformación en alúmina y aluminio es relativamente pequeña, aunque en la América Latina, por ejemplo, está aumentando la proporción de bauxita refinada localmente. No se ha observado ninguna tendencia similar para Africa.

En el Anexo 37 se observa también claramente que la actual reubicación de la industria del aluminio concierne únicamente a la producción de alúmina y aluminio. Su objetivo es reducir los costos de la energía y el transporte. El proceso no afecta por el momento a la semimanufacturación, que en los países desarrollados está ubicada principalmente en las proximidades del consumidor. Por otra parte, pese al aumento de la producción de aluminio en Oceanía, no se han podido detectar proyectos de importancia para el desarrollo de la semimanufacturación en ese continente.

La producción de alúmina y aluminio entraña procesos altamente productivos que requieren niveles elevados de capital, energía, mineral y materias primas; para la semimanufacturación se necesita básicamente capital, mano de obra y metal. El precio medio de los productos fabricados puede llegar a ser el doble del del lingote, por lo cual merece la pena prestar especial atención a las posibilidades de que los países en desarrollo participen más en ese proceso.

El consumo de aluminio es un punto crítico de cara a las posibilidades de desarrollo de la industria del aluminio en los países en desarrollo. En el Capítulo D 4

se mencionó ya que existe una correlación empírica entre el consumo de aluminio y el PNB. Sin embargo, no es el único factor determinante, y se impone cierta cautela y flexibilidad, dentro de límites razonables, al utilizar las conclusiones extraídas de la correlación entre el PNB y el consumo de aluminio. La disponibilidad de fuentes propias de aluminio dentro del país, junto a una actividad suficiente de promoción, por ejemplo, podría resultar en un consumo de aluminio mayor de lo previsto pero aun así barato, como demuestran los casos de varios países (por ejemplo Francia, Hungría, Venezuela). Aunque la existencia de una industria nacional del aluminio puede tener efectos positivos, hay también países, como Hong Kong y Corea del Sur, que consumen cantidades notables de aluminio (de 3 a 5 kg/habitante/a) sin poseer bauxita alguna. En esos países se han instalado recientemente elevadas capacidades de semimanufactura [10]. Por otra parte, en la India o Indonesia, donde existen grandes reservas de bauxita y, en el primer caso, una producción de aluminio bien desarrollada, el consumo específico es muy pequeño, incluso inferior a 0,5 kg.

Como ya se menciona en el Capítulo C, para los años 1990-1993 se prevé un aumento del consumo de aluminio (véase el Anexo 7). La tasa de crecimiento anual prevista es por término medio del 4,2% para los países con economía de mercado. Sin embargo, es inferior a ese promedio en los Estados Unidos y Europa, es decir, las zonas de gran consumo del mundo. El único país de esa región para el que se prevé una tasa de crecimiento superior al promedio es Francia. Se prevé que la tasa de crecimiento sea superior al promedio mundial en el Japón (4,8%) y en el resto del mundo (5,4%). Eso significa que el consumo aumentaría considerablemente en los países en desarrollo, pero muy probablemente no en los países menos adelantados, circunstancia que podría influir en las tendencias de

- [26] Selected from the data in an unpublished study of James F. King on trends of the alumina market /1983/.
- [27] Lopez, F.A.: Critical Parameters Affecting the Management and Economics of Alumina Production- UNIDO 446/4 14. Aug. 1985.
- [28] Paine Webber: World Aluminium Dynamics.- New York May 1985.
- [29] Zámbo, J.: Bauxite and Alumina Production, Historical retrospection, review of the present situation and prognosis. UNIDO ID/WG 273/9.- 1978.
- [30] Zámbo, J.: personal communication
- [31] UNIDO: Study on the disposal and utilization of Bauxite residues /Final Report/. ALUTERV-FKI - Budapest, Oct. 1980.
- [32] Kumar, R.: Status of the semi products aluminium industry in some developing countries. UNIDO draft report 1981.
- [33] Domony, A.: Aluminium fabricating industry and aluminium consumption in the Near East and North Africa, Magyar Aluminium 16. 1979, 7-8. pp 240-243.
- [34] The economic use of aluminium. Development and Transfer of Technology Series No 21. UNIDO 1985., New York
- [35] Bokor, A.; Domony, A; Varga, I.: The economic use of aluminium, UNIDO/ ID.335 1979.
- [36] 1983 World Bank Atlas, Washington 1983.
- [37] World Metal Statistics, 1985 Oct.
- [38] European Aluminium Statistics, 1984, Aluminium Zentrale
- [39] Hungarian Aluminium Statistics, 1985, Budapest
- [40] Gazda, I.: A világ alumíniumipara. /aluminium industry of the World/ ALUTERV-FKI, 1985. Budapest.

- [41] Domony,A; Várhelyi,R: Some considerations on the development of aluminium semiproducts manufacturing industries. The Second Arab Aluminium Conference, Cairo, 1985.
- [42] Domony,A; : Guidelines for processing aluminium semi-fabricated products. UNIDO/I.C.619 1985.
- [43] Bánfy,A: Prognostication of world aluminium production for 1990-1995., Magyar Aluminium 20 /1982/, pp 24-29.
- [44] Hertwich,G: Kompakt-Umschmeltzanlage für die kontinuierliche Herstellung von Strangpressbaren aus Kreislaufschnitt und Rohmetall. Aluminium /Düsseldorf/ 60. /1984/ 6 pp 436-439.
- [45] Altenpohl,D: Materials in World Perspective, Springer Verlag, Heidelberg, New York 1980, pp 153-154.
- [46] Zilges,F.J.: Aufbau und Arbeitsweise einer neuen Indirekt-Strang und Rohrpresslinie für Aluminium. Aluminium /Düsseldorf/ 60 /1984/6. pp 424-430
- [47] Varga,I; Fülöp,S: Establishing of aluminium finished product industries in developing countries., Magyar Aluminium 21/1984/ 7-8., pp. 281-286.
- [48] Statements of the Scientific Committee of the Alumina Production until 2000, ICSOBA Symposium held at Tihany /Hungary/ Oct. 1981 /unpublished/.
- [49] Zambó,J: Development trends in the alumina production. Presented at a UNIDO Workshop at Kingston, Jamaica in June 1985.
- [50] USP 4.082.833
- [51] Gardner,H.H-Grjotheim,K.-Welch,B.J: Recent results and expectations for aluminium extraction via  $AlCl_3$  electrolysis /Alumina Production until 2000, ICSOBA Symposium at Tihany, Oct 1981./ pp 27-42.

- [52] Brondyke, J: The Aluminium industry in 1982 and outlook for the 80's., J. of Metals, April 1983.
- [53] Apelian, D, Mutharasan, R : Commercially Available Porous Media for Molten Metal Treatment: A property evaluation.- Light Metals 1982., Proceedings of 111th AIME Annual Meeting, Dallas. Feb. 1982. pp 935-968.
- [54] Dassel, J.L, Zininger, T.C: Sheet ingot casting with inflatable wipers.- Light Metals 1983., Proceedings of 112th AIME Annual Meeting, Atlanta March 1983. pp. 793-801.
- [55] Wilkins, R.F.T: The variable chill depth mould system. Light Metals 1983. Proceedings of the 112th AIME Annual Meeting, Atlanta, March 1983. pp. 901-930.
- [56] Goodrich, D.G; Dassel, J.L; Shogren, R.M: Kaiser Aluminum. Plant implementation of electromagnetic casting. Light Metals 1982. Proceedings of the 111th AIME Annual Meeting, Dallas, Feb. 1982., pp 781-791
- [57] Weinberg, F: Squeeze Casting Solidification Technology in the Foundry and Cast House /Conf. Proc./ Coventry, England, Sept. 1980., pp. 131-136.
- [58] Duckworth, W.F: The Challenge to the Materials Technologist, 4 /1984/ 6. pp. 924-930.
- [59] Prados, J.A: Conform continuous extrusion process - its contribution to energy conservation. Metals Technology, 11 /1984/ p.358.
- [60] Langerweger, J; Maddock: The conform process: a further development in continuous extrusion. Schweizer Maschinenmarkt. 84 /1984/ pp. 37-39.
- [61] Furrer, P: Modern trends in aluminium alloy development. Aluminium /Düsseldorf/ 59 /1983/ pp. 913-916.

- [62] Processing and marketing of bauxite/alumina/aluminium. Areas for international cooperation. UNCTAD 1981. TD/B/C.1/PSC/19.
- [63] Mineral Processing in Developing Countries. UNIDO. ID.253. New York 1980.
- [64] Székely, G.A: An alternative to chlorine fluxing of aluminium: The SNIF process. Proceeding of second International Extrusion Technology Seminar., Atlanta., Nov.1977.
- [65] Hicter, J.M: ALPUR refining process. Light Metals 1983. Proceedings of 112th AIME Annual Meeting Atlanta, March 1983. p.1005.
- [66] Luchinger, J; Willemin, G: MINT - a new system for the on-line treatment of liquid aluminium. Revue d'Aluminium. 510. /1981/ p. 393-395.
- [67] Gariépy, B; Dubé, G; Simoneau, C; Leblanc, G: The TAC process. a proven technology. Journal of Metals 36. /1984/ 11. p. 42-44.
- [68] Dubé, G; Newberry, V.J: TAC - A novel process for the removal of lithium and other alkalis in primary aluminium. Light Metals 1983. Proceedings of 112th AIME Annual Meeting. Atlanta March 1983. p. 991-1003.
- [69] U.S patent 3.381.741
- [70] Sekiguchi, T; Mitamura, R; Fukuda, S: Light Metals 1981. Proceedings of 110th <sup>AIME</sup> Annual Meeting. Chicago. Feb.1981. p. 871-883.
- [71] Wagstaff, F.E; Keeler, R: Hot top casting at Reynold's Massena Plant. Light Metal Age 1982. 8. p. 11.
- [72] Satebin, R; Haller, W: Industrial application of electromagnetic casting of aluminium. Light Metal Age 43. /1985/ 7-8. p. 14-16.

Annex 1

CONCEPT OF A METHODOLOGY FOR DEFINING APPROPRIATE  
TECHNOLOGY

Extracted from Biritz [5]

In a simplified form, considerations for defining appropriate industrial manufacturing technologies should proceed in the following sequence:

- (a) define the product in technical terms; if more than one product variation is possible, identify and describe each;
- (b) determine the markets for each product variety assuming several, reasonable price levels, and establish an order of "preliminary preferences" between the various products. Other aspects of social acceptability must also be taken into account.
- (c) identify and list all process technologies for manufacturing the products;
- (d) identify which process alternatives look most advantageous as regards (i) raw material availability; (ii) capital investment; (iii) labor utilization; (iv) ease of operation and maintenance; etc;
- (e) define the exact economic parameters for the plant (i.e. expected profitability, available subsidies, etc.);
- (f) determine all envisaged mandatory socio-political constraints (i.e. plant location, labor hours, environmental issues, etc.) and estimate the resulting added costs;
- (g) determine the availability of manpower to operate the plant and its level of qualifications;
- (h) review various process possibilities in the light of raw materials availability, economic, socio-political and manpower constraints and select one or more processes showing greatest promise in most requirements;
- (i) break-down selected processes into individual process steps and determine which of those can be modified to

minimize investment and operating costs, including allowing maximum labor utilization, if this is desired;

- (j) define optimum plant size to achieve desired production rates within the context of the required, detailed feasibility study;
- (k) finally, the detailed feasibility study should identify clearly all key assumptions and critical input needs (e.g. training of personnel) for successfully operating the plant after it has been built.

