

FABRICACION DE CEMENTO PORTLAND EN PLANTA PILOTO

Jorge ARRIBADA C. *
Josefina VILARO L.*

RESUMEN

Se describe la fabricación de cemento portland en la planta piloto del Departamento de Ciencia de los Materiales, IDIEM. Se da a conocer el tipo de maquinaria empleada y sus condiciones de utilización.

El cemento obtenido se ensayó según las normas chilenas, y además se hicieron pruebas en un hormigón tipo estándar. Se presentan los valores experimentales obtenidos.

INTRODUCCION

El objeto de este trabajo fue estudiar experimentalmente las materias primas que usará la Industria Nacional de Cemento S. A. (INACESA) en su planta de Antofagasta, por medio de la elaboración de un cemento tipo portland, con esas materias primas, en la planta piloto de IDIEM.

Considerando la composición química global de las materias primas, se estima que, mezclando calizas de baja ley (58°/o de CaCO₃) y calizas de alta ley

* Investigadores de IDIEM

(92% de CaCO_3) y con adición de mineral de hierro, se pueden preparar dosificaciones de material crudo adecuadas para la fabricación de clínker, el que con una determinada cantidad de yeso de la zona de Antofagasta y molido a una finura conveniente, permite la fabricación de cemento portland conforme a las normas chilenas (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION, INN)⁷.

La elaboración del clínker es un proceso físico-químico, en cuya sinterización a temperaturas del orden de 1450°C se encuentran fundamentalmente cuatro componentes principales formando una solución sólida. De estas fases, identificadas en la química del cemento como silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S) aluminato tricálcico (C_3A) y aluminoferrito tetracálcico (C_4AF), el silicato tricálcico es el más significativo e importante en el endurecimiento del cemento.

Durante el proceso de clinkerización contribuyen a alterar las condiciones de equilibrio de las fases la temperatura del horno, el sistema de enfriamiento del clínker, la interacción del aluminio tricálcico con la fase ferrita, la presencia de iones extraños y la formación de una fase vítrea que modifica las propiedades del clínker con respecto a la cinética de su reactividad con el agua.

El cálculo de las fases indica en forma potencial, bajo determinadas condiciones, la cantidad de cada una de las cuatro fases más importantes del clínker: C_3S , C_2S , C_3A , y C_4AF . Los módulos, la capacidad de combinación de la cal y el cálculo potencial de las fases, se basan en los resultados obtenidos por análisis químico de los crudos, del clínker y del cemento. El cálculo de los módulos entrega relaciones numéricas de los componentes químicos mayores, la relación de combinación del CaO y el máximo de CaO combinable.

Boove y Kühl han detallado el desarrollo del cálculo de módulos, los cuales fueron aplicados por Michaelis, Mussgnud, Lea and Porter y Konopicky.

En la fabricación del clínker se distinguen dos etapas bien definidas: la preparación de las materias primas (molienda, mezcla y homogeneización) y la calcinación de esta mezcla, que se hace de preferencia en horno rotatorio. En la preparación de la materia prima debe considerarse la dosificación de los materiales en base a condiciones químicas fijadas previamente. Cada fabricante formula sus tipos de cemento de acuerdo al clínker que puede o desea producir. Esta formulación obedece a razones de calidad y a factores económicos.

Una correcta dosificación del crudo se realiza con aceptable precisión en base al conocimiento de la composición química de las materias primas, de modo de obtener cantidades necesarias de CaO - SiO_2 - Al_2O_3 y Fe_2O_3 . Las bases químicas para calcular la dosificación a emplear son los módulos, índice de actividad y factores de saturación de la cal.

La calidad del clínker es función de la finura y homogeneización del crudo, de la temperatura de sinterización y condiciones de enfriamiento, de la cal libre y densidad aparente, variables que influyen en la calidad del cemento portland, que debe cumplir con los valores mínimos o máximos exigidos por los requisitos químicos, propiedades físicas y mecánicas de la Norma Chilena 148 C-of-67.

IDENTIFICACION DE LAS MATERIAS PRIMAS

Los materiales empleados en este estudio fueron calizas de alta y baja ley en CaCO_3 de los yacimientos El Way de Antofagasta, mineral de hierro y mineral de yeso de la zona, los que se identifican en la Tabla I.

TABLA I
COMPOSICION QUIMICA DE LOS CRUDOS

Componentes	Caliza de ley alta, %	Caliza de ley baja, %	Mineral de hierro, %	Yeso, %
SiO_2	4.56	24.19	3.36	2.71
Al_2O_3	1.08	7.86	—	0.32
Fe_2O_3	0.89	0.57	80.18	0.42
CaO	49.88	33.14	8.60	34.59
MgO	0.82	1.07	—	0.25
SO_3	0.10	0.43	0.75	38.61
Na_2O	0.28	1.18	—	—
K_2O	0.37	0.82	—	—
P_2O_5	0.32	0.93	3.74	—
P/calc.	40.60	27.03	—	—
CaCO_3	88.69	58.33	—	—
Agua combinada	—	—	—	16.58
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	—	—	—	79.22
CaSO_4	—	—	—	3.05

DOSIFICACION DE CRUDOS

La dosificación de los materiales se calculó a partir de la composición química de las materias primas disponibles, considerando fundamentalmente los siguientes parámetros establecidos a priori:

Indice de Kühl

Este índice da la relación entre el contenido real de CaO y el máximo contenido en CaO combinable con los óxidos ácidos del clínker. El valor fijado al índice de Kühl podría considerarse como medida indirecta del silicato tricálcico y bicálcico potencialmente presentes en el clínker.



