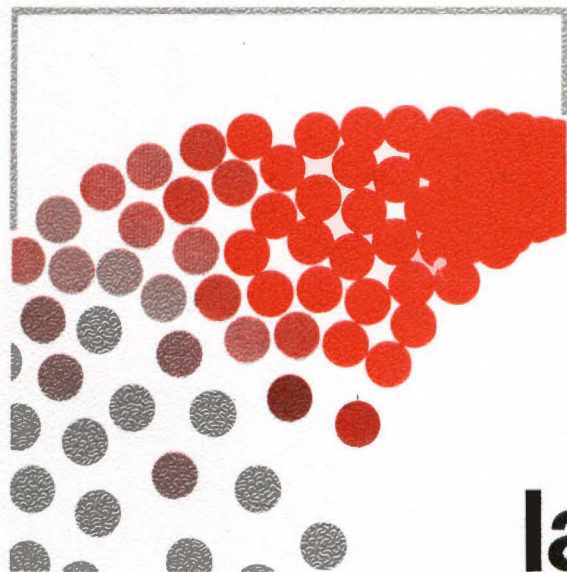




Seminario latinoamericano sobre utilización de escorias de Altos Hornos en la construcción

MEMORIAS

**18-20 de junio de 1991
Buenos Aires - Argentina**

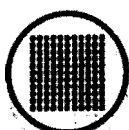
Seminario latinoamericano sobre utilización de escorias de Altos Hornos en la construcción

MEMORIAS

18-20 de junio de 1991

BUENOS AIRES

ARGENTINA



INTI

Subsecretaría de Industria y Comercio
INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL

CIID



CANADA

CENTRO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO

Este Seminario ha sido organizado por:

- Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI, Argentina.
- International Development Research Centre, IDRC, Canadá, dentro del Proyecto: "Escoria de Altos Hornos - Argentina" y de acuerdo con el Convenio INTI - IDRC.
- Director del Proyecto: Dr. Adolfo LONGO

Auspiciado por:

- Sociedad Mixta Siderurgia Argentina - SOMISA
- Cámara Vivienda Económica de la Rep. Argentina - CAVERA
- Instituto de la Vivienda de la Prov. de Buenos Aires-IVBA
- Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón - AATH
- Establecimiento Altos Hornos Zapla - DGFM
- Subsecretaría de Vivienda y Ordenamiento Ambiental - SVOA
- Cámara Argentina de la Construcción - CAC
- Universidad Tecnológica Nacional - UTN
- Instituto del Cemento Portland Argentino - ICPA
- Secretaría de Ciencia y Tecnología - SECyT

Agradecimiento:

A las autoridades y en particular al personal de Relaciones Públicas de la Empresa Sociedad Mixta Siderurgia Argentina S.A. el apoyo brindado para la realización de este Seminario. Al personal del Sector Ediciones del INTI, donde se preparó el material gráfico e impresión de estas memorias.

PROLOGO

Como consecuencia de un convenio entre las empresas Agua y Energía Eléctrica, la Sociedad Mixta Siderurgia Argentina y el Instituto Nacional de Tecnología Industrial, se inició en este último, hace ya diez años, el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento de las cenizas volantes y las escorias de altos hornos en la obtención de cementos mezcla.

Posteriormente se continuaron los estudios sobre las escorias granuladas de altos hornos; los resultados de estos trabajos contribuyeron como antecedentes al Proyecto: "Escorias de Altos Hornos - Argentina" desarrollado dentro de un Convenio entre el Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI y el International Development Research Center, IDRC, del Canadá.

En Argentina, el empleo de la escoria de alto horno granulada estaba limitado a su incorporación, hasta un 10 % en masa, durante la molienda de clínker para la obtención de cemento portland normal, a pesar de la existencia de la norma "Cemento Portland con Escoria de Alto Horno" que contemplaba la incorporación desde 25 hasta 65 % de escoria.

Recientemente esta norma ha sido remplazada por otra de igual título que permite la incorporación de más del 10% hasta 35 % de escoria y la norma "Cemento de Escoria de Alto Horno" que contempla un contenido de más de 35 % hasta 75 % de escoria. Ultimamente se ha lanzado al mercado el cemento portland con escoria de alto horno.

El objetivo final del Proyecto "Escoria de Altos Hornos - Argentina" fue aportar los conocimientos técnicos necesarios para que este co-producto de la industria siderúrgica se utilice en forma apropiada y que las ventajas técnico-económicas que representa su empleo como material potencialmente hidráulico lleguen a todos los sectores de la comunidad; así por ejemplo, que su costo, significativamente menor, se traslade al de la construcción de viviendas económicas.

Para que esto sea posible es necesario que los sectores interesados, principalmente el de la construcción, tomen conocimiento de los resultados obtenidos y de las posibilidades que se presentan. Con esta premisa se planificó la realización de este seminario de divulgación.

Con el fin de intercambiar experiencia con otros países de Latinoamérica que desde hace tiempo emplean estos cementos y hacer partícipes de ésta a los que aún no lo han implementado, se ha invitado a investigadores de aquellos

países que trabajan en la producción, investigación, desarrollo y aplicación de los cementos de escoria. De esta manera, se exponen en este seminario trabajos referidos a la producción de cementos de escoria, al empleo de estos en obras de importancia por sus requerimientos especiales, desarrollos donde se emplean diferentes activadores de la capacidad hidráulica potencial de la escoria, estudios a nivel de laboratorio, utilización en hormigón celular, etc.

A estas contribuciones debemos agregar la del Canadá, a través de investigadores del CANMET (Canadian Center for Mineral and Energy Technology). Energy, Mines and Resources, Canadá. En particular, la participación del Dr. V. M. Malhotra, de reconocida autoridad en el campo de la tecnología del hormigón y en el empleo de subproductos industriales en la construcción, a quien agradecemos su participación en este Proyecto y el entrenamiento proporcionado a investigadores argentinos en el laboratorio que él dirige.

El Proyecto "Escoria de Altos Hornos - Argentina" y este Seminario no hubieran sido posible sin el apoyo del International Development Research Centre - IDRC, de Canadá. Desde sus más altas autoridades, quienes depositaron su confianza en nosotros, hasta los funcionarios que siguieron de cerca el desarrollo de los trabajos y que, con amplitud de criterio y experiencia, comprendieron, aconsejaron y nos estimularon frente a las dificultades encontradas; a todos ellos, nuestro profundo agradecimiento.

Dr. Adolfo LONGO
Director del Proyecto
"Escoria de Altos Hornos-Argentina"

CONTENIDO

PROLOGO	iii
PROYECTO ESCORIA DE ALTOS HORNOS - ARGENTINA. Resumen Adolfo Longo y Luis Fernandez Luco	1
ANTECEDENTES DEL PROYECTO ESCORIAS DE ALTOS HORNOS - ARGENTINA	3
CARACTERIZACION DE LAS ESCORIAS DE ALTOS HORNOS ...	19
CEMENTOS. MEZCLA EN BASE A ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA	27
EMPLEO DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA MOLIDA EN LA CONSTRUCCION DE UNA VIVIENDA	63
INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LOS CEMENTOS MEZCLA	99
EVALUACION DE LA ESCORIA PRODUCIDA POR EL ESTABLECIMIENTO ALTOS HORNOS ZAPLA	141
ASPECTOS ECONOMICOS Y ECOLOGICOS ASOCIADOS AL EMPLEO DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA MOLIDA	181
RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL EMPLEO DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA MOLIDA	195
HORMIGONES CELULARES EN BASE A ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO Romeo E. Miretti, Jorge A. Citroni, Rudy O. Grether y Carlos R. Passerino	203
O EMPREGO DA ESCORIA DE ALTO FORNO GRANULADA EM CIMENTOS PORTLAND NO BRASIL Mario William Esper, Vahan Agopyan	239
NOVOS EMPREGOS DA ESCORIA DE ALTO FORNO: ESTUDIOS REALIZADOS NO BRASIL María A. Cincotto, Vahan Agopyan	256
USE OF GRANULATED BLAST FURNACE SLAG IN CONCRETE IN CANADA - A REVIEW V. M. Malhotra	277

ALKALI ACTIVATED BLAST-FURNACE SLAG CONCRETES: PROPORTIONING AND PROPERTIES E. Douglas, A. Bilodeau , V. M. Malhotra	295
PRODUCCION DE CEMENTOS CON ESCORIAS DE ALTOS HORNOS Anibal Avendaño Cruz	308
CEMENTOS SIDERURGICOS UTILIZADOS EN CHILE Arnoldo Bucarey C.	357
CONCRETO CON CEMENTO SIDERURGICO María del Pilar Velasco B.	393
ESTUDIO DE UNA ESCORIA SIDERURGICA PRODUCIDA EN MEXICO PARA SU USO COMO MATERIAL CEMENTANTE Claudio Eberhardt, David López	415
USO DE ESCORIAS DE ACERIAS ELECTRICAS EN LA PRODUCCION DE CEMENTO DE ESCORIA Y ARRABIO Nicolás O. Guevara	421

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 enfriaba 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 la 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 clinker, 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^a 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 Huttenzement 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 ₂	3,57	1,63	1,30	1,88	1,29	1,36	1,63	0,85	1,94
Al ₂ O ₃	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

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

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

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

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

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

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

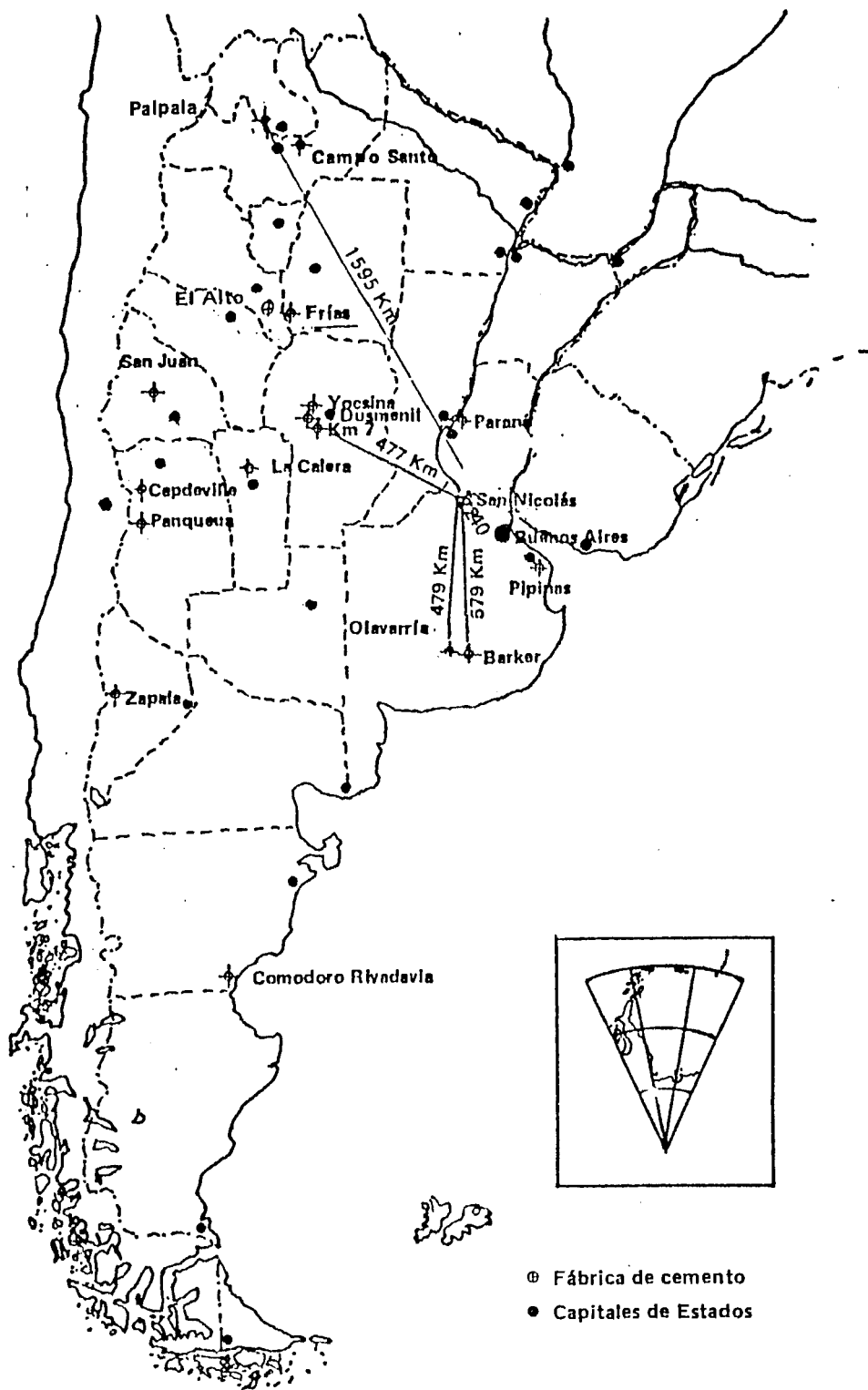


Fig. 1; ubicación de los Altos Hornos y distancia a San Nicolás de las fábricas de cemento más cercanas.

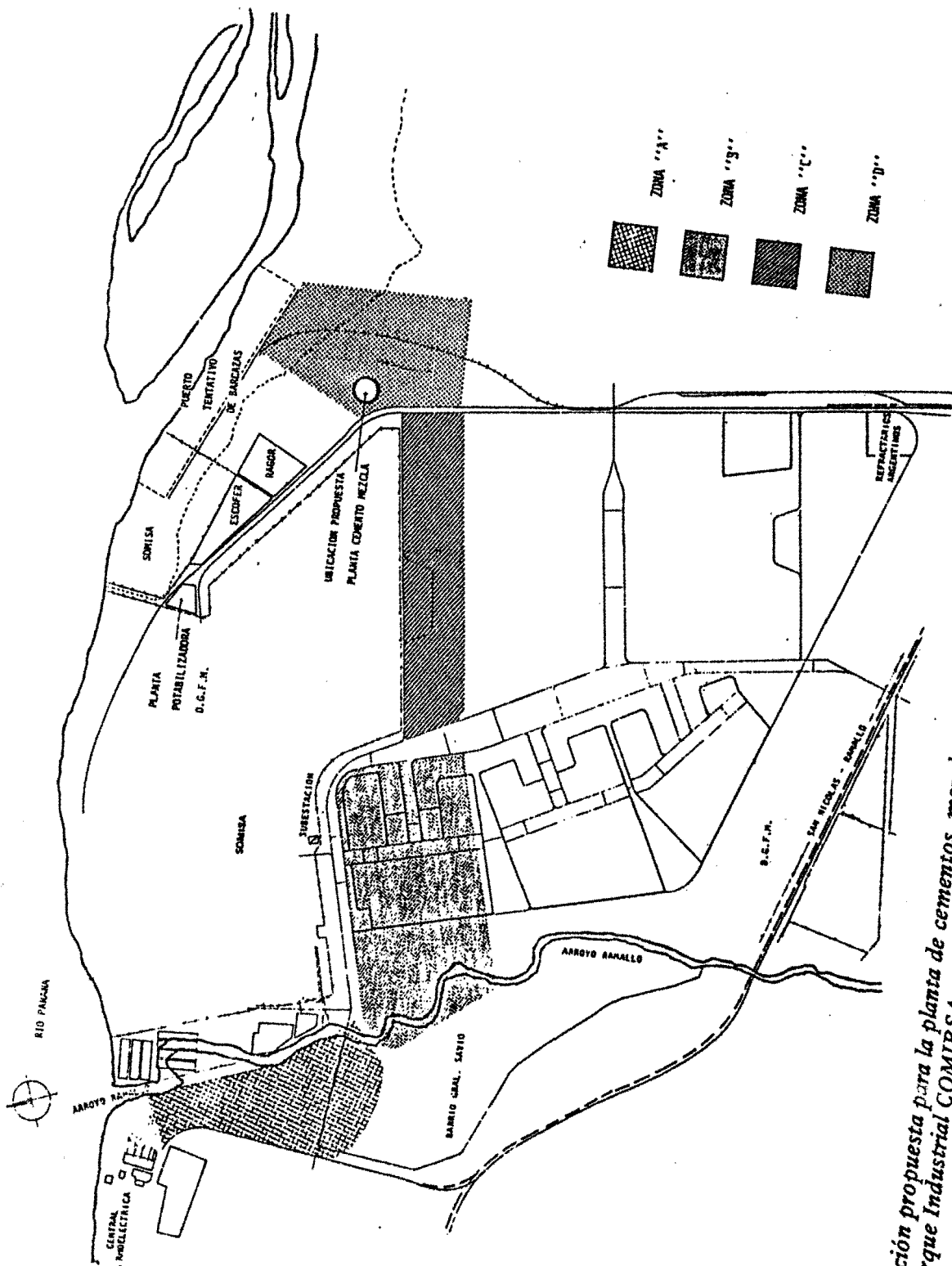


Fig. 2: Ubicación propuesta para la planta de cementos, mezcla, dentro del Parque Industrial COMIRSA.

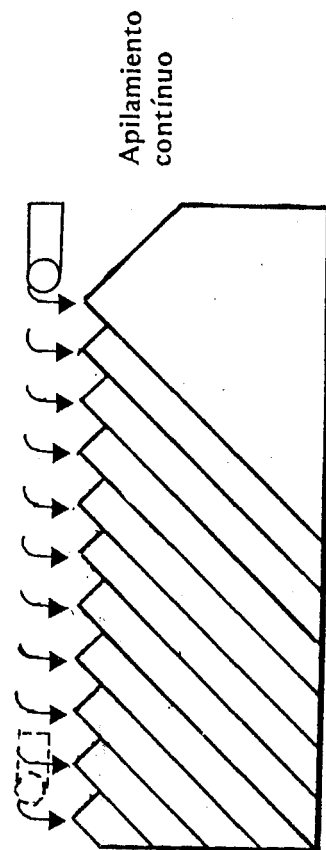
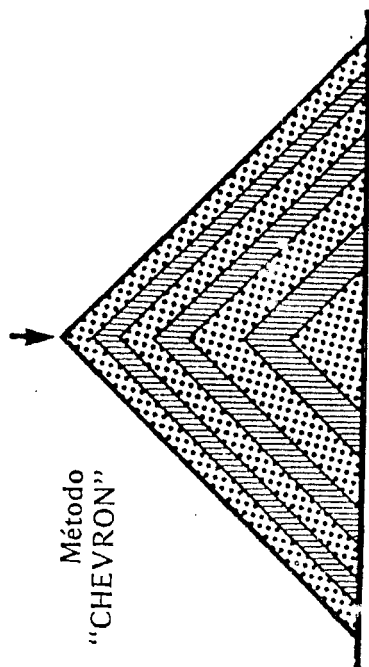
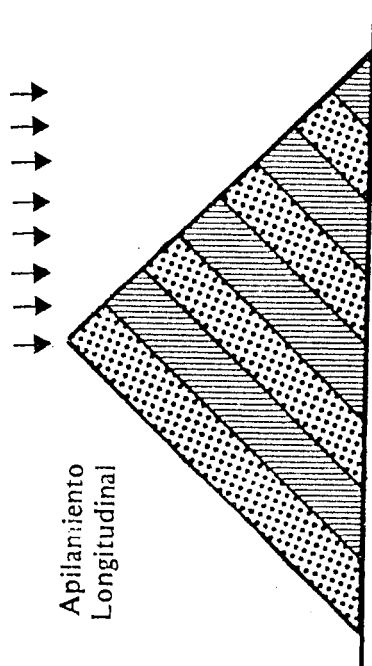
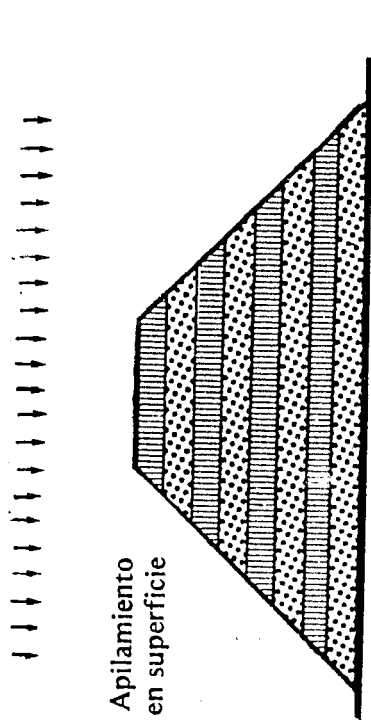
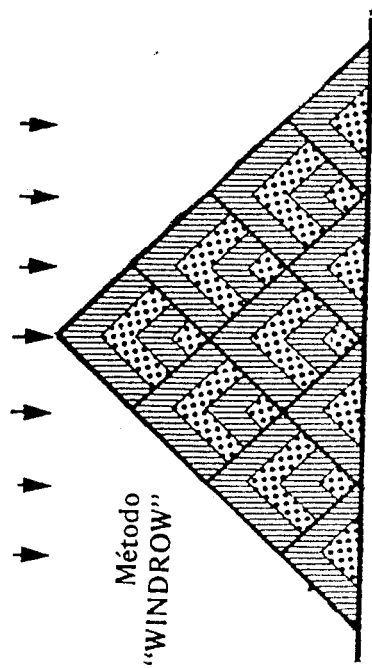


Fig. 3: Distintos esquemas de apilamiento

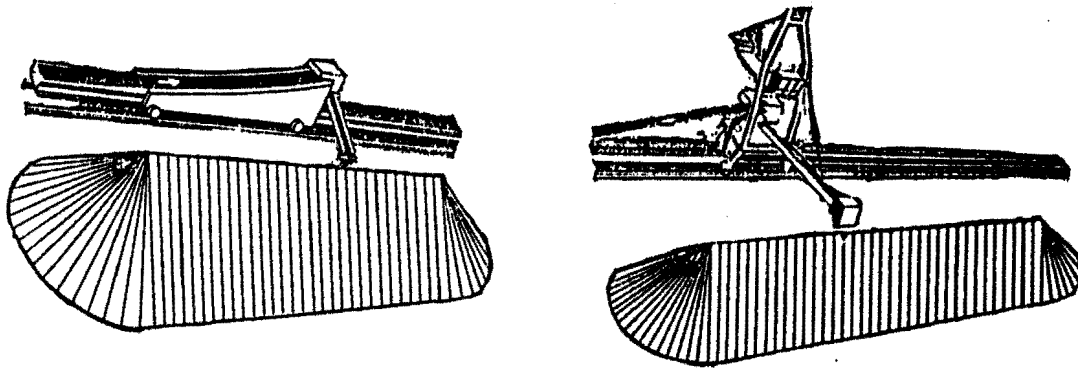


Fig. 4: Sistemas de almacenamiento

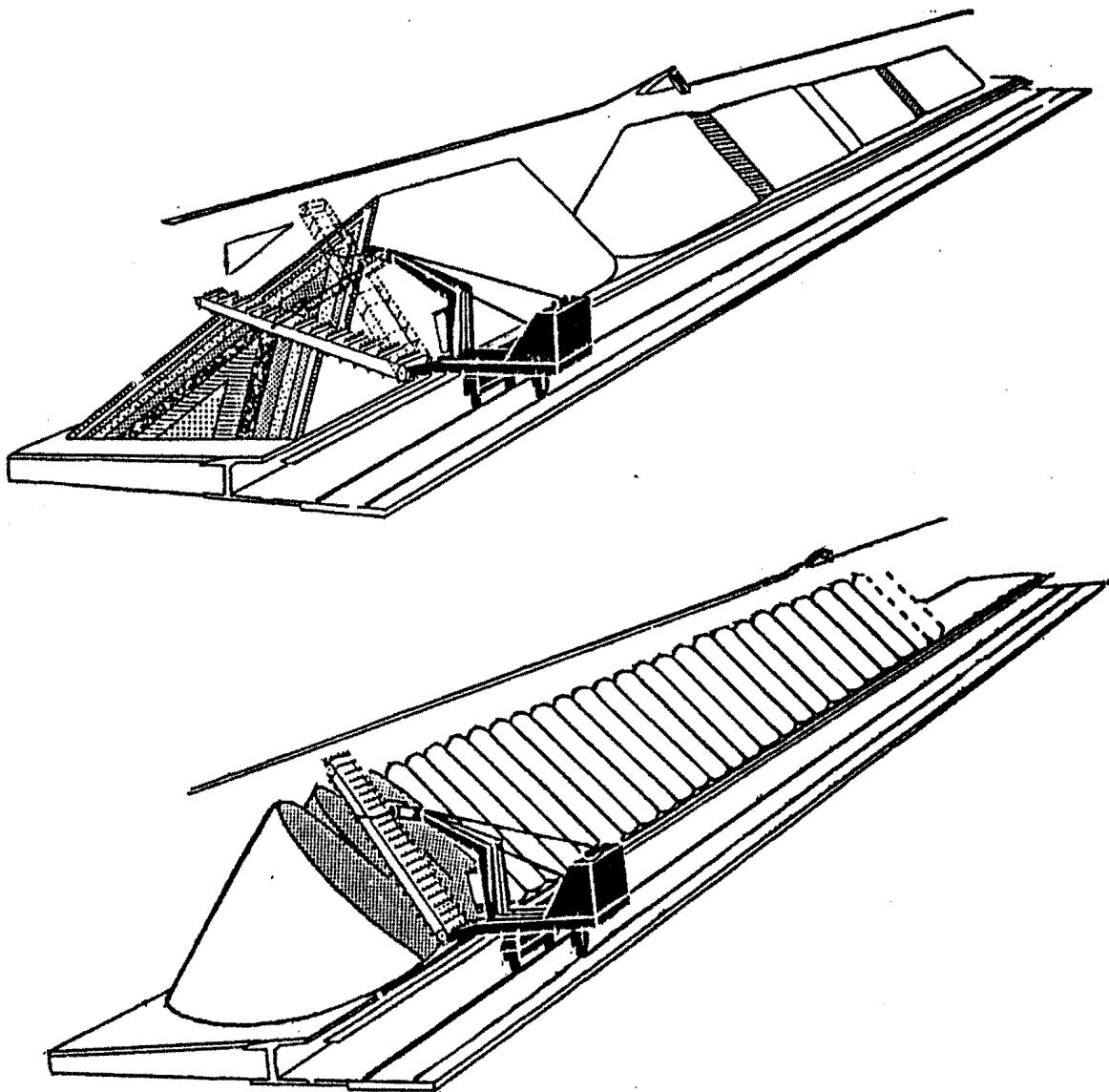


Fig. 5: Sistemas de recuperación del material

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 μm 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 m²/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 m²/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 comunmente 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 μm 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 cementos 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
Índice a 7 días		
Grado 80		
Grado 100	75	70
Grado 120	95	90
Índice a 28 días		
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 Nº 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 m²/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 m²/kg Blaine en muestras con alto contenido de clinker 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 clinker) se alcanzó solamente los 400 m²/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 m²/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 m²/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 clinker. También disminuye la aglomeración de las partículas de clinker, la que se manifiesta para contenidos de este material superiores al 60 %, ya que la escoria no tiende a aglomerarse.

Para el clinker 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 clinker, mientras que para el clinker 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 clinker y 60%, 50%, 40%, 70%, 30%, y 100% de clinker, 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 clinker 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 μ 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 clinker 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 clinker de estas muestras fue de 30, 40, 70 y 100 % nominal y su superficie específica, 400 m²/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 m²/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 m²/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 m²/kg, a los 7 días para las finuras de 400 m²/kg y 500 m²/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 m²/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 m²/kg superan al cemento control.

En resumen, con el clinker 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 m²/kg, mientras que con el clinker 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 clinker 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 Hydration 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 Hydraulic Blast-Furnace Slag", Zement, Kalk, Gips, 7:449-459, 1954.
3. Voinovitch, I; Raverdy, M.; Dron, R; "Ciment de Laitier Granulé sans clinker", 7. 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 clínteres (g/100g)

	Clínter B	Clínter C
Residuo insoluble	0,39	0,11
Dióxido de silicio (SiO ₂)...	20,1	21,7
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)...	6,10	5,18
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃).....	3,61	3,53
Oxido de calcio (CaO).....	62,4	66,0
Oxido de magnesio (MgO)	3,61	0,68
Trióxido de azufre (SO ₃)....	0,49	0,39
Oxido de calcio libre	1,15	0,41
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,64	0,39
Oxido de potasio (K ₂ O).....	1,47	1,36
Alcalinos totales	1,41	1,29
Densidad (g/cm ³).....	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 ₂).....	36,5 "
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	12,5 "
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	1,31 "
Oxido de manganeso (Mn ₂ O ₃) ...	1,03 "
Oxido de calcio (CaO)	42,9 "
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,38 "
Oxido de potasio (K ₂ O).....	0,78 "
Oxido de magnesio (MgO).....	3,74 "
Trióxido de azufre (SO ₃).....	0,11 "
Sulfuro (S=)	0,84 "
Alcalinos totales	0,89 "
Densidad	2,92 g/cm ³
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 ₃)	43,9 "
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,64 "
Cloruro (Cl-)	0,04 "
Agua combinada	20,2 "
SO ₄ Ca.2H ₂ 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 m²/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 m²/kg (Blaine), clínker C

Mezcla	Superficie específica Blaine (m ² /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 m²/kg (Blaine), clinker B

Mezcla	Superficie específica Blaine (m ² /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 (cm3)		
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 (cm3)		
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 μm)
para las muestras preparadas con clinker 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 μm) para las muestras preparadas con
clinker 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 clínker 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 clínker 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/cm3
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/cm3
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 m2/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 (m2/kg)			Clínker B Finura (m2/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 m2/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. (m2/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 (m2/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 ₂).....	31,3 "
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	11,9 "
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	4,47 "
Oxido de manganeso (mn ₂ O ₃) ...	0,92 "
Oxido de calcio (CaO)	44,2 "
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,44 "
Oxido de potasio (K ₂ O).....	0,88 "
Oxido de magnesio (MgO).....	3,71 "
Trióxido de azufre (SO ₃).....	0,88 "
Sulfuro (S=)	1,04 "
Alcalinos totales	1,02 "
Densidad	2,96 g/cm ³
Porcentaje de fase vítrea	98,0 %
Finura Blaine	380 m ² /kg

Tabla 21: Cal aérea hidratada en polvo.

Análisis químico.

