

## PROYECTO

### "ESCORIA DE ALTOS HORNOS - ARGENTINA"

DR. A. LONGO (\*)  
ING. L. FERNANDEZ LUCO (\*)

## RESUMEN

Los trabajos que se exponen a continuación corresponden a los resultados obtenidos en el desarrollo del Proyecto "Escoria de Altos Hornos - Argentina". En distintos congresos nacionales e internacionales se han presentado resultados obtenidos en este desarrollo, por lo cual no fueron incluidos en este seminario, con excepción de algunos aspectos que se consideró importante reiterar o que hacen a la comprensión general de los trabajos.

Estos trabajos incluyen la caracterización de las escorias producidas en los altos hornos de SOMISA y Zapla, su activación con cemento portland para la obtención de cementos mezcla y con cales para formular un cemento de albañilería. Se estudió la influencia de la temperatura en el desarrollo de resistencia en vista al empleo del curado acelerado en la fabricación de premoldeados. Se emplearon cementos mezcla en hormigones normales y livianos y en la fabricación de mosaicos graníticos, entre otros.

Además de las ventajas técnicas que representa la incorporación de las escorias como material cementicio, se analizan los beneficios económicos y ecológicos consecuencia de este empleo.

(\*) Instituto Nacional de Tecnología Industrial

A fin de superar la resistencia natural frente a un nuevo producto, los trabajos no se circunscribieron al nivel de laboratorio sino que se extendieron a la elaboración de elementos premoldeados y a la construcción de una vivienda económica, donde este material se empleó remplazando al cemento portland normal en distintos porcentajes.

El comportamiento de los materiales y las condiciones de habitabilidad de la vivienda, ocupada por una familia, serán evaluadas en el transcurso del tiempo.

El trabajo en obra permitió observar que el empleo de este material no representa mayores inconvenientes sino más bien aporta ciertas ventajas operativas. Las experiencias recogidas en los estudios de laboratorio y en obra se han tenido en cuenta en la elaboración de las recomendaciones finales.

Los autores:

El Dr. Adolfo Longo se inició en la investigación académica en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Buenos Aires, donde obtuvo su doctorado en Ciencias Químicas en 1966. Dirigió distintos proyectos multidisciplinarios de desarrollo aplicado y ejerció también la docencia universitaria, siendo actualmente Profesor Titular Ordinario de la Universidad Tecnológica Nacional. Desde hace catorce años estudia el aprovechamiento de cenizas volantes y escoria de altos hornos, en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

El Ing. Luis Fernandez Luco se graduó en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de San Juan en 1984 y realizó la carrera de postgrado "Tecnología Avanzada del Hormigón" en la Universidad Nacional de La Plata. Es profesor adjunto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Participa en el Proyecto "Escorias de Alto Horno - Argentina" desde su comienzo y en 1988 realizó en el CANMET un período de entrenamiento referido al uso de escoria de altos hornos en hormigones.

## ANTECEDENTES DEL PROYECTO

### "ESCORIAS DE ALTOS HORNOS - ARGENTINA"

#### RESUMEN

Se informa sobre las fuentes de producción de escorias de altos hornos en Argentina, capacidad de producción, localización, etc.

Se describe la situación actual con respecto a la normalización en el País, de la escoria de alto horno granulada y de los cementos con y de escoria.

Se discuten los resultados de un estudio de prefactibilidad sobre la instalación de una planta de cemento mezcla; las conclusiones de este trabajo alentaron a la prosecución de las investigaciones de laboratorio sobre las escorias de altos hornos. Así se analizó la uniformidad del material, actividad hidráulica, usos alternativos de incorporación al hormigón, etc.

La experiencia recogida en estos estudios sirvió de antecedente para el Proyecto "Escoria de Altos Hornos - Argentina".

## ANTECEDENTES DEL PROYECTO

### "ESCORIAS DE ALTOS HORNOS - ARGENTINA"

#### 1. INTRODUCCION

En octubre de 1945 entró en producción el primer alto horno de Argentina, en la Ciudad de Palpalá, Pcia. de Jujuy, a 1.595 km de Buenos Aires, Fig. 1, desde esa fecha se dispone en el País de escoria de alto horno.

Este alto horno formaba parte de la primer planta siderúrgica integrada del País, Establecimiento Altos Hornos Zapla, concebido para utilizar las materias primas de la región. El hecho de no disponer de carbón mineral llevó a que se empleara carbón vegetal, recurso abundante en las provincias vecinas y a la forestación de más de 100.000 ha para la provisión futura de carbón. El mineral empleado provenía de la zona con una ley máxima de hierro del 48%, luego de su beneficio por separación manual; si bien esta ley es actualmente considerada muy baja y no económica, en esa época era del orden de la empleada en altos hornos de los países con una industria siderúrgica desarrollada.

La baja ley del mineral de hierro utilizado tenía como consecuencia una producción de escoria superior, en masa, a la de arrabio, efectuándose en la Universidad Nacional de Tucumán los primeros estudios para el empleo de estas escorias en la fabricación de aglomerantes hidráulicos (1).

Luego del primer alto horno se construyeron otros cuatro más, quedando en la actualidad el N° 5, discontinuando la actividad de los cuatro primeros, de reducida capacidad. La sustitución gradual del mineral propio, de baja ley, por mineral importado de alta ley ha incrementado la producción de arrabio y reducido la de escoria por tonelada de arrabio a 355 kg escoria/ton arrabio; siendo la producción de escoria del año 1989 de 36.000 t la que se enfría totalmente en agua. Trabajando a capacidad máxima la producción anual de escoria sería del orden de 48.000 t.

El 20 de junio de 1960 entró en operación el alto horno N° 1 de la Sociedad Mixta Siderúrgica Argentina - SOMISA, instalado en las cercanías de la Ciudad de San Nicolás, Provincia de Buenos Aires, a 232 km de la Capital Federal.

En esta misma siderúrgica se pone en marcha el alto horno N° 2 el 15 de marzo de 1974; ambos altos hornos

utilizan mineral de hierro de alta ley y coque. La carga utilizada, la mayor capacidad y la optimización de la operación han permitido que la producción de escoria se reduzca a aproximadamente 290 kg/t arrabio.

La producción del alto horno N° 1 fue en 1989 de 210.000 t la que se granuló totalmente; la producida por el alto horno N° 2 fue de 327.000 t; ésta es enfriada al aire. Se encuentra en estudio la alternativa de granular también la escoria de este alto horno.

Resumiendo podemos decir que la producción total de escoria de alto horno en el país es de 537.000 t, de las cuales 246.000 t son escoria de alto horno granulada, Tabla N° 1.

## 2. ANTECEDENTES DE LAS NORMAS NACIONALES

Previendo la mayor disponibilidad de escoria con la puesta en marcha del alto horno N° 1 de SOMISA, se inician en 1959 las tratativas para modificar la norma de cemento portland normal y elaborar la de cemento portland con escoria de alto horno, para poder así dar salida a este subproducto.

Esto permitió que la norma IRAM 1503 "Cemento Portland Normal" contemple la incorporación de escoria granulada hasta un 10 % en masa y que en diciembre de 1967 se envíen a discusión pública las normas IRAM 1636 "Cemento Portland de Escoria de Alto Horno", que contemplaba la incorporación entre 25 y 65 % de escoria y la norma IRAM 1667 "Escoria Granulada de Alto Horno - Características", aprobadas definitivamente en mayo de 1970 y 1971 respectivamente.

Es de señalar que la norma IRAM 1636 establecía en el punto B- Alcance de esta Norma: "B-2- El cemento objeto de esta norma no es apto para ser utilizado en estructuras armadas".

Esta restricción limitaba fuertemente el campo de empleo de estos cementos y posiblemente esta haya sido la causa principal de que este cemento no se fabricara en el país.

En diciembre de 1986, a través de la Comisión para el Desarrollo de Escorias Siderúrgicas del Instituto Argentino de Siderurgia se propone al Instituto Argentino de Racionalización de Materiales la revisión de las normas IRAM 1636 a IRAM 1667. Estas propuestas incluían la eliminación de la restricción mencionada anteriormente, la ampliación del contenido máximo de escoria e incorporaba la alternativa de molienda separada del clínker y la escoria

de alto horno y su posterior mezcla y homogeneización para obtener el cemento portland de escoria de alto horno (2).

La propuesta de modificación de la norma para la escoria de alto horno granulada contemplaba la inclusión de la normalización de la escoria de alto horno granulada molida para su utilización directamente en obra, además de otras modificaciones que incluían los avances registrados en las normas internacionales al respecto.

Estas propuestas fueron tratadas por el Subcomité de Cementos del IRAM, el que, en diciembre de 1989 y octubre de 1990, aprobó respectivamente las siguientes normas: Norma IRAM 1636, "Cemento Portland con Escoria de Alto Horno", donde el contenido de escoria está comprendido entre el 10 y 35 %, Norma IRAM 1630, "Cemento de Escoria de Alto Horno", para contenido de escoria mayores al 35 % y hasta el 75 % .

En ambos casos el campo de aplicación de estos cementos es el mismo que el del cemento portland normal, excepto que "no es apto para ser utilizado en la ejecución de elementos estructurales de hormigón pretensado".

Con respecto a la normalización de la escoria de alto horno, ésta limitó su utilización a la fabricación de los cementos bajo las normas mencionadas anteriormente. No se incorporó el empleo de la escoria de altos hornos granulada molida como material potencialmente hidráulico.

De este modo la Norma IRAM 1667 pasó a ser denominada "Escoria Granulada de Alto Horno para Cemento", quedando sin cubrir, hasta la fecha, la alternativa propuesta para el empleo de la Escoria de Alto Horno Granulada Molida a la finura apropiada, directamente en obra junto con el cemento portland normal en la proporción apropiada para cada caso. Esta alternativa ha pasado para su tratamiento al Subcomité de Hormigón.

### 3. TRABAJOS PRELIMINARES

#### 3.1. Estudios de Prefactibilidad para la elaboración de Cemento Mezcla

En cumplimiento de un convenio celebrado oportunamente entre Agua y Energía Eléctrica, INTI y SOMISA, se realizó un estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de cemento mezcla, en el cual, además de la escoria de alto horno se contempló la utilización de la ceniza volante producida en la Central Térmica de San Nicolás.

Este trabajo incluyó el estudio de mercado, definición del producto, ingeniería básica, estructura de costos y evaluación del proyecto. Los resultados del trabajo señalaron la conveniencia técnico-económica de construir una planta del orden de 600.000 t/año de capacidad en el Parque Industrial de COMIRSA, en San Nicolás (3).

Una de las conclusiones de este estudio es la siguiente: "En resumen, podemos decir que se trata de un proyecto conveniente para la economía general, por el ahorro energético, la posibilidad de disponer de un cemento de características óptimas para las obras de infraestructura que el país debe encarar, la racionalización del transporte de cemento a una región con un alto crecimiento y alejada de las fábricas de cemento y la reducción de la contaminación ambiental. Es por otro lado muy interesante desde el punto de vista económico para los capitales que se inviertan en este proyecto, representando una inversión con un riesgo relativamente bajo".

Al costo de producción de cemento debemos sumarle el costo de transporte hasta el lugar de consumo. La localización de la fuente de escoria granulada más importante, SOMISA, es en este aspecto privilegiada ya que está ubicada en el baricentro del consumo de cemento del país y las fábricas de cemento más cercanas se encuentran a una distancia de 480 km (Figs. 1, 2).

Con respecto a las inversiones consideradas en este estudio las mismas son muy superiores a la inversión mínima necesaria; esto se debe a que se consideró la más avanzada tecnología disponible en ese momento, con la automatización de todo el proceso y la posibilidad de duplicar la producción. A estos factores se debe sumar la marcada sobrevaluación de nuestra moneda en el momento del estudio. No obstante estas circunstancias el período de recuperación del capital estaba comprendido entre 7,5 y 11 años según las alternativas, plazo que por lo expresado anteriormente se puede considerar de máxima, siendo de esperar su reducción a menos de la mitad.

### 3.2. Uniformidad de la Escoria Granulada Producida por un Alto Horno

Durante las discusiones sobre la normalización de las escorias granuladas se planteó el problema de la no constancia de las propiedades de la escoria o que la escoria no tenía una calidad constante, afirmaciones que se fundamentaban en el hecho de considerar a la escoria de alto horno como un subproducto. Presentado de esta manera estas opiniones tuvieron suficiente difusión como para desacreditar este material. En realidad no se tuvo en cuenta que el control del funcionamiento del alto horno y

del arrabio que produce se efectúa a través de la escoria, por lo tanto la composición de la misma y su constancia son parámetros a los que se presta especial atención.

Es importante tener en cuenta que la escoria de alto horno no es una especie química, por lo tanto no tiene sentido hablar de su falta de uniformidad si no se establece un criterio de evaluación y aceptación. Con este fin se realizó un estudio estadístico donde se procesaron los resultados de los análisis químicos de 1213 muestras de escorias de altos hornos granuladas, provenientes de un período de producción de seis meses (4).

En este estudio se tomó como referencia la uniformidad de escorias producidas en Alemania y Francia y de un cemento portland normal producido por una fábrica para la construcción de una central hidroeléctrica y de cementos de diferentes fábricas para distintas obras.

Es de práctica en la industria del cemento almacenar las materias primas en lechos de homogeneización, (Figs. 3, 5) en este estudio se analizó también la influencia de este procedimiento en la reducción de la dispersión, dando como resultado que si se toman 90 coladas consecutivas se obtiene una homogeneización del orden de la escoria europea y superior a la de los cementos portland normal estudiados y tomados como referencia, Tablas 2-4.

Se calcularon también las dispersiones de las fórmulas más utilizadas para relacionar la composición química de las escorias y su actividad hidráulica. Estas fórmulas, Tabla 5, como se ha demostrado (5), tienen una validez relativa y muy posiblemente las fluctuaciones de componentes minoritarios como  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ , etc. tengan una influencia similar a desviaciones más grandes de los componentes mayoritarios.

### 3.3. Alternativas para las formas de empleo de la Escoria de Alto Horno

Se han contemplado las siguientes posibilidades:  
a) molienda conjunta de clínker - escoria granulada - yeso;  
b) molienda separada del clínker y yeso por un lado y de la escoria granulada por otro y mezclado de ambos componentes en seco; c) incorporación de estos componentes independientemente durante la preparación de los morteros y hormigones.

Para las distintas formas de reemplazo se analizó la influencia de la finura de molienda, porcentaje de sustitución y tiempo de curado sobre la resistencia a la flexión y compresión de morteros y la resistencia a la compresión de hormigones.

Se podría pensar que el proceso de molienda conjunta debería llevar a una distribución más íntima y uniforme de las partículas de escoria y clínker que los otros métodos y de este modo contribuir a una mayor resistencia del mortero u hormigón, sin embargo esto no fue observado en este estudio, como así tampoco en la bibliografía.

El análisis estadístico de los resultados de resistencia promedios para morteros ensayados a las edades de 3, 7, 28, 90, 180 y 360 días mostró diferencias significativas entre los tres métodos a las edades de 28 y 90 días; en ambos casos el procedimiento de molienda separada dió como resultado morteros con resistencia más alta que los de molienda conjunta.

El análisis de los resultados para hormigones, ensayados a las mismas edades que los morteros, señaló diferencias significativas solamente a las edades de 7 y 90 días, pudiéndose considerar equivalentes para las otras edades.

A la edad de 7 días la molienda conjunta da resistencias más altas mientras que a 90 días la incorporación directa de la escoria granulada molida directamente en la hormigonera es lo que produce resultados de resistencia más elevados.

Graficados los resultados promedios de las resistencias de los hormigones obtenidos por ambos métodos, en función de la edad de ensayo, muestran una diferencia muy pequeña, con una tendencia en las primeras edades de mayor resistencia para el procedimiento de molienda conjunta, tendencia que se revierte a edades más avanzadas, (fig. 4). Estos resultados son similares a resultados previos encontrados en la bibliografía (6).

Podemos de todos modos observar que la diferencia entre los distintos métodos en general no es significativa y cuando estadísticamente lo es, la magnitud de esta diferencia es menor del 7 %, tanto para morteros como para hormigones.

Otro aspecto considerado fue la uniformidad, dentro de cada "batch", reflejada en los resultados a compresión, por el promedio de los coeficientes de variación. En este caso el test "t" de Student mostró diferencias significativas solamente para la edad de 7 días, resultando menor el promedio de los coeficientes de variación para el procedimiento de adición de la escoria granulada molida por separado.

### 3.3.1. Conclusiones

Las diferencias entre los distintos procedimientos no son relevantes, por lo tanto en la decisión de adoptar uno u otro procedimiento deben tenerse en cuenta otros factores.

A escala comercial existe a la fecha una amplia experiencia sobre la adición de la escoria granulada molida directamente en obra. En Bélgica V. Trief desarrolló el proceso, luego conocido por su nombre, en el cual la escoria es molida en húmedo y luego la suspensión es incorporada a la hormigonera junto con el cemento portland y los agregados. Este procedimiento fue empleado en la presa de Bort-les-Orguir en Francia y en las presa de Chuanie y Avon en Gran Bretaña (7-8).

Si bien este proceso elimina la necesidad del secado de la escoria previo a la molienda y permite obtener una molienda más fina con un menor consumo de energía no se difundió hasta el presente.

En Venezuela se realiza la molienda de la escoria por separado, por vía seca y luego se mezcla con cemento portland normal en silos de homogeneización (9).

Por otro lado la molienda en seco de la escoria y su incorporación en obra fue adoptada en distintos países, tanto en grandes como en pequeñas obras, siendo actualmente una técnica perfectamente establecida en países como Australia, Canadá, Estados Unidos, Finlandia, Inglaterra, Japón y Sud Africa (10-11).

La molienda separada de la escoria y su incorporación junto con el cemento portland normal en la hormigonera representa una serie de ventajas: optimización de la molienda al evitar una sobremolienda del clínker, permitir ajustar la relación EAHGM/CPN en función del requerimiento del proyecto; disminución de los problemas de almacenaje ya que la EAHGM no se hidrata en ausencia de un agente activante, reducción de costos de transporte, etc.

## REFERENCIAS

- (1) Soria Bravo, C. "Contribución al estudio de la aplicación de escorias granuladas no clásicas en la industria de los aglomerantes hidráulicos". "Escorias Siderúrgicas - II Jornadas Técnicas". Noviembre 8, 9 y 10 de 1988. Tomo 3 pp. XIV-1-XIV-79, Bs. As.
- (2) Longo, Adolfo. "Escorias Granuladas de Altos Hornos y Cementos de Escoria - Análisis y Características de Normas Nacionales e Internacionales". "Escorias Siderúrgicas - II Jornadas Técnicas". Noviembre 8, 9 y 10 de 1988. Tomo 3 pp. XV-I-XV-17, Bs. As.
- (3) Longo, A.; Carrizo, H.; Pozzi, A.M. "Estudio de Prefactibilidad para la Elaboración de Cemento Mezcla", Convenio A y E - INTI - SOMISA, Abril 1979. 103 pp. Informe Interno.
- (4) Longo, A.; Berbeglia, A. "Estudio de la Uniformidad de la Escoria Granulada producida por un Alto Horno" 5<sup>a</sup> Reunión Técnica AATH La Plata, 27-31 Octubre de 1982. Tomo 1 pp. 189 - 217.
- (5) Smolczyk, H. Z.K.G. 6, 294 - 296, 1978. "The effect of the chemistry of the slag on the strength of blastfurnace cements".
- (6) Fulton, F. S. "The properties of Portland Cements Containing Milled Granulated Blast Furnace Slag". A Portland Cement Institute Monograph, Johannesburg, 1974. South Africa.
- (7) Cléret de Langavant, J. "Pourquoi et comment le ciment de laitier par broyage humide a été adopté pour la construction du barrage de Bort". CERILH, separata del autor.
- (8) Higgins, D. "Developments and trends in the use of GGBS" Concrete, August, 1989, 35-37.
- (9) Kaiser H. "Die Erzeugen von Huttzement in getrennter Vermahlung" Zement-Kalk-Gips 25; 67, 1972.
- (10) "ASTM Specification for Ground Iron Blast Furnace Slag: Its Development, Use and Future" ACI SP 91-76, Vol. 2, 1551-1576, April 1986.
- (11) Higgins, D. "BS 6699 - A standard for ground granulated blast furnace slag" Concrete, 20 Nro. 8, August, 1986.

T A B L A N° 1

PRODUCCION DE ESCORIA DE ALTO HORNO Y CEMENTO PORTLAND

NORMAL EN ARGENTINA (1989)

Productor	Escoria Granulada (t)	Escoria Enfriada al Aire (t)
Altos Hornos Zapla	36.000	-
SOMISA	210.000	327.000
Subtotal	246.000	327.000
Producción Total	573.000	
Producción de Cemento Portland Normal	4.439.171	

T A B L A N° 2

MEDIAS, DESVIOS ESTANDAR Y COEFICIENTES DE VARIACION PARA

1213 MUESTRAS DE ESCORIAS

Variable	Media	Desvío Estandar	Coef. de Variación
Dióxido de Silicio	37,47	1,337	3,57
Oxido de Aluminio	11,13	0,700	6,29
Oxido de Calcio	43,16	1,582	3,67
Oxido de Magnesio	5,82	0,660	11,35
Azufre	0,91	0,114	12,56
Oxido de Manganeso (II)	0,50	0,347	70,02
Oxido de Hierro (II)	0,36	0,216	59,33

T A B L A N° 3

MEDIAS, DESVIOS ESTANDAR Y COEFICIENTES DE VARIACION PARA  
LOS PROMEDIOS MOVILES DE 90 COLADAS CONSECUTIVAS

Composición	Media	Desvío Estandar	Coef. de Variación
Dióxido de Silicio	37,43	0,609	1,63
Oxido de Aluminio	11,13	0,327	2,94
Oxido de Calcio	43,23	0,774	1,79
Oxido de Magnesio	5,79	0,399	6,89
Azufre	0,91	0,036	3,97
Oxido de Manganeso (II)	0,49	0,133	26,96
Oxido de Hierro (II)	0,37	0,060	16,42

T A B L A N° 4

COEFICIENTES DE VARIACION PARA LAS ESCORIAS DE SOMISA, LAS  
DE REFERENCIA Y EL CEMENTO EN ESTUDIO

Comp.	SOMISA		A	B	C	D	Ei	Ef	F
	1 Col	90 Col							
SiO <sub>2</sub>	3,57	1,63	1,30	1,88	1,29	1,36	1,63	0,85	1,94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,29	2,94	3,72	3,65	2,72	2,12	2,24	1,50	10,23
CaO	3,67	1,79	2,90	2,42	1,80	1,70	1,60	0,82	0,96
MgO	11,34	6,89	5,07	12,75	4,89	5,65			7,65

A: AH No. 1/1964 (1)      Ei: Francia/1973 Sin homog. (9)  
 B: AH No. 2/1964 (1)      Ef: Francia/1973 homogeneizada (9)  
 C: AH No. 1/1965 (1)      F: Cemento util. en Sto.Grande (6)  
 D: AH No. 2/1965 (1)

T A B L A N° 5

VALORES DE DISTINTAS EXPRESIONES UTILIZADAS PARA PREDECIR  
LA HIDRAULICIDAD, EN FUNCION DE LA COMPOSICION QUIMICA DE  
LA ESCORIA

Fórmula	Media	Desvío Estandar	Coef. de Variac.
Fórmula I	1,61	0,098	6,07
Fórmula II	1,18	0,063	5,38
Fórmula III	1,15	0,077	6,63
Fórmula IV	1,31	0,082	6,23
Fórmula V	1,50	0,106	7,06
Fórmula VI	1,51	0,100	6,60

$$\text{Fórmula I} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$$

$$\text{Fórmula II} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3}$$

$$\text{Fórmula III} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$$

$$\text{Fórmula IV} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$$

$$\text{Fórmula V} = \frac{\text{CaO} + 1/2 \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{FeO} + (\text{MnO})_2}$$

$$\text{Fórmula VI} = \frac{\text{CaO} + 1/2 \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$$

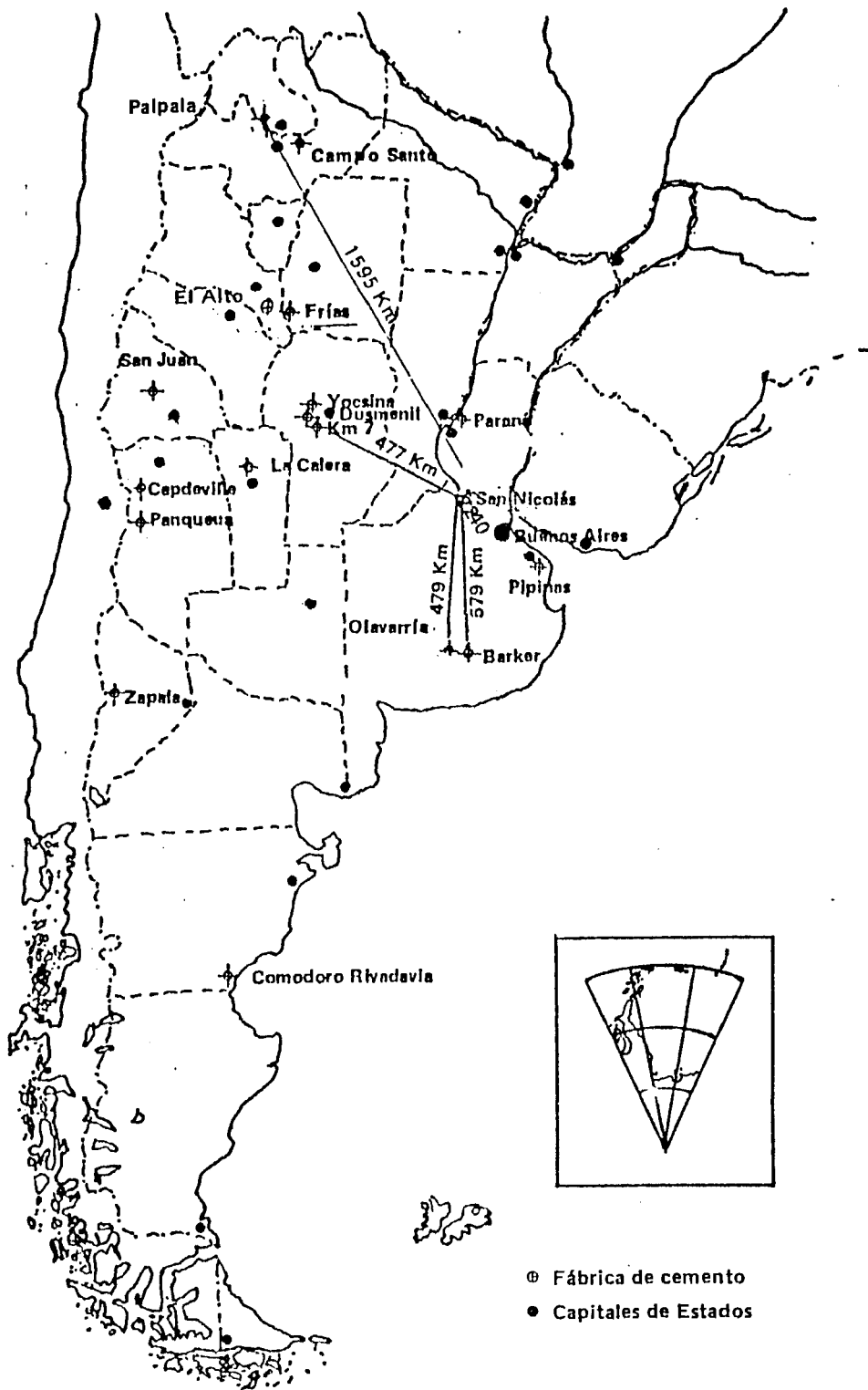


Fig. 1; ubicación de los Altos Hornos y distancia a San Nicolás de las fábricas de cemento más cercanas.

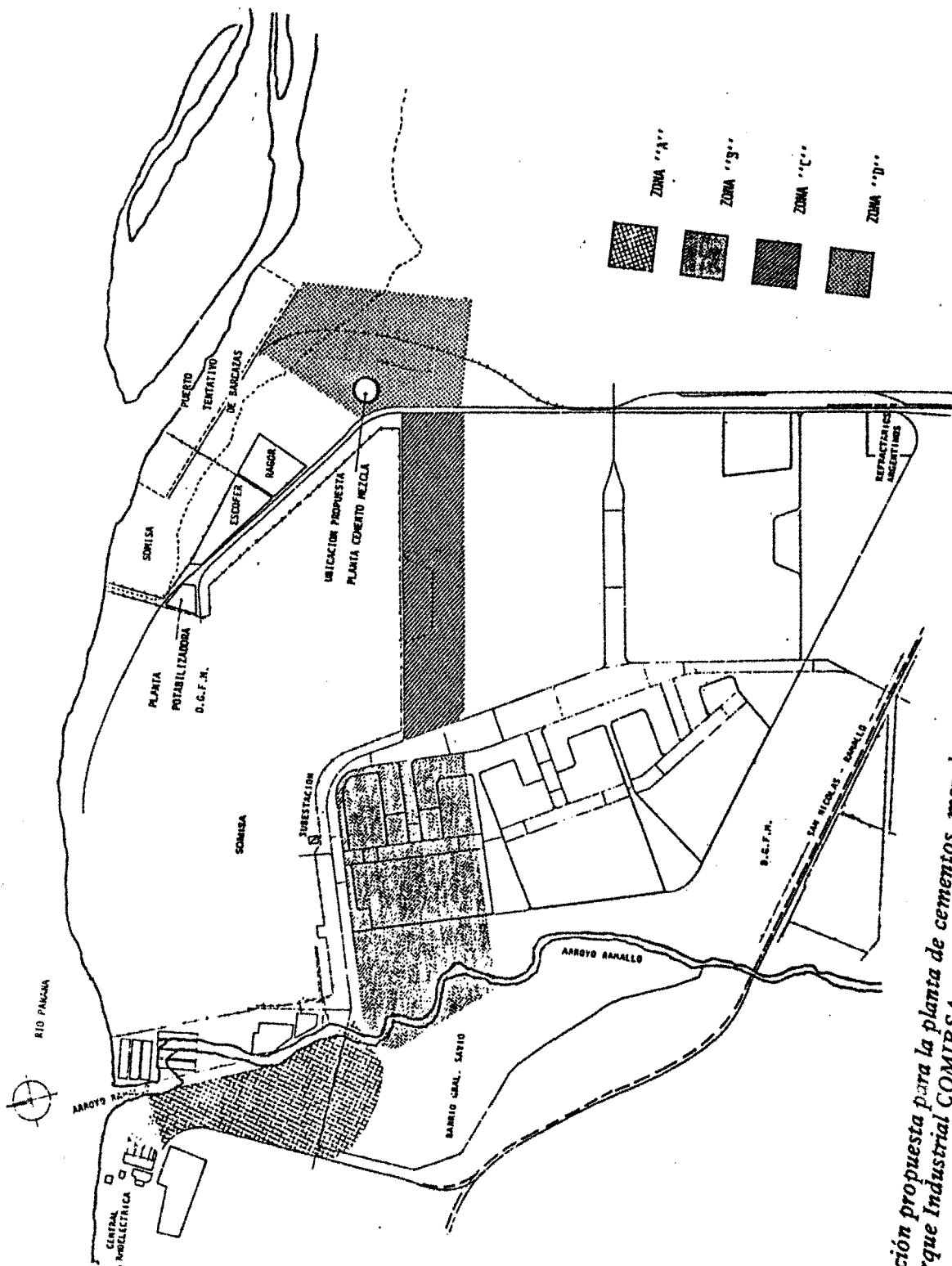


Fig. 2: Ubicación propuesta para la planta de cementos, mezcla, dentro del Parque Industrial COMIRSA.

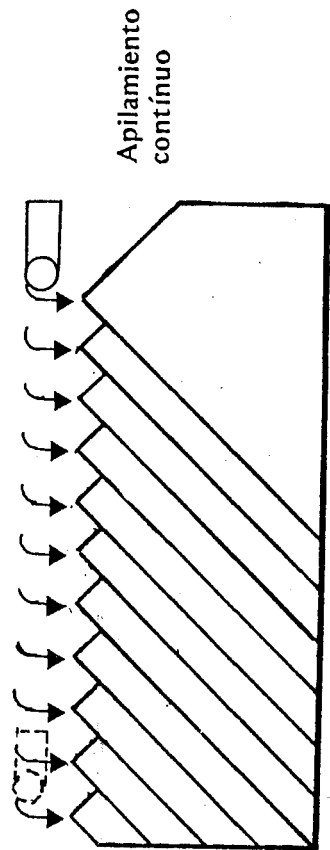
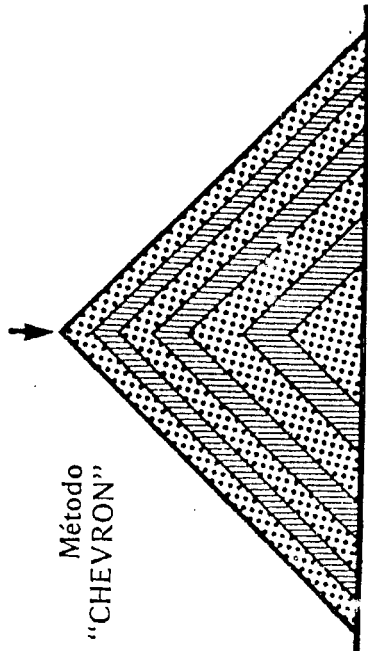
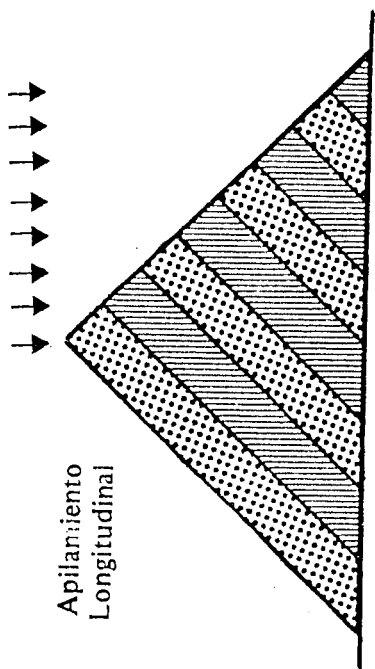
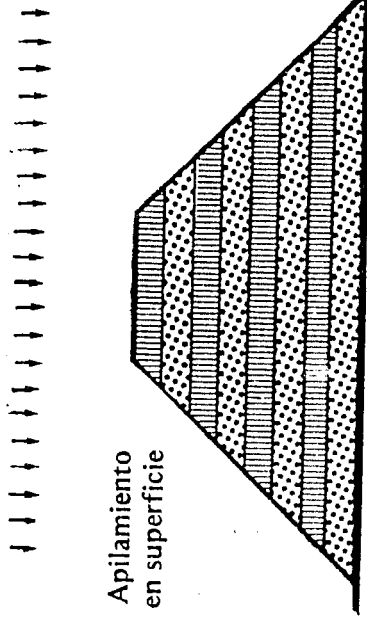
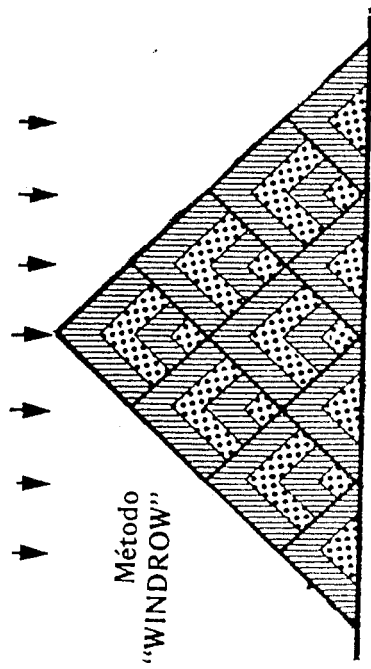
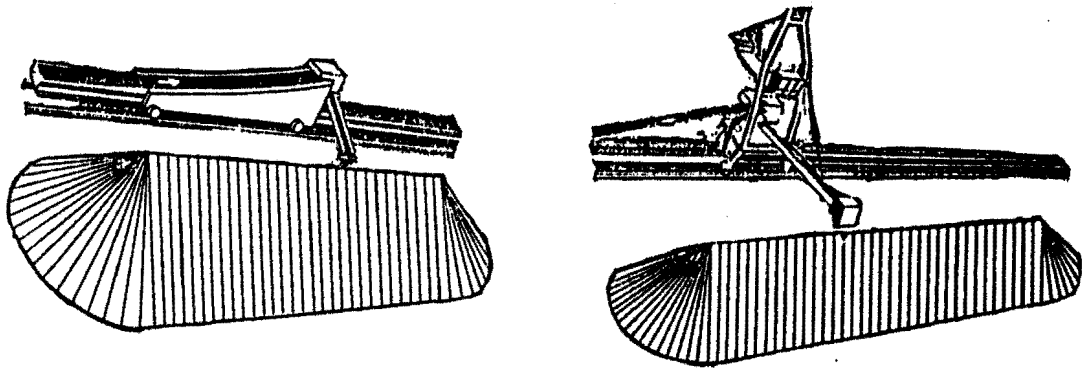
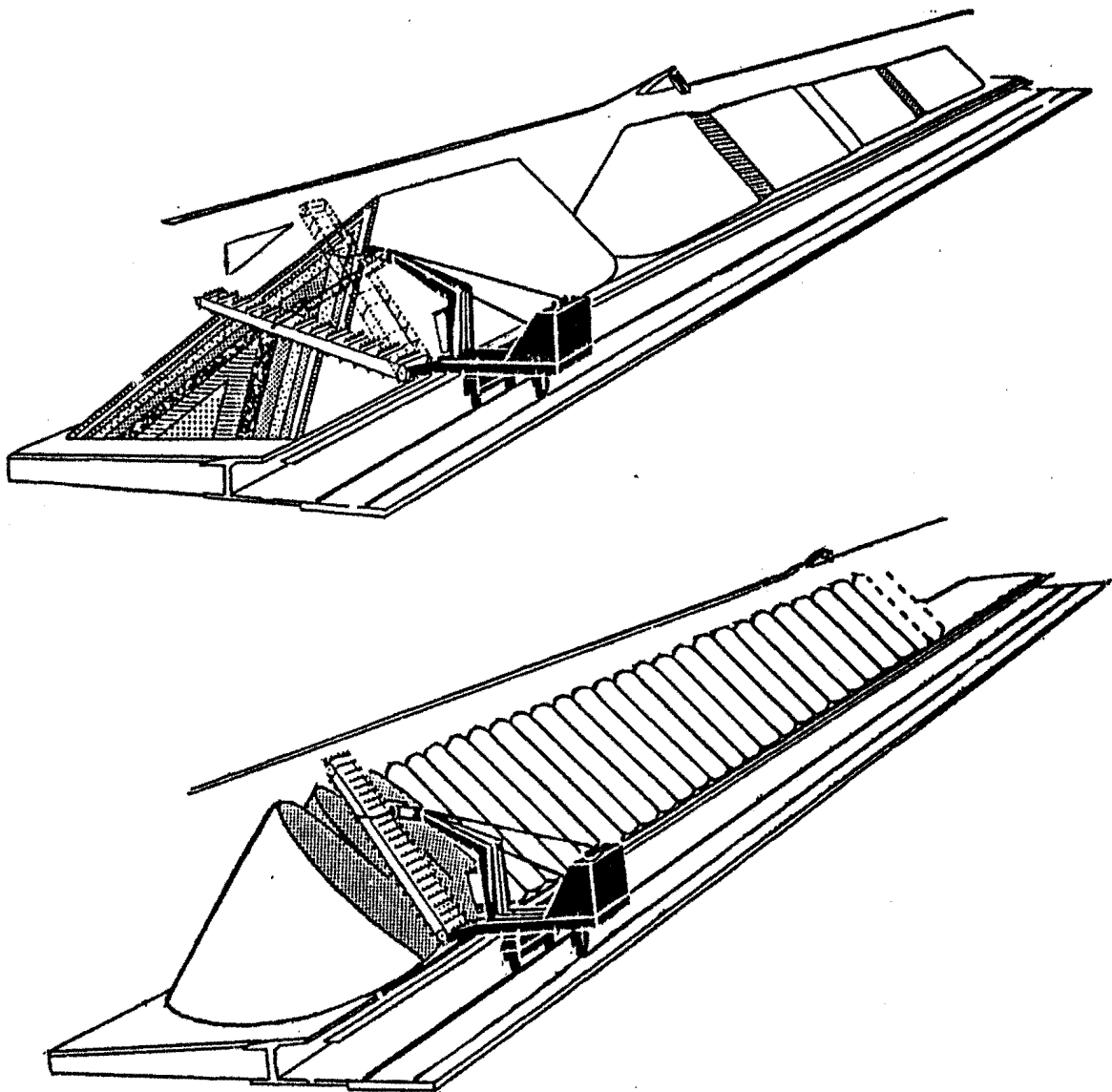


Fig. 3: Distintos esquemas de apilamiento



*Fig. 4: Sistemas de almacenamiento*



*Fig. 5: Sistemas de recuperación del material*

# CARACTERIZACION DE ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA

## RESUMEN

La escoria granulada de alto horno puede destinarse a elaborar cemento mezcla por molienda conjunta con clinker portland o puede molerse en forma separada para utilizarse como constituyente de morteros y hormigones o integrar cementos de/con escoria. En ambos casos, es necesario proceder a caracterizar el material, determinando las propiedades que lo identifican y determinan su comportamiento físico y mecánico.

En este trabajo se resumen las formas usuales de caracterización de escoria granulada de alto horno y de la escoria granulada molida. Se indica brevemente las diferentes alternativas disponibles y los valores sugeridos para las distintas variables en función de las características de las escorias locales.

El destinatario principal de este trabajo es el usuario, por lo que los ensayos más tecnificados, utilizados en tareas de investigación o desarrollo, pueden no estar incluidos en el mismo.

## CARACTERIZACION DE ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA

### 1. INTRODUCCION

La necesidad de caracterización de la escoria de alto horno puede presentarse en distintas circunstancias, ya sea cuando se trata de procesar el producto para obtener escoria granulada de alto horno molida, para obtener cementos mezcla por sustitución parcial de cemento portland por escoria de alto horno o cuando se desea emplear escoria granulada de alto horno molida en la preparación de hormigones y morteros adicionándola directamente en la mezcladora.

De acuerdo con el alcance y la profundidad del análisis requerido, las técnicas pueden alcanzar cierta complejidad. En este trabajo se presentan los ensayos y determinaciones que se realizan usualmente para caracterizar el producto.

La propiedad más importante a los fines de utilizar la escoria granulada de alto horno molida como material cementicio es su hidraulicidad, o sea la capacidad de reaccionar con el agua y proporcionar resistencia a morteros y hormigones. Otras propiedades tales como el color y la molturabilidad son menos relevantes para el usuario, aunque esta última determina la cantidad de energía consumida en la molienda.

### 2. CARACTERIZACION

Son diversos los factores que influyen sobre la hidraulicidad de la escoria. El análisis de cada uno de ellos permite obtener pautas de su capacidad ligante y en ello se basa la caracterización de las escorias de alto horno granuladas.

#### 2.1. Grado de vitrificación (contenido de fase vítrea)

El grado de vitrificación depende de las condiciones de enfriamiento de la escoria y su composición química. La bibliografía indica que no existe un contenido de fase vítrea mínimo para asegurar adecuada hidraulicidad, aunque los resultados óptimos se obtendrían para aproximadamente un 95 % de vidrio. Aún así, no hay buena correlación entre los resultados de resistencia a la compresión y el contenido de fase vítrea.

En la práctica, el usuario de la escoria granulada no puede modificar las condiciones de la materia prima, por lo que la determinación del contenido de

vidrio o fase vítrea puede realizarse para controlar la uniformidad en la escoria recibida.

Para su determinación, existen diferentes técnicas. El método quizás más ajustado es el Método McMaster Modificado adoptado por las normas canadienses (CSA A363 - M1983) y que consiste básicamente en un conteo al microscopio. En el INTI se ha desarrollado un método equivalente utilizando luz transmitida y un polarizador. También se utilizan técnicas de difracción por rayos X en forma cuantitativa, empleando distintos patrones de referencia.

Las distintas técnicas no son comparables en cuanto a los resultados obtenidos y, para el caso de las técnicas de determinación por microscopía, el valor depende de la finura de molido de la muestra analizada. Para minimizar la dispersión de resultados se debe trabajar con la fracción comprendida entre los tamices #200 y #230 ó #325 (75, 62 y 45  $\mu\text{m}$  respectivamente).

Hay otros factores determinantes del comportamiento de la escoria, por lo que es difícil asignar al contenido de fase vítrea un valor mínimo absoluto. En algunos casos, se pueden obtener buenos resultados con valores tan bajos como 65 %. Debemos resaltar que tanto la escoria granulada de SOMISA como la de AHZ poseen un elevado porcentaje de fase vítrea.

## 2.2. Composición química

La composición química está determinada por el funcionamiento del alto horno y existe un rango más o menos amplio de composiciones para las cuales la escoria presenta buena hidraulicidad. Se han definido distintos índices para determinar la reactividad potencial en función de su composición química, pero ninguno presenta buena correlación con la resistencia a compresión de morteros a todas las edades [1].

En general, distintos autores coinciden en aceptar que lo importante, más que una composición química determinada, es una buena constancia en el tiempo.

De acuerdo con el estudio de uniformidad que se realizara hace unos años con la escoria de SOMISA [2], la homogeneización de coladas permite obtener una menor dispersión en la composición química que la que se observa para los cementos portland que se comercializan en nuestro país.

Algunas escorias presentan características particulares, como las de Sudáfrica y Canadá, que tienen un contenido elevado de óxido de magnesio (16, 18 %) pero no se han detectado expansiones excesivas por la

presencia de periclasas. En nuestro país, la escoria de Altos Hornos Zapla tiene una composición química particular por las características del alto horno, por esta razón, se la trata en forma separada [3] en este Seminario.

### 2.3. Composición mineralógica

La composición mineralógica determina las propiedades hidráulicas de la escoria en forma más determinante que la composición química. La forma de determinar los principales constituyentes es desvitrificar la escoria y permitir la completa formación de cristales; se encuentra principalmente series de solución sólida de melilita, gehlenita, akermanita y, en menor cantidad, monticelita, diópside, merwinita y otros compuestos.

Sin embargo, distintos autores coinciden en expresar que no se pueden evaluar las propiedades hidráulicas por medio del cálculo de los minerales correspondientes a esa composición en equilibrio. Los estudios de estas características son muy restringidos y se realizan con fines experimentales y de investigación.

### 2.4. Finura de molido

La finura de la EAHGM es un factor importante en cuanto la misma influye en la ganancia de resistencia que se puede alcanzar en morteros u hormigones. Un aumento de la finura de la EAHGM lleva a un incremento en la velocidad de reacción, otorgando mayor resistencia a todas las edades para cualquier porcentajes de remplazo. Por otro lado, una mayor finura implica un mayor consumo de energía y por arriba de ciertos valores, un desmejoramiento de otras propiedades, por lo cual se busca generalmente una solución de compromiso.

Las finuras usuales son mayores a las del cemento portland y se encuentran entre 380 y 600 m<sup>2</sup>/kg, dependiendo de las características propias de las diferentes escorias y las propiedades deseables para el producto. De acuerdo con nuestra experiencia, una finura aceptable para la escoria de SOMISA sería de 400 m<sup>2</sup>/kg [4].

Las formas de control de la finura de molido son numerosas; por tamizado simplemente se determina un porcentaje en masa menor a un cierto tamaño; otras técnicas, permiten estimar un tamaño medio y las más modernas, por ejemplo granulómetro a rayo laser,

brindan información para conocer la distribución de tamaños de las partículas.

El método comúnmente utilizado para evaluar la finura es la permeametría por el Método de Blaine, que vincula la finura a la superficie específica de una masa determinada de polvo. Es importante también controlar que no existan demasiadas partículas mayores a 45  $\mu\text{m}$  pues prácticamente no contribuyen a la actividad hidráulica.

## 2.5. Tipo de activación

El tipo de activación es determinante de la forma y velocidad en que se manifiestan las características hidráulicas latentes de las escorias. Se pueden citar numerosas sustancias, la mayoría alcalinas o de reacción alcalina en solución, pero la que presenta mayor importancia es el cemento portland, presente en prácticamente todos los hormigones.

Precisamente, se utiliza al cemento portland como el activador de control para medir la actividad hidráulica de las escorias a través de la determinación del "Índice de Actividad". De esta manera, se resume en una sola evaluación todas las otras características mencionadas, obteniendo valores de fácil interpretación y sencilla vinculación con el destino final del producto: ligante en morteros y hormigones.

Este Índice de Actividad de la Escoria [S.A.I.] ha sido adoptado en EEUU y Canadá y consiste en comparar la resistencia a la compresión de morteros normalizados preparados con el cemento portland de referencia y los obtenidos utilizando una mezcla 50 % de cemento portland/50 % de escoria granulada molida. El valor porcentual de comparación se determina a la edad de 28 días y, en función del mismo, puede asignarse un "grado" característico a la escoria.

A efectos de estudiar la evolución de resistencia, se se determinan índices para 3, 7 ó más días. En la Tabla 1 se transcriben de la norma ASTM C989-85 "Ground Iron Blast Furnace Slag for Use In Concrete and Mortars" los requisitos físicos en lo que respecta a la resistencia a la compresión para determinar el "grado" correspondiente.

Los resultados obtenidos al caracterizar la escoria de SOMISA y Altos Hornos Zapla [4] [3] muestran que el Índice de Actividad de la Escoria no representa la actividad hidráulica propia de la escoria sino que refleja el comportamiento de la dupla cemento-escoria; una misma escoria presenta diferente actividad con distintos cementos, hecho que determina la necesidad de evaluación para cada caso en particular.

Otro tipo de activación, distinta de la química, es la térmica, ya sea a presión atmosférica o en autoclave. En el primer caso, se aceleran las reacciones de hidratación, pudiendo obtenerse mayores resistencias a corta edad. Se realizó una primera aproximación al tema utilizando la escoria de SOMISA [5], para estudiar la influencia de las variables que intervienen en el proceso. En el otro caso, se trabaja con temperaturas superiores a 100 °C y presión mayor a la atmosférica [6-7]. Se inducen reacciones diferentes y puede combinarse este efecto con la activación química.

## 2.6. Otras características que suelen evaluarse

### 2.6.1. Contenido de agua retenida

Previo a la molienda del producto granulado, es necesario eliminar por secado el exceso de agua retenida, operación que demanda tanta más energía cuando mayor es el contenido de agua de la escoria. Este aspecto no afecta a las propiedades finales del producto pero interviene en la ecuación económica del proceso global.

### 2.6.2. Molturabilidad

Esta propiedad es determinante de la energía requerida para lograr la molienda de la escoria hasta finuras compatibles con el destino que se persiga. En general, podemos indicar que son necesarias finuras más altas que las usuales para los cemento portland para compensar la escasa contribución a la resistencia a corta edad.

### 2.6.3. Características morfológicas y color

La descripción morfológica de su examen al microscopio no resulta demasiado útil para predecir su comportamiento en morteros y hormigones, aunque en algunos casos puede brindar información adicional acerca del proceso de enfriado, cristalización parcial, contaminación con arrabio, porosidad y molturabilidad potencial. En lo que respecta al color, existe una regla empírica que puede resultar interesante como evaluación preliminar: "Mientras más claro sea el color de la escoria, supuestas constantes las demás variables, mejor será su performance como adición hidráulicamente activa". Sin embargo, no debemos perder de vista la influencia de la presencia de ciertos compuestos químicos en el color final del producto y la eventual contaminación con coque, carbón o arrabio.

## REFERENCIAS

1. Smolczyk, H.G. "The effect of the Chemistry of the Slag on the strength of Blast-furnace Cements" Zement, Kalk, Gips 31(6):294-296; 1978
2. Longo, A.; Berbeglia, A. "Estudio de la Uniformidad de la Escoria Granulada Producida por un Alto Horno", V Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, La Plata, Octubre 1982.
3. Longo, A.; Fernandez Luco, L. "Evaluación de la Escoria Producida por el Establecimiento Alto Hornos Zapla" Seminario Latinoamericano sobre Utilización de Escorias de Altos Hornos en la Construcción, Buenos Aires, Junio 1991.
4. Longo, A.; Fernandez Luco, L. "Cementos Mezcla en base a Escoria de Alto Horno Granulada" Seminario Latinoamericano sobre Utilización de Escorias de Altos Hornos en la Construcción, Buenos Aires, Junio 1991.
5. Longo, A.; Fernandez Luco, L. "Influencia de la Temperatura de Curado en los Cementos Mezcla" Seminario Latinoamericano sobre Utilización de Escorias de Altos Hornos en la Construcción, Buenos Aires, Junio 1991.
6. Miretti, R.E. et al. "Hormigones Celulares en Base a Escoria Granulada de Alto Horno" Seminario Latinoamericano sobre Utilización de Escorias de Altos Hornos en la Construcción, Buenos Aires, Junio 1991.
7. CITAC - Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Informe Interno, 1990.

**Tabla 1: Índices de actividad de la escoria necesarios en función del grado asignado para la edad de 7 y 28 días, ASTM C 989-86 "Physical Requirements"**

Grado asignado	Promedio de las 5 últimas muestras consecutivas	Cualquier muestra individual
<b>Índice a 7 días</b>		
Grado 80	.....	.....
Grado 100	75	70
Grado 120	95	90
<b>Índice a 28 días</b>		
Grado 80	75	70
Grado 100	95	90
Grado 120	115	110

## CEMENTOS MEZCLA EN BASE A ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA

### RESUMEN

La escoria de alto horno granulada molida presenta capacidad hidráulica latente que se manifiesta cuando se la activa adecuadamente.

Se utilizó cemento portland y cal aérea como activadores, formulando mezclas binarias (escoria - cemento portland) y ternarias (escoria - cal - cemento). Se realizaron ensayos de caracterización de estos cementos mezcla, evaluando propiedades físicas y mecánicas a diferentes edades. Las mezclas se obtuvieron por molienda en escala de laboratorio, alcanzando distintas finuras para evaluar su influencia sobre las propiedades físicas y sobre el desarrollo de resistencia.

Los resultados obtenidos son muy satisfactorios y muestran que es posible utilizar la escoria de alto horno granulada producida por SOMISA como remplazo parcial de cemento portland.

Se desarrolló además un cemento de albañilería, con excelentes propiedades reológicas en estado fresco y adecuada resistencia a la compresión.

Los cementos mezcla obtenidos se utilizarán en morteros y hormigones en la construcción del prototipo.

## CEMENTOS MEZCLA EN BASE A ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA

### 1. INTRODUCCION

Los elementos que forman parte del cemento portland normal están presentes en la composición química de la escoria granulada molida, aunque con estructura y proporciones diferentes; en condiciones normales no reaccionan fácilmente, necesitándose la presencia de agentes externos que "activen" esa capacidad latente.

Convenientemente activada, la escoria granulada molida es capaz de desarrollar propiedades ligantes análogas a las de un cemento portland pero debe distinguírsela de las puzolanas pues la formación de compuestos de hidratación puede producirse con agentes activantes distintos del hidróxido de calcio generado en la hidratación del cemento portland y el consumo de este reactivo no es proporcional a la cantidad de escoria presente.

Los mecanismos que se desarrollan para "liberar" la capacidad hidráulica latente han sido desarrollados por distintos autores [1-2].