En valores del índice de Kühl cercanos a 100 es más probable encontrar presencia de cal libre, lo que no excluye la posibilidad de que haya cal libre en clínkeres con índices de Kühl muy inferiores a 100, debido a factores independientes de la composición química del crudo. En el caso presente se eligieron los siguientes índices Kühl:

para cemento corriente

$$K = \frac{100 \text{ CaO}}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3} = 87$$

para cemento de alta resistencia

$$K = 95$$

Módulo aluminico

Este módulo equivale, según Bogue, a fijar la relativa proporción de los compuestos C_3A y C_4AF limitando la acción fundente y la cantidad teórica de fase líquida formada.

Se eligieron los siguientes valores:

para cemento corriente

$$MA = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 1.5$$

para cemento de alta resistencia

$$MA = 1.3$$

Dosificación

Con estos antecedentes se calcularon las siguientes dosificaciones:

	Cemento corriente C_1	Cemento alta resistencia C_2
Caliza de alta ley	56.4°/o en peso	59.0°/o en peso
Caliza baja ley	44.3°/o en peso	40.0°/o en peso
Mineral de hierro	1.1°/o en peso	1.0°/o en peso

Con estas dosificaciones se hicieron pruebas preliminares para determinar sus aptitudes para la sinterización, por medio del microscopio de fusión, el cual permite observar las modificaciones que sufre el crudo de cemento a temperaturas comprendidas entre 1000 y 1500°C. En la Fig. 1 se muestran las fotografías obtenidas entre 1350 y 1500°C.



Fig. 1. Sinterización del crudo de cemento en microscopio de fusión, dosificación 1.

PREPARACION DEL CRUDO

Las calizas y el mineral de hierro fueron triturados en chancadora de mandíbulas Denver, Fig. 2, a un tamaño máximo de 6 mm y luego la mezcla perfectamente homogeneizada, se molió en una unidad Hardinge, Fig. 3, de trabajo en circuito cerrado, que cuenta con equipo automático de alimentación controlado electrónicamente. Mediante un clasificador de espas se puede regular el tamaño de grano que se desea obtener, dentro de amplios márgenes. Además, esta unidad lleva un equipo de desempolvado por ciclón y filtros de manga. La finura de las mezclas se prefijó en $10 \pm 2\%$ de residuo en el tamiz de 88 micrones de abertura.

La homogeneización de la mezcla de materias primas se controló midiendo las variaciones en el título de carbonato de calcio para mantener relativamente constante el contenido de carbonato, reduciendo al máximo las desviaciones entre el título real y el título teórico.