**ALUMINIUM CONSUMPTION**

1973 - 83  
thousand tons

**1. Total world consumption (primary + secondary)**

	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
World less CPE	13787	13901	11065	13958	14463	15334	16141	15572	15117	14861	16355
CPE countries	3020	3550	3500	3750	3900	4100	4175	4135	4115	4180	4245
<b>Total</b>	<b>16809</b>	<b>17451</b>	<b>14565</b>	<b>17708</b>	<b>18363</b>	<b>19434</b>	<b>20316</b>	<b>19707</b>	<b>19232</b>	<b>19041</b>	<b>20600</b>

**2. Consumption of primary aluminium**

World less CPE	11189	11269	8619	11095	11366	12027	12618	11969	11318	10948	12124
CPE countries	2578	2763	2840	3024	3175	3316	3374	3321	3301	3336	3342
<b>Total</b>	<b>13767</b>	<b>14059</b>	<b>11459</b>	<b>14119</b>	<b>14541</b>	<b>15343</b>	<b>15992</b>	<b>15290</b>	<b>14619</b>	<b>14284</b>	<b>15466</b>

**3. Consumption of secondary aluminium**

World less CPE	2598	2705	2446	2863	3097	3307	3523	3603	3799	3913	4231
CPE countries	444	687	660	726	725	784	801	814	814	844	903
<b>Total</b>	<b>3042</b>	<b>3392</b>	<b>3106</b>	<b>3589</b>	<b>3822</b>	<b>4091</b>	<b>4324</b>	<b>4417</b>	<b>4613</b>	<b>4757</b>	<b>5134</b>

Note: Primary consumption of World less CPE countries in 1984: approx. 12450 th.tons

Reference: [6]

Annex 3

CAPACITIES OF METALLURGICAL GRADE ALUMINA PLANTS PER  
CONTINENT IN 1984  
in Thousand tons

Europe (including Yugoslavia and Turkey but excluding CPE countries)	6445
Europe (CPE countries)	6755
North America	7105
Latin America	6070
Oceania	9110
Far-East (excluding CPE countries)	2772
CPE countries of Asia	920
Near-East	-
Africa	700
Total	<hr/> 39877

Reference: [9]  
(partially revised)

Annex 4

ALUMINIUM SMELTER CAPACITIES PER CONTINENT  
IN 1984  
in Thousand tons

Europe (including Yugoslavia and Turkey but excluding CPE countries)	4008
Europe (CPE countries)	3735
North America	5933
Latin America	1059
Oceania	847
Far-East (excluding CPE countries)	1292
CPE countries of Asia	569
Near-East	377
Africa	622
Total	<hr/> 18432

Reference: [9]  
(partially revised)

ALUMINIUM SEMI-FABRICATION CAPACITIES PER CONTINENT  
IN 1983  
in Thousand tons

Europe (including Yugoslavia and Turkey but excluding CPE countries)		5103.5
Europe (CPE countries)	appr.	3500.-*
North America		7910.5
Latin America		653.5
Oceania		322.5
Far-East (excluding CPE countries)		2667.6
CPE countries of Asia	appr.	570.-*
Near-East		160.6
Africa		239.9
Total		<hr/> 21127.9

Notes: \* estimated

- only primary semi-fabrication taken into consideration, i.e. only hot-rolling, but not cold-rolling and no foil capacities; extrusion and rod-manufacturing capacities included, but not wire manufacturing.  
Does not include casting capacities!

Reference: [10] (partially revised), [40]

# Aluminium's Supply Curve - 1985

105

95

85

75

65

55

45

35

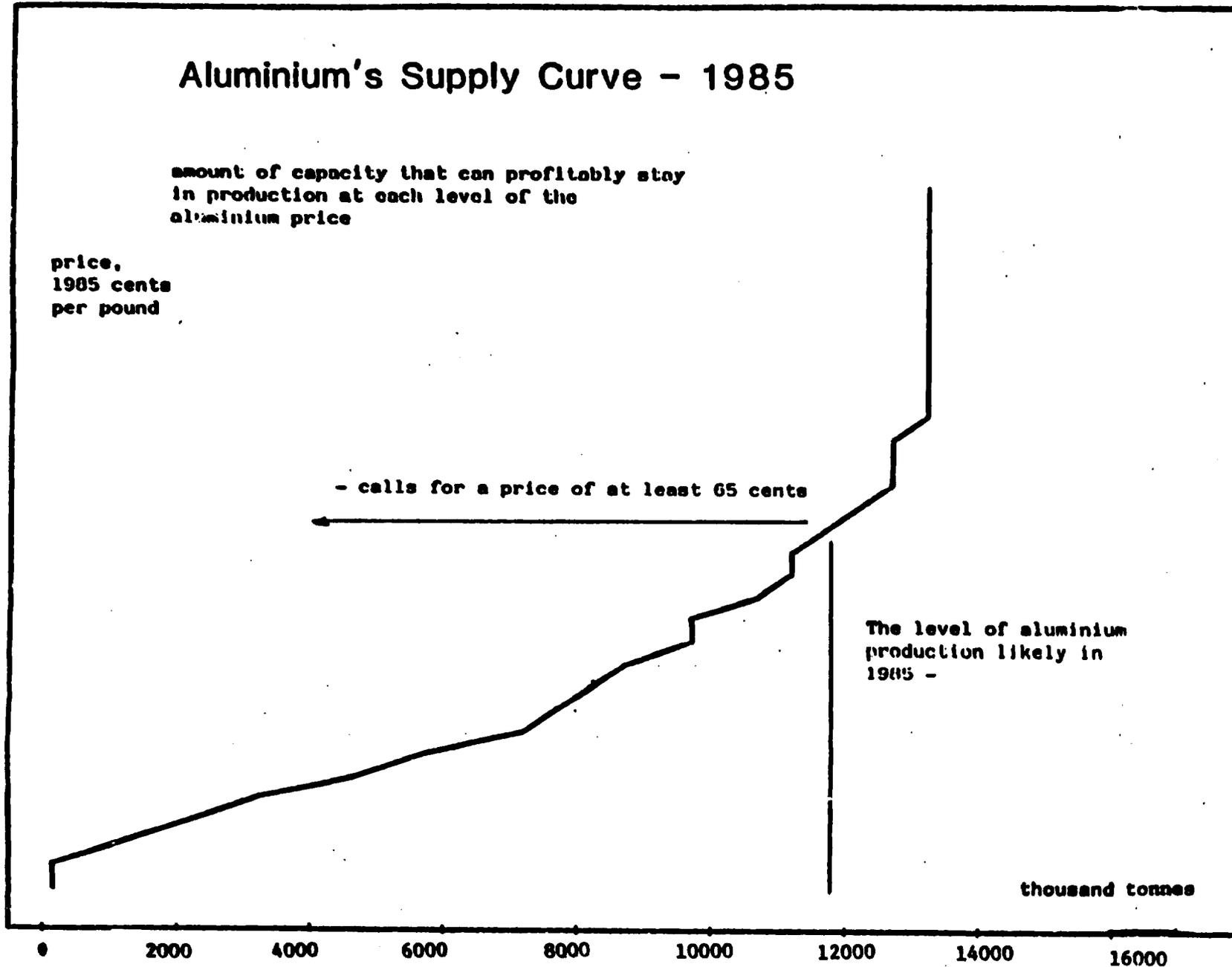
amount of capacity that can profitably stay  
in production at each level of the  
aluminium price

price,  
1985 cents  
per pound

- calls for a price of at least 65 cents

The level of aluminium  
production likely in  
1985 -

thousand tonnes



Annex 7

EXPECTED ANNUAL GROWTH OF RATES  
1990-93

	in industrial production	in aluminium consumption
USA	4.6 %	4.0 %
Japan	5.8 %	4.8 %
France	4.8 %	4.8 %
Germany	3.8 %	3.1 %
Italy	4.8 %	3.8 %
UK	3.4 %	-0.2 %
Other Europe*	4.1 %	3.8 %
Europe total*	4.1 %	3.4 %
Rest of world*	no data given	5.4 %
World*	4.6 %	4.2 %

Note: \* MEC-s only

Reference: [8]

WORLD BAUXITE RESOURCES, CLASSIFIED ACCORDING TO THEIR STATE OF DEVELOPMENT

Country/continent	Identified Resources				Total	Undiscovered resources
	Developed		Reserves	Undeveloped		Hypothetical Speculative
	Mineable reserves	Potential ores		Potential ores		
Australia	1,215	2,175	1,030	1,980	6,400	
Guinea	1,210	250	3,345	13,990	18,795	
Cameroon	-	-	680	1,320	2,000	
other Africa	50	-	720	1,885	2,655	
Africa	1,260	250	4,745	17,195	23,450	
Brazil	620	-	850	3,030	4,500	} > 50,000
Jamaica	1,800	-	-	600	2,400	
Surinam	200	-	200	1,570	1,970	
Guyana	90	250	-	820	1,160	
other America	65	5	295	2,325	2,690	
America	2,775	255	1,345	8,345	12,720	
India	50	-	1,070	1,495	2,615	
Indonesia	40	40	500	500	1,080	
other Asia	35	5	160	790	990	
Asia	125	45	1,730	2,785	4,685	
Europe	805	345	-	325	1,475	
Western World	6,180	3,070	8,850	30,630	48,730	
State trade countr.		not classified			1,960	
World Total					50,690	> 50,000

Reference: [15]

Annex 9

CLASSIFICATION SYSTEM FOR BAUXITE RESOURCES

---

R e s o u r c e s			
Developed		Undeveloped	
Mineable Reserves	Potential Ores	Reserves	Potential Ores

---

Definitions:

Resources: Concentration of bauxite in or on the Earth's crust in such form that economic exploration is currently or potentially feasible. Resources = Reserves + Potential Ores.

Developed Resources: Bauxite deposits/areas currently under exploitation.

Undeveloped Resources: Known bauxite deposits/areas of bauxite, from which an economical exploitation can be expected in future.