Residuo insoluble	0,28 g/100g
Dióxido de silicio (SiO ₂).....	1,45 "
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	0,17 "
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	0,16 "
Oxido de calcio (CaO)	71,3 "
Oxido de magnesio (MgO)	0,56 "
Dióxido de carbono (CO ₂)	7,1 "
Indice 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 01:1:6 no tiene aire intencionalmente incorporado

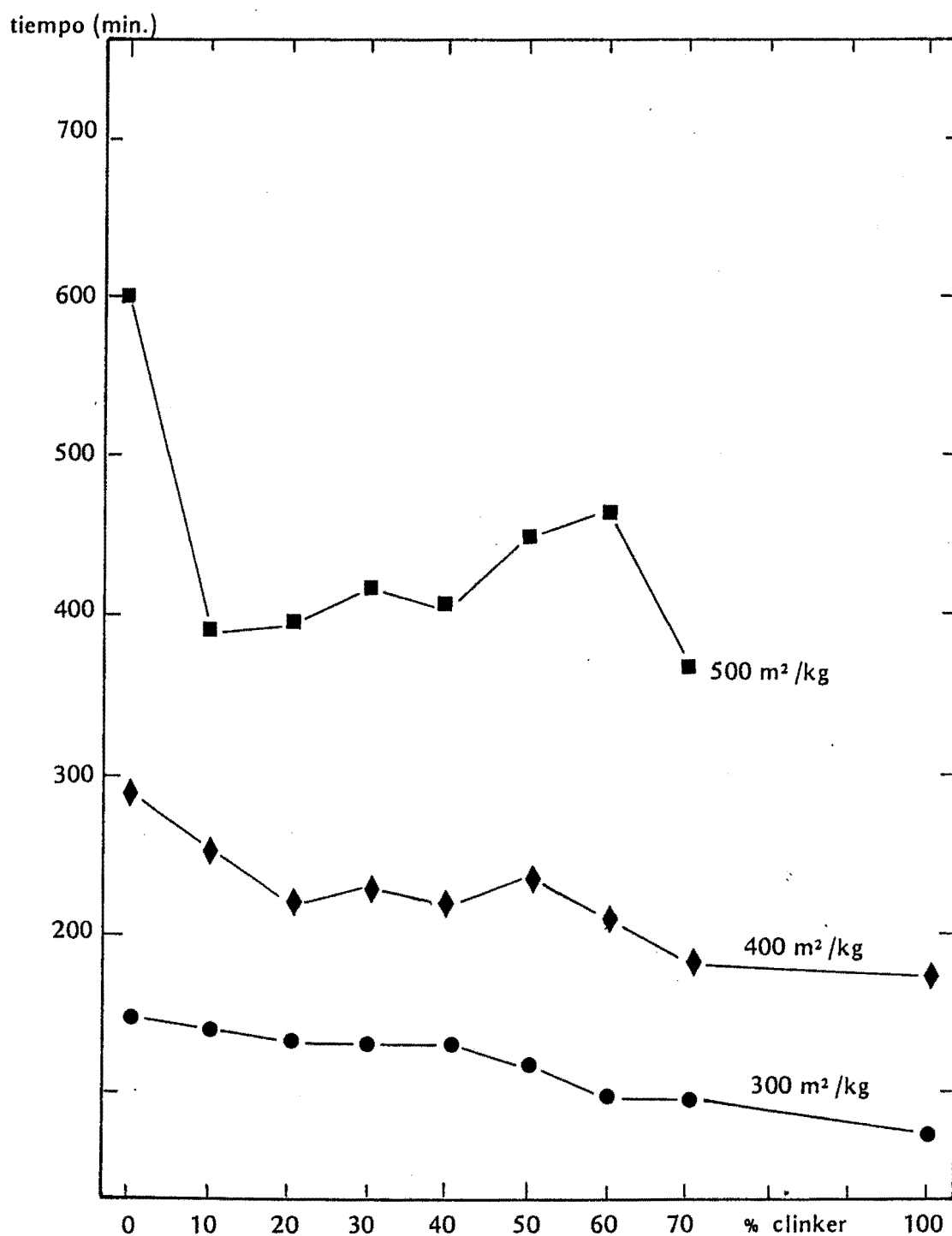


Fig. 1: Tiempo de molienda necesario para alcanzar finuras con superficie específica Blaine de 300, 400 y 500 m²/kg en función del porcentaje de clinker C.

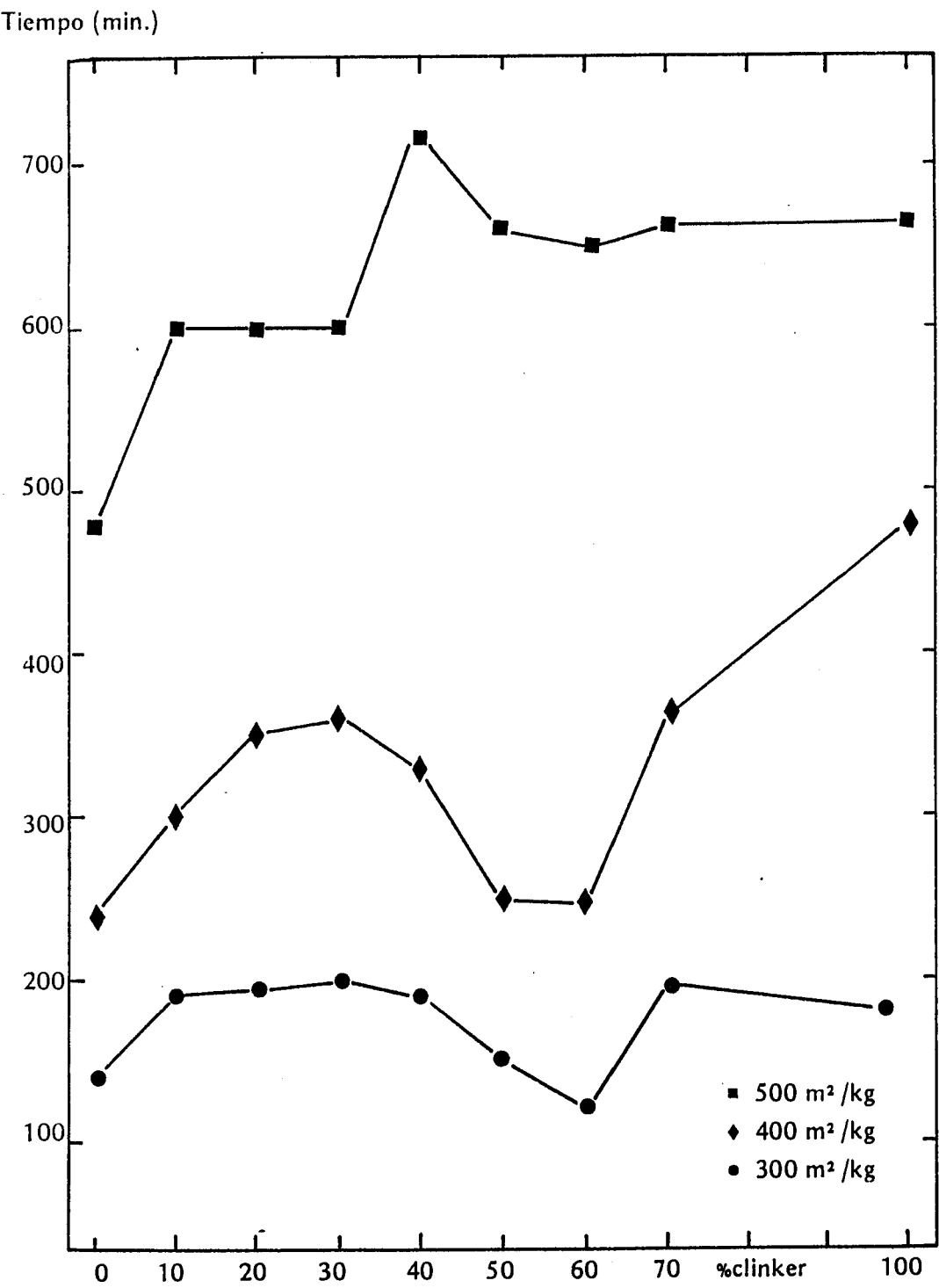


Fig. 2: Tiempo de molienda necesario para alcanzar finuras de superficie específica de 300, 400 y 500 m²/kg, en función del contenido de clinker B.

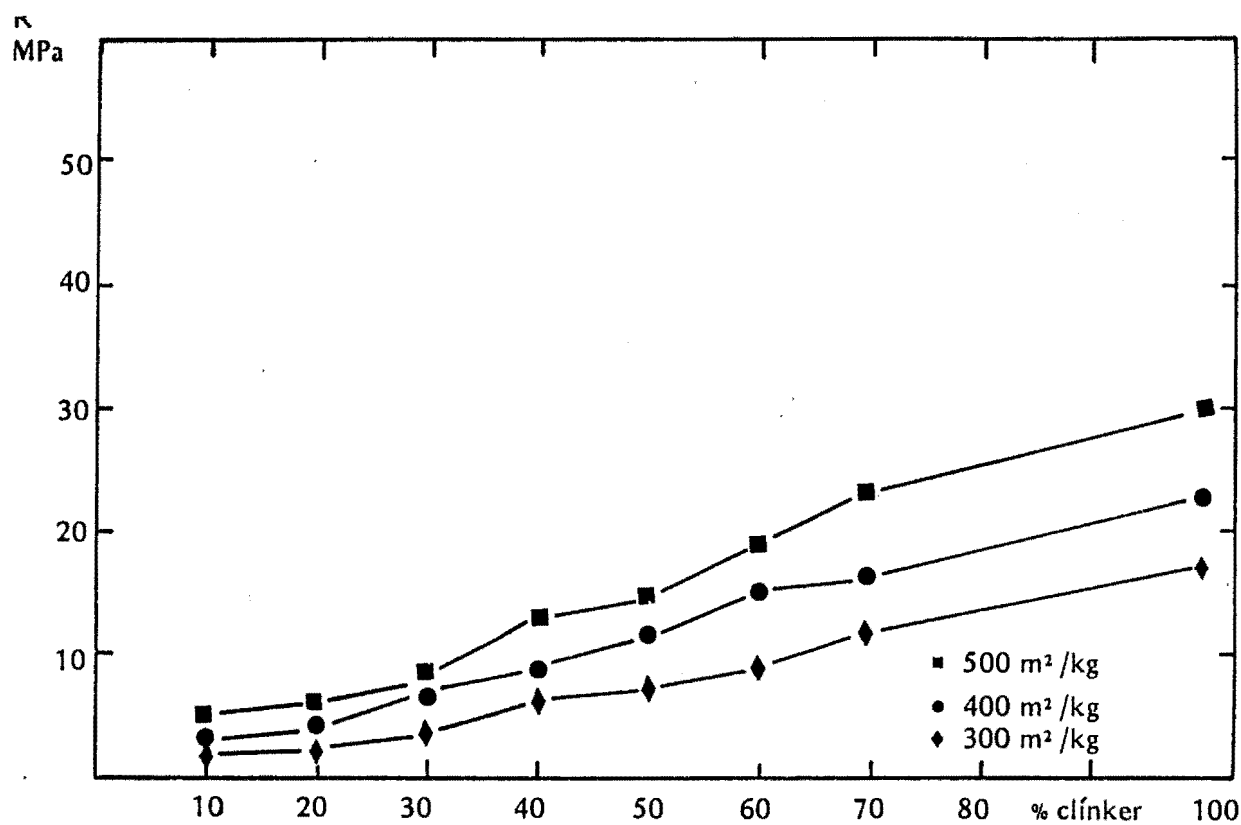


Fig. 3: Resistencia a la compresión a la edad de 3 días en función del porcentaje de clinker C.

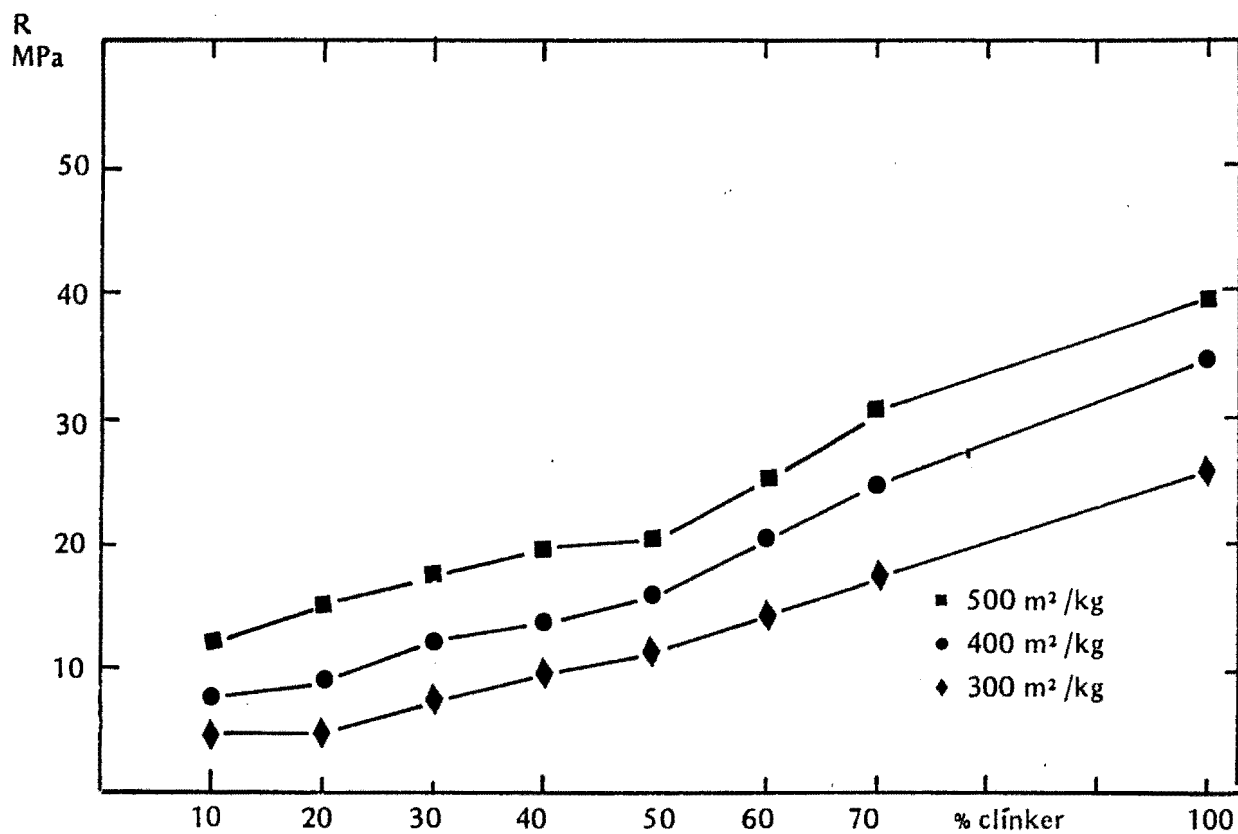


Fig. 4: Resistencia a la compresión a la edad de 7 días en función del porcentaje de clinker C.

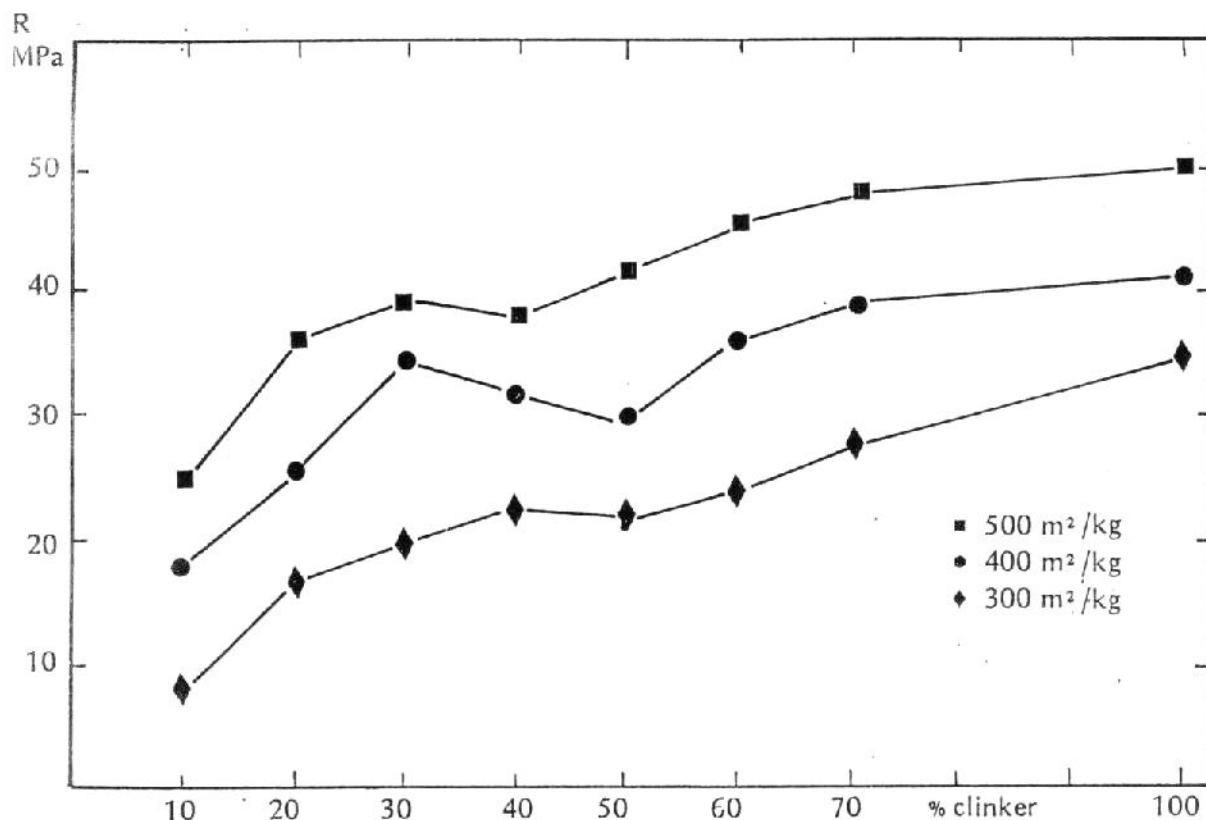


Fig. 5: Resistencia a la compresión a la edad de 28 días en función del porcentaje de clinker C.

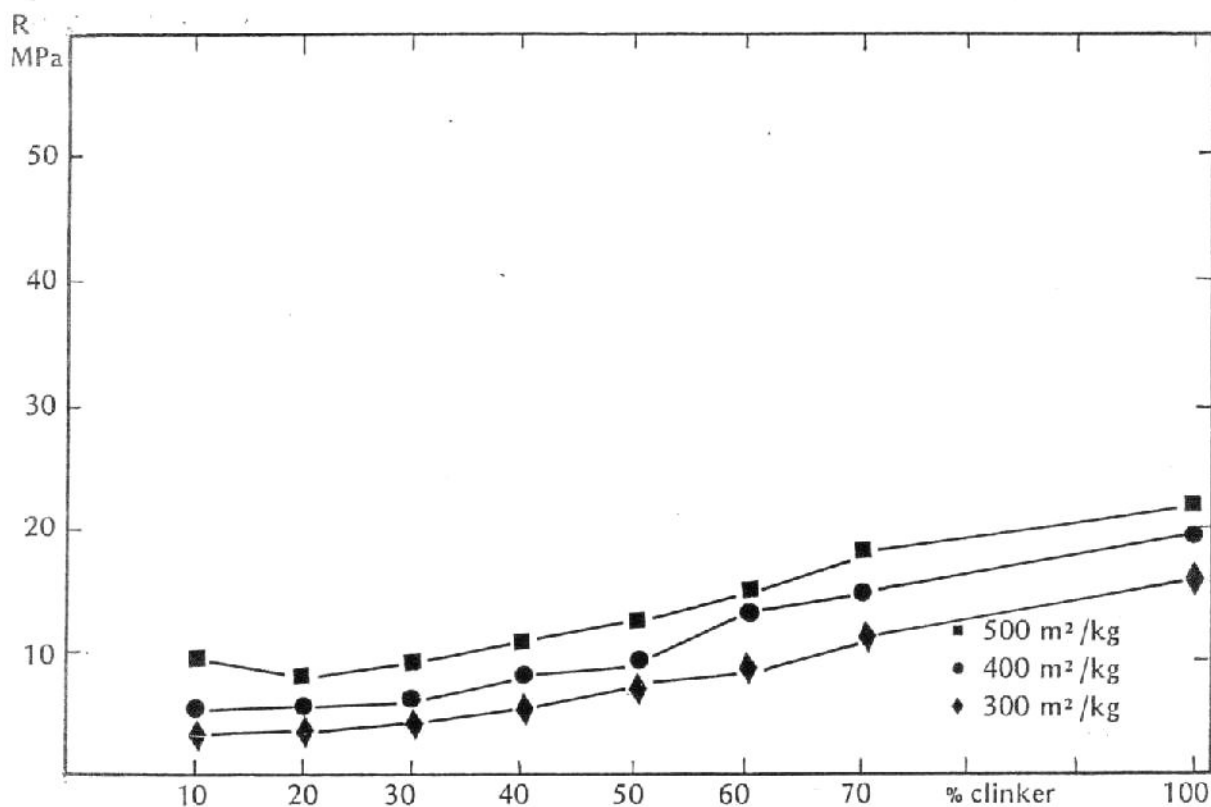


Fig. 6: Resistencia a la compresión a la edad de 3 días en función del porcentaje de clinker C.

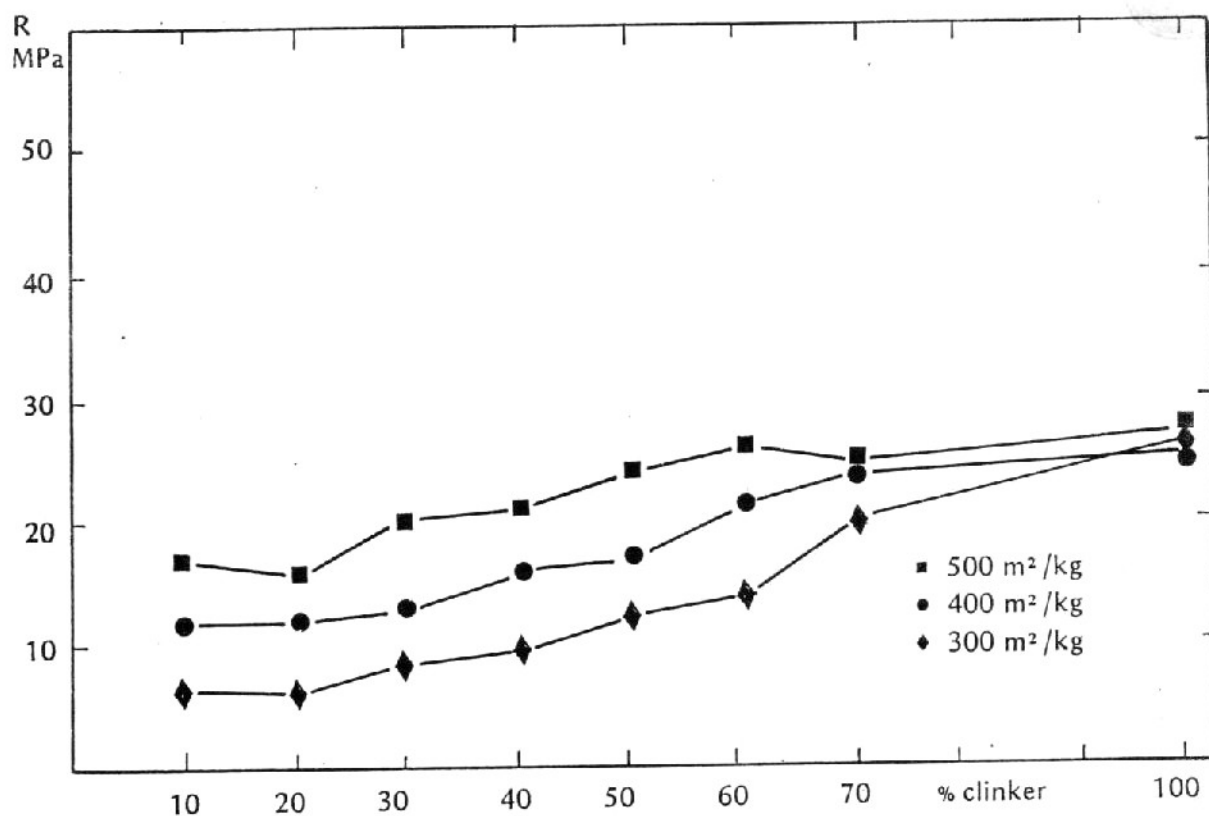


Fig. 7: Resistencia a la compresión a la edad de 7 días en función del porcentaje de clinker B.

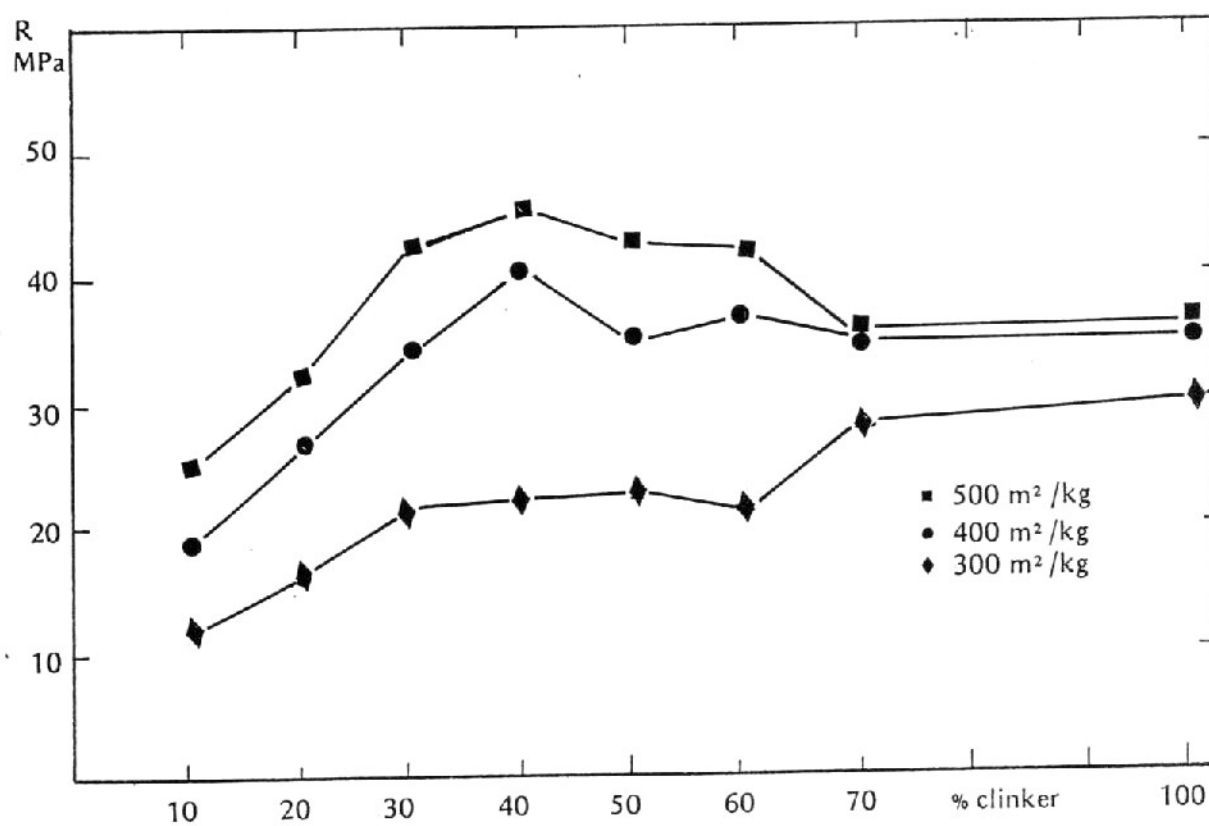


Fig. 8: Resistencia a la compresión a la edad de 28 días en función del porcentaje de clinker B.

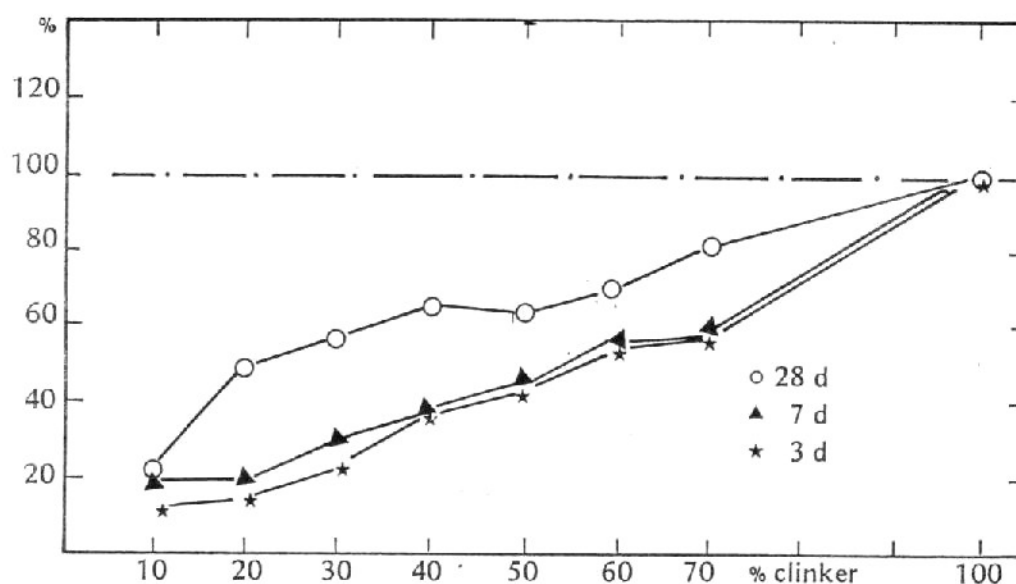


Fig. 9: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker C; finura Blaine $300\text{m}^2/\text{kg}$.

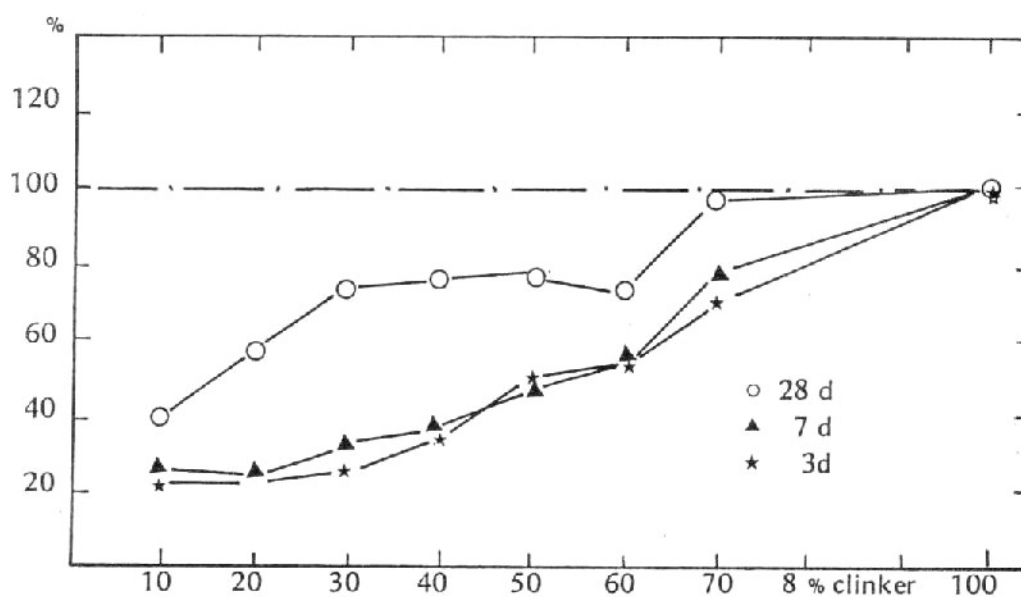


Fig. 10: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker B; finura Blaine $300\text{m}^2/\text{kg}$.