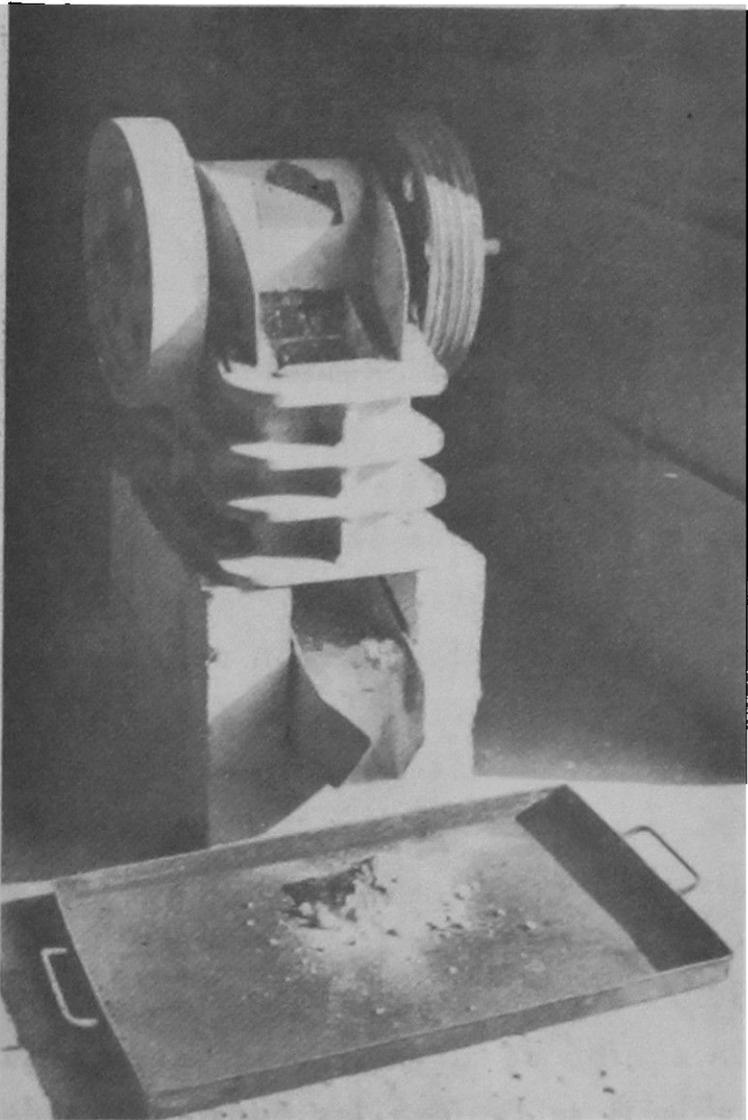


Fig. 2. Chancadora Denver de mandíbula.

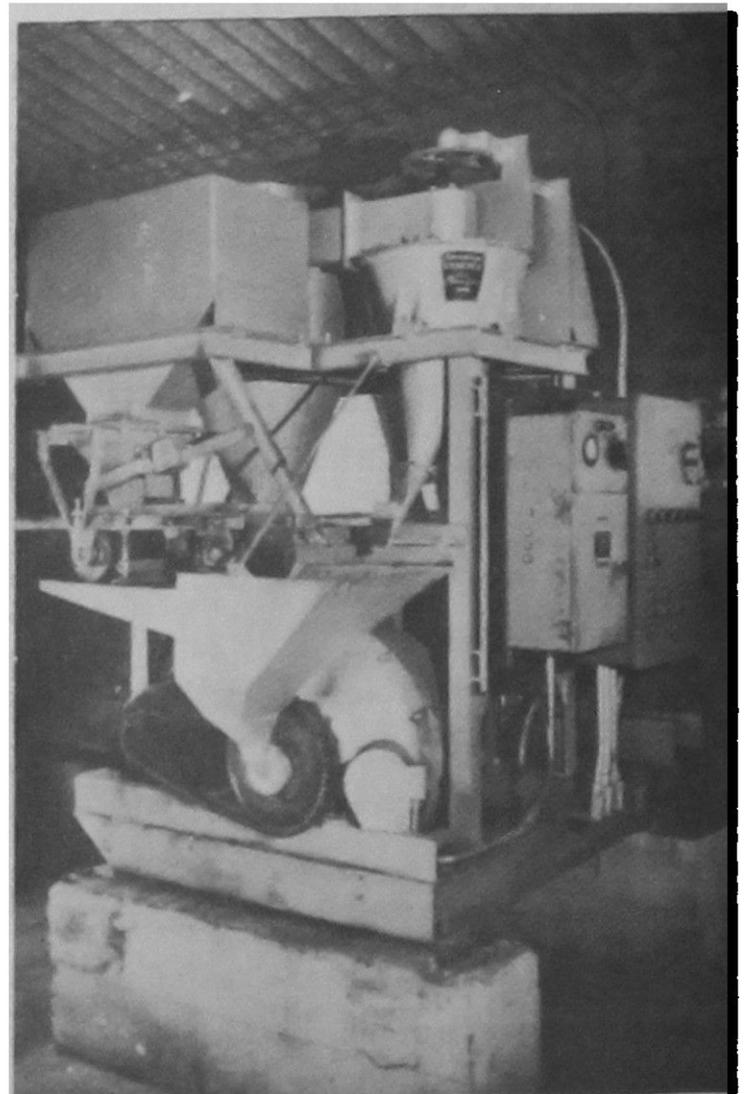


Fig. 3. Unidad Hardinge de molienda.

FABRICACION DEL CLINKER

El proceso de fabricación empleado fue el de vía seca en horno rotatorio semejante a los industriales, del tipo Labor de la marca Polysius, Fig. 4. Tiene 5 m de largo y 40 cm de diámetro útil, y con los cabezales de carga y descarga hacen