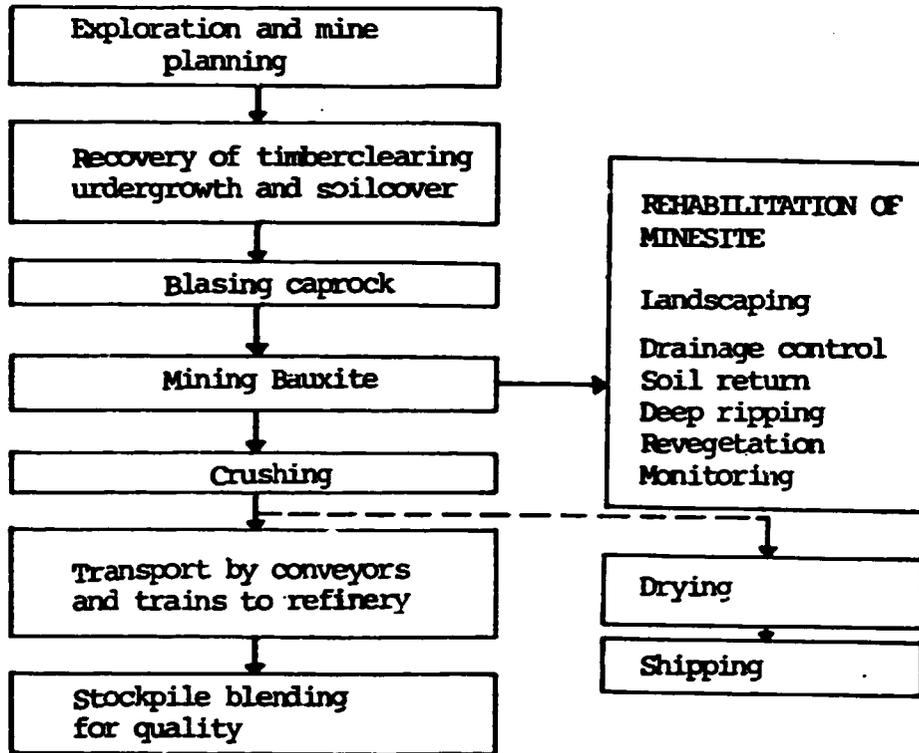
Reserves: That portion of resources from which bauxite is currently economically exploited under existing conditions, including cost, quality, geologic evidence and technology (category: Mineable Reserves of Developed Resources) or economical exploitation will be expected in future (category: Reserves of Undeveloped Resources).

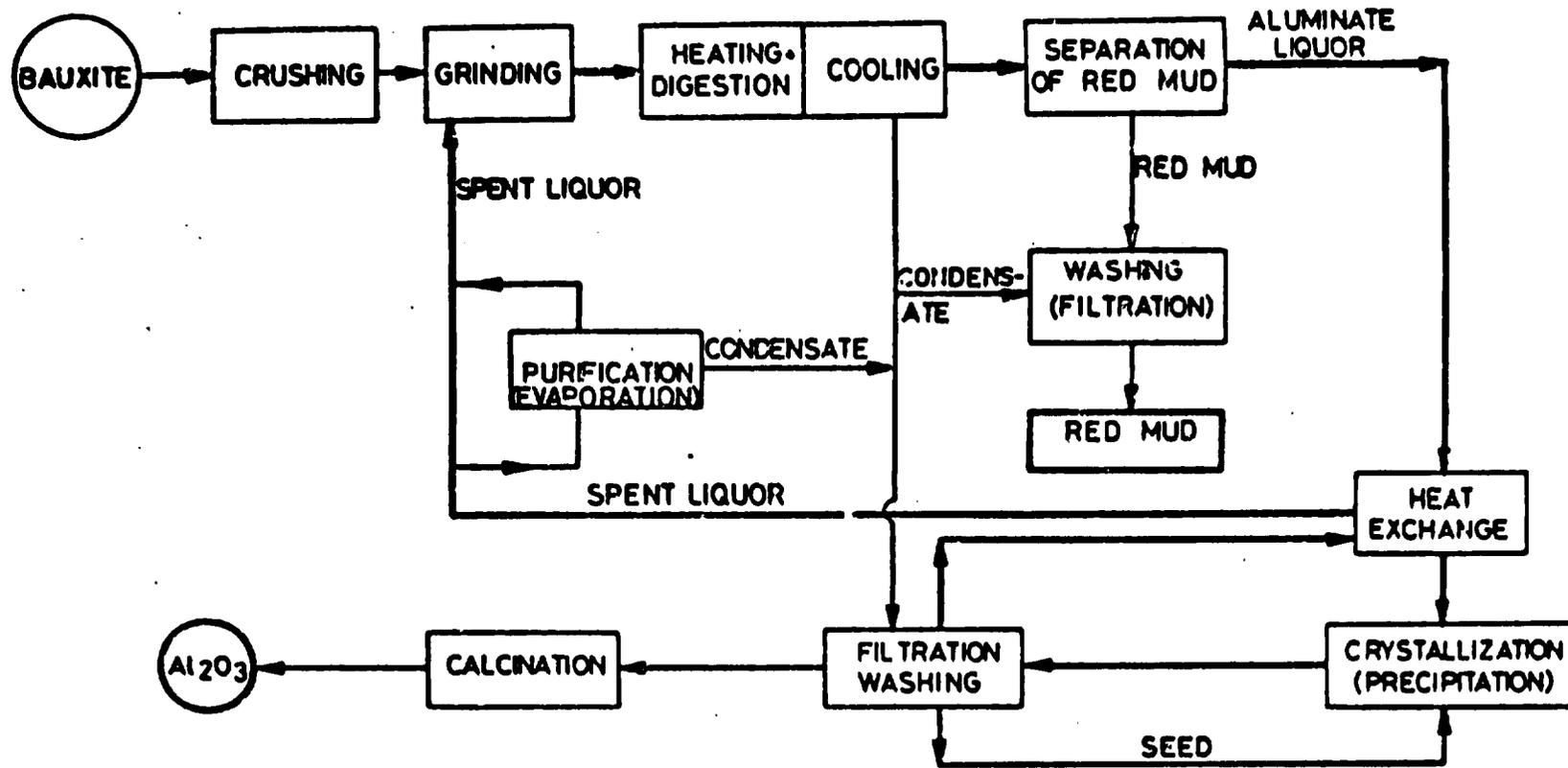
Potential Ores: That portion of resources in the continuity of known deposits which are insufficiently explored at this time and for which quantitative estimates are based largely on broad knowledge (category: Potential Ores of Developed Resources) or that portion of subeconomic resources which may become reserves as a result of changes in economic conditions or after further exploration (category: Potential Ores of Undeveloped Resources).

---

Reference: [19]

MAIN PHASES OF THE BAUXITE MINING  
FROM EXPLORATION TO REFINERY'S GATE  
/AFTER ALCOA OF AUSTRALIA'S LEAFLET/





OPERATION UNITS OF THE BAYER PROCESS

Annex 12

CHARACTERISTICS OF FLOURY AND SANDY  
ALUMINA

	Sandy alumina	Floury alumina
Grain distribution %		
+ 150 $\mu\text{m}$	< 5	-
75-150 $\mu\text{m}$	60	10
45- 75 $\mu\text{m}$	25	40
- 45 $\mu\text{m}$	< 10	50
Specific surface		
$\text{m}^2/\text{g}$	> 30	5-10
Alfa $\text{Al}_2\text{O}_3$ content %	< 30	50-70
Angle of repose		
degree	$\sim$ 30	40-50
LOI %	$\sim$ 1	$\sim$ 0,5

## Annex 13

## CAPITAL COST FOR ALUMINA REFINERIES

(US\$ 1980)

---

Total capital cost including infrastructure and location factors.

<u>Refinery Size</u>	<u>Capital Cost</u>
(Million tons per year)	(Million US\$)
0 - 2.0	$pf \times lf \times (330 + 720 \times size)$
2.0 - $n \times 2.0$	$pf \times lf \times (885 \times size)$
$n \times 2.0 -$	$pf \times lf \times (1,062 \times size)$

where pf: process factor

<u>Process</u>	<u>Process Factor</u>
American Bayer	1.0
Modified A. Bayer	1.06
European Bayer	1.12
Soda-Sinter	1.30

lf: location factors from Table 13.

n: diseconomy of scale factor, between 2 and 5 depending on location.

---

Sources: Woods, D. "Financial Decision Making in the Process Industry,"  
Prentice Hall, New Jersey, 1975.

World Bank consultant.

Copied from: [11]

Annex 14

PRODUCTION COSTS OF SELECTED ALUMINA PLANTS  
(USD/t ALUMINA)

		Capacity th. tpy	Bauxite	Other mate- rial	Energy	Wages etc.	Total vari- able	Capi- tal charges	Total
<b>A. Old plants</b>									
Alcoa	Pinjara Austr.	2600	26.3	13.7	56.9	39.6	136.1	41.2	177.3
Gove	Austr.	1200	25.1	14.8	54.0	36.9	130.7	49.6	180.3
VAW	Lünen GFR	430	82.1	5.6	43.8	37.7	169.2	17.4	186.6
PUK	Gardanne Fr.	710	82.0	9.6	46.0	37.9	175.5	17.5	193.0
Alcoa	Pt.C. USA	1320	80.2	5.1	50.1	42.9	178.3	17.3	195.6
Friguia	Guinea	630	26.7	8.9	92.7	47.8	176.1	39.6	215.6
Alox	Stade GFR	650	73.6	12.1	46.7	40.0	172.4	43.8	216.1
Jamalco	Jam.	495	77.0	8.6	73.3	44.3	203.1	41.5	244.6
Eurallumina	Italy	720	80.9	16.6	67.9	45.1	210.4	48.8	259.2
K.BatonRouge	USA	930	100.5	10.6	66.7	56.5	234.3	41.2	275.5
<b>B. New plants</b>									
Worsley	Austr.	1000	30.8	13.9	44.0	35.8	124.4	135.8	260.7
Interalum.	Venez.	1000	77.7	11.4	17.5	47.2	153.8	131.3	285.0
AlumEsp.	Spain	800	84.0	6.3	47.0	33.0	170.7	130.5	301.2
NALCO*	India	800	39.5	18.0	72.1	33.9	163.5	175.6	339.0
Aunghinish	Ireland	800	86.9	5.6	50.0	39.3	181.8	179.5	361.3
Alumar	Brasil	500	79.7	15.9	53.0	41.4	189.8	172.6	362.5

Note: \* expected values only

Reference: [26]

## DESCRIPTION OF SOME NON-BAYER PROCESSES

### 1. Sintering process

On course of the sintering process bauxite or other aluminium-ferrous materials are blended with soda and lime and on treating it at 1350 °C the  $Al_2O_3$  content of same is converted to sodium aluminate, capable of being dissolved with low-concentrated soda solution. After leaching the sinter, the solution is separated from the insoluble residue and desilicated. The clarified solution is carbonated by the introduction of  $CO_2$ -gas. Aluminium hydroxide crystals are washed and calcined while soda solution is recycled to the process.