Los activadores más comunmente usados son el hidróxido de calcio (cal), el cemento portland y el yeso, aunque otros compuestos, entre los que podemos citar el sulfato de sodio, el hidróxido de sodio y el silicato de sodio, también han sido ensayados con éxito [3-4] como se ha expuesto en este Seminario [5].

El cemento portland es el activador que tiene mayor importancia desde el punto de vista práctico para la elaboración de hormigones y el Proyecto se ha desarrollado empleando principalmente este material.

La elevación de temperatura favorece y acelera las reacciones de hidratación, normalmente algo más lentas que las del cemento portland normal, su influencia ha sido estudiada y los resultados se expondrán en este Seminario [6].

## 2. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS

Se prepararon por molienda conjunta distintas mezclas binarias utilizando clínkeres de dos orígenes diferentes y escoria granulada. Los niveles de remplazo se eligieron de modo de cubrir el rango entre 30 % y 90 % de escoria y se estudiaron tres finuras de molido. La mayor finura mejora el comportamiento mecánico de los cementos mezcla, principalmente a edades cortas, pero aumenta en forma no proporcional el consumo de energía. Este hecho justifica el extenso plan desarrollado para optimizar estas variables; si bien la validez de estos resultados se restringe a las condiciones de laboratorio en que fueron implementados, los mismos han sido confirmados por los resultados en obra.

## 3. MATERIALES

### 3.1. Clinkeres

Se utilizó clínker de dos fábricas. Se trituroó en dos etapas, utilizando un molino a mandíbulas y otro a rodillos. Su composiciones químicas y densidades figuran en la Tabla 1.

### 3.2. Escoria Granulada de Alto Horno

Se utilizó escoria granulada proveniente del Alto Horno N<sup>o</sup> 1 que SOMISA posee en San Nicolás, la que fue caracterizada mediante diferentes ensayos: análisis químico, análisis granulométrico, densidad y contenido de fase vítrea. Los resultados se indican en las Tablas 2 y 3.

### 3.3. Yeso

El yeso utilizado, de origen natural y tal cual se extrae de la cantera, fue previamente triturado. Su análisis químico se indica en Tabla 4.

### 3.4. Mezclas preparadas

Se prepararon distintas mezclas, variando el porcentaje de remplazo de clínker por escoria y el clínker. La cantidad de yeso se mantuvo constante en el 4 %, adoptando el criterio de mantener la misma dilución en volumen. Las distintas mezclas preparadas y sus composiciones se indican en Tabla 5.

### 3.5. Molienda

Se estudiaron tres niveles de finura, determinados en base al ensayo del permabilímetro de Blaine: 300,

400 y 500 m<sup>2</sup>/kg, ya que pruebas preliminares realizadas en nuestros laboratorios en diferentes condiciones demostraron que es muy difícil alcanzar una finura de molido mayor de 500 m<sup>2</sup>/kg Blaine en muestras con alto contenido de clínker por el empastamiento de los cuerpos moledores, descartándose el uso de coadyuvantes de molienda para no introducir variables adicionales. Por esta razón, para las mezclas sin escoria (composición nominal 100 % de clínker) se alcanzó solamente los 400 m<sup>2</sup>/kg.

Se evaluó para todos los casos la finura alcanzada en función del tiempo necesario de molienda (proporcional a la energía consumida).

Los tiempos necesarios para alcanzar las superficies específicas de 300, 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg para todas las mezclas se resumen en las Tablas 6 y 7.

En las Figuras 1 y 2 se grafican los valores correspondientes a los cementos mezcla que contienen 90, 60 y 30 % de escoria respectivamente.

Un análisis más detallado de los resultados concernientes a la molienda conjunta pueden consultarse en otro trabajo [7]. A continuación, se transcriben un breve resumen de las conclusiones generales.

En general, los tiempos de molienda se incrementan para aumentos en el contenido de escoria, aunque esta observación es válida para finuras en el orden de los 300 m<sup>2</sup>/kg. Para finuras más altas, los mínimos tiempos de molienda se presentan para contenidos de escoria del 30 al 40 %. Los resultados se pueden interpretar a través del efecto abrasivo que ejercen las partículas de escoria, facilitando la reducción de las partículas de clínker. También disminuye la aglomeración de las partículas de clínker, la que se manifiesta para contenidos de este material superiores al 60 %, ya que la escoria no tiende a aglomerarse.

Para el clínker C se puede observar que para obtener una resistencia de 30 MPa ( norma IRAM 1636 ) a 28 días, el consumo de energía se incrementa en el orden 100%, 70%, 60%, 40%, 30%, 50% y 20% de clínker, mientras que para el clínker B el orden es 100%, 60%, 50%, 70%, 40%, 30% y 20%.

Para una resistencia de 35 MPa a 28 días, el consumo de energía se incrementa en el orden: 100%, 70%, 60%, 40%, 30-50%, y 20% de clínker y 60%, 50%, 40%, 70%, 30%, y 100% de clínker, para C y B respectivamente.

Estos resultados son válidos para las condiciones de molienda utilizadas y demuestran que no siempre se consume más energía en la molienda de los cementos de escoria y que sobre la misma influyen las características del clínker y la resistencia que se busca alcanzar.

Este análisis se deberá realizar, con los materiales de cada caso, simulando las condiciones industriales de molienda, teniendo en cuenta, por ejemplo,

si la molienda es a circuito cerrado o abierto, la utilización de cylpebs o de ayuda-molienda, etc.

#### 4. ENSAYOS

##### 4.1. Ensayos Físicos

Las muestras preparadas fueron sometidas a los ensayos usuales de caracterización de cementos: agua para pasta de consistencia normal, material retenido en tamiz 75  $\mu$ m, expansión en autoclave, contracción por secado, tiempo de fraguado y densidad. Las densidades fueron calculadas a partir de los valores correspondientes de los componentes de la mezcla y su composición; algunos valores fueron determinados en forma experimental como control. Los resultados se muestran en las Tablas 8 a 13.

##### 4.2. Ensayos Mecánicos

Los cementos mezcla obtenidos fueron ensayados a la compresión siguiendo las instrucciones de la norma ASTM C109. Se moldearon probetas cúbicas de 50 mm de arista con mortero de la siguiente composición:

Arena	1375 g
Cemento	500 g
Agua	242 g
w / c	0,485

De acuerdo con las especificaciones de la norma se utilizó la arena llamada "de Ottawa", cuya distribución de tamaños se describe en la Tabla 14.

Las probetas se mantuvieron cubiertas durante 24 horas en sala de moldeo y luego se desmoldaron y sumergieron en agua saturada con cal hasta la edad de ensayo.

Los valores de resistencia a la compresión a las edades de 3, 7 y 28 días para los cementos compuestos por escoria y clínker C y B se pueden observar en la Tabla 15. En las Figuras 3 a 8 se grafican estos resultados.

Para analizar la contribución de la escoria al desarrollo de resistencia, se calculó el valor porcentual referido al correspondiente a la mezcla de igual finura sin escoria. Los resultados se resumen en la Tabla 16 y se grafican en Fig. 9 a 14.

Se realizaron ensayos adicionales con ambos clínkeres para estudiar la evolución de resistencia hasta la edad de 90 días. El contenido de clínker de estas muestras fue de 30, 40, 70 y 100 % nominal y su superficie específica, 400 m<sup>2</sup>/kg Blaine. Los resultados se muestran en Tabla 17.

Los valores del Índice de Actividad de la Escoria (S.A.I.) calculados para la escoria en estudio se pueden observar en la Tabla 18, y se la puede clasificar con grado 100 y 80 para los clínkeres B y C respectivamente y finura de 500 m<sup>2</sup>/kg. Para el clínker B, se está muy cerca del grado 120.

## 5. CONCLUSIONES

Se observa que para distintos valores de resistencia hay un porcentaje de remplazo, dependiente del clínker utilizado, que minimiza el tiempo de molienda, es decir, el consumo de energía.

La escoria en estudio muestra un comportamiento muy diferente con los dos clínkeres. Con el de mayor contenido de álcalis, menor resistencia y molturabilidad, clínker B, la contribución de la escoria al desarrollo de resistencia es superior y se manifiesta para edades más tempranas que en el caso del clínker C.

En las Figs. 15 y 16 se representa la evolución de resistencia hasta 90 días para los cementos con 0, 60 y 70 % de escoria, donde puede observarse las diferencias señaladas.

El desarrollo de resistencia con la edad, hasta 28 días, para los cementos con 90, 60 y 30 % de escoria, muestra un comportamiento de acuerdo con lo esperado.

La influencia de la finura sobre la resistencia a compresión para las distintas edades y para los cementos con 90, 60 y 30 % de escoria se muestra en las Figs. 17 y 18 donde se puede observar que para el clínker C la molienda más fina contribuye más a 28 días que a 3 ó 7 días. Con el clínker B la influencia de la finura es similar, pero disminuye, a la edad de 28 días, para los cementos con mayor contenido de clínker.

Con clínker C, la resistencia a la compresión aumenta en general con el contenido de clínker, no evidenciándose una contribución muy importante de la escoria hasta los 7 días. Para 28 días, sin embargo, se manifiesta un mayor aporte relativo para un contenido de escoria en el rango del 60 al 70%. Para 90 días y 400 m<sup>2</sup>/kg de finura Blaine, las mezclas con 40 y 70 % de clínker superan al control.

Con clínker B, la contribución de la escoria a la ganancia de resistencia se observa a los 3 días para la finura de 500 m<sup>2</sup>/kg, a los 7 días para las finuras de 400 m<sup>2</sup>/kg y 500 m<sup>2</sup>/kg y a los 28 días para todas las finuras. A esta edad y para un contenido de escoria entre 40 y 70 %, el aporte es máximo, el que, para la finura de 500 m<sup>2</sup>/kg permite superar al control en este rango de

reemplazo. A la edad de 90 días y de acuerdo con la información obtenida por el ensayo de algunas muestras, todos los cementos mezcla con finura de 400 m<sup>2</sup>/kg superan al cemento control.

En resumen, con el clínker B se supera, a la edad de 28 días, entre un 6 y un 27 % la resistencia del cemento control, para finuras de 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg, mientras que con el clínker C las resistencias de los cementos mezcla no superan a la del control a la edad de 28 días aunque esto sí ocurre alrededor de los 60 días aproximadamente, con el cemento que contiene 60 % de escoria.

Los requisitos de resistencia mínima a 3, 7 y 28 días de la norma ASTM C 595 ( 12.4, 19.3 y 24.1 MPa ) y los de la norma IRAM 1636 ( 17 y 30 MPa ) a 7 y 28 días no son cumplidos por todas las composiciones. Se puede observar de la Tabla 18 los contenidos mínimos de clínker para cumplir con los requisitos de norma en cada caso. Se debe tener en cuenta que los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma ASTM que difiere de la norma IRAM, por lo cual los valores, respecto a esta última, son solamente orientativos.

## 6. CEMENTOS PARA ALBAÑILERIA

Los cementos para albañilería deben presentar, además de buenas propiedades mecánicas y estabilidad volumétrica, adecuada plasticidad y capacidad de retención de agua. Para conferir estas características, es usual el uso de caliza e incorporador de aire en cementos de albañilería y de cal area o hidratada según corresponda en obra. En nuestro caso, se utilizó una mezcla escoria-cal en estudios preliminares para diseñar un cemento para albañilería [8]. Los resultados mostraron la necesidad de utilizar un aditivo plastificante e incorporador de aire y de incluir cemento portland normal en la formulación para mejorar el comportamiento reológico y mecánico a corta edad respectivamente. El cemento finalmente formulado cumplió con las especificaciones de la norma IRAM 1685 para Cementos de Albañilería en los ensayos de laboratorio.

Este cemento fue utilizado para la confección de mortero de revoque de los paneles de la vivienda prototipo, como se señala en otro trabajo presentado en este Seminario [9].

## 6.1. Materiales

### 6.1.1. Escoria De Alto Horno Granulada

Se utilizó Escoria Granulada Molida en la Planta Piloto de molienda que SOMISA posee en San Nicolás. Sus características físicas y composición química se indican en la Tabla 19.

### 6.1.2. Cal Hidratada

De acuerdo con los resultados de estudios previos, se utilizó cal area hidratada en polvo. Se eligió una cal proveniente de la Prov. de San Juan. Sus características físicas y composición química se describen en Tabla 20.

### 6.1.3. Cemento Portland Normal

Se utilizó cemento portland normal producido en Olavarría, Provincia de Buenos Aires.

### 6.1.4. Aditivo Incorporador De Aire Y Plastificante

Se utilizó un producto comercial constituido por ácidos carboxílicos grasos y aromáticos neutralizados, el que se presenta como un sólido soluble en agua. Se utilizó la misma dosis que para trabajos anteriores [8], esto es, 18 mg/kg de ligante y se incorporó a la mezcla diluido en agua en solución 1g/100g.

## 6.2. Ensayos sobre Mortero Fresco

Se trabajó en dos etapas. En la primera, se prepararon morteros no normalizados, esto es, la relación ligante/arena fue menor a la que establecen las normas IRAM, con el objeto de establecer comparaciones en estado fresco y endurecido con un mortero tradicional (1:1:6). En la segunda, se buscó caracterizar la mezcla ternaria utilizando las proporciones establecidas por norma. En este caso, el patrón de referencia lo constituyó un cemento de albañilería comercial. Los contenidos de cal utilizados fueron 20, 25, y 30 % de cal en el primer caso y 15, 20 y 25 % en el segundo. Las composiciones de las mezclas ternarias se detallan en Tabla 21 y las de los morteros en la Tabla 22.

En todos los casos se utilizó arena normalizada, integrada por tres fracciones, cuya granulometría figura en la Tabla 23. La cantidad de agua se ajustó de modo de alcanzar una fluidez de 110 +/- 5 %. El porcentaje de aire incorporado fue del 18 % aproximadamente.

Se realizaron ensayos de retención de agua contra succión de acuerdo con la norma IRAM 1679 "Cementos de albañilería, método de ensayo". La capacidad de retención de agua de los morteros con 18% de aire incorporado (nominal) se indica en Tabla 24.

Se moldearon probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm, las que fueron desmoldadas a las 48 horas para prevenir roturas. El curado se realizó sumergiendo las mismas en agua saturada con cal a 21 °C hasta la edad de ensayo.

### 6.3. Ensayos Sobre Mortero Endurecido

Se realizó ensayo de flexión y compresión a las edades de 3, 7, 28 y 90 días. Los resultados se indican en Tabla 25. En la Fig. 19 se grafican los resultados de resistencia a la compresión, por ser más representativos.

## 7. ANALISIS DE RESULTADOS

Es importante destacar las excelentes características del mortero fresco en lo que respecta a su cohesión y plasticidad, igualando y en algunos casos superando a los cementos de albañilería de uso comercial, ensayados como referencia.

Los valores de resistencia a compresión a tres días son bajos y disminuyen con el incremento en el contenido de cal. A 7 y 28 días la resistencia disminuye levemente con el contenido de cal, aunque este comportamiento no está bien definido pues para las mezclas con 20 y 25% de cal existen algunas inversiones.

Los valores de resistencia a flexión muestran un comportamiento menos definido, aunque los valores se mantienen en el mismo orden.

## 8. CONCLUSIONES

Los resultados son buenos pues en general muestran que un cemento de albañilería compuesto por escoria-cal podría competir ventajosamente con los cementos comerciales.

Las características reológicas de los morteros son excelentes pero debe prestarse especial cuidado a las condiciones de curado en obra. Ensayos orientativos realizados en laboratorio indican una influencia importante del curado al aire, el cual impide alcanzar los valores de resistencia obtenidos por el curado húmedo [7]. La incorporación de un 15% de cemento a la mezcla permite esperar una menor sensibilidad a las deficiencias de curado.

## REFERENCIAS

1. Kondo, R. and Ueda, S. "Kinetics and Mechanism of the Hidration of Cements", Proceedings, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, 4;270, Tokyo, 1969.
2. D'Ans, J. and Eick, H. "Investigations on the Setting Process of Hidraulic Blast-Furnace Slag", Zement, Kalk, Gips, 7:449-459, 1954.
3. Voinovitch, I; Raverdy, M.; Dron, R; "Ciment de Laitier Granulé sans clinker", 7<sup>o</sup> Congreso Internacional de Química del Cemento, Paris, 1980.
4. Kukko, H; Mannonen, R. "Chemical and Mechanical Properties of Alkali-Activated Blast-Furnace Slag Concrete (F-Concrete)", Nordic Concrete Research, Pub.1 16/82.
5. Douglas, E; Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. "Alkali Activated Blast-Furnace Slag Concrete. Proportioning and Properties" Seminario Latinoamericano sobre Utilización de Escorias de Altos Hornos en la Construcción. Junio 1991, Buenos Aires, Argentina.
6. Longo, A.; Fernandez Luco, L. "Influencia de la Temperatura de Curado en los Cementos Mezcla" Seminario Latinoamericano sobre Utilización de Escorias de Altos Hornos en la Construcción. Junio 1991, Buenos Aires, Argentina.
7. Longo, A.; Lopez, A.R. "Cementos de Albañilería en Base a Escorias de Altos Hornos" IX Conferencia Interamericana sobre Tecnología de Materiales, Octubre 1987, Santiago, Chile.
8. Longo, A; Fernandez Luco, L.; "Cemento de Albañilería Compuesto por Escoria-Cal" 8a. Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Octubre de 1989, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
9. Fernandez Luco, L; Longo, A. "Empleo de la Escoria de Alto Horno Granulada en la Construcción de una Vivienda" Seminario Latinoamericano sobre Utilización de Escorias de Altos Hornos en la Construcción. Junio 1991, Buenos Aires, Argentina.

Tabla 1: Composición química y densidades de los clínkeres (g/100g)

	Clínker B	Clínker C
Residuo insoluble .....	0,39	0,11
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )...	20,1	21,7
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )...	6,10	5,18
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	3,61	3,53
Oxido de calcio (CaO).....	62,4	66,0
Oxido de magnesio (MgO) ....	3,61	0,68
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )....	0,49	0,39
Oxido de calcio libre .....	1,15	0,41
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O) .....	0,64	0,39
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O).....	1,47	1,36
Alcalinos totales .....	1,41	1,29
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ).....	3,12	3,13

Tabla 2: Escoria de alto horno granulada, análisis granulométrico.

Tamiz Nro	% Ret. acum.
4	0,9
8	7,7
16	36,1
30	83,5
50	92,3
100	96,2
Fondo	100,0

Tabla 3: Escoria de alto horno granulada, análisis químico, contenido de fase vítrea y densidad.

Residuo insoluble	0,77 g/100g
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ).....	36,5 "
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ....	12,5 "
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	1,31 "
Oxido de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ...	1,03 "
Oxido de calcio (CaO) .....	42,9 "
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O) .....	0,38 "
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O).....	0,78 "
Oxido de magnesio (MgO).....	3,74 "
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ).....	0,11 "
Sulfuro (S=) .....	0,84 "
Alcalinos totales .....	0,89 "
Densidad .....	2,92 g/cm <sup>3</sup>
Porcentaje de fase vítrea ...	97,5 %

Tabla 4: Yeso, composición química.

Residuo insoluble + Dióxido de silicio.	0,76 g/100g
Oxidos precipitables por amoníaco .....	0,32 "
Oxido de calcio (CaO) .....	33,1 "
Oxido de magnesio (MgO) .....	0,02 "
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) .....	43,9 "
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	0,64 "
Cloruro (Cl <sup>-</sup> ) .....	0,04 "
Agua combinada .....	20,2 "
SO <sub>4</sub> Ca.2H <sub>2</sub> O .....	94,3 "

Tabla 5: Composición de las diferentes mezclas y denominación de las mismas.

Ej: B470

B: Origen del clínker utilizado  
 4: Finura de molienda (400 m<sup>2</sup>/kg)  
 70: Porcentaje de clínker en la mezcla

Designación	Contenido porcentual (en masa)		
	Clínker	Yeso	Escoria
B/C x 00	96	4	---
B/C x 70	67.2	4	28.8
B/C x 60	57.6	4	38.4
B/C x 50	48.0	4	48.0
B/C x 40	38.4	4	57.6
B/C x 30	28.2	4	67.2
B/C x 20	19.2	4	76.8
B/C x 10	9.6	4	86.4

Nota: La "x" indica que no se identifica la finura porque las proporciones se mantienen para las mezclas molidas a distinta finura.

Tabla 6: Tiempo necesario (h:min) para alcanzar superficie específica de 300, 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg (Blaine), clínker C

Mezcla	Superficie específica Blaine (m <sup>2</sup> /kg)		
	300	400	500
Cx00	1:20	3:05	---
Cx70	1:35	3:10	9:00
Cx60	1:45	3:25	7:50
Cx50	1:55	3:55	7:30
Cx40	2:00	3:45	6:55
Cx30	2:05	3:35	6:45
Cx20	2:10	3:40	6:10
Cx10	2:25	4:15	6:25

Nota: La "x" indica que no se identifica la finura porque aparece como parámetro de encabezamiento de las columnas de la tabla.

Tabla 7: Tiempo necesario (h:min) para alcanzar superficie específica de 300, 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg (Blaine), clinker B

Mezcla	Superficie específica Blaine (m <sup>2</sup> /kg)		
	300	400	500
Bx00	3:00	7:30	---
Bx70	3:15	6:00	11:00
Bx60	2:00	4:05	10:55
Bx50	2:30	4:10	11:00
Bx40	3:10	5:30	12:05
Bx30	3:20	6:00	10:00
Bx20	3:15	5:50	10:00
Bx10	3:10	5:00	10:00

Nota: La "x" indica que no se identifica la finura porque aparece como parámetro de encabezamiento de las columnas de la tabla.

Tabla 8: Agua para pasta de consistencia normal

Mezclas			Agua (cm <sup>3</sup> )		
C310	C410	C510	22,4	23,0	23,8
C330	C430	C530	21,6	23,0	24,4
C340	C440	C540	21,8	23,0	24,4

Mezclas			Agua (cm <sup>3</sup> )		
B310	B410	B510	---	21,4	---
B320	B420	B520	21,8	23,0	24,0
B330	B430	B530	21,4	22,8	24,2
B340	B440	B540	21,4	22,8	24,4
B370	B470	B570	---	21,6	22,8

--- Valores no determinados o cuyo resultado no es consistente.

Tabla 9: Material retenido en tamiz Nro 200 ( 75  $\mu\text{m}$  ) para las muestras preparadas con clínker C.

Mezclas			% retenido		
C310	C410	C510	6,0	2,5	0,7
C320	C420	C520	7,8	2,1	0,8
C330	C430	C530	8,5	3,3	1,0
C340	C440	C540	10,1	2,6	1,2
C350	C450	C550	7,8	3,0	2,0
C360	C460	C560	9,6	3,3	3,0
C370	C470	C570	12,2	5,1	5,0
C300	C400	C500	11,4	7,6	---

Tabla 9 (Cont.): Material retenido en tamiz Nro 200 ( 75  $\mu\text{m}$  ) para las muestras preparadas con clínker B.

Mezclas			% retenido		
B310	B410	B510	10,6	4,9	1,5
B320	B420	B520	7,9	2,2	0,9
B330	B430	B530	16,8	5,7	3,1
B340	B440	B540	17,2	5,5	3,2
B350	B450	B550	15,7	6,2	6,2
B360	B460	B560	17,2	8,3	2,0
B370	B470	B570	19,9	6,5	5,0
B300	B400	B500	14,2	9,6	---

Tabla 10: Expansión en autoclave

Mezclas			Expansión %		
B330	B430	B530	0,04	0,02	0,07
B340	B440	B540	0,06	0,04	0,03
----	B400	----	----	0,05	----

Mezclas			Expansión %		
C330	C430	C530	-0,01	-0,02	-0,04
C340	C440	C540	-0,01	-0,03	-0,04
----	C400	----	----	n.d.	----

Tabla 11: Contracción por secado

Mezclas			Contracción %		
B330	B430	B530	-0,10	-0,10	-0,10
B340	B440	B540	-0,09	-0,11	-0,12
B300	B400	----	-0,09	-0,11	----

Mezclas			Contracción %		
C330	C430	C530	-0,08	-0,10	-0,11
C340	C440	C540	-0,08	-0,08	-0,10
C300	C400	----	-0,09	-0,12	----

Nota: el signo (-) indica contracción

Tabla 12: Tiempo de fraguado para la muestras elaboradas con clinker C.

Mezcla	Tiempo inicial (IRAM)	Tiempo inicial (ASTM)	Tiempo final (IRAM-ASTM)
C300	2:32	2:46	3:45
C400	1:39	1:59	2:42
C370	2:28	2:47	3:45
C470	2:04	2:17	3:15
C570	1:27	1:42	2:30
C310	4:48	5:08	8:00
C410	4:15	4:48	6:30
C510	3:43	4:06	6:15

Tabla 12 (Cont): Tiempo de fraguado para la muestras elaboradas con clinker B.

Mezcla	Tiempo inicial (IRAM)	Tiempo inicial (ASTM)	Tiempo final (IRAM ASTM)
B300	2:15	2:40	3:45
B400	0:30	1:10	2:00
B370	2:35	3:15	3:50
B470	1:50	2:25	3:45
B570	n.d.	n.d.	n.d.
B310	4:55	5:40	8:00
B410	4:00	4:40	6:00
B510	3:50	4:30	6:30

Tabla 13: Densidad teórica de las diferentes mezclas preparadas con clínker C

Mezcla	g/cm <sup>3</sup>
C300 C400	3,13
C370 C470 C570	3,05
C360 C460 C560	3,03
C350 C450 C550	3,00
C340 C440 C540	2,98
C330 C430 C530	2,95
C320 C420 C520	2,93
C310 C410 C510	2,90

Tabla 13 (Cont): Densidad teórica de las diferentes mezclas preparadas con clínker B.

Mezcla	g/cm <sup>3</sup>
B300 B400	3,13
B370 B470 B570	3,05
B360 B460 B560	3,03
B350 B450 B550	3,00
B340 B440 B540	2,98
B330 B430 B530	2,95
B320 B420 B520	2,93
B310 B410 B510	2,90

Tabla 14: Granulometría de la arena de Ottawa, utilizada para ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C 109)

Tamiz Nro.	mm	Retenido acumulado %
16	1,18	-
30	0,60	15,5
40	0,425	31,7
50	0,30	64,1
100	0,150	96,2
Fondo	-	100,0

Tabla 15: Resistencia a la compresión para los cementos mezcla y de referencia a las edades de 3, 7 y 28 días

Sp m <sup>2</sup> /kg	Resistencia a la compresión ( MPa )						
	Clínk %	Clínker C			Clínker B		
		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
300	10	2,1	4,8	7,7	3,3	6,6	12,1
	20	2,4	4,9	17,1	3,5	6,2	16,8
	30	3,9	7,6	20,1	4,0	8,5	22,1
	40	6,2	9,5	22,8	5,2	9,4	22,7
	50	7,3	11,3	22,2	7,4	12,4	23,0
	60	9,3	14,1	24,3	8,0	13,6	21,5
	70	11,7	17,0	28,1	10,6	19,7	28,5
	100	17,2	25,4	34,8	15,1	25,8	29,7
400	10	3,2	7,8	18,0	5,3	12,0	19,0
	20	4,0	9,0	25,5	5,5	12,2	27,0
	30	7,9	12,4	34,5	6,0	13,1	34,4
	40	9,0	13,7	31,7	7,6	16,0	40,9
	50	11,8	15,9	29,8	9,2	17,1	35,3
	60	15,2	20,4	36,1	12,9	21,4	37,7
	70	16,4	24,8	38,8	14,3	23,5	35,1
	100	23,4	34,9	41,4	19,1	25,4	35,5
500	10	5,3	12,2	24,8	9,4	17,1	24,9
	20	6,3	15,1	36,4	7,6	15,9	32,6
	30	8,4	17,6	39,3	8,9	20,3	43,0
	40	13,0	19,2	38,6	10,9	21,0	45,9
	50	14,5	20,5	41,7	12,8	24,1	43,2
	60	19,3	25,0	45,5	14,6	26,1	42,5
	70	23,7	30,4	48,2	17,7	24,3	35,6
	100	30,0	39,0	50,0	21,0	27,0	36,0

Tabla 16: Resistencia porcentual con respecto al cemento de referencia

Resistencia porcentual (100 % corresp. clínker puro)							
Edad (d)	Clink (%)	Clínker C Finura (m <sup>2</sup> /kg)			Clínker B Finura (m <sup>2</sup> /kg)		
		300	400	500	300	400	500
3	10	12,2	13,8	17,7	21,9	27,9	44,8
	20	14,2	17,1	21,0	23,1	29,0	36,0
	30	22,7	33,8	28,0	26,3	31,5	42,6
	40	36,0	38,5	43,3	34,7	39,7	52,0
	50	42,7	50,4	48,3	49,3	48,2	61,0
	60	53,9	64,8	64,3	52,9	67,6	69,7
	70	68,0	69,9	79,1	70,2	75,2	84,5
	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
7	10	19,1	22,5	31,3	25,7	47,3	63,6
	20	19,4	25,9	38,7	24,2	48,1	58,8
	30	29,8	35,4	45,1	33,0	51,6	75,1
	40	37,4	39,4	49,3	36,5	62,9	77,9
	50	44,5	45,6	52,6	48,0	67,3	89,4
	60	55,6	58,4	64,1	52,7	84,0	96,8
	70	66,9	71,1	78,0	76,6	92,3	90,1
	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
28	10	22,1	43,5	49,6	40,7	53,5	69,2
	20	49,0	61,6	72,9	56,6	76,0	90,7
	30	57,8	83,3	78,6	74,3	96,9	119,6
	40	65,7	76,4	77,3	76,5	115,3	127,5
	50	63,8	72,0	83,3	77,3	99,4	119,9
	60	69,8	87,0	91,0	72,5	106,0	118,1
	70	80,8	93,6	96,5	96,0	98,9	98,8
	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabla 17: Serie de ensayos adicionales para 56 y 90 días  
Superficie específica Blaine: 400 m<sup>2</sup>/kg

% clínker	Resistencia a la compresion (MPa)			
	Clínker C		Clínker B	
	56 d	90 d	56 d	90 d
30	----	34,0	38,2	42,7
40	34,0	46,9	44,2	50,4
70	32,6*	48,0	35,5	----
100	----	39,2	38,3	35,8

---- Probetas no moldeadas

\* Valores no consistentes

Tabla 18: Índice de actividad de la escoria (S.A.I.) con los clínter C y B para distintas finuras y edades

Super. Espec. (m <sup>2</sup> /kg)	Índice de actividad de la escoria					
	Clínter C			Clínter B		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
300	42,7	44,5	63,8	49,3	48,0	77,3
400	50,4	45,6	72,0	48,2	67,3	99,4
500	48,3	52,6	83,3	61,0	89,4	119,9

Tabla 19: Porcentaje mínimo de clínter con el cual los cementos cumplen con la resistencia a la compresión mínima según normas.

Norma	Finura (m <sup>2</sup> /kg)	3 d		7 d		28 d	
		C	B	C	B	C	B
ASTM C 595	300	100	100	100	70	60	70
	400	60	60	60	60	20	20
	500	40	50	40	30	10	10
IRAM 1636	300	*	*	70	70	100	100
	400	*	*	60	50	30	30
	500	*	*	30	30	20	20

\* No requerida por la norma IRAM 1636

Tabla 20: Escoria de alto horno granulada molida, análisis químico, contenido de fase vítrea y densidad.

Residuo insoluble	1,00 g/100g
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ).....	31,3 "
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ....	11,9 "
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	4,47 "
Oxido de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ...	0,92 "
Oxido de calcio (CaO) .....	44,2 "
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O) .....	0,44 "
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O).....	0,88 "
Oxido de magnesio (MgO).....	3,71 "
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ).....	0,88 "
Sulfuro (S=) .....	1,04 "
Alcalinos totales .....	1,02 "
Densidad .....	2,96 g/cm <sup>3</sup>
Porcentaje de fase vítrea ....	98,0 %
Finura Blaine .....	380 m <sup>2</sup> /kg

Tabla 21: Cal aérea hidratada en polvo.

Análisis químico.

Residuo insoluble .....	0,28 g/100g
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ).....	1,45 "
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ....	0,17 "
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	0,16 "
Oxido de calcio (CaO) .....	71,3 "
Oxido de magnesio (MgO) .....	0,56 "
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	7,1 "
Índice de cal útil (CaO) .....	64,5 "
Oxido de calcio libre .....	62,6 "

Análisis físicos

Finura

Tamiz Nro	% retenido acumulado
30	0,14
100	0,66
200	2,0

Expansión en autoclave: 0,03 %  
 Plasticidad ( Emley ) : 150

Tabla 22: Composición de cementos

Designación	Cemento portland %	Escoria %	Cal aérea %
O20	15	65	20
O25	15	60	25
O30	15	55	30
O1:1:6 **	65	--	35
A15	15	70	15
A20	15	65	20
A25	15	60	25
APL *	--	--	--

\* Cemento de albañilería comercial  
 \*\* Unica mezcla sin incorporación intencional de aire

Tabla 23: Composición de morteros

Mezcla	Cemento	Escoria	Cal	Agua	Aditivo
O20	47,0	209	65	280	58
O25	48,0	188	78	285	57
O30	46,0	168	91	290	55
O1:1:6	200,0	---	107	285	--
A15	75,0	350	75	295	90
A20	75,0	325	100	300	90
A25	75,0	300	125	305	90
APL *	500,0	---	---	---	--

\* Cemento de albañilería comercial

Nota: Todas las mezclas se prepararon con 1500 g de arena normalizada para albañilería.

Tabla 24: Granulometría de la arena normalizada para ensayos de resistencia de cementos de albañilería.

Tamiz Nro	% Ret. acumulado
16	0,0
30	48,0
50	73,4
100	97,4
Pasa 100	100,0

Tabla 25: Retención de agua de los morteros (%)

Mezcla	Retención(%)
A15	67
A20	69
A25	72
APL	71

Tabla 26: Resistencia a flexión y compresión

Iden.	Flexión (MPa)				Compresión (MPa)			
	3d	7d	28d	90d	3d	7d	28d	90d
O20	0,25	1,07	2,17	2,30	0,73	2,81	5,74	6,60
O25	0,26	1,13	2,04	2,30	0,73	3,03	4,27	6,20
O30	0,28	1,19	1,65	2,00	0,68	2,90	4,30	4,80
1:1:6	0,33	1,24	2,00	1,80	2,55	4,10	6,80	6,60
A15	0,69	1,95	3,40	2,70	2,02	4,98	10,9	13,80
A20	0,47	1,69	3,30	3,50	1,47	4,96	9,4	11,60
A25	0,52	1,61	3,10	3,40	1,67	5,41	9,6	11,70
APL	0,35	0,71	1,10	1,60	1,03	2,01	3,30	4,80

Nota: La mezcla O1:1:6 no tiene aire intencionalmente incorporado

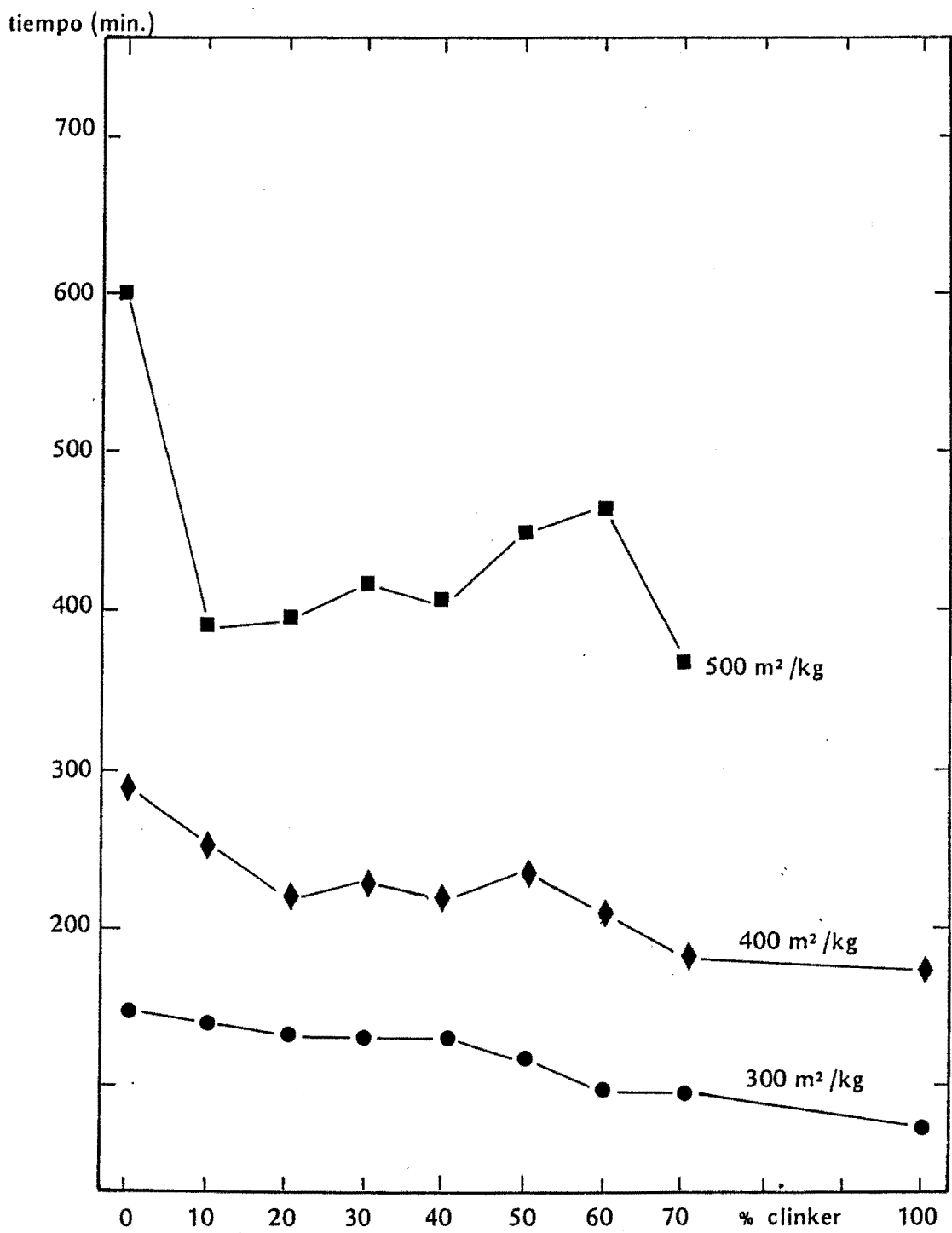


Fig. 1: Tiempo de molienda necesario para alcanzar finuras con superficie específica Blaine de 300, 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg en función del porcentaje de clinker C.

Tiempo (min.)

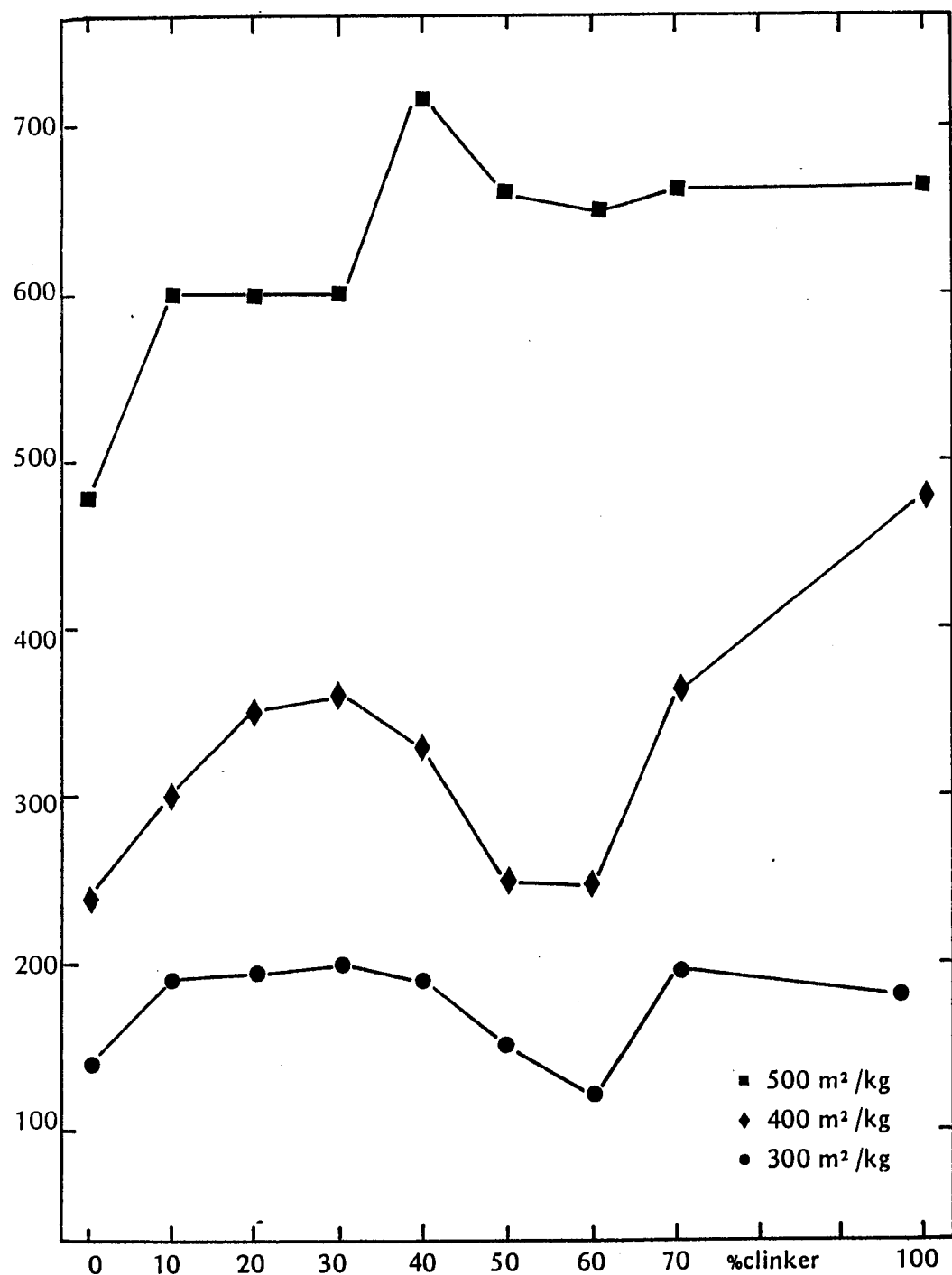


Fig. 2: Tiempo de molienda necesario para alcanzar finuras de superficie específica de 300, 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg, en función del contenido de clinker B.

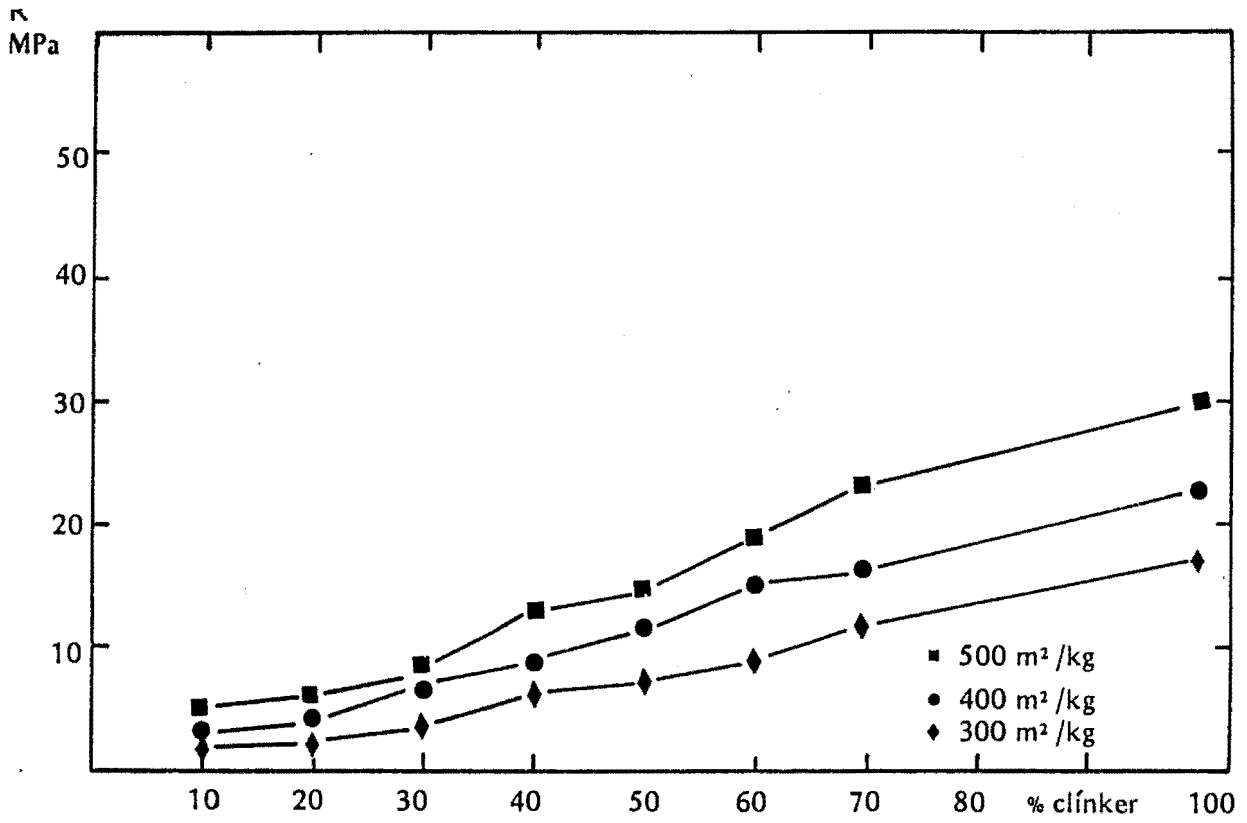


Fig. 3: Resistencia a la compresión a la edad de 3 días en función del porcentaje de clínker C.

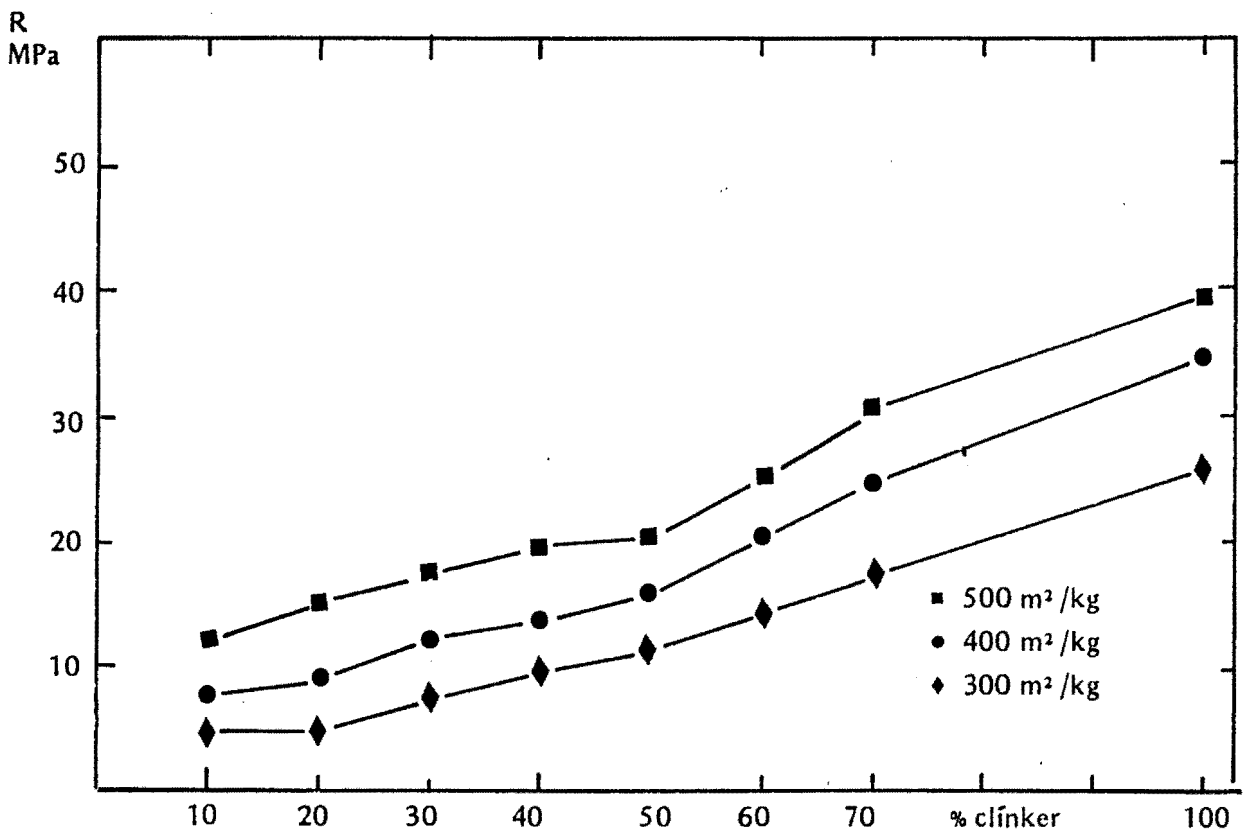


Fig. 4: Resistencia a la compresión a la edad de 7 días en función del porcentaje de clínker C.

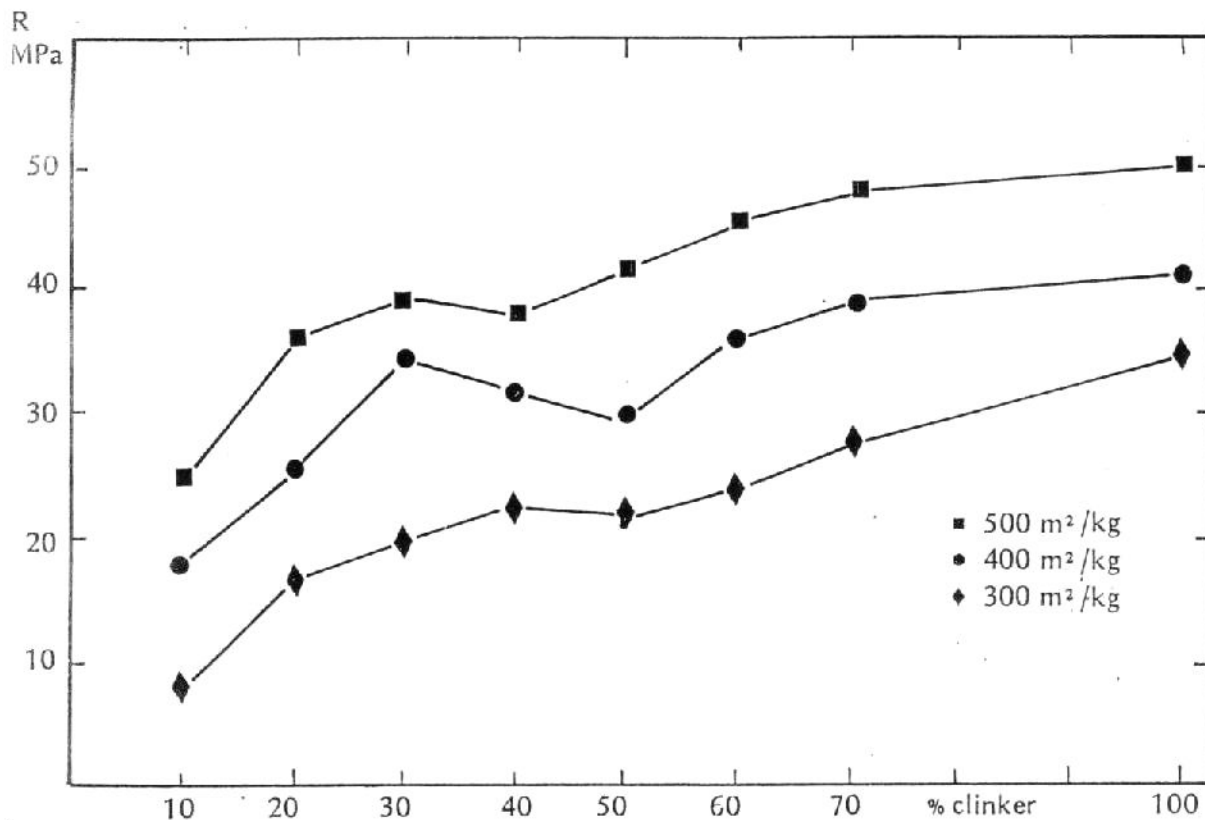


Fig. 5: Resistencia a la compresión a la edad de 28 días en función del porcentaje de clinker C.

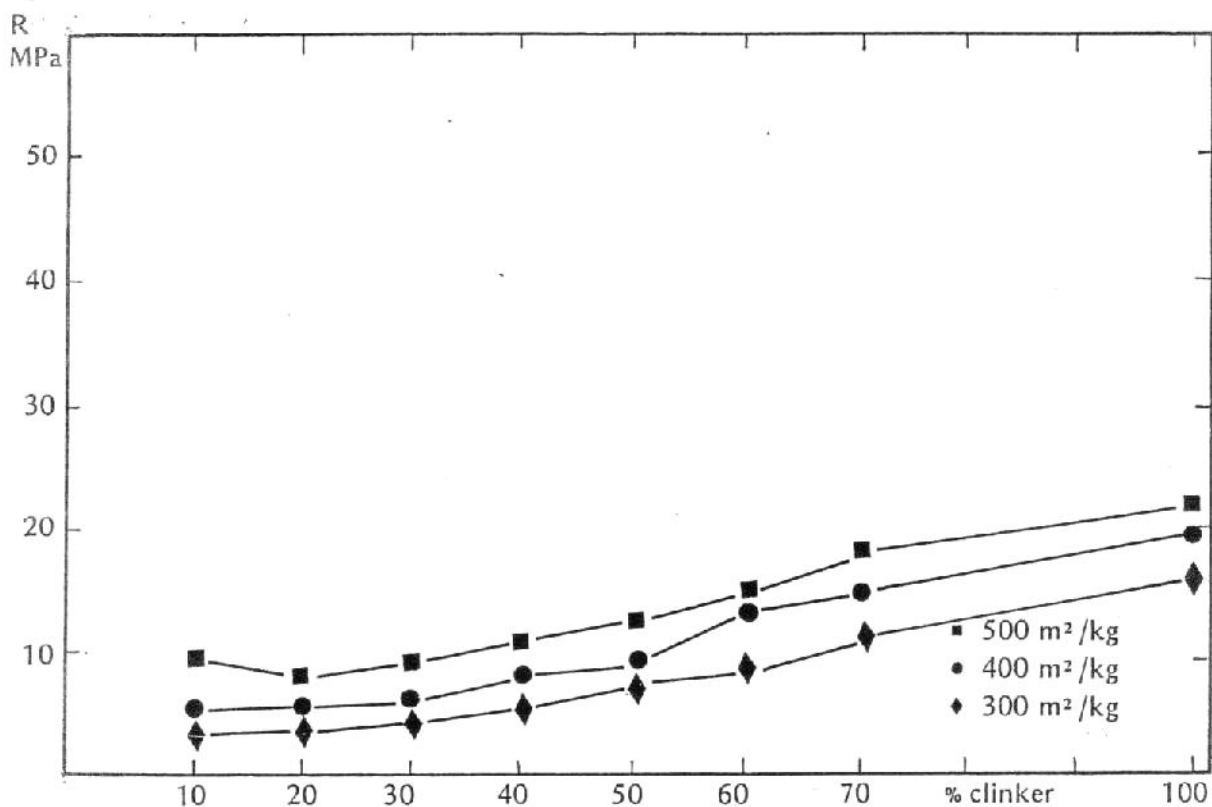


Fig. 6: Resistencia a la compresión a la edad de 3 días en función del porcentaje de clinker C.