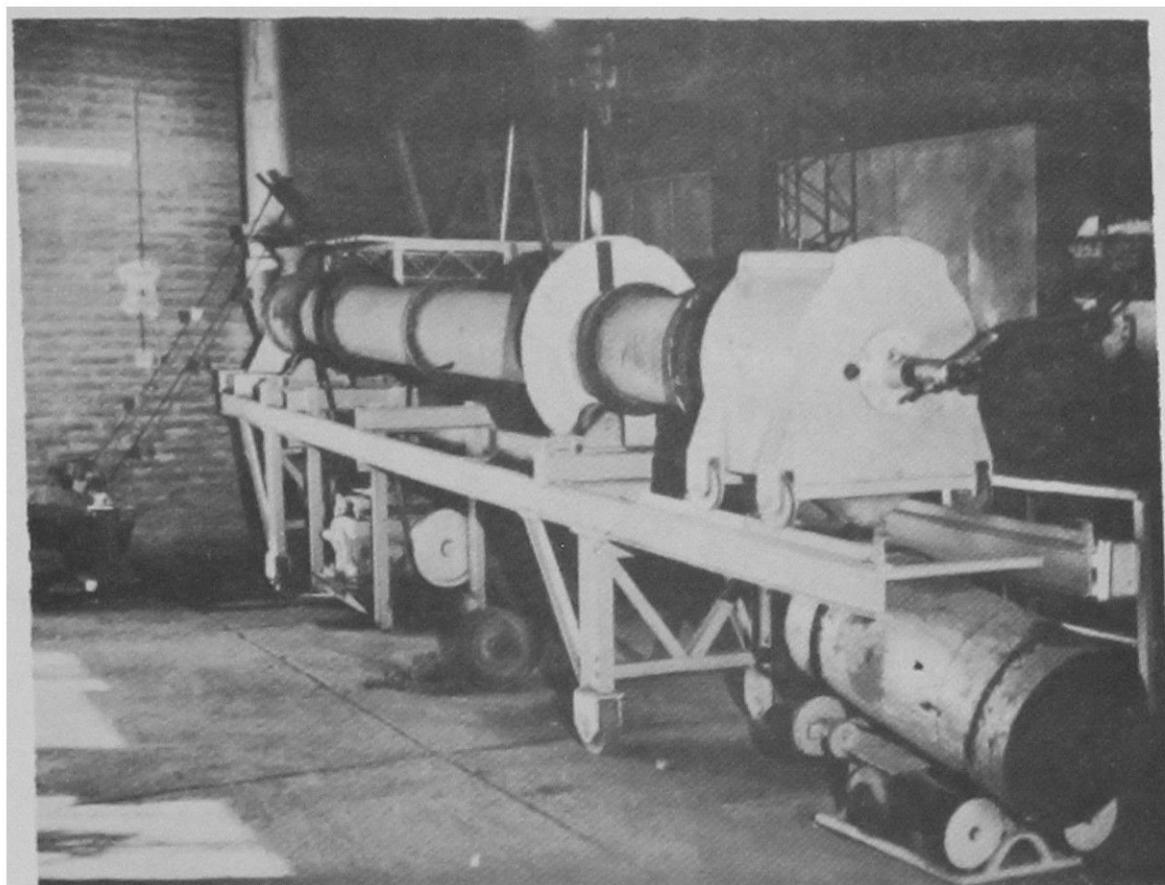


Fig. 4. Horno rotativo Polysius tipo Labor.

una longitud de 8 m. Su producción media aproximada es de 20 kg de clínker por hora. Trabaja apoyado en dos juegos de rodillos y permite la regulación del número de revoluciones dentro de un amplio margen. La inclinación del horno es de 3.5%; ella puede ser modificada por acortamiento o alargamiento de la distancia entre soportes. El número de revoluciones del horno es regulable entre 2.3 y 13.8 revoluciones por minuto. La acomodación del número de revoluciones deseado se efectúa por regulación manual durante su funcionamiento. El combustible empleado es petróleo, con mechero de inyección forzada; se puede alcanzar una temperatura de 1550°C. La temperatura se controla por medio de un pirómetro óptico y cuenta con equipo de alimentación automática y enfriadora de tambor rotatorio. En la Tabla II se indican las condiciones de trabajo del horno.

En la fabricación del clínker debe cuidarse de mantener constante la composición de los materiales que se introducen al horno, para lo cual hay que hacer las correcciones debidas, controlando el contenido de carbonato de calcio de la mezcla y modificando la producción de los materiales que la contienen si es necesario.

El grado de sinterización del clínker obtenido se verificó determinando la densidad aparente y los porcentajes de cal libre y residuo insoluble.

La determinación de las diferentes fases del clínker se hizo por microscopía

TABLA II
CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO
DEL HORNO

Alimentación	0.6 kg/min
Temperatura	1400 - 1450°C
Aire primario	4.5 kgf/cm ² de presión,
Aire secundario	2.0 kgf/cm ² de presión
Velocidad horno	2.3 revoluciones/min

óptica de reflexión; se incluyó la muestra en una resina plástica de endurecimiento rápido, se pulió con sovasol para evitar la hidratación y enseguida se atacó con una solución de 0.25% HNO₃; 24.75% H₂O y 75% alcohol etílico⁴.

Las observaciones se hicieron en microscopio óptico Leitz Orthomat, con un aumento máximo de 1000 X. Figs. 5, 6, 7 y 8.