### 2. Combined processes

a) The paralelly combined process is used in cases the bauxite processed can be separated into two sorts of ores containing different percentage of silica. In such cases high silica bauxite is sintered by the soda-lime process and the solution resulting after leaching is added to the aluminate liquor of the Bayer branch.

b) A combination of the Bayer and sintering process in series is also used. In this case first the bauxite is processed by the Bayer process, thereafter the red-mud is sintered with a view to regenerate the alumina contained in it.

### 3. Nepheline processing

This technology results in alumina, soda, potassium salt and cement as products. The process starts with lime sintering, where the soda needed for the formation of soluble aluminate is available in the processed rock itself. The recovery of alumina and alkali from the sinter is performed by a two-stage digestion, followed by desilication, carbonization, hydrate separation and calcination. After carbonating the solution, soda and potassium salts are crystallized. The mud, containing calciumsilicate is used for cement production.

### 4. Alunite processing

The ore is roasted in two reactors in a fluidized bed. In the first phase an oxidizing atmosphere is used, while alu-

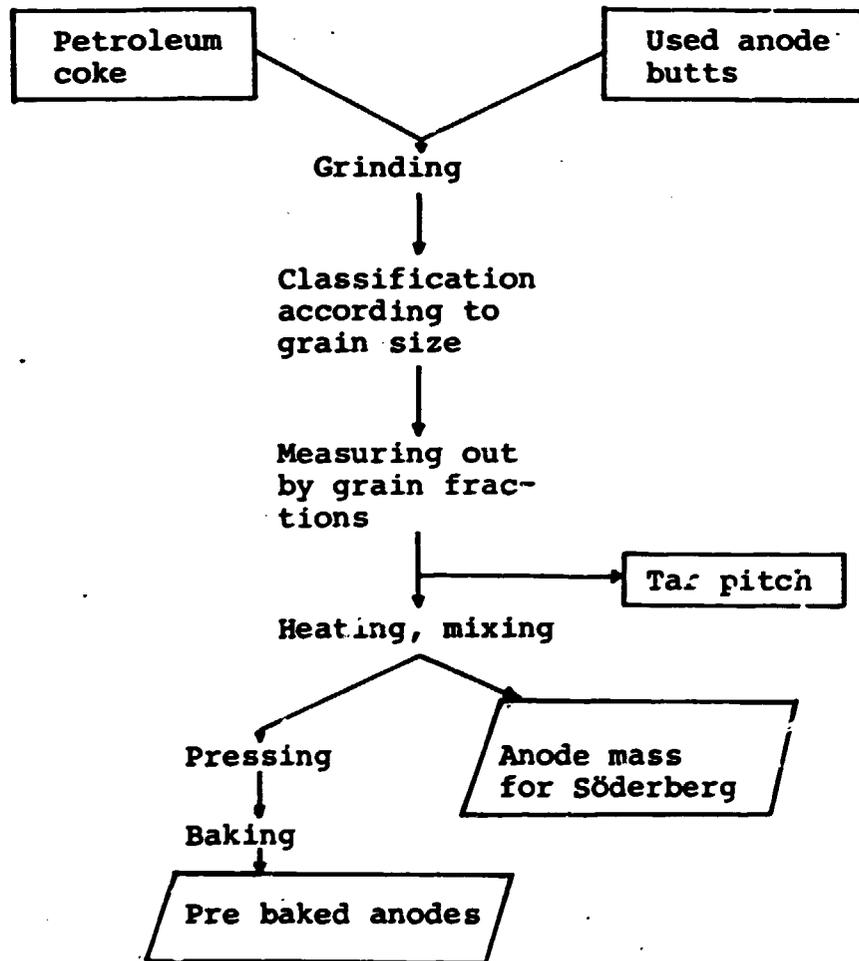
minium sulphate is decomposed by a reducing gas in the second phase. The gas products of the reaction are used to produce Sulfuric acid, while the reduced alunite is processed according to a modified Bayer technology for the recovery of alumina and sulfate salts.

About the economy of these processes see: [29]

Reference: [29]

Annex 16

FLOW SHEET OF ANODE PRODUCTION



\* where applicable

Annex 17

INPUTS FOR ALUMINUM SMELTERS

(Per metric ton of aluminum)

---

	Prebaked System
Alumina, metric tons	1.93
Power, Kwh /a	13,500 - 14,300 (1980) 13,160 (1985) 12,800 (1990) 12,600 (1995-2000)
Labor, man-hours	8.6
Thermal energy - million Btu	4.4
Coke, metric tons	0.375
Fluorides, /b kilograms	30
Pitch, metric tons	0.10
Other costs (maintenance, overhead) US\$ 1980	220

---

/a We assume, as Anthony Bird Associates, an improvement on electrical energy productivity of 0.5% a year.

/b Cryolite and aluminum fluoride.

Sources: Woods, Douglas and James C. Burrows, "The World Aluminum-Bauxite Market," Praeger, 1980.

Company data.

Anthony Bird Associates, Aluminum Annual Review, February 1981.  
World Bank consultant.

Copied from: [11]

**COST OF ELECTRIC POWER FOR ALUMINIUM SMELTERS  
(COSTED AT GENERATING SITES)**

(US\$ 1980 kilowatt hour)

	Existing Low Cost	Possible Low Cost For New Smelters	Higher Cost Electricity (coal or nuclear) /a
United States West	.02 /b	-	.05
United States East	.024	-	.05
Canada West	.004	.03	.05
Canada East	.004	.03	.05
Jamaica	-	-	.05
Central America/Caribbean	-	.02	.05
Guyana	-	.02 /c	.05
Suriname	.0045 /d	.03	.05
Brazil	.02	.02	.05
Argentina	.008	.03	.05
Venezuela	.026 /e	.03	.05
Western Europe	.029	-	.05
Eastern Europe	.02	-	.05
Asian USSR	.02	.02	.05
Oceania	.012	.02	.05
ASEAN	-	.02	.05
Korea/P. Taiwan	-	.02	.05
China	.02	.02	.05
Japan	.02	-	.05
India	.02	.03	.05
Rest of Asia	.02	.03	.05
Middle East	.003	.02	.05
Northern Africa	.02	.02	.05
Ghana/Other West Africa	.0048 /f	.02	.05
Guinea	-	.02	.05
Zaire	-	.006 /h	.05
Rest of East Africa	-	-	.05
South Africa	.02	-	.05

/a See: World Bank, "Energy in the Developing Countries", August 1980, p. 43; also see Murray Lester, "The Outlook for Power in the Aluminium Industry", Light Metal Age, June 1980, p. 26. The capital cost of a coal power plant is about US\$1600/kw; considering a real rate of return of 10-15% and dividing by 7000 Kwh/kw the capital cost component of coal generated power would be in the range of US\$0.02/kwh to US\$0.03/kwh. If we add the cost of coal we obtain a total cost range of US\$0.03/kwh - 0.06/kwh depending on coal mining costs, quality and transport cost.

/b Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, "Minerals and Materials" - a Monthly Survey - July 1981, Washington D.C., page 2.

/c IBA Review, September 1977, p. g, cites from 5-6 to 10 mills/kwh.

/d According to the Brokopondo Agreement between the Suriname Government and Suralco.

/e Metal Bulletin, February 17, 1981, p. 15.

/f Metal Weeks, January 19, 1981, mentions that power from the Asahan River will cost US\$0.012/kwh.

/g Ghana US\$0.0048/kwh, Cameroon US\$0.01/kwh.

/h Project which would use electricity from the existing power plant.

Source: See footnotes above. Electricity generated with flared gas considered at US\$0.02/kwh, hydroelectricity priced at US\$0.02/kwh for high head rivers and at US\$0.03/kwh for low head rivers.

## Annex 19

## ELECTRICITY SUPPLIES AVAILABLE FOR ALUMINUM SMELTING

(Gigawatt hours per year)

	Current <u>/a</u> Low Cost	New <u>/b</u> Low Cost
United States West	23,500	-
United States East	21,300	-
Canada West	3,700	13,100
Canada East	11,700	3,000 <u>/e</u>
Jamaica	-	-
Central America/Caribbean	300	9,600
Guyana	-	1,700
Suriname	890	440
Brazil	3,800	26,200
Argentina	1,900	26,800
Venezuela	5,500	13,800
West Europe	37,900	-
East Europe	32,700	-
Asian USSR	14,700	4,800
Oceania	7,200	29,600
ASEAN	-	15,700
Korea - Taiwan	-	-
China	5,531	1,730
Japan	3,900	-
India	2,850	16,200
Rest of Asia	850 <u>/c</u>	4,200
Middle East	4,100	78,900
North Africa	1,800	9,900
Ghana - Rest of West Africa	3,600	39,600
Guinea	-	5,600
Zaire	-	2,400 <u>/d</u>
Rest of East Africa	-	-
South Africa	1,100	-

/a Estimated from Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, "Primary Aluminum Plants, Worldwide," Washington, D.C., 1981. Such report gives the sources of electric power for each aluminum plant. The low cost power is considered only as that generated by hydroelectric sources, coal and natural gas for oil exporting countries. The electric power available was estimated as Plant Capacity (thousand mt) x 0.95 (capacity utilization rate) x 14.3 gigawatt hours/thousand mt.

/b The figures shown here correspond to 10% of new hydropower potential 25% of flared gas plus 15,000 gigawatt hours considered for Australian coal (see Table 4).

/c Turkey.

/d Only currently available power.

/e Power considered available for smelters.