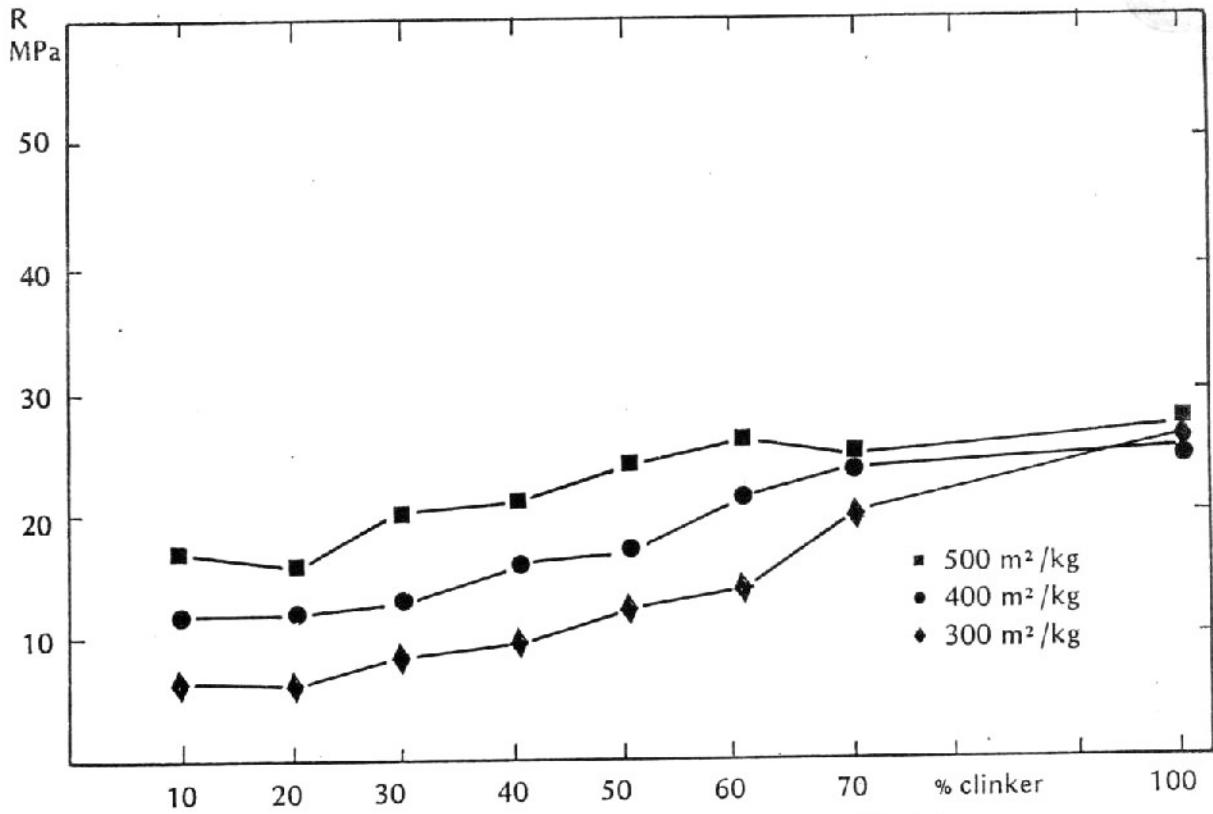


Fig. 7: Resistencia a la compresión a la edad de 7 días en función del porcentaje de clinker B.

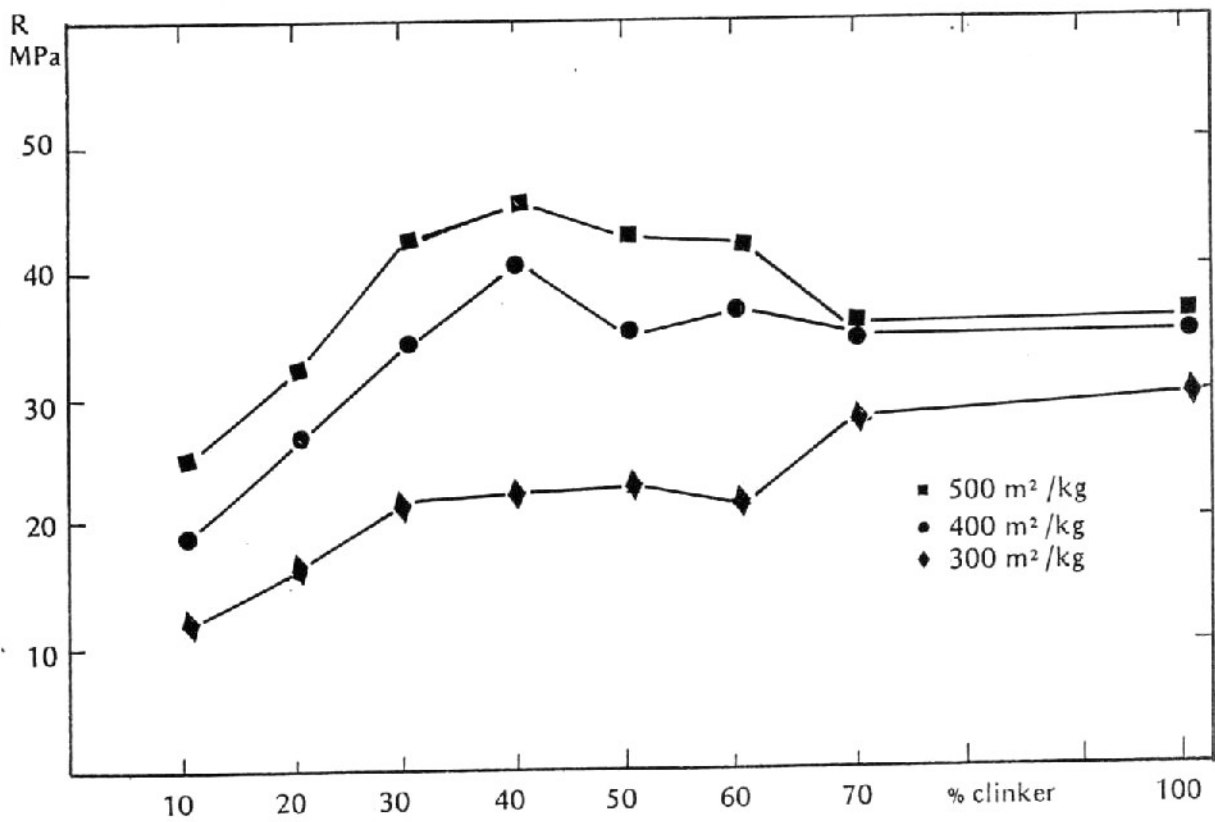


Fig. 8: Resistencia a la compresión a la edad de 28 días en función del porcentaje de clinker B.

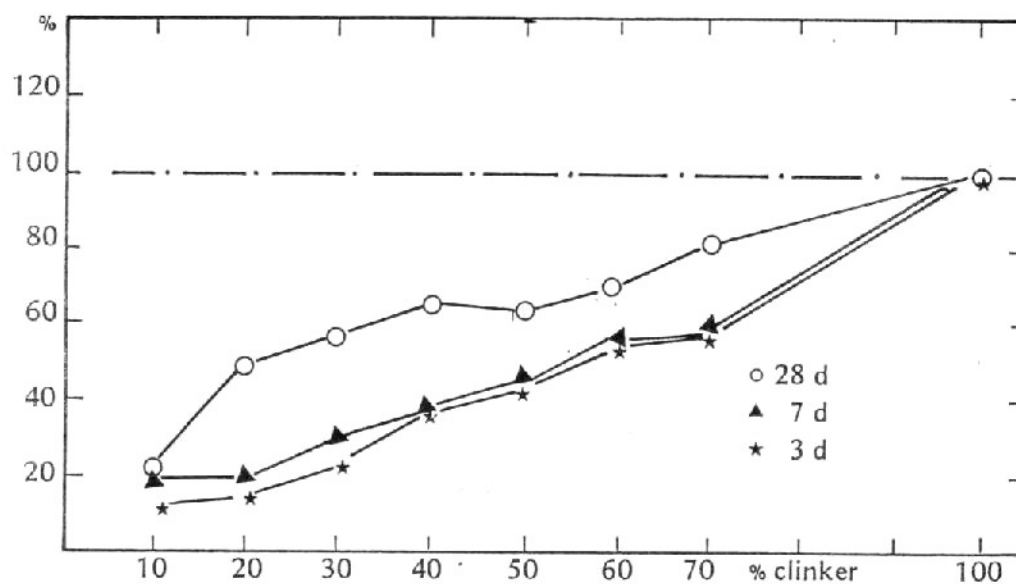


Fig. 9: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker C; finura Blaine 300m<sup>2</sup>/kg.

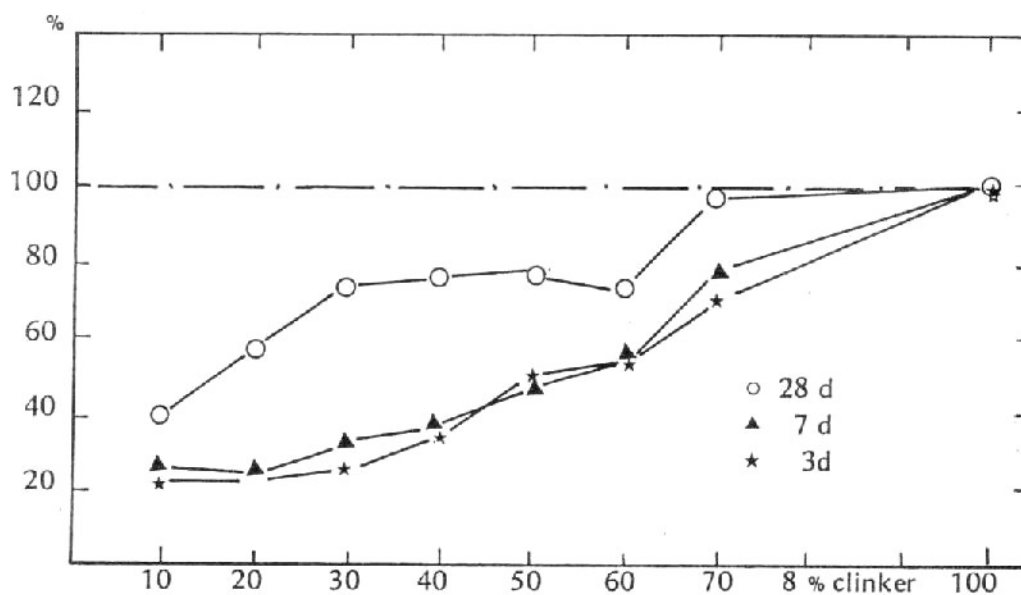


Fig. 10: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker B; finura Blaine 300 m<sup>2</sup>/kg.

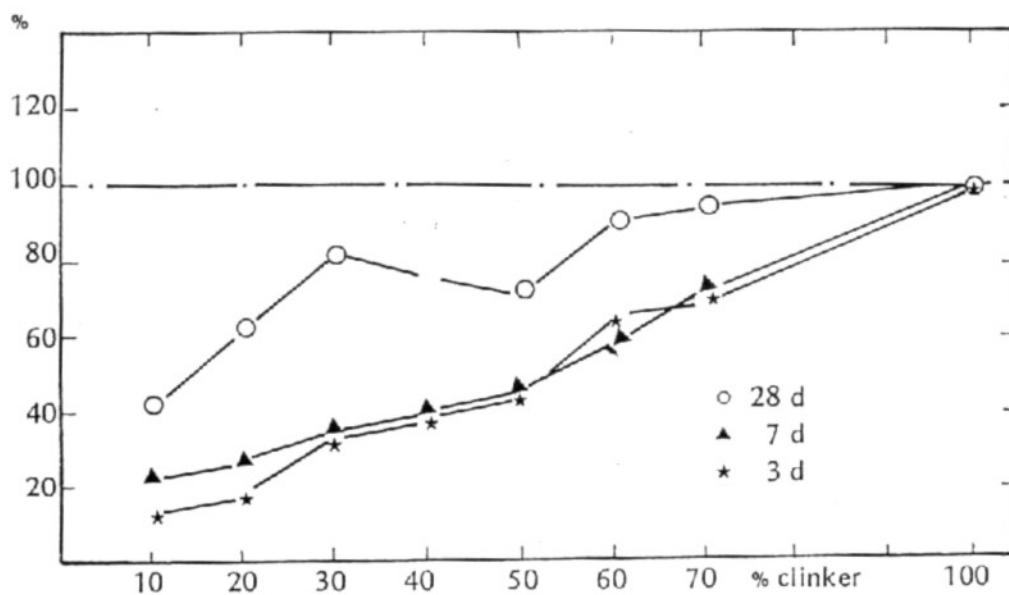


Fig. 11: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker C; finura Blaine 400 m<sup>2</sup>/kg.

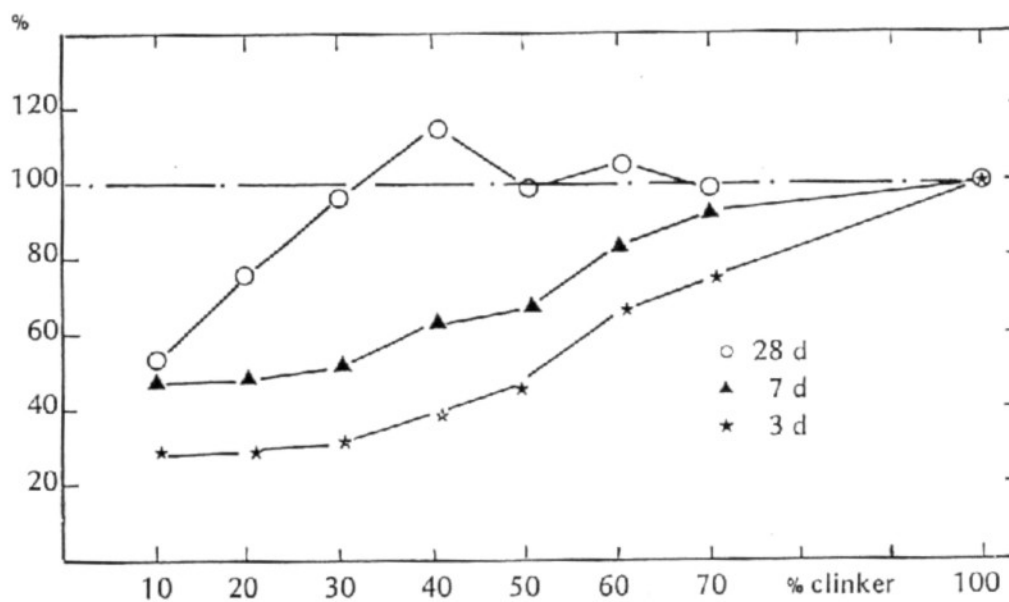


Fig. 12: Resistencia porcentual a respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker B; finura Blaine 400 m<sup>2</sup>/kg.

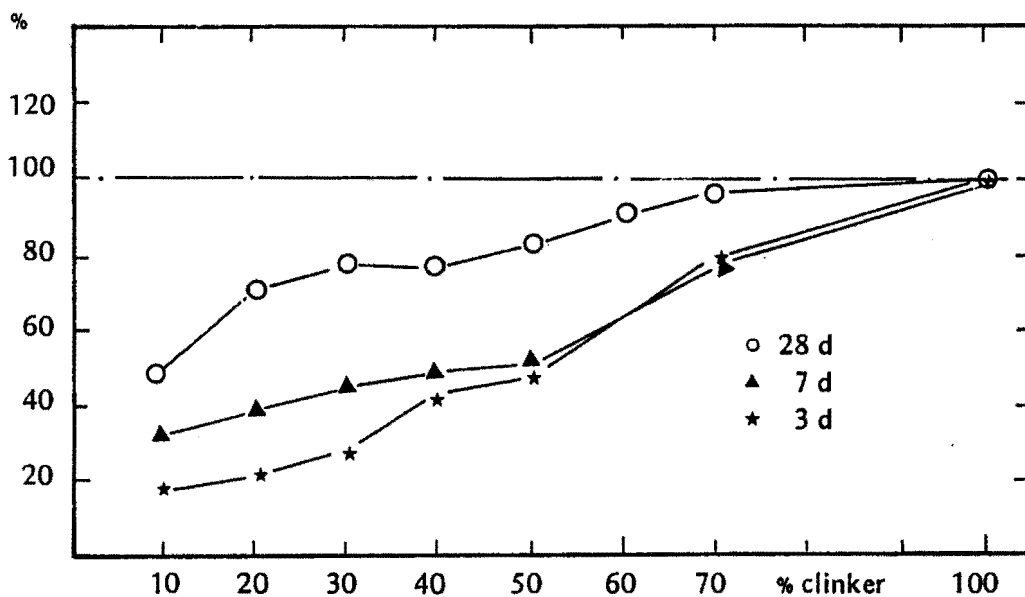


Fig. 13: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker C; finura Blaine 500 m<sup>2</sup>/kg.

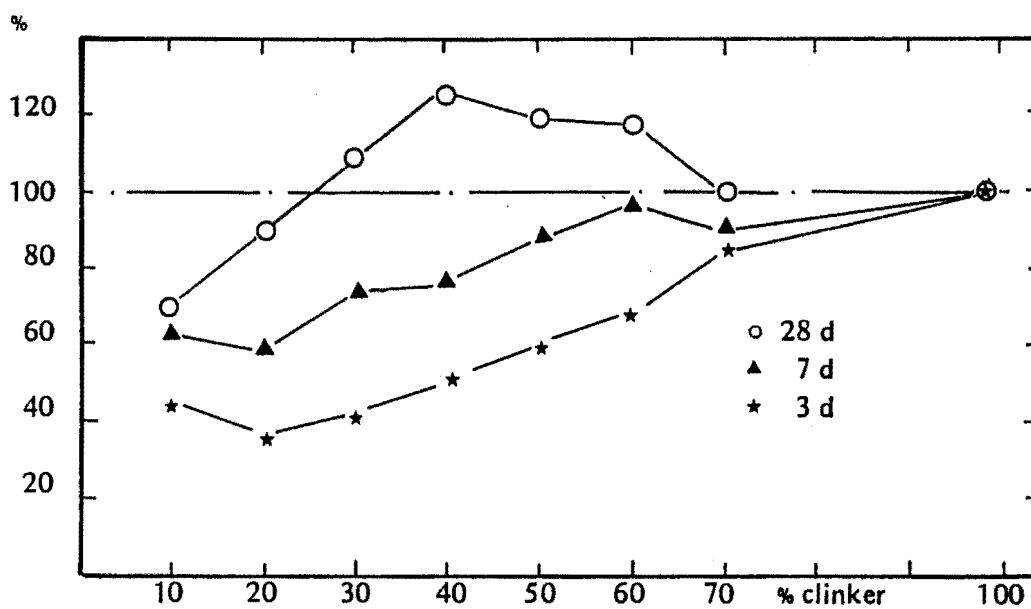


Fig. 14: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker B; finura Blaine 500 m<sup>2</sup>/kg.

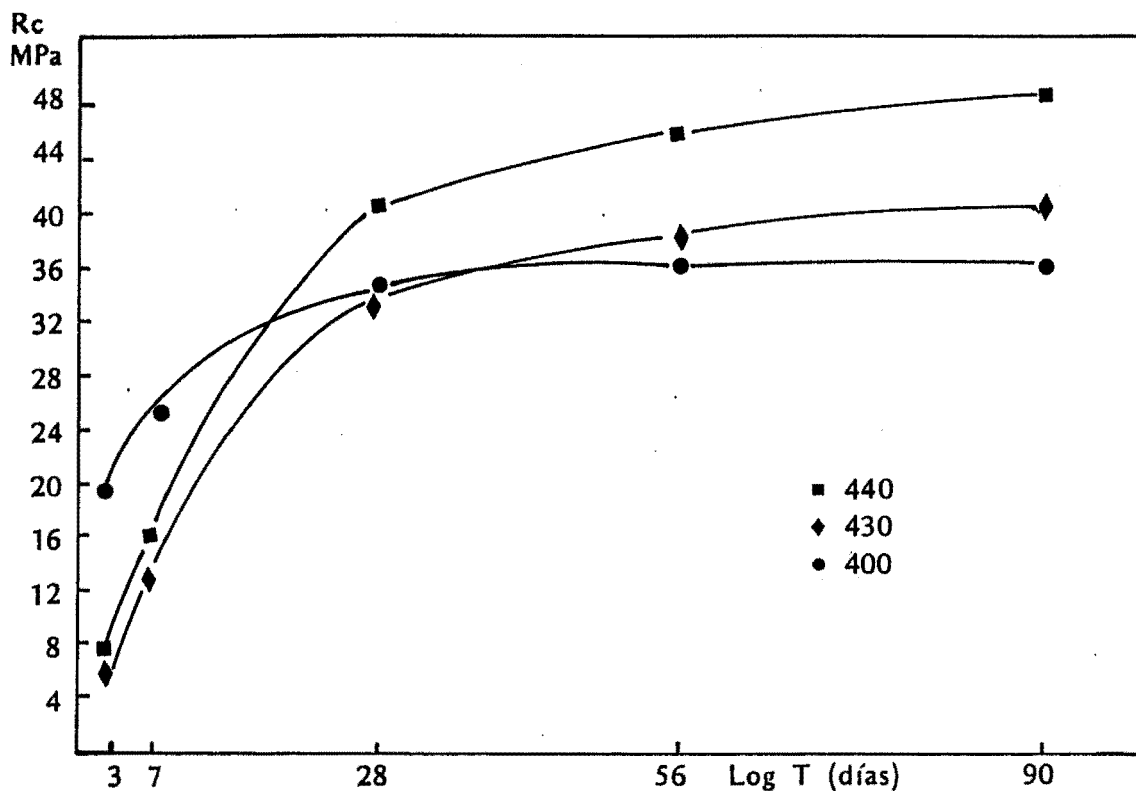


Fig. 15: Resistencia a la compresión en función del tiempo hasta la edad de 90 días para los cementos con 0, 60 y 70 % de escoria (clinker B).

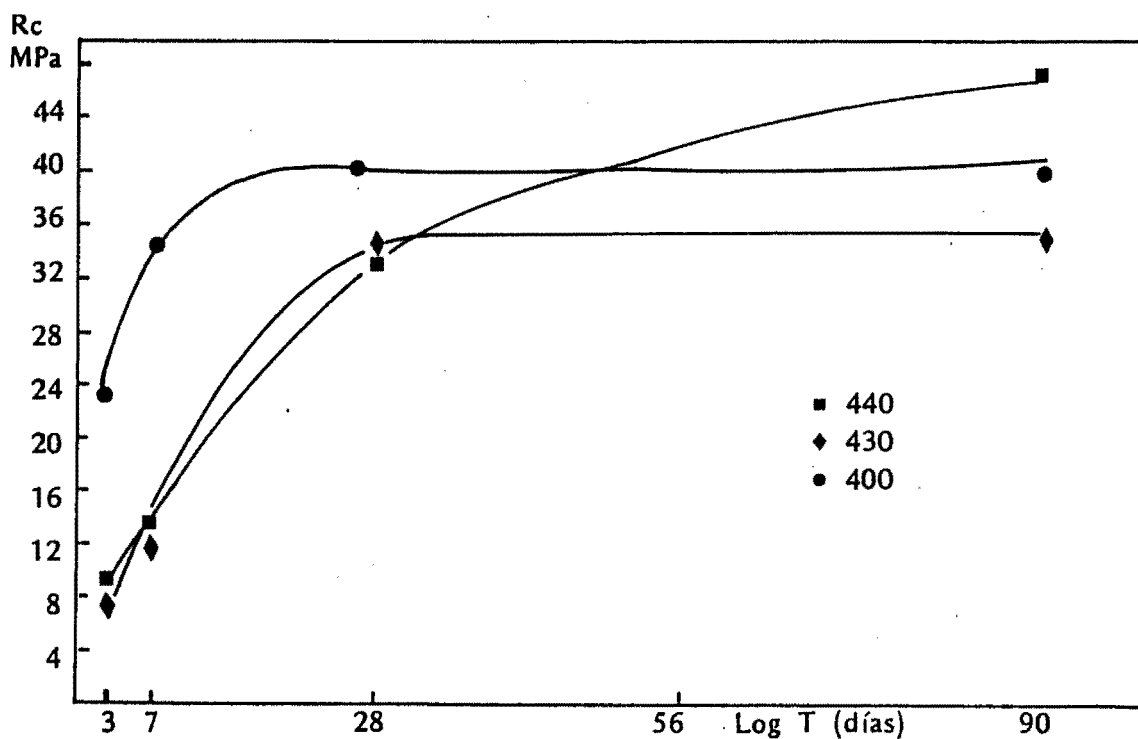


Fig. 16: Resistencia a la compresión en función del tiempo hasta la edad de 90 días para los cementos con 0, 60 y 70 % de escoria (clinker C).

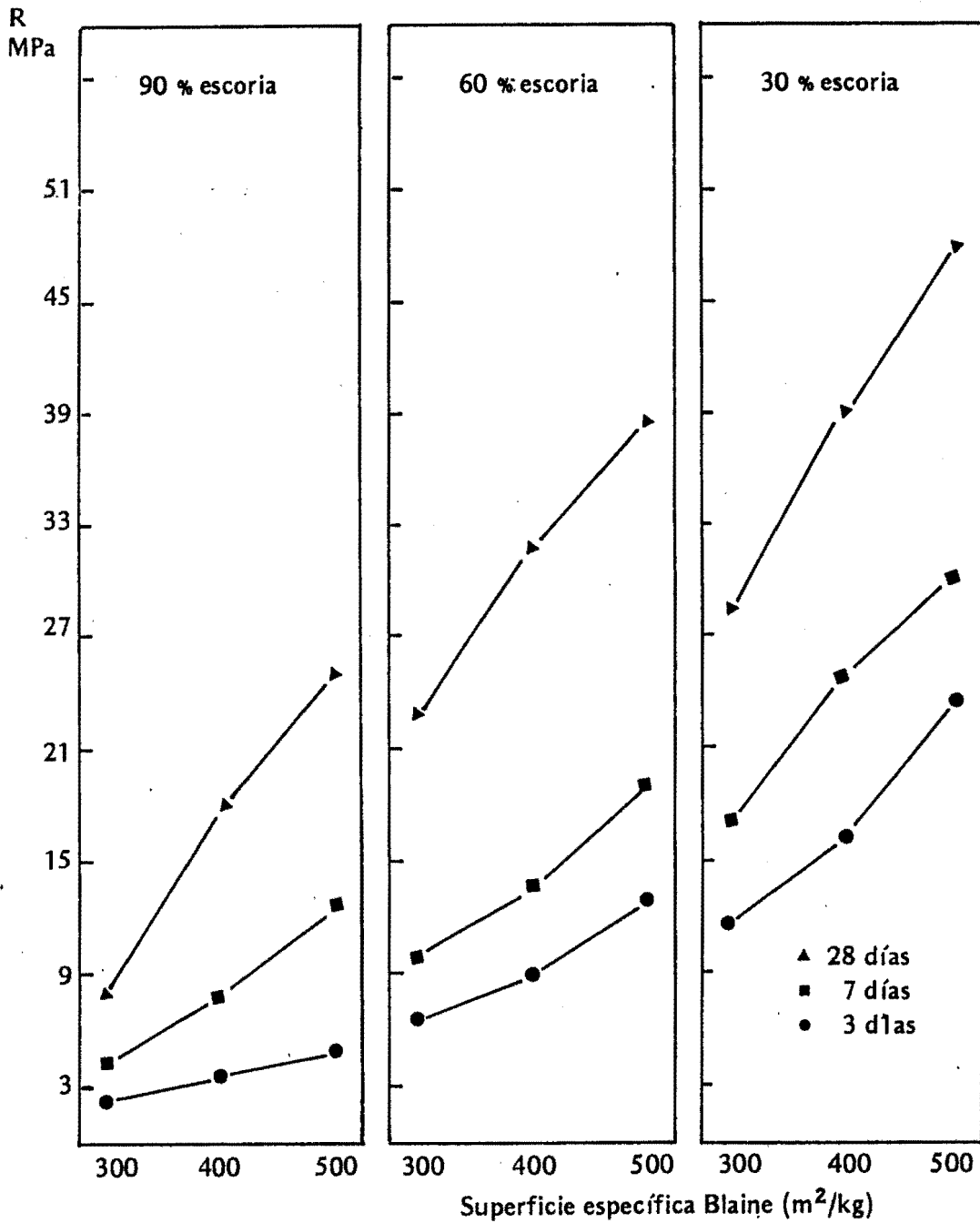


Fig. 17: Resistencia a la compresión en función de la finura para cementos con 90, 60 y 30 % de escoria y clinker C.

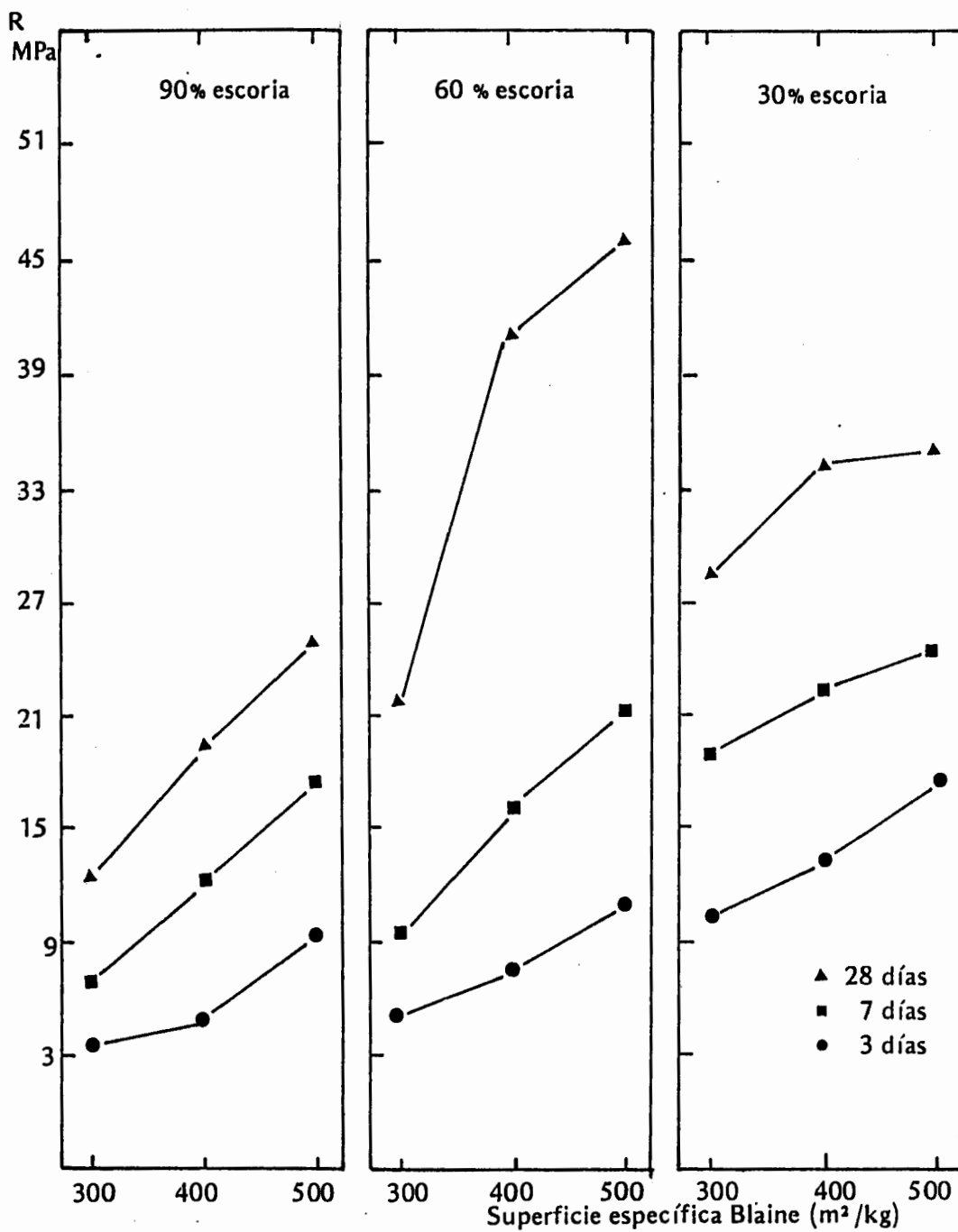


Fig. 18: Resistencia a la compresión en función de la finura para cements con 90, 60 y 30 % de escoria y clinker B.

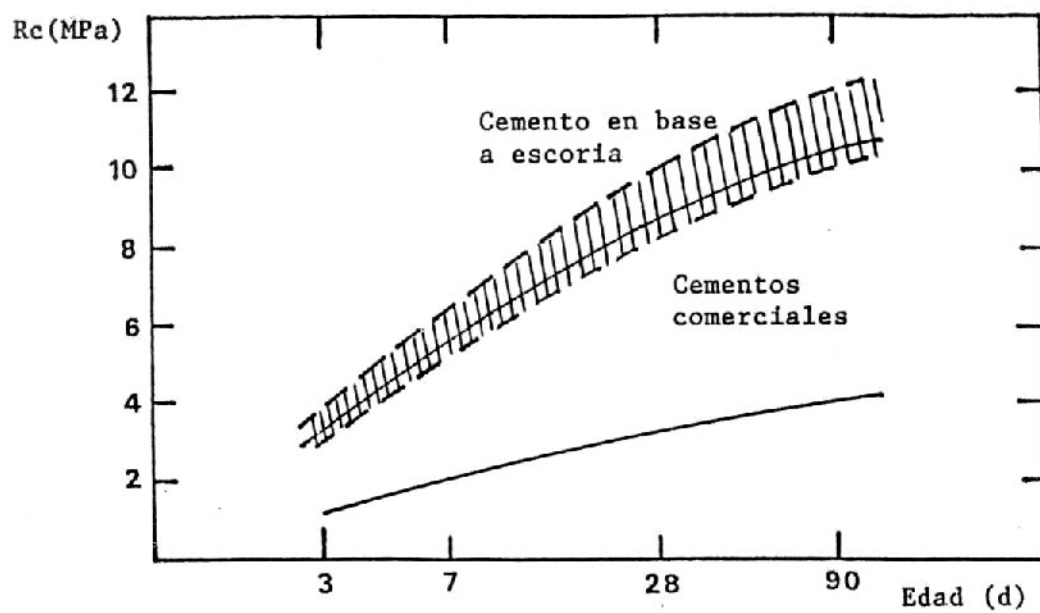


Fig. 19: Cemento de albañilería: Resistencia a la compresión a las edades de 3, 7, 28 y 90 días para morteros elaborados con cemento de albañilería comercial y el cemento desarrollado en base a escoria.

EMPLEO DE LA EAHGM EN LA CONSTRUCCION  
DE UNA VIVIENDA

RESUMEN

Los cementos mezcla y el cemento de albanilería desarrollados en base a escoria de alto horno granulada molida se utilizaron en la construcción de una vivienda prototipo. Se adoptó un sistema industrializado, semipesado, constituido principalmente por paneles de hormigón liviano. En el apéndice se detalla el sistema constructivo y se describe la técnica de montaje de los paneles en obra.

En este trabajo se describen los cambios introducidos al sustituir cemento portland por escoria granulada de alto horno molida en su composición, así como un resumen de los desarrollos previos en laboratorio.

La sustitución parcial de cemento por escoria en morteros y mosaicos pudo realizarse sin inconveniente alguno en lo que respecta a los métodos habituales de trabajo. Por el contrario, se observó una mejor trabajabilidad de las mezclas utilizadas.

Es importante destacar la adecuada plasticidad de los morteros de albanilería en los que se utilizó un cemento compuesto por escoria, cal aérea y cemento portland. El comportamiento de los revoques exteriores e interiores es satisfactorio, sin defectos de adherencia ni fisuraciones.

La vivienda será evaluada en lo que respecta a las condiciones de habitabilidad y al comportamiento de los materiales en servicio.

## EMPLEO DE LA EAHGM EN LA CONSTRUCCION DE UNA VIVIENDA

### 1. INTRODUCCION

Para la construcción de una vivienda prototipo se adoptó un sistema industrializado semipesado, de construcción en seco, integrado por paneles prefabricados autoportantes.

El sistema admite distintas soluciones para la cubierta. Ninguna de las alternativas utiliza cemento portland, susceptible de ser remplazado por escoria, por lo que se eligió cubierta de tejas con estructura de madera a la vista, realizando la estética general de la vivienda.

Las fundaciones son del tipo tradicional, de hormigón armado, dimensionadas de acuerdo con las características del suelo, el lugar y el proyecto. En nuestro caso se adoptó un encadenado de vigas continuas sobre el que apoyan los paneles premoldeados.

### 2. DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA

Los muros son autoportantes y están constituidos por la unión de los paneles respectivos, según se trate de muros interiores o exteriores. Los paneles consisten en un bastidor perimetral de chapa galvanizada que actúa como encofrado perdido del panel y sirve de elemento de unión entre paneles propiamente dichos, entre los paneles y las fundaciones y con la solera superior.

Los paneles constan de tres estratos: dos externos de hormigón liviano y uno intermedio de poliestireno expandido. Esta estratificación se interrumpe en la zona de nervaduras estructurales, donde el panel es macizo, constituido por hormigón liviano. Sobre los paneles se ejecuta un revoque con terminación de pintura y revestimiento. El arriostramiento longitudinal de los paneles se realiza mediante un encadenado de chapa galvanizada. Tanto la carpintería, que es de chapa galvanizada, como las instalaciones eléctrica, sanitaria y de gas, se encuentran incorporadas en los paneles respectivos.

En el Apéndice se puede encontrar una descripción detallada del sistema.

### 3. SINOPSIS DE LOS CAMBIOS INTRODUCIDOS

En principio, no se realizaron cambios sobre el sistema constructivo, sino que las modificaciones se limitaron al remplazo parcial de cemento portland por escoria granulada de alto horno molida.

Cuando fue posible, se ajustaron y optimizaron las dosificaciones utilizadas (hormigón liviano de paneles) o se diseñaron nuevos cementos (cemento de albañilería).

Elemento	Material	% de EAH	Observ.
Vigas de Fundación	Hormigón estructural	50 %	-----
Contrapiso	Hormigón pobre	67 %	-----
Paneles	Hormigón liviano	35 %	Se optimizó dosificac.
Revoques	Mortero	20 % Cal 15 % CPN 65 % EGM	Se usó Aditivo
Mosaico granítico	Mosaico	50 %	Preparad. en fábrica
Baldosones perimetrales	Hormigón	50 %	Preparad. en fábrica

#### 3.1. Hormigones Estructurales

##### 3.1.1. Antecedentes

Los cementos mezcla, obtenidos a partir del remplazo parcial de cemento portland por escoria granulada de alto horno molida, pueden utilizarse para elaborar hormigones estructurales.

Se ensayaron diferentes mezclas de hormigones convencionales en laboratorio, variando los porcentajes de remplazo de cemento por escoria y las relaciones agua/cemento. Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se adoptó para las fundaciones un nivel de remplazo del 50 % y una relación agua/cemento de 0,65-0,70.

### 3.1.2. Caracterización de hormigones de peso normal

Las características de los hormigones convencionales elaborados con cementos mezcla son similares, en líneas generales, a aquellas de los preparados con cemento portland normal. Sin embargo, presentan algunas diferencias que es necesario conocer para poder adecuar la tecnología de los hormigones al uso de estos cementos.

Con el objeto de evaluar las características generales se prepararon distintos pastones variando la relación agua/cemento (entiéndase cemento + escoria, cuando corresponda) y el porcentaje de remplazo de cemento por escoria granulada molida.

Se determinaron sus propiedades más relevantes en estado fresco y endurecido, estudiando la evolución de resistencia con el tiempo hasta la edad de un año.

Los resultados obtenidos son satisfactorios pero se debe resaltar que corresponden al conjunto de materiales utilizados, pues ya se demostró, al analizar los resultados de morteros, que la capacidad hidráulica de la escoria como ligante depende no sólo del porcentaje de remplazo y su finura sino también del cemento portland (clinker) utilizado.

#### 3.1.2.1. Materiales utilizados

Los materiales utilizados fueron:

- Cemento portland normal, origen: Olavarría, Prov. de Buenos Aires. Sus características físicas y químicas se detallan en Tabla 1. Por la indicación de sus envases, podrían contener hasta un 10 % de escoria granulada de alto horno molida en su composición.
- Escoria de alto horno granulada molida (EAHGM), origen: SOMISA, San Nicolas, Prov. de Buenos Aires. La escoria fue provista ya molida por la empresa. Sus características físicas y químicas se indican en Tabla 2.
- Piedra partida granítica, de 19 mm de tamaño máximo. Su granulometría y demás propiedades físicas se indican en Tabla 3.
- Arena fina de río Paraná. Su granulometría y demás propiedades físicas se indican en Tabla 4.

Las curvas granulométricas del agregado fino, del grueso y del agregado compuesto se grafican en la Fig. 1. Como puede observarse, la curva granulométrica del

agregado total no es continua, como sería deseable. Para corregirla hubiera sido necesario utilizar una arena más gruesa. Esto se evitó ex-profeso para que los materiales fueran representativos de los que se usan habitualmente.

#### 3.1.2.2. Dosificación

Los porcentajes de remplazo de cemento portland por escoria de alto horno elegidos fueron 30, 50 y 70%, utilizándose la mezcla elaborada con cemento portland normal como hormigón de referencia. Se eligieron dos razones agua/cemento: 0,45 y 0,65 con el objeto de obtener al menos dos puntos de la curva de Abrams para estos cementos mezcla.

Siguiendo las recomendaciones ACI - 211, se dosificó y ajustó las diferentes mezclas mencionadas. El asentamiento elegido fue de 8 +/- 1 cm, compatible con un hormigón estructural de compactación manual.

Las proporciones de los materiales y las características del hormigón fresco se detallan en las Tablas 5 y 6. Resultaron mezclas trabajables, con buena cohesión y terminación.

La escoria se adicionó en forma independiente, esto es, no premezclada con el cemento portland.

Resulta conveniente aclarar que los hormigones de razón agua/aglomerante 0.65 con 0 y 50 % de Escoria y el de razón agua/aglomerante 0.45 con 50 % de Escoria fueron elaborados utilizando el cemento recibido en la primer partida, que presentaba signos de prehidratación. Dichas mezclas evidenciaron efectos de exudación.

El tiempo de mezclado fue de 2 min, 1 de reposo y 2 minutos adicionales. Se determinó el tiempo de fraguado de una mezcla de relación agua/cemento + escoria = 0,45 y un porcentaje de remplazo del 60 %, para observar la influencia en el retraso del fraguado. Los valores obtenidos se grafican en la Fig. 2.

Se moldearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm, las que se ensayaron a la compresión y tracción por compresión diametral a diferentes edades. El módulo de elasticidad estático se determinó a la edad de 28 días.

#### 3.1.2.3. Resultados

Los resultados de ensayo a la compresión y módulo de elasticidad estático, cada uno de ellos promedio de tres probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm, se informan en Tablas 7 y 8, los resultados de tracción indirecta en Tabla 11 y Tabla 12 y los valores porcentuales de resistencia a la compresión,

referidos a las mezclas de control, se consignan en Tabla 9 y Tabla 10.

Es de destacar las bajas dispersiones obtenidas, tanto para el cemento portland normal como para los cementos mezcla, aun cuando el cemento portland y la escoria granulada molida se incorporaron a la hormigonera en forma separada para estos últimos casos.

A corta edad, los hormigones elaborados con cementos mezcla presentaron menores resistencias que el control, diferencia que se acentuó con el aumento en el contenido de escoria.

A 28 días y para razón a/c = 0,65, las mezclas con 30 y 50 % de escoria como remplazo de cemento superaron o igualaron al patrón, superándolo a edades mayores para todas las composiciones. En algunos casos, las diferencias son significativas, alcanzando el 34 % a favor del cemento mezcla.

Es importante resaltar que los cementos mezcla mejoran su comportamiento relativo a los hormigones de cemento portland para razones agua/cemento altas ( 0.65 en nuestro caso ), situación muy frecuente en obras con escaso control de calidad, contribuyendo a la seguridad global de las estructuras.

Paralelamente, se moldearon probetas cúbicas de mortero, norma ASTM C 109, utilizando los mismos cementos mezcla de los hormigones, con el objeto de evaluar comparativamente los resultados. Los valores obtenidos se resumen en Tabla 13.

### 3.1.3. Conclusiones

La sustitución parcial de cemento por escoria mejora la trabajabilidad del hormigón fresco, aumentando la cohesión y reduciendo la exudación, aunque produce un leve retardo en los tiempos de fraguado. En el hormigón endurecido se observa una menor resistencia a corta edad, aunque a edades iguales a superiores a 28 días el comportamiento es comparable o superior.

No se observaron cambios en el módulo de elasticidad estático en compresión.

Se debe aumentar las precauciones para prolongar el curado húmedo hasta tanto la escoria desarrolle actividad hidráulica; los cementos mezcla son más sensibles a las condiciones defectuosas de curado.

No hay buena correlación entre los resultados de resistencia evaluados sobre morteros y los correspondientes a los hormigones preparados con los mismos cementos mezcla, por lo que la etapa de moldeo y ensayo de hormigones no debe obviarse al decidir el porcentaje de remplazo y proporciones más convenientes.

### 3.2. Mosaicos Graníticos con Cemento de Escoria

#### 3.2.1. Introducción

Con el objeto de lograr una utilización integral de la escoria granulada molida en la vivienda prototipo, se decidió utilizar mosaicos graníticos para el interior de la misma y baldosones de cemento para las veredas perimetrales. En ambos casos, se realizaron ensayos preliminares en una fábrica reconocida, utilizando los procedimientos habituales de modo de evaluar los aspectos tecnológicos asociados al remplazo de cemento por escoria en estos elementos.

Sólo se acentuaron los cuidados en lo que respecta al curado, para permitir que la escoria desarrollase su capacidad hidráulica. El presente informe resume los resultados obtenidos en esta experiencia.

#### 3.2.2. Materiales

##### Escoria:

Se utilizó escoria de Alto Horno granulada de 400 m<sup>2</sup>/kg de superficie específica, proveniente del alto horno Nro. 1 de SOMISA. Sus características se indicaron en Tabla 2.

##### Cemento:

Cemento portland normal, identificado CN, provisto por el fabricante de mosaicos.

Para evaluar el comportamiento del cemento mezcla con un 50 % de remplazo de cemento portland por escoria, se moldearon probetas cúbicas de mortero, de acuerdo con ASTM C 109 y se ensayaron a la compresión a las edades de 7 y 28 días. Los resultados del cemento de control y del cemento mezcla se indican en Tabla 14. El valor obtenido para el cemento de control a la edad de 28 días es anormalmente bajo. Para otras muestras de cemento del mismo origen, este valor oscila alrededor de 30 MPa.

##### Agregados:

##### Primera serie de ensayos:

Agregado calcáreo, procedencia Pcia. de Córdoba, identificado por el proveedor como grano 0/1 y por el fabricante como "S", granulometría 3-5 mm.

### Segunda serie de ensayos:

Agregado calcáreo, procedencia Peia. de Córdoba, identificado por el proveedor como granó 0/3 y por el fabricante como "C", tamaño máximo 10 mm junto con agregado "verde alpe", de igual procedencia y tamaño máximo de 10 mm.

#### 3.2.3. Condiciones de Curado

##### Primera serie de ensayos:

Los mosaicos se sumergieron en agua a las 24 horas de moldeados hasta las edades de 14 y 28 días.

##### Segunda serie de ensayos:

Luego de moldeados los mosaicos se mantuvieron 3 días en una sala cerrada, con la humedad natural provocada por el agua retenida por las piezas; luego se los dejó el aire libre, sin cuidados especiales.

Los ensayos se realizaron a las edades de 28 días luego del moldeo.

#### 3.2.4. Determinaciones realizadas

Los ensayos realizados fueron: módulo de rotura por flexión, desgaste en la máquina de Dorry y absorción, de acuerdo con la norma IRAM 1522. Los resultados se indican en Tabla 15.

#### 3.2.5. Discusión de resultados

##### Ensayo de Flexión:

En la primera serie los resultados de módulo de rotura por flexión para los mosaicos curados bajo agua durante 14 y 28 días fueron 8,3 y 8,2 MPa respectivamente, mientras que en la segunda serie fueron de 3,7 y 6,8 MPa para los mosaicos con escoria y cemento portland normal respectivamente. Esto confirma la necesidad de un curado más prolongado para los mosaicos con cemento de escoria pero no se justifica extenderlo por más de 14 días.

##### Ensayo de desgaste:

Los resultados del ensayo de desgaste por método de Dorry se indican en la Tabla 15.

Es interesante observar el buen comportamiento de los mosaicos con escoria, los que en la segunda serie

de ensayos superaron a los de cemento portland normal. En las baldosas calcáreas se observa la influencia del curado y el relativamente bajo desgaste que presentan cuando se utilizó cemento de escoria.

#### Ensayo de absorción:

Los valores de absorción se ven afectados también por las condiciones de curado.

Para las baldosas calcáreas el aumento del tiempo de curado de 14 a 28 días, no disminuye significativamente la absorción pues sólo disminuye de 8,4 a 8,3 %.

Analizando ambas series, se observa que la deficiencia en el curado se manifiesta por un incremento en la absorción. Las diferencias entre los mosaicos con escoria y los elaborados con cemento portland normal no es significativa. En todos los casos los valores de absorción están dentro de norma, si bien en esta última experiencia muy cerca del límite máximo.

### 3.2.6. Conclusiones

Podemos decir que el empleo de cemento de escoria, con un 50 % de escoria granulada de alto horno en remplazo de cemento portland normal permite obtener mosaicos graníticos que cumplen en general los requerimientos de norma. Los resultados no difieren significativamente con los moldeados con cemento portland normal, excepto cuando el curado no es satisfactorio y señalan en principio un mejor comportamiento en el ensayo de desgaste.

Una solución de compromiso propuesta para el curado es mantener 3 ó más días las piezas en un local cerrado, con 100 % HR y luego cubiertas con una película de polietileno, por lo menos hasta alcanzar los 14 días.

### 3.3. Premoldeados

#### 3.3.1. Hormigón liviano para paneles premoldeados

La tipología y características generales de los paneles se describen en el Apéndice. Como el montaje en obra se realiza sin maquinaria pesada, existe un límite práctico en el peso del panel que impone una cota de 1300 kg/m<sup>3</sup>

al peso específico aparente del hormigón por lo que admite la calificación de semiestructural. El bajo peso

específico permite, además, obtener un bajo coeficiente de conductividad térmica y lograr adecuadas condiciones de habitabilidad con sólo 0,09 m de espesor.

La textura superficial del panel debe ser lo suficientemente rugosa para lograr una buena adherencia con el mortero de revoque, condición que limita la cantidad de pasta y la fracción de agregado fino.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se ajustó la dosificación de un hormigón liviano que mejorara la calidad sin incrementar el costo. Se buscó, además, incrementar la protección de las armaduras empotradas en el hormigón mejorando la trabajabilidad y disminuyendo los vacíos por deficiencias en la compactación.

#### 3.3.1.1. Proporciones de la mezcla en Fábrica

Las cantidades de los materiales utilizados en fábrica para un pastón, de acuerdo con lo informado por la Empresa, son las siguientes:

Cemento portland normal	80 kg
Agregado grueso ("Ripiolita")	125 kg
Agregado fino (liviano)	190 kg
Agua (valor medio)	40 kg

Se ajustaron distintas mezclas en laboratorio, a los efectos de mejorar las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido. El porcentual de remplazo de cemento por escoria para el hormigón liviano de los paneles respetó el límite del 35 % establecido por la nueva norma IRAM 1636 que era la única que contaba con la aprobación del Subcomité de cementos a esa fecha.

Se logró un hormigón con menor contenido de cemento, más trabajable y con mejor resistencia a la compresión.

Con este hormigón se moldearon dos paneles de 2,40 x 0,60 x 0,09 m y uno de 2,40 x 0,50 x 0,09 m para evaluar su comportamiento frente a las condiciones reales de colocación. El agregado liviano ingresó primero a la hormigonera donde se prehumedeció durante 15 minutos con parte del agua total de amasado. El agregado fino natural, el cemento portland y escoria granulada molida ingresaron por separado, y finalmente se completó la cantidad de agua prevista. El mezclado se prolongó por 5 minutos para asegurar la correcta homogeneización del hormigón.

El aspecto del hormigón en estado fresco fue satisfactorio, con adecuada trabajabilidad pero conservando un aspecto rugoso en superficie para mejorar la adherencia del mortero de revoque.

Una vez analizados los resultados obtenidos en las mezclas experimentales y de acuerdo con las observaciones realizadas, se convino con Personal de la Empresa en minimizar los cambios a los efectos de no introducir variantes en los métodos usuales de producción en serie de los paneles.

No se modificó la disposición general de las armaduras pero se sustituyó por hierro galvanizado, habida cuenta de la escasa protección contra la corrosión provista por el hormigón liviano. Esta precaución está avalada por numerosas citas bibliográficas.

La resistencia al impacto podría mejorarse si se incrementase o densificase la armadura de refuerzo pero esto traería alteraciones en el método de elaboración de los paneles que se utiliza actualmente.

Se utilizó el agregado grueso de stock de fábrica ("Ripiolita") Nº 2, de menor tamaño. Se adicionó arena fina natural para corregir las deficiencias granulométricas de la fracción fina y se convino en prehumedecer los agregados en la hormigonera durante 15-20 minutos antes de incorporar el material ligante (cemento + escoria).

Las cantidades utilizadas por pastón se indican a continuación:

Cemento Portland normal:	55 kg
Escoria granulada molida:	27 kg
Agreg. fino liviano:	150 kg
Agregado grueso liviano:	150 kg
Agregado fino normal:	15 kg

Con los cambios introducidos se logra una reducción de costos importante, ya que se reemplaza al cemento portland por escoria de alto horno granulada molida, de menor costo. Asimismo, al mejorar la dosificación general del hormigón, se obtiene mejor resistencia con menor contenido de material cementicio (cemento + escoria). La mejor trabajabilidad de la mezcla ajustada permitió reducir los tiempos de colocación y compactación del hormigón en los paneles, lo que sin duda, influye positivamente en el costo final por panel.

Se llenaron los paneles a utilizar en la vivienda prototipo y se moldearon probetas de control para estimar la resistencia a la compresión de los hormigones dosificados. Los resultados se expresan en Tabla 16.

### 3.4. Determinación de Las Propiedades Mecánicas de Los Paneles Premoldeados

Para reproducir mejor la condición real de trabajo, los paneles fueron revocados antes de ser ensayados utilizando el cemento de albañilería desarrollado en base a escoria (65%), cemento portland (15%) y cal aérea hidratada en polvo (20%).

El comportamiento del conjunto hormigón vivo-mortero, en lo que hace a su adherencia, fue muy bueno, ya que no se observó desprendimiento del mortero en ningún caso.

Los ensayos usuales sobre este tipo de paneles son:

Ensayo de Compresión excéntrica (IRAM 11588)

Ensayo de impacto sobre probeta vertical (IRAM 11596)

Ensayo de resistencia al impacto de la bola de acero (IRAM 11595)

#### 3.4.1. Ensayo de Compresión excéntrica (IRAM 11588)

Sobre cada panel se aplicó una carga vertical excéntrica, distante un tercio del espesor del mismo, respecto del borde interior. Dicha carga se aplicó en escalones crecientes, a partir de un valor de 2.0 daN tomado como referencia inicial a efectos de determinar las deformaciones, retornando al mismo luego de cada escalón.