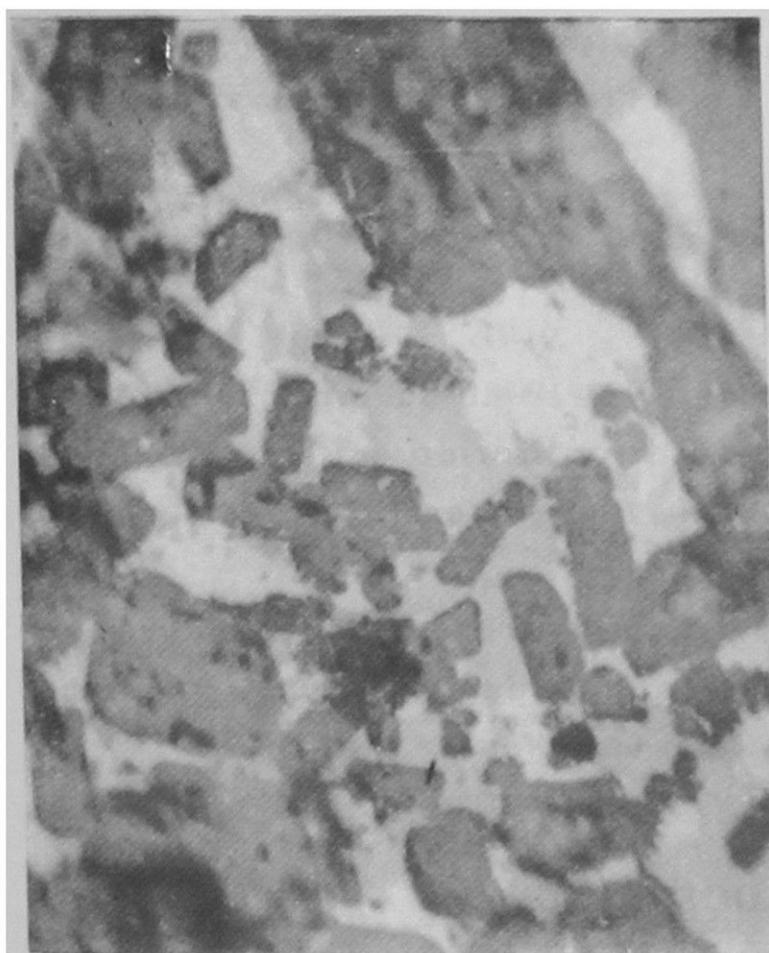


Fig. 5. Cristales de C₃S, C₃A y C₄AF-1000 X.

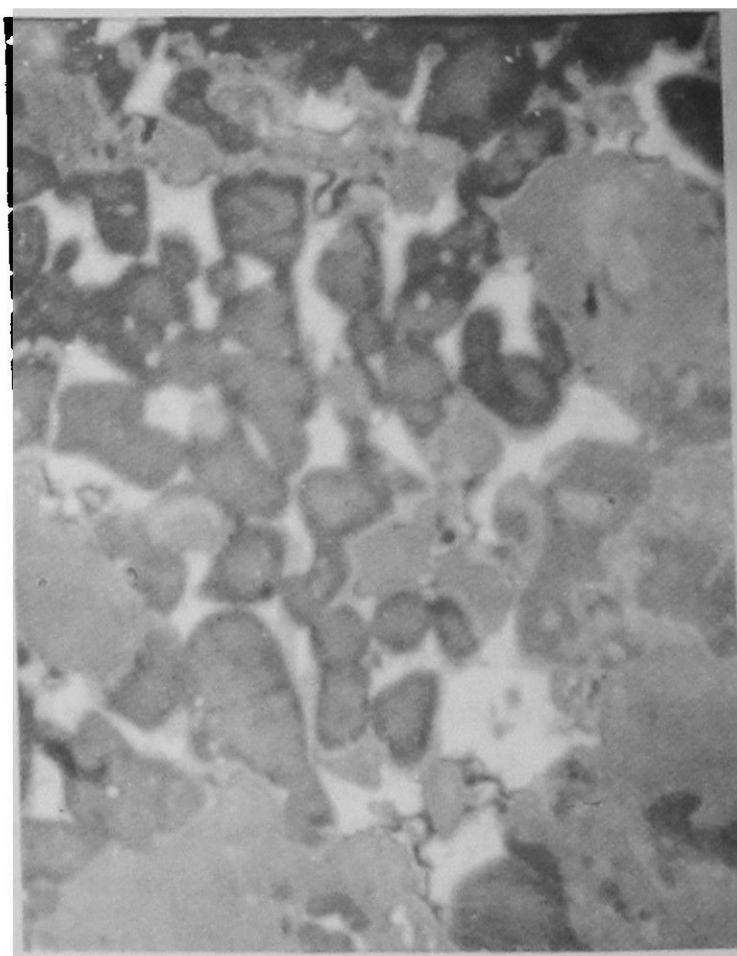


Fig. 6. Cristales de C₃S-200 X.