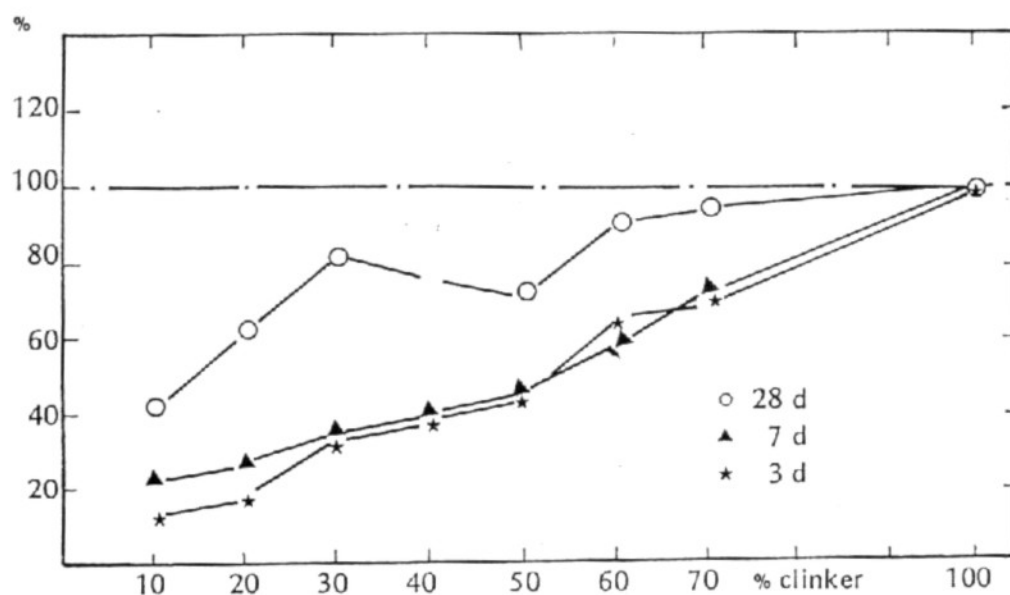


Fig. 11: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker C; finura Blaine 400 m²/kg.

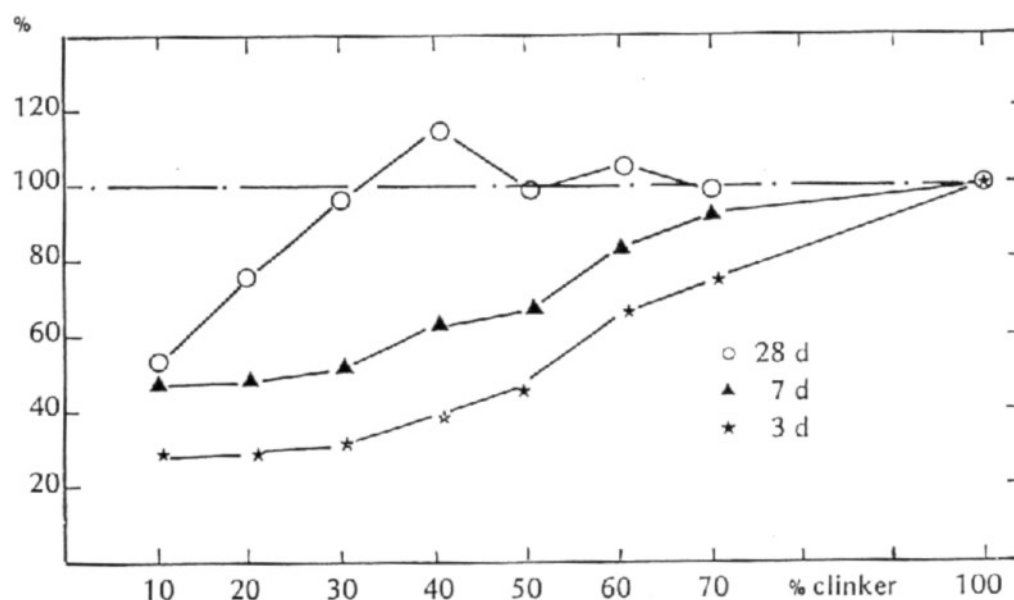


Fig. 12: Resistencia porcentual a respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker B; finura Blaine 400 m²/kg.

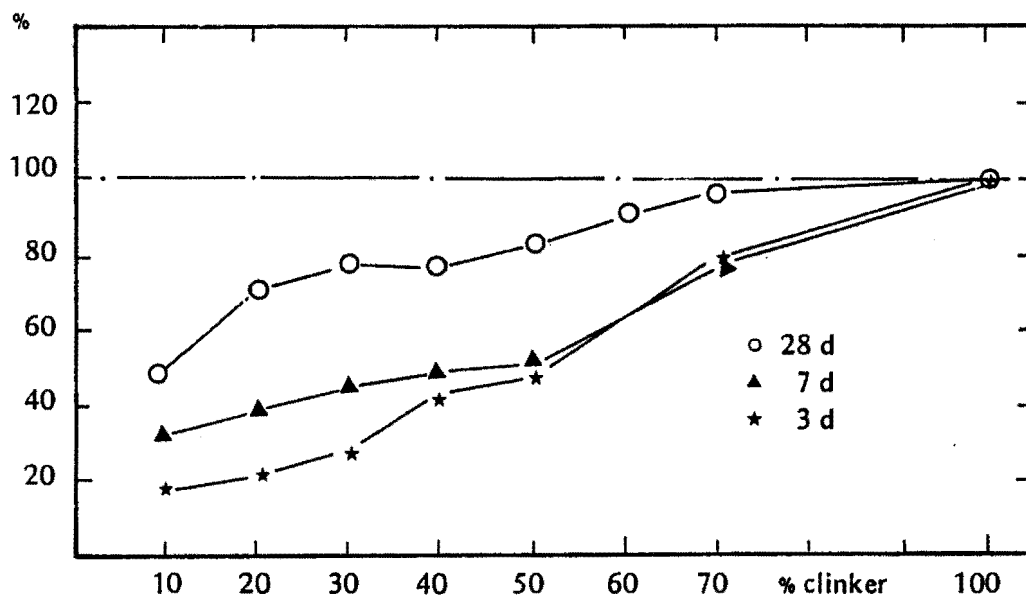


Fig. 13: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker C; finura Blaine 500 m²/kg.

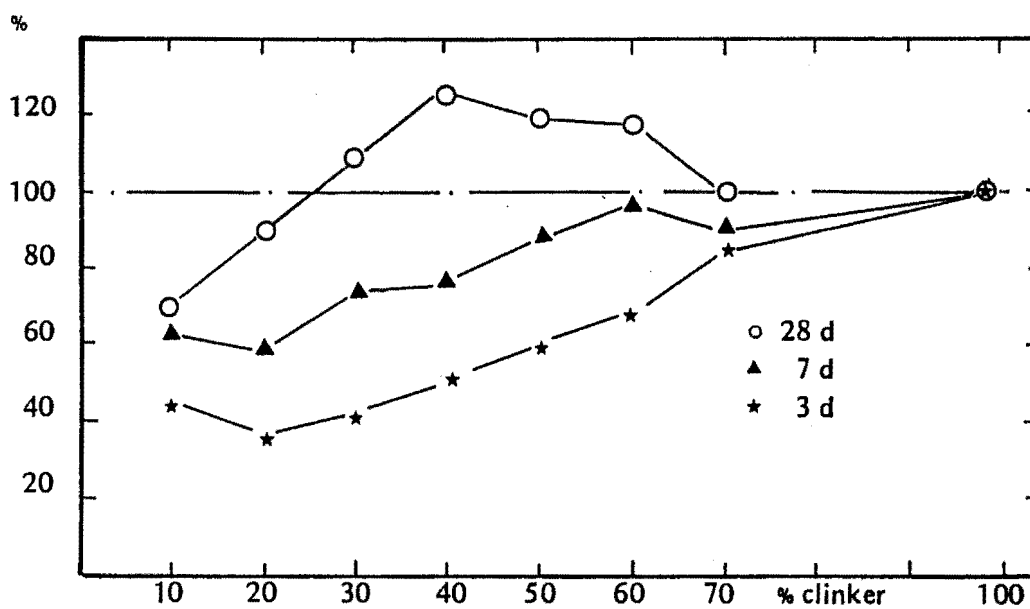


Fig. 14: Resistencia porcentual respecto al clinker puro en función del porcentaje de clinker B; finura Blaine 500 m²/kg.

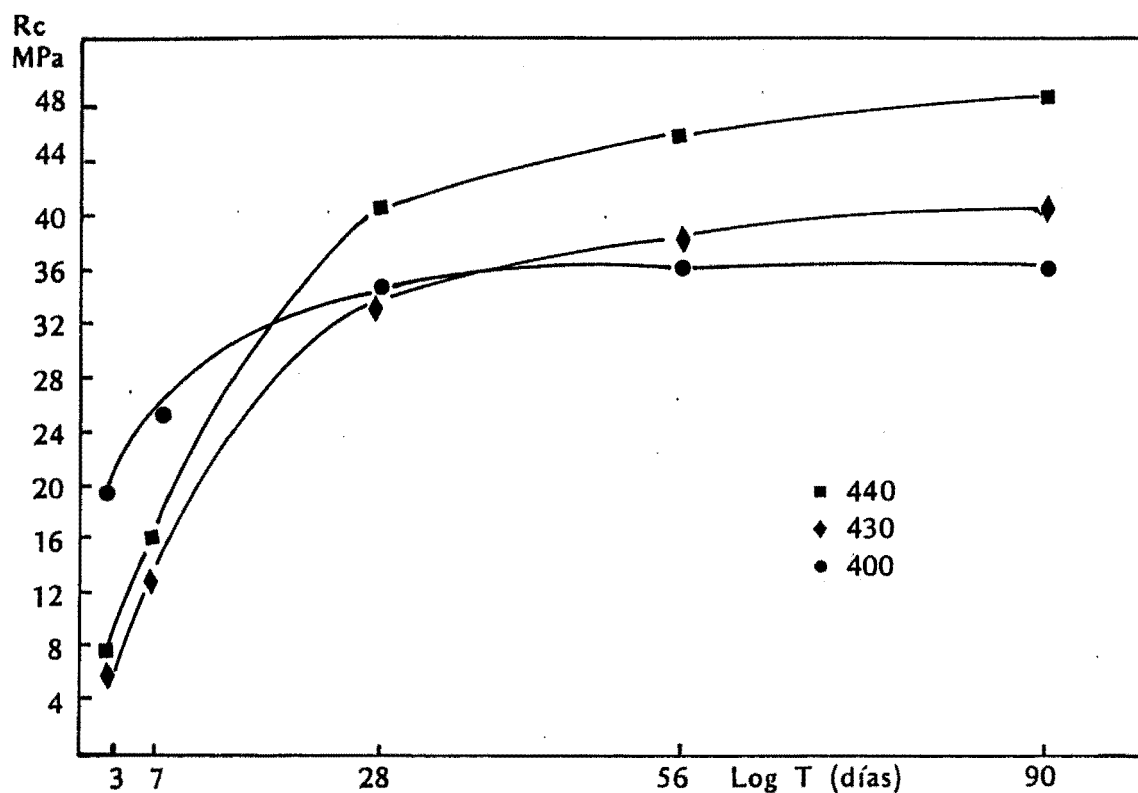


Fig. 15: Resistencia a la compresión en función del tiempo hasta la edad de 90 días para los cementos con 0, 60 y 70 % de escoria (clinker B).

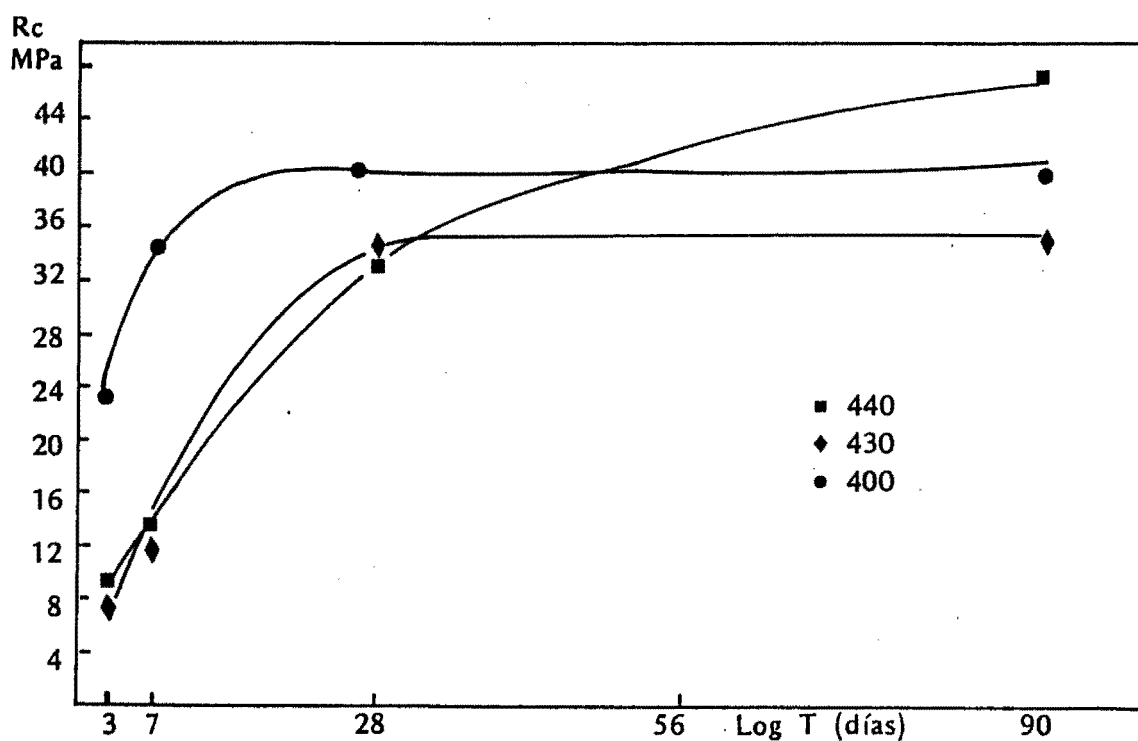


Fig. 16: Resistencia a la compresión en función del tiempo hasta la edad de 90 días para los cementos con 0, 60 y 70 % de escoria (clinker C).

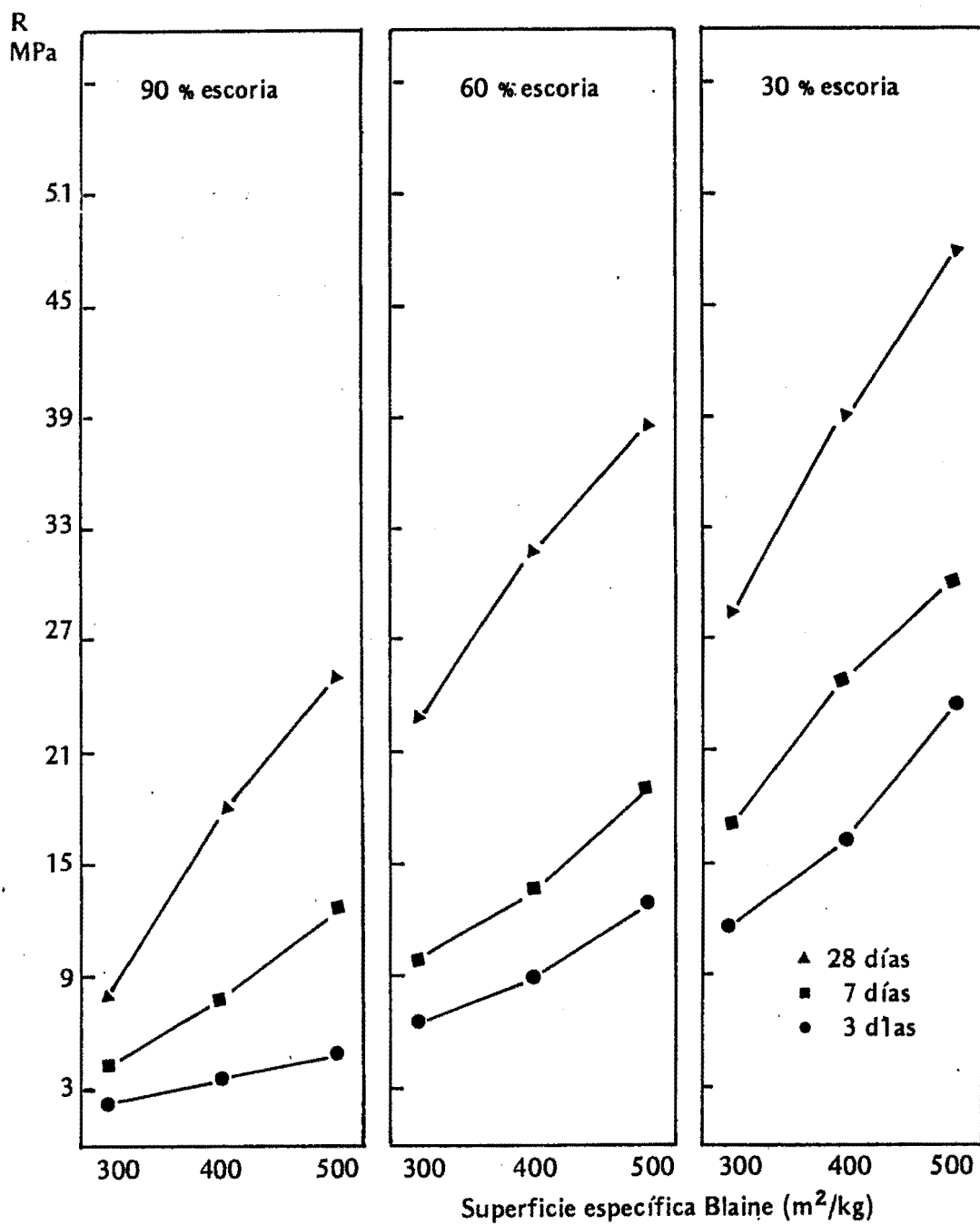


Fig. 17: Resistencia a la compresión en función de la finura para cementos con 90, 60 y 30 % de escoria y clinker C.

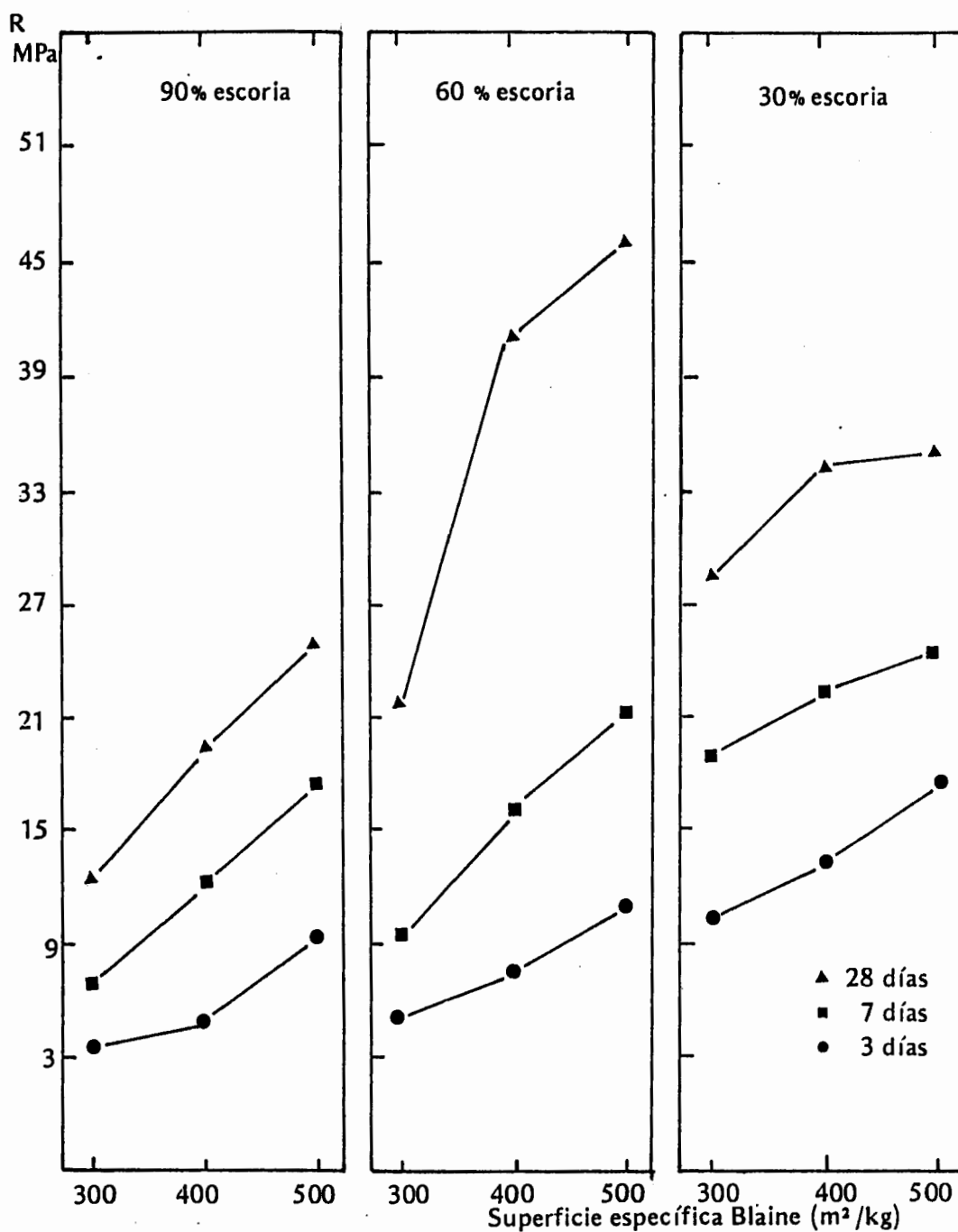


Fig. 18: Resistencia a la compresión en función de la finura para cements con 90, 60 y 30 % de escoria y clinker B.

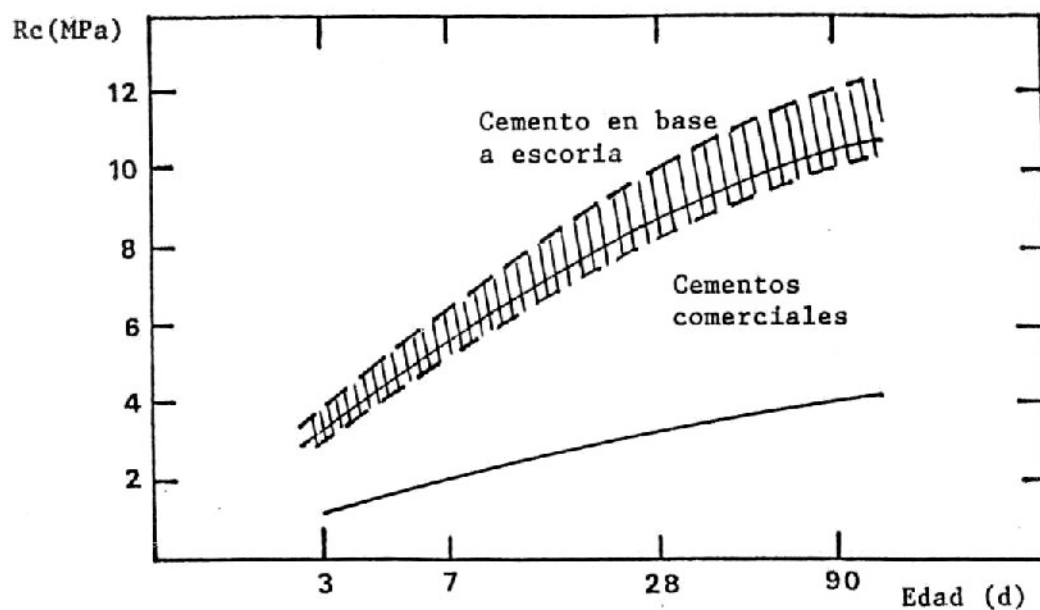


Fig. 19: Cemento de albañilería: Resistencia a la compresión a las edades de 3, 7, 28 y 90 días para morteros elaborados con cemento de albañilería comercial y el cemento desarrollado en base a escoria.

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, realzando 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 hormigón 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 m²/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 Peña. de Córdoba, identificado por el proveedor como grano 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 moldeado.

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/m³

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 liviano-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° 1: 188.16 daN

Panel N° 2: 215,60 daN

Panel N° 3: 158.00 daN

Ensayo de Impacto blando

Ensayo N°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^o 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^o 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 arrriostramiento 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/m³) 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/m³) 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 parri-llas 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

Prevía 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 ₂)	21,0
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	4,80
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	4,14
Oxido de Calcio (CaO)	63,9
Oxido de Sodio (Na ₂ O)	0,05
Oxido de Potasio (K ₂ O)	0,97
Oxido de Magnesio (MgO)	0,68
Trióxido de Azufre (SO ₃)	2,40
Oxido de Calcio Libre (CaO)	0,59
Alcalinos totales (Na ₂ O + 0,658.K ₂ 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 ₂).....	31,3 "
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	11,9 "
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	4,47 "
Oxido de manganeso (mn ₂ O ₃) ...	0,92 "
Oxido de calcio (CaO)	44,2 "
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,44 "
Oxido de potasio (K ₂ O).....	0,88 "
Oxido de magnesio (MgO).....	3,71 "
Trióxido de azufre (SO ₃).....	0,88 "
Sulfuro (S=)	1,04 "
Alcalinos totales	1,02 "
Densidad	2,96 g/cm ³
Porcentaje de fase vítrea	98,0 %
Finura Blaine	380 m ² /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	REPLAZO 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 Primera serie	Granitos	14	8,3	2,0	7,5
		28	8,2	2,1	7,2
	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 1.13 1.16 1.14	7.3 7.5 8.4 7.5	7.7
n.d. n.d. n.d. n.d.	7.9 8.0 7.2 8.1	7.8

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 Nº 1	Panel Nº 2	Panel Nº 3	Panel Nº 1	Panel Nº 2	Panel Nº 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 Nº 1	PANEL Nº 2	PANEL Nº 3	PANEL Nº 1	PANEL Nº 2	PANEL Nº 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