Para cada escalón de carga, se determinó el acortamiento del panel y la flecha lateral, bajo carga y residual (deformación total y plástica respectivamente). El acortamiento se determinó con el promedio de las lecturas efectuadas en cuatro flexímetros, dividido por la longitud de la base de medida y multiplicado por la altura del panel. Finalmente, la carga se incrementó hasta llegar a la rotura.

En la Tabla 17 se indican los valores obtenidos.

#### 3.4.2. Ensayo de Impacto sobre probeta vertical

De acuerdo con las indicaciones de la norma IRAM correspondiente, el ancho individual de cada panel es insuficiente para que el ensayo sea representativo, por lo que se agruparon en grupos de a tres, por medio de las juntas constructivas previstas en el diseño. El conjunto se colocó en posición vertical, vinculado en ambos extremos (superior e inferior) a una estructura rígida mediante rodillos, a efectos de materializar las condiciones estáticas de apoyo simple. Sobre la zona central del panel del medio se dejó caer la bolsa de cuero con arena en su interior (Peso total= 30 daN)

con movimiento pendular, desde alturas crecientes, incrementadas de 15 cm en 15 cm.

Para cada impacto, se determinaron flecha instantánea y flecha residual.

En la Fig. 2 se esquematiza el dispositivo de ensayo y en la Tabla 18 se indican los valores obtenidos.

#### 3.4.3. Ensayo de resistencia al impacto de la bola de acero

Sobre un mismo punto del panel simplemente apoyado se dejó caer la bola de acero de 5 N de peso, desde alturas crecientes, incrementadas de 25 cm en 25 cm, hasta alcanzar los 2 m de altura. Para cada impacto se determinó el diámetro y la profundidad de la huella producida en la superficie del espécimen. En la Tabla 19 se indican los valores obtenidos.

De los resultados se deduce que los paneles de hormigón liviano elaborados con cemento mezcla cumplen los requerimientos de norma y que se comparan favorablemente con los paneles realizados utilizando cemento portland normal.

#### 3.5. Conclusiones

Es posible sustituir parcialmente el cemento portland por escoria granulada de alto horno molida en elementos premoldeados. El nivel de remplazo debe adecuarse al ritmo general de los trabajos y a las condiciones particulares de curado que se empleen a ritmo normal de trabajo. De realizarse un curado al aire, es conveniente que se tomen precauciones para evitar una desecación prematura de los elementos.

#### OBSERVACIONES

##### Ensayo de compresión: cargas de rotura

Panel N<sup>o</sup> 1: 188.16 daN

Panel N<sup>o</sup> 2: 215,60 daN

Panel N<sup>o</sup> 3: 158.00 daN

##### Ensayo de Impacto blando

Ensayo N<sup>o</sup>1, panel central:

Para h = 0.75 m Fisura horizontal cara opuesta al golpe, zona del golpe

Para h = 1.20 m Fisura vertical cara opuesta al golpe en toda la longitud del panel.

Para h = 1.80 m Fisura cara opuesta al golpe.

Para  $h = 2.40$  m Se deterioraron las juntas entre paneles.

Ensayo N<sup>o</sup> 2, panel central:

Para  $h = 0.45$  m Fisura horizontal cara opuesta al golpe, zona del golpe

Para  $h = 1.20$  m Fisura vertical cara opuesta al golpe en toda la longitud del panel.

Para  $h = 2.10$  m Fisura cara opuesta al golpe.

Para  $h = 2.40$  m Se deterioraron las juntas entre paneles.

Ensayo N<sup>o</sup> 3, panel central:

Para  $h = 0.90$  m Fisura vertical cara opuesta al golpe.

## APENDICE

### 1. DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA

Los muros son autoportantes y están constituidos por la unión de los paneles respectivos, según se trate de muros interiores o exteriores. Los paneles consisten en un bastidor perimetral de chapa galvanizada que actúa como encofrado perdido del panel y sirve de elemento de unión entre paneles propiamente dichos, entre los paneles y las fundaciones y con la solera superior.

Los paneles constan de tres estratos: dos externos de hormigón liviano y uno intermedio de poliestireno expandido. Esta estratificación se interrumpe en la zona de nervaduras estructurales, donde el panel es macizo, constituido por hormigón liviano. Sobre los paneles se ejecuta un revoque con terminación de pintura y revestimiento. El arriostramiento longitudinal de los paneles se realiza mediante un encadenado de chapa galvanizada. Tanto la carpintería, que es de chapa galvanizada, como las instalaciones eléctrica, sanitaria y de gas, se encuentran incorporadas en los paneles respectivos.

### 2. ELEMENTOS QUE INTEGRAN EL SISTEMA

#### 2.1. Panel muro exterior

Se trata de elementos portantes de 0.09 m de espesor, 0.60, 0.70 ó 0.80 m de ancho y 2,55 o bien 2,75 m de alto.

El panel presenta distinta composición según las diferentes zonas climáticas, adoptándose en nuestro caso un primer estrato de hormigón liviano de 30 mm de espesor, luego un estrato intermedio de planchas de poliestireno expandido de 20 mm (densidad 30 kg/m<sup>3</sup>) y un tercer estrato de hormigón liviano con arcilla expandida como agregado, de 30 mm de espesor.

Las planchas se disponen en cantidad de seis por panel, entre las cuales se alojan dos hierros de diámetro 4,2 mm con extremos soldados al bastidor de chapa galvanizada. En estos sectores se constituyen nervios (tres verticales y cuatro horizontales) de 50 mm de ancho por todo el espesor del panel.

En obra se revocan ambas caras en espesores no inferiores a 5 mm, con lo que se completa el espesor de 100 mm del panel. Finalmente se aplica un salpicado plástico hidrófugo con soplete, lo que le da al panel el espesor final de 106 mm.

En el puente térmico originado por el parante tipo macho de los bastidores de chapa galvanizada se realiza una operación de corte longitudinal del mismo, de modo que al conformar el doblado se hacen dos piezas, las cuales se unen mediante el empleo de arandelas plásticas con un doble remache en frío, logrando una separación de 2 mm entre piezas.

Como la cubierta elegida (tejas) tiene pendiente mayor a 5°, se colocan paneles mojinete como cierre de los aleros. Su conformación es la misma que la de los paneles exterior e interior, según la ubicación de los mismos. Estos elementos están destinados a compensar la distancia existente entre el plano superior de las placas (altura de encadenado) y el plano conformado por la proyección de la pendiente de la cubierta.

## 2.2. Panel muro interior

Tiene la misma conformación que el panel muro exterior, pero se emplea poliestireno expandido de 30 mm (densidad 12 kg/m<sup>3</sup>) y no se realiza el corte del parante tipo macho pues entre ambientes interiores no es fundamental la aislación térmica.

## 2.3. Paneles con instalación eléctrica

Se trata de paneles exteriores o interiores que llevan incorporados elementos de instalación eléctrica utilizando los materiales especificados en la memoria técnica. Las interconexiones se realizan por cámara de entretecho. La fijación de la instalación se materializa en el momento del armado, sujetando caños y cajas a la estructura del bastidor de panel. Posteriormente, con las tareas de hormigonado en planta, se rigidiza.

## 2.4. Paneles con instalación de gas

Se trata de paneles exteriores o interiores que, de acuerdo con un diseño previo, llevan incorporados elementos de la instalación de gas, utilizando los materiales especificados en la memoria técnica o cláusula del contrato.

La interconexión de las mismas se realiza bajo piso; en todos los casos se aplican las normas de Gas del Estado, quien a su vez, supervisa el elemento elaborado.

La fijación de la instalación se materializa en el momento del armado, sujetando las partes a la estructura del panel a la vez que se posicionan las salidas mediante soportes de chapa galvanizada BWG N° 18 destinados a mantener la distancia y profundidad de las piezas.

Se emplea protección plástica de las cañerías en el contacto con los elementos metálicos, evitando de este modo la corrosión por contacto (corrosión galvánica).

## 2.5. Paneles con instalación sanitaria

Se trata de paneles exteriores o interiores que, de acuerdo con el diseño previo, llevan incorporados elementos para la instalación de agua fría o caliente, utilizando los materiales especificados en la memoria técnica o cláusula del contrato.

Particularmente en el caso de los paneles sanitarios, el desarrollo se realiza alineando los mismos de modo tal que el conjunto forme un tabique, unificando la zona "húmeda" de los servicios.

Nuestro caso está dado por cuatro elementos que reúnen a un lado las instalaciones correspondientes a la cocina y al otro lado las correspondientes a baño y lavadero.

La conexión de agua directa (red) e indirecta (tanque de reserva) se realiza bajo piso, mientras que la interconexión para agua fría y caliente se realiza por entretecho con "barrales" armados en fábrica y conectados en obra.

La fijación de caños y grifería se materializa en el momento del armado sujetando las partes a la estructura del panel, a la vez que se posicionan las salidas mediante soportes de chapa galvanizada BWG Nº 18 destinados a mantener la distancia y profundidad de las mismas.

Completando el tabique se elabora un conducto para efluentes cloacales unificado, colocando las descargas alineadas sobre un caño colector de PVC de 110 mm de diámetro ( Todos los elementos se fabrican en PVC utilizando soldadura por aire caliente con varilla del mismo material) de manera tal que al posicionar la parte superior de la pileta del piso, boca de desagüe y codo de asiento de inodoro, coincidiendo con el nivel 0.00 de piso terminado, automáticamente se obtiene la pendiente de descarga y las posiciones exactas para la colocación de los artefactos.

Los artefactos y los accesorios se colocan con los mismos recaudos de la obra tradicional, teniendo en cuenta que para el caso no se emplean elementos de embutir, por lo que si hubiera que tomarlos a la pared deberá ser por medio de tornillos y tarugos de expansión.

Los revestimientos se realizan "en situ", utilizando los mismos materiales que se emplean en la construcción tradicional.

## 2.6. Paneles con carpintería

La totalidad de la carpintería metálica se realiza en chapa galvanizada, elaborando en fábrica sus componentes, ensamblando las partes e incorporando el elemento terminado en el bastidor del panel previo al hormigonado.

La carpintería de madera se coloca en obra, siendo el caso típico las puertas placa de fabricación standard. En caso de utilizarse cerramientos de madera, se deja previsto en el panel un elemento de transición que consiste en un premarco de chapa al cual se fija posteriormente la abertura.

## 2.7. Techo y cubierta

El sistema, como ya se indicara, admite diferentes soluciones. En nuestro caso, se adoptó la cubierta de tejas.

Se utiliza una estructura de tirantería de madera con disposición y secciones variables según los cálculos de cada situación particular.

El anclaje de los cabios a los paneles se realiza mediante escuadras de chapa galvanizada BWG Nº 18 soldadas al encadenado superior y fijando la madera con clavos. El techo lo constituye el entablonado de 1,25 cm, cartón embreado como aislante hidrófugo, clavaderas y tejas cerámicas sin esmaltar. Todos los elementos citados se disponen y ejecutan en forma convencional.

## 3. DESCRIPCION DEL MONTAJE

### 3.1. Nivelación y replanteo

Se procedió a eliminar la capa superior de suelo vegetal y luego se rellenó con tosca hasta alcanzar el nivel acorde con lo indicado por el nivel de calzada.

Decidida una fundación constituida por vigas armadas, se procedió a excavar en la tosca una zanja que constituyó en encofrado natural de la fundación.

### 3.2. Fundaciones

En el espacio conformado se colocaron parrillas de tres hierros de 4,2 mm de diámetro en el sentido longitudinal con estribos (hierros transversales de 6.0 mm de diámetro) cada 0.20 m, separados al menos 25 mm del nivel del suelo.

Se dejó espacio para efectuar las interconexiones de cañerías (bajo piso), se verificó los niveles

de encofrado y se procedió al hormigonado utilizando cemento mezcla con un remplazo parcial de cemento portland del 50 %. Los materiales cementicios (cemento portland y escoria granulada molida) se incorporaron en forma separada a la hormigonera y se prolongó el mezclado a 5 minutos para asegurar la mezcla íntima de los componentes.

### 3.3. Contrapiso y esqueleto cloacal

Se ejecutó tomando el nivel superior de la viga de fundación como enrase del mismo, pues estaba prevista la colocación de mosaico granítico.

Se empleó un hormigón pobre, sin armadura, en el que la escoria granulada molida constituyó el 67 % (2/3 partes) del ligante.

### 3.4. Descarga y montaje de paneles

La descarga y montaje de paneles se realizó en la forma corriente, por personal de la Empresa. No se describe en detalle esta operación pues no existen operaciones particulares derivadas de la utilización de la escoria granulada molida.

Una vez verificado el aplomado de los paneles, su escuadra y el correcto encastre, se procede a encastrar un perfil metálico de encadenado superior, arriostrando de este modo cada uno de los muros. La fijación efectiva del encadenado a los paneles se realiza mediante soldadura.

### 3.5. Techo

Como se trata de una cubierta de tipo convencional, las tareas son ejecutadas de acuerdo con las reglas del arte.

### 3.6. Cordón exterior

Previa verificación del correcto alineado de los paneles exteriores y antes de dar comienzo a los revoques, se procedió a la colocación de moldes en todo el perímetro exterior de la vivienda y a la ejecución del cordón exterior. Este cordón incluye un material hidrófugo en su composición y lleva una pendiente del 40 %. La junta superior se tomó con un sellador elástico.

### 3.7. Llenado de marcos

Una vez revisada toda la carpintería para verificar que los encuentros de dinteles, jambas y umbrales tengan un buen ajuste y adecuada terminación, se procedió al llenado de los elementos verticales de

los marcos con mortero de cemento-arena (1:3), asegurándose que no quedaran zonas huecas.

### 3.8. Revoques interiores y exteriores

Una vez verificado el alineamiento de las aletas de los paneles, las que serán utilizadas como nivel de control del revoque, se humedecieron con agua los muros a revocar, cargando el material en dos veces. En la primera, se presionó con el fondo de la cuchara de modo de forzar el ingreso del mortero de revestimiento en los poros del hormigón del panel. En la segunda, se verificó la correcta nivelación con las aletas, quedando estas últimas perfectamente limpias para el trabajo de colocación de mordiente y salpicado.

El ligante utilizado en ambas superficies, exterior e interior, estuvo constituido por la mezcla ternaria cemento:cal aérea:escoria granulada molida, adicionada de un aditivo plastificante e incorporador de aire. Este cemento de albañilería desarrollado en el Proyecto mostró un buen comportamiento en pruebas en laboratorio y en obra, tanto en estado fresco como endurecido.

### 3.9. Interconexiones

Se procedió luego a realizar las interconexiones correspondientes a la instalación de gas y agua, verificando la estanqueidad de las mismas.

### 3.10. Colocación de pisos

Se realizaron los trabajos de colocación de pisos, utilizando una mezcla de asiento en la que se reemplazó el 50 % del cemento portland por escoria de alto horno granulada molida.

Los mosaicos graníticos utilizados, ya descriptos, incorporan escoria como remplazo parcial de cemento.

### 3.11. Colocación de revestimientos

Para la zona sanitaria, se colocó el revestimiento previsto. En estos casos, el nivel del revoque alcanza las aletas de los paneles para que el material de asiento adhiera uniformemente. Los azulejos y cerámicos se continúan también sobre la zona correspondiente a la unión entre paneles.

Toda la tarea, salvo las aclaraciones precedentes, se ejecutaron con la misma rutina que en la obra tradicional.

### 3.12. Cableado electricidad

Como continuidad de las tareas, siguiendo las indicaciones del plano respectivo, se procedió a efectuar la totalidad del cableado en la vivienda, realizando una primera prueba del servicio.

### 3.13. Aplicación de mordiente

Todas las partes metálicas de la vivienda a ser pintadas o salpicadas, se limpiaron perfectamente dejándolas libres de grasitud, rebabas, restos de materiales, polvillo, etc, para proceder a la aplicación de mordiente especial para superficies galvanizadas mediante soplete. En estas condiciones, fue posible realizar el acabado final con perfecta adherencia, evitando el desprendimiento del producto aplicado.

### 3.14. Pintura

Luego de efectuar un repaso final verificando la correcta terminación de los elementos (libres de imperfecciones, abolladuras, correcta soldadura, pulido, masillado y limpieza) se procedió a la aplicación con soplete de una primer mano de pintura a todos los elementos metálicos.

### 3.15. Salpicado interior

Los muros a trabajar se limpiaron con cepillo de cerda para eliminar el polvo y la arena suelta residual, procediendo luego a corregir las imperfecciones (raspaduras profundas, oquedades, salientes).

Posteriormente se aplicó el material diluido en agua con rodillo de piel cubriendo en forma pareja y total el muro.

Una vez seca esta base se aplicó la carga final con compresor y pistola, cuidando que tuviera un aspecto uniforme en cuanto a textura, color y cobertura.

### 3.16. Salpicado plástico exterior

Los trabajos se realizaron en forma similar a lo descrito en el Item anterior. El material aplicado sobre los muros cubrió el cordón exterior para permitir que el agua escurra hasta el perímetro exterior de la fundación. Este salpicado plástico tiene la función de barrera impermeable para el agua de lluvia, dado que ni los paneles ni el revoque proveen esta protección.

### 3.17. Terminación propiamente dicha

En esta etapa se colocaron los vidrios, se realizó la puesta en servicio de las instalaciones, se efectuó una segunda mano de pintura dando el acabado final y se colocaron artefactos y accesorios.

Tabla 1: Análisis químico del cemento portland

	g/100g
Residuo Insoluble	0,32
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	21,0
Oxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,80
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,14
Oxido de Calcio (CaO)	63,9
Oxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,05
Oxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	0,97
Oxido de Magnesio (MgO)	0,68
Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )	2,40
Oxido de Calcio Libre (CaO)	0,59
Alcalinos totales (Na <sub>2</sub> O + 0,658.K <sub>2</sub> O)	0,69
Sulfuros (S=)	0,02

Tabla 2: Escoria de alto horno granulada molida, análisis químico, contenido de fase vítrea y densidad.

Residuo insoluble	1,00 g/100g
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ).....	31,3 "
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ....	11,9 "
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	4,47 "
Oxido de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ...	0,92 "
Oxido de calcio (CaO) .....	44,2 "
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O) .....	0,44 "
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O).....	0,88 "
Oxido de magnesio (MgO).....	3,71 "
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ).....	0,88 "
Sulfuro (S=) .....	1,04 "
Alcalinos totales .....	1,02 "
Densidad .....	2,96 g/cm <sup>3</sup>
Porcentaje de fase vítrea ....	98,0 %
Finura Blaine .....	380 m <sup>2</sup> /kg

Tabla 3: Granulometría del agregado grueso

Tamiz	% ret.ac.
1"	0
3/4"	2
1/2"	31
3/8"	56
# 4	91
Fondo	100

Tabla 4: Granulometría del agregado fino (arena fina Paraná)

Tamiz	% ret.ac.
# 4	0
# 8	2.8
# 16	5.7
# 30	23.2
# 50	60.0
# 100	96.5
Fondo	100.0

Tabla 5: Dosificación y propiedades del hormigón fresco

a/c+EAHGM = 0.45	REPLAZO DE CEMENTO POR ESCORIA[%]			
Material [kg/m3]	0	30	50	70
Piedra partida	1081	1082	1090	1093
Arena fina Paraná	694	692	690	689
Cemento Tipo I	404	284	200	117
E.A.H.G.M.	-	122	200	274
Agua	182	181	180	177
Asentamiento [cm]	7.0	7.5	7.0	9.0
Aire inc. [%]	1.8	2.2	1.9	2.2
PUV fresco [kg/m3]	2360	---	2356	---

Tabla 6: Dosificación y propiedades del hormigón fresco

a/c+EAHGM = 0.65	REEMPLAZO DE CEMENTO POR ESCORIA[%]			
Material [kg/m3]	0	30	50	70
Piedra partida	1057	1064	1070	1074
Arena fina Paraná	770	765	762	760
Cemento Tipo I	312	215	146	87
E.A.H.G.M.	-	92	146	203
Agua	204	198	190	189
Asentamiento [cm]	7,0	8,5	7,0	8,0
Aire inc. [%]	1,6	2,0	2,2	2,4
PUV fresco [kg/m3]	2347	-----	2316	-----

Tabla 7: Resultados de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad estático para hormigones de w/c = 0,45

A/C 0,45	Edad [días]					
	7	28		91	180	365
Cont.de escoria [%]	Res.a comp. [MPa]	Res.a comp. [MPa]	E [GPa]	Res.a comp. [MPa]	Res.a comp. [MPa]	Res. a comp. [MPa]
0	30,7	41,0	38,1	43,8	46,4	51,5
30	24,0	36,9	35,7	44,3	46,6	47,1
50	16,2	34,4	36,4	42,8	44,6	47,8
70	13,2	34,1	34,3	42,6	43,5	50,2

Tabla 8: Resultados de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad estático para hormigones de  $w/c = 0,65$ .

A/C 0,65	Edad [días]					
	7	28		91	180	365
Cont.de Escoria [%]	Res.a comp. [MPa]	Res.a comp. [MPa]	E [GPa]	Res. a comp. [MPa]	Res.a comp. [MPa]	Res.a comp. [MPa]
0	17,4	24,6	31,6	27,4	28,8	30,7
30	15,3	26,5	31,8	33,7	35,6	36,2
50	9,7	24,4	29,4	30,4	32,8	41,0
70	6,0	19,0	26,4	28,8	31,9	35,3

Tabla N° 9: Resultados de resistencia a la compresión relativa porcentual para hormigones de  $w/c = 0,45$  (100 % corresponde a la mezcla de control a la edad correspondiente).

A/C 0.45	Edad [días]				
	7	28	91	180	365
% de Escoria	Res.a comp.%	Res.a comp.%	Res. a comp.%	Res. a comp.%	Res. a comp.%
0	100	100	100	100	100
30	78,2	90,0	101,1	100,4	91,5
50	52,8	83,9	97,7	96,1	92,8
70	43,0	83,2	97,3	93,7	97,5

Tabla 10: Resultados de resistencia a la compresión relativa porcentual para hormigones de w/c = 0,65 (100 % se le asigna a la mezcla de control a la edad correspondiente).

a/c+EAHGM = 0,65	Edad [días]				
	7	28	91	180	365
% Escoria	Res. a comp. %	Res. a comp. %	Res. a comp. %	Res. a comp. %	Res. a comp. %
0	100	100	100	100	100
30	87,9	107,7	123,0	123,6	117,9
50	55,7	99,2	110,9	113,0	133,6
70	34,5	77,2	105,1	110,8	115,0

Tabla 11: Resultados de tracción indirecta para hormigones de razón agua/cemento = 0,45

a/c+EAHGM = 0,45	Tracción por compresión diametral [MPa]	
	Edad [días]	
% Escoria	28	91
0	3,8 +/- 0,2	3,5 +/- 0,3
30	3,3 +/- 0,3	3,6 +/- 0,3
50	3,3 +/- 0,2	3,5 +/- 0,3
70	3,2 +/- 0,2	3,6 +/- 0,1

Tabla 12: Resultados de tracción indirecta para hormigones de razón agua/cemento = 0,65

a/c+EAHGM = 0,65	Tracción por compresión diametral [MPa]	
	Edad [días]	
% Escoria	28	91
0	3,2 +/- 0,2	2,8 +/- 0,1
30	3,0 +/- 0,2	3,1 +/- 0,4
50	3,0 +/- 0,2	3,1 +/- 0,3
70	2,80 +/- 0,02	3,0 +/- 0,1

Tabla 13: Resistencia a la compresión de morteros preparados con los cementos mezcla utilizados para los hormigones

% Escoria	Edad		
	7 días	28 días	91 días
0	23,0	32,3	32,9
30	13,6	31,3	39,0
50	10,7	31,0	44,9
70	9,1	22,3	34,1

Tabla 14: Resistencia a la compresión de morteros ASTM C 109 de cemento portland normal y cemento portland con escoria ( 50 %) a las edades de 7 y 28 días.

CEMENTO	RESISTENCIA A COMPRESION (MPa)	
	7 días	28 días
CN	14,8	24,7 (*)
CN/EAHGM	8,5	25

(\*) Valor anormalmente bajo.

Tabla 15: Resultados de ensayo de mosaicos graníticos

CEMENTO	TIPO DE MOSAICO	TIPO DE CURADO	RESIST.A FLEXION [MPa]	DESGASTE [mm]	ABSORCION [%]
CN/EAHGM	Granitos	14	8,3	2,0	7,5
		28	8,2	2,1	7,2
Primera serie	Calcáreo	14	--	2,1	8,4
		28	--	1,6	8,3
CN	Granítico Verde Alpe	* 28	6,8	2,0	9,1
CN/EAHGM	Granítico Verde Alpe	* 28	3,7	1,3	9,6

\* De acuerdo con lo indicado para la segunda serie de ensayos.

Tabla 16: Resultado de ensayo de probetas de hormigón liviano utilizado en la confección de los paneles para la vivienda prototipo, curadas en las mismas condiciones que los paneles.

Densidad seca	Resist. comp. (MPa)	Promedio (MPa)
1.11	7.3	7.7
1.13	7.5	
1.16	8.4	
1.14	7.5	
n.d.	7.9	7.8
n.d.	8.0	
n.d.	7.2	
n.d.	8.1	

Nota: para las probetas identificadas con n.d. no se indica la densidad por no encontrarse secas al momento del ensayo. Su densidad media (húmedas) = 1.25

Tabla 17: Resultados de ensayo a compresión excéntrica

CARGA	ACORTAMIENTO			FLECHA LATERAL		
	Panel Nº 1	Panel Nº 2	Panel Nº 3	Panel Nº 1	Panel Nº 2	Panel Nº 3
daN	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.8	0.04	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.6	0.09	0.00	0.14	0.00	0.00	0.03
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29.4	0.14	0.06	0.27	0.00	0.00	0.10
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39.2	0.20	0.08	0.39	0.00	0.00	0.10
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
49.0	0.23	0.16	0.51	0.00	0.00	0.15
2.0	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
58.8	0.30	0.27	0.63	0.03	0.05	0.20
2.0	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
68.6	0.43	0.27	0.78	0.03	0.10	0.20
2.0	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
78.4	0.48	0.41	0.90	0.00	0.10	0.25
2.0	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00
88.2	0.55	0.47	0.99	0.04	0.11	0.25
2.0	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00
98.0	0.61	0.53	1.09	0.04	0.13	0.27
2.0	0.00	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00
107.8	0.72	0.60	1.20	0.04	0.13	0.30
2.0	0.00	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00
117.6	-----	0.65	1.33	-----	0.15	0.32
2.0	-----	0.04	0.09	-----	0.00	0.00
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 18: Resultados del ensayo de impacto blando

ALTURA DE CAIDA	ENERGIA DE IMPACTO	FLECHA INSTANT.			FLECHA RESIDUAL		
		Panel N° 1	Panel N° 2	Panel N° 3	Panel N° 1	Panel N° 2	Panel N° 3
m	daJ	cm	cm	cm	mm	mm	mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.15	4.5	0.2	0.2	0.1	0.70	0.43	0.20
0.30	9.0	0.4	0.5	0.3	1.17	0.92	0.34
0.45	13.5	0.6	0.7	0.4	1.27	1.16	0.37
0.60	18.0	0.7	0.8	0.5	1.33	1.21	0.67
0.75	22.5	0.8	0.9	0.6	1.33	1.60	0.98
0.90	27.0	1.0	1.0	0.7	1.33	1.76	1.22
1.05	31.5	1.0	1.1	0.8	1.86	2.06	1.52
1.20	36.0	1.2	1.1	0.9	2.15	2.28	1.97
1.35	40.5	1.4	1.4	1.0	2.53	2.87	1.97
1.50	45.0	1.6	1.7	1.1	3.00	3.89	2.05
1.65	49.5	1.8	1.9	1.3	3.47	4.47	2.53
1.80	54.0	2.1	2.1	1.5	3.96	5.44	3.05
1.95	58.5	2.5	2.3	1.6	4.67	6.16	3.36
2.10	63.0	3.3	2.6	1.8	----	6.93	----
2.25	67.5	4.1	3.1	2.2	----	----	----
2.40	72.0	6.4	3.6	2.6	----	----	----
2.55	76.5	---	4.1	3.2	----	----	----
2.70	81.0	---	---	4.0	----	----	----
2.85	85.5	---	---	---	----	----	----

Tabla 19: Resultados del ensayo de impacto de la bola de acero.

ALTURA DE CAIDA DE LA BOLA DE ACERO (m)	IMPRONTA					
	DIAMETRO (cm)			PROFUNDIDAD (mm)		
	PANEL N <sup>o</sup> 1	PANEL N <sup>o</sup> 2	PANEL N <sup>o</sup> 3	PANEL N <sup>o</sup> 1	PANEL N <sup>o</sup> 2	PANEL N <sup>o</sup> 3
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.60	0.78	0.62	0.30	0.30	0.20
0.50	1.18	1.11	0.97	0.60	0.60	0.50
0.75	1.62	1.25	1.43	0.80	1.00	0.70
1.00	1.92	1.53	1.75	1.10	1.10	0.90
1.25	1.93	1.72	1.87	1.30	1.20	1.00
1.50	1.95	1.76	1.99	1.40	1.50	1.30
1.75	2.30	1.91	2.25	1.70	1.70	1.70
2.00	2.34	1.96	2.30	2.00	2.00	2.00

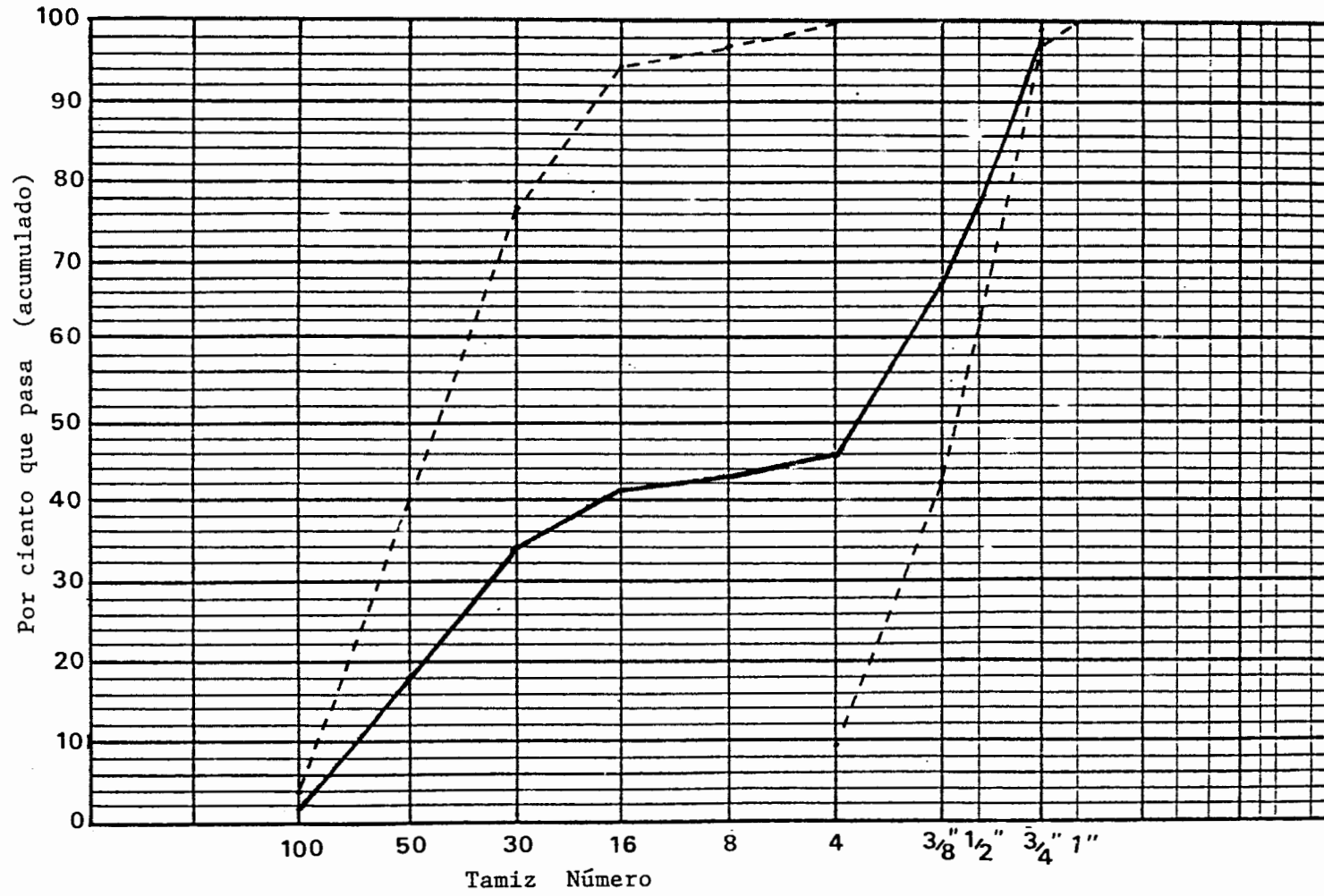


Fig. 1: Granulometría del Agregado Fino, Agregado Grueso y Agregado Compuesto

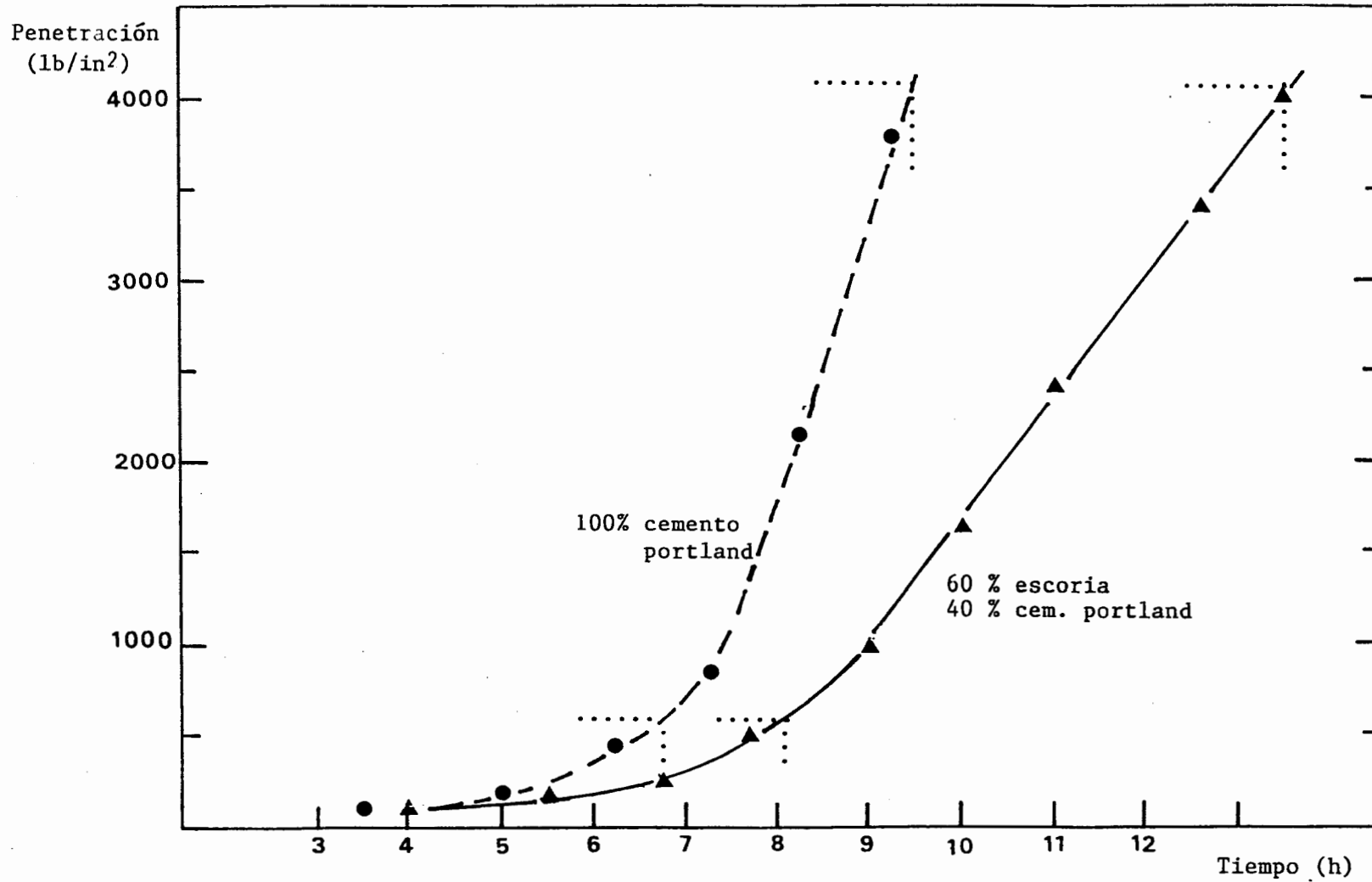
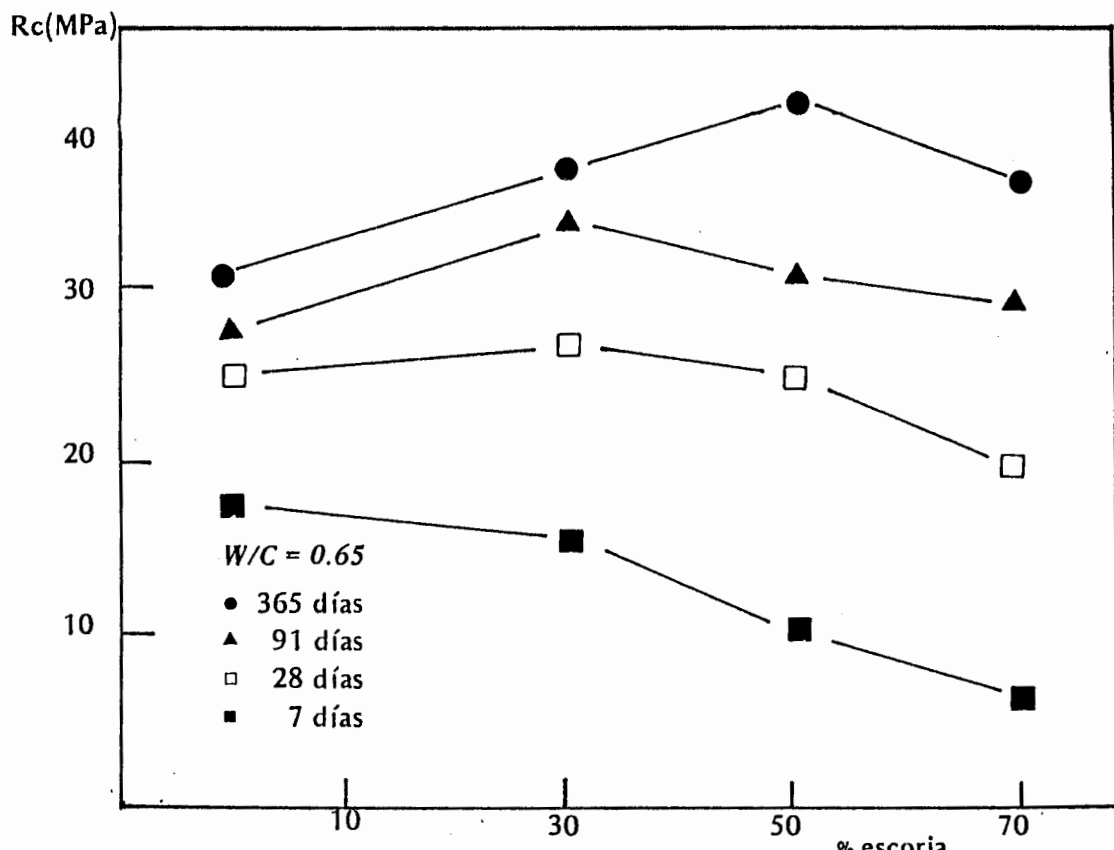
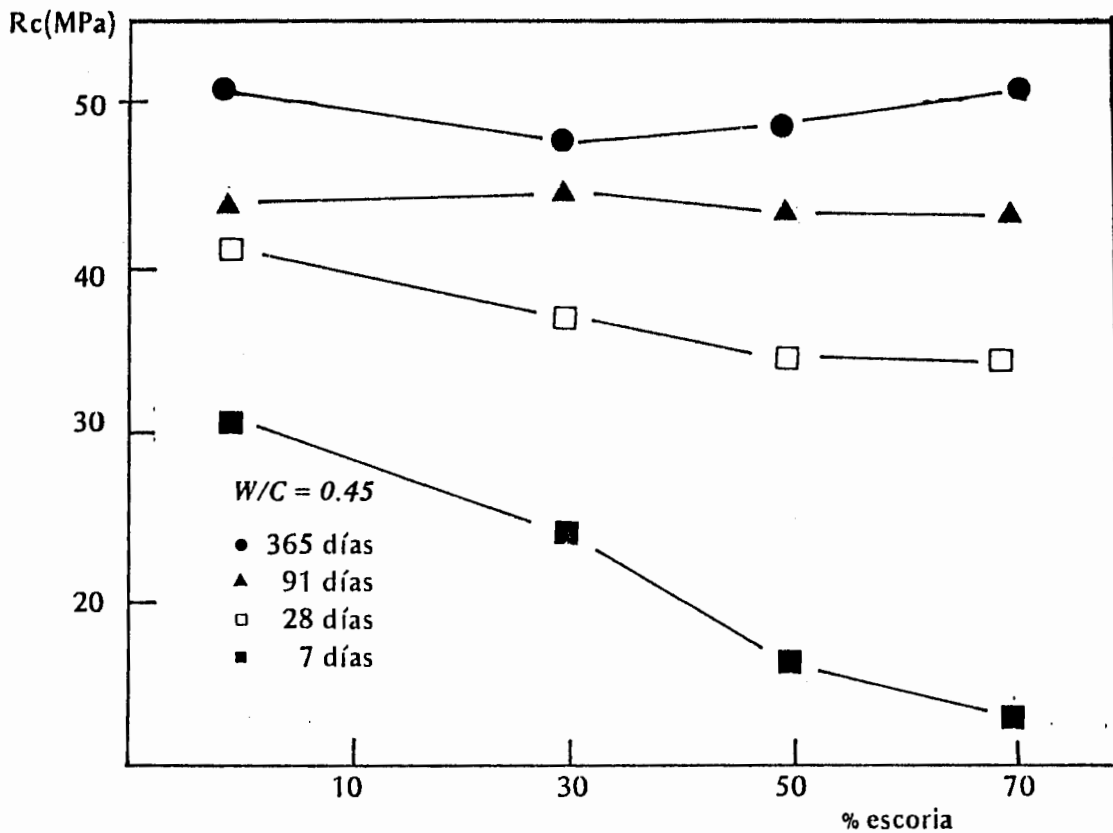
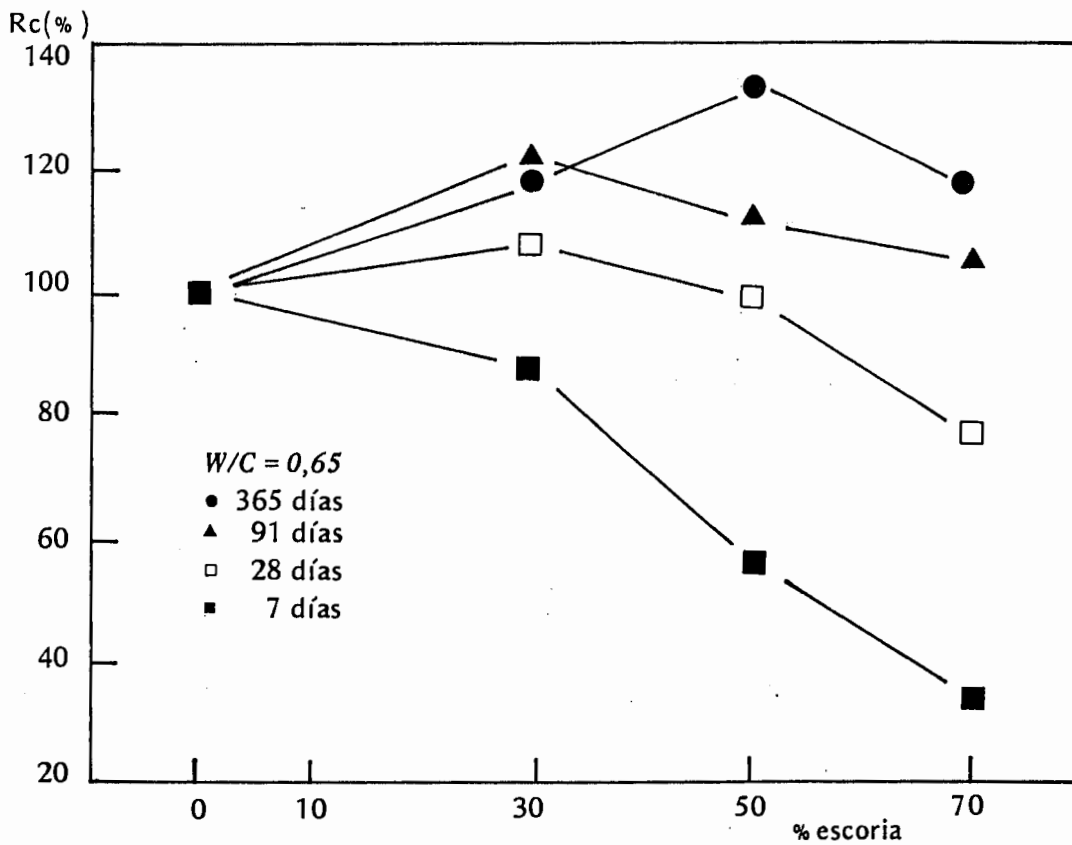
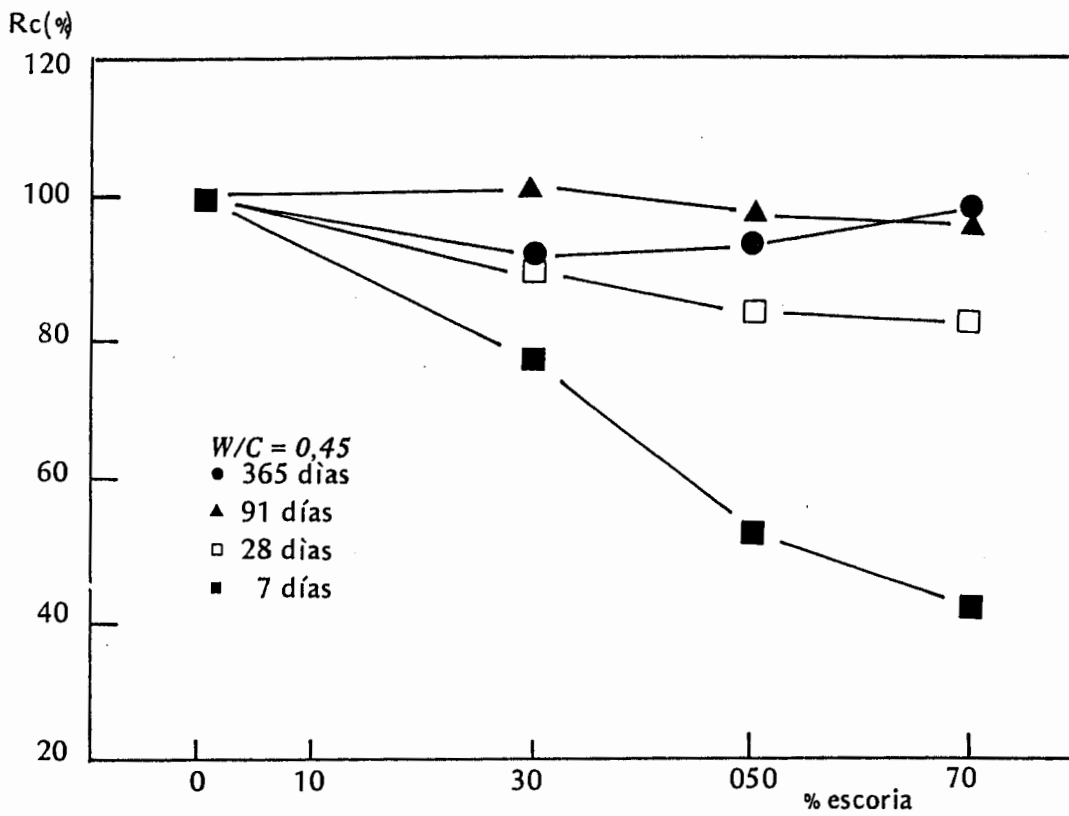


Fig. 2: Tiempo de fraguado del hormigón elaborado con cemento portland y con el 60 % de escoria como remplazo parcial de cemento.



Resistencia a la compresión para hormigones de  $w/c = 0.45$  y  $0.65$  y diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por escoria.



Resistencia a la compresión relativa porcentual para hormigones con  $w/c=0,45$  y  $0,65$ ; 100% corresponde a la mezcla control (100% CPN).

# INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE CURADO

## EN LOS CEMENTOS MEZCLA

### RESUMEN

El curado acelerado de los elementos premoldeados es utilizado normalmente en la industria por razones operativas y/o económicas, ya que permite una circulación más rápida del capital de trabajo.

El empleo de la escoria de alto horno granulada representaría una ventaja económica importante para la industria de premoldeados, permitiéndole, en algunos casos, competir favorablemente con otros materiales como, por ejemplo, en el caso de los bloques. Con el curado acelerado, el desarrollo más lento de resistencia de los cementos de escoria no representa un inconveniente sino que, en principio, se obtendría una pérdida relativa de resistencia final menor.

El objetivo de este trabajo es conocer el comportamiento de los cementos de escoria a las temperaturas normalmente utilizadas en el curado acelerado y también la influencia de temperaturas inferiores a 20 °C. Con este fin se analiza el efecto de la temperatura sobre el desarrollo de resistencia de morteros preparados utilizando cementos con distintos niveles de contenido de escoria.

Se han tenido en cuenta también otras variables que afectan el desarrollo de resistencia: tiempo de espera a la temperatura normal de moldeo hasta comenzar el curado, duración del curado a la temperatura establecida y gradientes de cambio de temperatura, tanto en ascenso como en descenso.

## 1. INTRODUCCION

Es bien conocido el efecto de la elevación de temperatura en la aceleración de las reacciones de hidratación, circunstancia relativamente más ventajosa para los cementos de escoria por su menor ganancia de resistencia a edades tempranas. Por otro lado, en la industria de premoldeados es conveniente, por razones económicas, alcanzar la resistencia mínima necesaria para el movimiento de los elementos elaborados en el menor tiempo posible. Debe contemplarse sin embargo el consumo adicional de energía y la reducción de resistencia a largas edades con respecto al curado normal; estos factores dependen de las condiciones de curado y el tipo de cemento utilizado.

Entre las variables que afectan el desarrollo de resistencia se ha evaluado el tiempo de espera, la temperatura de curado, la duración del mismo y las velocidades de cambio de temperatura.

El curado a temperaturas inferiores a la normal, 20°C, aporta información sobre el comportamiento de los cementos de escoria cuando se emplean en estas condiciones que son menos favorables porque estos cementos requieren mayor energía de activación. Esta situación puede presentarse en la zona de mayor probabilidad de uso de los cementos de escoria.

## 2. PLAN DE ENSAYOS

### 2.1. Cemento

Los cementos utilizados para este estudio se obtuvieron por molienda conjunta, en un molino de laboratorio, de clinker de cemento portland, escoria granulada de alto horno y yeso natural. En las Tablas 1 y 2 se indican las composiciones químicas y en la Tabla 3 la composición porcentual de los cementos y su identificación.

### 2.2. Morteros

Se moldearon probetas cúbicas de 50 mm de arista, de acuerdo con la norma ASTM C 109.

### 2.3. Temperaturas de curado

Las temperaturas de curado seleccionadas fueron 5, 12, 20 (curado normal), 33, 55 y 80 °C.

### 2.4. Tiempos de espera

Se fijaron tres niveles para el tiempo de espera entre la finalización del moldeo y la colocación de las probetas dentro del baño de agua saturada con cal a la temperatura de curado. Para las temperaturas de curado de 33, 55 y 80 °C, estos tiempos fueron de 4, 8 y 24 horas, considerando que los mismos podrían adoptarse en un proceso industrial. Para las temperaturas de curado de 5 y 12 °C, los tiempos de espera fueron solamente de 4 y 24 horas.

### 2.5. Edades equivalentes en curado normal

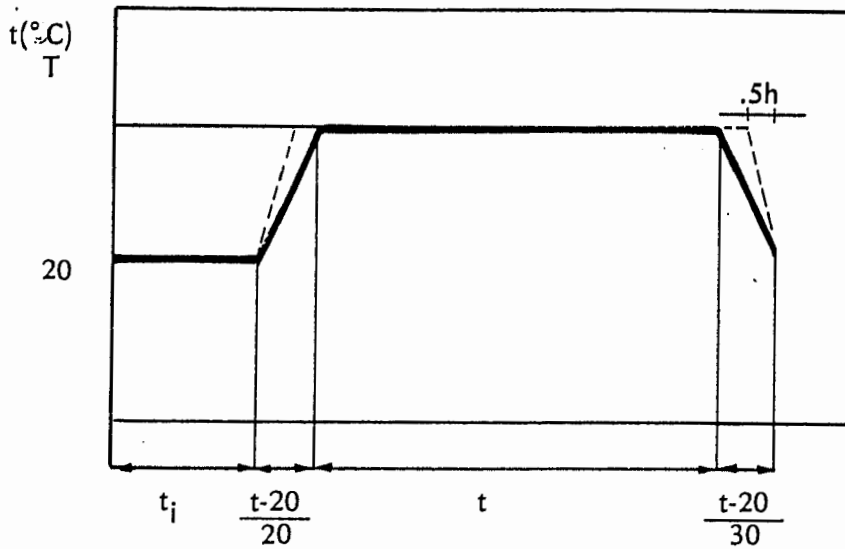
Se programaron los ensayos para las siguientes edades equivalentes: 3, 7, 14, 28 y 56 días, a las que se agregaron 1,7; 2 y 2,4 días para 33 °C, 1,7; 2,1 y 2,6 días para 55 °C y 1,7; 2 y 2,7 para 80 °C, con un tiempo de espera de 24 horas en todos los casos.

Los tiempos durante los cuales las probetas se mantuvieron a la temperatura de curado T °C se calcularon utilizando la siguiente expresión en la que se prevé un gradiente térmico de 20 °C/h para el calentamiento y 30 °C/h para el enfriamiento.

$$t(h) = \frac{M}{T} - \frac{20 \cdot t_i}{T} - \frac{(T-20) \cdot (T+20)}{2 \cdot T \cdot 20} - \frac{(T+20) \cdot (T-20)}{2 \cdot T \cdot 30}$$

donde, M: madurez (°C/h)  
ti: tiempo de espera (h)

Experimentalmente no se pudo cumplir en forma rigurosa con los gradientes térmicos planificados al no poder utilizarse el equipo que se tenía previsto emplear. Como consecuencia de este inconveniente, la madurez real es levemente superior a la nominal ya que el calentamiento fue más rápido y el enfriamiento más lento que lo supuesto. En el esquema se indica con líneas de trazos el gradiente real estimado y con líneas continuas el previsto en los cálculos.



Las probetas se retiraron del baño de curado media hora antes del ensayo y se sumergieron en agua a  $20$   $^{\circ}\text{C}$ . Para la temperatura de  $80$   $^{\circ}\text{C}$ , el enfriamiento se realizó en dos etapas para disminuir el gradiente térmico y evitar tensiones excesivas.