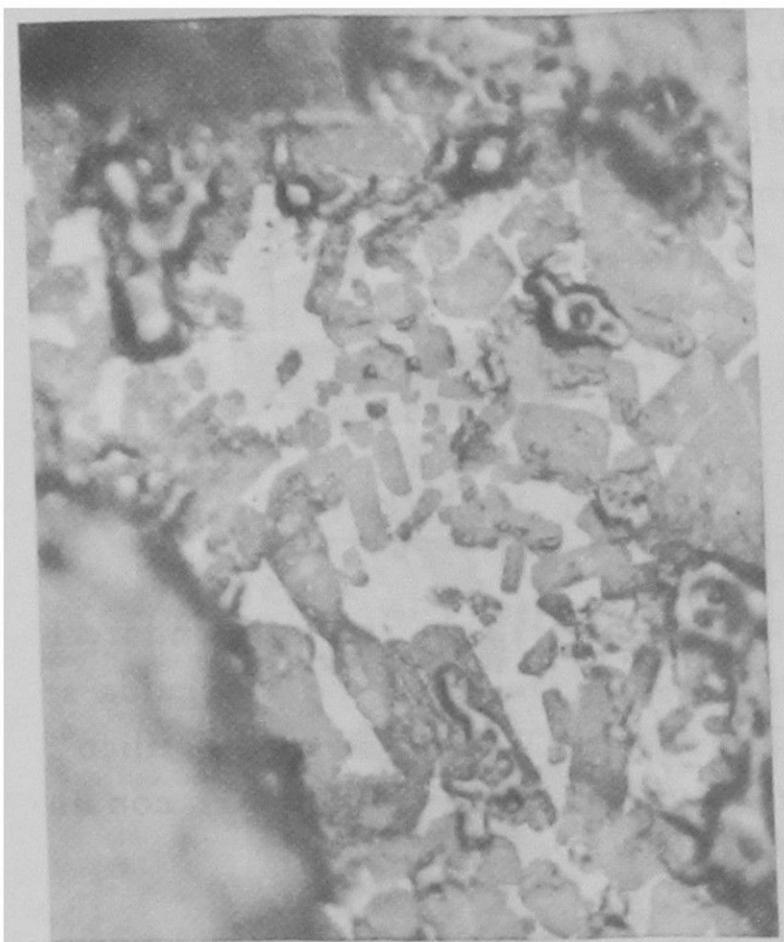


Fig. 7. Cristales de C_3A , C_3S y C_4AF -500 X.

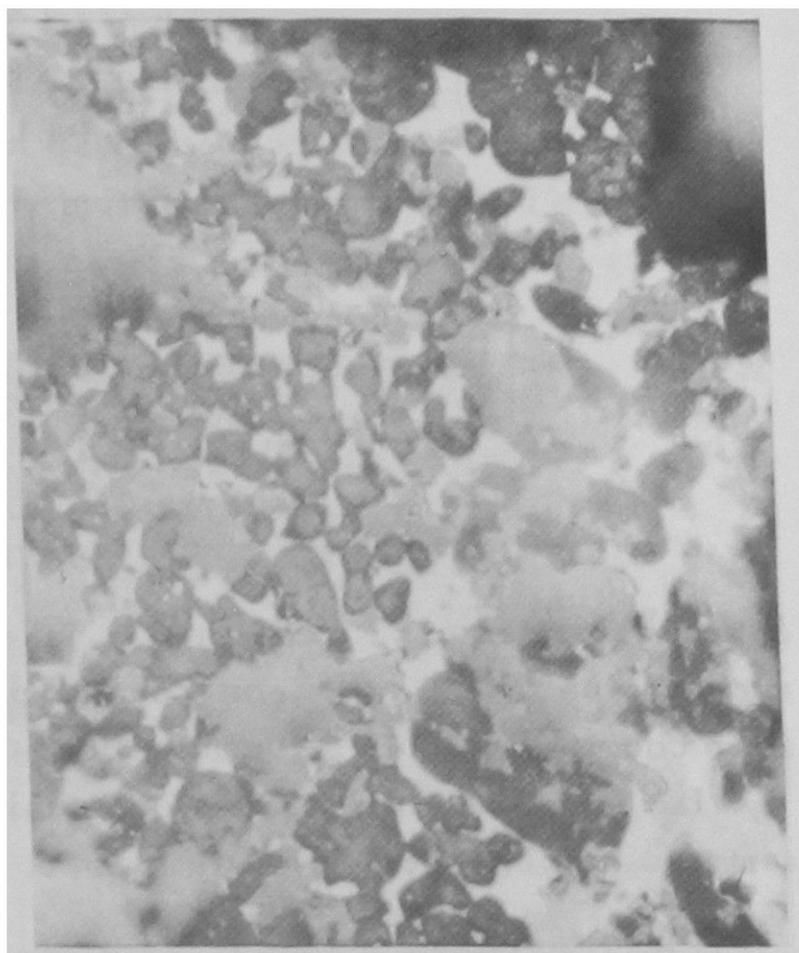


Fig. 8. Cristales C_2S en matriz vítrea-500 X.

FABRICACION DEL CEMENTO

En la elaboración del cemento portland se buscó la combinación más apropiada del clínker y yeso considerando el contenido de anhídrido sulfúrico (SO_3) del yeso en función del tiempo de fraguado inicial del cemento, manteniendo los valores de finura (superficie específica Blaine) casi constante.