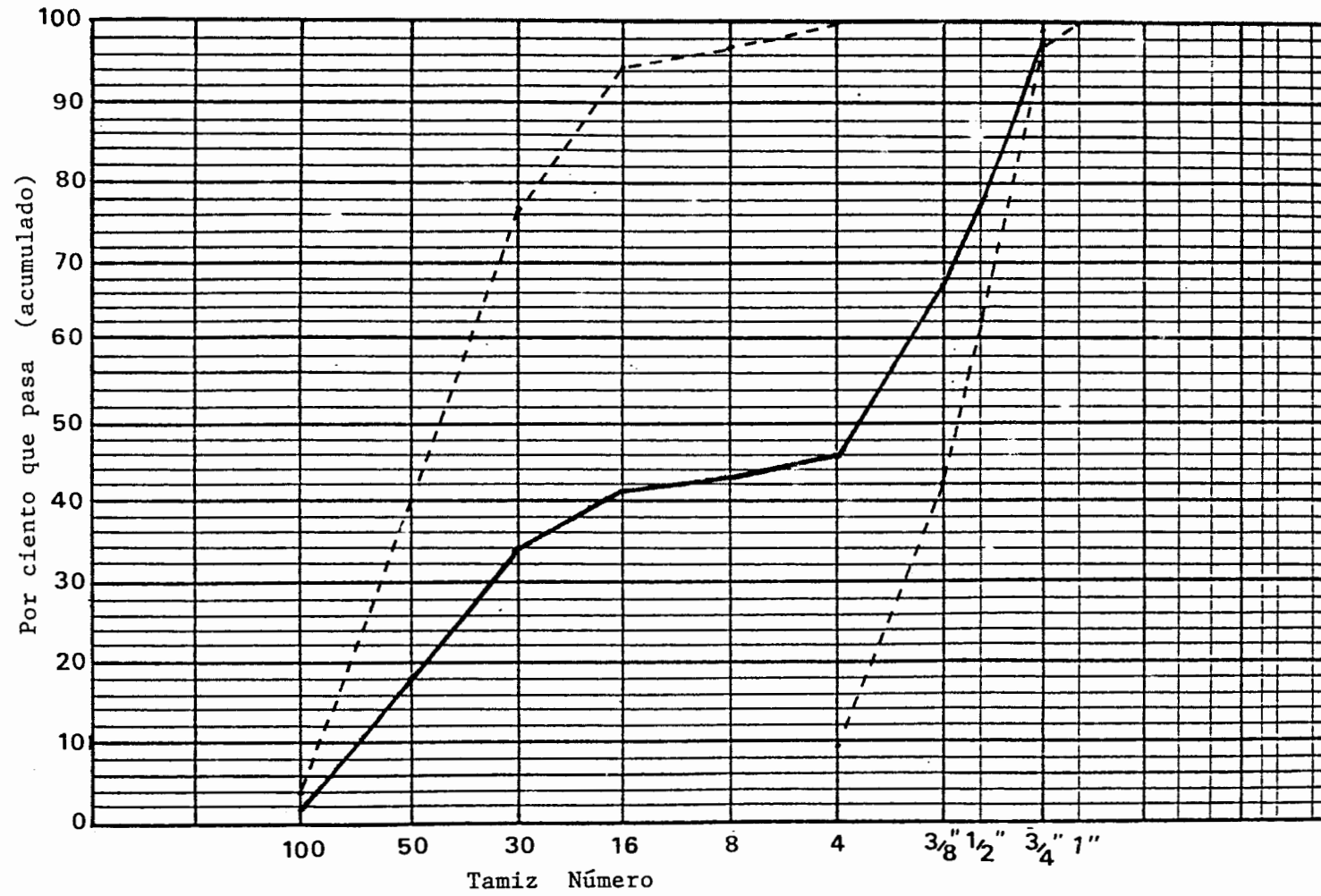


Fig. 1: Granulometría del Agregado Fino, Agregado Grueso y Agregado Compuesto

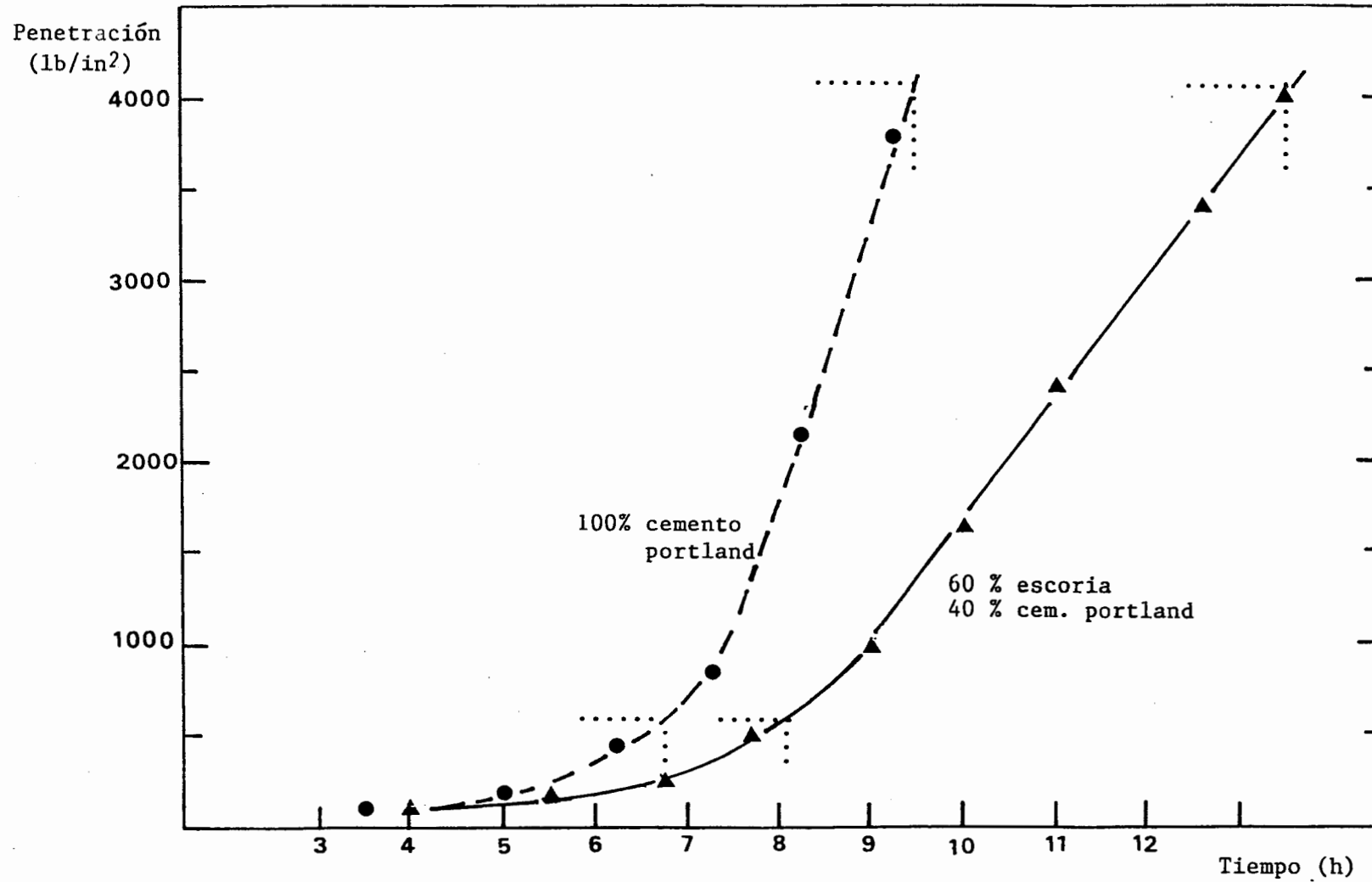
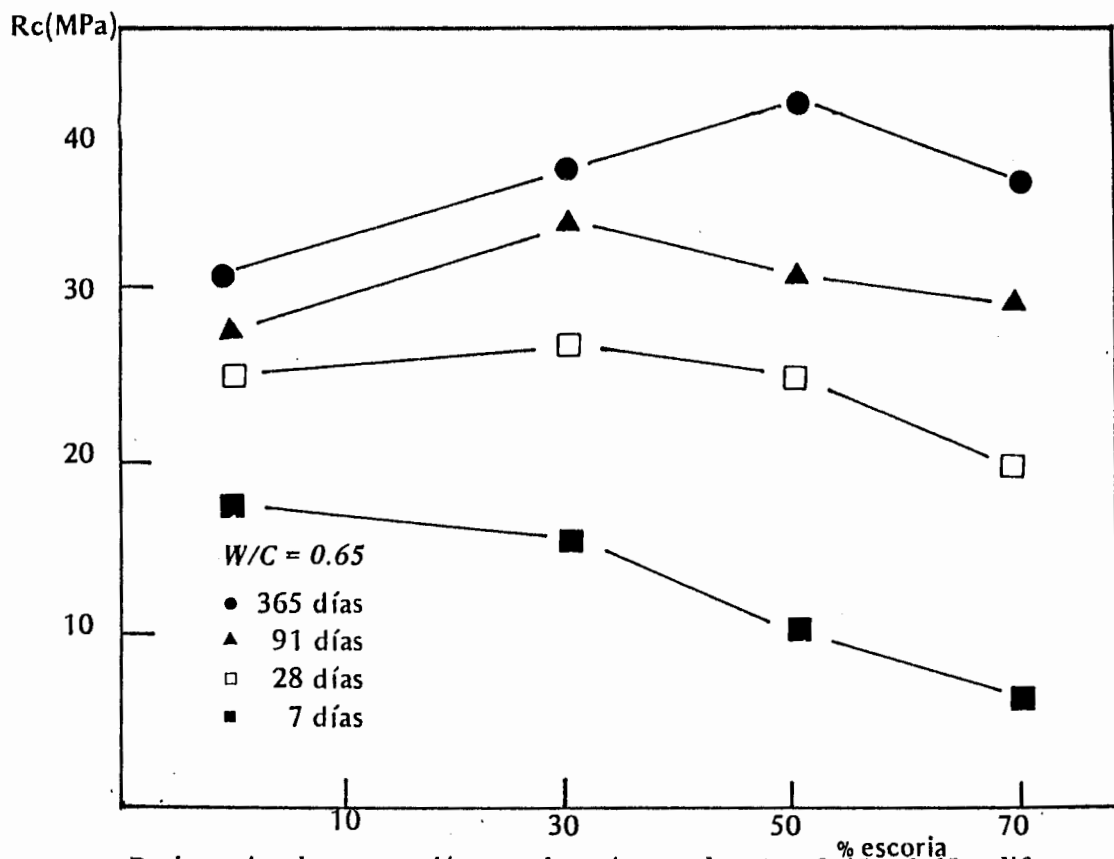
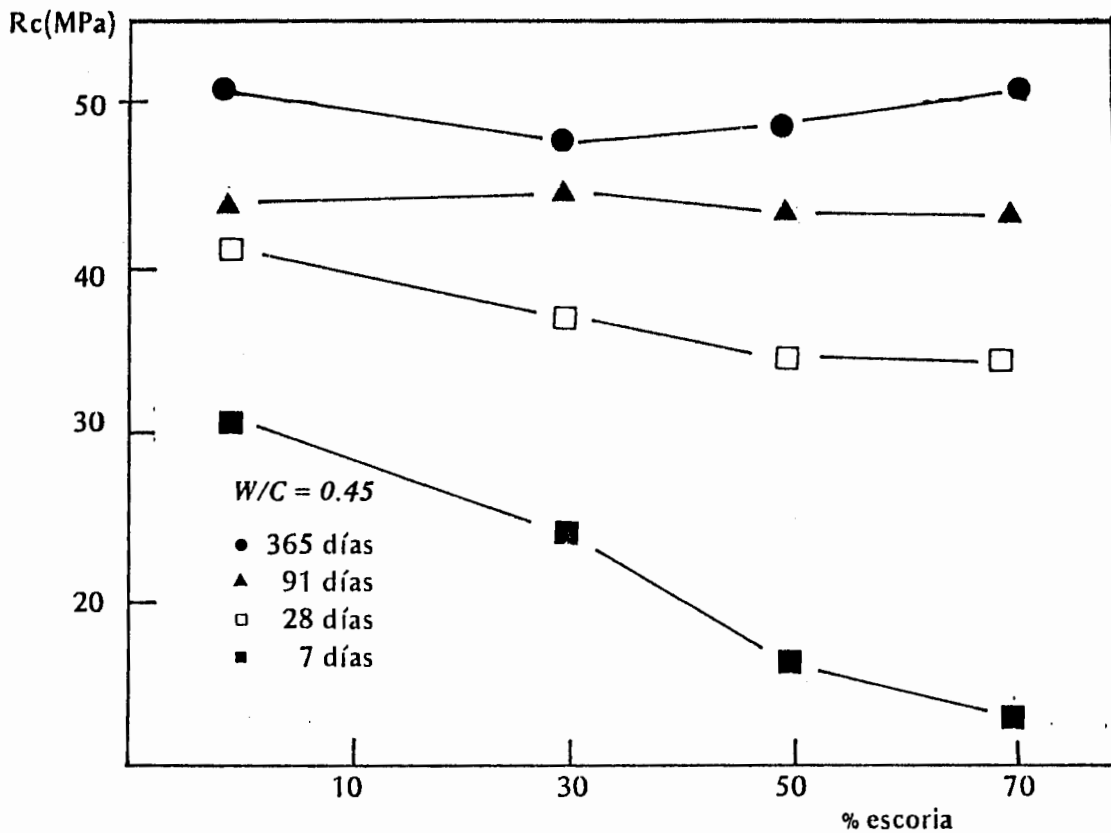
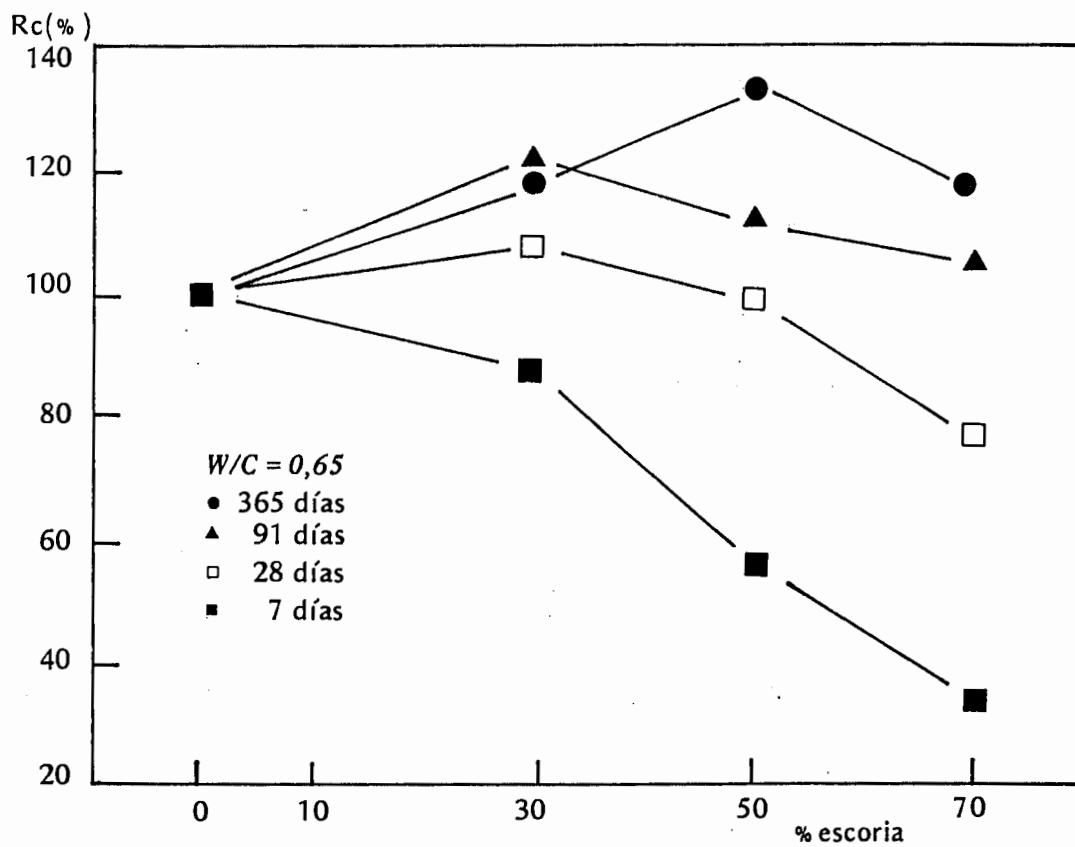
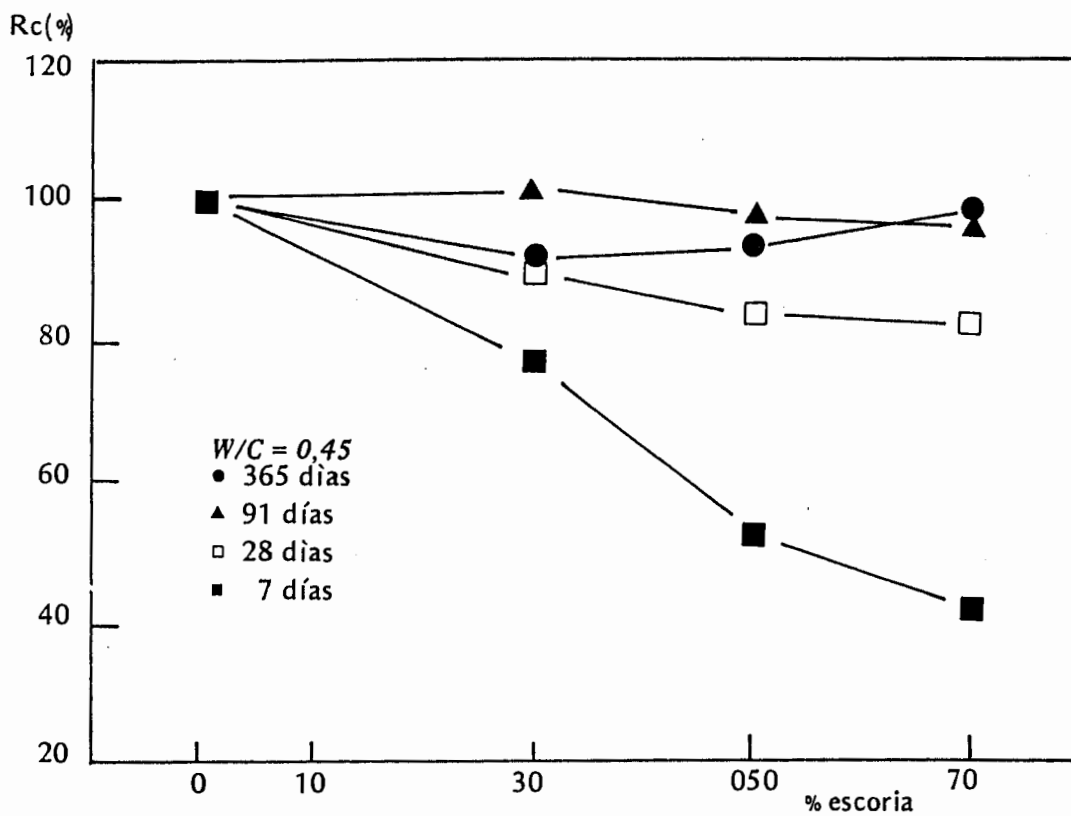


Fig. 2: Tiempo de fraguado del hormigón elaborado con cemento portland y con el 60 % de escoria como remplazo parcial de cemento.



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

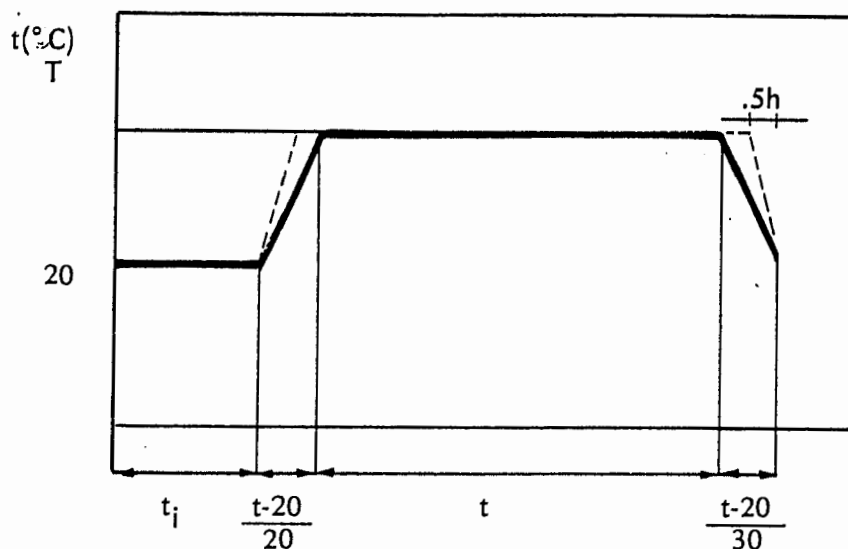
Se programaron los ensayos para las siguientes edades equivalentes: 3, 7, 14, 28 y 56 días, a las que se agregaron 1,7; 2 y 2,4 días para 33 °C, 1,7; 2,1 y 2,6 días para 55 °C y 1,7; 2 y 2,7 para 80 °C, con un tiempo de espera de 24 horas en todos los casos.

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°C . Para la temperatura de 80°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°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°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°C durante 24 horas y posteriormente calcinada durante una hora a 1050°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

α_c : pérdida por calcinación del cemento mezcla

α_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:

R_u : 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

E_a : 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°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°C y los valores más bajos los presentan este cemento y el B400 para 80°C .

El valor de $k(T)$ aumenta regularmente con la temperatura, como es de esperar, con las excepciones de B400 para 55°C y B440 a 20°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°C , anormalmente bajo. Es de hacer notar el rápido incremento del tiempo t_0 cuando la temperatura desciende de 20°C para el cemento B440 y de 15°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 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 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, 1958, 18 pp.

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

Composición	%
Residuo insoluble	0,39
Dióxido de silicio (SiO ₂)...	20,1
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)...	6,10
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃).....	3,61
Oxido de calcio (CaO).....	62,4
Oxido de magnesio (MgO)	3,61
Trióxido de azufre (SO ₃).....	0,49
Oxido de calcio libre	1,15
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,64
Oxido de potasio (K ₂ O).....	1,47
Alcalinos totales	1,41
Densidad (g/cm ³).....	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 ₂).....	36,5
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	12,5
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	1,31
Oxido de manganeso (Mn ₂ O ₃) ...	1,03
Oxido de calcio (CaO)	42,9
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,38
Oxido de potasio (K ₂ O).....	0,78
Oxido de magnesio (MgO).....	3,74
Trióxido de azufre (SO ₃).....	0,11
Sulfuro (S=)	0,84
Alcalinos totales	0,89
Densidad (g/cm ³)	2,92
Porcentaje de fase vítrea ...	97,5

Tabla 3: Composición porcentual de los cementos y su identificación

Identificación	Composición		
	Clínker	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
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)		
días	h	h	400	470	440	400	470	440
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
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)		
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)		
días	h	h	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
días	h	h						
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_o para los distintos cementos y temperatura de curado

Temp. de Curado ($^{\circ}\text{C}$)		5	12	20	33	55	80
400	$R_u(\text{MPa})$	38,0	34,7	44,6*	31,8	27,6	26,1
	$k_{t.0,001} (1/h)$	2,4	11,1	14,1	53,7	236,3*	15,8
	$t_o (h)$	300,8	38,1	12,2	7,3	5,5	3,6
470	$R_u (\text{MPa})$	47,7	41,4	38,9	38,3	37,7	27,2
	$k_{t.0,001} (1/h)$	2,99	3,9	9,3	22,0	49,8	147,6
	$t_o (h)$	291,1	58,4	13,2	9,6	1,0	2,6*
440	$R_u (\text{MPa})$	43,8	39,1	55,9*	39,9	33,3	31,8
	$k_{t.0,001} (1/h)$	2,1	7,5	2,9*	25,3	67,9	147,2
	$t_o (h)$	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

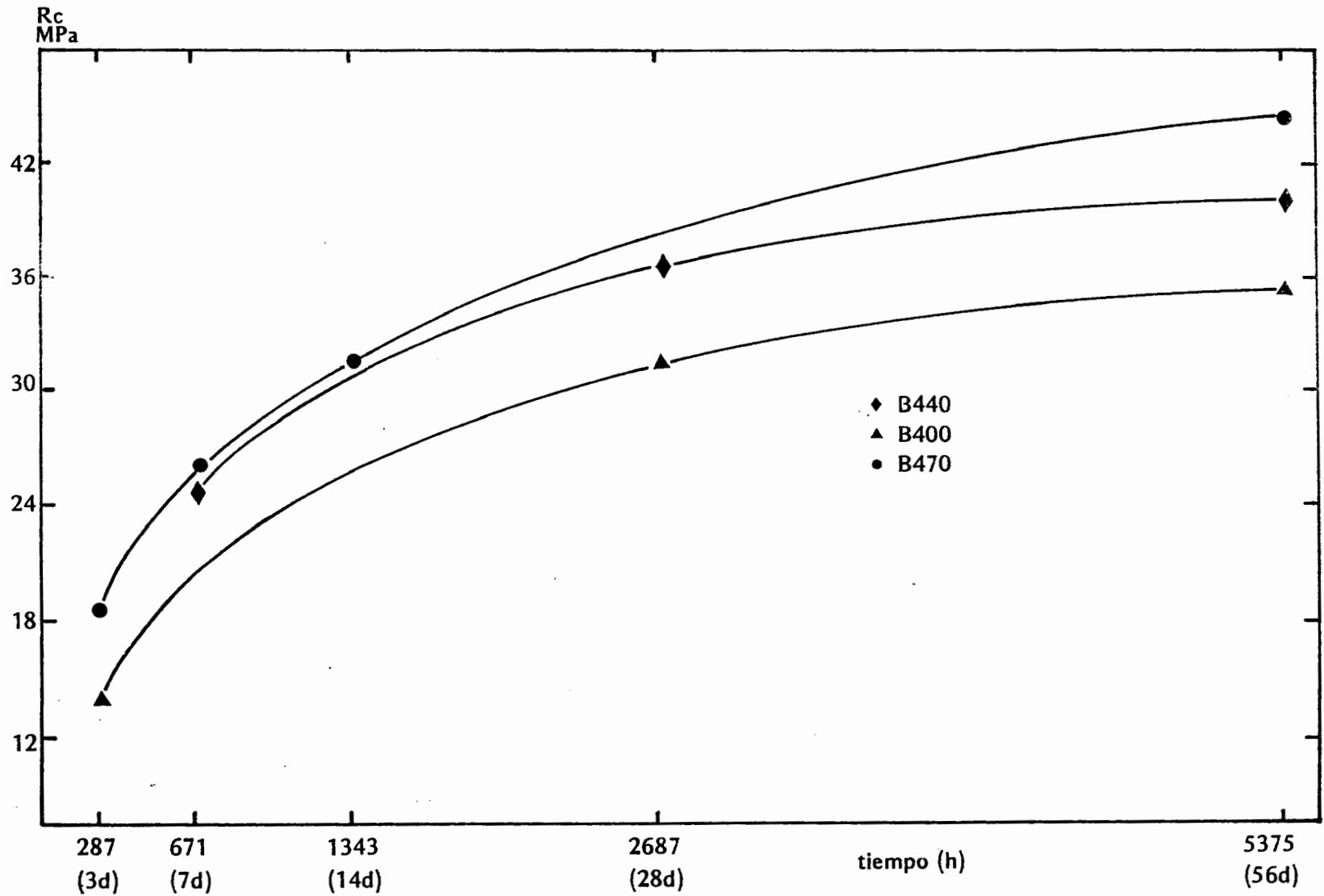


Fig. 1: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 5 °C.

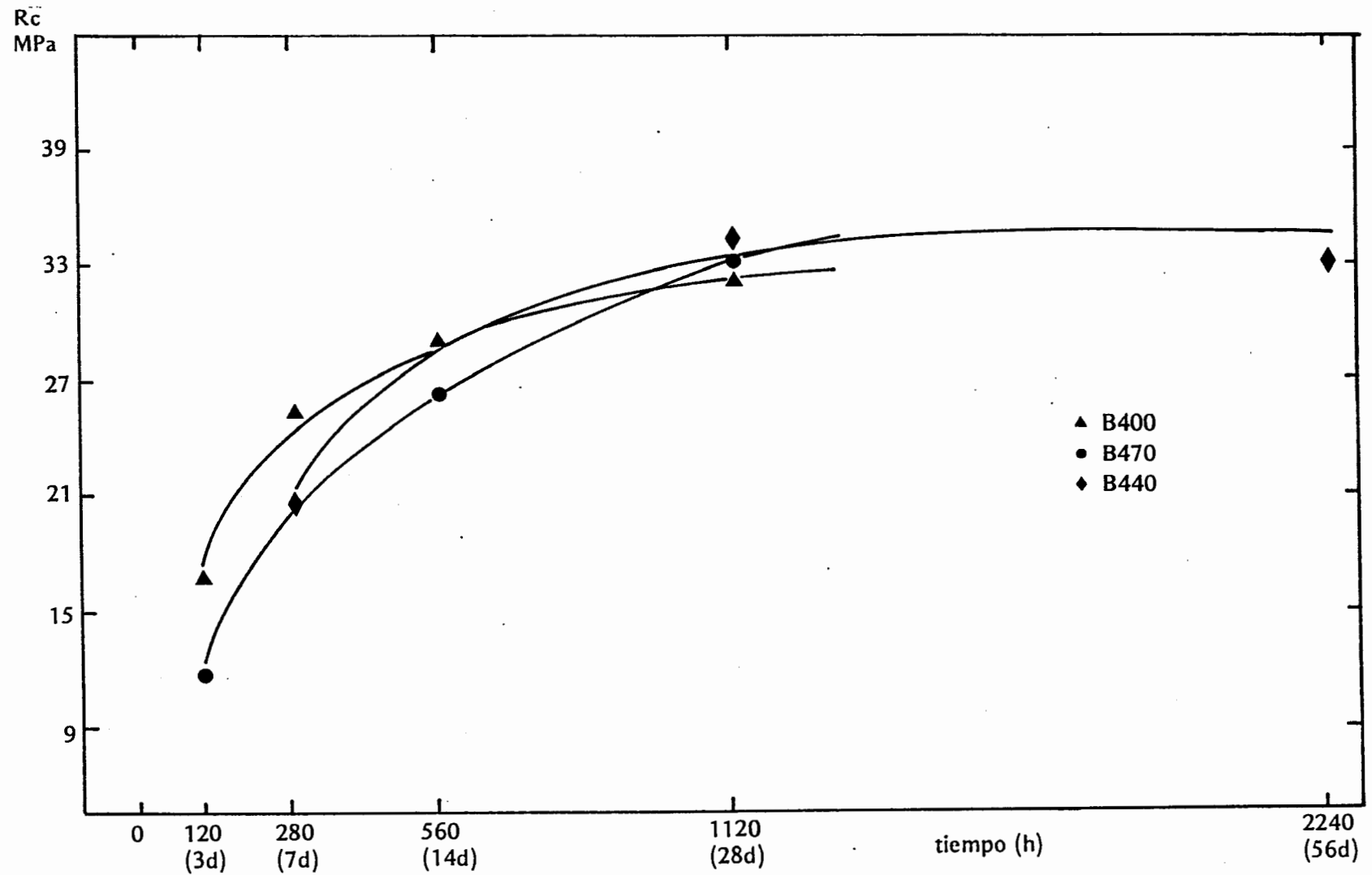


Fig. 2: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 12 °C.

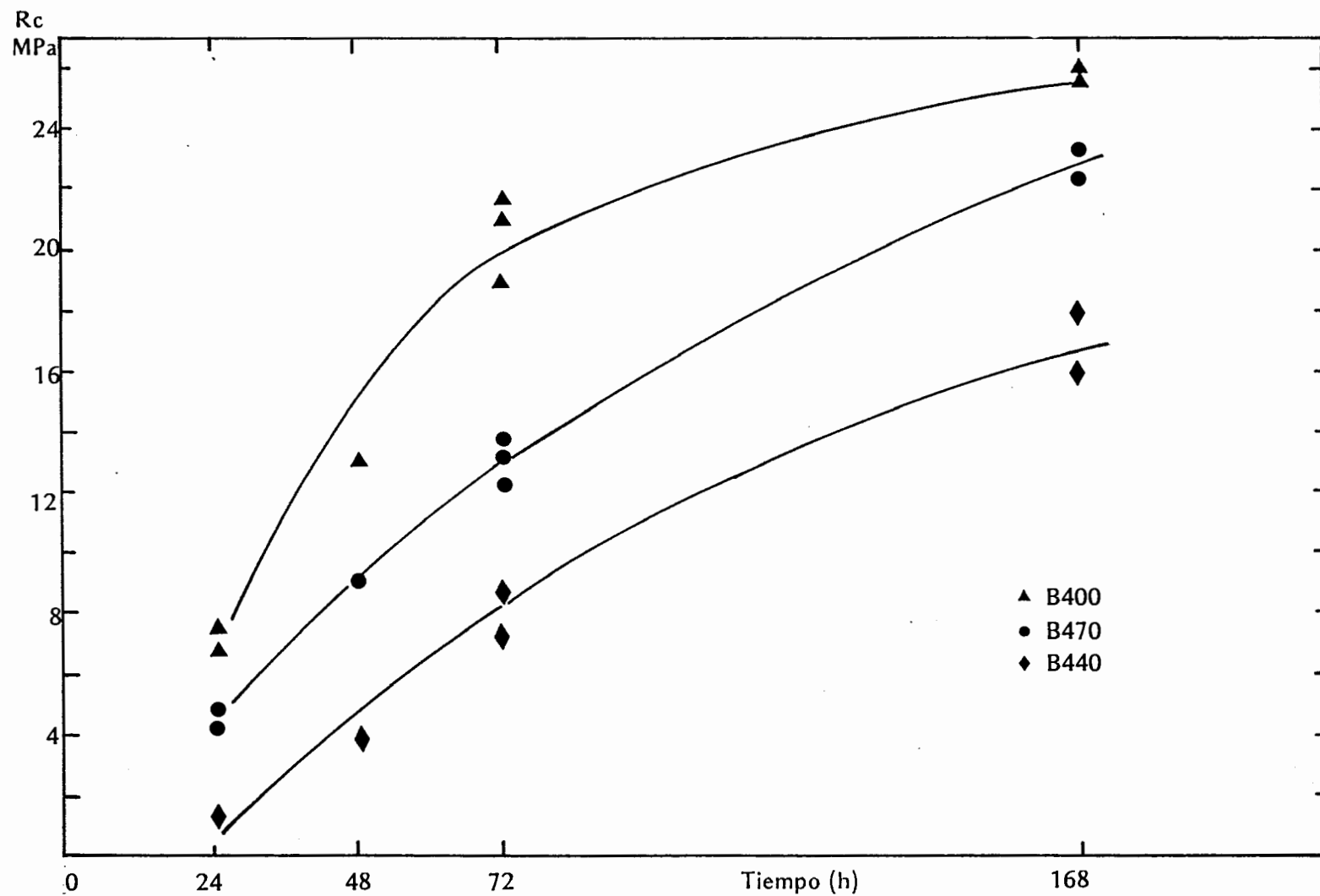


Fig. 3: Resistencia a la compresión en u función del tiempo de curado, temperatura de curado de 20 °C - Corta edad.