Sources: see footnote /a

AUSTRALASIA

AUSTRALIA

LOCATION CASE STUDY - NEW PLANT

DATES FROM 1987 PROCESS PREPARED  
POWER COAL SOURCE ON POWER COSTS ABA ESTIMATE  
ALUMINA LOW COST BAND

MATERIAL	QUANTITY	1987 PRICE	1985 COST	1987 COST	1989 COST	1991 COST	1993 COST
ALUMINA	1.925			585.2	629.5	659	671.3
PETROLEUM COKE	0.34			49.2	53.8	50.7	64.1
PITCH	0.09			32.8	32.0	32.8	32.8
OTHER MATERIALS				144.6	144.6	144.6	144.6
PRODUCTION LABOUR	4.1			54.6	57.3	60.2	63.3
MAINTENANCE LABOUR	1.9			25.4	26.7	28	29.5
ELECTRICITY	13693			385.1	408	429.8	450.5
MAINTENANCE MATERIALS				41.3	4.13	20.65	37.17
SALES AND ADMIN	1.4			22.5	23.6	24.8	26.1
LABOUR BENEFITS				51.2	53.8	56.5	59.4
DELIVERY				82.6	82.6	82.6	82.6
WORKING CAPITAL				32.3	33.2	35	36.4
<b>TOTAL VARIABLE COST</b>				<b>1566.8</b>	<b>1550</b>	<b>1632.7</b>	<b>1697.7</b>
<b>CAPITAL SERVICING ( CCA )</b>				<b>490.8</b>	<b>490.8</b>	<b>490.8</b>	<b>490.8</b>
<b>TOTAL COST ( CCA )</b>				<b>1997.6</b>	<b>2040.8</b>	<b>2123.5</b>	<b>2188.5</b>
<b>CAPITAL SERVICING ( HCA )</b>				<b>534.7</b>	<b>458.2</b>	<b>392.4</b>	<b>336</b>
<b>TOTAL COST ( HCA )</b>				<b>2041.5</b>	<b>2008.2</b>	<b>2025.1</b>	<b>2033.7</b>
<b>MEMORANDUM ITEMS -----</b>							
ALUMINA PRICE			182.4	304	327	342.3	348.7
ELECTRICITY COST MILLS PER KWH			18.3	28.1	29.8	31.4	32.9
WAGE RATE \$ PER HOUR			8.27				
TOTAL MAN-HOURS PER TONNE			7.4				
ASSUMED DEBT RATIO			51.5 PCT				
HCA CAPITAL COST			4545.7	DOLLARS PER TONNE ASSUMED			

Copied from: [8]

Annex 20

**ALUMINUM PRODUCTION COSTS AT SELECTED SITES, YEAR 2000 (New Plants)**  
**(US\$1980/metric ton)**

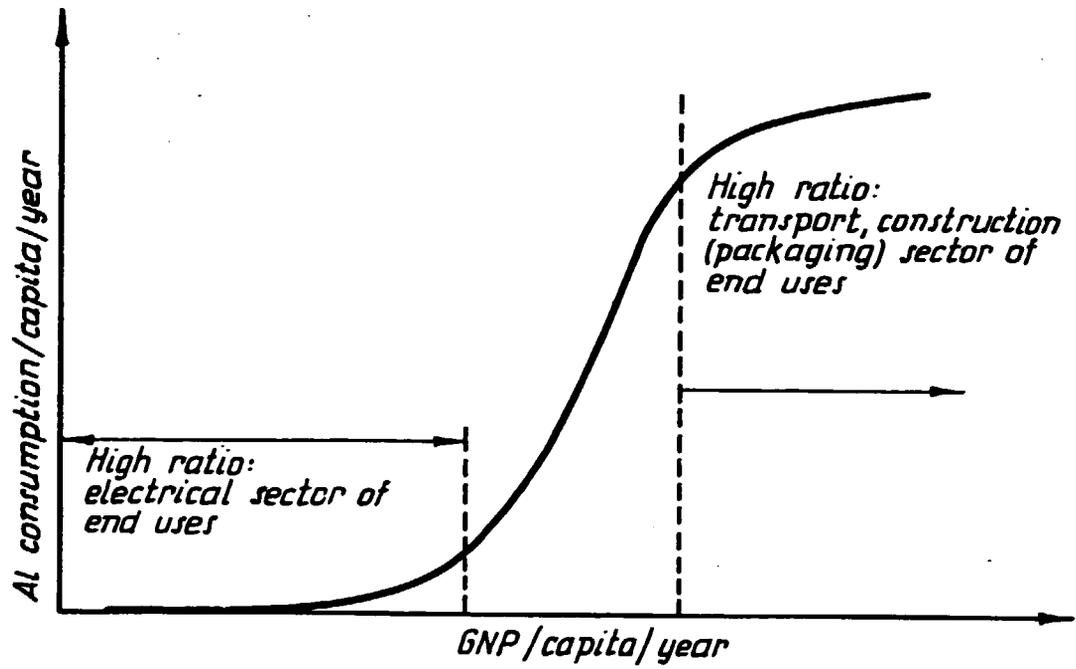
	United States	Canada	Brazil	Western Europe	Australia	Middle East	Japan
Alumina	620	620	575	670	560	580	600
Power	630	400	270	630	270	270	630
Labor	95	95	50	95	95	95	95
Thermal Energy	33	33	33	33	33	33	33
Coke	252	252	252	252	252	252	252
Fluorides		25	25	25	25	25	25
Pitch		25	25	25	25	25	25
Other	220	220	220	220	220	220	220
Capital charges /a	360	360	410	360	390	440	390
Total in US\$/mt	2,260	2,030	1,860	2,310	1,870	1,940	2,270
in US\$/lb.	1.02	0.92	0.84	1.05	0.85	0.88	1.03

/a For a 200,000 ton per year smelter.

Source: Computed from Tables 18 to 23; Alumina costs from Table 17.

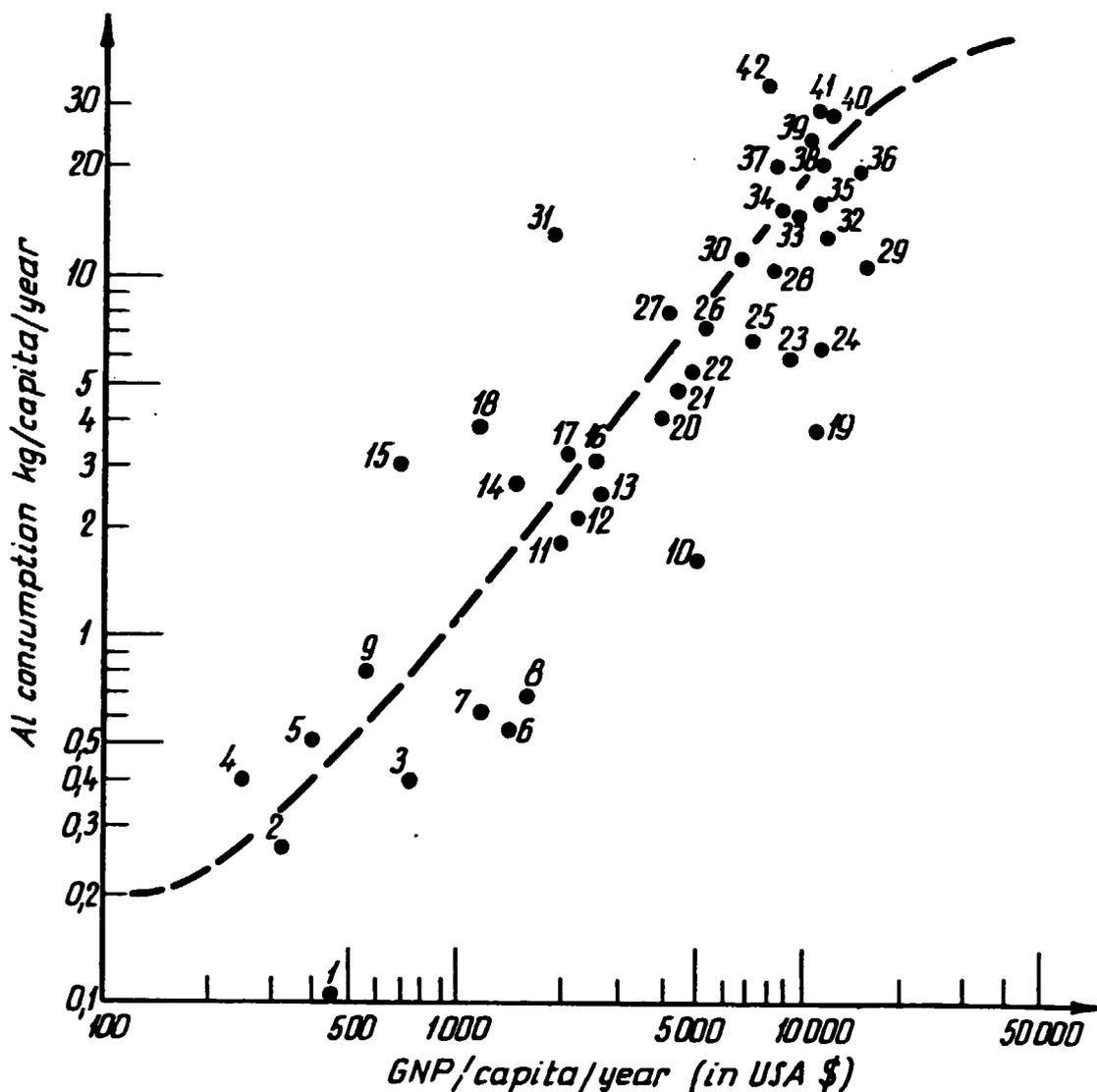
Annex 22

SIMPLIFIED DIAGRAM OF ALUMINIUM CONSUMPTION IN  
FUNCTION OF GNP



Annex 23

PER CAPITA AI CONSUMPTION IN FUNCTION OF GNP  
(valid for 1981)



- |                  |                    |                                 |
|------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1. Indonesia     | 15. Taiwan         | 29. Sweden                      |
| 2. Pakistan      | 16. Argentina      | 30. Italy                       |
| 3. Philippines   | 17. Brazil         | 31. Hungary                     |
| 4. India         | 18. Cameroon       | 32. France                      |
| 5. Ghana         | 19. Denmark        | 33. Australia                   |
| 6. Turkey        | 20. Venezuela      | 34. Austria                     |
| 7. Colombia      | 21. Hong Kong      | 35. Canada                      |
| 8. Malaysia      | 22. Israel         | 36. Switzerland                 |
| 9. Egypt         | 23. Finland        | 37. Japan                       |
| 10. Ireland      | 24. Netherlands    | 38. Federal Republic of Germany |
| 11. Mexico       | 25. New Zealand    | 39. Belgium                     |
| 12. Portugal     | 26. Spain          | 40. Norway                      |
| 13. South Africa | 27. Greece         | 41. United States               |
| 14. South Korea  | 28. United Kingdom | 42. Bahrain                     |