De acuerdo a los valores anteriormente determinados se propuso un cemento con 95% de clínker y 5% de yeso, molido en la unidad Hardinge a una finura de 3000 ± 200 Blaine cm^2/g .

RESULTADOS

Identificación de las fases por difracción de Rayos X

Los componentes cristalinos del cemento se pueden identificar por difracción de Rayos X, ya que al cristalizar un compuesto químico los átomos se ordenan formando planos semejantes a los nudos de una red, que se distinguen de otros formados por los mismos átomos o por átomos diferentes; es decir, cada compuesto químico tiene una o muy pocas formas de presentarse cristalizado que sirven para distinguirlo de los demás y por lo tanto identificarlo. Cada compuesto presenta espectros de difracción característicos, lo que facilita su interpretación.

Los diagramas de difracción se hicieron en un aparato Phillips 1130/00, y se utilizó un tubo de Rayos X con ánodo de cobre.

En la Fig. 9 se muestra el difractograma del cemento elaborado que corresponde a un típico difractograma de un cemento portland, donde predomina el silicato o alita, dado que es el componente mayor y también por su alto grado de cristalinidad. Los máximos del silicato tricálcico se encuentran entre 29° - 30° , 32° - 33° , 34° , 41° - 42° y 51° - 52° donde aparecen como un doblete que caracteriza al C_3S monoclinico. Los máximos del silicato bicálcico o belita aparecen a 30° - 31° como C_2S , a 32° - 33° superpuesto con alita y a 41° - 42° también superpuesto con alita

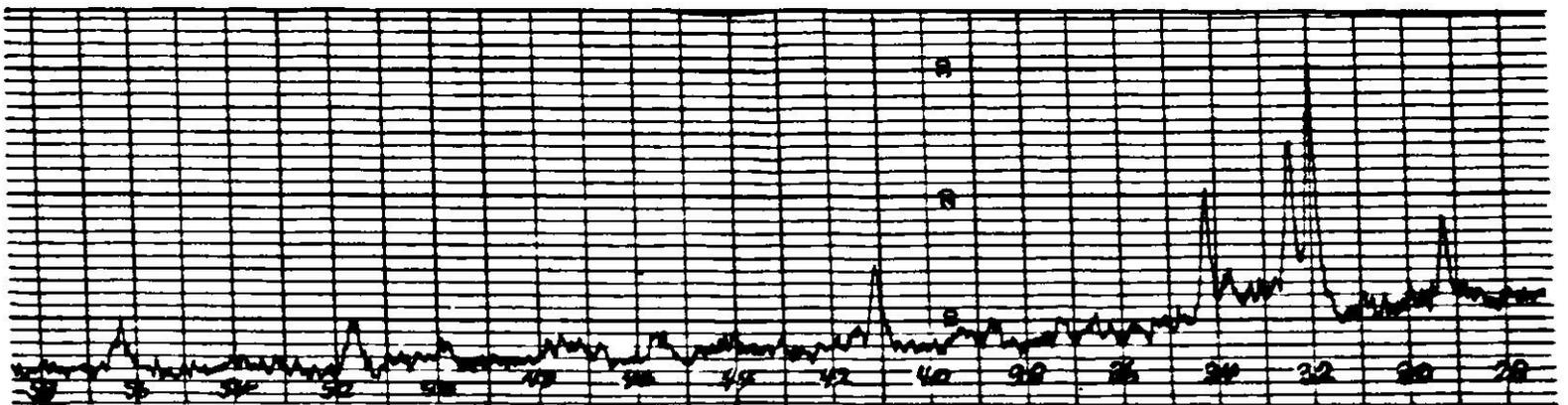


Fig. 9. Diagrama de difracción de rayos X del cemento portland obtenido, C₁.

Calidad del cemento

La calidad del cemento se determinó por análisis químico, ensayos físicos y mecánicos. Se complementó con pruebas mecánicas en un hormigón tipo estándar. Los resultados se presentan en las Tablas III, IV, V, VI y VII.

TABLA III
COMPOSICION QUIMICA DE LOS
CEMENTOS FABRICADOS % EN PESO

Componentes	C ₁	C ₂
SiO ₂	22.01	20.81
Al ₂ O ₃	6.03	4.89
Fe ₂ O ₃	4.05	3.89
CaO	62.85	64.51
MgO	1.01	1.38
SO ₃	1.82	1.92
P ₂ O ₅	0.30	0.64
Na ₂ O	0.24	0.31
K ₂ O	0.40	0.05
Cal libre	1.20	1.30
Residuo insoluble	0.82	0.55
Pérdida por calcinación	1.18	2.08

TABLA IV
MODULOS E INDICES DE LOS
CEMENTOS FABRICADOS

Módulos	C ₁	C ₂
Módulo hidráulico (MH)	1.92	2.13
Módulo de silicato (MS)	2.18	2.37
Módulo alumínico (MA)	1.49	1.26
Factor de saturación de la cal (LSF)	86.60	95.20