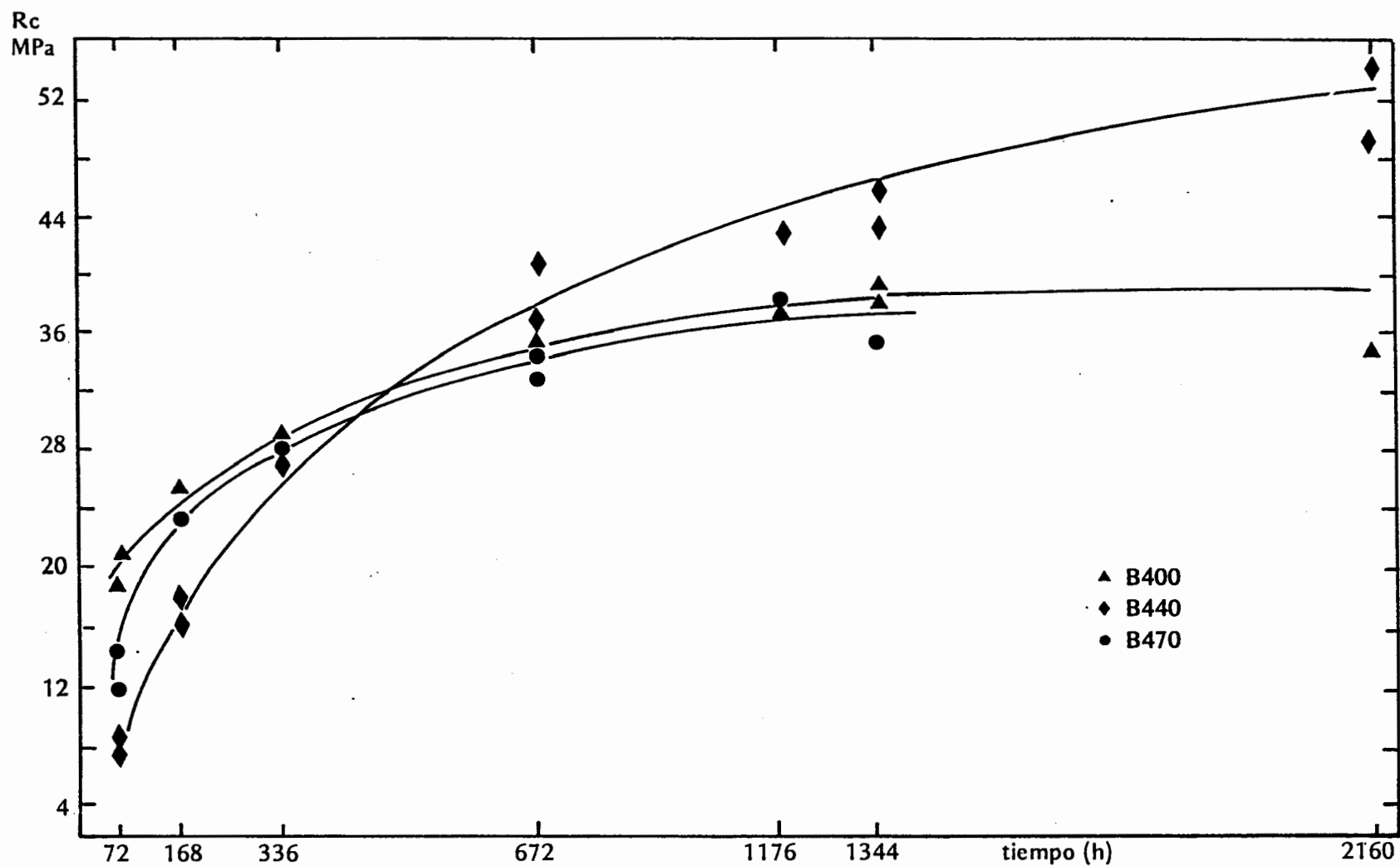


Fig. 4: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, temperatura de curado de 20 °C.

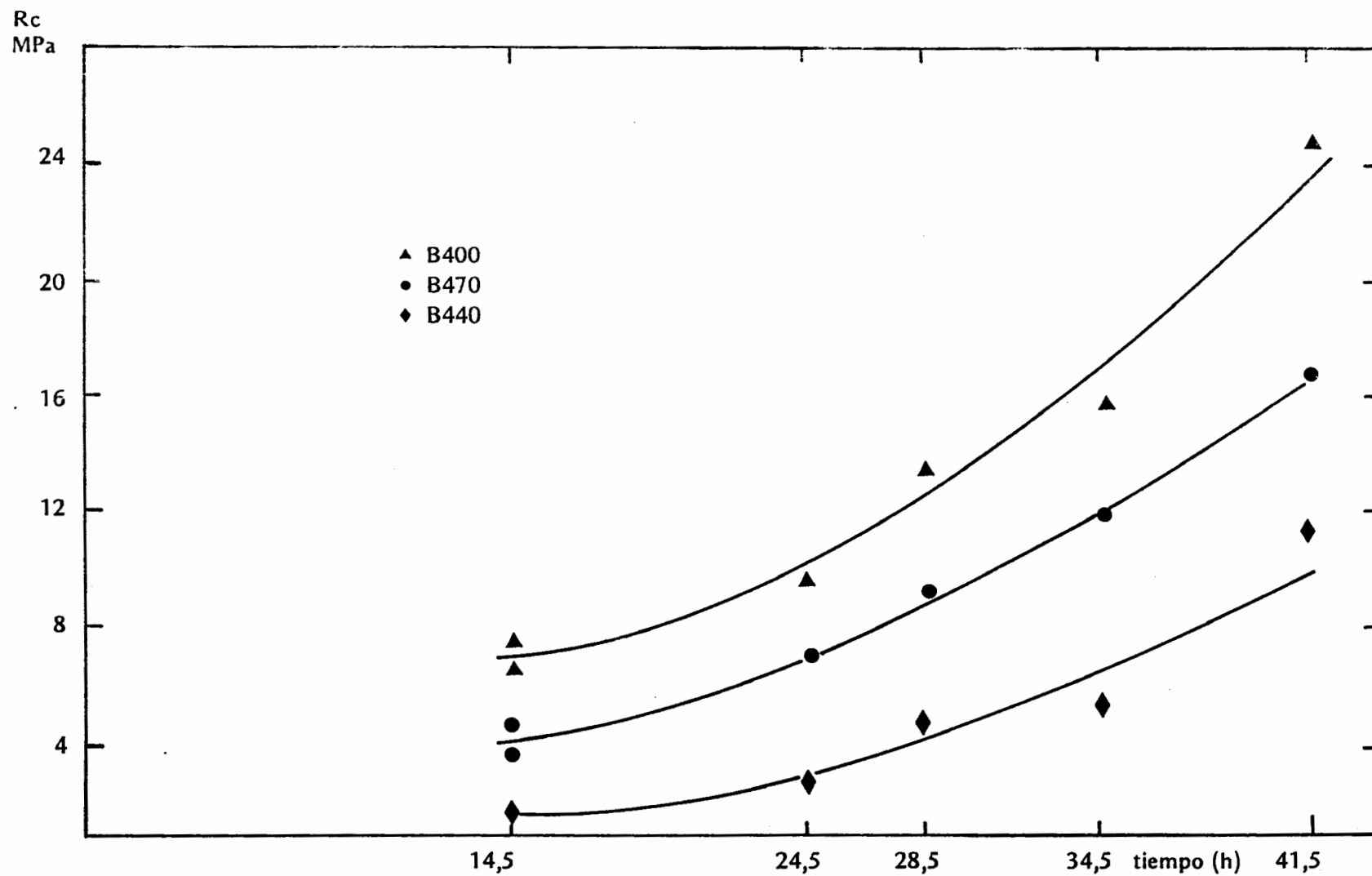


Fig. 5: Resistencia a la compresión en función del tiempo e de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 33 °C - Corta edad.

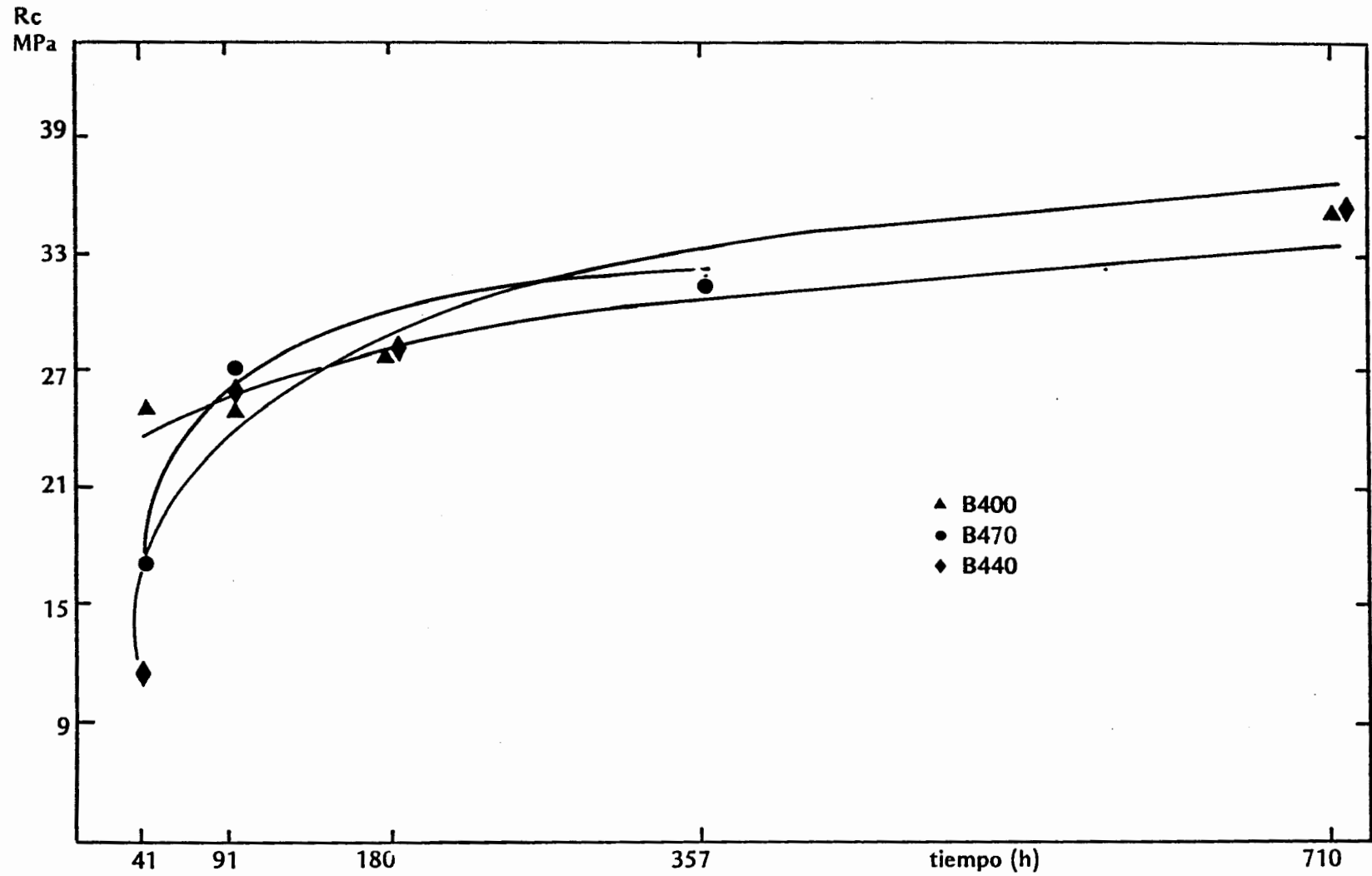


Fig. 6: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 33 °C.

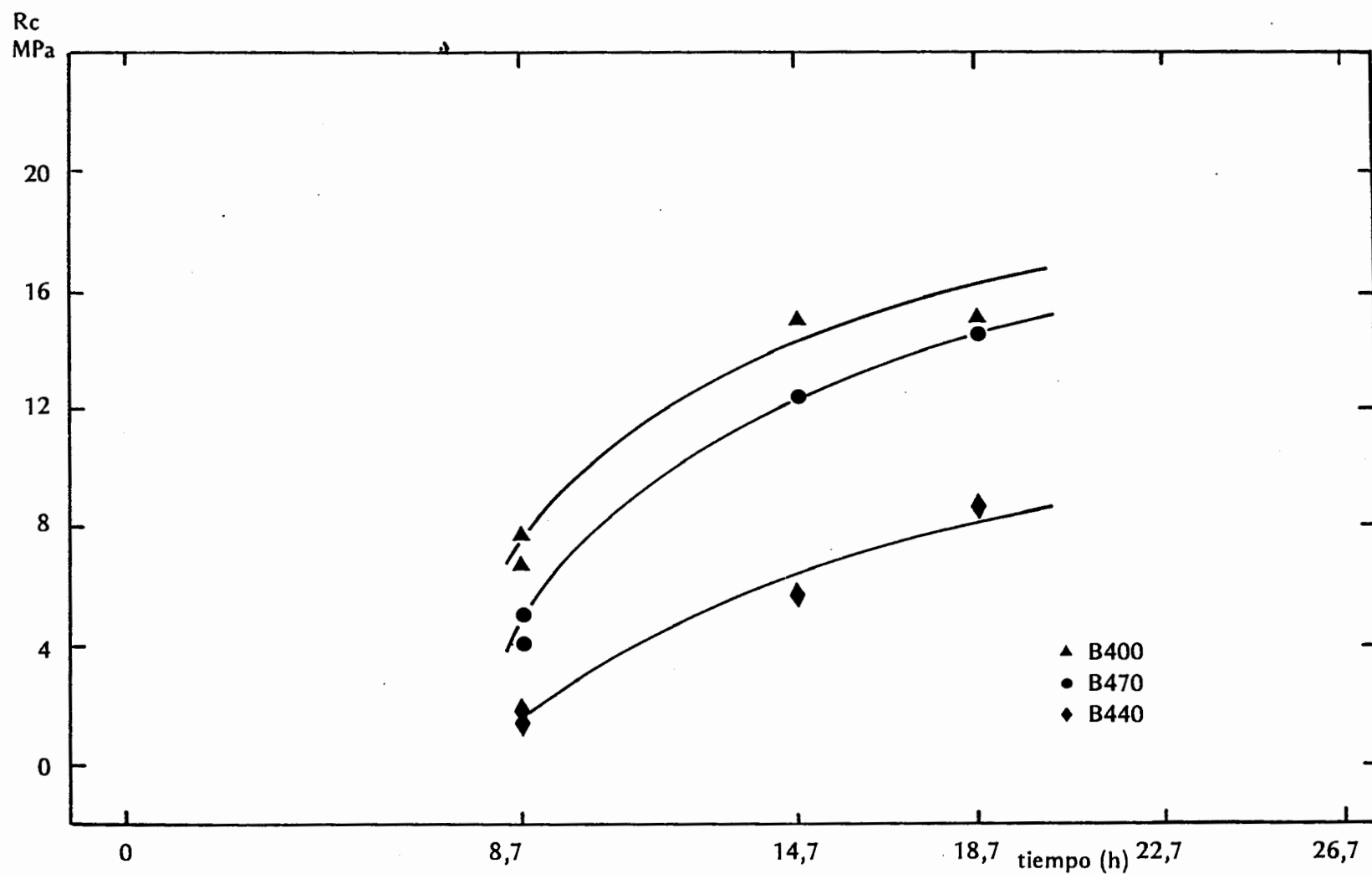


Fig. 7: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 55 °C - Corta edad.

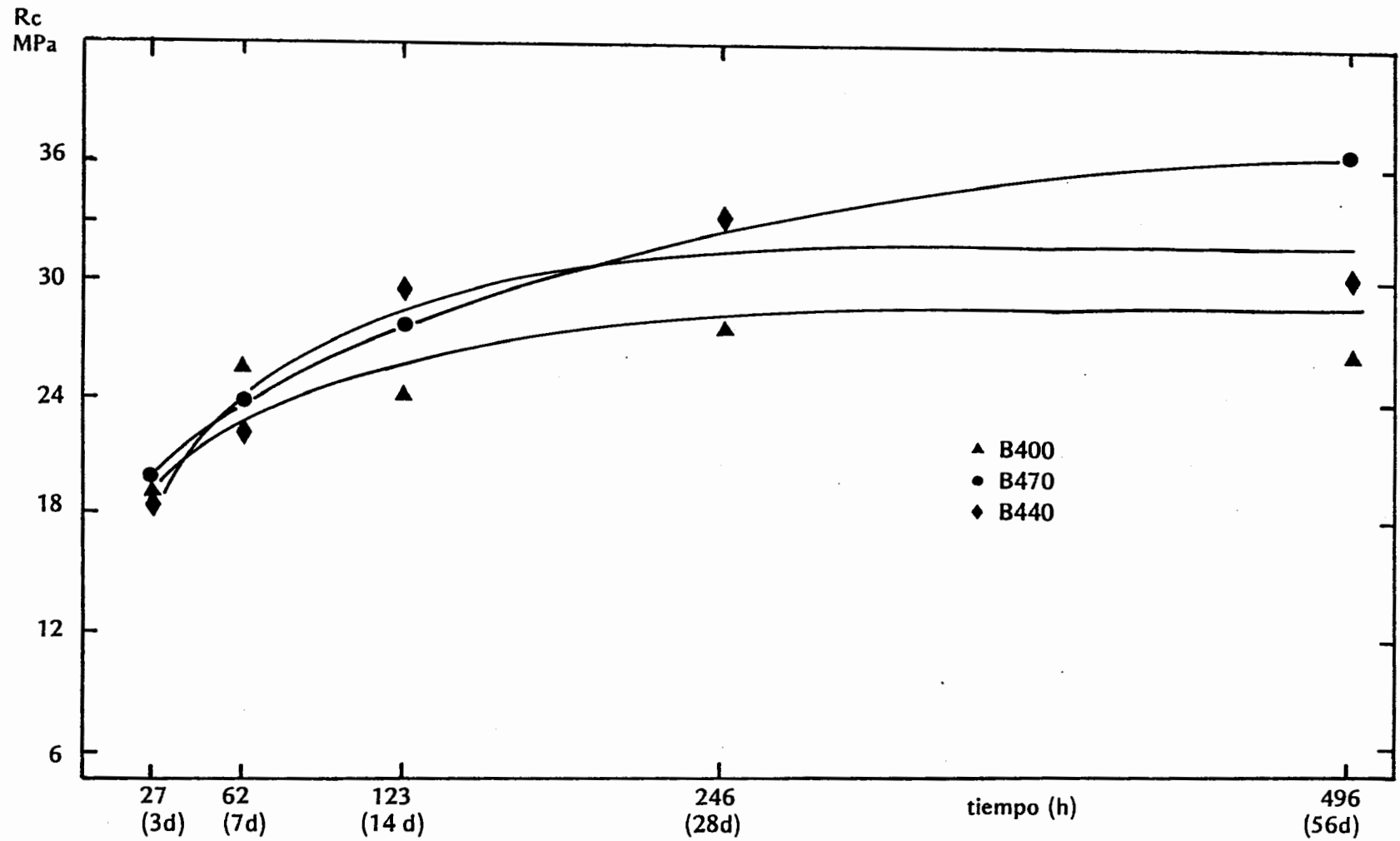


Fig. 8: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 55 °C.

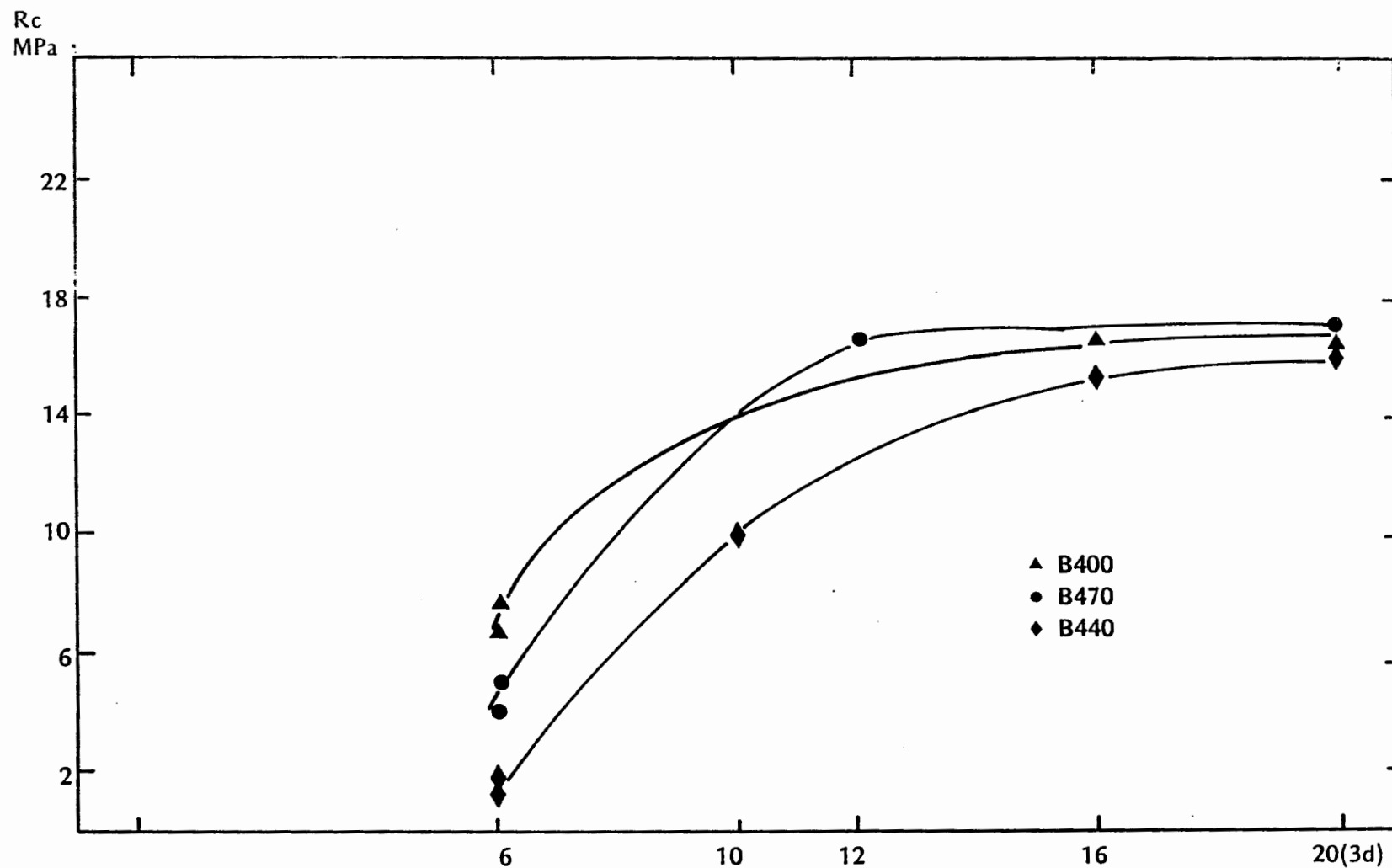


Fig. 9: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 80 °C - Corta edad.

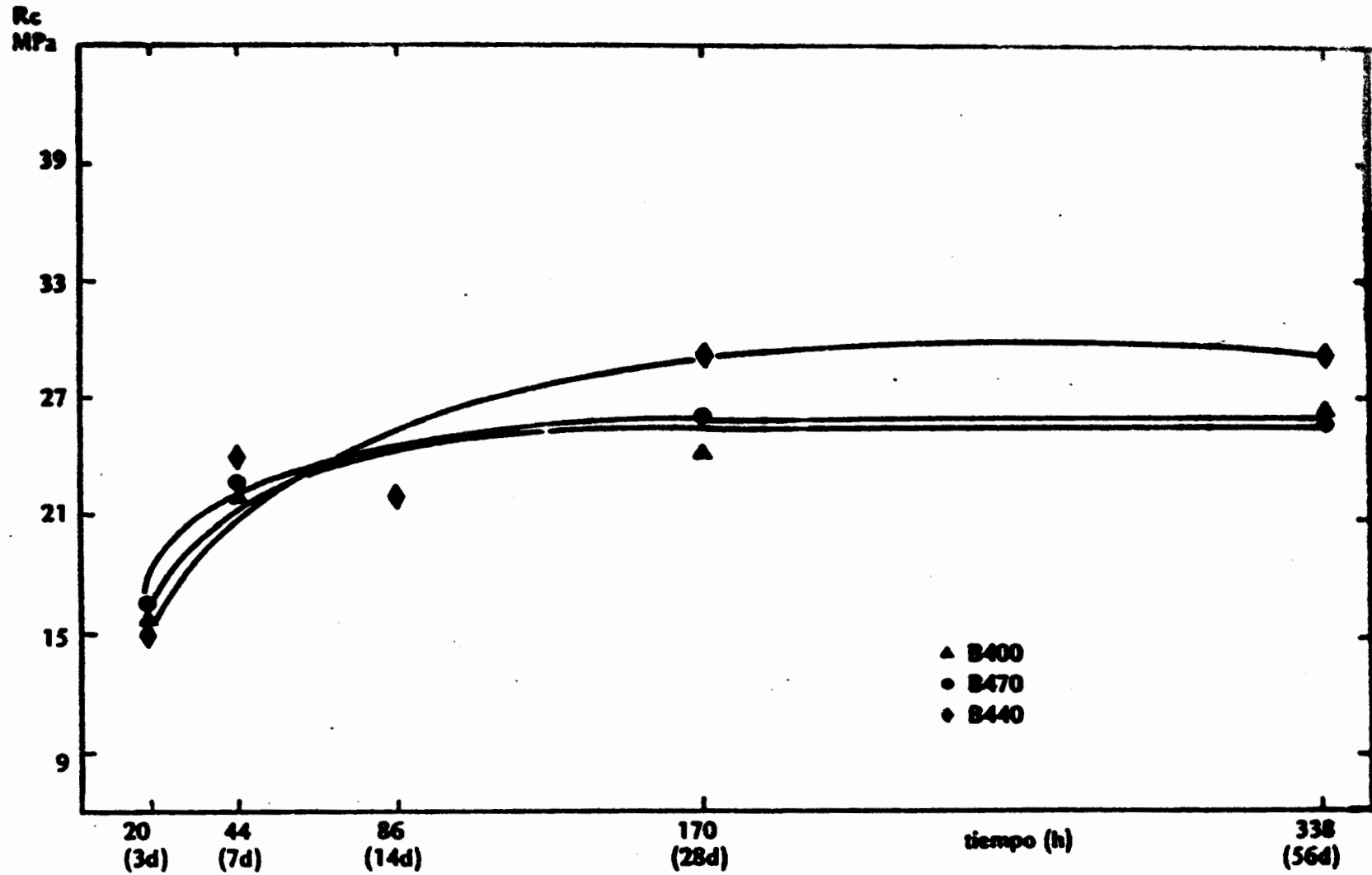


Fig. 10: Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para tiempo de espera de 24 h y temperatura de curado de 80 °C.

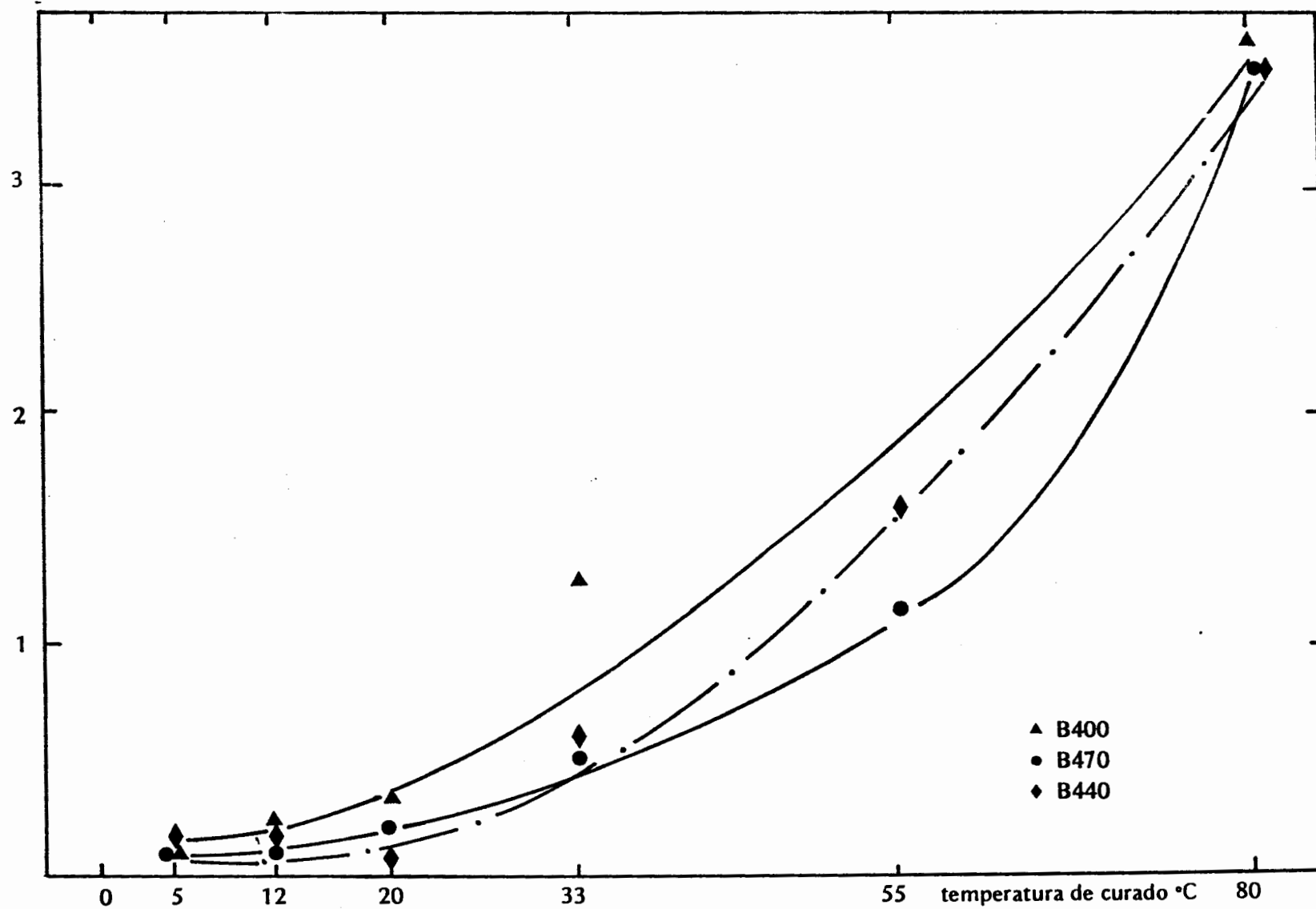


Fig. 11: $k(T)$ en función de la temperatura de curado (°C)

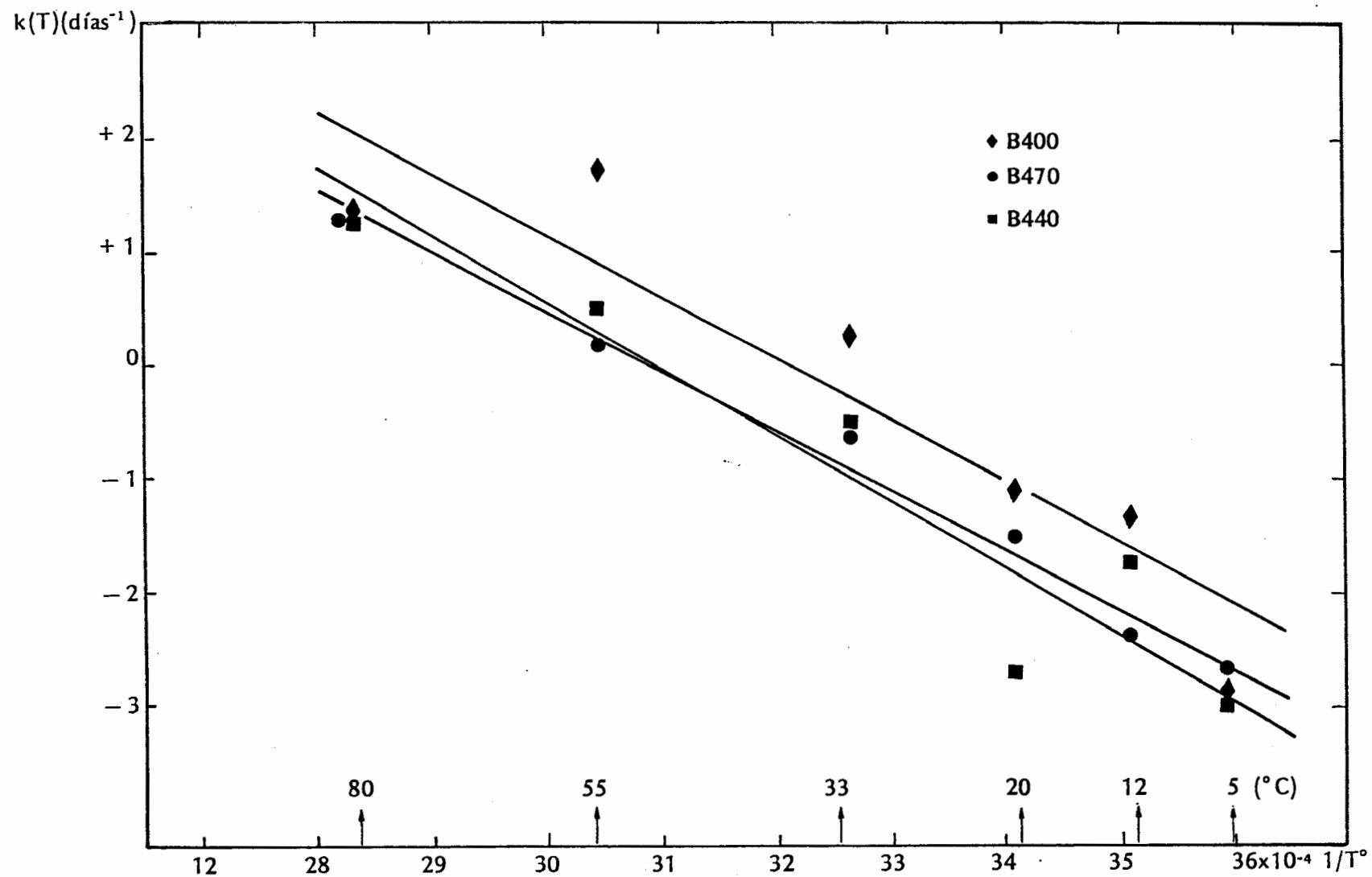


Fig. 12: Logaritmo natural de $k(T)$ en función de la inversa de a la temperatura absoluta.