## 2.6. Influencia del Curado en la Resistencia a largas Edades

Para evaluar la influencia del curado a temperaturas diferentes a la normal a edades tempranas sobre la resistencia a mayores edades, un grupo de probetas fue curado a temperaturas  $T$ , durante el tiempo necesario para alcanzar las edades equivalentes de 3 y 7 días, luego de lo cual se continuó el curado a  $20$   $^{\circ}\text{C}$  sumergidas en agua hasta llegar a las edades de 28 y 360 días.

## 3. EQUIPOS UTILIZADOS

Para obtener los diferentes curados a las temperaturas previstas, se debieron improvisar diferentes equipos de modo de mantener la temperatura constante en los valores preestablecidos. En todos los casos, la variación promedio de temperatura no fue superior a  $1,5$   $^{\circ}\text{C}$ .

## 4. GRADO DE HIDRATACION

Se intentó seguir el proceso de hidratación determinando el agua combinada químicamente, por calcinación a  $1050$   $^{\circ}\text{C}$ . Para ello, una masa de  $130$  g de las probetas ensayadas fue pulverizada sumergida en acetona a fin de detener el proceso de hidratación, luego sometida a secado en estufa a  $105$   $^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas y posteriormente calcinada durante una hora a  $1050$   $^{\circ}\text{C}$ . El grado de hidratación se calculó mediante la expresión:

$$W_n = \frac{(W^{105} - W^{1050}) - \alpha_c \frac{1}{1+g} W^{105} - \alpha_a \frac{g}{1+g} W^{105}}{W^{1050} - (1 - \alpha_a) \frac{g}{1+g} W^{105}}$$

donde

$W_n$ : masa de agua unida químicamente por unidad de masa de cemento

$W^{105}$ : masa de material luego del secado a 105 °C

$W^{1050}$ : masa de material luego del secado a 1050 °C

$\alpha_c$ : pérdida por calcinación del cemento mezcla

$\alpha_a$ : pérdida por calcinación del agregado

$g$ : relación masa agregado/masa cemento

## 5. RESULTADOS

En las tablas 4 a 9 se presentan los resultados de resistencia a compresión y grado de hidratación para las distintas temperaturas de curado, tiempos de espera y edades equivalentes.

En las Figuras 1 a 10 se representan las resistencias en función de los tiempos de curado para el tiempo de espera de 24 horas y los tres cementos ensayados. En algunos casos no se observa un incremento regular de la resistencia con el tiempo de curado, apreciándose incluso una disminución de la resistencia para las temperaturas más altas a tiempos prolongados de curado.

Para 55 y 80 °C y tiempos de espera de 4 y 8 horas, el desarrollo de resistencia con el tiempo de curado no es regular, siendo esto más marcado para el tiempo de espera de 4 horas y la temperatura de 80 °C.

El desarrollo de resistencia en función del grado de hidratación no muestra una correlación satisfactoria. Suponiendo una relación lineal, el mejor coeficiente de correlación encontrado fue 0,66. Esto indica que otros factores, además del grado de hidratación deben ser tenidos en cuenta, por lo menos en el rango de variables estudiadas.

El tratamiento de los resultados se realizó de acuerdo con el procedimiento desarrollado por Carlino [1], el que puede consultarse en el apéndice. Los cálculos se realizaron únicamente para el tiempo de espera de 24 horas y se determinó:

Ru: resistencia última o resistencia a la compresión a edad infinita

k(T): valor de la función de temperatura o constante de velocidad de ganancia de resistencia, a temperatura T

t : edad a la cual se considera que comienza la ganancia de resistencia

Ea: energía de activación aparente

En primer lugar se evaluaron los resultados a 20°C, siguiendo el siguiente procedimiento:

- a) se consideraron todos los resultados disponibles a esta temperatura
- b) de las curvas  $R = f(t)$  se descartaron aquellos valores que más se alejaban de la curva, dejando al menos un valor a edad avanzada
- c) Con los valores anteriores se calcularon los parámetros de la recta  $1/R = f(1/t)$  y sus errores, determinándose el valor de  $1/R_u$  para  $1/t = 0$
- d) Considerando  $t_0 = 0$  se comenzaron a descartar los valores correspondientes a edades cortas, partiendo de las edades más bajas, de uno en uno, buscando el menor error de  $1/R_u$
- e) Determinado el valor de  $R_u$ , se procedió al cálculo de  $t_0$  y  $k(T)$ . Para ello, con todos los valores aceptados inicialmente se calcularon los parámetros de la recta  $R/(R_u - R) = f(t)$ , determinándose  $t_0$ ,  $k(T)$  y su error
- f) A partir de ese resultado, se comenzó a descartar los valores correspondientes a las edades más largas de uno en uno, en forma decreciente, buscando el menor error de  $k(T)$

El mismo procedimiento se siguió para las otras temperaturas, donde el tiempo de espera se tuvo en cuenta para el cálculo de  $R_u$ , sumando  $24 \times 20/T$  al tiempo de curado del primer cálculo. Esta aproximación y la de  $t_0 = 0$  no afectan significativamente los resultados, ya que como se indicó anteriormente se tienen en cuenta principalmente los resultados a largas edades.

Luego de obtener el primer valor de  $k(T)$  y para el siguiente cálculo de  $k(T)$  y  $t_0$ , el tiempo total se calculó sumando al de  $t$  el valor  $t_i \cdot k(20)/k(T)$ , donde  $t_i$  es el tiempo de espera, 24 horas para los casos calculados.

Para el cálculo de las energías de activación, se consideró que la variación de  $k(T)$  con la temperatura sigue la ecuación de Arrhenius, por lo que se calculó la pendiente de la recta  $\ln k(T) = f(1/T)$ , a partir de la cual se obtuvo  $E_a$ .

En las Fig. 11 y 12 se representan los valores de  $k(T)$  en función de  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y el  $\ln k(T)$  en función de  $1/T$  ( $1/\text{K}$ ) respectivamente. En las Tablas 10 a 12 se muestran los resultados de  $R_u$ ,  $t_0$ ,  $k(T)$ ,  $E_a$  y los errores calculados para cada caso.

## 6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Es difícil efectuar un análisis de los resultados a partir de las curvas  $R = f(t)$ , siendo más conveniente hacerlo a través de la evaluación de los parámetros calculados.

En general,  $R_u$  disminuye con el incremento de temperatura, como era de esperar. Los valores para B400 y B440 a  $20^{\circ}\text{C}$  son anormalmente altos, con respecto a la evolución encontrada

Los valores más bajos los presenta el cemento B400, mientras que entre B470 y B440 no hay una diferencia definida. El valor más alto se alcanza con el cemento B470 para  $5^{\circ}\text{C}$  y los valores más bajos los presentan este cemento y el B400 para  $80^{\circ}\text{C}$ .

El valor de  $k(T)$  aumenta regularmente con la temperatura, como es de esperar, con las excepciones de B400 para  $55^{\circ}\text{C}$  y B440 a  $20^{\circ}\text{C}$ , donde encontramos un valor anormalmente alto y anormalmente bajo respectivamente con respecto a los esperados de acuerdo con la tendencia general.

Para una temperatura constante, los valores más altos de  $k(T)$  corresponden al cemento de referencia B400, mientras que entre B470 y B440 las diferencias son relativamente menores.

Los valores de  $t_0$  disminuyen regularmente con el aumento de  $T$ , con algunas excepciones como el correspondiente a B440 para  $5^{\circ}\text{C}$ , anormalmente bajo. Es de hacer notar el rápido incremento del tiempo  $t_0$  cuando la temperatura desciende de  $20^{\circ}\text{C}$  para el cemento B440 y de  $15^{\circ}\text{C}$  para los cementos B400 y B470, Fig. 13.

Los valores de la energía de activación para los cementos B400 y B440 son prácticamente similares si se tiene en cuenta el error experimental, en tanto que para el B470 es inferior.

Los morteros de cemento con el contenido mayor de escoria, B440, curados a las edades equivalentes de 3, 7 y 14 días, muestran una ganancia de resistencia superior que curados a las mismas edades a temperatura normal (20 °C). Esto también es válido para 3 y 7 días para el cemento con 30 % de escoria, B470, mientras que para el cemento de referencia los valores de resistencia están en el mismo orden o presentan una disminución.

Para la edad de 28 días hay, en general, un comportamiento similar para todos los cementos, evidenciando una disminución de resistencia por efecto del curado acelerado, Tablas 13-16. Los mejores resultados se obtienen para una temperatura de 33 °C, para la cual se alcanzan o superan los valores del curado normal pero las resistencias relativas de los cementos de escoria son menores que las correspondientes al cemento portland normal.

## 7. CONCLUSIONES

Con el clinker de cemento portland utilizado en este estudio se obtuvo muy buena respuesta a corta edad en la activación de la escoria a temperatura normal. Es de esperar que cuando se aplique el curado acelerado a un cemento con escoria donde se emplee un clinker que brinde naturalmente menos activación, los resultados relativos sean aún más beneficiosos.

En las Tablas 17 y 18 se pueden ver los valores absolutos y la relación porcentual de la resistencia alcanzada por curado acelerado a temperatura T, a las edades equivalentes de 3 y 7 días, continuando con el curado normal hasta completar los 28 y 360 días después del moldeo. Los valores de referencia son las resistencias a 28 y 360 días de curado normal desde el moldeo, a los que se asignó el valor 100.

Cuando se completa el curado a 28 días, después del curado a una temperatura distinta de la normal, no se alcanza, en general, los mismos valores de resistencia. Si bien no hay una tendencia perfectamente definida, parecería que el cemento con mayor contenido de escoria es el más afectado.

En cambio, cuando el curado se extiende a 360 días, se observa que hasta 33 °C hay un incremento en las resistencias para el cemento con mayor contenido de escoria, B440. Para temperaturas superiores a 33 °C las resistencias a 360 días son menores que para el curado normal desde el

moldeo y no hay una diferencia definida en el comportamiento de los tres cementos. La prolongación del tiempo de espera de 4 a 24 horas tiene un efecto positivo, como era previsible.

De esto se concluye que el curado acelerado representa una ventaja relativa para los cementos con escoria con respecto al cemento portland normal y que no es conveniente superar la edad equivalente de 14 días. A temperaturas más altas no se observa una diferencia sistemática significativa para las distintas condiciones y cementos. Se observa también un efecto negativo cuando el tiempo de espera se acorta a 4 horas.

En resumen, los mejores resultados se obtienen con un curado a 33 °C, un tiempo de espera de 24 horas y una edad equivalente de 7 días, siguiendo el de 55 °C, 24 horas de espera y una edad equivalente de 3 días.

Los resultados obtenidos no pueden extrapolarse a otros clínkeres, ya que son válidos solamente para los cementos estudiados.

## APENDICE

La velocidad de ganancia de resistencia a cualquier edad puede expresarse [2] como una función de la correspondiente resistencia R y la temperatura T:

$$\frac{dR}{dt} = f(R).k(T)$$

En base a la experiencia empírica se propuso para la función de resistencia f(R), la forma:

$$f(R) = Ru [ 1 - ( R/Ru) ]^2$$

donde Ru es la resistencia límite a edad infinita.

Con la aproximación que Ru es independiente de la temperatura y considerando las dos expresiones anteriores, tenemos:

$$\int_0^R \frac{dR}{[1 - R/Ru]^2} = Ru \int_{t_0}^t k(T).dt$$

donde se tuvo en cuenta el período de inducción y por lo tanto R es igual a cero hasta un tiempo  $t_0$  y k(T) es el valor de función de temperatura o constante de velocidad.

Si se considera el caso de curado a temperatura constante, es decir, bajo condiciones isotérmica, k(T) es independiente del tiempo y la integración de las funciones anteriores nos lleva a:

$$\frac{Ru}{Ru-R} = k(T).(t - t_0) \quad (1)$$

Reagrupando esta expresión, obtenemos:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_u \cdot k(T) \cdot (t - t_0)} + \frac{1}{R_u}$$

En una primera aproximación y para consideraciones a largo plazo ( $t \gg t_0$ ), se puede tomar  $t_0 = 0$ , por lo tanto:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_u \cdot k(T) \cdot t} + \frac{1}{R_u}$$

De esta expresión es posible obtener  $R_u$ .

Volviendo a la expresión original (1) y reordenando:

$$\frac{R}{R - R_u} = k(T) \cdot t - k(T) \cdot t_0$$

De esta ecuación y con el valor calculado anteriormente para  $R_u$ , podemos obtener  $k(T)$  y  $t_0$ , utilizando preferentemente los resultados a edades cortas.

Si la temperatura no permanece constante es necesario expresar la función de temperatura  $k(T)$  en términos de  $T$ ; una primera aproximación, utilizada en el concepto de madurez, considera una relación lineal:

$$k(T) = A (T - T_0)$$

donde  $A$ : constante

$T_0$ : temperatura por debajo de la cual no hay desarrollo de resistencia con el tiempo, es decir,  $k(T_0) = 0$

De esta manera, la función temperatura-tiempo,  $M$ , se puede expresar:

$$M = \int_0^t k(T) dt = A \int_0^t (T - T_0) dt$$

$$M = A (T - T_0) t$$

El valor comúnmente aceptado para  $T_0$  es  $-10$  °C; llevando esto a la expresión anterior, tenemos:

$$M = A ( T + 10 ) t$$

Un mejor ajuste de la función  $k(T)$  con la temperatura se consigue utilizando la ecuación de Arrhenius, que expresa la variación de la constante de velocidad de una reacción química con la temperatura:

$$k(T) = B \cdot e^{-E_a/RT}$$

donde  $B$  es una constante,  $E_a$  la energía aparente de activación,  $R$  la constante universal de los gases y  $T$  la temperatura absoluta de curado.

Tomando logaritmos a ambos miembros de esta ecuación, obtenemos:

$$\ln k(T) = \ln B - \frac{E_a}{R \cdot T}$$

Por lo tanto, vemos que si la función  $k(T)$  puede expresarse mediante la ecuación de Arrhenius, la representación del  $\ln k(T)$  en función de  $1/T$  ( $1/K$ ) debería ajustarse por una recta. En el caso estudiado, Fig 12, esto se cumple, aunque con una dispersión importante, y podemos estimar de la misma el valor de la energía de activación  $E_a$ .

## REFERENCIAS

1. Carlino, N. J. "The maturity method: Theory and application" *Cement, Concrete and Aggregates*. Vol. 6, Nro. 2. Winter 1984, pp 61-73.
2. Bernhardt, C. J. "Hardening of Concrete at Different Temperatures" *Proceedings of the RILEM Symposium on Winter Concreting*, Danish Institute for Building Research, Copenhagen, Denmark, 1956, 18 pp.

Tabla 1: Composición química y densidad del clínker utilizado (g/100g)

Composición	%
Residuo insoluble .....	0,39
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )...	20,1
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )...	6,10
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	3,61
Oxido de calcio (CaO).....	62,4
Oxido de magnesio (MgO) ....	3,61
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ).....	0,49
Oxido de calcio libre .....	1,15
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O) .....	0,64
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O).....	1,47
Alcalinos totales .....	1,41
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ).....	3,12

Tabla 2: Escoria de alto horno granulada, análisis químico, contenido de fase vítrea y densidad.

Composición	%
Residuo insoluble	0,77
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ).....	36,5
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ....	12,5
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	1,31
Oxido de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ...	1,03
Oxido de calcio (CaO) .....	42,9
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O) .....	0,38
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O).....	0,78
Oxido de magnesio (MgO).....	3,74
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ).....	0,11
Sulfuro (S=) .....	0,84
Alcalinos totales .....	0,89
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,92
Porcentaje de fase vítrea ...	97,5

Tabla 3: Composición porcentual de los cementos y su identificación

Identificación	Composición		
	Clinker	Escoria	Yeso
400	96	-	4
470	67,2	28,8	4
440	38,4	57,6	4

Tabla 4: Resistencia a la compresión y grado de hidratación para temperatura de curado de 5 °C

Edad equiv. (20°C)	Tiempo de espera	Tiempo a T de curado	Grado de hidratación			Resistencia a compresión (MPa)		
			400	470	440	400	470	440
días	h	h						
3	4	271	0,20	0,18	0,14	27,9	15,9	10,4
	24	191	0,14	0,21	0,27	13,9	18,8	26,5
7	4	655	0,19	0,19	0,13	33,6	25,2	16,9
	24	575	0,10	0,24	0,18	13,4	26,1	25,2
14	4	1327	0,31	0,21	0,18	31,4	25,6	22,0
	24	1247	0,28	0,19	0,33	35,9	31,8	39,1
28	4	2671	0,26	0,24	0,20	34,9	26,1	26,1
	24	2591	-----	-----	-----	31,6	-----	36,8
56	4	5359	-----	-----	-----	38,6	22,6	38,3
	24	5279	0,32	0,22	0,23	35,3	44,8	40,2
3(28)	4	271	0,29	0,27	0,27	30,5	27,0	25,8
	24	191	0,29	0,19	0,16	33,3	32,3	31,2
3(360)	4	271	-----	-----	-----	40,3	49,3	49,5
	24	191	-----	-----	-----	39,6	33,7	47,8
7(360)	4	655	-----	-----	-----	38,0	43,5	52,4
	24	575	-----	-----	-----	41,5	35,7	48,0

Tabla 5: Resistencia a la compresión y grado de hidratación para temperatura de curado de 12 °C

Edad equiv. (20°C)	Tiempo de espera	Tiempo a T de curado	Grado de hidratación			Resistencia a compresión (MPa)		
			400	470	440	400	470	440
días	h	h						
3	4	113	0,20	0,14	0,37	18,9	14,0	7,7
	24	80	0,28	0,16	0,12	16,9	12,1	6,3
7	4	273	0,19	0,18	0,16	25,4	18,0	13,6
	24	240	0,21	0,18	0,12	25,5	23,1	20,3
14	4	553	0,29	0,20	0,17	35,3	23,7	20,0
	24	520	0,28	0,22	0,19	29,0	26,7	21,8
28	4	1113	----	----	----	28,8	29,1	26,5
	24	1080	0,40	0,27	0,20	32,0	33,5	34,6
56	4	2233	0,25	0,19	0,20	33,2	28,4	36,4
	24	2200	0,19	0,22	0,19	27,0	27,3	32,7
3(28)	4	113	0,28	----	0,19	28,7	31,2	22,3
	24	80	0,22	0,18	0,21	32,0	24,7	28,8
7(28)	4	273	----	----	----	29,0	25,3	20,4
	24	240	0,27	0,26	0,19	34,9	36,6	32,5
3(360)	4	113	----	----	----	39,5	45,1	47,3
	24	80	----	----	----	42,3	41,2	50,3
7(360)	4	273	----	---	----	41,7	40,7	53,9
	24	240	----	---	----	38,6	44,5	44,3

Tabla 6: Resistencia a la compresión y grado de hidratación para temperatura de curado de 20 °C

Edad equiv. (20°C)	Tiempo de espera	Tiempo a T de curado	Grado de hidratación			Resistencia a compresión (MPa)		
			400	470	440	400	470	440
días	h	h						
1	---	24	----	----	----	6,6	4,0	1,5
	---	24	----	----	----	7,6	4,8	1,7
2	---	48	----	----	----	12,9	8,9	3,9
3	---	72	0,21	0,10	0,14	20,9	12,3	8,8
7	---	168	0,14	0,12	0,08	25,1	18,7	12,6
14	---	336	0,28	0,17	0,14	28,6	28,3	18,9
28	---	672	0,30	0,30	----	30,7	32,9	36,8
49	---	1176	0,30	0,31	0,28	37,9	38,1	42,8
56	---	1344	0,24	----	0,32	39,4	----	42,8
360	---	8640	----	----	----	39,9	48,2	42,6

Tabla 7: Resistencia a la compresión y grado de hidratación para temperatura de curado de 33 °C

Edad equiv. (20°C)	Tiempo de espera	Tiempo a T de curado	Grado de hidratación			Resistencia a compresión (MPa)		
			400	470	440	400	470	440
días	h	h	400	470	440	400	470	440
1,7	24	10	----	----	----	9,9	7,3	2,9
2	24	14	----	----	----	13,6	9,2	4,8
2,4	24	20	----	----	----	15,9	11,9	5,6
3	4	38	0,20	0,17	0,16	22,2	17,3	11,0
	8	36	0,17	0,13	0,11	20,5	15,0	11,1
	24	27	0,20	0,19	0,12	25,1	17,0	11,5
7	4	88	0,21	0,17	0,21	27,7	22,8	25,0
	8	86	0,22	0,17	0,15	29,8	25,7	24,4
	24	78	0,21	0,20	0,22	24,9	27,2	25,4
14	4	176	0,24	0,24	0,22	28,9	20,1	26,1
	8	175	0,22	0,22	0,24	25,0	25,6	24,0
	24	166	0,28	0,31	0,26	27,9	26,6	28,0
28	4	354	0,18	0,26	0,33	34,9	31,1	36,0
	8	351	0,20	0,22	0,19	38,4	31,2	39,0
	24	343	0,23	0,17	0,26	36,1	31,4	36,9
56	4	707	0,27	0,32	0,29	29,8	38,8	41,3
	8	705	0,19	0,27	0,18	34,3	32,9	35,5
	24	697	0,25	0,26	0,21	30,6	29,0	35,3
3(28)	4	38	0,35	0,25	0,34	25,7	31,0	29,1
	24	27	0,22	0,16	----	32,4	33,0	25,4
7(28)	4	88	----	----	----	----	----	----
	24	78	0,21	0,20	0,18	31,1	33,1	36,6
3(360)	4	38	----	----	----	32,3	40,3	38,8
	24	27	----	----	----	34,0	48,0	52,8
7(360)	4	88	----	----	----	37,8	43,0	54,0
	24	78	----	----	----	39,3	49,6	44,7

Tabla 8: Resistencia a la compresión y grado de hidratación para temperatura de curado de 55 °C

Edad equiv. (20°C)	Tiempo de espera	Tiempo a T de curado	Grado de hidratación			Resistencia a Compresión (MPa)		
			400	470	440	400	470	440
1,7	24	6	-----	-----	-----	15,7	12,2	5,8
2,1	24	10	-----	-----	-----	15,7	15,2	8,5
2,6	24	14	-----	-----	-----	19,3	17,1	11,8
3	4	26	0,24	0,26	0,19	21,2	19,4	18,8
	8	24	0,16	0,22	0,20	22,1	20,6	18,9
	24	18	0,20	0,18	0,18	19,1	19,6	19,1
7	4	62	0,25	0,17	0,29	19,6	18,2	19,0
	8	59	0,21	0,21	0,24	22,5	23,3	25,4
	24	53	0,24	0,28	0,24	25,4	23,7	22,2
14	4	123	0,29	0,19	0,26	19,9	23,7	22,7
	8	120	0,19	0,18	0,17	23,7	24,1	28,5
	24	114	0,22	0,23	0,19	23,9	27,6	29,4
28	4	245	0,28	0,17	0,30	24,4	20,4	23,0
	8	242	0,31	0,24	0,24	21,6	19,9	13,5*
	24	237	0,27	0,21	0,23	27,5	35,4	33,0
56	4	489	0,32	0,18	-----	20,9	17,5	21,9
	8	487	0,27	0,27	0,21	14,3	16,2	21,4
	24	481	0,32	0,27	0,14	26,0	36,1	29,5
3(28)	4	26	0,21	0,28	0,22	19,3	20,2	22,0
	24	18	0,25	0,24	0,21	28,9	26,9	26,8
7(28)	4	62	0,22	0,26	0,24	24,4	24,5	26,1
	24	54	0,25	0,26	0,19	20,3	18,3	24,7
3(360)	4	26	-----	-----	-----	18,7	27,2	30,8
	24	18	-----	-----	-----	28,1	26,8	25,0
7(360)	4	62	-----	-----	-----	30,8	31,3	32,8
	24	53	-----	-----	-----	32,4	33,5	29,5

\* Valor no consistente

Tabla 9: Resistencia a la compresión y grado de hidratación para temperatura de curado de 80 °C

Edad equiv. (20°C)	Tiempo de espera	Tiempo a T de curado	Grado de hidratación			Resistencia a compresión (MPa)		
			400	470	440	400	470	440
1,7	24	4	-----	-----	-----	17,8	16,5	9,9
2	24	6	-----	-----	-----	16,9	16,4	9,7
2,7	24	10	-----	-----	-----	16,2	19,0	15,0
3	4	19	0,22	-----	0,17	21,8	16,8	24,5
	8	18	0,22	0,18	0,14	21,6	17,9	22,0
	24	14	0,16	0,17	0,14	15,8	16,6	15,6
7	4	43	0,20	0,23	0,16	15,3	13,7	14,7
	8	42	0,14	0,15	0,19	19,2	21,6	27,9
	24	38	0,20	0,16	0,21	22,2	22,6	26,7
14	4	85	0,22	0,47	0,18	21,7	22,0	23,2
	8	84	0,18	0,17	0,18	23,3	24,3	29,1
	24	80	0,23	0,24	0,21	20,8	20,7	25,2
28	4	169	0,19	0,18	0,14	17,7	21,3	17,7
	8	168	0,28	0,28	-----	27,5	23,0	29,1
	24	164	0,23	0,23	0,19	24,1	26,1	29,2
56	4	337	0,22	0,18	0,17	19,8	17,6	20,3
	8	336	0,21	0,20	0,18	16,7	23,0	33,0
	24	332	0,22	0,19	0,18	26,2	26,3	29,2
3(28)	4	19	0,21	0,21	0,18	21,2	17,0	22,2
	24	14	-----	-----	-----	23,2	26,7	20,0
7(28)	4	43	-----	-----	-----	19,4	21,6	23,4
	24	38	0,20	0,22	-----	24,7	26,5	26,6
3(360)	4	19	-----	-----	-----	32,4	44,7	32,2
	24	14	-----	-----	-----	34,1	39,3	45,1
7(360)	4	43	-----	-----	-----	18,1	33,6	31,1
	24	38	-----	-----	-----	21,3	39,8	33,0

Tabla 10: Valores de los parámetros  $R_u$ ,  $k(T)$  y  $t_0$  para los distintos cementos y temperatura de curado

Temp. de Curado ( $^{\circ}\text{C}$ )		5	12	20	33	55	80
4 0 0	$R_u(\text{MPa})$	38,0	34,7	44,6*	31,8	27,6	26,1
	$kt.0,001 (1/h)$	2,4	11,1	14,1	53,7	236,3*	15,8
	$t_0 (h)$	300,8	38,1	12,2	7,3	5,5	3,6
4 7 0	$R_u (\text{MPa})$	47,7	41,4	38,9	38,3	37,7	27,2
	$kt.0,001 (1/h)$	2,99	3,9	9,3	22,0	49,8	147,6
	$t_0 (h)$	291,1	58,4	13,2	9,6	1,0	2,6*
4 4 0	$R_u (\text{MPa})$	43,8	39,1	55,9*	39,9	33,3	31,8
	$kt.0,001 (1/h)$	2,1	7,5	2,9*	25,3	67,9	147,2
	$t_0 (h)$	9,8*	83,0	14,9	12,0	4,0	4,2

\* Valores no consistentes

Tabla 11: Errores estimados de los valores  $1/R_u$  y  $k$  calculados

Temperatura de Curado ( $^{\circ}\text{C}$ )		5 %	12 %	20 %	33 %	55 %	80 %
400	$E (1/R_u)$	1,5	1,3	1,0	0,2	4,2	3,2
	$E [k(t)]$	7,9	3,3	4,7	3,3	7,7	7,3
470	$E (1/R_u)$	6,7	2,8	2,7	1,2	5,4	1,0
	$E [k(t)]$	5,6	4,7	2,4	0,5	1,7	3,0
440	$E (1/R_u)$	0,4	9,3	5,6	6,4	4,9	3,6
	$E [k(t)]$	1,8	2,7	2,1	2,0	2,9	7,9

Tabla 11 Cont. : Edades para las cuales se determinó 1/Ru y k (T)

Mezcla	Temp. (°C)	Edades (1/Ru) días	Edades [k(T)] días
400	5	3; 28; 56	3; 28; 56
	12	7; 14; 28	3; 7; 14; 28
	20	14; 28; 56	3; 2; 1
	33	7; 14; 56	1,7; 2; 2,4
	55	3; 7; 14; 28; 56	1,7; 2,1; 2,6; 3; 7
	80	7; 28; 56	2,7; 3; 7
470	5	7; 14; 56	3; 7; 14; 56
	12	3; 14; 28	3; 14; 28
	20	7; 14; 28	1; 2; 3; 7
	33	3; 7; 28	1,7; 2; 2,4
	55	7; 14; 56	1,7; 2,1; 2,6; 3
	80	7; 28; 56	2; 3; 7; 28
400	5	7; 28; 56	7; 28; 56
	12	7; 28; 56	3; 7; 28
	20	14; 28; 56	1; 2; 3; 7; 14
	33	7; 28; 56	1,7; 2; 3
	55	3; 14; 28; 56	1,7; 2,1; 2,6; 3; 14
	80	14; 28; 56	1,7; 2,7; 3; 7

Tabla 12: Energía de activación, kJ/mol entre 5 y 80 °C para los distintos cementos

Cemento	Ea	E%
400	45,8	1,7
470	42,9	0,5
440	46,6	1,4

Tabla 13: Resistencias relativas de probetas curadas a distintas temperaturas, a la edad equivalente de 3 días, con respecto al curado normal a la misma edad.

Temperatura (°C)	Tiempo de espera (h)	Resistencias Relativas		
		400	470	440
5	4	133,5	129,3	118,2
	24	66,5	152,8	301,1
12	4	90,4	113,8	87,5
	24	80,9	98,4	71,6
20	-	100	100	100
33	4	106,2	140,6	125,0
	8	98,1	121,9	126,1
	24	120,1	138,2	130,7
55	4	101,4	157,7	213,6
	8	105,7	167,5	214,8
	24	91,4	159,3	217,0
80	4	104,3	136,6	278,4
	8	103,3	145,5	250,0
	24	75,6	135,0	177,3

Tabla 14: Resistencias relativas de probetas curadas a distintas temperaturas, a la edad equivalente de 7 días, con respecto al curado normal a la misma edad.

Temperatura (°C)	Tiempo de espera (h)	Resistencias Relativas		
		400	470	440
5	4	133,9	134,8	134,1
	24	53,4	139,6	200
12	4	101,2	96,2	107,9
	24	101,6	123,5	161,1
20	-	100	100	100
33	4	110,4	121,9	198,4
	8	118,7	137,4	193,6
	24	92,2	145,4	201,6
55	4	78,1	97,3	150,8
	8	89,6	124,1	201,6
	24	101,2	126,7	176,2
80	4	61,0	73,3	116,7
	8	76,5	115,5	221,4
	24	88,4	120,9	211,9

Tabla 15: Resistencias relativas de probetas curadas a distintas temperaturas, a la edad equivalente de 14 días, con respecto al curado normal a la misma edad.

Temperatura (°C)	Tiempo de espera (h)	Resistencias Relativas		
		400	470	440
5	4	109,8	90,5	116,4
	24	125,5	112,4	206,9
12	4	123,4	83,7	105,8
	24	101,4	94,3	115,3
20	-	100,0	100,0	100,0
33	4	101,0	71,0	138,1
	8	87,4	90,5	127,0
	24	97,5	94,0	148,1
55	4	69,2	83,7	120,1
	8	82,9	85,2	150,8
	24	83,6	97,5	155,5
80	4	75,9	77,7	122,7
	8	81,5	85,9	154,0
	24	72,7	73,1	133,3

Tabla 16: Resistencias relativas de probetas curadas a distintas temperaturas, a la edad equivalente de 28 días, con respecto al curado normal a la misma edad.

Temperatura (°C)	Tiempo de espera (h)	Resistencias Relativas		
		400	470	440
5	4	113,7	79,3	70,9
	24	102,9	-	100,0
12	4	93,8	88,4	72,0
	24	104,2	101,8	94,0
20	-	100,0	100,0	100,0
33	4	113,7	94,5	97,8
	8	125,1	94,8	106,0
	24	117,6	95,4	100,3
55	4	79,5	62,0	64,1
	8	70,3	60,5	36,7
	24	89,6	107,6	89,7
80	4	57,6	64,7	48,1
	8	89,6	69,9	79,1
	24	78,5	79,3	79,3

Tabla 17: Resistencia absoluta a la compresión de probetas curadas a las edades equivalentes de 3 y 7 días a las temperaturas T y curado normal hasta completar 28 y 360 días.

T (°C)	Edad equiv	Tiempo de espera	Resist.a 28 d(MPa)			Resist.a 360 d(MPa)		
			400	470	440	400	470	440
5	3	4	30,5	27,0	25,8	40,3	49,3	49,5
		24	33,3	32,3	31,2	39,6	33,7	47,8
	7	4	----	----	----	38,0	43,5	52,4
		24	----	----	----	41,5	35,7	48,0
12	3	4	28,7	31,2	22,3	39,5	45,1	47,3
		24	32,0	24,7	28,8	42,3	41,2	50,3
	7	4	29,0	25,2	20,4	41,7	40,7	53,9
		24	34,9	36,5	32,5	38,6	44,5	44,3
20	28	--	30,7	32,9	36,8	----	----	----
33	3	4	25,7	31,0	29,1	32,3	40,3	38,8
		24	32,4	33,0	25,4	34,0	48,0	52,8
	7	4	----	----	----	37,8	43,0	54,0
		24	31,1	33,1	36,6	39,3	49,6	44,7
55	3	4	19,3	20,2	22,0	18,7	27,2	30,8
		24	28,9	26,9	26,8	28,1	26,8	25,0
	7	4	24,4	24,5	26,	30,8	31,3	32,8
		24	20,3	18,3	24,7	32,4	33,5	29,5
80	3	4	21,2	17,0	22,2	32,4	44,7	32,2
		24	23,2	26,7	20,0	34,1	39,3	45,1
	7	4	19,4	21,6	23,4	18,1	33,6	31,1
		24	24,7	25,5	26,6	21,3	39,8	33,0

Tabla 18: Resistencia relativa a la compresión de probetas curadas a las edades equivalentes de 3 y 7 días a las temperaturas T y curado normal hasta completar 28 y 360 días.

T (°C)	Edad equiv	Tiempo de espera	Resist.a 28 d(MPa)			Resist.a 360 d(MPa)		
			400	470	440	400	470	440
5	3	4	99,3	82,2	70,0	101,0	102,3	116,2
		24	108,5	98,3	84,8	99,2	69,9	112,2
	7	4	---	----	----	95,2	90,6	123,0
		24	----	----	----	103,2	74,1	112,7
12	3	4	93,5	94,9	60,5	99,0	93,6	111,0
		24	104,2	75,2	78,1	106,0	85,5	118,1
	7	4	24,3	76,8	55,3	104,5	84,4	126,5
		24	113,7	111,2	88,3	96,7	92,3	104,0
20	28	--	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
33	3	4	83,6	94,4	78,9	80,9	83,6	91,1
		24	105,5	100,3	68,8	65,2	99,6	123,9
	7	4	----	----	----	94,7	89,2	126,8
		24	101,4	100,6	99,3	98,5	102,9	104,9
55	3	4	62,9	61,3	59,7	46,9	56,4	72,3
		24	94,0	81,7	72,9	70,4	55,6	58,7
	7	4	79,6	74,4	70,8	77,2	64,9	77,0
		24	66,2	55,6	67,1	81,2	69,5	69,2
80	3	4	69,0	51,8	60,1	81,2	92,7	75,6
		24	75,4	81,3	54,4	85,5	81,5	105,9
	7	4	63,3	65,6	63,6	45,4	69,7	73,0
		24	80,5	80,6	72,2	53,4	82,6	77,5

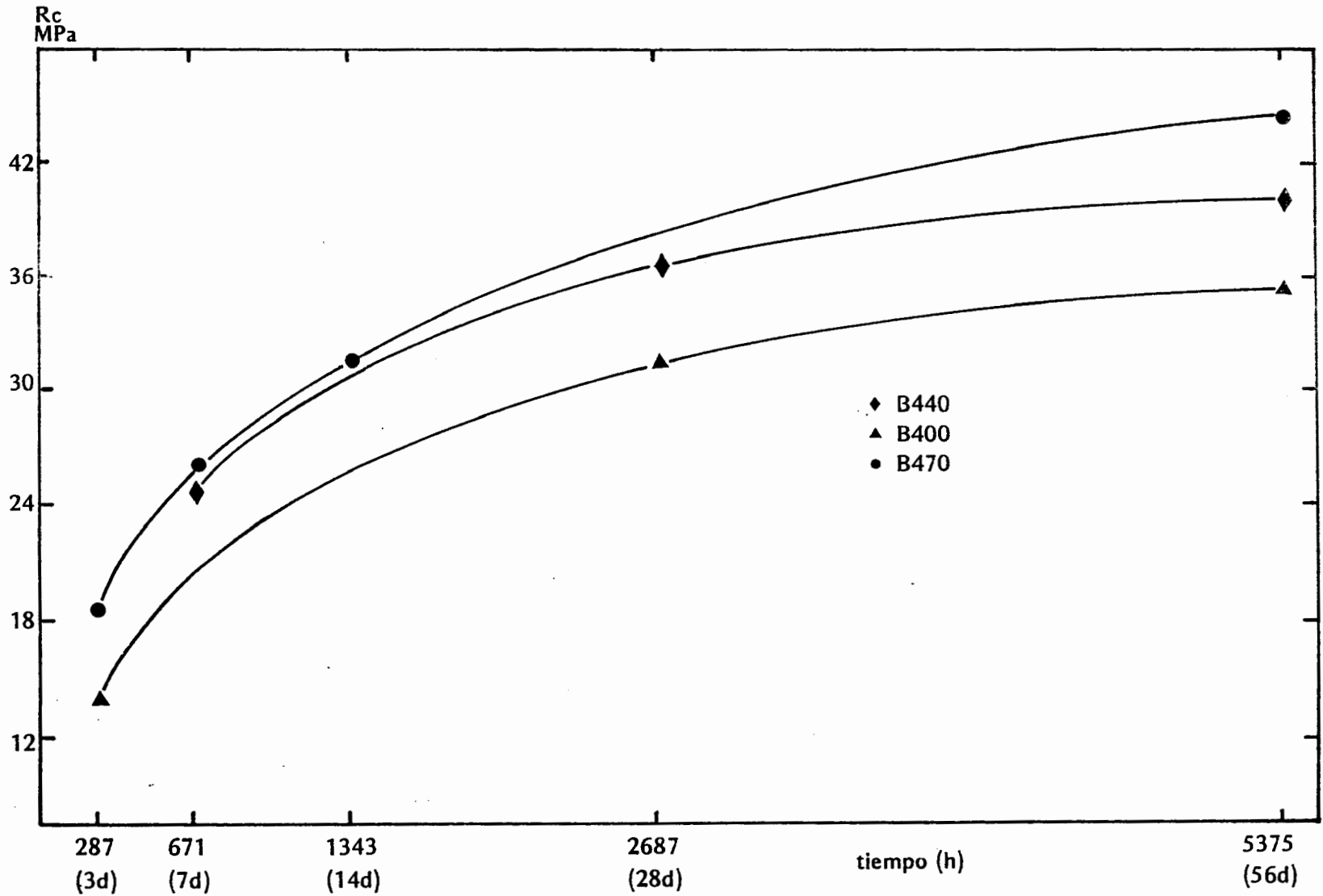


Fig. 1: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 5 °C.

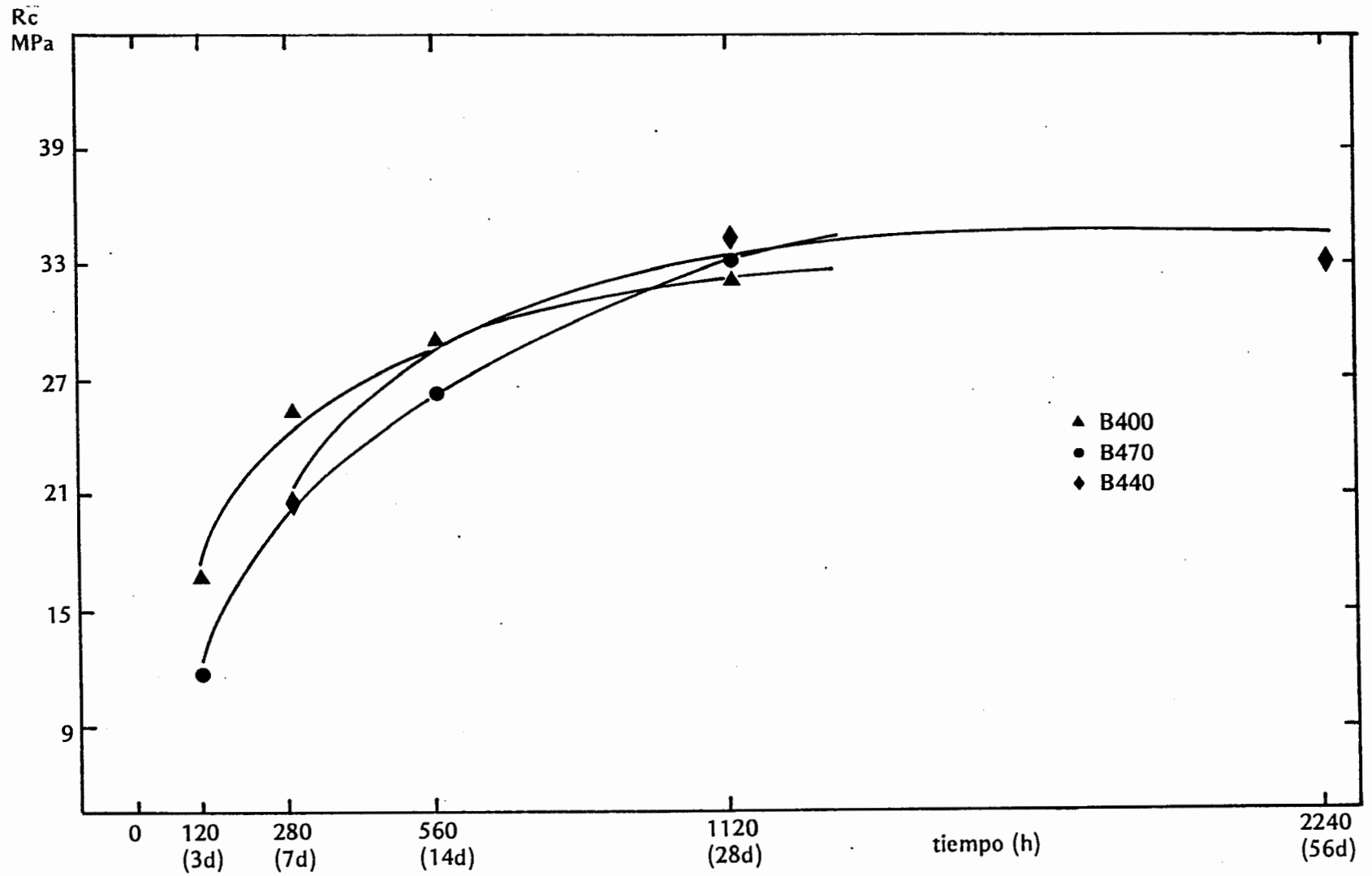


Fig. 2: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 12 °C.

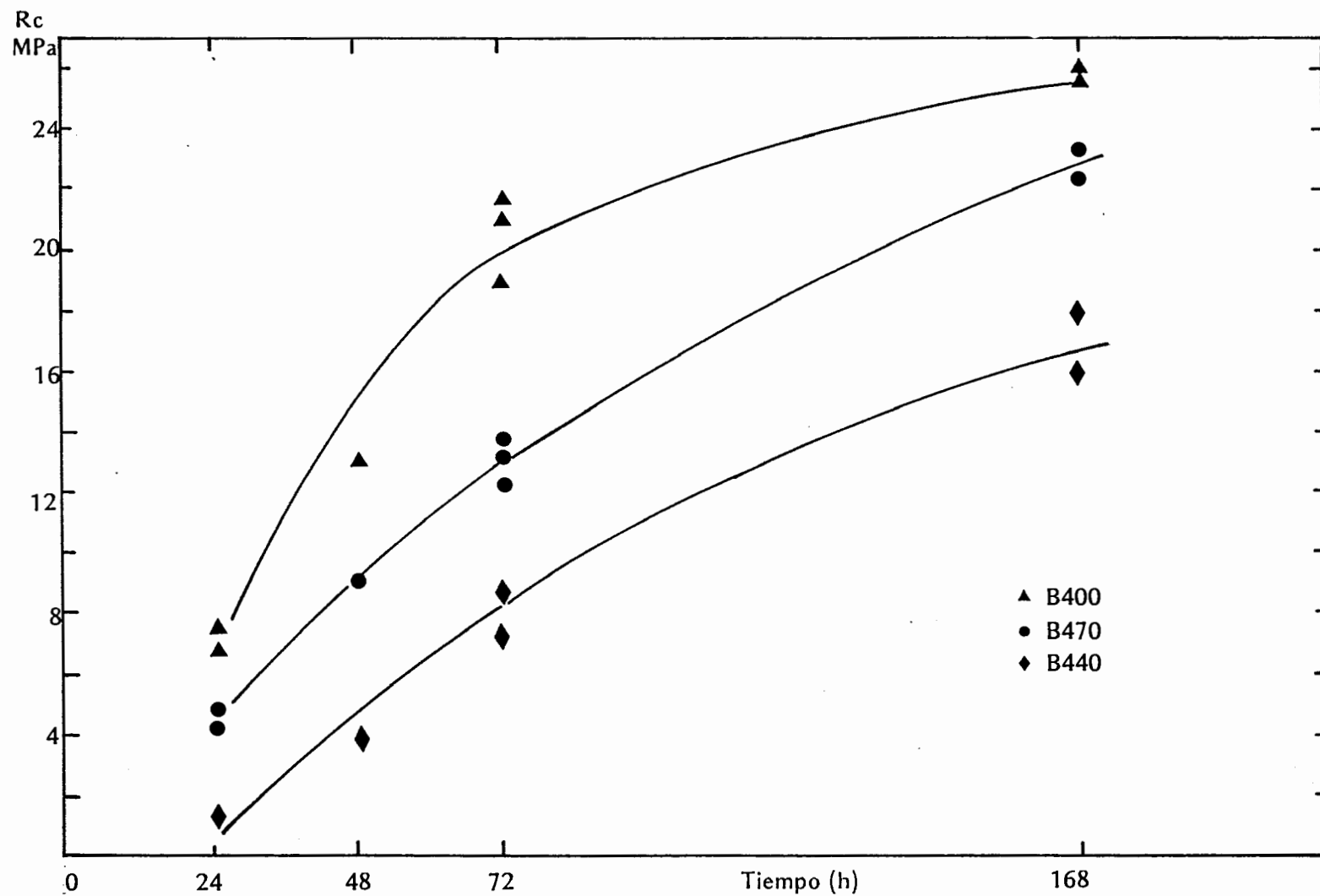


Fig. 3: Resistencia a la compresión en u función del tiempo de curado, temperatura de curado de 20 °C - Corta edad.

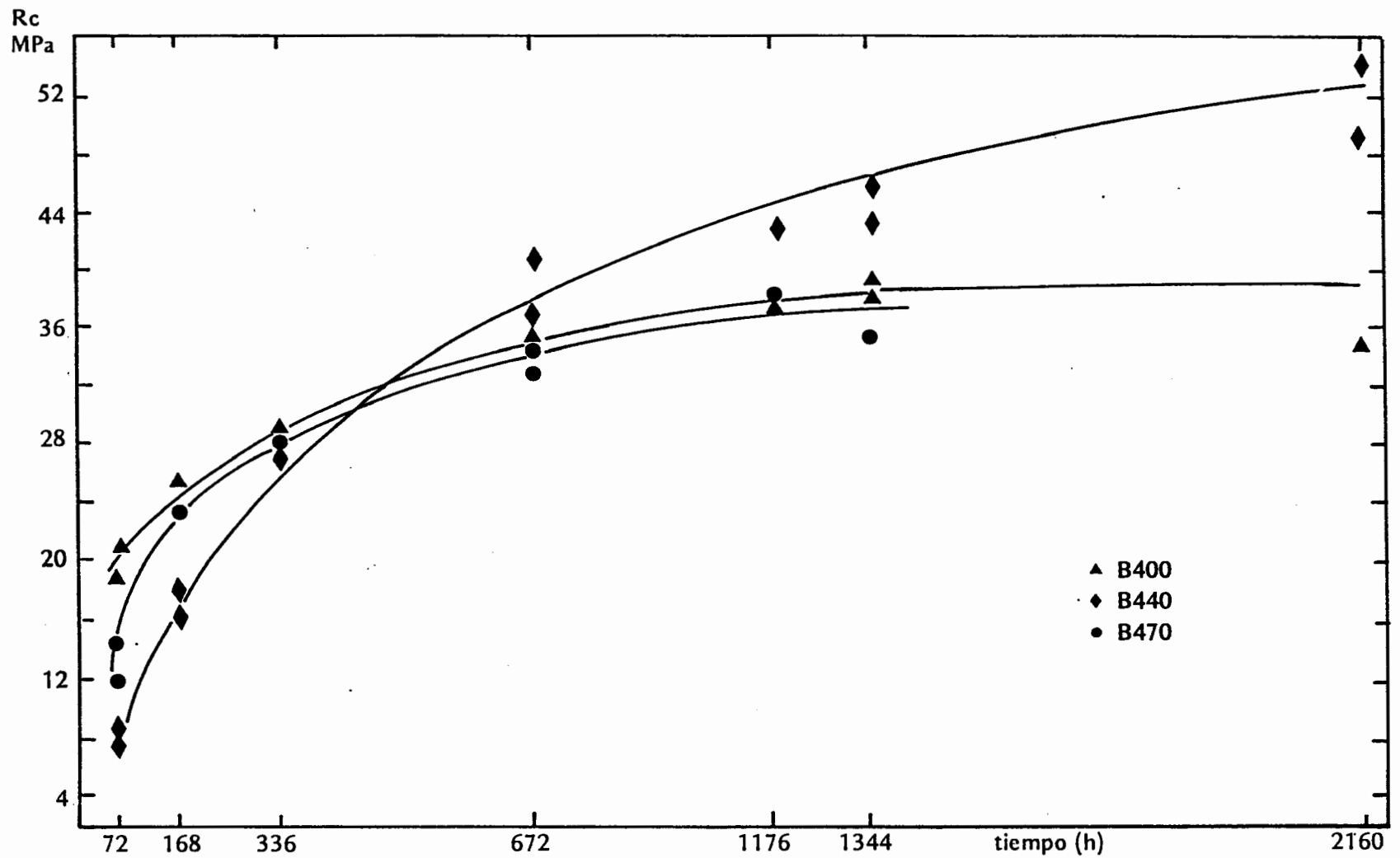


Fig. 4: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, temperatura de curado de 20 °C.

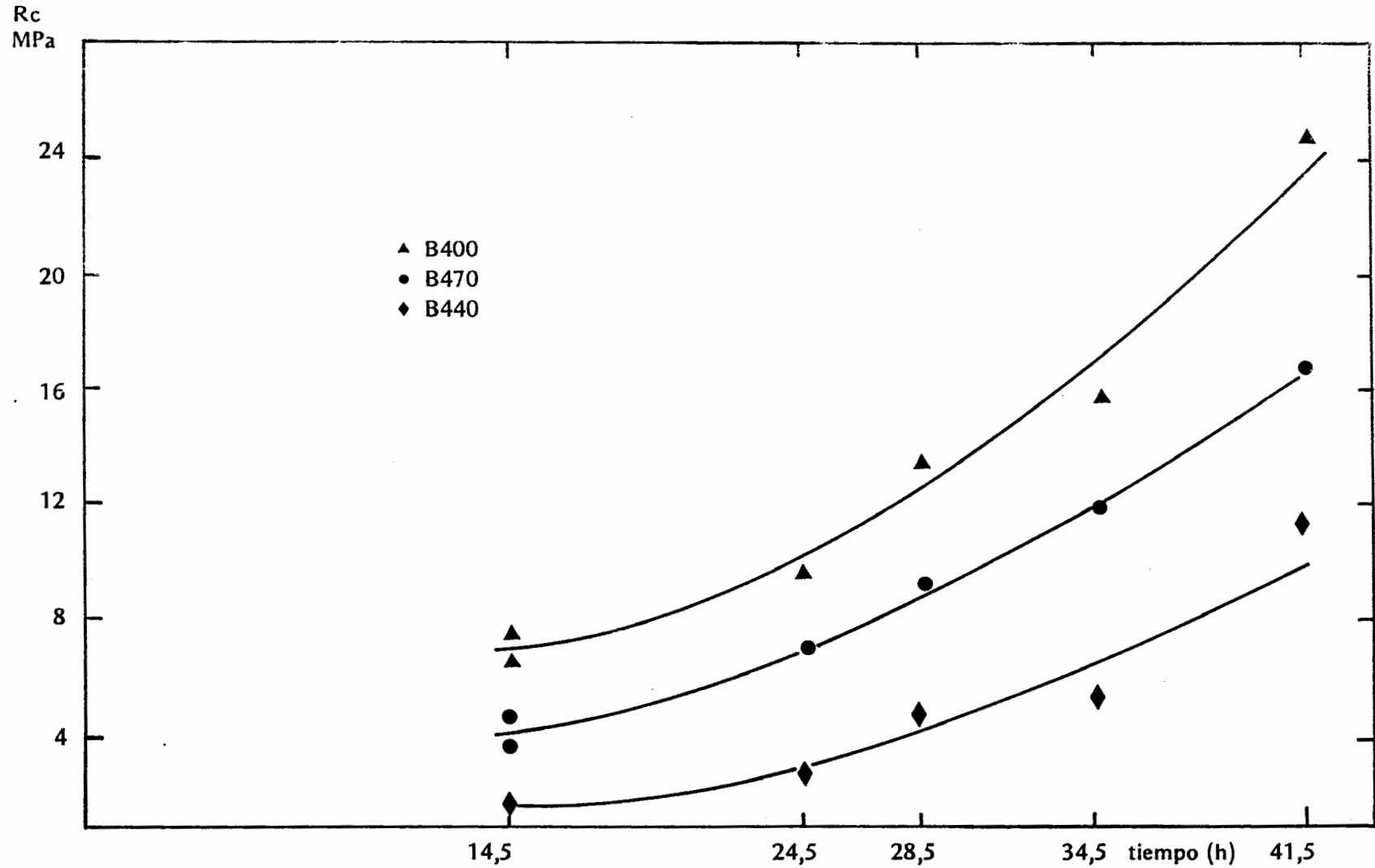


Fig. 5: Resistencia a la compresión en función del tiempo e de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 33 °C - Corta edad.