TABLA V
COMPOSICION POTENCIAL DE LOS CEMENTOS
FABRICADOS SEGUN FORMULA DE BOGUE¹
°/o EN PESO

Componentes principales	C ₁	C ₂
Silicato tricálcico (C ₃ S)	37.1	60.5
Silicato dicálcico (C ₂ S)	36.0	14.0
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	9.1	6.4
Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF)	12.3	11.8
Sulfato de calcio (CaSO ₄)	3.1	3.3
Fase líquida a 1450° (según F. Lea) ⁹	27.0	23.0

TABLA VI
ENSAYOS FISICOS DE LOS CEMENTOS FABRICADOS

Características físicas	C ₁	C ₂
Peso específico	3.184 kg. dm ⁻³	3.184 kg. dm ⁻³
Sup. específica (Blaine)	3200 cm ² g ⁻¹	3900 cm ² g ⁻¹
Agua de consistencia normal	29.25°/o	27.25°/o
Fraguado inicial	230 minutos	120 minutos
Fraguado final	280 minutos	240 minutos
Expansión autoclave	0.80°/o	1.00°/o

TABLA VII
ENSAYOS MECANICOS SEGUN NORMAS INN
DE LOS CEMENTOS

Edad días	Tensión de rotura			
	Flexión kgf cm^{-2}		Compresión kgf cm^{-2}	
	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
1	20	32	72	176
3	39	50	172	289
7	47	64	239	372
28	68	72	376	455
60	79	84	494	589

Hormigón

Como una comprobación final de la calidad del cemento corriente se preparó hormigón y se ensayó a la compresión.

Se usaron agregados de la planta de áridos de ARRIP S. A. de tamaño máximo 25.4 mm. Se utilizó una dosificación usual para hormigones de prueba, calculada a base de áridos secos y con una relación grava - gravilla 1:1 en peso.

La dosificación usada fue la siguiente:

Cemento	300	kg/m^3
Agua	175	l/m^3
Grava	512	kg/m^3
Gravilla	512	kg/m^3
Arena	905	kg/m^3

El hormigón preparado, con descenso de cono entre 5 - 6 cm, se apisonó en tres capas con 25 golpes cada una en moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, que se ensayaron a la compresión a las fechas indicadas en la Tabla VIII.

TABLA VIII
ENSAYOS MECANICOS HORMIGON

Edad	Resistencia a la compresión kgf cm^{-2}
3 días	112
7 días	171
28 días	251
60 días	304

Los valores son el promedio de tres ensayos.

CONCLUSIONES

1. Con este trabajo se logró establecer que las materias primas de la zona de Antofagasta, debidamente dosificadas, permiten fabricar cementos portland tanto de grado corriente como de alta resistencia, cuyas propiedades determinadas por ensayos químicos, físicos y mecánicos, cumplen ampliamente con los requisitos exigidos por las normas chilenas.

La Planta Piloto de IDIEM, con las restricciones propias de este tipo de instalaciones, permite estudiar experimentalmente la aptitud de materias primas para la fabricación de cemento y proporciona información muy valiosa para orientar los procedimientos a escala industrial.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los académicos de IDIEM, Sres. Ernesto Gómez y Pablo Kittl su colaboración en la elaboración de hormigones y microscopía óptica del clinker respectivamente.

REFERENCIAS

1. BOGUE, R. H. *La chimie du ciment portland*. Eyrolles. París. 1955.
2. EITEL, W. *Silicate Science*. vol. 5, Academic Press. 1966.
3. TAYLOR, H. F. W. *La química de los cementos*. Urmo Espartero. Bilbao. 1971.
4. KITTL, P., NUÑEZ, A., JIMENEZ, P. y ALVAREZ, R. Microscopía óptica del clinker. *Revista del IDIEM*, vol. 7, n° 2, pp. 83 - 98, (1968).
5. SARABIA, A. Dosificación de crudos para Portland. *Cemento - Hormigón*, n° 423 (junio 1969), pp. 625 - 641.
6. YAMAGUCHI, G. y TAKAGA, S. Analysis of Portland cement clinker. *International Symposium on the Chemistry of Cement (Tokyo)* vol. 1, (1969), pp. 181 - 217.
7. Instituto Nacional de Normalización. *Cemento: Terminología, clasificación y especificaciones generales*. 148 - OF 67.
8. KEIL, F. *Cemento*. Editores técnicos asociados. Barcelona. 1973.
9. LEA, F. *The chemistry of cement and concrete*. Edward Arnold. Londres. 1970.

PORTLAND CEMENT MANUFACTURED AT IDIEM PILOT PLANT

SUMMARY:

Two trial types of portland cement were manufactured in a pilot plant for experimental studies with raw materials from El Way which will be the regular supply source for the new INACESA cement factory.

Both cements were tested according to chilean specifications with satisfactory results.