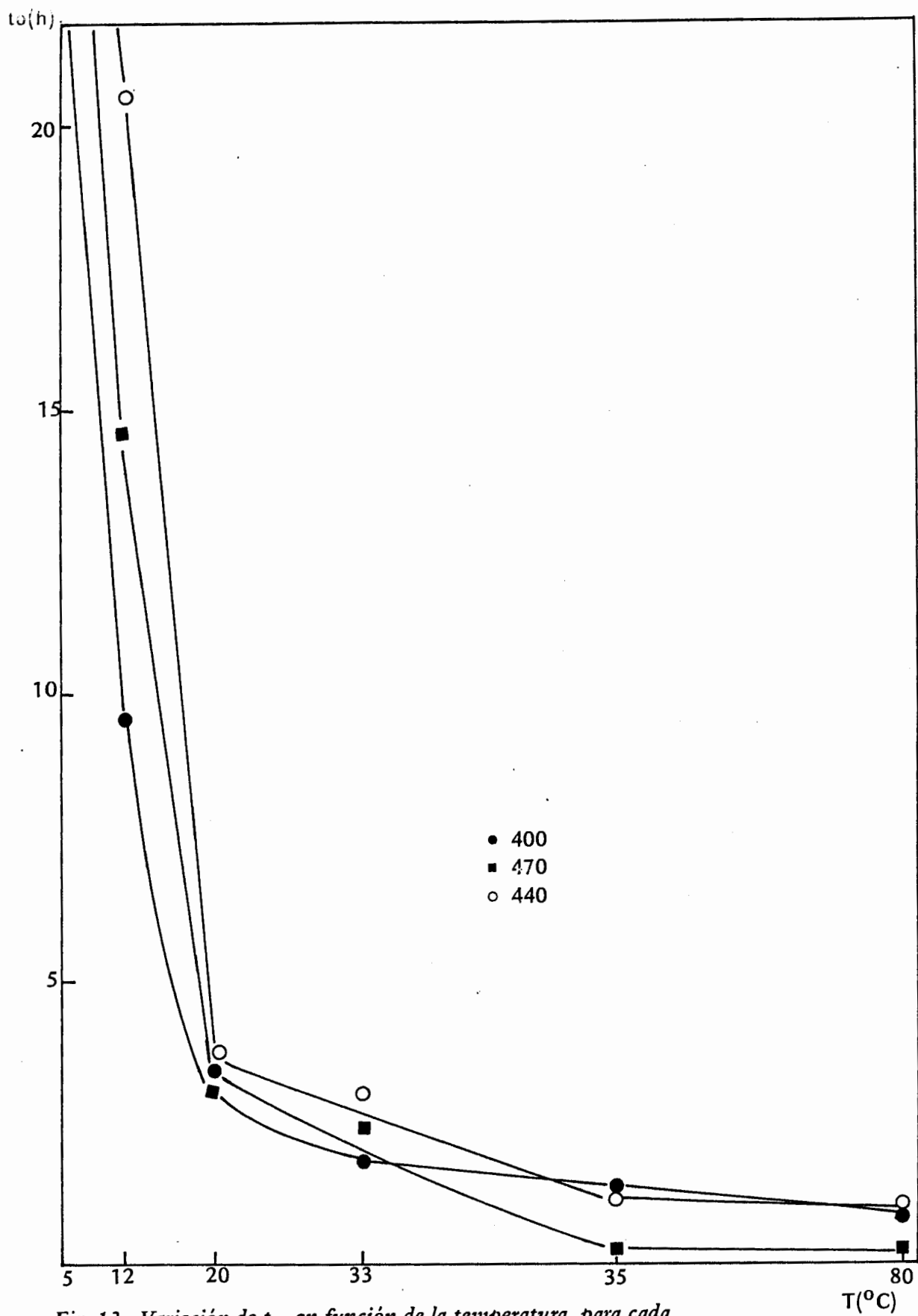


Fig. 13: Variación de t_0 en función de la temperatura, para cada uno de los cementos estudiados.

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° 5.

La escoria de este alto horno es muy particular, ya que en su composición química presenta un contenido alto de SiO_2 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_2 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° 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 piquera 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 m²/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 (m2/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 m2/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 m2/kg y con la escoria, finuras de 500 y 600 m2/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 m²/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 m²/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 m²/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 m²/kg con respecto a 400 m²/kg; esto puede atribuirse a un problema de control en la molienda, ya que repetidos los moldes para 500 m²/kg se obtuvieron resultados similares.

Es de interés señalar que, para 400 m²/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 m²/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 clínker 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 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 m²/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 m²/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 m²/kg, mientras que para 500 m²/kg, se puede llegar hasta un 50 % de sustitución.

3. EVALUACION DE LA ESCORIA GRANULADA MOLIDA EN LA PLANTA DE ALTOS HORNOZ 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/cm³ y 310 m²/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 piqueta 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, H₂S, 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 m²/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 SiO₂, la disminución del CaO y un valor anormalmente alto de los alcalinos totales, expresados como Na₂O.

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 μ m.

4.4.6. Molturabilidad

Se realizó una molienda hasta 500 m²/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 m²/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 ₂)	38,3	39,2	38,5	40,3	40,9
Ox. de aluminio (Al ₂ O ₃)	14,4	13,4	14,0	14,0	13,6
Ox. de hierro (Fe ₂ O ₃)	0,65	0,65	0,64	0,52	0,39
Ox. de manganeso (Mn ₂ O ₃)	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 ₂ O)	0,31	0,40	0,31	0,35	0,28
Ox. de potasio (K ₂ 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 ₃)	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 ₂)	35,5	38,1	38,1	39,1	36,7
Ox. de aluminio (Al ₂ O ₃)	13,7	13,8	14,2	13,2	13,3
Ox. de hierro (Fe ₂ O ₃)	0,68	0,43	0,53	0,41	0,44
Ox. de manganeso (Mn ₂ O ₃)	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 ₂ O)	0,30	0,29	0,31	0,26	0,26
Ox. de potasio (K ₂ 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 ₃)	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 ₂)	21,4
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4,37
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	3,55
Oxido de calcio (CaO)	62,8
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,18
Oxido de potasio (K ₂ O)	0,35
Oxido de magnesio (MgO)	2,94
Trióxido de azufre (SO ₃)	2,12
Pérdida por calcinación	1,65
Oxido de calcio libre (CaO)	0,20
Alcalinos totales (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	0,41

Tabla 4: Composición y finura de los cementos mezcla

Ident.	Esc. %	Clink. %	Yeso %	Finura m2/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	0:50
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 m2/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 m²/kg, a las edades de 3, 7 y 28 días.

Contenido de escoria	Resistencia a la compresión (MPa)				
	400 m ² /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 ² /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 m2/kg	500 m2/kg
7	41	69
28	66	87

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

Finura (m2/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 ₂)	39,2
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	9,84
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	3,56
Oxido de manganeso (Mn ₂ O ₃)	1,85
Oxido de Calcio (CaO)	35,4
Oxido de Sodio (Na ₂ O)	0,57
Oxido de Potasio (K ₂ O)	1,77
Oxido de Magnesio (MgO)	3,67
Trióxido de Azufre (SO ₃)	0,33
Pérdida por Calcinación	3,42
Alcalinos totales, equiv. en Na ₂ 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 ₂)	43,1	42,1
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	10,0	9,91
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	1,17	1,59
Oxido de manganeso (Mn ₂ O ₃)	1,71	1,59
Oxido de calcio (CaO)	34,7	33,0
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0,66	1,06
Oxido de potasio (K ₂ O)	2,35	3,90
Trióxido de azufre (SO ₃)	0,12	0,14
Pérdida por calcinación	0,32	0,37
Oxido de magnesio (MgO)	5,30	4,94
Alcalinos totales, equiv. en Na ₂ 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 (m2/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 (m2/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 (m2/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 (cm3)	Aditivo (cm3)
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

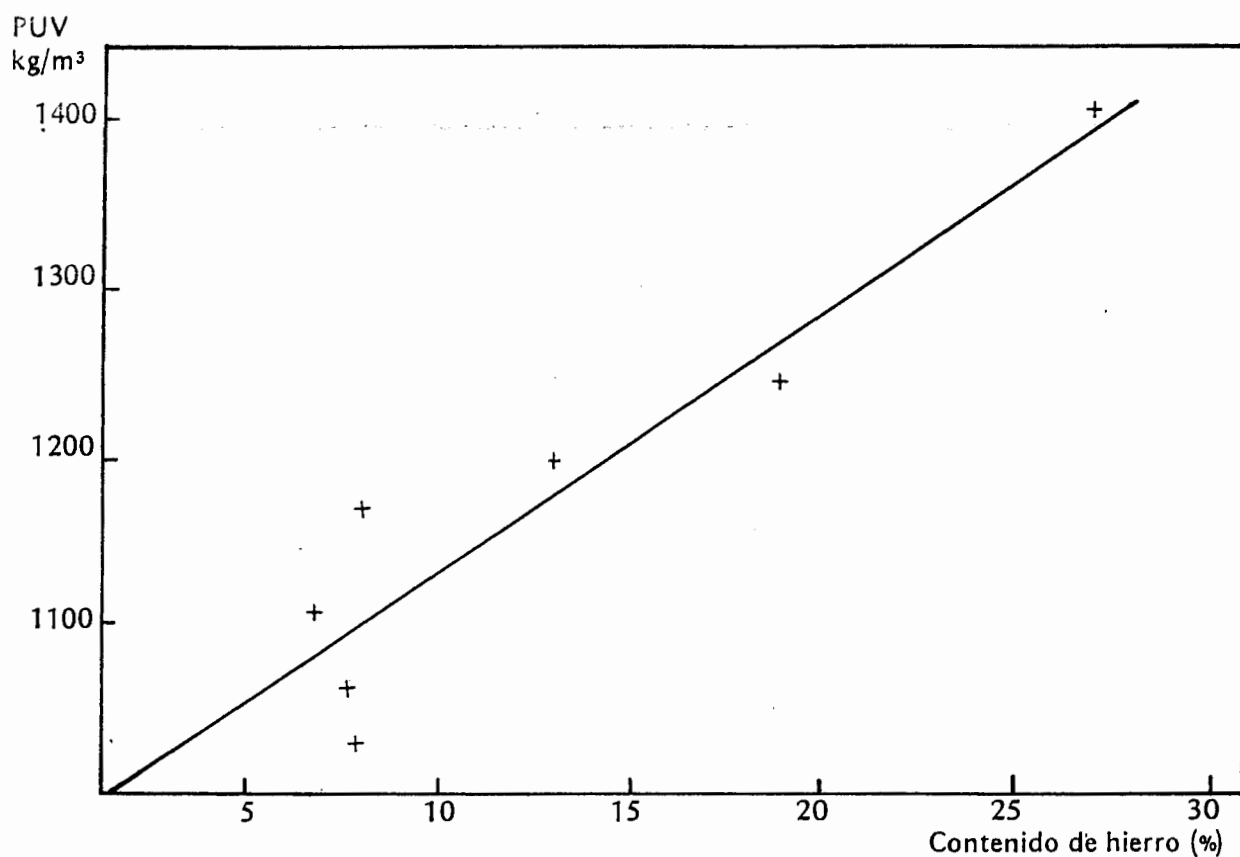


Fig. 1: Masa de la unidad de volumen en función del porcentaje de ancho en la escoria.

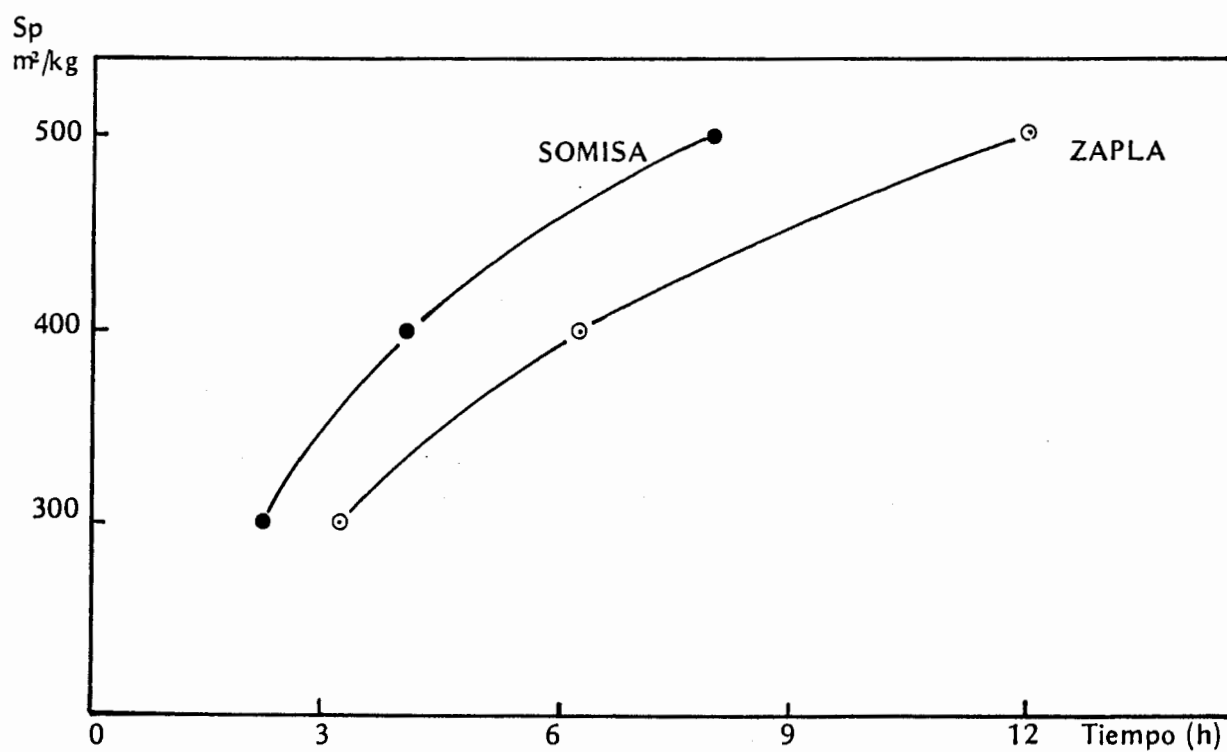


Fig. 2: Superficie específica en función del tiempo de molienda para las escorias de SOMISA y Altos Hornos ZAPLA

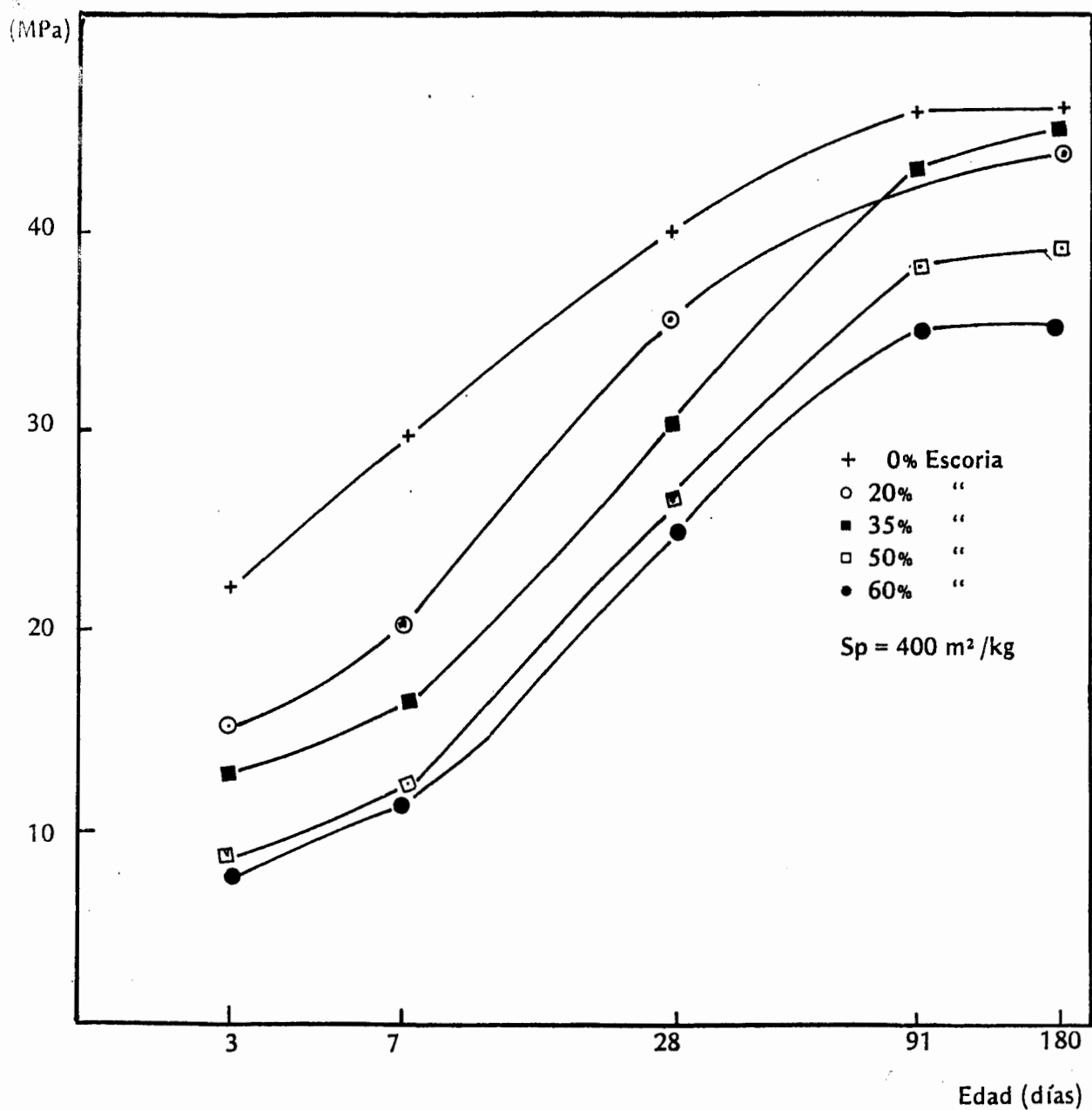


Fig. 3: Resistencia a la compresión para distintos contenidos de escoria en función de la edad. Superficie específica $400 \text{ m}^2/\text{kg}$.

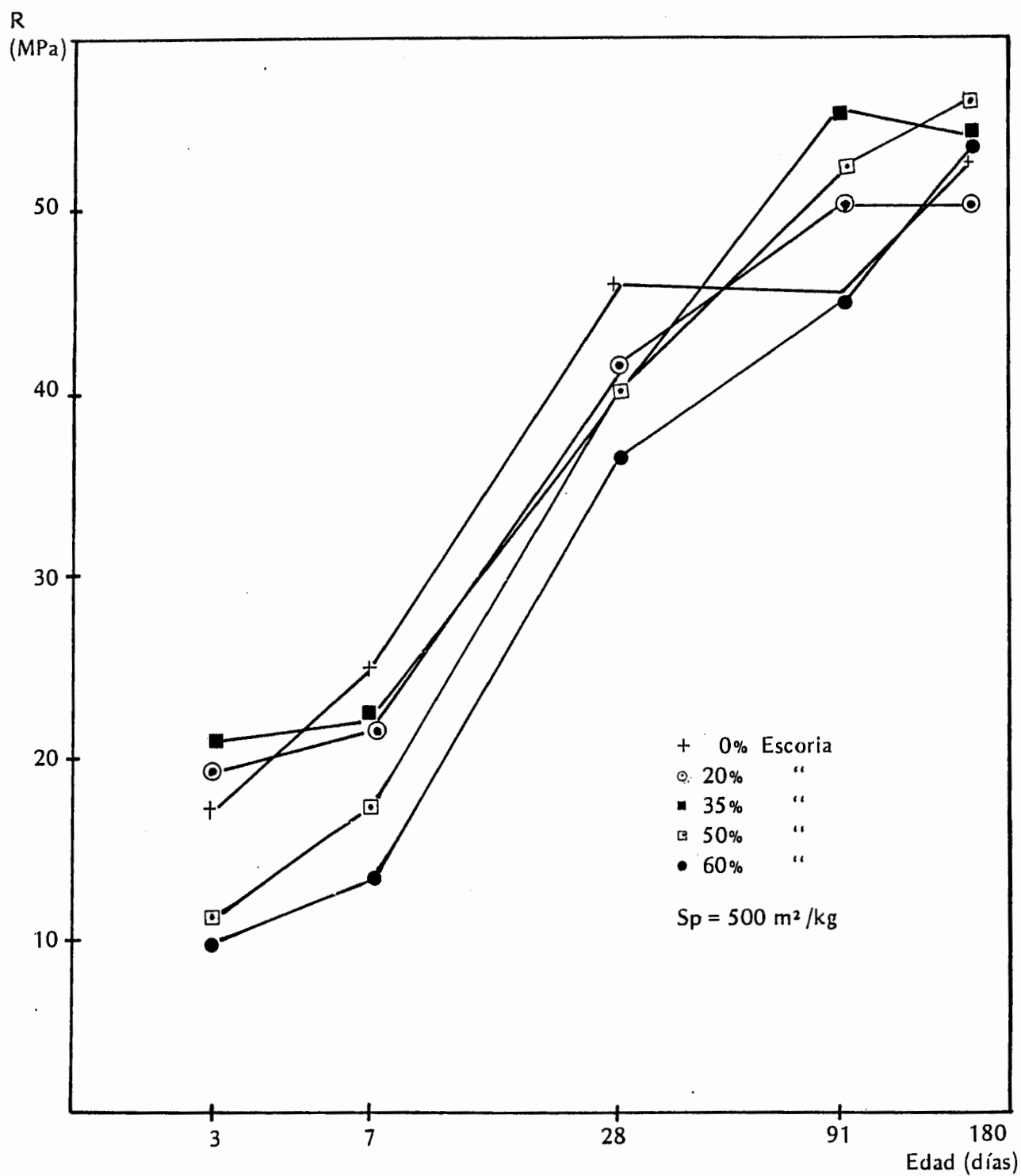


Fig. 4: Resistencia a la compresión para distintos contenidos de escoria en función de la edad. Superficie específica $500 \text{ m}^2/\text{kg}$.

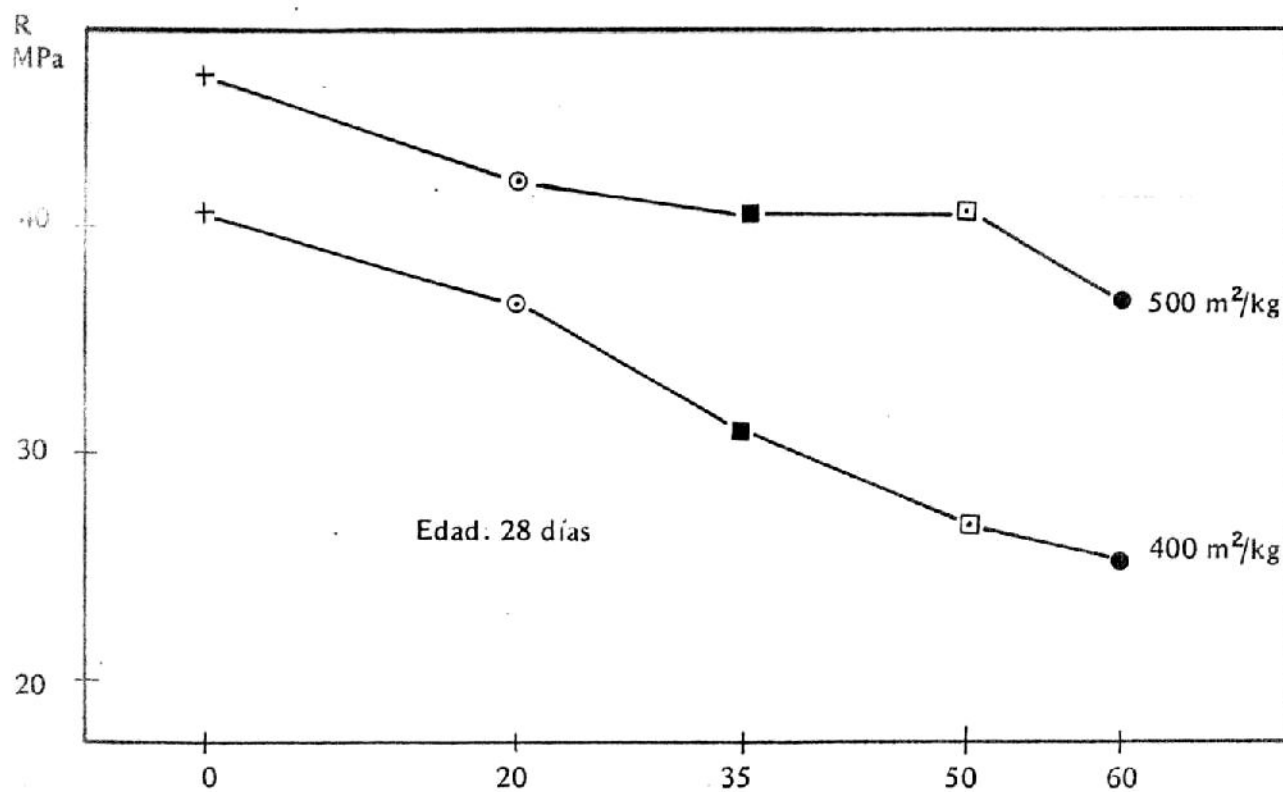


Fig. 5: Resistencia a compresión a 28 días para distintos contenidos de escoria y para finura 400 y 500 m²/kg Blaine.

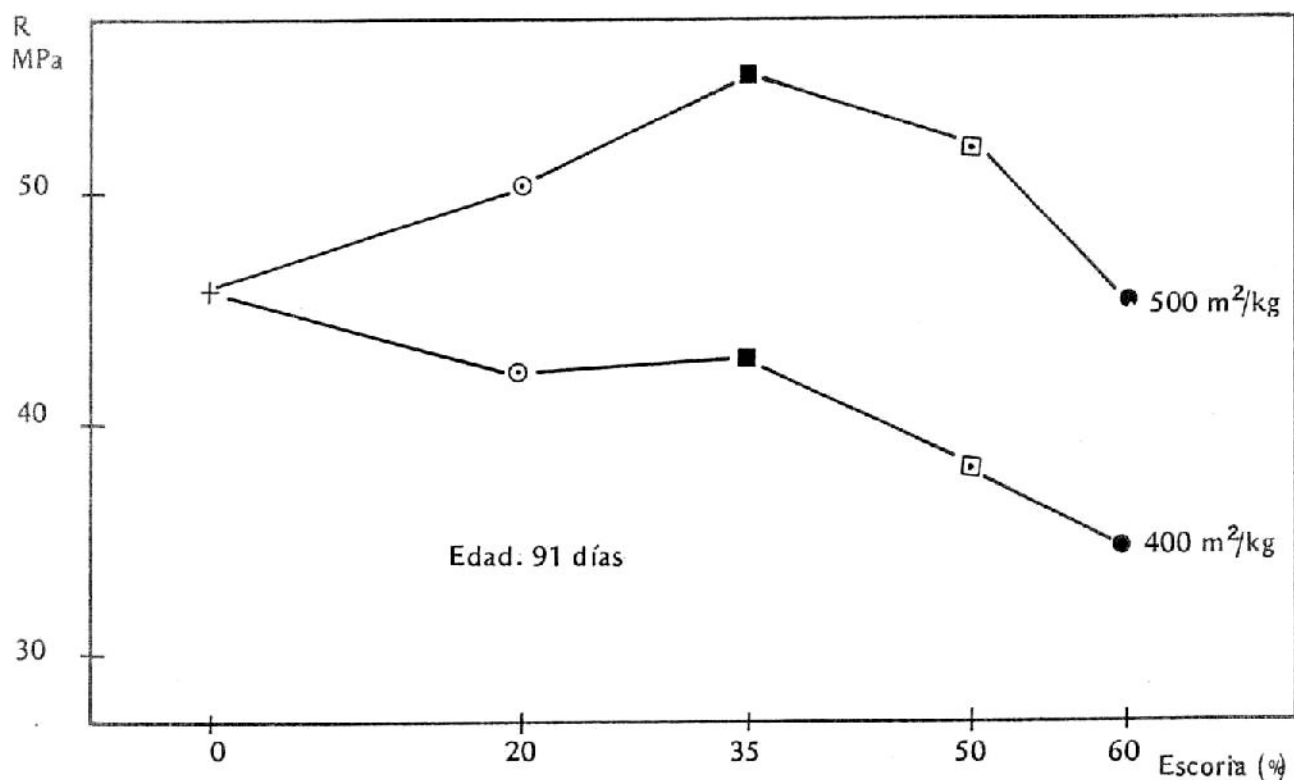


Fig. 6: Resistencia a compresión a 91 días para distintos contenidos de escoria y para finuras 400 y 500 m²/kg Blaine.