Annex 24

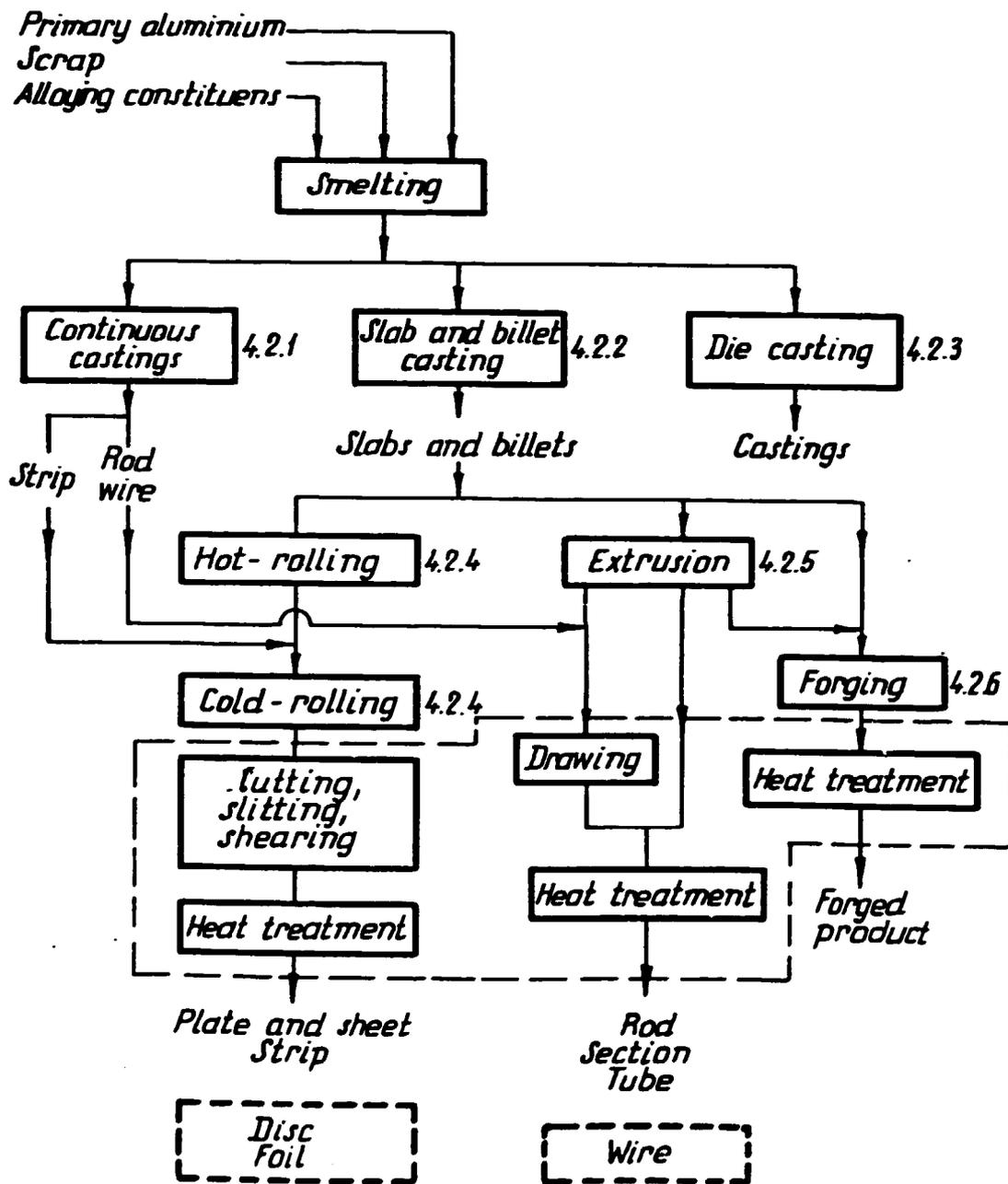
RELATIVE PRICE OF DIFFERENT SEMIS

Aluminium ingot	100 %
Continuous-cast rod wire coils	115 %
Continuous-cast strip coils	120-125 %
Unalloyed and weakly alloyed strip coils of 1.5-0.7 mm thickness	130 %
Thin strip of commercial quality	140 %
Thin strip of special quality /minimum/	150 %
Foil of commercial quality	180 %
High-finish foil	210-250 %
Low-alloyed extruded sections	180-220 %
Low-alloyed extruded sections of anodized surface	220-250 %

Reference: [41][42]

Annex 25

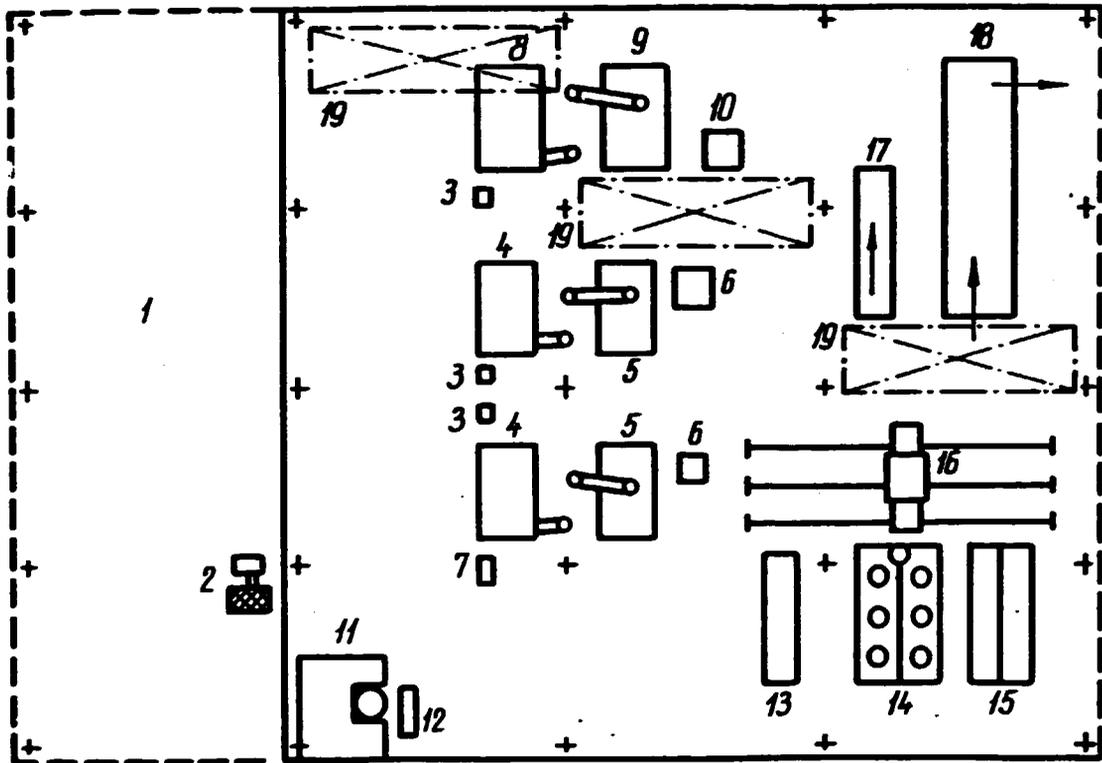
PRINCIPAL TECHNOLOGICAL OPERATIONS AND PRODUCTS  
OF SEMI-MANUFACTURING



Annex 26

TRADITIONAL SLAB AND BILLET CASTING SHOP WITH VERTICAL  
CASTING MACHINES

(capacity above 10,000 tpy)

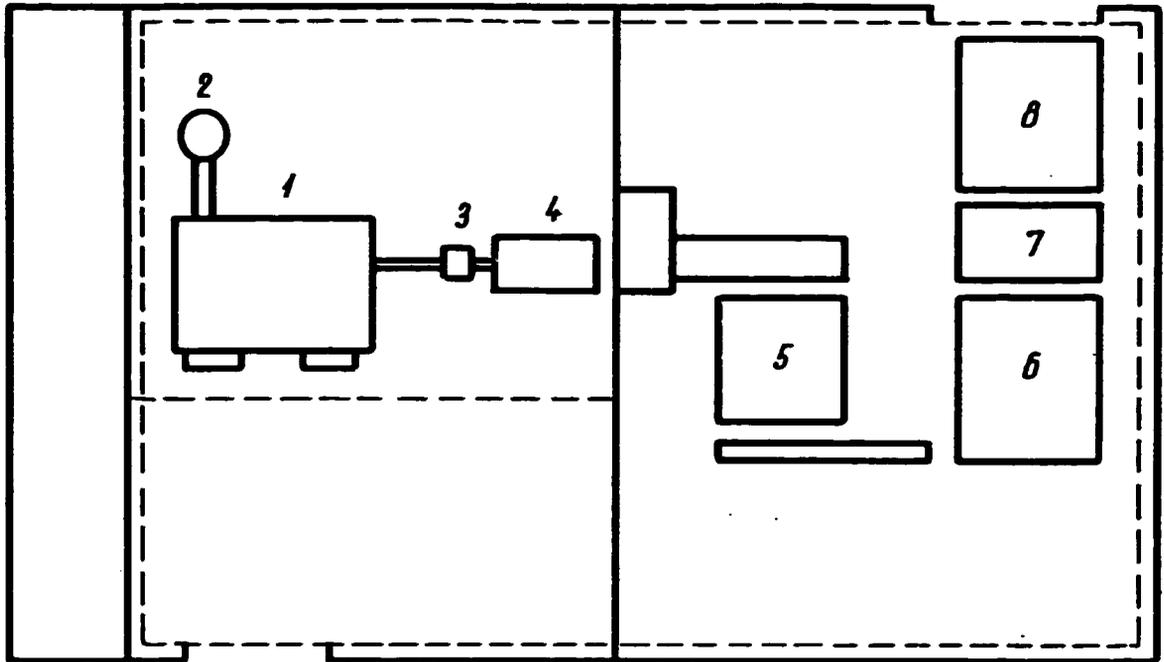


- |  |   |
|--|---|
| 1. Covered storage area for logs (base material) | 10. Casting machine                             |
| 2. Electronic platform scale (weigher)           | 11. Induction furnace (master alloy production) |
| 3. Slag separator                                | 12. Pig casting chain                           |
| 4. Melting furnace                               | 13. Charge preparation station                  |
| 5. Casting furnace                               | 14. Homogenizing furnace                        |
| 6. Casting machine                               | 15. Cooling bench                               |
| 7. Ladle preheating                              | 16. Push Bench                                  |
| 8. Melting furnace                               | 17. Billet machining lathe                      |
| 9. Casting furnace                               | 18. Billet-cutting saw                          |
|  | 19. Overhead crane                              |

Reference: [42]

Annex 27

CASTING SHOP WITH HORIZONTAL BILLET CASTING MACHINES  
(capacity about 5,000 tpy)



- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1. Melting and casting furnace         | 5. Intermediate storage place        |
| 2. Recuperator                         | 6. Continuous homogenization furnace |
| 3. Meltfilter                          | 7. Billet-cooling area               |
| 4. Horizontal billet-casting equipment | 8. Billet Discharge pallet           |

Reference: [44]

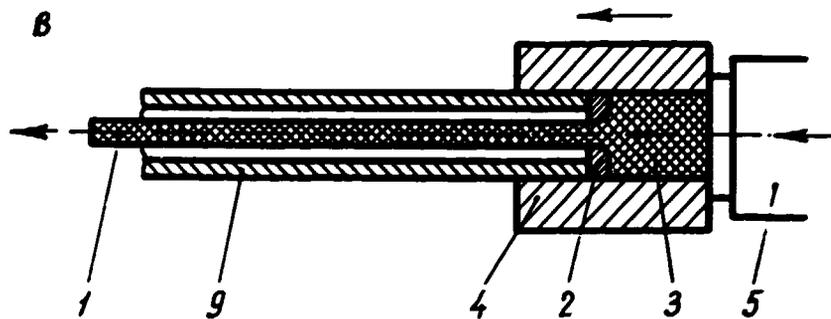
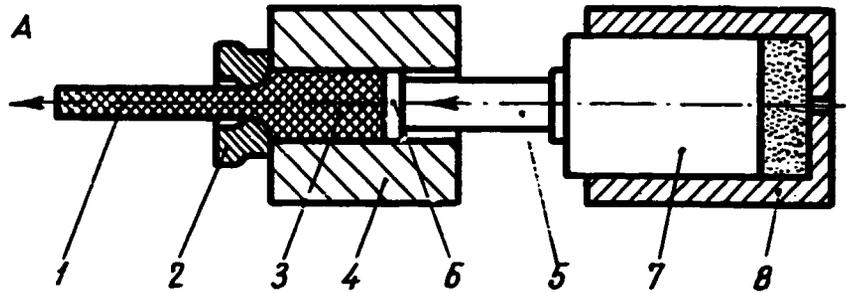
SUMMING-UP SOME FEATURES OF ROLLING MILLS