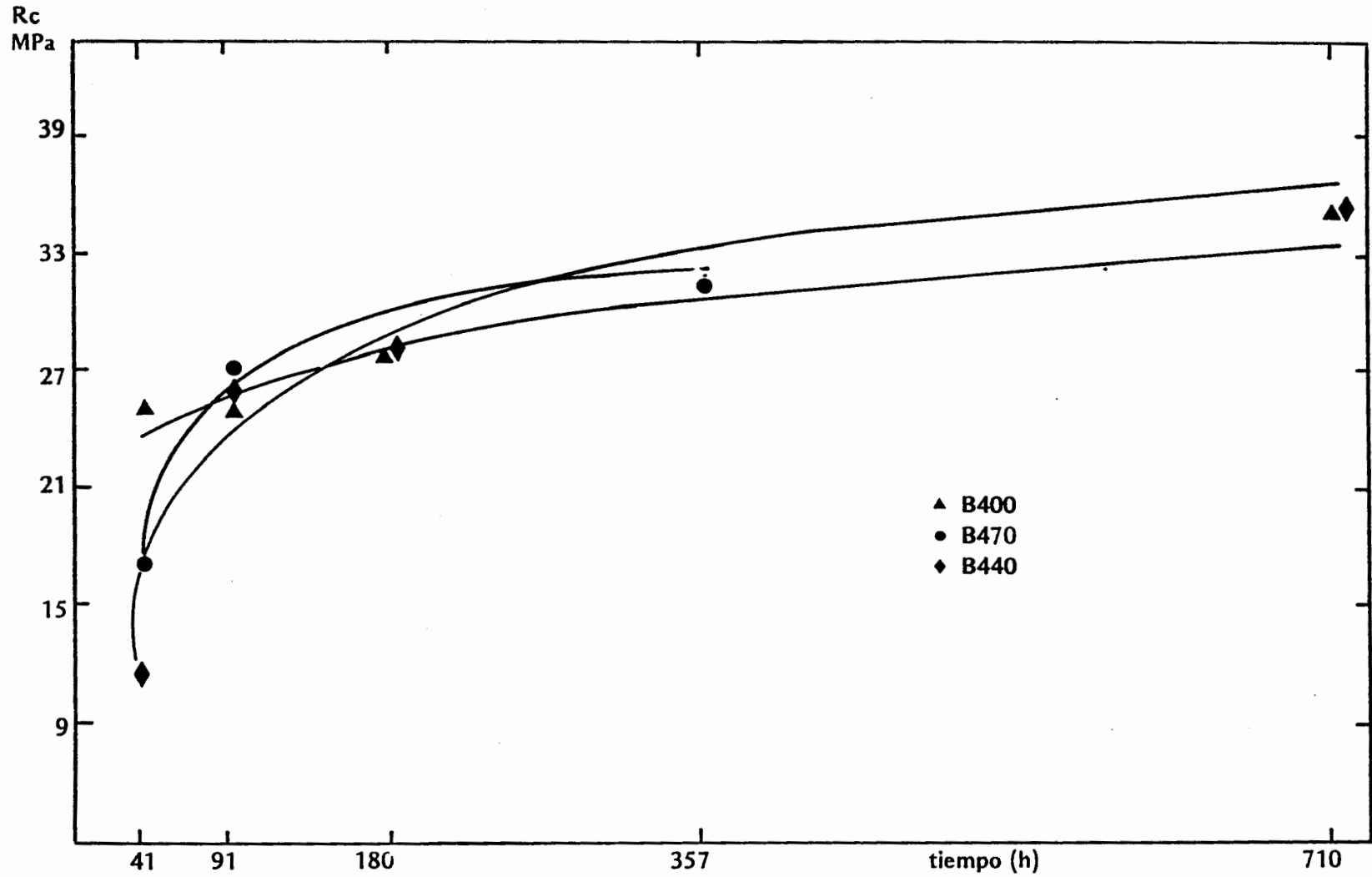


Fig. 6: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 33 °C.

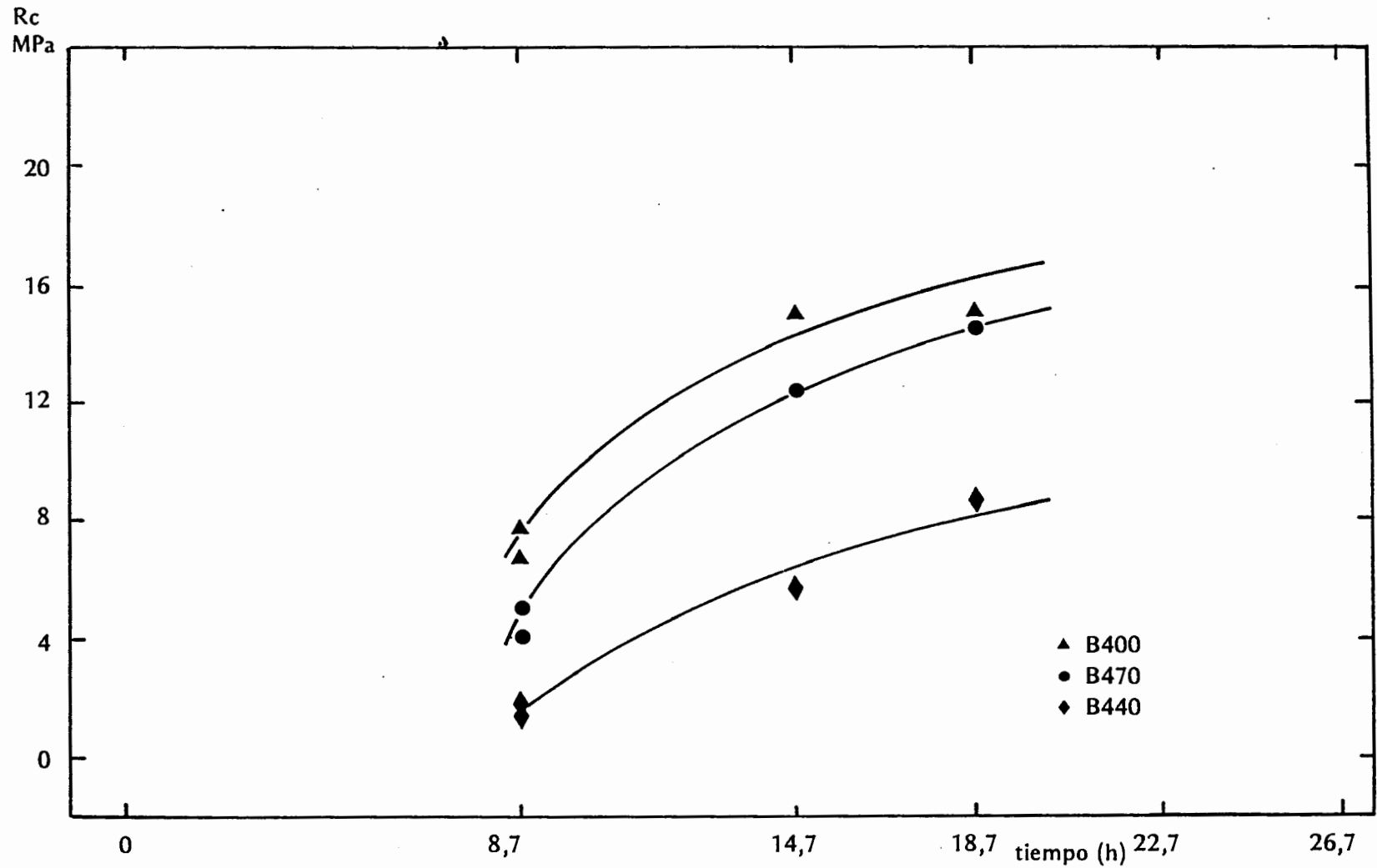


Fig. 7: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 b y temperatura de curado de 55 °C - Corta edad.

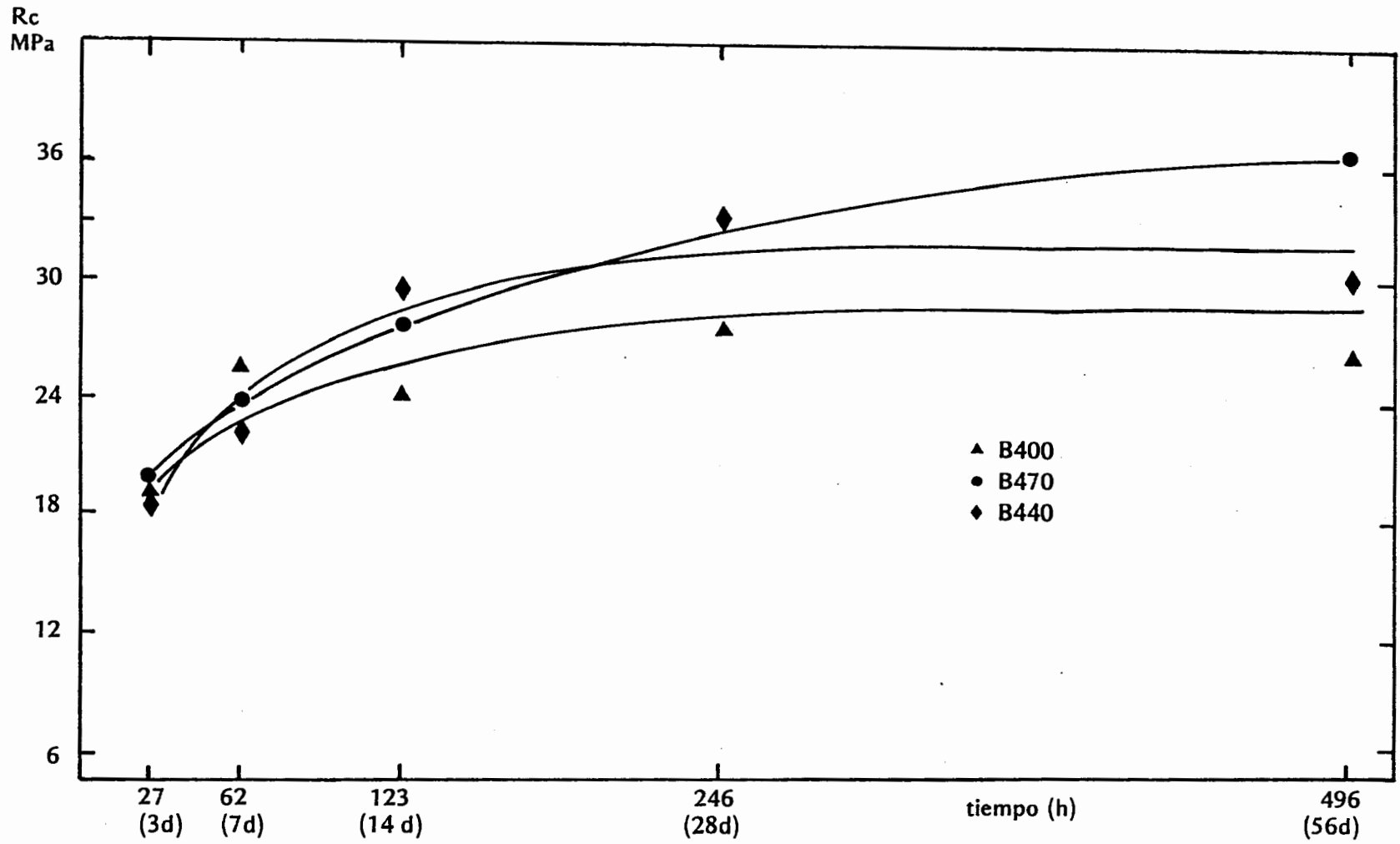


Fig. 8: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 55 °C.

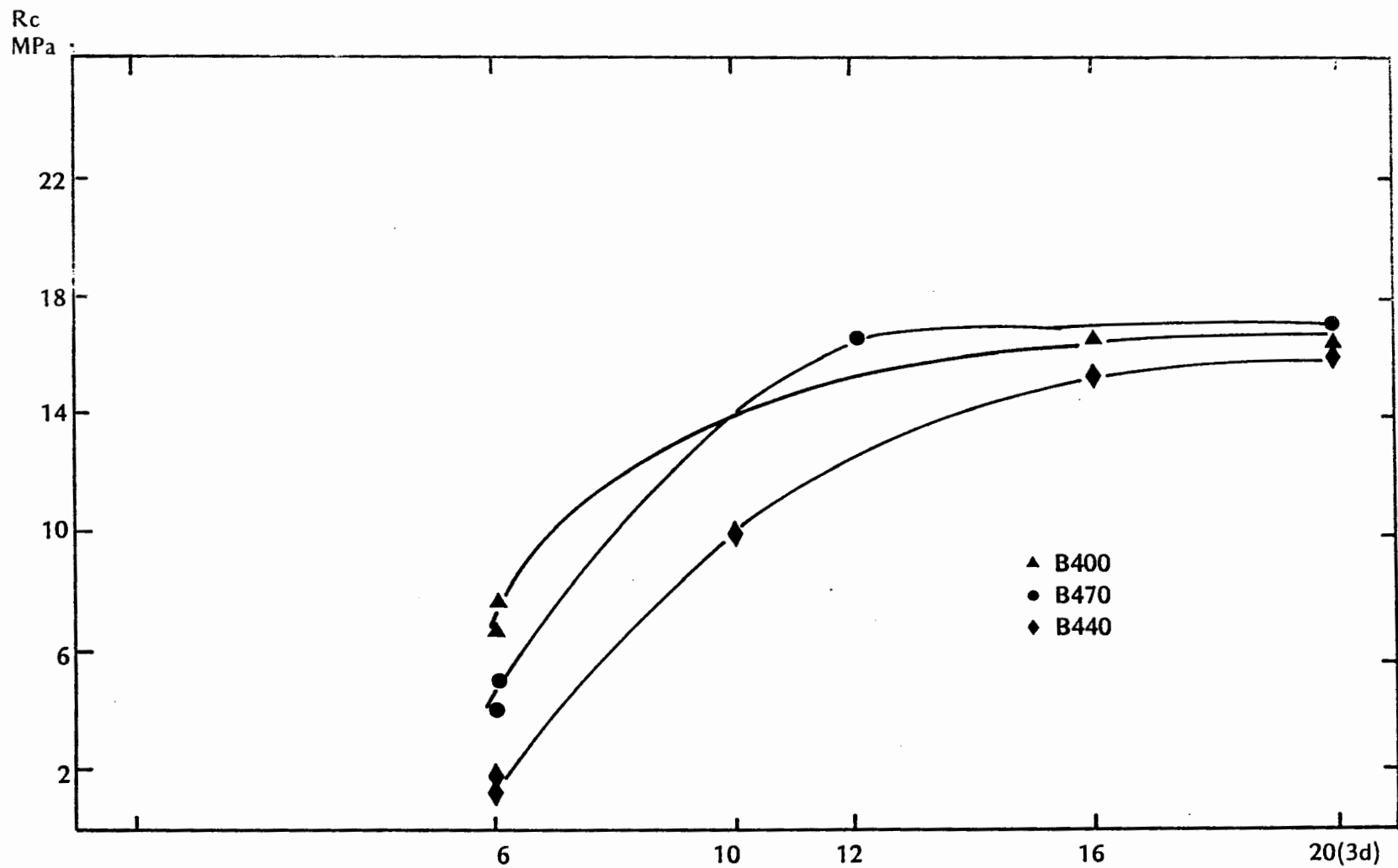


Fig. 9: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 80 °C - Corta edad.

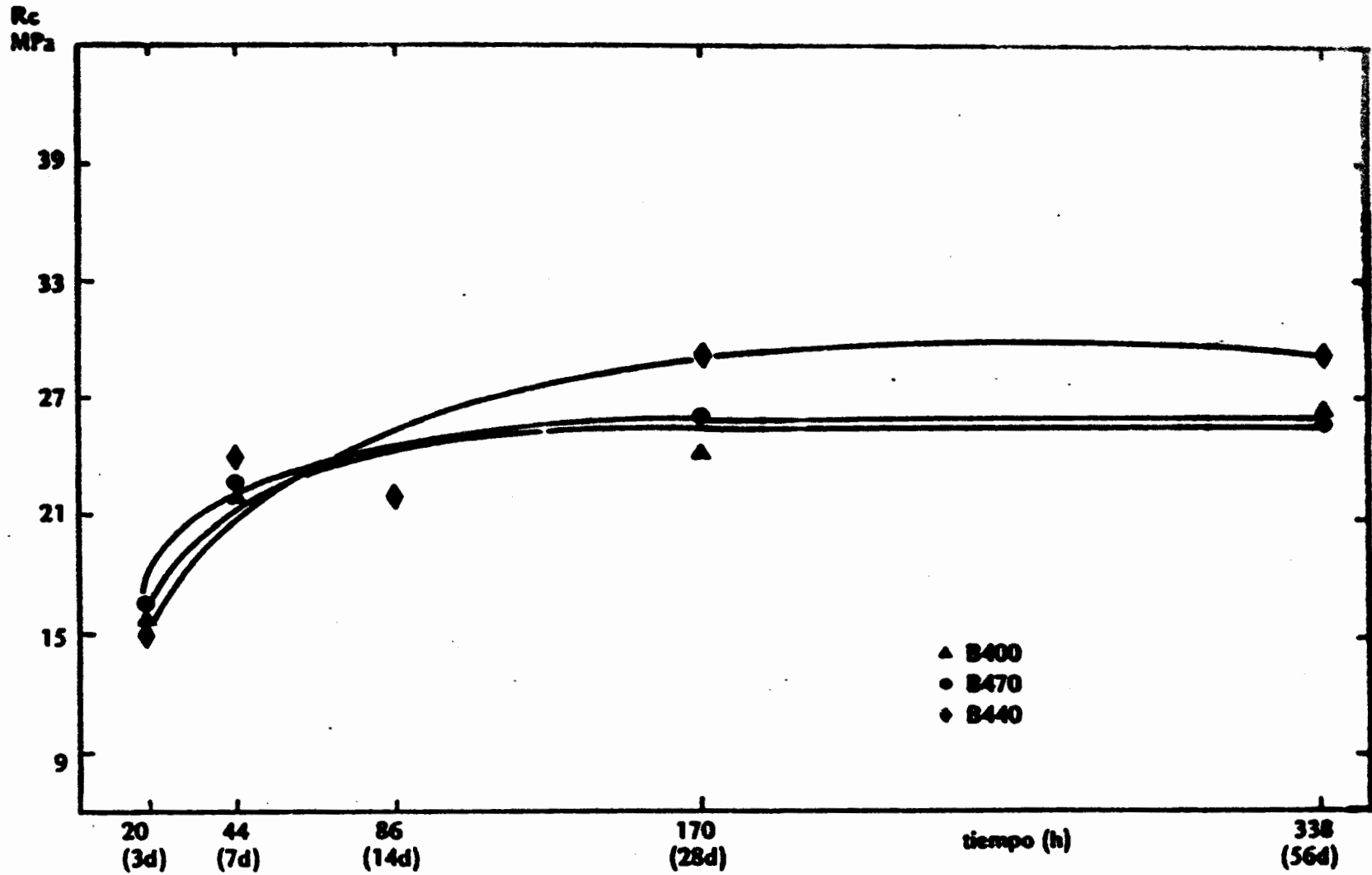


Fig. 10: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 80 °C.

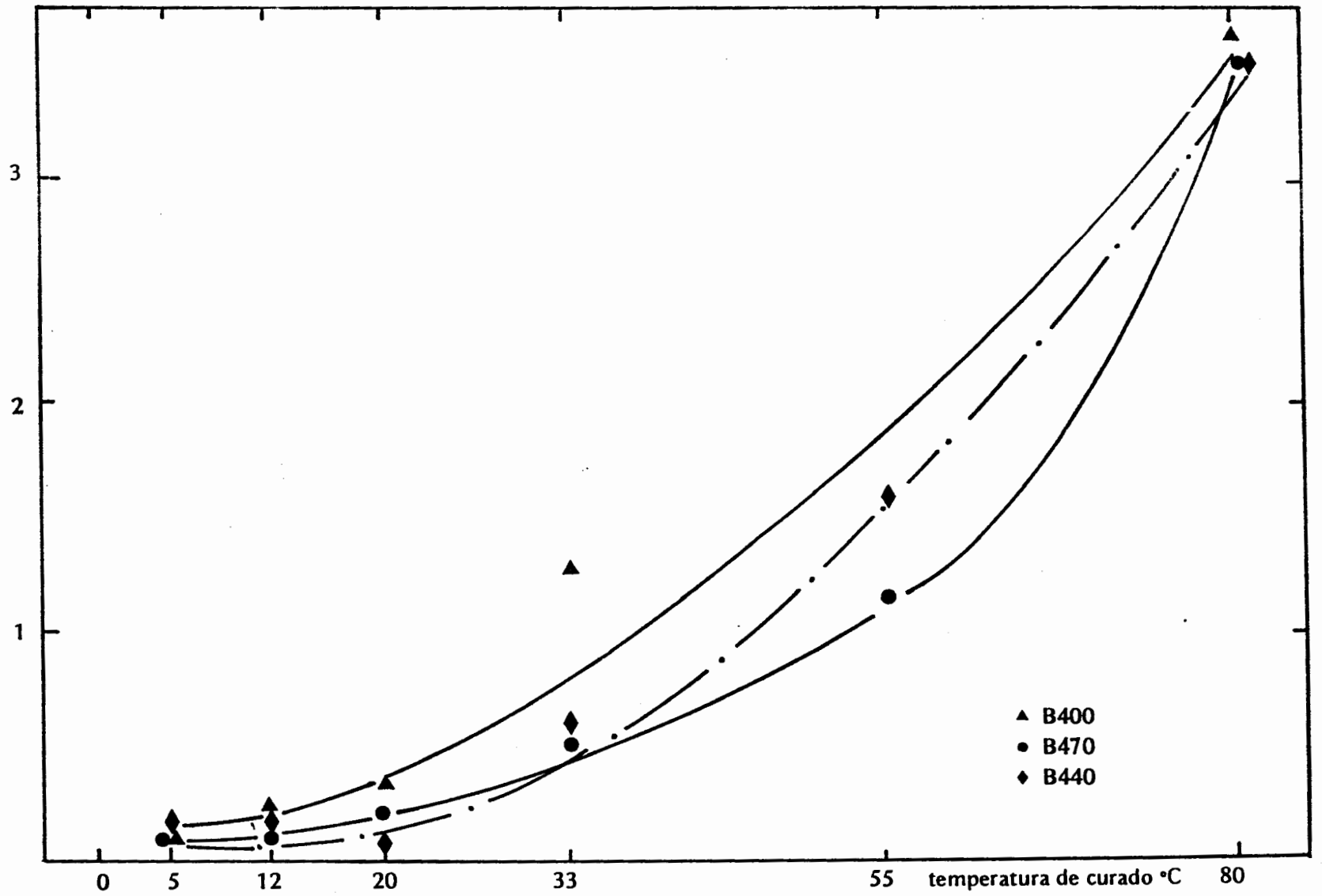


Fig. 11:  $k(T)$  en función de la temperatura de curado (°C)

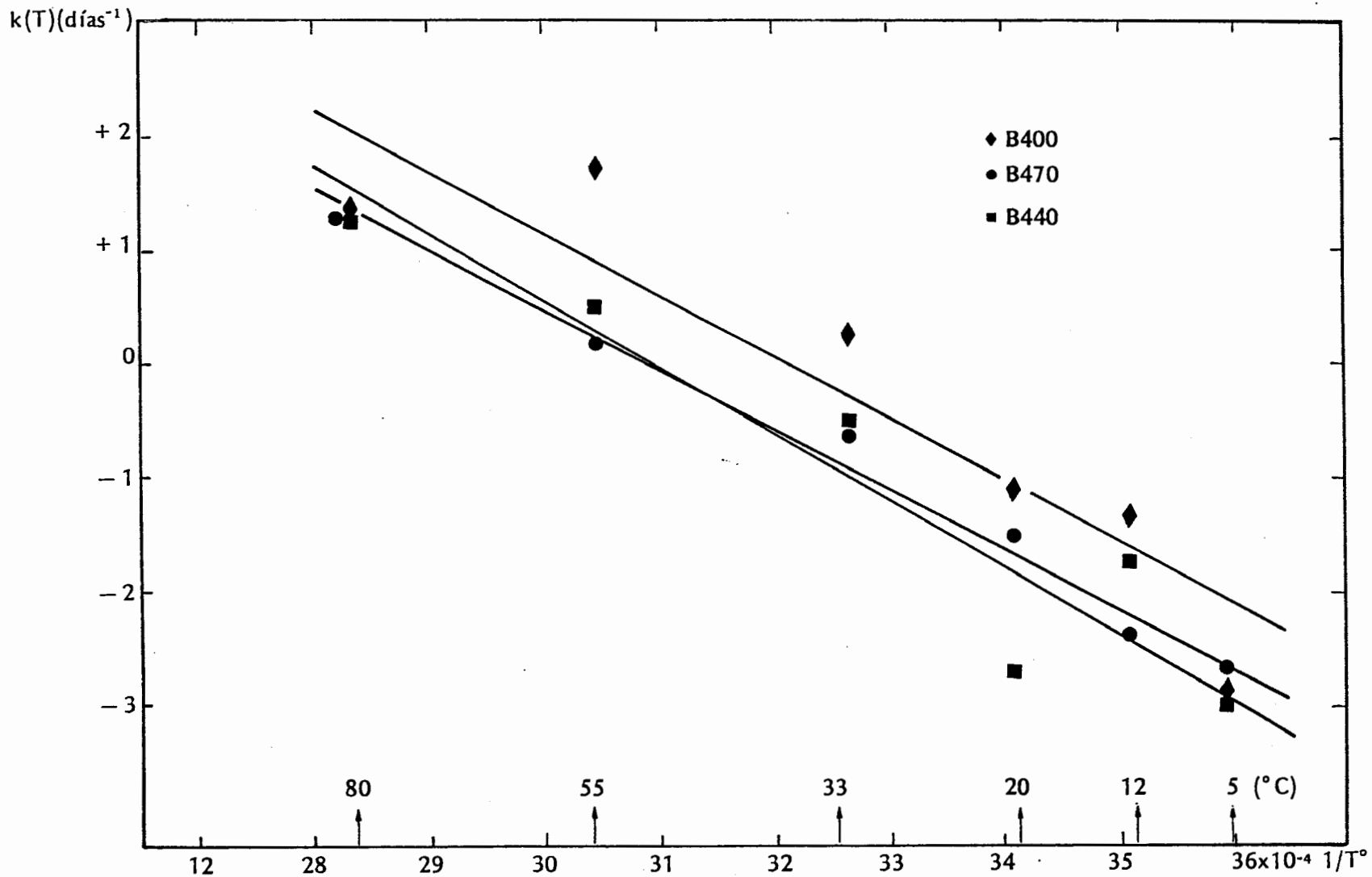


Fig. 12: Logaritmo natural de  $k(T)$  en función de la inversa de a la temperatura absoluta.

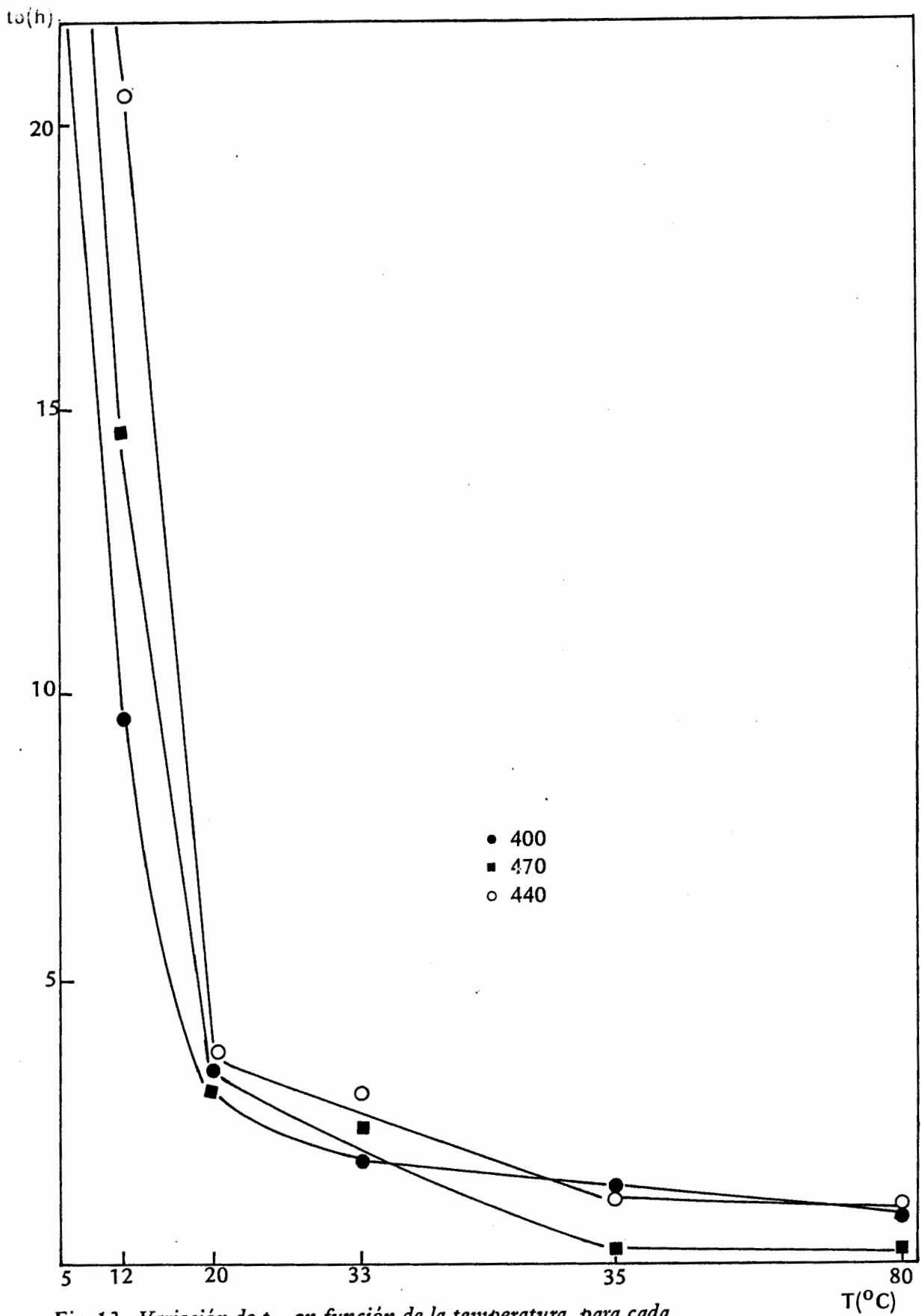


Fig. 13: Variación de  $t_0$  en función de la temperatura, para cada uno de los cementos estudiados.



EVALUACION DE LA ESCORIA PRODUCIDA POR EL  
ESTABLECIMIENTO ALTOS HORNOS ZAPLA

RESUMEN

Este estudio se encaró considerando el posible empleo de las escorias producidas en Altos Hornos Zapla como material potencialmente hidráulico.

Los objetivos fijados fueron: caracterizar el material, evaluar su capacidad hidráulica, analizar sus diferencias con una escoria "estandar" y determinar las ventajas que podría significar la optimización de la operación de granulación con la instalación de un equipo especial, caja de granulación, ("blowing box"), cedido por el CIID (Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo - Canadá).

Los resultados obtenidos muestran que esta escoria, molida a una finura adecuada y en presencia de cemento portland normal, desarrolla propiedades hidráulicas, aunque en forma más lenta que otras escorias.

En base a los resultados obtenidos y a las observaciones realizadas en la planta, se efectúan una serie de recomendaciones que posibilitarían el aprovechamiento comercial de esta escoria en remplazo parcial de cemento portland normal.

## ESCORIA DE ALTOS HORNOS ZAPLA

### 1. INTRODUCCION

La primer planta siderúrgica integrada instalada en Argentina fue Establecimientos Altos Hornos Zapla, el que comenzó su producción de arrabio en octubre de 1945. Al primer alto horno se le sumaron otros, de mayor capacidad, encontrándose al presente solamente en funcionamiento el más reciente de ellos, el alto horno N<sup>o</sup> 5.

La escoria de este alto horno es muy particular, ya que en su composición química presenta un contenido alto de SiO<sub>2</sub> y bajo de CaO, respecto a las escorias destinadas a la fabricación de cemento de escoria o siderúrgico. Esta composición química está relacionada con la circunstancia de utilizar mineral de hierro de baja ley, es decir, alto contenido de SiO<sub>2</sub> y carbón vegetal en lugar de coke, trabajando a temperaturas relativamente bajas. En los últimos años, el mineral empleado fue gradualmente remplazado por otro de ley más alta, llevando consecuentemente a una reducción de la masa de escoria por unidad de arrabio producida y a un cambio en la composición química.

En este trabajo se consideran las escorias producidas "regularmente" por AHZ, la escoria producida por la caja de granulación y una escoria granulada molida obtenida en un molino industrial en la planta de AHZ.

### 2. EVALUACION PRELIMINAR

Este estudio se inicia con la evaluación de la escoria producida y granulada "regularmente" por el alto horno N<sup>o</sup> 5 del Establecimiento Altos Hornos Zapla. Como activante se emplea un clínker producido por una empresa cementera en las cercanías de la planta siderúrgica.

Esta evaluación tiene el carácter de preliminar y de referencia a una definitiva a realizar una vez instalada la caja de granulación y superados algunos problemas operativos.

Los objetivos principales fueron analizar la uniformidad de la escoria producida en distintas coladas y la constancia en la composición química, detectar diferencias entre los dos canales de granulación y evaluar el porcentaje de fase vítrea y las propiedades potencialmente hidráulicas de una muestra representativa de la escoria producida.

## 2.1. Toma de muestras

A fines del mes de octubre de 1988 se realizó la toma de muestras de la escoria producida por el alto horno Nro. 5 granulada en el canal principal y auxiliar, las que se identificaron como P y A respectivamente.

Una vez finalizado cada escoriado, se recogió de la parte superior de la pila formada una muestra de escoria con el auxilio de la cuchara de almeja, evitando contaminar las muestras con escoria perteneciente a otras coladas. Luego de permitir algunos minutos de drenado, se volcó el material en la playa ubicada inmediatamente a continuación de las piletas de enfriamiento.

De cada pila se extrajo una muestra representativa, de aproximadamente 25-30 kilos, cuarteada mediante un partidor de Jones.

Por efecto del "soplado del horno", las muestras se contaminaban con carbón vegetal. En particular, la escoria "principal" se mostró más afectada pues la piqueta casi enfrenta la pileta. Esta diferencia no se cuantificó, pero era notable a simple vista.

Se determinó el contenido de humedad retenida por las muestras de escoria extraídas del centro de las pilas, luego de permitir el drenaje durante 18 a 20 horas. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 1.

## 2.2. Tratamiento posterior de las muestras

Se examinaron visualmente las muestras y se detectó una excesiva contaminación con arrabio, el que se presentaba en forma aislada o unido a partículas de carbón vegetal o de escoria granulada. Por otra parte, el grado de contaminación no era regular.

De las 10 muestras extraídas, identificadas como A1, A2, A3, A4, A5, P1, P2, P3, P4 y P5 se pensó realizar un común representativo de todas ellas, pero la falta de uniformidad, fundamentalmente en el grado de contaminación, motivó la decisión de elegir las dos menos contaminadas para formar el común designado como ZAP.

### 2.2.1. Descontaminación de las muestras

Previo a la caracterización de la escoria granulada, fue necesario separar el carbón vegetal y el arrabio.

El carbón vegetal se separó parcialmente por tamizado, vía seca, sobre tamiz de 4,75 mm de abertura de malla.

La presencia de partículas de carbón con arrabio adherido, unido a la elevada absorción del primero, impidieron la separación por flotación. El residuo de carbón se consideró despreciable en masa por su baja densidad.

La separación del hierro se realizó en forma manual con un imán permanente, con tantas pasadas como fueron necesarias hasta que la masa de material magnético retenido en el imán fue despreciable.

Se determinó entonces el porcentaje de contaminación en masa, para la muestra con más contenido de hierro y la menos contaminada, arrojando los siguientes valores:

Muestra más contaminada: A2 y A4; la primera se descartó pues el operador del alto horno informó que correspondía a una escoriada con contenido anormal de hierro. Material magnético: superior al 25 %

Muestra menos contaminada: de las muestras menos contaminadas, se eligieron dos, A5 y P5 para constituir un común denominado ZAP. Su contenido de hierro se evaluó efectuando la separación del material magnético, previa trituration por rodillos, para liberar el arrabio de la escoria.

Material magnético :	8,8 %
Material no magnét .:	90,4 %
Material contaminado:	0,8 % (escoria contaminada con hierro, no separados por la trituration en los rodillos.)

A los efectos de desarrollar un método expeditivo que sirviera para detectar diferentes grados de contaminación con arrabio, se determinó el Peso de la Unidad de Volumen (PUV) suelto de las diferentes muestras. La influencia del contenido de hierro ( $P_e = 7,85$ ) se pone de manifiesto en el incremento del PUV (Fig. 1). Aunque el método no mostró la sensibilidad deseada, es eficaz para detectar rápidamente muestras con contaminación anormal.

### 2.3. Caracterización de la escoria granulada

La escoria granulada seleccionada, se caracterizó macroscópicamente, observándose partículas de diferente coloración.

#### 2.3.1. Análisis mineralógico

El material se presenta en forma de partículas de tamaño arena gruesa, en tanto la parte más fina se produce como consecuencia de la partición de las primeras debido a su friabilidad.

Al microscopio, se observa una textura eminentemente vítrea que en algunos casos incluye partículas metálicas de forma esférica, óxidos de hierro y burbujas. Pueden ser incoloras, transparentes o translúcidas aunque también hay una cierta proporción de verdosas y blancas.

En el caso de partición, los bordes son irregulares y la fractura concoide. En las variedades blancas, son notorias las características de friabilidad y la estructura semejante a una pómez por su gran cantidad de poros.

### 2.3.2. Determinación del contenido de vidrio

Sobre una muestra ZAP molida, se determinó por conteo al microscopio el porcentaje de fase vítrea, encontrándose el siguiente resultado:

Vidrio .....	93,2 %
Partículas cristalinas ....	2,8 %
Partículas opacas .....	4,0 %

La caracterización mediante técnicas de difracción por rayos X (XRD) determinó la ausencia de partículas cristalinas; es decir, el contenido de partículas cristalinas de la muestra está por debajo del umbral de detección mediante esta técnica.

### 2.3.3. Análisis químico

Para no introducir errores apreciables, se descontaminaron las muestras antes de efectuar el análisis químico. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 2 y 2 bis, donde también se informan los contenidos de hierro metálico obtenidos por análisis.

### 2.4. Preparación de los cementos mezcla

Para la preparación de los cementos mezcla se utilizó clínker de una empresa cementera ubicada a aproximadamente 70 km de AHZ en la localidad de Puesto Viejo, piedra de yeso y escoria granulada de alto horno descontaminada. En la Tabla 3 se muestra la composición química del clínker empleado.

Se realizaron moliendas conjuntas, con contenidos nominales de 0, 20, 35, 50 y 60 % de escoria, alcanzando finuras de 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg Blaine.

En la Tabla 4 se puede ver la composición de los cementos mezcla preparados, las finuras alcanzadas y el tiempo necesario para alcanzar esas finuras.

En el siguiente cuadro se puede observar la diferente molturabilidad de la escoria de AHZ cuando se la compara con una estudiada previamente (SOMISA), Fig. 2.

FINURA (m <sup>2</sup> /kg)	TIEMPO DE MOLIENDA	
	ZAPLA	SOMISA
300	3:20	2:15
400	6:15	4:05
500	12:00	8:00

Con las mezclas preparadas se moldearon probetas cúbicas de 50 mm de arista para evaluar la resistencia de los morteros a la compresión a las edades de 3, 7, 28, 91 y 180 días de acuerdo con la norma ASTM C 109.

Las proporciones del mortero y la granulometría de la arena utilizada (arena de Ottawa) se consignan en las Tablas 5 y 6 respectivamente.

Las probetas se desmoldaron a las 24 horas de moldeadas y se mantuvieron sumergidas en agua saturada con cal hasta la edad de ensayo. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 7.

Para evaluar la hidraulicidad de la escoria, la norma ASTM C 989 determina un "Índice de actividad de la escoria" (S.A.I.), definido como el valor porcentual de la resistencia a la compresión a la edad de 28 días para un cemento mezcla que contenga 50 % de escoria con respecto al cemento portland normal de referencia.

Realizados estos cálculos, para la edad de 7 y 28 días y con las dos finuras, 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg, se obtuvieron los valores de la Tabla 8.

## 2.5. Molienda conjunta y separada

Para simular la condición de mezcla de los componentes del cemento mezcla en el momento de elaboración del mortero (u hormigón), se realizó molienda separada, alcanzando con el clínker una finura de 400 m<sup>2</sup>/kg y con la escoria, finuras de 500 y 600 m<sup>2</sup>/kg. Se moldearon probetas cúbicas de 50 mm de arista de acuerdo con ASTM C 109, las que se mantuvieron sumergidas en agua saturada con cal hasta la edad de ensayo. La rotura a la compresión se realizó a las edades de 3, 7, 28, 91 y 180 días. Los resultados se consignan en la Tabla 9.

## 2.6. Conclusiones

Para alcanzar una finura determinada con la escoria de AHZ, se necesita mayor tiempo de molienda que para la escoria de SOMISA, lo cual puede atribuirse a su composición menos básica.

La contaminación con arrabio es alta y variable de colada en colada, siendo necesaria su eliminación antes de la molienda. Es conveniente hacer una premolienda a tamaño menor que 1 mm para liberar las partículas adheridas.

El análisis químico de las muestras señala una relación  $\text{SiO}_2/[\text{CaO} + \text{MgO}]$  superior a la deseable, desde el punto de vista de sus propiedades hidráulicas. El contenido de aluminio está dentro del rango aconsejado por la bibliografía. El contenido de alcalinos es relativamente alto, atribuible al uso de carbón vegetal y sería interesante estudiar su influencia. El resto de los componentes está dentro de los valores que presentan normalmente las escorias.

El grado de vitrificación es adecuado. Su relativamente bajo contenido en fase cristalina puede atribuirse a su composición química.

El porcentaje de agua retenida luego del drenaje se considera relativamente bajo, favoreciendo la posterior operación de secado.

Los valores de finura elegidos, 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg Blaine, son adecuados para esta evaluación preliminar ya que una finura menor no hubiera arrojado valores satisfactorios en lo que hace a su actividad hidráulica. Esto se manifiesta en el Índice de Actividad de la escoria (S.A.I.). A la finura 500 m<sup>2</sup>/kg le corresponde un grado 80, casi en el límite con el grado 100 (70 para 7 días y 90 para 28 días).

Se observa un incremento muy importante en el desarrollo de resistencia cuando se pasa de finura 400 a 500 m<sup>2</sup>/kg, lo que se pone de manifiesto en forma más acentuada a la edad de 28 días. La resistencia a la compresión a 3 y 7 días para el cemento de referencia (0 % de escoria) muestra valores menores para 500 m<sup>2</sup>/kg con respecto a 400 m<sup>2</sup>/kg; esto puede atribuirse a un problema de control en la molienda, ya que repetidos los moldeos para 500 m<sup>2</sup>/kg se obtuvieron resultados similares.

Es de interés señalar que, para 400 m<sup>2</sup>/kg, la resistencia a la compresión disminuye en forma regular a 3 y 7 días con el aumento del contenido de escoria. Esto indica muy poca, si alguna, contribución de la escoria al desarrollo de resistencia, la que sí se manifiesta a 28 días. Para 500 m<sup>2</sup>/kg se observa que a 3 y 7 días la

resistencia disminuye marcadamente cuando el contenido de escoria supera el 35 %, mientras que para 28 días esta disminución se produce cuando el porcentaje de escoria es mayor que 50 %, Figura 4.

El cemento que se utilizó como referencia y activador se seleccionó en virtud de la proximidad de su planta elaboradora con AHZ, pudiendo obtenerse resultados más favorables con otros cementos como puede observarse en la Tabla 10, donde se muestran determinaciones del S.A.I. con clinker de diferente origen.

## 2.7. Recomendaciones

El análisis de los resultados de estos ensayos orientativos, cuyo objetivo primario es optimizar la evaluación de la escoria granulada utilizando un equipo de granulación, permitió enunciar las siguientes recomendaciones:

- Es conveniente la instalación de un decantador o trampa de arrabio previo a la ubicación de la Caja de Granulación.
- La contaminación con carbón debe evitarse, pues puede tener un efecto negativo en caso de utilizar aditivos, como se comprobó en el estudio de cementos de albañilería elaborados con escoria de AHZ. En ese caso particular fue necesario duplicar la dosis de aditivo con respecto a otros cementos informados previamente.
- El desarrollo de resistencia en función de la edad es el característico de los los cementos de escoria, pero más acentuado, es decir, un desarrollo lento a edades cortas y una ganancia de resistencia que se prolonga con el tiempo.
- La finura de molienda indicada correspondería a 500 m<sup>2</sup>/kg. Para esta finura y 50 % de remplazo de cemento por escoria, se supera al cemento de referencia a la edad de 100 días. Determinaciones realizadas sobre muestras con 600 m<sup>2</sup>/kg de finura Blaine, demostraron que la mejora relativa de resultados no justifica el incremento excesivo en el consumo de energía en la molienda para alcanzar dicha finura.
- El porcentaje de remplazo parcial de cemento por escoria no debe superar el 35 % cuando la finura alcanza los 400 m<sup>2</sup>/kg, mientras que para 500 m<sup>2</sup>/kg, se puede llegar hasta un 50 % de sustitución.

### 3. EVALUACION DE LA ESCORIA GRANULADA MOLIDA EN LA PLANTA DE ALTOS HORNOS ZAPLA

#### 3.1. Introducción

Ante el requerimiento por parte de Autoridades de AHZ de evaluar una escoria producida y molida en planta, que fue utilizada en algunos trabajos experimentales fuera del alcance de este estudio, se determinó su composición química y contenido de hierro metálico, Tabla 11, y se evaluó su actividad hidráulica potencial a través del S.A.I. (ASTM C 109).

La Tabla 12 resume los valores de S.A.I. a las edades de 7 y 28 días. Algunas probetas se desintegraron durante el curado, hecho que se atribuyó a la presencia de hierro metálico, por lo que procedió a separarlo con un imán permanente, en forma manual. Los resultados obtenidos con esta escoria descontaminada se indican también en la Tabla 12; la densidad y la superficie específica fueron 2,91 g/cm<sup>3</sup> y 310 m<sup>2</sup>/kg, respectivamente.

#### 3.1.1. Conclusiones

El análisis químico muestra un nivel de contaminación con hierro superior a lo deseable. La oxidación y correspondiente expansión provocada en las primeras horas pudo haber sido la causa de desintegración de algunas probetas. Moldeos realizados con la misma escoria desmagnetizada no presentaron este problema, arrojando mayor resistencia a 7 días, aunque el comportamiento a las edades de 28 y 91 días fue similar.

Los valores obtenidos son relativamente bajos, fundamentalmente si se los compara con escoria de igual procedencia evaluada en el punto 2.

### 4. CARACTERIZACION DE LA ESCORIA OBTENIDA CON LA CAJA DE GRANULACION

#### 4.1. Introducción

De acuerdo con las recomendaciones dadas por el experto enviado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, CIID, de Canadá, personal del Establecimiento Altos Hornos Zapla instaló la caja de granulación en la salida de la piquera de escoriado lateral. El decantador de arrabio previsto no fue construido, de modo tal que no fue posible eliminar la contaminación de la escoria con el hierro metálico.

Debido a inconvenientes en el funcionamiento del alto horno no se pudo realizar más de una experiencia, por lo tanto la granulación obtenida con esta caja muy probablemente pueda ser optimizada.

Por las circunstancias mencionadas anteriormente, no se justificó la realización de un estudio más extenso, tal como se tenía previsto efectuar.

#### 4.2. Proceso de granulación

El proceso de granulación consiste en transformar la escoria al estado líquido, a una temperatura de alrededor de 1400 C, en un material granular mediante el impacto con un chorro de agua a alta presión, disminuyendo simultáneamente su temperatura a un valor cercano a la ambiente.

Como segunda etapa de este proceso la escoria debe ser separada del agua y transportada de la vecindad del alto horno hasta la playa de almacenamiento o despachada directamente mediante vagones o camiones.

Distintos procesos han sido diseñados para optimizar estas operaciones y también para disminuir la contaminación ambiental, producida por la emanación de vapores de agua, H<sub>2</sub>S, etc, que llevan a una disminución de visibilidad y a serios problemas de corrosión, además de crear condiciones de trabajo inadecuadas. Si bien estos problemas son considerablemente menores cuando la escoria es granulada que cuando es enfriada al aire, es aún posible una reducción de los niveles de contaminación a valores insignificantes.

La caja de granulación forma parte de uno de estos sistemas operativos (1) y se instala a la salida del canal de escoriado donde se produce el proceso de granulación. Su diseño permite dispersar la escoria líquida en pequeñas gotas que son rápidamente enfriadas y transportadas, mediante la inyección de agua a través de dos conjuntos de pequeños orificios y una rendija horizontal. El caudal y presión de agua de alimentación de estos dos conjuntos pueden ser variados independientemente permitiendo así modificar el tamaño de los gránulos, densidad y grado de vitrificación.

En la figura 14 se muestra un esquema del sistema instalado, donde se puede apreciar que, fijado el caudal de agua de alimentación principal, el caudal y presión de alimentación a cada una de las cámaras de la caja de granulación puede ser controlado individualmente.

Se realizó la calibración del equipo y el personal del alto horno fue instruido por el experto canadiense, quien dirigió la instalación y puesta en marcha del equipo,

de modo de adecuar su funcionamiento a las condiciones de colada de escoria.

#### 4.3. Muestra

Se obtuvieron dos muestras de aproximadamente 15 kg cada una, correspondientes a una misma colada, granuladas por medio de la caja de granulación y con el sistema existente en AHZ, las que fueron identificadas como BB y CC respectivamente.

#### 4.4. Tratamiento posterior de las muestras

##### 4.4.1. Secado

Se procedió al secado en estufa a temperatura de 105 °C hasta peso constante. No se determinó el contenido de humedad retenida pues en la planta no se dispuso de los medios necesarios y las muestras se recibieron en el laboratorio luego de varios días de obtenidas.

##### 4.4.2. Análisis granulométrico

Se realizó análisis granulométrico sobre tamices de la serie normal IRAM. Los resultados se consignan en Tabla 13 donde podemos observar que la escoria obtenida con la caja de granulación muestra un tamaño medio un poco mayor que la escoria "regular". Esto se manifiesta también en el módulo de finura.

##### 4.4.3. Descontaminación de las muestras

Se realizó la separación manual de las partículas gruesas de carbón. El contenido separado en peso es similar para ambas muestras. El porcentaje en peso, 1,6 %, es escaso, pero debe tenerse en cuenta que su proporción en volumen es muy superior debido a la baja densidad del carbón con respecto a la escoria granulada.

El arrabio se separó utilizando un imán permanente, en forma manual y con tantas pasadas como fuera necesario para que el hierro adherido fuera despreciable. Previo a esta operación, se disgregó la muestra en un mortero para separar el hierro adherido a partículas de escoria.

Los porcentajes se consignan en Tabla 14, que muestra que el contenido de hierro es excesivo en ambos casos. Es evidente la necesidad de instalar una trampa para el arrabio para disminuir el nivel de contaminación.

#### 4.4.4. Análisis químico

Las muestras descontaminadas se molieron en molino a bolas hasta una finura de 340 m<sup>2</sup>/kg aproximadamente. Se determinó la composición química, incluyendo el contenido de hierro metálico. Los resultados se muestran en Tabla 15 donde se puede observar el incremento en el contenido de SiO<sub>2</sub>, la disminución del CaO y un valor anormalmente alto de los alcalinos totales, expresados como Na<sub>2</sub>O.

#### 4.4.5. Contenido de fase vítrea y difracción por rayos X.

Se determinó el contenido de fase vítrea por conteo al microscopio y se realizó una difracción por rayos X. Los resultados se indican en Tabla 16.

Resultados de la difracción por Rayos X (XRD):

Muestra BB: Abundante material amorfo y muy escasa presencia de partículas cristalinas.

Muestra CC: El contenido de partículas cristalinas es inferior al umbral de detección por este método.

Microfotografía:

En las Figuras 15 y 16 se puede observar la microfotografía de las muestras BB y CC con distintos aumentos. Las muestras corresponden a la fracción entre 1000 y 590  $\mu$ m.

#### 4.4.6. Molturabilidad

Se realizó una molienda hasta 500 m<sup>2</sup>/kg, obteniendo muestras parciales para evaluar la molturabilidad de ambas escorias. Los resultados se resumen en Tabla 17.

#### 4.4.7. Conclusiones

Prescindiendo de la contaminación presente en ambas muestras, la escoria procesada mediante la caja de granulación presenta una mejor distribución de tamaños y mayor tamaño medio, como indica su módulo de finura.

La escoria granulada con la caja de granulación tuvo menor porcentaje de fase vítrea, lo que podría manifestarse como una menor actividad hidráulica potencial. Este hecho puede atribuirse a causas diferentes del enfriamiento propiamente dicho, tales como composición química y temperatura de la escoria.

Las ventajas que aportó el nuevo equipo, aún en etapa de calibración y optimización en su operación, se tradujeron en una mejor molturabilidad de la escoria, lo que permitiría ahorrar energía en la molienda.

#### 4.5. Propiedades mecánicas

##### 4.5.1. Resistencia a la compresión

Se realizaron moldeos de acuerdo con la norma ASTM C 109 (cubos de 50 mm de arista) para determinar la resistencia a la compresión a diferentes edades. En la Tabla 18 se resume el plan de ensayos efectuados. El esquema se repite para ambas muestras, BB y CC.

En las Tablas 19 y 20 se indican los resultados obtenidos hasta la edad de 91 días. Se calcularon valores porcentuales relativos al cemento control (100 % CPN) para cada edad, los que se consignan en Tablas 21 y 22.

Con el valor de la resistencia a la compresión a las edades de 7 y 28 días para el cemento patrón (100 % CPN), y con el valor correspondiente al 50 % de remplazo de cemento por escoria se determinó el índice de actividad, (S.A.I.) de ambas escorias. Los resultados se indican en Tabla 23.

##### 4.5.2. Conclusiones

Los valores de resistencia a la compresión para distintas edades y finuras son del mismo orden que los obtenidos para la escoria granulada con el procedimiento existente en AHZ.

La influencia de la mayor finura de molido se hace evidente en los resultados a 28 días y se acentúa a 91 días. Las diferencias se incrementan para contenidos de escoria del 50 y 60 %, en cuyos casos se supera a las mezclas con mayor contenido de cemento portland.

Idénticas conclusiones se extraen del análisis de los Índices de Actividad (S.A.I.) a 7 y 28 días.

## 5. MORTEROS PARA ALBANILERIA

De acuerdo con las experiencias obtenidas con la escoria de Somisa, en lo que respecta al diseño de cementos para elaborar morteros para albañilería, se ensayaron distintas proporciones de la mezcla ternaria: escoria granulada molida - cemento portland - cal aérea hidratada en polvo.

Se utilizó la escoria granulada mediante el sistema preexistente en Zapla, molida en los laboratorios del INTI. Por tratarse de una evaluación preliminar, ésta se limitó al estudio de la evolución de la resistencia a la flexión y compresión en función de la edad, para distintos contenidos de cal aérea. El contenido de cemento de las mezclas se mantuvo constante.

La dosificación utilizada para los cementos de albañilería y los respectivos morteros se esquematiza en la Tabla 24 y la granulometría de la arena, en la Tabla 25.

Se ajustó el contenido de agua de manera de mantener constante el extendido en  $110 \pm 5 \%$ . Se moldearon probetas prismáticas de  $4 \times 4 \times 16$  cm, las que se mantuvieron 48 horas en el laboratorio antes de ser desmoldadas. El curado se proporcionó sumergiendo las probetas en agua saturada con cal, a una temperatura constante de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  hasta la edad de ensayo. Se ensayaron a la flexión (carga en el centro) y a la compresión. Los valores de resistencia obtenidos se indican en Tabla 26.