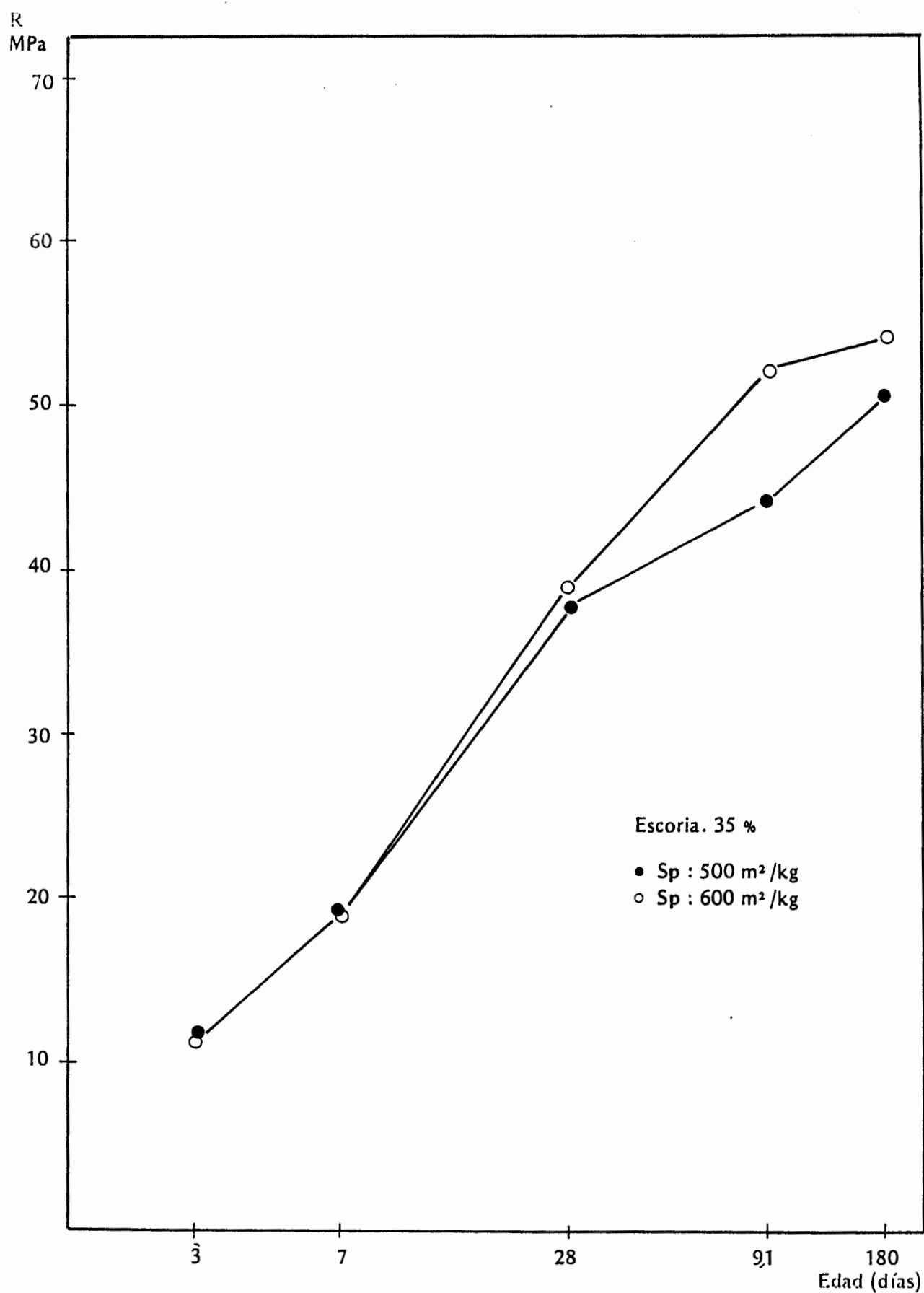


Fig. 7: Resistencia a compresión de morteros obtenidos por molienda separada, en función de la edad, para 35 % de escoria y finura 500 y 600 m²/kg.

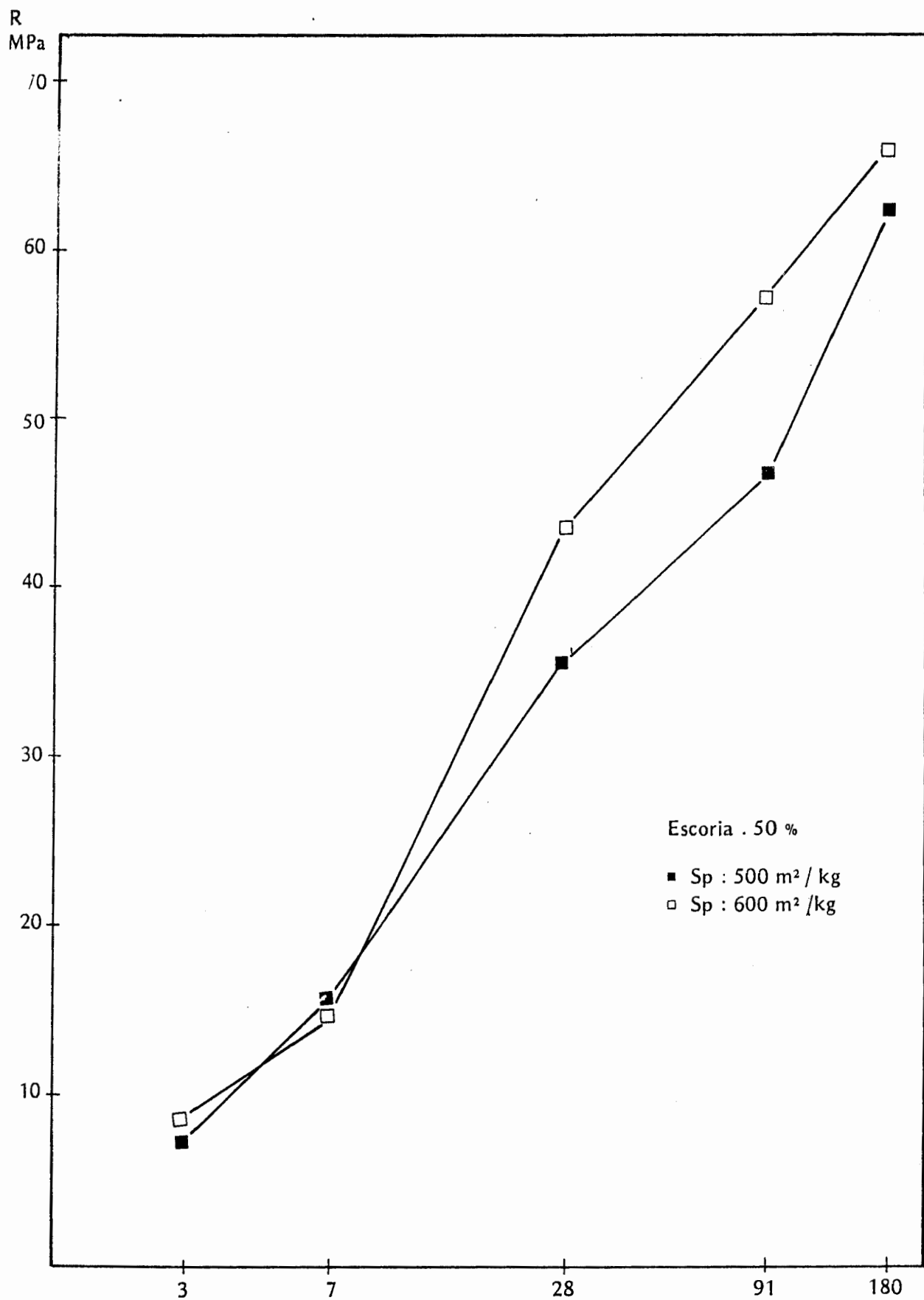


Fig. 8: Resistencia a compresión de morteros obtenidos por molienda separada, en función de la edad, para 50% de escoria y finura 500 y 600 m^2/kg .

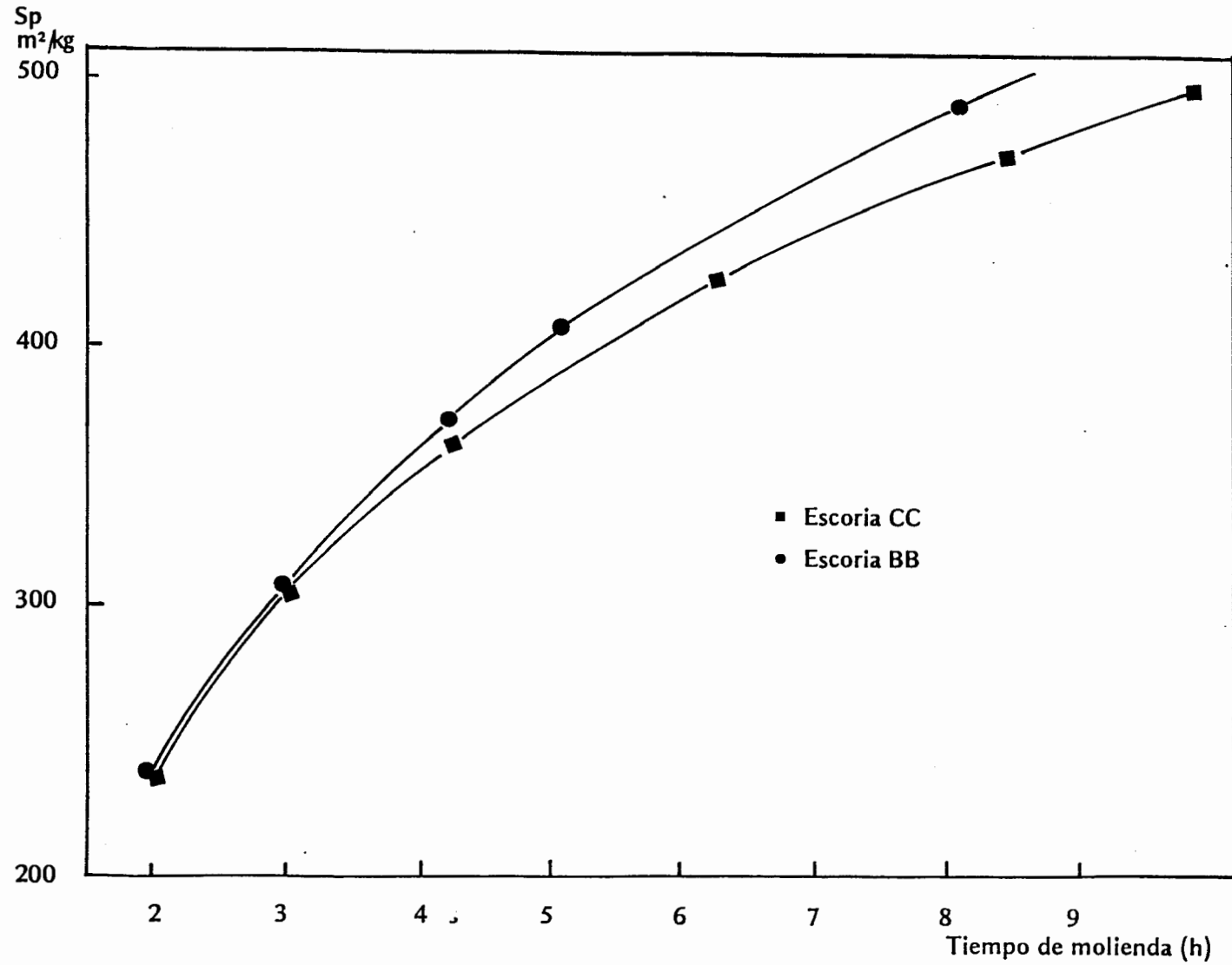


Fig. 9: Superficie específica en función del tiempo de molienda para la escoria granulada normalmente (CC) y con la a caja de granulación (BB).

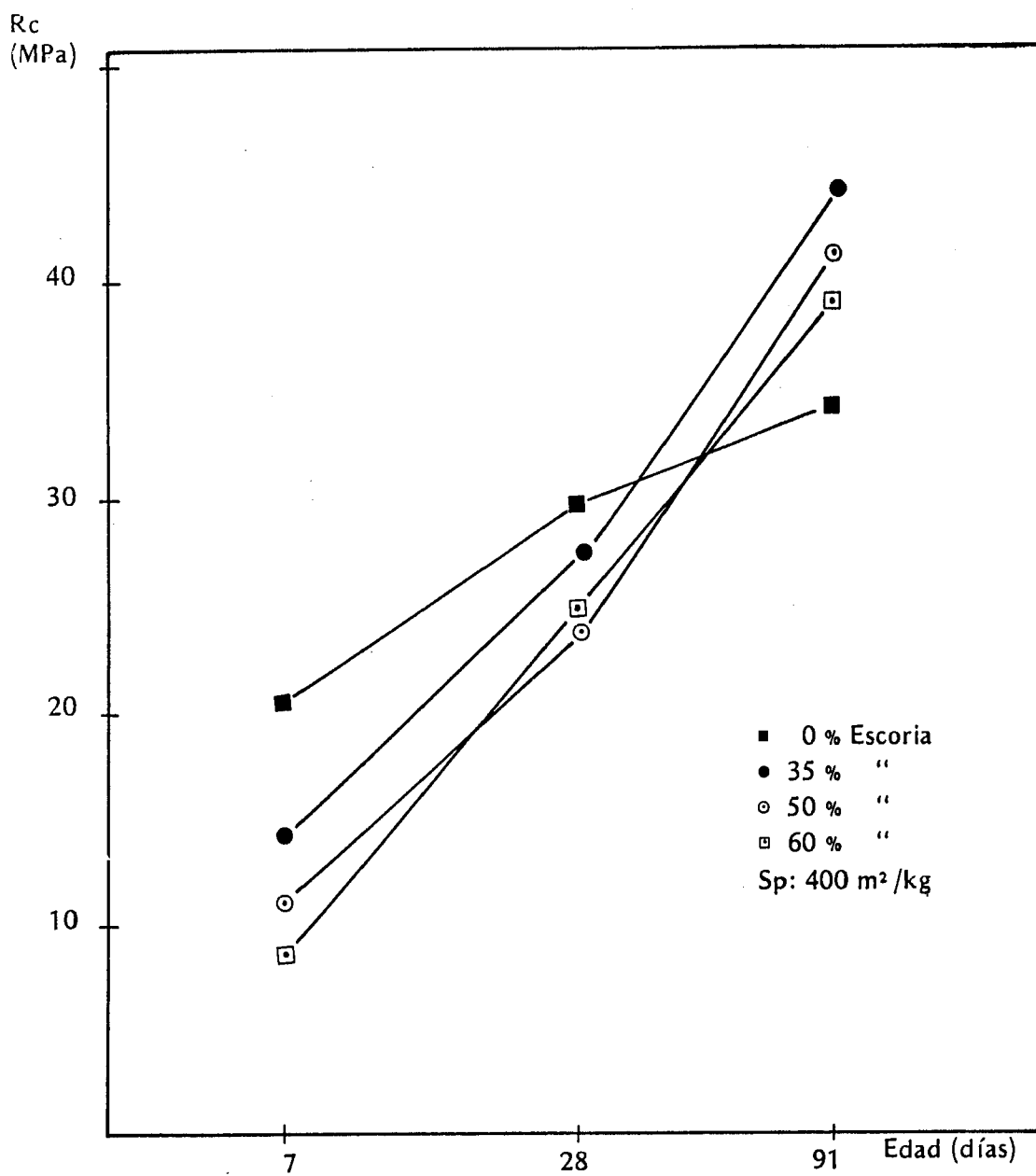


Fig. 10: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria granulada normalmente (CC), en función de la edad. Finura de la escoria 400 m²/kg.

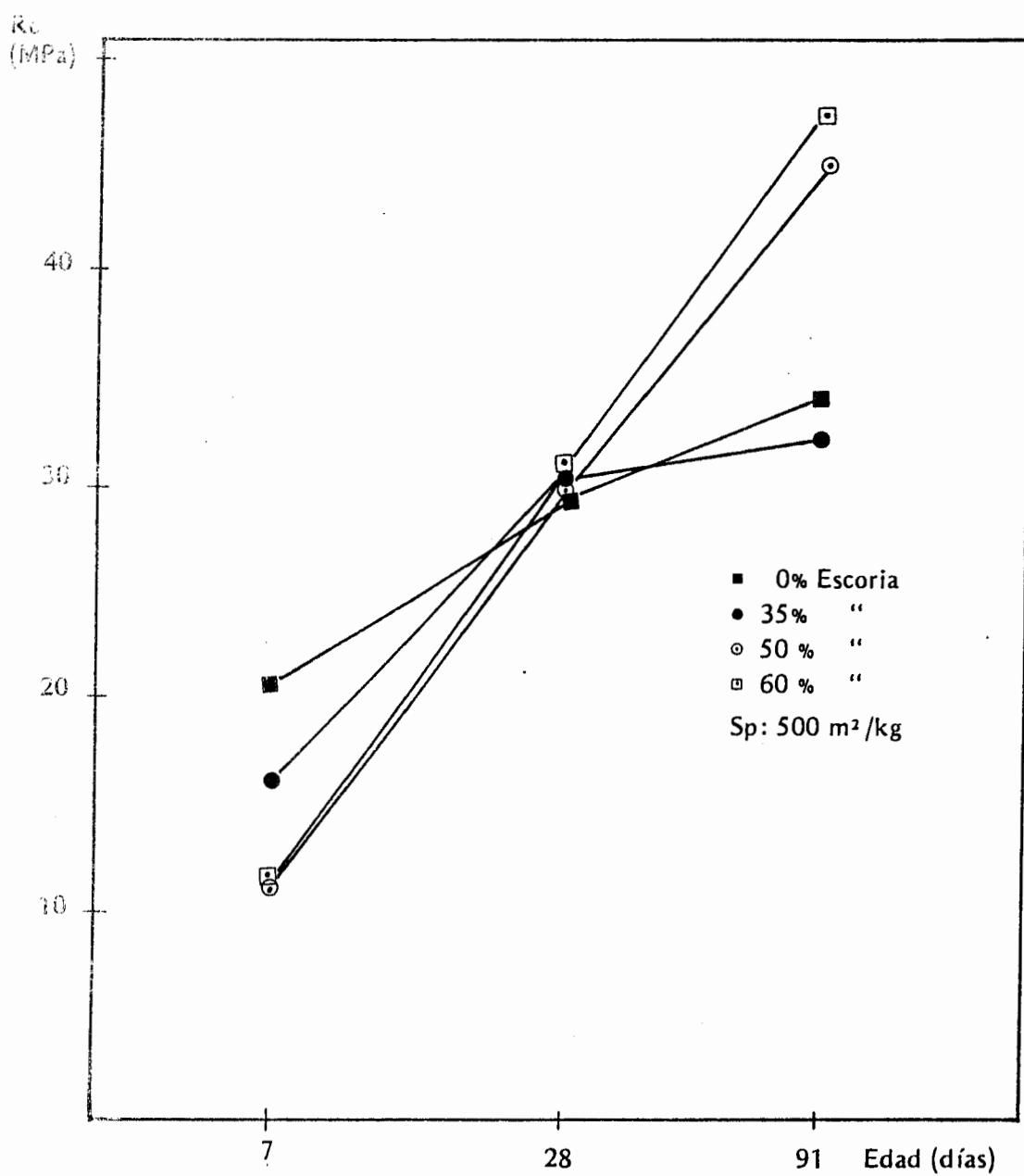


Fig. 11: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria granulada normalmente (CC), en función de la edad. Finura de la escoria 500 m²/kg.

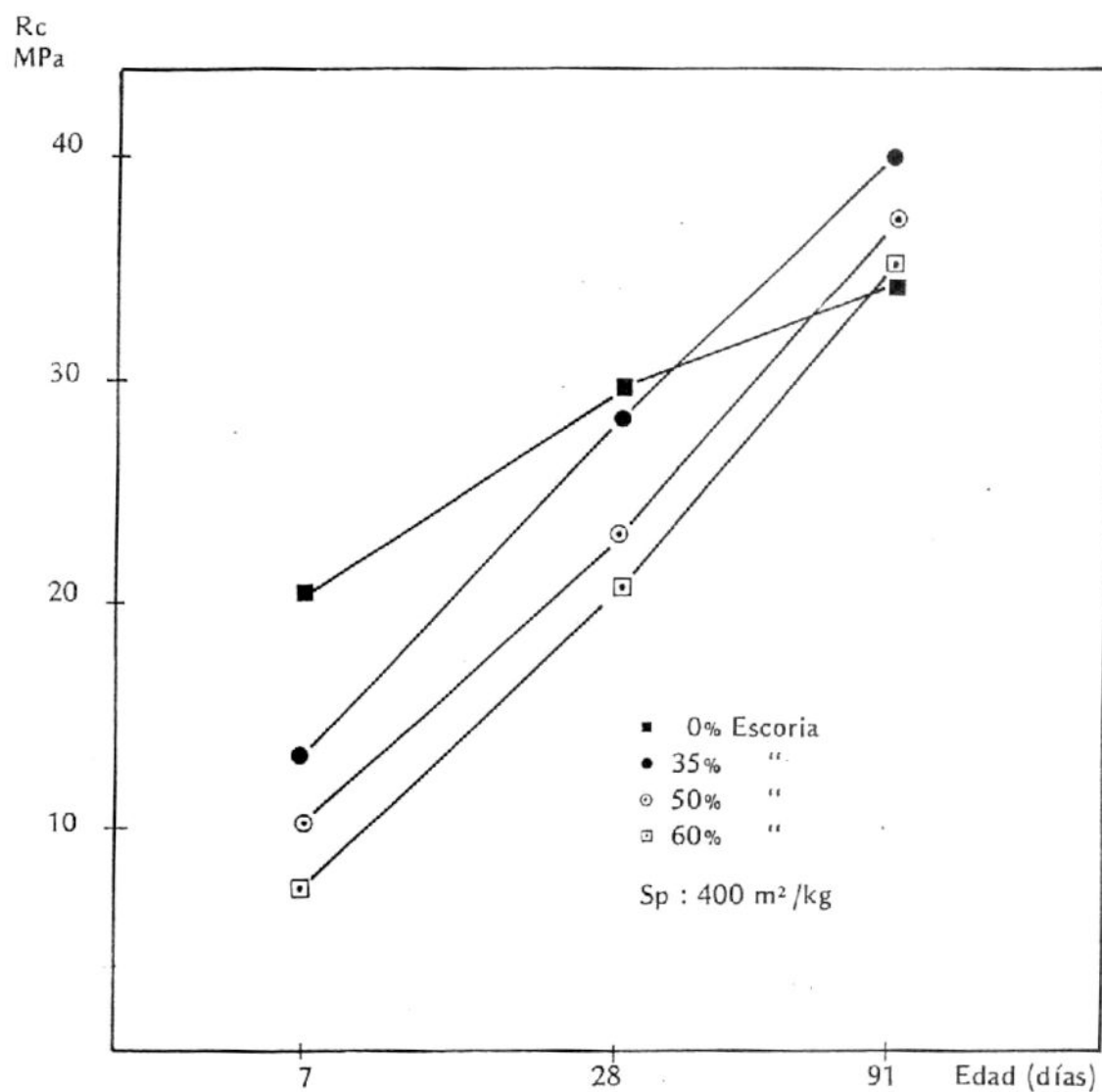


Fig. 12: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria obtenida con la caja de granulación (BB), en función de la edad. Finura de la escoria 400 m²/kg.

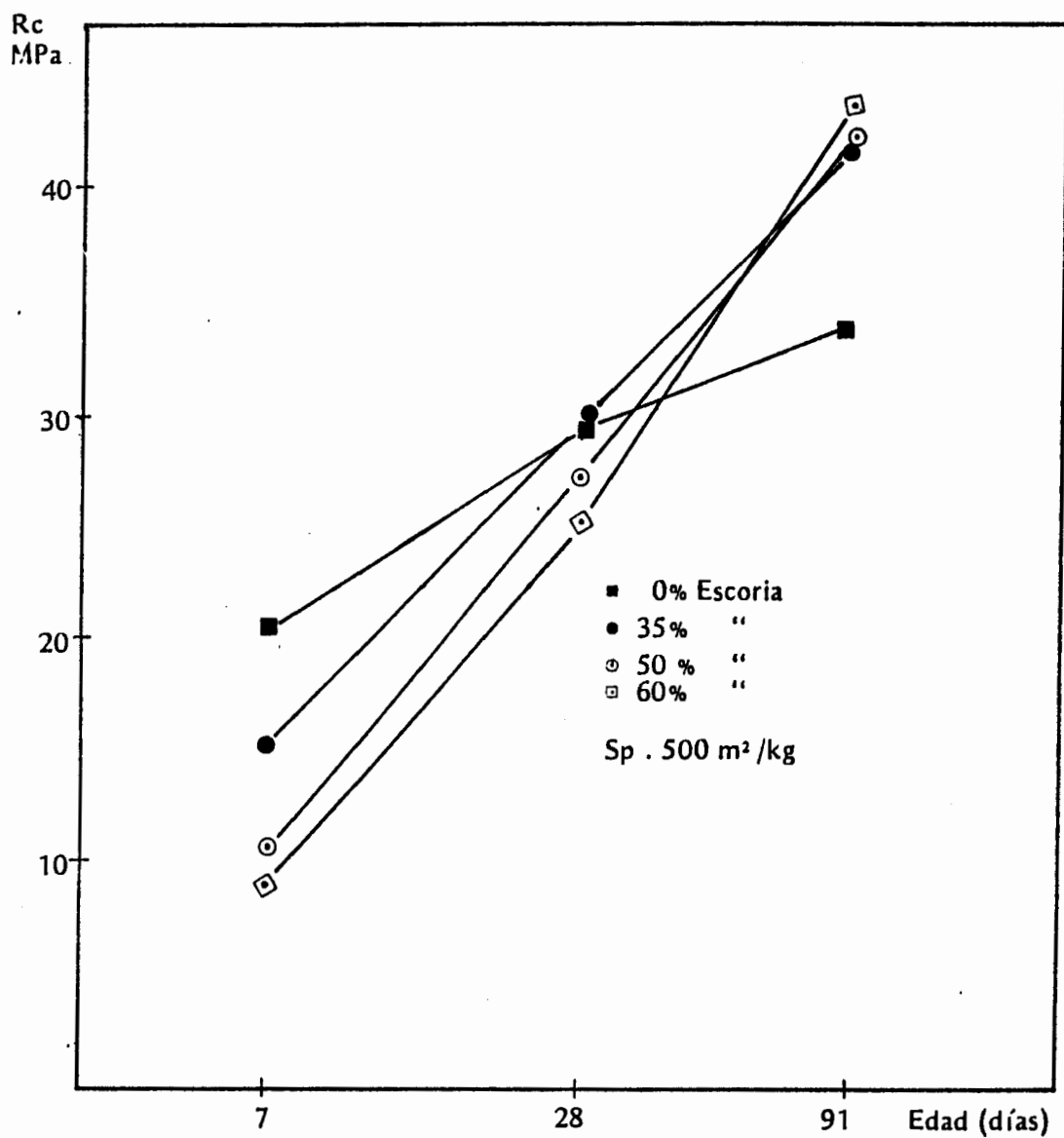
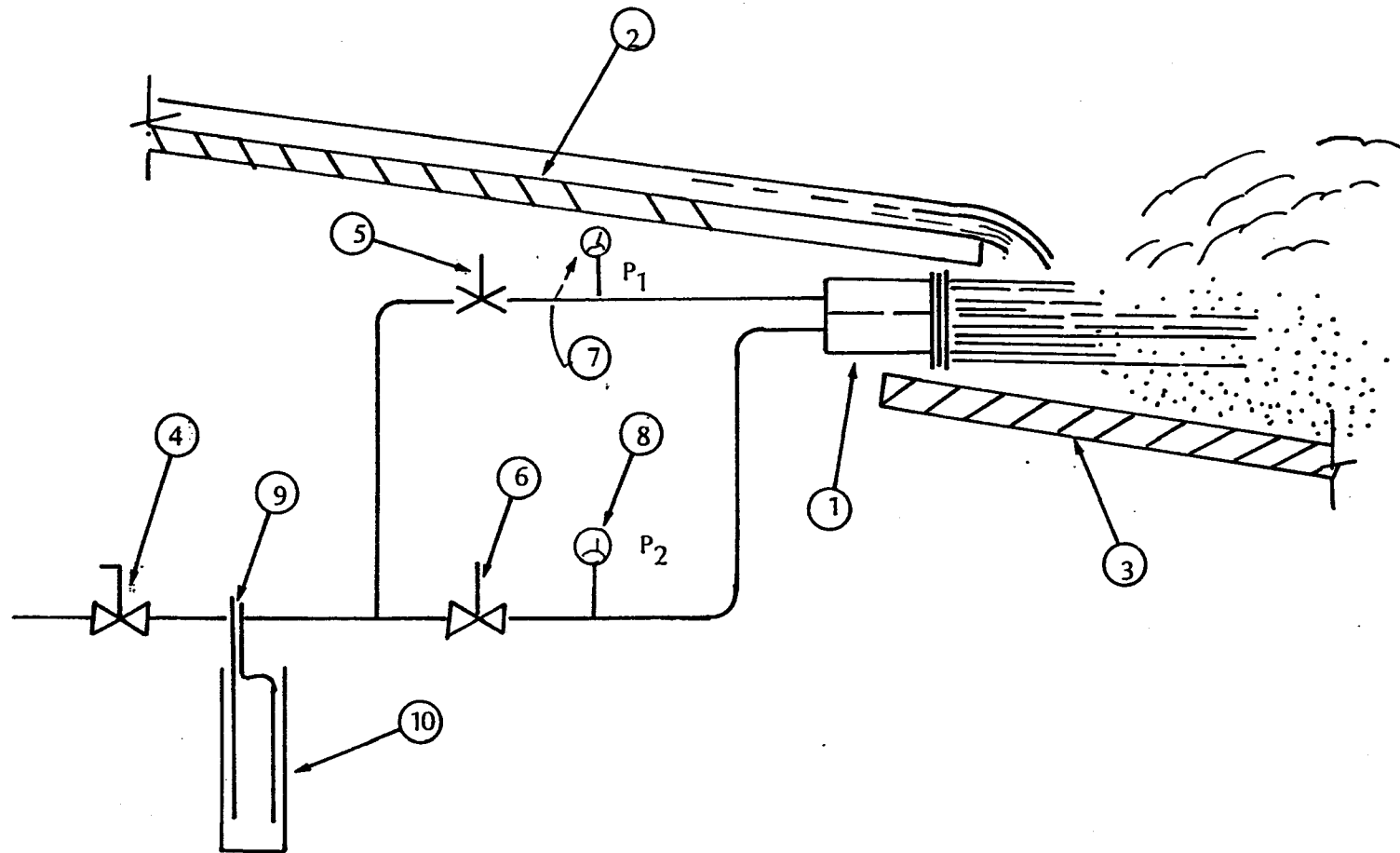


Fig. 13: Resistencia a la compresión para distintos niveles de reemplazo, escoria obtenida con la caja de granulación (BB), en función de la edad. Finura de la escoria 500 m² /kg.



- 1. Caja de granulación.
- 2. Canal de escoria líquida.
- 3. Canal de escoria fría
- 4. Válvula principal.
- 5. Válvula cámara superior.

- 6. Válvula cámara inferior.
- 7. Manómetro cámara superior.
- 8. Manómetro cámara inferior.
- 9. Placa orificio.
- 10. Manómetro.

Fig. 14: Esquema de instalación de la caja de granulación.

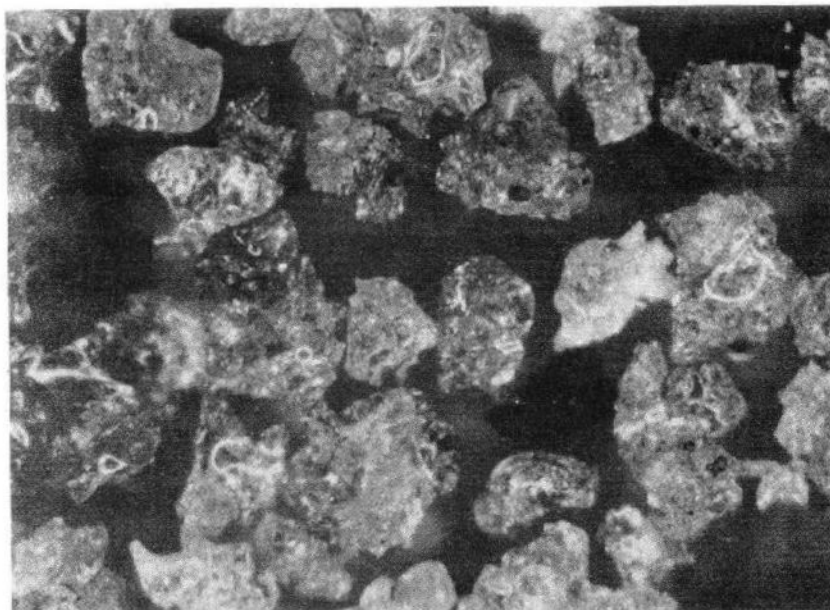


Fig. 15-a: Muestra B.B. Microfotografía 1, x 10 aumentos: Se observan partículas de escoria con textura vitrea, transparentes, y con conclusiones metálicas. Las mismas son de formas irregulares y con fractura concoide.