Type of plant	Production related to labour ton/head and year	Production related to operating area tons/m <sup>2</sup> and year
Small and medium-size plant, wide product mix, individual rolling mills. Annual production 30,000-120,000 tons	60 - 80	0.9 - 1.5
Large rolling mill, moderate product mix, multi-stand hot-rolling line. Annual production 120,000-180,000 tons	120 - 180	1.3 - 1.8
Target rolling mill, narrow product mix, tandem rolling lines. Annual production 150,000-300,000 tons	240 - 300	1.6 - 2.5

Reference: [42]

Annex 29

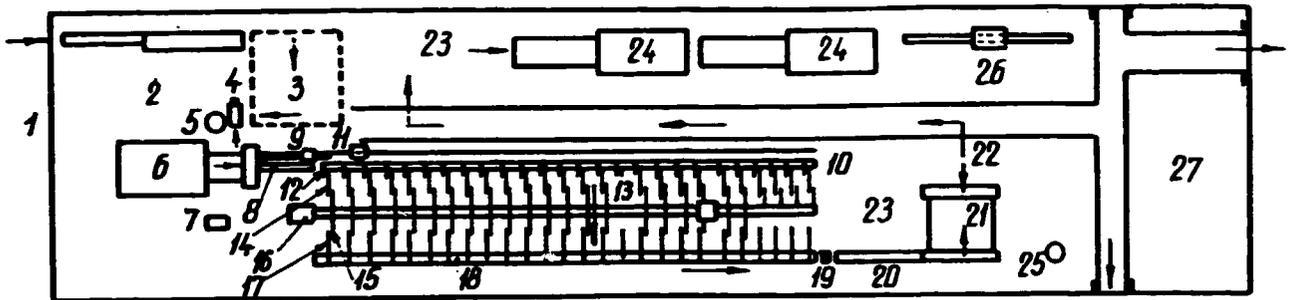
SCHEMATIC DIAGRAM OF DIRECT (A) AND INDIRECT (B)  
EXTRUSION



1. product
2. die
3. billet
4. container
5. pressing rod
6. pressing disk
7. ram
8. pressing cylinder
9. stem

Reference: [46]

LAYOUT OF EQUIPMENT IN AN EXTRUSION PLANT



1. Sloped rack for storage of logs, storage of logs and billets,
2. Gas or oil fired log-, billet preheating furnace,
- 2a. Induction billet preheating furnace,
3. Homogenizing chamber,
4. Hot billet shear,
5. Billet water cooler,
6. Extrusion press,
7. Die preheating furnace,
8. Initial table,
9. Hot cutting saw or shear,
10. Run-out table,
11. Puller,
12. Lift transfer to the cooling table,
13. Cooling table,
14. Transfer conveyor over the cooling table,
15. Transfer conveyor to the stretcher,
16. Stretcher,
17. Transfer conveyor to the saw table,
18. Saw table,
19. Cutting saw,
20. Saw gauge table,
21. Inspection table,
22. Palletizing,
23. Product storage before heat treatment,
24. Aging oven,
25. Wire drawing machine,
26. Profile rolling machines,
27. Product storage before anodizing.

Annex 31

COST OF INSTALLING CAPACITIES FOR PROCESSING THE  
SAME TONNAGES OF SEMI-FABRICATED AND FINISHED ITEMS  
COMPARED TO SMELTERING'  
(Index of smelting =100)

Type of plant or operation	Per cent
Aluminium smelter	100
Scrap processing (remelting)	10
Semi-manufacturing	
Continuous-cast wire	25
Continuous-cast strip	30
Cold-rolling (including rolling of continous-cast strip and foil)	170
Extrusion plant (including drawing)	140
Drop-forging plant	310
Pressure die-casting	220
Semi-manufacture finishing facilities	
Disc manufacture	1
Tube welding	10
Corrugated sheet manufacture	80
Strip-painting	35
Extrusion anodization	35

Reference: [34][47]

**ECONOMICALLY FEASIBLE MINIMUM SIZE OF FACILITIES  
AND THEIR INSTALLATION COSTS**

(Index of smelting = 100)

<b>Plant</b>	<b>Processed metal Per cent</b>	<b>Investment costs Per cent</b>
<b>Aluminium smelter</b>	100	100
<b>Finished product manufacture</b>		
Kitchenware	0.1	0.6
Cans	2.25	7.2
Liquid gas bottles	2.0	3.6
Casks	0.4	1
Radiators	0.75	1.1
Lamp posts	1.22	1.8
Stranded wire,uninsulated conductor	4.4	0.9
Cables,insulated conductors	10	6
Containers and tanks	1.2	2
Collapsible tubes and aerosol bottles	5	6.5
Sandwich panels for the building industry	0.7	0.6
Portals, small buildings	1.0	0.4
Furniture frame,ladder, scaffolding	0.8	0.2

Reference: [47]

## MAIN TASKS OF THE TECHNICAL IMPROVEMENTS OF ALUMINA PRODUCTION

Main directions of R + D	Targets	Possible solutions
<p>1. Improvement of efficacy of precipitation by increasing the <math>\text{Na}_2\text{O}_k</math> concentration of the liquor</p>	<p>To reach good performance in precipitation while securing requested alumina qualities</p>	<p>Purification of solution</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- removal of carbonate salts and regeneration of their <math>\text{Na}_2\text{O}</math> contents by                             <ul style="list-style-type: none"> <li>. crystallizing evaporation</li> <li>. causticization in the washing line</li> <li>. complex causticization</li> </ul> </li> <li>- removal of organics by                             <ul style="list-style-type: none"> <li>. feeding magnesium salts</li> <li>. evaporation of hydrate wash water, oxalate separation</li> <li>. liquor and/or salt ignition</li> <li>. wet oxidation</li> </ul> </li> </ul> <p>Development of technology</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. agglomeration</li> <li>. hydrate classification</li> <li>. multistage seeding</li> <li>. cooling during precipitation</li> </ul>
<p>2. Increasing the digestion temperature at the processing of monohydrate bauxites</p>	<p>To improve kinetics, to reach the theoretical yield, to conserve energy, to obtain well handable red mud</p>	<p>In autoclaves at 240-250 °C</p> <p>in tube digester at 260-280 °C</p>

---

**Main directions of R + D****Targets****Possible solutions**

---

3. Increasing efficacy of existing digestion lines

To release the limitations of the equipment by increasing the temperature and by modifying the technology

Technology using additives

4. Energo-technology, increase of capital productivity, optimization of the process

To minimize production costs, to increase plant productivity

Coordination of digestion and precipitation parameters and of the quantity of water to be evaporated

5. Reduction of caustic consumption

To reduce chemical and attached losses

- Carbonate salt causticization.
  - Red mud causticization
  - Complex causticization
  - Hydrothermal (high temperature) treatment of red mud (in case of medium and poor quality bauxites).
  - Modernization of red mud washing by
    - . modification of settlers
    - . heavy-duty filters
    - . up to date flocculants
-

ALUMINIUM CONTINUOUS FILTERING PROCESSES AND FIRMS  
PRODUCING THEIR EQUIPMENT

---

Trade name	Process name	Firm	References
SNIF	Spinning Nozzle Inert Flotation Process	Union Carbide Co.	[64]
ALPUR	-	Pechiney	[65]
MINT	-	Consolidated Aluminium Corporation	[66]
TAC	Treatment of Al in crucibles	Alcan Smelters and Chemicals Ltd.	[67, 68]

---

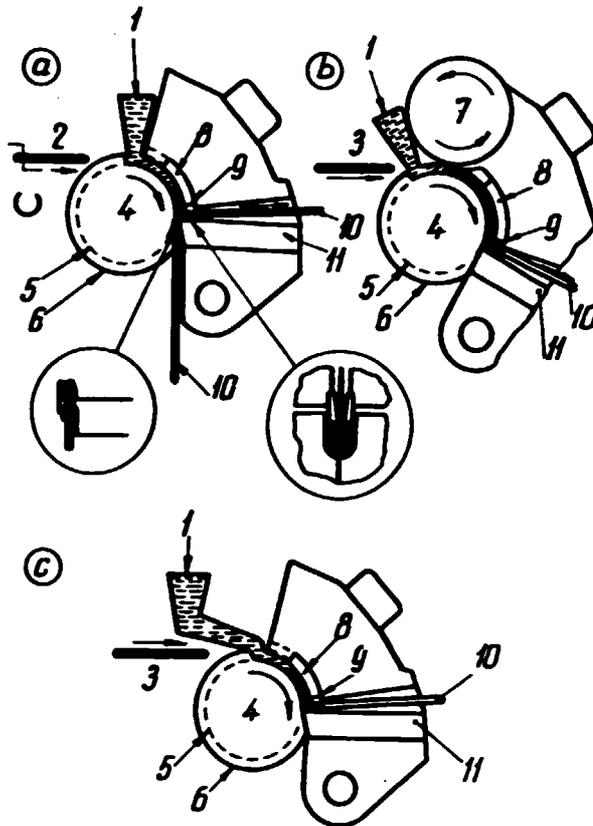
Annex 35

ALUMINIUM SEMI CONTINUOUS CASTING PROCESSES AND FIRMS  
PRODUCING THEIR EQUIPMENT

Trade name	Process name	Firm	References
LFRT	Level Feed Reservoir Top	Kaiser Aluminum	[ 69]
	New Hot Top	Showa Aluminium Industries	[ 70]
	Maxi Cast	Wagstaff Co.	[ 71]
EMC	Electro-magnetic casting	Swiss Aluminium Ltd.	[ 72]