Se utilizó la misma dosis de aditivo que para la escoria de SOMISA pero, al determinar posteriormente el contenido de aire incorporado, se observó que éste era insuficiente. Este comportamiento se atribuye a la presencia de carbón no eliminado en forma manual en el proceso de descontaminación. Para alcanzar el nivel de aire deseado (18 %), fue necesario duplicar la dosis del aditivo.

### 5.1. Conclusiones

El comportamiento al estado fresco es satisfactorio.

Los resultados indican escasa actividad de la escoria a corta edad, pero el comportamiento mejora a 28 días y más aún a 91 días. Es evidente la necesidad de prolongar el curado húmedo.

La presencia de carbón aumenta la dosis de aditivo necesaria para lograr una correcta incorporación de aire. Es probable que este hecho se reitere para otros aditivos de uso corriente en morteros y hormigones, pero sería conveniente realizar los ensayos correspondientes en cada caso.

## 6. CONCLUSIONES GENERALES

La escoria producida por Altos Hornos Zapla puede ser utilizada como material potencialmente cementicio, ya sea para la obtención de cemento de escoria, por molienda conjunta, o como adición hidráulicamente activa en obra, con una finura adecuada. Para que esto pueda ser implementado satisfactoriamente este material debe ser considerado como un coproducto del arrabio que se produce simultáneamente.

Es necesario tener una carga definida para el alto horno y efectuar el control de cada colada mediante análisis químico y medición de temperatura, de modo tal que se pueda asegurar la uniformidad en las características de la escoria producida.

Se debe mejorar la separación de la escoria y el arrabio y eliminar la mayor parte de éste, intercalando una trampa antes de la granulación de la escoria ya que de esta manera se reduce el costo de la separación magnética y se incrementa la producción de metal del horno.

Es conveniente poder eliminar aquellas escorias que por razones circunstanciales, baja temperatura, alta contaminación, etc, no tengan la calidad adecuada, desviándolas a otra fosa o vagón termo, de modo tal de no disminuir la calidad promedio de la escoria producida.

La finura de esta escoria debería estar comprendida entre 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg, en función de los niveles de reemplazo y aplicaciones que se le quiera dar. Una finura menor no permite desarrollar todo su potencial hidráulico, mientras que una mayor finura incrementaría el costo de molienda sin una ventaja proporcional.

El nivel de sustitución de cemento portland normal por esta escoria puede llegar hasta el 60 %, dependiendo esto del grado de molienda, cemento portland con el cual se incorpore y requerimientos de la obra.

La escoria puede ser utilizada para la fabricación de cementos de albañilería, pero, principalmente en este caso, como en el empleo en remplazo parcial de cemento portland normal, se deben cuidar las condiciones de curado ya que el desarrollo de resistencia es lento a las primeras edades pero importante a largo plazo.

Se recomienda el empleo de esta escoria en fábrica de premoldeado con corado acelerado y en obra con un buen control de calidad.

Es conveniente profundizar y extender los estudios sobre esta escoria una vez implementadas las acciones sugeridas anteriormente.

REFERENCIAS:

(1) Arthur W. Cooper, M. Solvi, M. Carmes. "Blast furnace slag granulation" Iron and Steel Engineer, 46-52, July 1986.

(2) Arthur W. Cooper, "Informe Interno", Noviembre 1990, Manager Engineering Services, Paul Wurth Ltd, Hamilton, Ontario, Canadá.

Tabla 1: Humedad retenida por la escoria granulada

Muestra	Humedad retenida %
1	7,8
2	7,4
3	7,4
4	8,7

Tabla 2: Análisis químico de muestras P1, P2, P3, P4 y P5 en g/100g

Composición	P1	P2	P3	P4	P5
Residuo insoluble	2,54	2,77	2,76	1,29	3,42
Dióx. de silicio (SiO <sub>2</sub> )	38,3	39,2	38,5	40,3	40,9
Ox. de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	14,4	13,4	14,0	14,0	13,6
Ox. de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,65	0,65	0,64	0,52	0,39
Ox. de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,01	1,36	1,27	1,08	1,15
Ox. de calcio (CaO)	36,9	36,6	36,4	37,2	37,4
Ox. de sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,31	0,40	0,31	0,35	0,28
Ox. de potasio (K <sub>2</sub> O)	1,63	1,88	1,82	1,66	1,30
Ox. de magnesio (MgO)	3,38	3,81	3,56	3,50	4,00
Trióx. de azufre (SO <sub>3</sub> )	0,15	0,05	0,16	0,04	0,17
Pérdida por calcinación	1,00	0,18	0,85	0,12	0,17
Alcalinos totales	1,38	1,64	1,51	1,44	1,13
Hierro metálico	13,0	11,8	6,71	7,25	7,55

Tabla 2 bis: Análisis químico de A1, A3, A4, A5 y ZAP en g/100g

Composición	A1	A3	A4	A5	ZAP
Residuo insoluble	6,06	3,42	3,73	2,68	4,89
Dióx. de silicio (SiO <sub>2</sub> )	35,5	38,1	38,1	39,1	36,7
Ox. de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13,7	13,8	14,2	13,2	13,3
Ox. de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,68	0,43	0,53	0,41	0,44
Ox. de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,29	1,17	1,19	1,13	1,13
Ox. de calcio (CaO)	36,7	37,3	36,9	38,6	38,5
Ox. de sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,30	0,29	0,31	0,26	0,26
Ox. de potasio (K <sub>2</sub> O)	1,72	1,48	1,73	1,23	1,17
Ox. de magnesio (MgO)	3,50	3,41	3,44	3,69	3,75
Trióx. de azufre (SO <sub>3</sub> )	0,03	0,07	0,06	0,07	0,07
Pérdida por calcinación	0,54	0,58	0,39	0,50	0,29
Alcalinos totales	1,43	1,26	1,45	1,07	1,03
Hierro metálico	18,9	8,0	26,8	7,85	8,62

Tabla 3: Análisis químico del clínker

Composición	g/100g
Residuo insoluble	0,23
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	21,4
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,37
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,55
Oxido de calcio (CaO)	62,8
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,18
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	0,35
Oxido de magnesio (MgO)	2,94
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	2,12
Pérdida por calcinación	1,65
Oxido de calcio libre (CaO)	0,20
Alcalinos totales (Na <sub>2</sub> O + 0.658 K <sub>2</sub> O)	0,41

Tabla 4: Composición y finura de los cementos mezcla

Ident.	Esc. %	Clink. %	Yeso %	Finura m <sup>2</sup> /kg	Tiempo molienda h :min
Z400	---	96,0	4	400	
Z420	19,2	76,8	4	400	4:45
Z435	33,6	62,4	4	400	
Z450	48,0	48,0	4	400	4:40
Z460	57,6	38,4	4	400	5:10
Z500	---	96,0	4	500	8:30 (*)
Z520	19,2	76,8	4	500	
Z535	33,6	62,4	4	500	
Z550	48,0	48,0	4	500	6:50
Z560	57,6	38,4	4	500	6:20

(\*) Para esta muestra no se retiró la mitad de la carga como para las demás; se agregaron cylpebs al alcanzar una finura de 400 m<sup>2</sup>/kg .

Tabla 5: Composición del mortero ASTM C 109

Cemento	500 g
Agua	242 g
Arena de Ottawa	1375 g
Razón a/c (*)	0,485 g

(\*) con "c" se designa al material cementicio, cemento portland (clinker + yeso) o cemento mezcla (cemento + escoria)

Tabla 6: Granulometría de la arena de Ottawa

Tamiz #	Abertura mm	% retenido acumulado
16	1,180	---
30	0,600	2 +/- 2
40	0,425	30 +/- 5
50	0,300	75 +/- 5
100	0,150	98 +/- 2

Tabla 7: Resistencia a la compresión para finura 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg, a las edades de 3, 7 y 28 días.

Contenido de escoria	Resistencia a la compresión (MPa)				
	400 m <sup>2</sup> /kg				
	3d	7d	28d	91d	180d
0	21,5	29,2	40,0	45,6	45,6
20	14,8	20,1	36,1	42,2	43,8
35	12,4	16,1	30,5	42,8	44,6
50	8,3	11,9	26,4	38,0	38,7
60	7,6	11,2	25,0	34,8	34,9

Contenido de escoria	Resistencia a la compresión (MPa)				
	500 m <sup>2</sup> /kg				
	3d	7d	28d	91d	180d
0	16,7	24,9	46,0	45,5	52,3
20	18,9	22,1	41,4	50,2	49,8
35	20,6	22,1	39,9	55,3	53,7
50	10,9	17,2	40,2	52,1	55,5
60	9,6	13,3	36,5	45,3	53,0

Tabla 8: Índice de Actividad de la Escoria (SAI)

Edad (d)	S. A. I.	
	400 m <sup>2</sup> /kg	500 m <sup>2</sup> /kg
7	41	69
28	66	87

Tabla 9: Resultados de resistencia a la compresión de morteros obtenidos por molienda separada

Finura (m <sup>2</sup> /kg)	Contenido de escoria	Resist. a la compresión (MPa)				
		3d	7d	28d	91d	180d
500	35 %	11,4	19,4	38,3	44,5	50,7
	50 %	7,5	15,7	35,8	46,4	61,9
600	35 %	11,4	19,4	39,1	52,2	54,2
	50 %	8,4	14,9	43,8	57,1	66,1

Tabla 10: Resistencia a la compresión e Índice de Actividad de la Escoria con cementos de diferente origen

Cemento Portland normal	Edad (d)	Resistencia (MPa)	S.A.I.
ZPV	7	11,9	41
	28	24,3	61
ZL	7	8,8	25
	28	33,0	80
ZY	7	11,4	45
	28	31,9	90

Tabla 11: Análisis químico de la escoria molida en Planta de A.H.Z., en g/100g

Residuo Insoluble	0,96
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	39,2
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	9,84
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,56
Oxido de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,85
Oxido de Calcio (CaO)	35,4
Oxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,57
Oxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	1,77
Oxido de Magnesio (MgO)	3,67
Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )	0,33
Pérdida por Calcinación	3,42
Alcalinos totales, equiv. en Na <sub>2</sub> O	1,73
Hierro metálico	5,39

Observaciones: El análisis químico fue realizado sobre muestra libre de hierro metálico.

Tabla 12: Determinación del Índice de Actividad de la Escoria molida en Planta en A.H.Z.

a) Muestra original, sin tratamiento alguno

Edad	50 % escoria	CPN	S.A.I.
7 d	7,6 MPa	22,2 MPa	34
28 d	16,8 MPa	32,6 MPa	51
91 d	29,4 MPa	38,9 MPa	76

b) Muestra desmagnetizada

Edad	50 % escoria	CPN	S.A.I.
7 d	8,8 MPa	20,0 MPa	44
28 d	16,7 MPa	(*)	51
91 d	27,6 MPa	37,4 MPa	74

(\*) El valor obtenido no se considera representativo, por lo que se utiliza el resultado de la muestra patrón del grupo anterior (32,6 MPa) para el cálculo del S.A.I.

Tabla 13: Análisis granulométrico de las muestras de escoria granulada

Tamiz #	Abertura (mm)	% Retenido acumulado	
		Muestra BB	Muestra CC
4	4,75	0,5	0,0
8	2,36	9,2	2,9
16	1,18	47,4	32,0
30	0,600	90,0	82,3
50	0,300	97,3	94,8
100	0,150	99,3	98,9
Fondo		100,0	100,0
M.F.		3,43	3,11

Tabla 14: Porcentajes en masa de contaminación

	Muestra BB	Muestra CC
% de carbón	1,58	1,59
% de hierro	20,0	13,6

Tabla 15: Análisis químico, en g/100g

Composición	Muestra	
	BB	CC
Residuo Insoluble	0,32	0,52
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	43,1	42,1
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10,0	9,91
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,17	1,59
Oxido de manganeso (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,71	1,59
Oxido de calcio (CaO)	34,7	33,0
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,66	1,06
Oxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	2,35	3,90
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	0,12	0,14
Pérdida por calcinación	0,32	0,37
Oxido de magnesio (MgO)	5,30	4,94
Alcalinos totales, equiv. en Na <sub>2</sub> O	2,21	3,63
Hierro metálico	0,48	0,78

Tabla 16: Valores obtenidos por microscopía óptica

Fase	Identificación	
	BB	CC
Vidrio	87,9	93,8
Cristalinas	1,5	0,3
Semicristalinas	1,6	0,7
Opacos	9,0	5,2
Total	100,0	100,0

Tabla 17: Molturabilidad comparada de ambas escorias (BB y CC)

Escoria BB		Escoria CC	
Tiempo de molienda h:min	Finura Blaine m2/kg	Tiempo de molienda h:min	Finura Blaine m2/kg
2:00	238	2:00	234
3:00	308	3:00	307
4:15	371	4:15	359
4:45	390	5:15	396
5:05	410	6:15	425
6:30	440	8:30	457
8:05	497	9:45	500

Tabla 18: Esquema de variables y niveles evaluados

Finura de molido (m2/kg)	: 400 y 500
Contenido de escoria (%)	: 0, 35, 50 y 60
Edad de ensayo (días)	: 7, 28, 91

Tabla 19: Resultados de la resistencia a la compresión para la escoria granulada CC

Escoria (%)	Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	Resistencia a la compresión (MPa)		
		7 d	28 d	91 d
0	300	20,4	29,6	34,1
35	400	14,2	27,2	44,0
	500	15,8	30,4	32,1 *
50	400	11,0	23,5	40,6
	500	10,8	29,7	44,9
60	400	8,7	24,7	38,9
	500	10,9	30,6	47,3

\* Valor dudoso

Tabla 20: Resultados de resistencia a la compresión para la escoria granulada BB (Caja de Granulación)

Escoria (%)	Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	Resistencia a la compresión (MPa)		
		7 d	28 d	91 d
0	300	20,4	29,6	34,1
35	400	13,2	28,0	39,9
	500	15,1	30,2	41,6
50	400	10,0	23,0	37,1
	500	10,5	27,2	42,1
60	400	6,9	20,4	35,0
	500	9,0	25,3	44,0

Tabla 21: Resultados de la resistencia a la compresión en morteros, para la escoria "CC", valores porcentuales. (100 % para el CPN a la edad correspondiente)

Escoria %	Finura Blaine (m2/kg)	Resistencia Porcentual		
		7 d	28 d	91 d
0	300	100	100	100
35	400	69,6	91,9	129,0
	500	77,5	102,7	94,1*
50	400	53,9	79,4	119,1
	500	52,9	100,3	131,7
60	400	42,6	83,4	114,1
	500	53,4	103,4	138,7

\* Valor dudoso

Tabla 22: Resultados de resistencia a la compresión en mortero para la escoria granulada BB (Caja de Granulación), valores porcentuales (100 % corresponde al CPN a la edad correspondiente)

Escoria %	Finura Blaine (m2/kg)	Resistencia Porcentual		
		7 d	28 d	91 d
0	300	100	100	100
35	400	64,7	94,6	117,0
	500	74,0	102,0	122,0
50	400	49,0	77,7	108,8
	500	51,5	91,9	123,5
60	400	33,8	68,9	102,6
	500	44,1	85,5	129,0

Tabla 23: Valores de resistencia a la compresión para el cemento patrón y S.A.I. de las escorias.

Esc %	Finura (m <sup>2</sup> /kg)	Edad (días)	Resistencia Compr. (MPa)		S.A.I.	
					BB	CC
0	300	7	20,4		Control	
		28	29,6			
50	400	7	10,0	11,0	49	54
		28	23,0	23,5	78	79
	500	7	10,5	10,8	51	53
		28	27,2	29,7	92	100

Tabla 24: Dosificación en masa de cementos y morteros de albañilería

Denominación	% CPN	% EAHGM	% CAL
AZ-15	15	70	15
AZ-20	15	65	20
AZ-25	15	60	25

Cemento Alb.	Arena (g)	Agua (cm <sup>3</sup> )	Aditivo (cm <sup>3</sup> )
AZ-15	1500	290	9
AZ-20	1500	305	9
AZ-25	1500	310	9

Tabla 25: Granulometría de la arena utilizada (IRAM 1679)

Fracción Tamiz #	Masa (g)
20 - 30	750
30 - 50	540
50 - 100	210

Tabla 26: Resistencia a la flexión y compresión a las edades de 7, 28 y 91 días (MPa)

Identif.	Resistencia a la flexión (MPa)			Resistencia a la compresión (MPa)		
	7d	28d	91d	7d	28d	91d
AZ-15	2,3	4,7	5,5	7,7	20,4	25,8
AZ-20	2,1	4,4	4,9	7,0	17,6	23,2
AZ-25	1,9	4,2	4,9	6,5	16,2	21,9

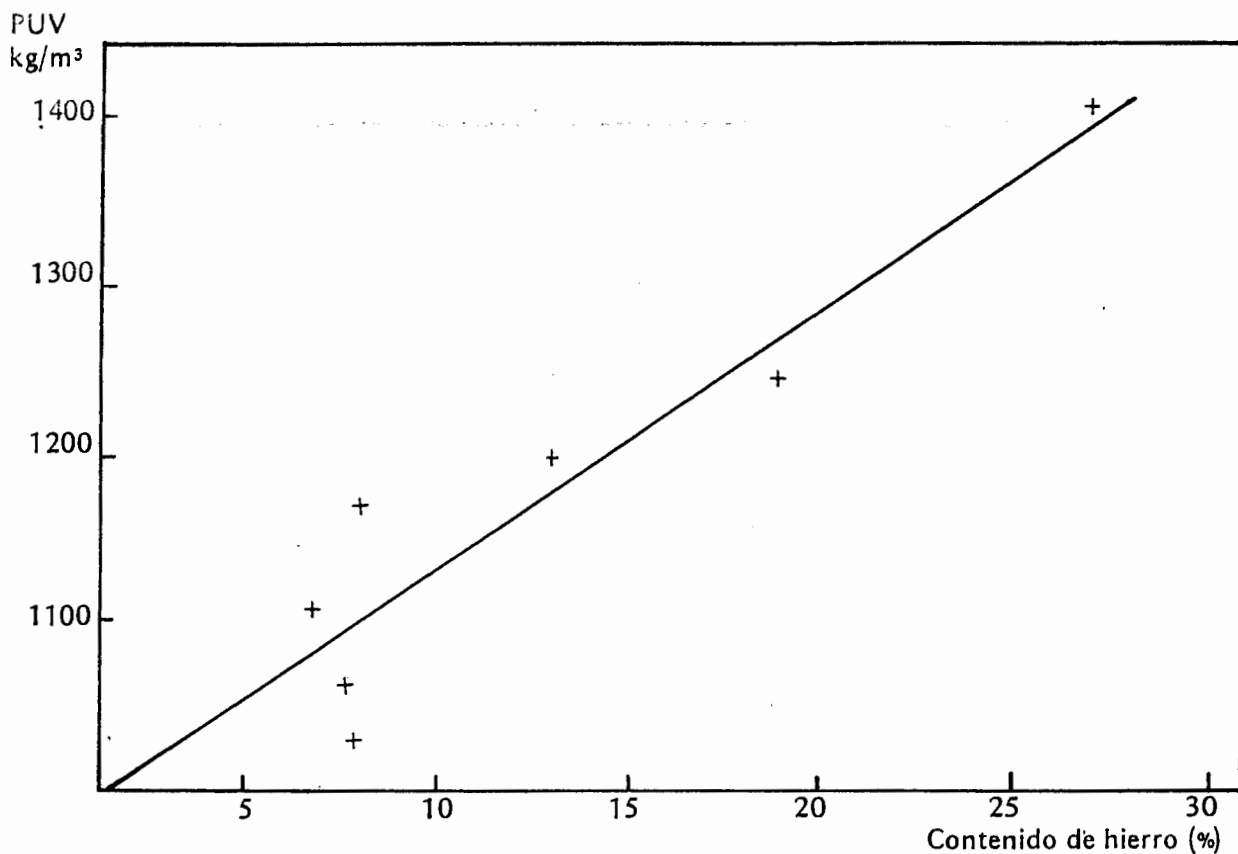


Fig. 1: Masa de la unidad de volumen en función del porcentaje de ancho en la escoria.

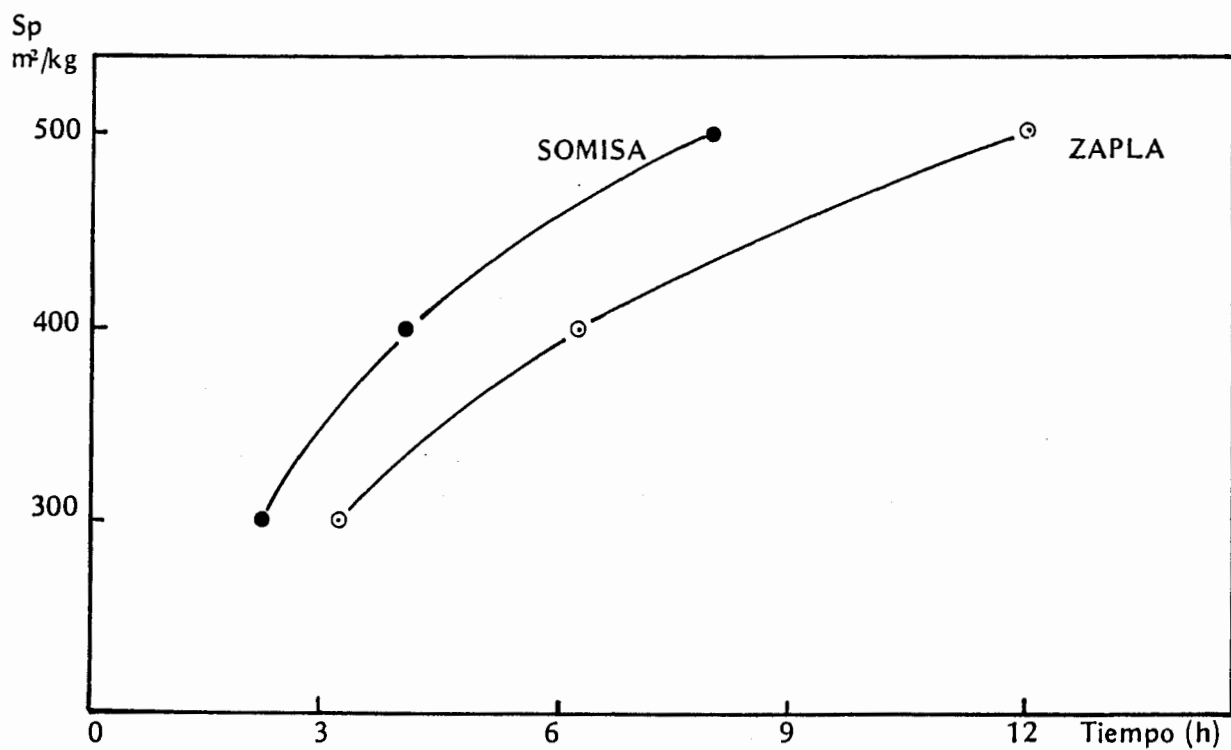


Fig. 2: Superficie específica en función del tiempo de molienda para las escorias de SOMISA y Altos Hornos ZAPLA

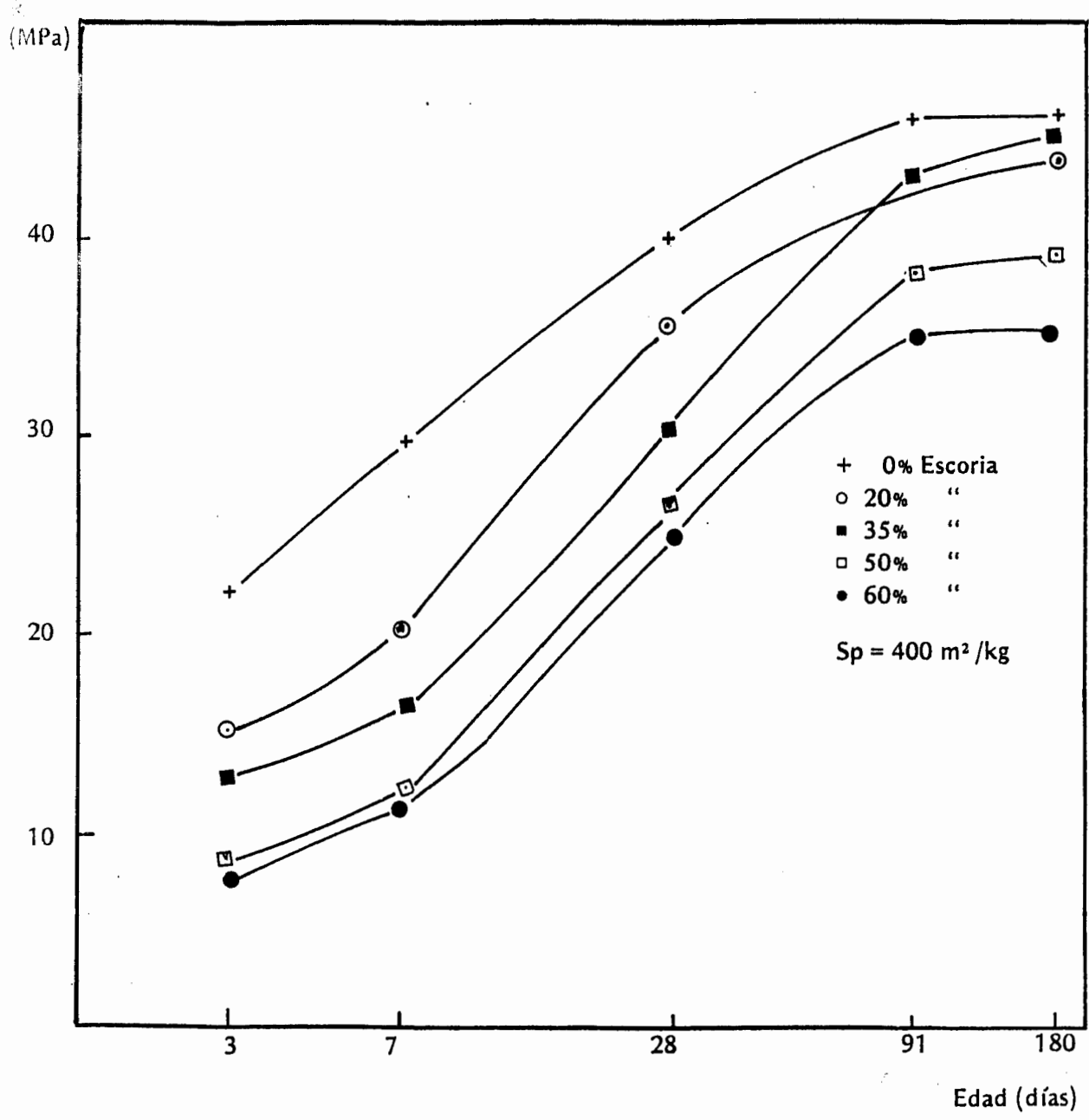


Fig. 3: Resistencia a la compresión para distintos contenidos de escoria en función de la edad. Superficie específica 400 m<sup>2</sup> /kg.

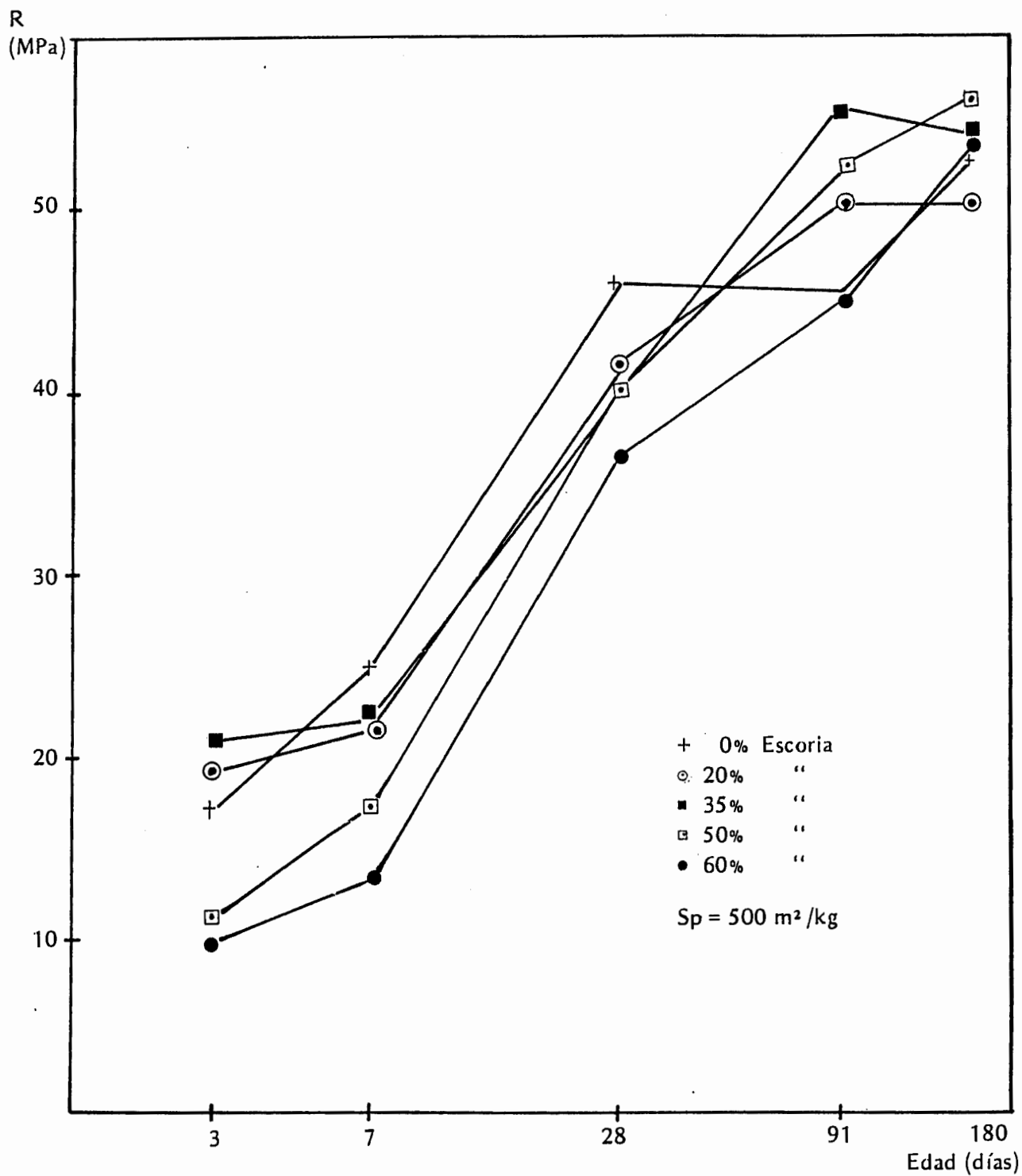


Fig. 4: Resistencia a la compresión para distintos contenidos de escoria en función de la edad. Superficie específica 500 m<sup>2</sup>/kg.

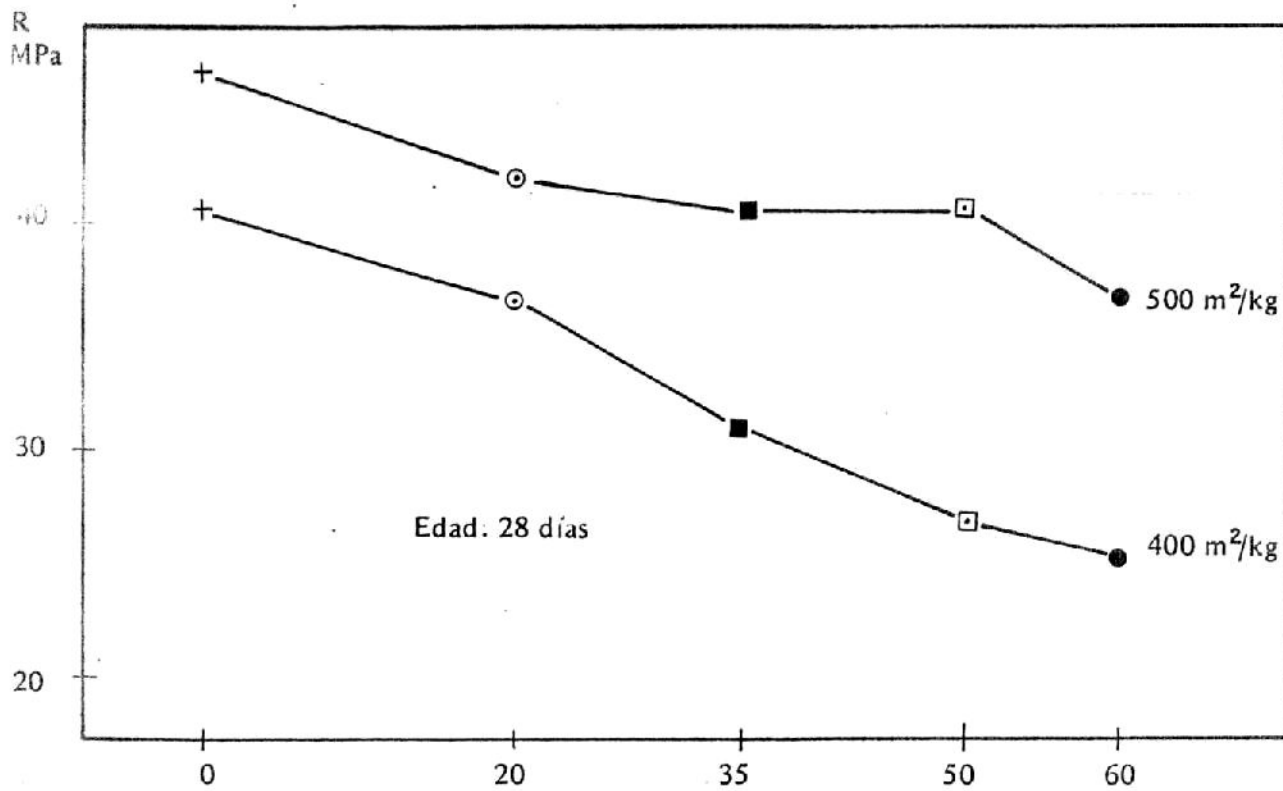


Fig. 5: Resistencia a compresión a 28 días para distintos contenidos de escoria y para finura 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg Blaine.

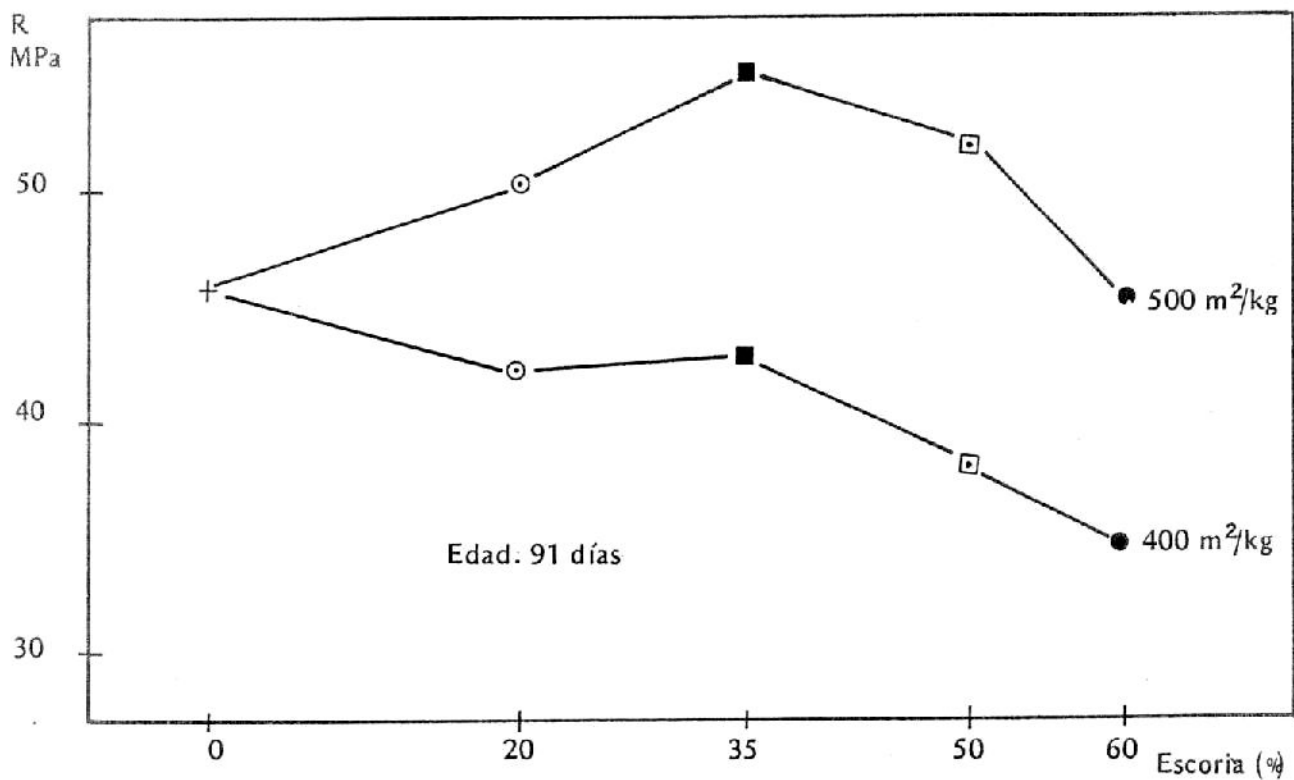


Fig. 6: Resistencia a compresión a 91 días para distintos contenidos de escoria y para finuras 400 y 500 m<sup>2</sup>/kg Blaine.

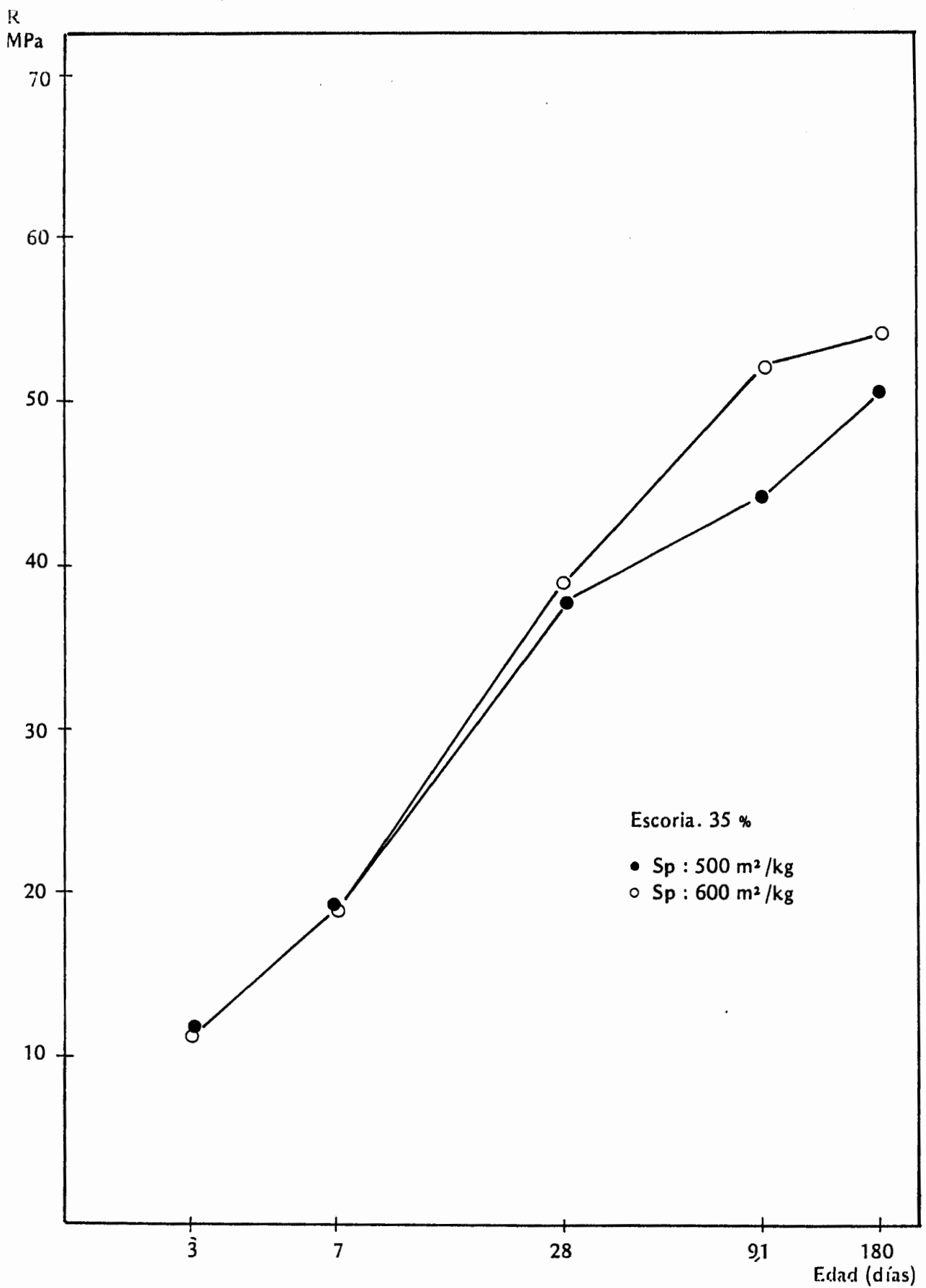


Fig. 7: Resistencia a compresión de morteros obtenidos por molienda separada, en función de la edad, para 35 % de escoria y finura 500 y 600 m<sup>2</sup>/kg.

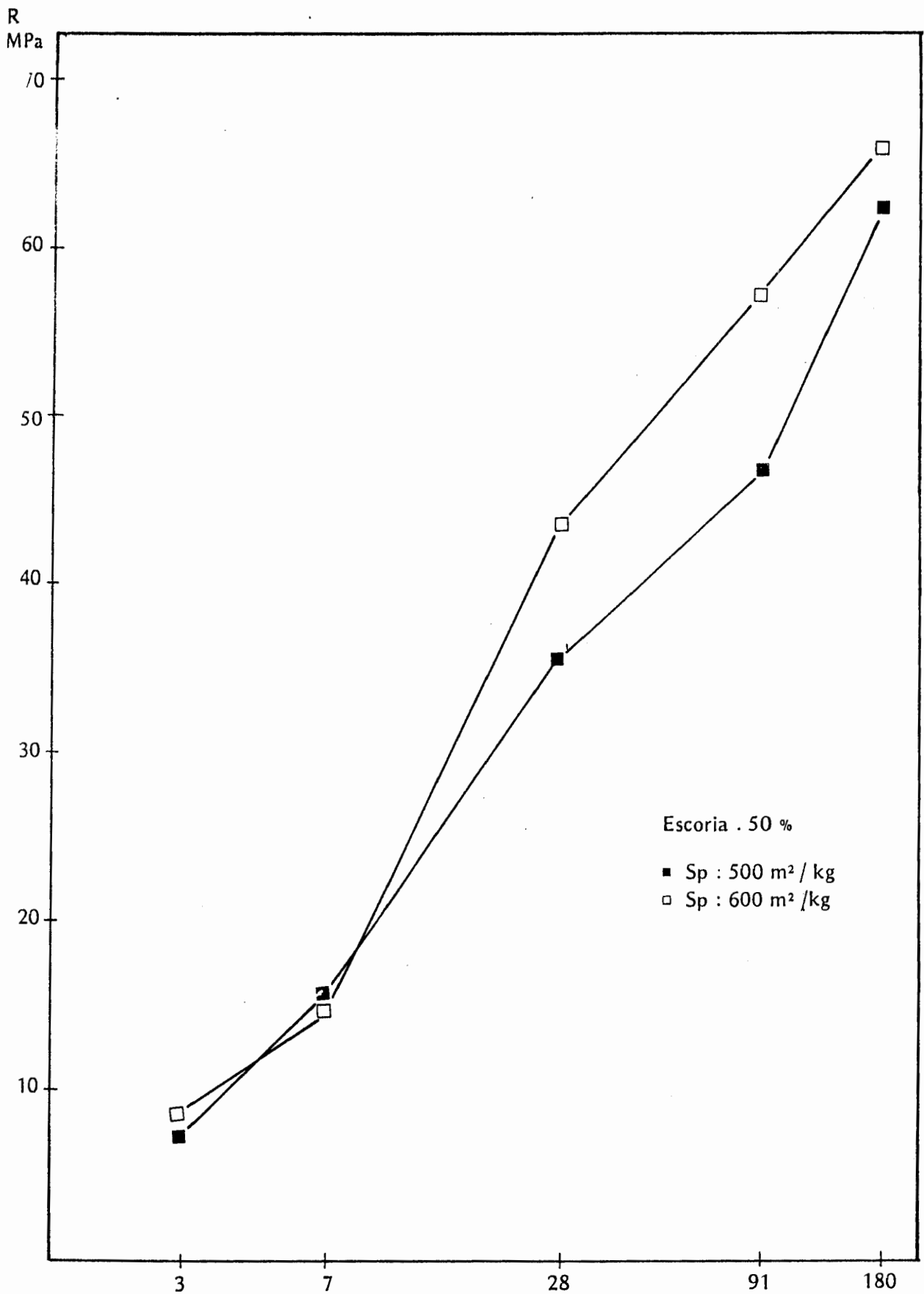


Fig. 8: Resistencia a compresión de morteros obtenidos por molienda separada, en función de la edad, para 50% de escoria y finura 500 y 600 m<sup>2</sup>/kg.

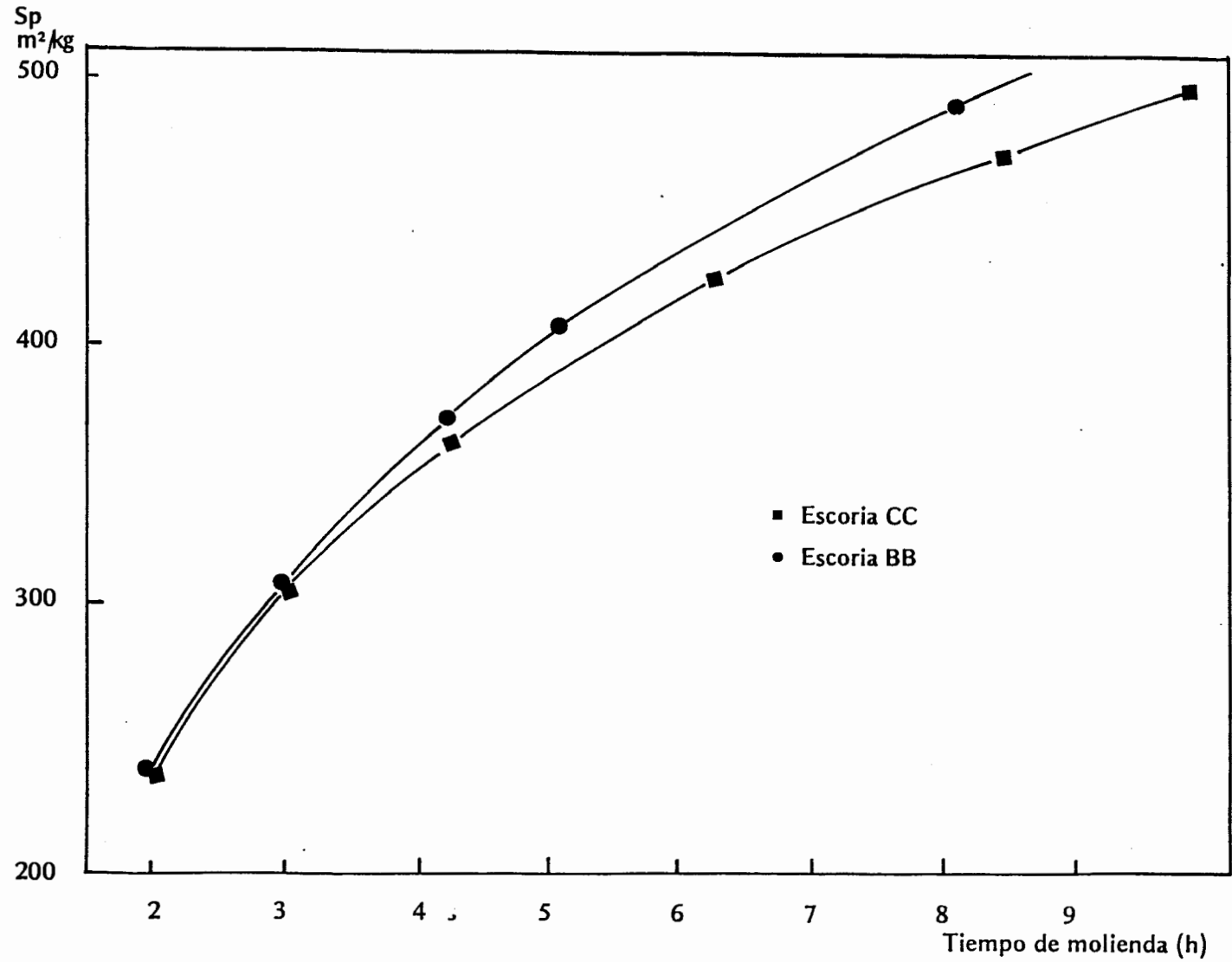


Fig. 9: Superficie específica en función del tiempo de molienda para la escoria granulada normalmente (CC) y con la a caja de granulación (BB).

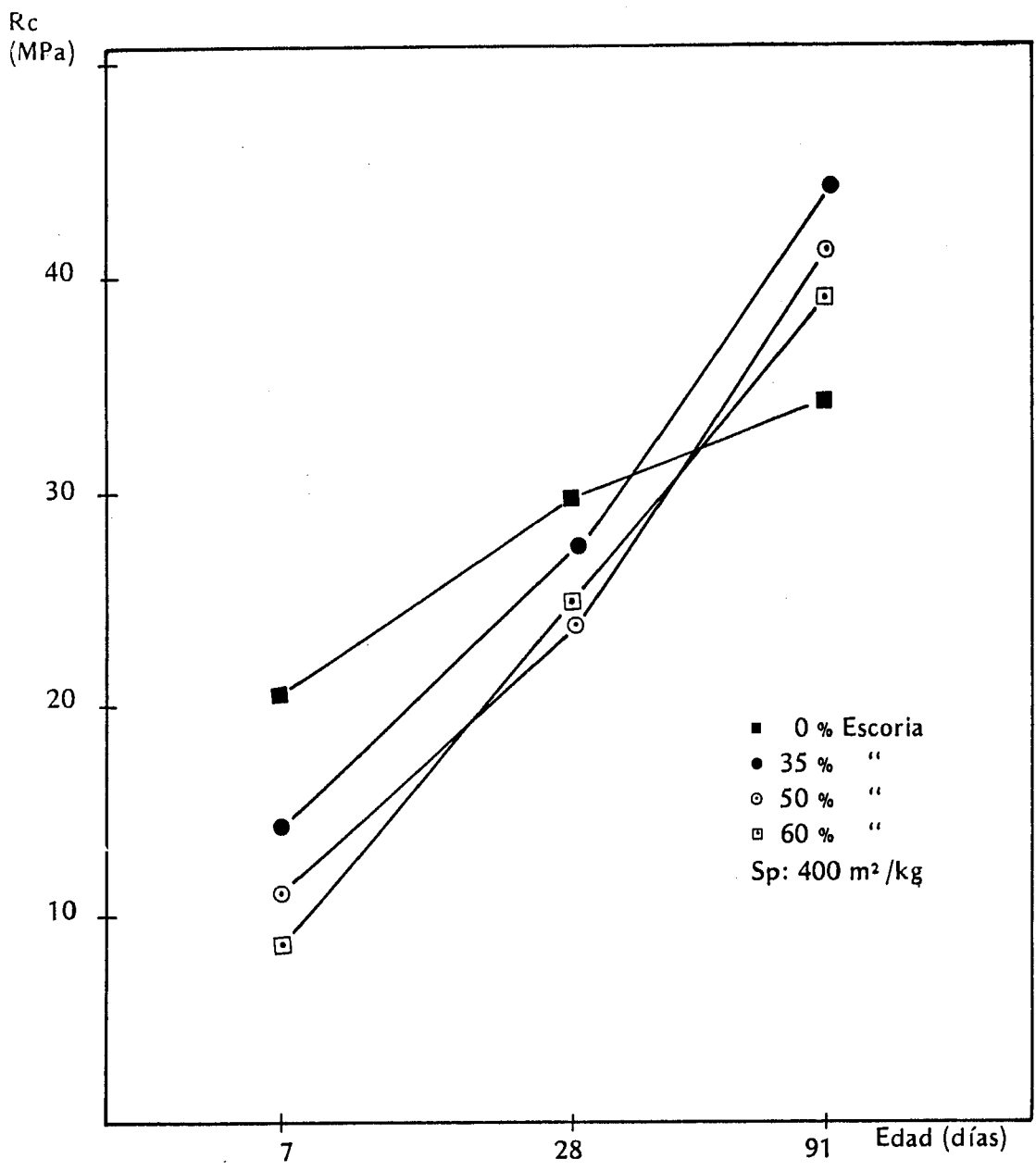


Fig. 10: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria granulada normalmente (CC), en función de la edad. Finura de la escoria 400 m<sup>2</sup>/kg.

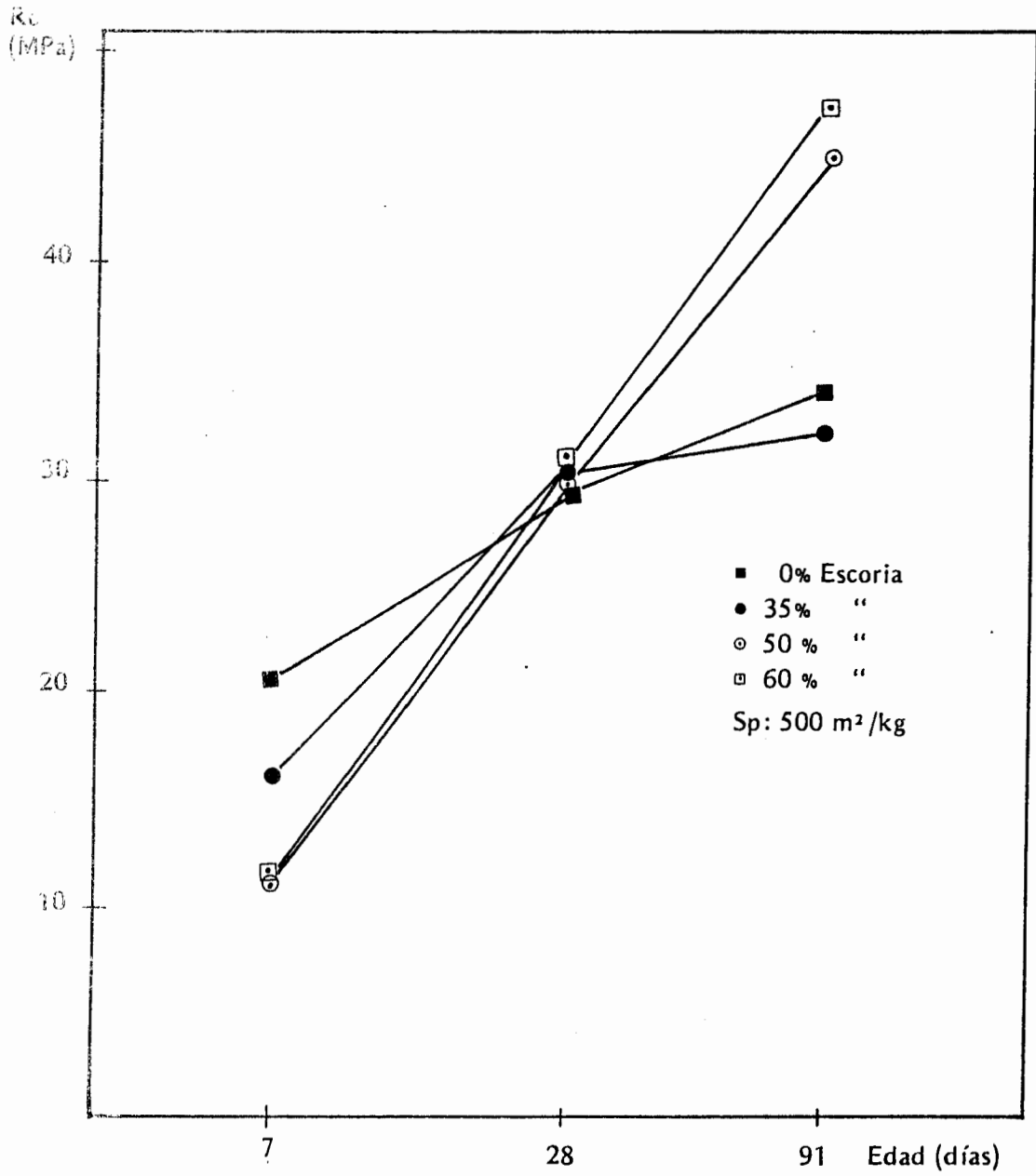


Fig. 11: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria granulada normalmente (CC), en función de la edad. Finura de la escoria 500 m<sup>2</sup>/kg.

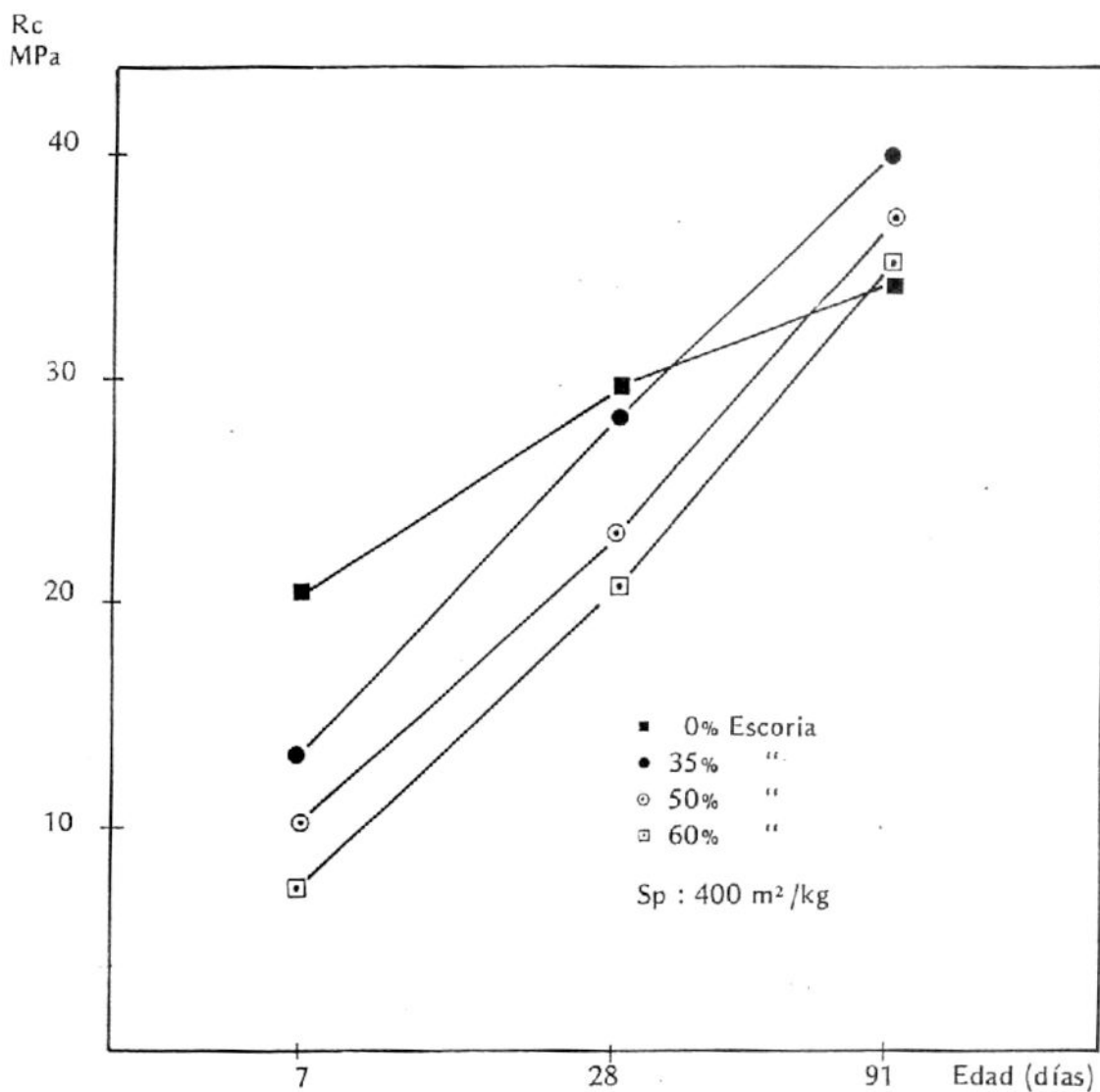


Fig. 12: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria obtenida con la caja de granulación (BB), en función de la edad. Finura de la escoria  $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

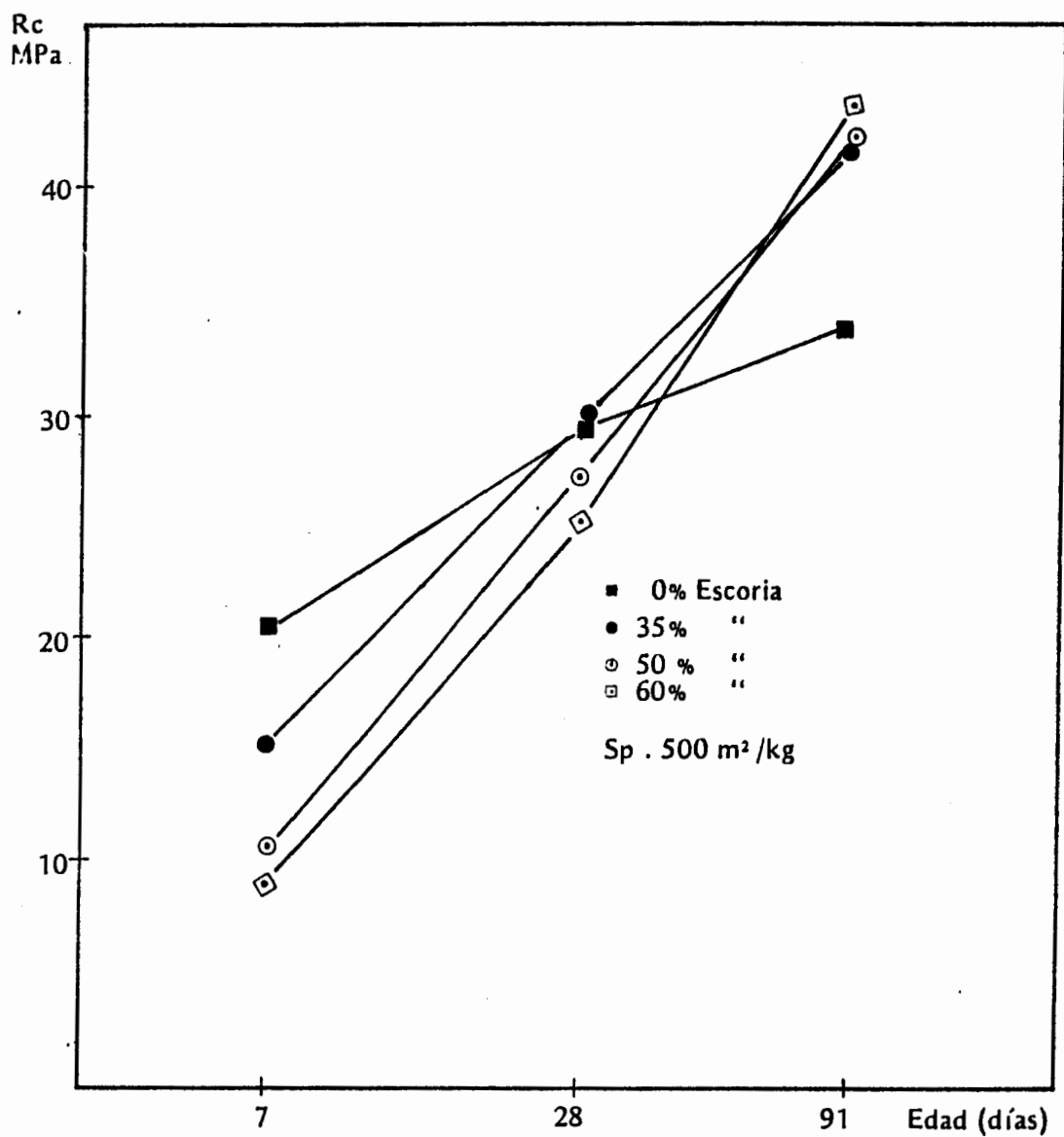
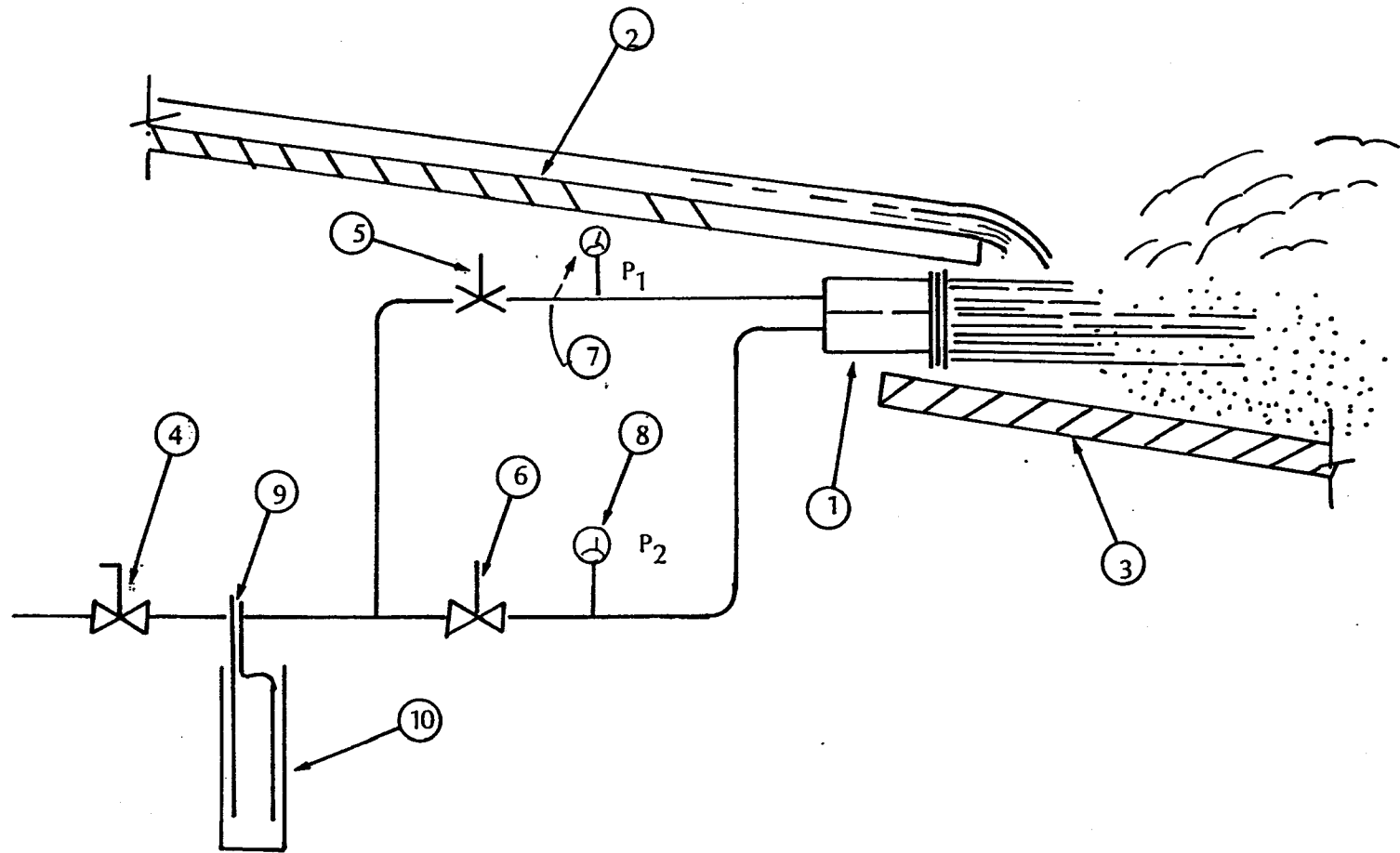


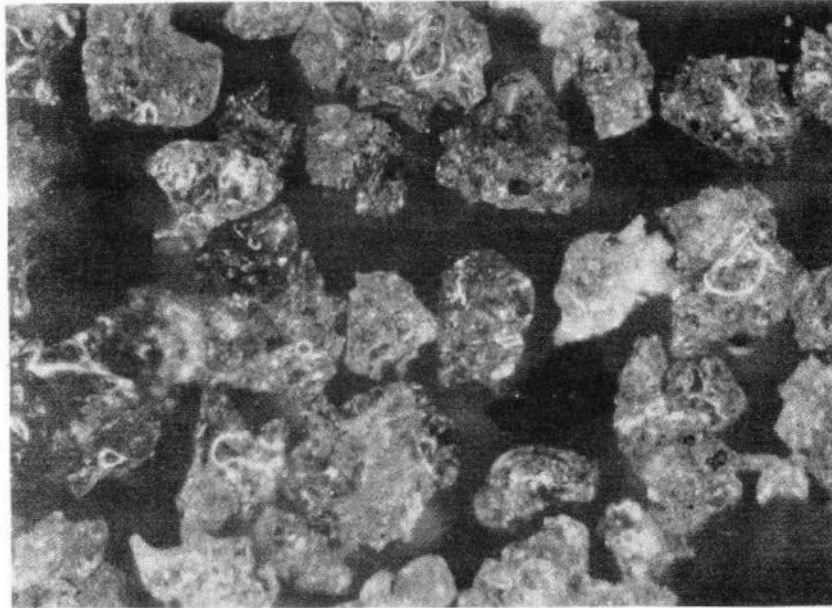
Fig. 13: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria obtenida con la caja de granulación (BB), en función de la edad. Finura de la escoria 500 m<sup>2</sup>/kg.



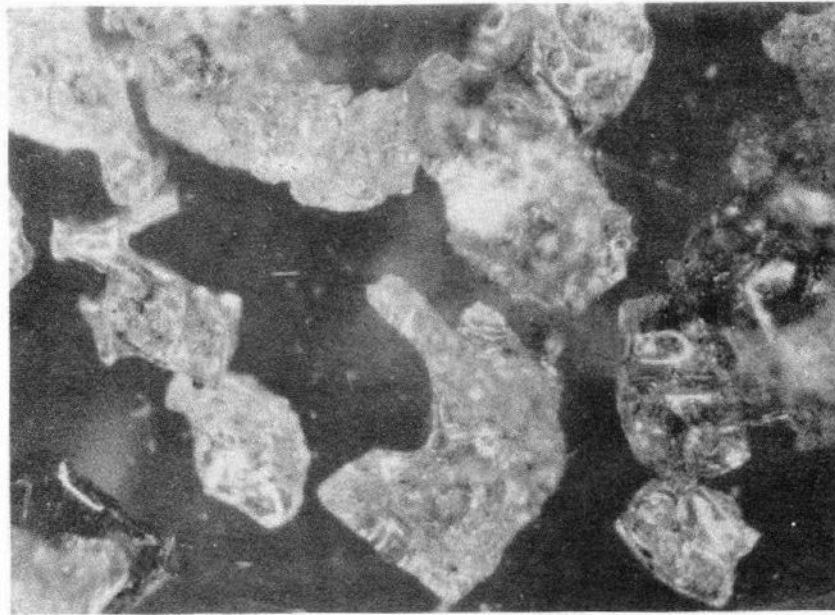
1. Caja de granulaci3n.
2. Canal de escoria líquida.
3. Canal de escoria fría
4. V3lvula principal.
5. V3lvula c3mara superior.

6. V3lvula c3mara inferior.
7. Man3metro c3mara superior.
8. Man3metro c3mara inferior.
9. Placa orificio.
10. Man3metro.

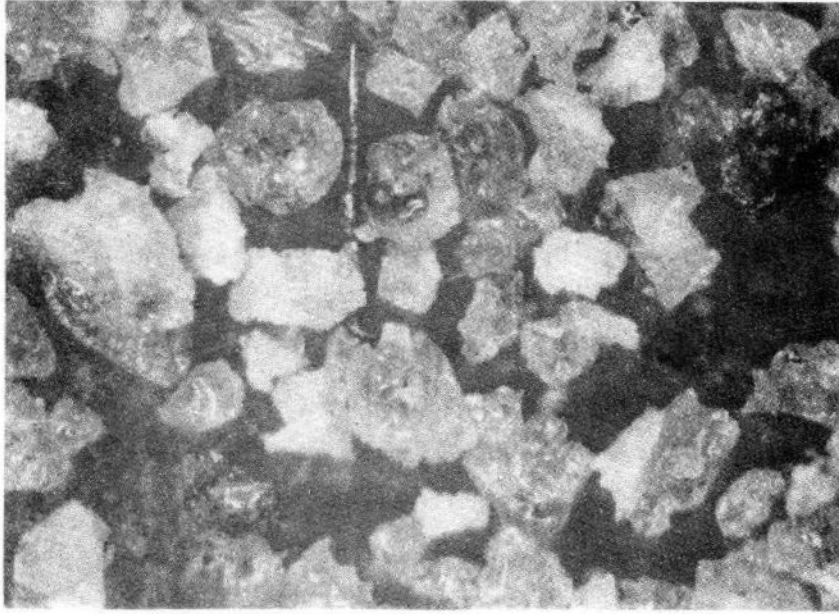
Fig. 14: Esquema de instalaci3n de la caja de granulaci3n.



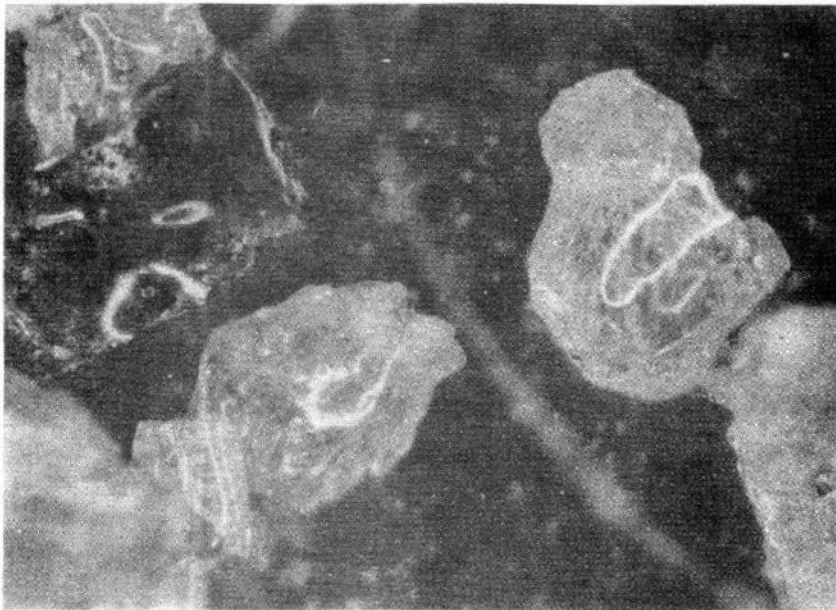
*Fig. 15-a: Muestra B.B. Microfotografía 1, x 10 aumentos: Se observan partículas de escoria con textura vítrea, transparentes, y con conclusiones metálicas. Las mismas son de formas irregulares y con fractura concoide.*



*Fig. 15-b: Muestra B.B. Microfotografía 2, x 20 aumentos: Se observan partículas de escoria con características similares a la microfotografía 15-a.*



*Fig. 16-a: Muestra C.C. Microfotografía 4, x 10 aumentos: Se observan partículas de escoria con textura vítrea, en general translúcidas y que presentan inclusiones metálicas.*



*Fig. 16-b: Muestra C.C. Microfotografía 5, x 20 aumentos: Las partículas de escoria presentan textura vítrea e inclusiones gaseosas.*

## ASPECTOS ECONOMICOS Y ECOLOGICOS

### ASOCIADOS AL EMPLEO DE EAHGM

#### RESUMEN

Se analiza la incidencia del consumo de energía en la construcción, observándose las ventajas del empleo del cemento con respecto a otros materiales.

Se describe el proceso de obtención de cemento y se estima la diferencia en el consumo de energía entre este material y la EAHGM, teniendo en cuenta todas las variables involucradas.

Se compara las ventajas relativas del empleo de la escoria de alto horno como material potencialmente cementicio con respecto a otros empleos.

Se tiene en cuenta también aspectos ecológicos y económicos asociados como costo de movimiento de material, deterioro de equipos por corrosión, etc. De este balance surgen claramente las ventajas de granular las escorias de alto horno y de su empleo en la construcción en remplazo parcial de cemento portland.

El costo de la energía influye fuertemente en el costo final del cemento; esta razón y el incremento constante en el precio de los combustibles han impulsado el uso de adiciones activas como las escorias de alto horno en remplazo parcial de cemento.

## ASPECTOS ECONOMICOS Y ECOLOGICOS

### ASOCIADOS AL EMPLEO DE EAHGM

#### 1. INTRODUCCION

De los materiales básicos de la construcción el hormigón es uno de los que requiere menos energía específica, expresada en masa de combustible/masa de material. De la energía total necesaria más del 90 % corresponde a la energía consumida en la fabricación del cemento.

Esto nos lleva a considerar que el hormigón seguirá siendo el material de más amplio empleo elaborado por el hombre; por lo tanto, teniendo en cuenta el volumen producido y lo que es más importante, el volumen potencialmente requerido por nuestro país, el consumo de energía en valores absolutos es muy importante.

Por otro lado, si se compara el costo de la energía en función del costo del producto para distintos materiales, observamos que la relación más elevada es para el cemento (1).

De lo anterior podemos deducir que la reducción del consumo de energía en la fabricación de cemento debe incidir fuertemente en su costo y por extensión, dada su influencia en el costo del hormigón y las ventajas comparativas en el uso de este material, en el costo final de la construcción, especialmente en el de la vivienda de interés social.

No es de sorprender entonces que frente a la crisis energética de la década del '70, la industria del cemento haya encarado decididamente estudios para el ahorro en el consumo de energía.

Una de las conclusiones de un extenso trabajo al respecto (2) es que el empleo de adiciones potencialmente activas representan una de las posibilidades de implementación más inmediata e importante para reducir el consumo de energía.

Si bien la práctica de utilización de estos materiales comenzó hace muchos años, el problema energético incrementó considerablemente el interés en su empleo; esto incentivó los trabajos de investigación y desarrollo, los que llevaron a un mejor conocimiento de sus propiedades.

En el caso de la escoria de alto horno granulada, su capacidad potencialmente hidráulica se conocía desde 1862 y desde mediados de la primera mitad de siglo fue empleada en importantes obras de interés ingenieril, principalmente en Europa e inclusive en Japón (3).

## 2. EVALUACION DEL CONSUMO DE ENERGIA EN LA PRODUCCION DE CEMENTO

En principio las plantas de cemento se instalan en las cercanías de los yacimientos de caliza, ya que ésta es la materia prima más importante y la disponibilidad de arcillas en general no representa un problema. En el proceso de fabricación del cemento hay una reducción muy importante de masa, por lo menos del 44 % que corresponde a la descomposición de la caliza, de acuerdo con la siguiente reacción:



Como consecuencia resulta más económico transportar el producto final a los lugares de consumo, que instalar las plantas cerca de los mismos.

El proceso de fabricación del cemento comienza con la extracción mediante explosivos de los minerales, calizas y arcillas de las canteras y finaliza con el envasamiento y despacho del cemento, de acuerdo con la secuencia del Cuadro Nro. 1.

Podemos comparar el diagrama del cuadro anteriormente mencionado con el correspondiente a una planta de molienda de escoria; Cuadro Nro. 2.

El consumo de energía de las distintas operaciones y procesos que intervienen en la fabricación del cemento no tienen un valor único ya que dependen fundamentalmente de la tecnología utilizada, capacidad de producción, antigüedad de la planta, etc. Sin embargo, estos valores pueden acotarse perfectamente. Se observa una constante declinación en los consumos específicos, tendencia que también se aprecia en nuestro país, (4) cuadro Nro. 3.

A los fines de simplicidad para el cálculo del consumo de energía, dividiremos el proceso de fabricación del cemento portland normal en tres partes: la primera, desde la extracción de las materias primas en las canteras hasta la obtención del crudo o harina, la segunda parte corresponde al proceso de clinkerización y la tercera, a la de molienda del clínker y despacho del producto final.

Los requerimientos de energía para la primera etapa, Cuadro Nro. 4, difieren si el proceso es por vía húmeda o

seca; se estima que el procesamiento de los materiales representa en promedio cerca del 10 % de la energía total para la elaboración del cemento (2).

El proceso de calcinación del crudo o harina en los hornos de clinkerización consume alrededor del 83 % de la energía total, de esta cantidad 80 % corresponde al consumo de combustible del horno.

El cálculo teórico de la energía necesaria para producir 1 kg de clinker es de 420 kcal (1.758 kJ), pero si tenemos en cuenta que en el proceso real hay pérdidas de energía prácticamente imposibles de eliminar, por ejemplo el clinker no puede ser enfriado a temperatura ambiente recuperando toda la energía almacenada por el mismo, el valor estimado está entre 2.360 kJ/kg clinker y 2.790 kJ/kg clinker según el tipo de horno. A estos valores hay que sumarle otras pérdidas, por ejemplo el calor de los gases de combustión, radiación, etc., que dependen del equipamiento utilizado, condiciones de trabajo, capacidad de procesamiento, etc.

En general el proceso de clinkerización puede ser por vía seca o húmeda, con distintas variantes dentro de cada uno dirigidas a un mejor aprovechamiento energético.

La diferencia entre ambos procesos está basada en la alimentación del crudo como un polvo o como una pasta, con una humedad del orden del 35 %. Actualmente predomina la utilización del proceso por vía seca con el sistema de precalentamiento en suspensión.

En el cuadro Nro. 5 se resumen los valores promedios estimados para distintos procesos, se puede observar que el valor de 4.186 kJ/kg clinker es muy próximo al calculado para nuestro país, de acuerdo con la producción y el consumo de combustible en 1989, cuadro Nro. 3, por lo cual tomaremos este valor para nuestros cálculos.

La etapa final del proceso de fabricación de cemento corresponde a la molienda fina del clinker con la adición de alrededor de 4 % de yeso; el material obtenido es ensilado, homogeneizado y despachado a granel o embolsado.

Distintos factores influyen en el consumo específico de energía para la molienda del clinker o la escoria. Por un lado debemos tener en cuenta la tecnología empleada para la molturación, en la que predomina el uso de molino a bolas a pesar de la tendencia creciente en el empleo de los molinos a rodillos, (roller mill).

En cuanto a la eficiencia de los molinos a bolas, los factores que afectan su rendimiento son la capacidad de molienda, el número de revoluciones óptimo en función del diámetro del molino, tamaño, tipo y cantidad de los cuerpos moledores, relación largo/diámetro del molino,

características del revestimiento, número y dimensiones de los compartimentos, entre otros.

Por otro lado, la molienda puede efectuarse en circuito abierto o cerrado; ésta última permite una granulometría más cerrada, menor sobremolienda de finos y en general mejor control de la operación.

Los molinos a rodillos tienen un consumo específico de energía menor que los molinos a bolas, a lo que hay que agregar una menor inversión y menor requerimiento de espacio; estos molinos trabajan en circuito cerrado con un separador y el aire de barrido permite el secado simultáneo y eficiente del material con la molienda a la temperatura adecuada.

La molturabilidad del material es de mayor importancia en el consumo específico de energía para la molienda, pero éste no es un valor definido para el clínker ni tampoco para la escoria. Por ejemplo en la molturabilidad del clínker tiene importancia el tiempo de almacenamiento, contenido de humedad, empleo de ayuda molienda y composición química del clínker.

También la molturabilidad de la escoria depende de distintos factores, por ejemplo la técnica de granulación, pero fundamentalmente de su composición, siendo las escorias menos básicas las de menor molturabilidad. Una premolienda rápida, con una posterior separación magnética del hierro ocluido también ayuda a disminuir la energía necesaria para la molienda.

La discusión anterior explica la diversidad de opiniones con respecto a la diferencia de molturabilidad entre estos dos materiales y a las ventajas o no de la molienda conjunta o separada en cuanto al consumo específico de energía (5).

Finalmente, una variable muy importante a considerar es el grado de molienda que se tiene como objetivo alcanzar. Para el cemento es razonable considerar como adecuada una superficie específica Blaine de 300 m<sup>2</sup>/kg, mientras que para la escoria es conveniente una molienda más fina, encontrándose conveniente una superficie específica Blaine de 400 m<sup>2</sup>/kg para la escoria de SOMISA, ya que el mayor desarrollo de resistencia que se alcanza con una finura mayor no justifica el rápido incremento en el consumo de energía con el aumento de superficie específica.

Los consumos de energía para la molienda de clínker y escoria con un molino a rodillos, estimado de la información de un fabricante (6) son de aproximadamente 77,4 kJ/kg y 86,0 kJ/kg para 300 y 400 m<sup>2</sup>/kg de superficie específica respectivamente. A estos valores se le deben sumar el consumo de energía del ventilador y separador que es del orden de 37,44 kJ/kg, resultando un consumo total de 114,84

y 123,48 kJ/kg para el clínker y para la escoria granulada respectivamente.

Determinaciones realizadas con la escoria producida por SOMISA, en proceso por vía seca, arrojaron un resultado de 121,1 kJ/kg (7), que si bien es cercano al estimado posiblemente corresponde a una molienda más gruesa, dado que solamente se informa que el tamaño es menor que 75  $\mu$ m.

Aceptando una reducción del 30 % en el consumo con respecto a la molienda tradicional (6), se tendrían los siguientes valores: 164,0 kJ/kg para clínker y 176,4 kJ/kg para la escoria.

En el procesamiento de la escoria debemos tener en cuenta la energía necesaria para eliminar el agua retenida proveniente de la granulación. El porcentaje de agua depende lógicamente del tiempo transcurrido desde la granulación hasta su procesamiento, de las condiciones de almacenamiento y de la textura de las partículas, que es función de la técnica de granulación.

Experiencias cualitativas realizadas con la escoria de SOMISA, mostraron que el porcentaje de agua retenido luego de la granulación es del orden del 18 % y que dejado drenar por 24 horas el contenido se reduce alrededor del 9% .

Para el cálculo del consumo de energía podemos tomar, como valor conservativo, un contenido del 12 % . El valor teórico por cada 1 % de humedad por kilogramo de material seco es 26,8 kJ/kg; para un 12 % esto representa 321,6 kJ/kg y si suponemos una pérdida del 20 %, el consumo de energía para el secado sería de 402 kJ/kg.

Es de señalar que un secado simultáneo con la molienda resultaría ventajosa en lo que respecta al consumo de energía; si bien esto se puede lograr con un molino convencional (8), es más apropiado por sus características de funcionamiento un molino a rodillos (9), por lo que los valores anteriores se pueden considerar como cota superior.

### 3. COSTO DE TRANSPORTE

Otro aspecto que debe ser considerado es el consumo de energía en el transporte del cemento y de la escoria, para ello debemos tener en cuenta que el baricentro del consumo de cemento se encuentra a lo largo del eje Buenos Aires - Santa Fe, pudiéndose tomar como centro San Nicolás.

Observando que la menor distancia a San Nicolás de las fábricas de mayor capacidad instalada, ubicadas en Córdoba y el centro de la Pcia. de Buenos Aires, es de

aproximadamente 480 km, podemos estimar que el acortamiento de la distancia, utilizando la escoria producida por SOMISA, es en promedio de 240 km.

El requerimiento de energía para el transporte de cemento por camión, medio por el cual se transporta el 81 % del cemento producido en el país (4), ha sido estimado en 1,5 kJ/kgkm según la información bibliográfica (2), pero suponiendo un transporte con semiremolque a granel se ha estimado un consumo de 0,37 kJ/kgkm que para 240 km representa un ahorro de energía de 89 kJ/kg.

En el cálculo anterior no se han tenido en cuenta otros factores concurrentes como conservación de caminos, ya que se trata de tránsito pesado, amortización de equipos, etc.

#### 4. AHORRO ENERGETICO Y EVALUACION ECONOMICA

Con los valores anteriores podemos estimar los consumos de energía específicos para la obtención de cemento portland normal y escoria de alto horno granulada molida, obteniéndose los valores que se indican en el Cuadro Nro. 6.

Si se utilizara toda la producción de escoria de los altos hornos, que en total representa 537.000 t/año y considerando que el alto horno Nro. 2 de SOMISA granule la escoria que actualmente enfría el aire, el ahorro de energía total, si esta escoria se utilizara en reemplazo parcial de cemento portland, sería de prácticamente 2.600.000 GJ, equivalente a 59.150 t fuel oil por año, considerando un calor de combustión de 43.953 kJ/kg para el fuel oil.

En términos económicos este ahorro en combustible representa alrededor de 9.500.000 U\$S anuales, considerando para el fuel oil un precio de exportación de 160 U\$S/t.

Los valores anteriores deben considerarse de mínima ya que no se tuvo en cuenta la reducción de costos correspondientes a la diferencia en el orden de magnitud entre la complejidad de producir una tonelada de cemento portland normal y una tonelada de escoria granulada molida, fundamentalmente en equipamiento, instalaciones, mano de obra, control, etc.

## 5. OTROS USOS PARA LA ESCORIA DE ALTOS HORNOS

El ahorro energético y las ventajas económicas calculadas anteriormente deben compararse con las otras alternativas de uso de la escoria producida en los altos hornos.

La escoria de altos hornos granulada, es decir con propiedades hidráulicas latentes, tiene una granulometría similar a la de una arena gruesa, módulo de finura, mayor de 3, pudiéndose utilizar por lo tanto como agregado fino en morteros y hormigones. Los ensayos de laboratorio realizados con este fin demostraron que los requerimientos de agua se incrementan con respecto a los de una arena gruesa u "oriental", esto se puede atribuir a una mayor porosidad y rugosidad que afecta negativamente la trabajabilidad. No se observó ninguna ventaja en cuanto al desarrollo de resistencia.

Otros empleos posibles de la escoria granulada es para el mejoramiento de suelos destinados a la agricultura y en la estabilización de suelos para caminos vecinales o en capas estructurales de pavimentos flexibles.

Además de las aplicaciones anteriormente mencionadas existen otras posibilidades de uso de las escorias granuladas, por ejemplo, prefiltro en drenajes, como aporte de calcio en alimentos balanceados, etc., pero solamente podrían representar un porcentaje muy reducido del volumen total de la escoria disponible.

La escoria de alto horno enfriada al aire, triturada y clasificada es utilizada como agregado grueso en hormigón, en la construcción de bases y sub-bases, concretos asfálticos y sellados superficiales, balasto para ferrocarril, rellenos, etc. En general podemos decir que puede reemplazar a la piedra partida en la mayor parte de los casos de empleo de este material.

Una alternativa muy interesante, no muy extendida y no empleada en nuestro país es la peletización o expansión de la escoria, proceso desarrollado originariamente en Canadá por la National Slag Ltd. de Hamilton y que fuera implementado en Francia como Proceso Galex. Como el enfriamiento es relativamente rápido, ayudado por inyección de agua, las partículas más finas tienen estructura vítrea y por lo tanto poseen propiedades similares a la escoria granulada.

El uso más apropiado de la escoria peletizada es como agregado liviano para hormigones, en reemplazo de arcilla expandida u otros materiales de origen natural.

Desde el punto de vista económico cualquiera de los empleos de las escorias de altos hornos mencionados anteriormente representan un valor económico muy inferior a su

utilización como material potencialmente hidráulico; así por ejemplo la relación entre el precio del cemento portland normal y el de la piedra partida están en una relación superior de 10 a 1. Si bien la zona de influencia de la planta de SOMISA, donde uno de los altos hornos produce escoria enfriada al aire, no dispone de agregados naturales y este podría ser un argumento en favor de la producción de este material, como vimos anteriormente, también el cemento debe ser transportado de las zonas proveedoras de la piedra partida, dándose por lo tanto, en lo que hace al transporte, una situación similar.

## 6. ASPECTOS ECOLOGICOS

Por último, pero no menos importante, es necesario analizar los aspectos ecológicos asociados con los distintos métodos de procesamiento de la escoria líquida que se produce en un alto horno.

La escoria granulada se produce por el enfriamiento brusco de la escoria líquida y de acuerdo con la técnica empleada, por ejemplo en SOMISA y Altos Hornos Zapla, queda sumergida en agua, alcanzando de este modo una temperatura muy próxima a la ambiente a los pocos segundos de su evacuación. En este proceso se produce un gran volumen de vapor de agua y también la formación de dióxido de azufre y posiblemente vestigios de sulfuro de hidrógeno. Esta producción de gases y vapores dura el tiempo de escoriado y se utilizan distintas técnicas para reducir la contaminación ambiental, incluso el reciclado del agua de enfriamiento.

Uno de los problemas más serios que producen estos gases, desde el punto de vista económico, es la corrosión de equipos e instrumental cercanos al alto horno.

En el método de enfriamiento al aire la escoria líquida, a una temperatura de alrededor de 1500 °C, se acumula en una superficie limitada por dos paredes y se deja enfriar por conducción y radiación. Este proceso de enfriamiento es lento y se ayuda con un rociado de agua, que además permite el resquebrajamiento de la masa sólida, que se retira con una topadora de carga frontal cuando la temperatura disminuye lo suficiente.

Durante este proceso se produce la emanación de gases sulfurosos, vapor de agua y la radiación de calor, en forma prácticamente constante ya que por la lentitud del enfriamiento se debe trabajar alternativamente con dos fosas de escoriado.

Las posibilidades técnicas para reducir esta contaminación son prácticamente imposibles de implementar y las operaciones involucradas en el manejo de esta escoria son

mucho mas engorrosas y probablemente más costosas que en el caso de la escoria granulada.

Finalmente debemos considerar el proceso de expansión y peletización de la escoria o proceso Galex; en este caso el problema más serio que se presenta es la formación de lana de vidrio, peligrosa para los operarios y difícil de eliminar. En este caso la evacuación de la escoria se ve facilitada por su granulometría.

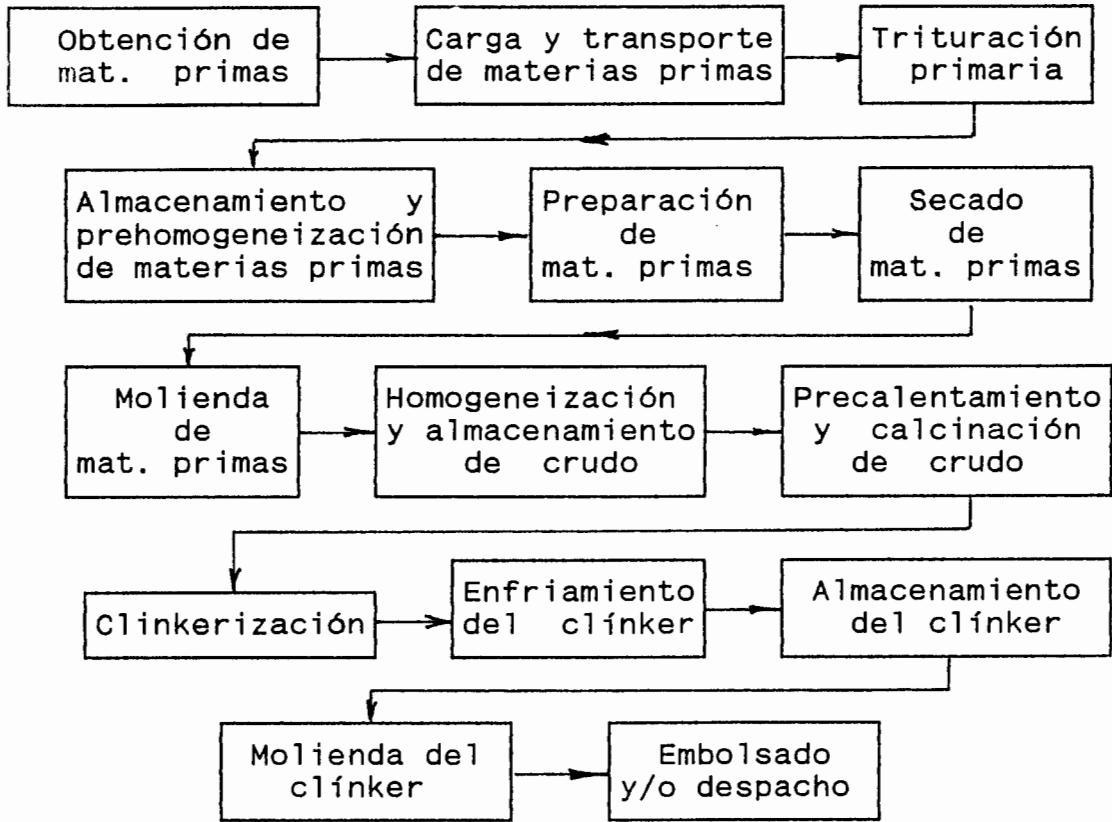
En resumen podemos decir que desde el punto de vista de la contaminación ambiental, facilidad de evacuación y economía del proceso, la granulación de la escoria es la más ventajosa de las técnicas alternativas de tratamiento.

## REFERENCIAS

1. Brown, P. W.; Clifton, J. R.; Frohnsdorff, G., "Energy Conservation Through the Facilitation of Increased Blended Cement Use" Energy Research and Development Administration, NBSSIR 76-1008, December, 1975.
2. Portland Cement Association, "Energy Conservation Potencial in the Cement Industry" Federal Energy Administration, Washington D.C. 20461, Conservation Paper Number 26, 1975.
3. Ozaki, S.; Sugata N. "Sixty Year Old Concrete in a Marine Environment" Concrete in Marine Environment, Proceedings Second International Conference St. Andrews by the sea, Canada, Ed. V. M. Malhotra ACI SP-109 pp. 587-597, 1988.
4. Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, Anuario 1989, Buenos Aires, Argentina.
5. Longo, A., Fernandez Luco, L. "Propiedades Mecánicas y Molienda Conjunta de Cementos de Escoria de Alto Horno". Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. IX Reunión Técnica, Buenos Aires, 31 de octubre al 3 de noviembre 1989.
6. "New Energy Saving Vertical Roller Mill for Cement" JCI News, Japan Consulting Institute, December 1988.
7. D.G.F.M. "Complejo Industrial "Ramallo - San Nicolás" Informe Interno, Octubre 1967.
8. Hilgard, G. "Das neue Hochofenzement Mahlwerk Duisburg" ZKG 29, 11, 1976.
9. Duda, Walter H. "Cement Data Book" 2da. Edición Macdonald & Evans London, 1978.

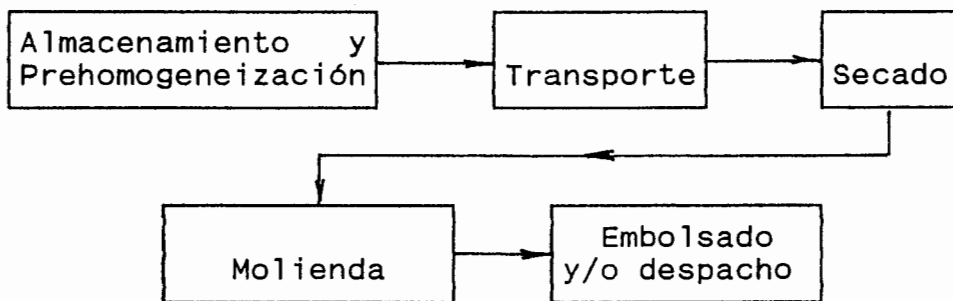
CUADRO Nro. 1

Diagrama esquemático del proceso de fabricación de cemento portland



CUADRO Nro. 2

Diagrama esquemática de una planta de molienda de escoria de altos hornos granulada



CUADRO Nro 3

Evolución del consumo específico de energía para el proceso de obtención del clínker

Año	Producción	kJ/kg
1970	4.743.375	8.308
1975	5.463.590	6.823
1980	7.132.770	5.839
1985	4.629.940	4.730
1989	4.448.931	4.228

CUADRO Nro. 4

Requerimiento de energía promedio para la obtención del crudo (kJ/kg clínker)

P r o c e s o		Húmedo	Seco
Extracción	Explosivo	10,17	10,17
	Combustible	18,63	18,63
	Electricidad	29,64	20,93
Trituración, secado	Combustible	-	372,13
	Electricidad	33,61	54,92
Molienda	Electricidad	352,46	454,18
Homogeneización	Electricidad	23,90	48,81
T o t a l		468	980

CUADRO Nro. 5

Valores promedios para distintos procesos de clinkerización

P r o c e s o		Consumo (kJ/kg clínker)
Húmedo		5.442
Seco	s/precalentamiento	4.186
	c/precalentamiento	3.349

CUADRO Nro. 6

Consumos específicos de energía (kJ/kg)

O p e r a c i ó n	Cemento Portland	Escoria de Alto Horno Granulada Molida
Obtención del crudo	980	-
Clinkerización	4.186	-
Molienda fina/secado	164	578
Total	5.330	578
Diferencia	4.752	
Diferencia en transporte	89	
Ahorro de energía final	4.841 kJ/kg escoria	

RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL EMPLEO DE LA  
EAHGM Y CEMENTOS DE ESCORIA DE ALTOS HORNOS

RESUMEN

Cuando se introduce en el mercado un material con el cual el usuario no tiene una experiencia previa, es necesario evitar que se cometan errores en su empleo por las correspondientes pérdidas económicas directas y las consecuentes a la desacreditación del producto, que afecta en definitiva al proveedor del mismo.

A los efectos de reducir al mínimo esta posibilidad, se ha confeccionado una guía de recomendaciones que consideramos útil tanto para el proveedor como para el usuario y que no representa ninguna dificultad cumplimentar.

Si bien estos cementos se caracterizan por una mayor versatilidad con adecuado margen de seguridad, es conveniente recurrir al asesoramiento profesional para lograr el máximo aprovechamiento de las ventajas que representa su utilización.

RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL EMPLEO  
DE LA EAHGM Y CEMENTOS DE ESCORIA DE ALTOS HORNOS

1. INTRODUCCION

El empleo de la escoria de altos hornos granulada molida como adición potencialmente hidráulica o la de cementos de escoria de altos hornos no introduce un problema adicional, por lo contrario, en general representa ventajas con respecto al empleo exclusivo de cemento portland normal. No obstante es necesario tener en cuenta la experiencia que a nivel internacional se ha reunido sobre este material para su correcta utilización.

En base a los conocimientos acumulados en el desarrollo del proyecto "Escoria de Altos Hornos - Argentina" sumados a las conclusiones obtenidas a través de la bibliografía, se ha elaborado esta guía de recomendaciones para la producción, almacenamiento y utilización de la EAHGM y de los cementos de escoria de altos hornos.

2. PRODUCCION

2.1. Secado

Luego del proceso de granulación, la escoria retiene una cierta cantidad de agua que debe ser eliminada antes de la molienda fina.

En la operación de secado es conveniente evitar que la escoria alcance temperaturas superiores a 500 °C a fin de que no se produzca la desvitrificación de la misma, en perjuicio de sus propiedades hidráulicas. Desde un punto de vista económico, también es aconsejable que no se alcancen temperaturas altas.

2.2. Molienda

Si bien los cementos de escoria, del mismo modo que el cemento portland normal, tienen límites mínimos de finura definidos por las respectivas normas, es aconsejable una superficie específica Blaine del orden de 350/400 m<sup>2</sup>/kg, según el contenido de escoria .

Del mismo modo, la escoria de altos hornos granulada molida debe tener una superficie específica preferentemente superior a 400 m<sup>2</sup>/kg, aunque en realidad, se debería adecuar la finura a las características deseables para el cemento en función de la obra en la que se utilizará este producto.

Además del valor de la superficie específica, es conveniente conocer el retenido en malla de 45  $\mu\text{m}$ , ya que tamaños mayores no tienen una contribución significativa al desarrollo de resistencia, principalmente en la molienda conjunta escoria/clínker.

### 2.3. Eliminación de hierro metálico

La escoria está frecuentemente contaminada con bajos contenidos de hierro metálico pero a veces éste puede alcanzar valores anormales. Este hierro se "granula" simultáneamente con la escoria y muchas veces queda ocluido, por lo que es conveniente además de su separación previa a la molienda una separación posterior antes del clasificador. La presencia de hierro, además de no contribuir a la resistencia mecánica y reducir la masa efectiva de escoria que se incorpora al hormigón, puede ocasionar problemas de inestabilidad en las mezclas endurecidas.

## 3. ALMACENAMIENTO

Para los cementos "con" o "de" escoria de altos hornos, se deben tomar las mismas precauciones que para con el cemento portland normal, en lo que respecta al almacenamiento. Se debe evitar su hidratación por efecto de la humedad ambiente o proveniente de otras fuentes.

Con las escorias de altos hornos granuladas molidas estudiadas no se ha encontrado aglomeración ni pérdida significativa de actividad hidráulica luego de varios años de almacenamiento en tambores, sin ninguna precaución especial.

No obstante, no es conveniente el contacto con agua, ya que por hidrólisis del  $\text{CaS}$  se forma  $\text{Ca(OH)}_2$ , se podría producir la activación de las reacciones de hidratación de la escoria.

Se debe evitar también el contacto con cemento portland, cal, yeso u otros materiales, ya que entonces se presentarían los mismos problemas de almacenamiento que presenta el cemento portland normal.

## 4. DOSIFICACION

### 4.1. Cemento Portland con Escoria de Alto Horno

El comportamiento de los cementos portland con un contenido relativamente bajo de escoria, menos del 35 %, es similar al del cemento portland normal, siendo sus

características muy dependientes de las del cemento portland. Sin embargo, podemos esperar que se manifieste un menor desarrollo de resistencia a cortas edades, lo que se podría contrarrestar elevando la finura de molido del cemento mezcla.

#### 4.2. Escoria de Alto Horno Granulada Molida

Si se incorpora la escoria de alto horno granulada molida directamente, esto es, como un componente más de la mezcla, debe tenerse en cuenta el nivel de remplazo parcial de cemento al dosificar el hormigón.

Es importante conocer el comportamiento de la escoria para ese nivel de remplazo con el cemento portland asociado en la mezcla, la evolución de resistencia en función de la edad y los requerimientos especiales del hormigón.

En cuanto a la estimación de la relación agua/cemento, ésta debe interpretarse como agua/(cemento + escoria). Generalmente la escoria permite trabajar con asentamientos algo menores para igual trabajabilidad, favoreciendo una disminución en la relación agua/cemento. Si se mantiene constante la consistencia, se consigue mejorar las condiciones de colocación.

#### 4.3. Uso de Aditivos

Los aditivos reductores de agua, incorporadores de aire y acelerantes de fraguado utilizados en hormigones de cemento portland normal son, en general, aptos para ser utilizados con cementos de escoria, pero es necesario verificar, en cada caso, la compatibilidad y la dosificación de aditivo necesaria para lograr el efecto deseado.

Una mención particular debe hacerse para los reductores de agua de alto rango o superfluidificantes, en cuyo caso es imprescindible estudiar su compatibilidad y dosificación.

En algunos casos, como por ejemplo, plastificantes e incorporadores de aire, se ha encontrado una disminución en el consumo de aditivo con cementos de escoria, pero no puede inferirse una regla general al respecto.

### 5. CURADO

#### 5.1. Humedad

Por el desarrollo de resistencia a corta edad más lento, es necesario asegurar durante un tiempo más

prolongado un nivel mínimo de humedad que evite la desecación, ya que de lo contrario, se perdería gran parte del incremento posterior de resistencia, mucho más importante en estos cementos que cuando se utiliza cemento portland normal.

Este tipo de precauciones es más importante en estructuras de espesor reducido y bajo condiciones tales que aceleran el secado.

## 5.2. Temperatura

Las temperaturas bajas tienen un efecto negativo más marcado para los cementos de escoria que para el cemento portland normal, por lo que se deben tomar precauciones en el caso de hormigonado a temperaturas inferiores a los 10°C, como por ejemplo, disminuir la disipación del calor generado en la hidratación, prolongar el tiempo de curado, etc.

## 6. PROTECCION DE ARMADURAS

La menor velocidad de hidratación de los cementos de escoria a edades tempranas, lleva implícita un mayor avance de la carbonatación de estos cementos con respecto a los cementos portland normal. Sin embargo, a edades avanzadas, su comportamiento es similar.

Por las razones anteriores, cuando se emplean estos cementos es importante respetar los espesores de recubrimiento establecidos por los códigos de práctica, a los fines de que el frente de carbonatación no alcance las armaduras. A veces, es conveniente incrementarlos para prevenir cualquier eventualidad.

## 7. CEMENTO DE ALBAÑILERIA

La activación de la escoria granulada molida con cal aérea o hidráulica es recomendada en la construcción de bases, entrepisos, subrasantes, etc., es decir donde se pueda mantener una humedad prolongada.

El uso como revestimiento o como material de asiento de la escoria activada con cal requiere el uso de un aditivo incorporador de aire y plastificante, correctamente dosificado.

En este caso, las recomendaciones en cuanto al curado, Punto 4.1, deben ser tenidas en cuenta estrictamente, ya que la resistencia es aportada solamente por la hidratación

de la escoria, en el caso que no se incorpore cemento portland.

La velocidad de carbonatación es importante en este caso, principalmente si el mortero no está totalmente saturado.

A la fecha, no se ha evaluado el comportamiento a largas edades bajo condiciones atmosféricas, por lo que se recomienda utilizarlo con precaución en estos casos.

#### 8. TIEMPO DE FRAGUADO

El tiempo necesario para el fraguado inicial de los cementos de escoria de alto horno es mayor que para el cemento portland normal; esta diferencia no representa un inconveniente importante y en cambio puede aprovecharse esta característica para evitar juntas de trabajo en épocas de alta temperatura ambiente.

#### 9. COLORACION

En general, cuando la escoria de alto horno es de buena calidad, presenta un color ámbar claro, con mayoría de partículas transparentes. Esto se manifiesta en la coloración de morteros y hormigones, que es notablemente más clara que cuando se emplea cemento portland normal, diferencia que se acentúa cuando aumenta el porcentaje de escoria.

Las superficies recién desmoldadas o las zonas expuestas luego de la rotura (en ensayo a flexión, p.ej.) muestran una coloración verde-azulada que desaparece definitivamente en contacto con el aire en forma relativamente rápida.

#### 10. USOS ESPECIALES

Son conocidas las ventajas que representa el empleo de los cementos de escoria en casos especiales, p.ej. cuando se necesita un hormigón resistente al ataque de sulfatos, en contacto con agua de mar, cuando existe posibilidad de reacción alcali-árido, etc. Para estos casos, se debe evaluar el comportamiento de la dupla cemento portland normal - escoria de alto horno granulada, el porcentaje de remplazo, la finura, etc.

No se puede asegurar resultados favorables para cualquier valor de estas variables, las que deben ser cuidadosamente analizadas para cada caso en particular.