Annex 36

OPERATIONAL ARRANGEMENTS OF CONFORM EXTRUSION MACHINE

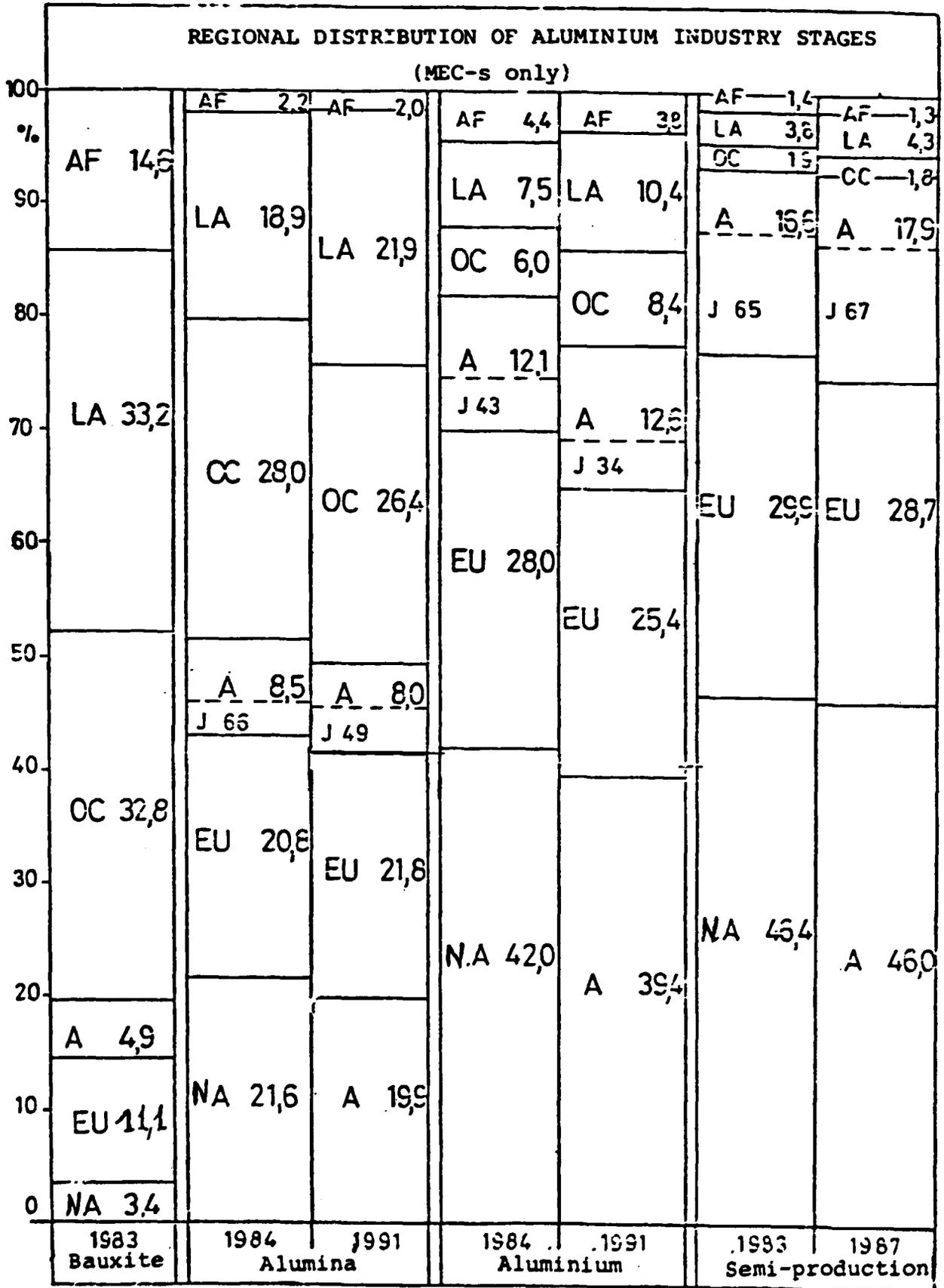


- a) gravity feed
- b) feed precompaction
- c) tangential feed

- 1. particulate feed
- 2. preformed solid feed
- 3. solid feed
- 4. extrusion wheel
- 5. groove root
- 6. wheel face
- 7. driven roll to assist feeding
- 8. grip segment
- 9. die
- 10. product
- 11. abutment

Reference: [59][60]

Annex 37



EU = Europe NA = North America A = Asia J = Japan\*  
OC = Oceania LA = Latin America AF = Africa

\*percentage within Asia

SEMI-PRODUCT TRADE IN 1983  
(\* total without "others")

	I M P O R T							Annex 38 (Others)	TOTAL *
	Rods t	Sheets t	Foils t	Powders t	Tubes t	Cables t			
FRG	85496	144836	28145	8975	18168	144	54378	285758	
Bel-Lux	25319	42595	18712	1186	2051	299	0	90202	
France	57816	85989	53687	1729	13371	1910	0	214422	
UK	52540	150882	30701	0	0	0	20772	234123	
Italy	26684	68204	13017	765	3762	491	14196	112863	
Netherlands	36582	53870	12420	392	1055	67	32221	184386	
Norway	4950	0	2529	0	1119	930	8585	9508	
Austria	13170	30918	0	0	3844	0	13295	47932	
Sweden	7649	57340	11783	487	2585	0	0	79844	
Switzerland	11989	27560	8338	254	5018	0	15302	68461	
Spain	0	14943	5381	193	953	5316	6959	26788	
Japan	11952	19807	1696	3200	98	39	0	36792	
USA	0	252911	13010	3762	0	0	4309	269683	
Canada	5845	109800	666	1625	1430	1459	1185	120825	
Australia	2064	1145	3268	369	0	0	746	6866	
<b>TOTAL</b>	<b>342056</b>	<b>1060716</b>	<b>203353</b>	<b>22877</b>	<b>56494</b>	<b>10655</b>	<b>(171948)</b>	<b>1708453</b>	

	E X P O R T							TOTAL*
	Rods t	Sheets t	Foils t	Powders t	Tubes t	Cables t	(Others) t	
FRG	72477	296609	97307	7379	18762	2206	86929	494740
Bel-Lux	76101	153390	21489	0	14748	3644	0	268772
France	72079	199711	31669	4242	8283	9160	0	325144
UK	18673	53089	14182	5054	2471	9483	15423	102952
Italy	33075	57741	20386	564	5274	243	67894	117283
Netherlands	36584	53870	12420	46	1055	2275	31795	106250
Norway	10841	57202	0	0	1969	0	6862	70012
Austria	14629	62683	0	0	1430	0	30098	84742
Sweden	6719	24376	9966	1681	3178	9724	0	55644
Switzerland	13596	30521	34546	77	5322	0	19505	163567
Spain	0	7799	1878	256	2057	16085	9601	28075
Japan	7513	154435	29818	235	2688	25848	0	228579
USA	13672	143319	17569	1937	0	18668	6255	194665
Canada	0	45365	1443	0	0	0	0	46808
Australia	0	59906	0	0	0	0	0	59906
<b>TOTAL</b>	<b>375359</b>	<b>1400016</b>	<b>292673</b>	<b>21521</b>	<b>73237</b>	<b>96828</b>	<b>(276362)</b>	<b>2279139</b>

	Balance							TOTAL*
	Rods t	Sheets t	Foils t	Powders t	Tubes t	Cables t	(Others) t	
FRG	-13019	151779	69162	-1396	554	2062	32551	208982
Bel-Lux	50782	110795	2777	-1186	12657	2745	0	178570
France	14263	113802	-22018	2513	-5088	7230	0	110722
UK	-33867	-97793	-16519	5054	2471	9483	-3349	-131171
Italy	6391	-10463	7369	-141	1512	-248	53698	4420
Netherlands	2	0	0	-346	0	2288	-426	1864
Norway	3911	57202	-2529	0	850	-930	-1723	60504
Austria	1459	31765	0	0	3506	0	16863	36810
Sweden	-930	-32964	-1817	1194	593	9724	0	-24200
Switzerland	1607	2961	26206	-177	384	0	4203	35106
Spain	0	-7146	-3503	63	1104	10769	2642	1287
Japan	-4439	134620	28122	-2915	2590	25001	0	183787
USA	13672	-109592	4559	-1825	0	18768	3946	-75018
Canada	-5845	-64435	777	-1625	-1430	-1459	-1185	-74017
Australia	-2084	58761	-3268	-369	0	0	-746	53040
<b>TOTAL</b>	<b>33303</b>	<b>339300</b>	<b>89320</b>	<b>-1356</b>	<b>19743</b>	<b>86173</b>	<b>(104414)</b>	<b>570686</b>

SEMI-FABRICATION IN SELECTED DEVELOPING AREAS  
(in thousand tonnes)

	Primary semi-manufacturing capacity *		Consumption of primary aluminium ingot
	1983	1987	1981
<u>Latin America</u>			
Brazil	281.8	381.8	240.9
Chile	5.-	5.-	3.-
Colombia	35.1	35.1	14.2
Costa Rica	10.-	10.-	5.-
Cuba	5.-	5.-	1.5
Ecuador	(cold rolling mill only)		-
El Salvador	6.-	6.-	2.-
Jamaica	4.-	4.-	3.-
Mexico	130.-	138.-	99.6
Panama	3.-	3.-	2.-
Peru	11.-	11.-	10.-
Puerto Rico	13.3	13.3	10.-
Trinidad-Tobago	(cold rolling mill only)		-
Uruguay	5.1	5.1	3.-
Venezuela	58.1	63.1	73.6 (?)
Total	<u>653.3</u>	<u>766.3</u>	<u>520.3</u>
<u>Africa</u>			
Algeria	5.-	8.-	4.-
Angola	(foil and wire prod. only)		-
Cameroon	35.-	35.-	27.7
Egypt	50.-	50.-	45.-
Ghana	(cold rolling mill only)		-
Ivory Coast	0.5	0.5	0.5
Morocco	(cold rolling mill only)		-
Nigeria	11.-	11.-	9.-
Tanzania	9.-	9.-	6.-
Zambia	(wire drawing only)		-
Zimbabwe	9.3	9.3	8.-
Total	<u>119.8</u>	<u>122.8</u>	<u>101.2</u>

	Primary semi-manufacturing capacity *		Consumption of primary aluminium ingot
	1983	1987	1981
<b>Asia</b>			
Bahrain	29.-	69.-	17.3
Bangladesh	(cold rolling mill only)		-
Hong Kong	34.7	40.7	21.6
India	352.-	355.7	249.6
Indonesia	7.- (?)	7.- (?)	14.-
Iran	34.- (?)	34.- (?)	30.1
Irak	21.-	21.-	26.4
Israel	26.5	26.5	9.5
Jordan	6.-	6.-	5.-
Korea, Republic	211.8	211.8	111.6
Kuwait	9.6	9.6	8.-
Lebanon	16.-	16.-	11.7
Malaysia	41.6	41.6	25.-
Philippines	31.6	31.6	17.-
Pakistan	10.8	13.8	6.-
Saudi Arabia	10.5	10.5	6.-
Singapore	1.6	1.6	1.5
Syria	5.-	5.-	4.-
Taiwan	70.3	110.3	77.8
Thailand	52.2	52.2	45.-
Unites Arab Emirates	3.-	3.-	2.-
<b>Total</b>	<b>974.2</b>	<b>1067.2</b>	<b>689.1</b>

Notes: \* hot rolling mill, extrusion and rod (for wire) capacities only

Reference: [10]