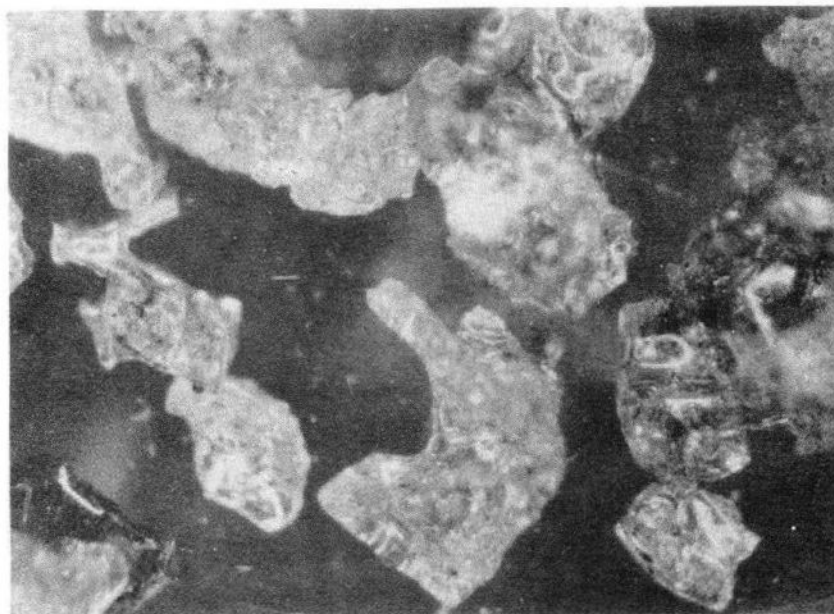


Fig. 15-b: Muestra B.B. Microfotografía 2, x 20 aumentos: Se observan partículas de escoria con características similares a la microfotografía 15-a.

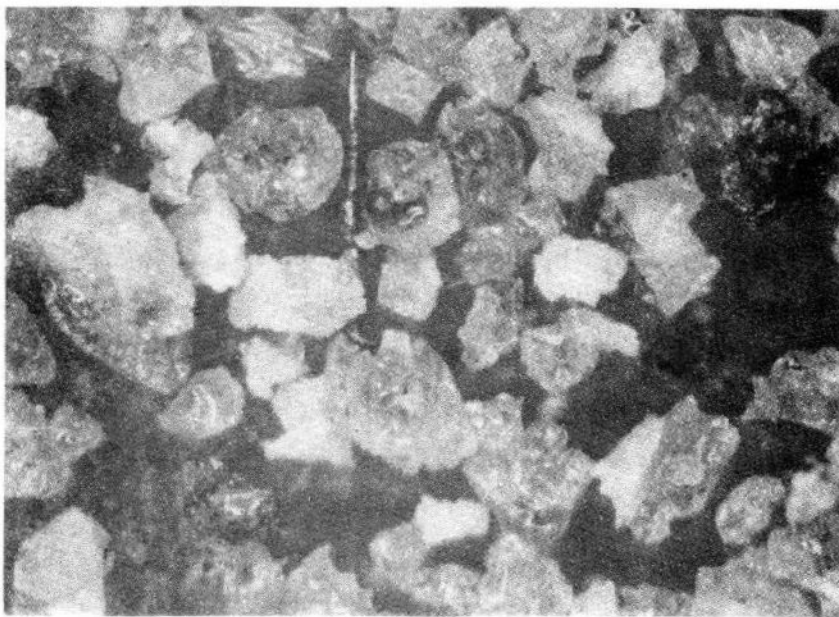


Fig. 16-a: Muestra C.C. Microfotografía 4, x 10 aumentos: Se observan partículas de escoria con textura vitrea, en general translúcidas y que presentan inclusiones metálicas.

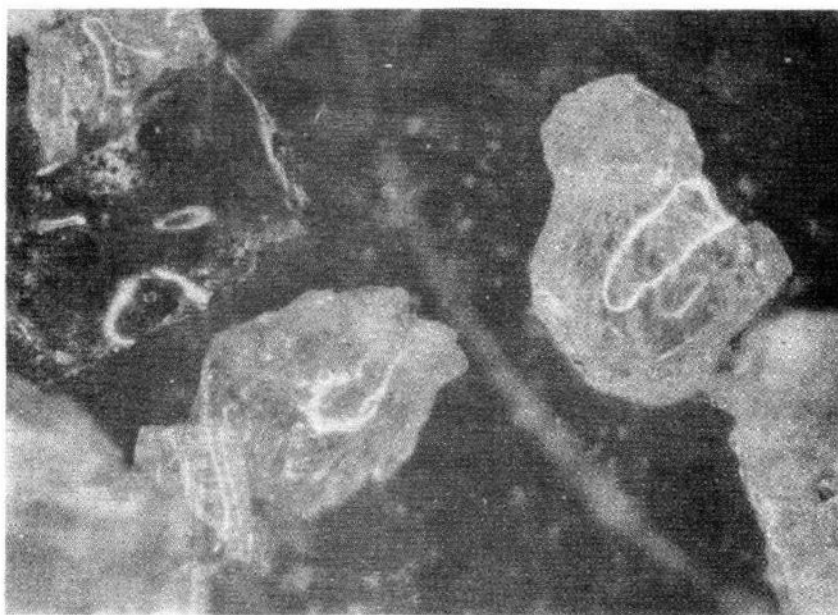


Fig. 16-b: Muestra C.C. Microfotografía 5, x 20 aumentos: Las partículas de escoria presentan textura vitrea e inclusiones gaseosas.

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 clinker 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 clinker ni tampoco para la escoria. Por ejemplo en la molturabilidad del clinker tiene importancia el tiempo de almacenamiento, contenido de humedad, empleo de ayuda molienda y composición química del clinker.

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 m²/kg, mientras que para la escoria es conveniente una molienda más fina, encontrándose conveniente una superficie específica Blaine de 400 m²/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 clinker 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 m²/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 clinker 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 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 clinker 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.

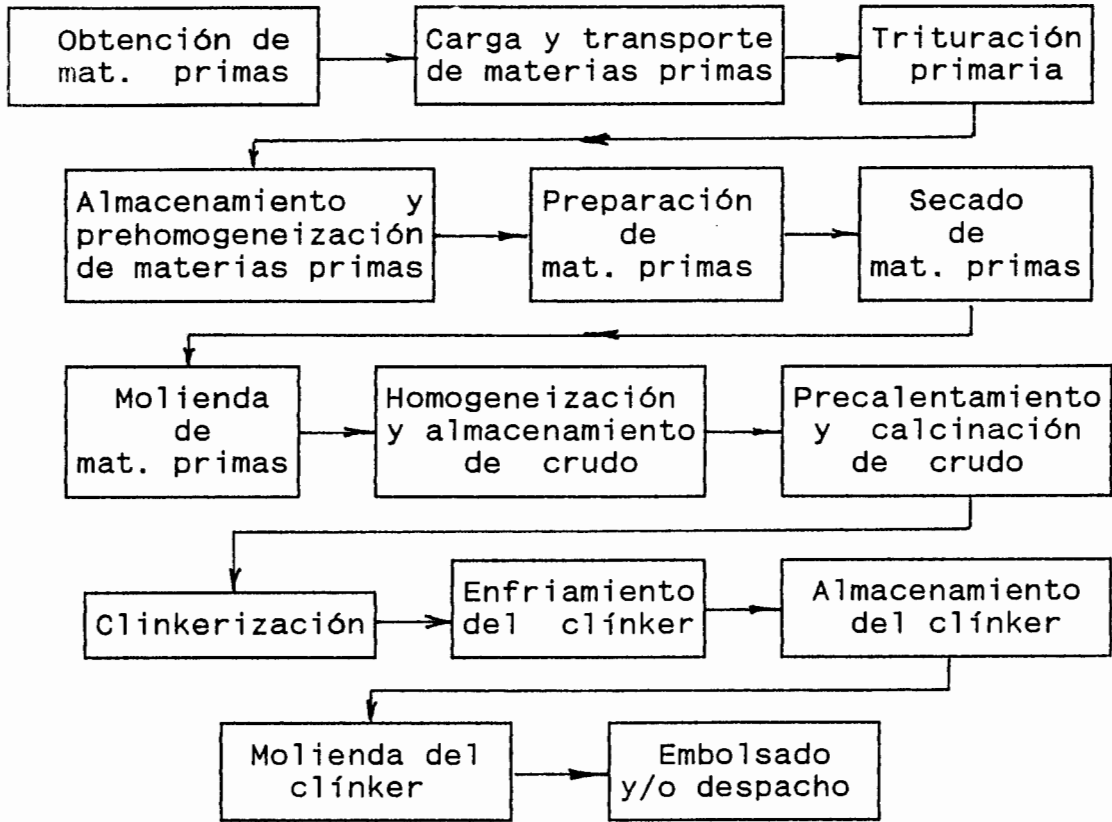
En resumen podemos decir que desde el punto de vista de la contaminación ambiental, facilidad de evacuación y economía del proceso, la granulación de la escoria es la más ventajosa de las técnicas alternativas de tratamiento.

R E F E R E N C I A S

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.

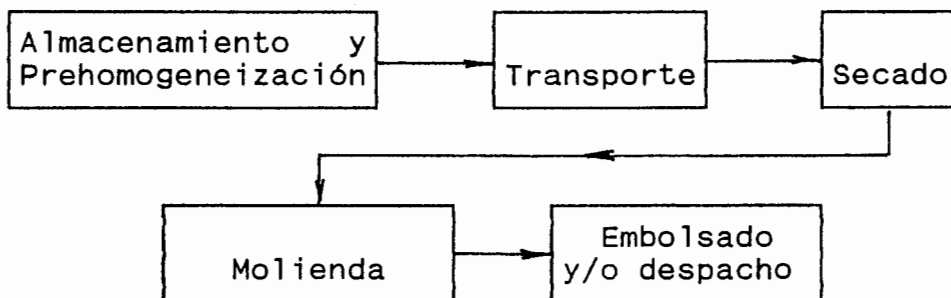
CUADRO Nro. 1

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 m²/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 m²/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 μm , 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 CaS se forma 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.

HORMIGONES CELULARES

EN BASE A ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO

Romeo E. Miretti, Jorge A. Citroni, Rudy O. Grether y
Carlos R. Passerino (*)

RESUMEN

En el presente trabajo se describen experiencias de investigación de laboratorio para la obtención de un hormigón celular utilizando como principal componente aglomerante la escoria granulada de alto horno (EGAH) molida. El planteo, a partir de otros tipos de hormigones celulares desarrollados por los autores, trata de obtener un material de construcción relativamente liviano apto para la elaboración de elementos premoldados, con un costo económico competitivo.

Se consideran las materias primas utilizadas, el proceso de elaboración, distintos tipos de curado estudiados y las principales propiedades físico-mecánicas de los hormigones celulares obtenidos. El material presenta una densidad reducida (en el rango de 500 a 1000 kg/m³), una gran capacidad de aislación térmica y una resistencia mecánica aceptable para cumplir funciones portantes, aunque no estructurales.

Finalmente se hacen algunas consideraciones de orden práctico sobre la elaboración industrial del material y sobre sus aspectos económicos.

*) Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, Facultad Regional Santa Fe. Grupo de Investigación "Producción, Estudio y Ensayo de Materiales Regionales para la Industria de la Construcción"

R.E. Miretti es Jefe del Grupo de Investigación "Producción, Estudio y Ensayo de Materiales Regionales para la Industria de la Construcción" de la Universidad Tecnológica Nacional (ARGENTINA) y Profesor Titular de la misma Universidad. Los coautores integran el mencionado Grupo de Investigación.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION

1.1. La escoria granulada de alto horno.

1.2. Los hormigones celulares.

2. EXPERIENCIAS DE LABORATORIO

2.1. Procedimiento de obtención.

2.2. Materias primas.

2.3. Dosajes estudiados.

2.4. Tipos de curado considerados.

2.5. Propiedades físico-mecánicas determinadas.

3. ASPECTOS TECNOLOGICOS PRACTICOS

4. ASPECTOS ECONOMICOS

5. CONCLUSIONES

I. INTRODUCCION

1.1. La escoria granulada de alto horno (EGAH)

1.1.1. Obtención

Las escorias de alto horno son sílico-aluminatos de calcio subproductos de la fabricación del arrabio, el que se obtiene reduciendo los minerales de hierro por coque en presencia de fundentes (calcáreos, rocas silíceas). El fundente se combina con la ganga del mineral para dar la escoria, que se recoge en la base del alto horno en estado

líquido (1.500 °C) flotando sobre el arrabio por su menor densidad.

Si la escoria fundida es bruscamente enfriada con agua se obtiene una arena gruesa denominada **escoria granulada de alto horno (EGAH)**. Este enfriamiento rápido produce, en gran parte, una vitrificación de la escoria que le confiere cierta capacidad de reaccionar con el agua (hidraulicidad) formando compuestos resistentes.

Pero esta propiedad hidráulica se encuentra "latente", ya que necesita de un activante para su desarrollo. La activación puede realizarse químicamente (activación alcalina -calcio, sodio- o sulfática), mecánicamente (mediante un molido muy fino) o térmicamente (distintos tipo de curado con vapor). En cualquier caso es prácticamente imprescindible la molienda de la EGAH.

En la activación alcalina (sódica o cálcica) de la EGAH se produce C.S.H (hidrosilicato monocálcico), C4.A.H13 (hidroaluminato tetracálcico) y C2.A.S.H8 (hidrosilicoaluminato bicálcico). Los dos últimos compuestos, observados con el microscopio electrónico, se presentan como plaquetas exagonales que desempeñan el rol de puentes cristalinos entre los granos de EGAH. Por su parte el C.S.H envuelve los granos de EGAH y, por intermedio de la solución, los demás elementos.

La activación sulfática provocada por el yeso origina silicato monocálcico hidratado, "etringita" o trisulfoaluminato tricálcico e hidróxido de aluminio).

1.1.2. Composición química

El potencial hidráulico de una EGAH puede estimarse en base a su composición química elemental. Existen numerosas fórmulas que permiten calcular distintos "índices de calidad" en función de los principales componentes elementales (sílice, alúmina, óxidos de calcio y magnesio, etc).

Sin embargo, no se ha conseguido hasta ahora predecir las propiedades hidráulicas de las escorias mediante una fórmula sencilla que tenga una validez general. No obstante se acepta como válido que las propiedades hidráulicas mejoran al aumentar su contenido de CaO, MgO y Al₂O₃, lo cual sólo se cumple para contenidos de magnesio de hasta 1.2 % aproximadamente. Además, proporciones de Al₂O₃ que superen el 13 % mejoran sólo las resistencias a corto plazo.

Los únicos métodos confiables resultan, entonces, los que se basan en la confección de probetas de pastas cementíceas o morteros en los que se reemplaza parcialmente

el cemento por EGAH, comparando los resultados con los obtenidos sobre probetas sin reemplazo de cemento.

En la composición potencial (componentes mineralógicos) de la EGAH se encuentran básicamente silicatos simples:

$2\text{CaO}.\text{SiO}_2.\text{Al}_2\text{O}_3$	(C2.A.S)	gehlemita
$\text{SiO}_2.\text{CaO}$	(C.S)	wollastonita
$\text{SiO}_2.2\text{CaO}$		(silicato bicálcico)

y silicatos dobles de calcio y magnesio que responden a la expresión general:

$n \text{ CaO}.\text{MgO}.\text{SiO}_2$

$\text{CaO}.\text{MgO}.\text{SiO}_2$	(n=1)	monticelita
$2\text{CaO}.\text{MgO}.\text{SiO}_2$	(n=2)	akermanita
$3\text{CaO}.\text{MgO}.\text{SiO}_2$	(n=3)	merwinita

además las escorias pueden contener sílice coloidal libre no combinada e impurezas como sulfuros de calcio, manganeso e hierro, óxidos de hierro y manganeso, etc.

1.1.3. El mecanismo de hidratación

En la práctica la activación química de la EGAH se obtiene generalmente por hidratación conjunta con cemento portland. La hidratación comienza por los minerales del cemento: el hidróxido de calcio liberado durante este proceso constituye el activador alcalino-cálcico de la EGAH, permitiendo la hidratación de la misma y "despertando" sus propiedades latentes.

Si bien es evidente que es necesario una reacción inicial con hidróxido de calcio para iniciar la hidratación de la EGAH, su continuación no depende de la combinación con nuevas cantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sino que se realiza la hidratación de la EGAH por sí misma. La cal puede ser considerada como un iniciador, pero la acción provocada no es puzolánica.

Si un cemento con EGAH es colocado con una gota de agua en el porta-objetos de un microscopio, a las pocas horas puede ser observada la formación de materia amorfa a partir de los granos de cemento y escoria. Después de un día pueden ser vistos gran número de agujas y placas de aluminato de calcio hidratado y grandes cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, precedido por la formación de trisulfoaluminato de calcio como se dijo anteriormente.

La actividad de la EGAH depende de la alcalinidad del medio, proporcionada por la cal de hidrólisis de los

silicatos. Esta se produce más rápidamente cuanto mayor es la temperatura, pues la velocidad de disolución y de reacción de los dos silicatos (bicálcico y tricálcico) y del aluminato tricálcico con el agua aumenta con la temperatura. De allí que resulten altamente convenientes los procesos de curado con incremento de temperatura (curado con vapor a presión atmosférica o a alta presión en autoclaves).

1.2. Los hormigones celulares

El hormigón celular (HC) es en realidad un mortero alvelolar que presenta el aspecto de una piedra porosa, con una estructura celular de poros aproximadamente esféricos visibles a simple vista, con un coloración variable según el tipo de materias primas utilizadas. Sus propiedades distintivas son:

- reducido peso específico
- alta capacidad de aislación térmica
- aceptable resistencia mecánica, acorde a su densidad.

En forma general puede decirse que las materias primas utilizadas son un aglomerante (cemento, cal, yeso, escoria granulada de alto horno, etc.), un agregado (por ejemplo arenas naturales o molidas) y uno o más agentes responsables de la formación de la estructura celular.

Esta formación puede obtenerse por un proceso químico (a partir de una reacción en la que tiene un papel fundamental el aditivo) o por un proceso físico (mediante la inclusión de burbujas de aire formando una espuma). Estos dos procedimientos dan lugar a una clasificación de los HC según su proceso de elaboración en HC gaseosos (proceso químico) y HC de espuma (proceso físico).

Una vez obtenida la masa de HC fresco cabe otra distinción según el tipo de curado a que ésta sea sometida. En un grado creciente de complejidad técnica y costo económico directo se pueden indicar:

- a) curado al aire
- b) curado con vapor libre (a presión atmosférica, a menos de 100 pC)
- c) curado en autoclave (vapor a elevada presión y temperatura)

Estas y otras distinciones han dado lugar a una clasificación sistemática y una correspondiente nomenclatura establecida por la RILEM a través de una recomendación específica [1].

En este sentido el HC desarrollado en el presente trabajo responde a las siguientes características principales:

- HC del tipo **gaseoso** (proceso de tipo químico)
- aglomerante: compuesto por una mezcla de cemento y EGAH
- agregado: arena natural
- tipo de curado: con vapor a presión atmosférica.

Los HC, cuyos primeros desarrollos datan de 1920 aproximadamente [2], han sido ampliamente estudiados en los países europeos (Suecia, Dinamarca, Alemania, Unión Soviética, etc.). En dichos países, por diversos motivos, se ha hecho hincapié en los HC curados en autoclave, y virtualmente se han desechado los HC con otros tipos de curado, que en general tienen un estándar de calidad inferior.

En nuestro país, los primeros antecedentes significativos de utilización de estos hormigones fueron precisamente de los del tipo curado en autoclave, a través del empleo de patentes desarrolladas en Europa. En el proceso de inserción de estos materiales, se realizó una introducción directa de las tecnologías desarrolladas en aquellos países, sin considerar las particulares condiciones locales de aplicabilidad (situación económica y nivel tecnológico).

De esta manera se descartaron materiales y procedimientos de elaboración que, habiendo sido superados en Europa, podrían haber tenido mejores condiciones de competitividad en nuestro medio. El hecho de que en general los HC curados en autoclave resultan económicamente poco competitivos con otros materiales de construcción tradicionales, ha inducido a la revalorización, con las restricciones correspondientes, de los HC con procesos de elaboración de menores niveles tecnológicos [3].

2. EXPERIENCIAS DE LABORATORIO

2.1. Procedimiento de obtención

Como se dijo, el procedimiento de obtención elegido para el HC a desarrollar fue del tipo "gaseoso", es decir, mediante la incorporación al mortero fresco de aditivos que reaccionan generando burbujas de gas que conforman la estructura celular del hormigón.

2.2. Materias primas

Las materias primas utilizadas fueron cemento portland, EGAH, y cal viva (como aglomerantes), arena silicea como agregado, agua y aluminio en polvo como aditivo activante (generador de gases).

2.2.1. Cemento portland

Se utilizó cemento portland normal, cuyas características físicas y químicas se indican en la TABLA I.

Es necesario destacar que las características del HC obtenido dependen de la naturaleza del cemento empleado en un grado mucho mayor que en el caso de los hormigones convencionales. La composición química del cemento influye decididamente en el momento de producirse la reacción generadora de gases, con lo cual la densidad resulta directamente afectada

2.2.2. Escoria granulada de alto horno

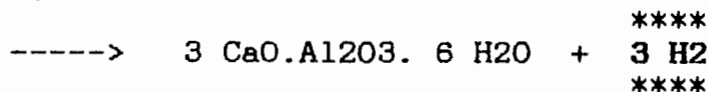
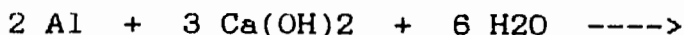
La EGAH empleada provino de la planta siderúrgica de SOMISA (Sociedad Mixta Siderúrgica Argentina), en la localidad de San Nicolás, provincia de Buenos Aires. La TABLA II muestra la composición química elemental de la misma.

La molienda se efectuó en seco utilizando para ello una máquina de Deval. En una primera etapa del trabajo se efectuaron moliendas con distinto grado de finura, constatando el incremento de las resistencias mecánicas con el mismo. Para la etapa de estudio sistemático se adoptó una molienda hasta obtener una finura con una superficie específica de 300 m²/kg (determinada por método Blaine).

Cabe agregar que se realizaron experiencias aisladas con EGAH proveniente de la planta siderúrgica de Altos Hornos Zapla (provincia de Jujuy, Argentina) que arrojaron resultados finales similares a los obtenidos con EGAH de SOMISA, si bien en principio el ensayo acelerado de valoración de calidad por el método propuesto por Venuat y Papadakis [4] arrojó resultados menores.

2.2.3. Cal

La utilización de cal viva en polvo tuvo por finalidad la incorporación del Ca(OH)₂ necesario en la mezcla fresca para la generación de las burbujas de gas:



En otros tipos de HC con cemento, éste Ca(OH)_2 proviene de la hidratación e hidrólisis de los silicatos cálcicos del cemento. En este caso, al haber reemplazado una importante porción del mismo por EGAH, se hace necesaria esta incorporación directa.

La cal viva en polvo se molió finamente en forma conjunta con la EGAH, ya que en caso contrario la dispersión de los escasos gránulos de cal (con molido de fábrica) en la masa del mortero ocasionó problemas de irregularidad en la estructura porosa del HC.

2.2.4. Agregado

Como agregado se utilizó arena silícea del río Paraná, del tipo "fina". En la TABLA III se indican las características físicas de la misma.

El uso de agregados muy finos en los HC es altamente recomendable, ya que contribuye a obtener una estructura porosa más homogénea y de poros más pequeños, con ventajas directas en las propiedades físicas del producto final.

2.2.5. Agente activante

Se utilizó polvo de aluminio seco estearinado (el estearinado protege temporariamente las partículas de aluminio impidiendo una reacción inmediata con el Ca(OH)_2 que tornaría difícil de controlar el proceso de elaboración).

2.3. Dosajes estudiados

Las dosificaciones se manejaron en peso según el siguiente esquema:

Aglomerante	Composición	- Cemento - EGAH - Cal
	Relaciones (en peso)	- Agregado/aglomerante - Agua/aglomerante - Activante/aglomerante

es decir que se estableció por una parte la composición del aglomerante (como porcentajes en peso de cemento, EGAH y cal) y por otra parte la proporción del resto de los componentes con relación al aglomerante.

Para establecer la composición del aglomerante se

elaboraron HC curados al aire con reemplazos crecientes de cemento por EGAH. Un ejemplo del efecto observado en la resistencia mecánica se presenta en la TABLA IV donde se aprecia que si bien a la edad de 3 días la resistencia obtenida es generalmente menor, se alcanzan a los 28 días valores similares (aunque con un cierto aumento de la densidad). Estos resultados indujeron a aceptar, en coincidencia con diversos antecedentes bibliográficos, que es posible un reemplazo de una importante proporción de cemento por EGAH sin grandes pérdidas en la resistencia mecánica a 28 días; se adoptó entonces una composición básica del aglomerante de 25 % de cemento + 75 % de EGAH.

Como se señaló más arriba, se hizo necesaria la incorporación de cal viva al aglomerante. Los porcentajes de reemplazo estudiados (sobre el total de aglomerante) variaron entre el 1 y el 20 %, determinándose un valor óptimo del 2 al 5 %. La composición final adoptada fue:

	:	3 %	cal
Aglomerante	:	25 %	cemento portland
	:	72 %	EGAH

La relación agregado / aglomerante se establece haciendo un balance entre los factores económicos (para una misma densidad del HC, a mayor relación agregado / aglomerante, menor contenido de aglomerante y por ende menor costo) y las propiedades del material a obtener (para una misma densidad del HC, a mayor relación agregado / aglomerante, menor resistencia mecánica).

Para el presente estudio, pensado para una gama de densidades relativamente bajas, se fijó el valor de esta relación en 0,5. Para otras densidades pueden adoptarse los valores de la TABLA V.

La relación agua / aglomerante se limita en función de las necesidades del proceso de elaboración, pasando a un segundo plano la influencia que puede tener esta relación en sí misma sobre la resistencia mecánica del HC.

Por último, la relación activante / aglomerante se maneja para obtener la densidad deseada en el HC.

2.4. Tipos de curado considerados

El escaso desarrollo de resistencia mecánica a temprana edad de los HC con EGAH hizo necesario considerar el curado del material mediante un proceso acelerado, máxime teniendo en cuenta que los HC gaseosos tienen su principal campo de acción en la elaboración de elementos premoldeados, donde los tiempos de elaboración son fundamentales.

Para ello se estudiaron dos variedades de HC (una con cemento y otra con un reemplazo del 75 % del mismo por EGAH) sometidas a los siguientes tipos de curado:

- a) Curado al aire.
- b) Curado con vapor a presión atmosférica.
- c) Curado con vapor a alta presión (autoclave).

Los resultados obtenidos se sintetizan en la TABLA VI; sobre ellos pueden hacerse los siguientes comentarios:

- *) el incremento de resistencia debido a los procesos de curado con vapor es mucho más importante en los HC con reemplazo de cemento por EGAH que en los HC sin EGAH.
- *) en el caso de los HC con EGAH la contribución del curado "acelerado" a la resistencia mecánica no se limita a las tempranas edades sino que continúa, aunque en menor grado, a edades más avanzadas.
- *) el curado con vapor a presión atmosférica resulta más ventajoso que el curado en autoclave. Cabe señalar que en el caso de que el agregado silíceo tuviera un grado de fineza suficiente, el curado en autoclave produciría la reacción química del mismo con el aglomerante (formación de silicatos cálcicos) con un incremento mucho más significativo de la resistencia.

En base a estos resultados se decidió adoptar un curado con vapor a presión atmosférica, determinando previamente los valores más adecuados para el tiempo y la temperatura de curado.

Las variables técnicas más importantes que deben ser consideradas en el tratamiento térmico con vapor libre y cuyos valores óptimos deben fijarse en cada caso son las siguientes:

- a) El proceso inicial o preliminar de curado normal, es decir, el tiempo de espera entre la mezcla y moldeo del HC y el comienzo de la aplicación del tratamiento térmico.
- b) La velocidad de calentamiento desde el comienzo del tratamiento (después del período inicial) hasta alcanzar la temperatura máxima.
- c) El valor de la temperatura máxima de estabilización que se aplica durante la mayor parte del curado.
- d) El período de permanencia a esa temperatura máxima.
- e) La velocidad de enfriamiento desde el final del período de permanencia hasta que alcanza la temperatura ambiente.

Sobre un mismo tipo de HC con EGAH se aplicaron distintos lapsos de curado, siempre a una temperatura de 80

°C, determinando la resistencia a las edades de 3, 7 y 28 días. Los resultados se presentan en el GRAFICO 1. Para la edad de 3 días, el máximo de resistencia se obtiene para un lapso de curado de 8 horas; para 28 días, en cambio, la duración del período de curado -entre 6 y 12 hs- es prácticamente inocua.

Asimismo se realizaron pruebas de curado con una misma duración a diferentes temperaturas, determinando un valor óptimo de 70 °C, en concordancia con los criterios aplicados normalmente a los hormigones convencionales.

También se estudió la influencia que tiene sobre las propiedades del HC endurecido el tiempo de espera transcurrido entre la elaboración del HC fresco y el comienzo del curado con vapor. Se determinó así la conveniencia de dejar transcurrir un lapso de varias horas, ya que se obtienen densidades finales algo menores con las mismas resistencias mecánicas. Además, un curado inmediato puede provocar una reactivación de las reacciones químicas generadoras de gases.

El enfriamiento se realizó en forma natural en el interior de la cámara utilizada.

2.5. Propiedades físico-mecánicas determinadas

Para la determinación de las principales propiedades físicas y mecánicas de los HC con EGAH se decidió reducir la cantidad de posibilidades a considerar limitando las variables en juego. Para ello se fijaron los siguientes parámetros:

- *) Dosificación en peso:
 - Composición del aglomerante (% en peso):
25 % cemento + 3 % cal + 72 % EGAH
 - Relación agregado/aglomerante (en peso): 0,50
- *) Curado con vapor a presión atmosférica:
 - tiempo de espera previa: 10 hs
 - temperatura: 70 °C
 - duración: 8 hs

por lo tanto las variables a manejar resultaron:

- relación agua / aglomerante
- relación activante / aglomerante.

Los resultados obtenidos en estas condiciones se resumen en la TABLA VII.

2.5.1. Propiedades físicas

*) Densidad absoluta

Se determinó mediante picnómetro, previa molienda de una muestra de HC con EGAH. Se obtuvo un valor de 2,50 g/cm³.

*) Densidad aparente

En la TABLA VII se indica la gama de variedades obtenidas; debe tenerse en cuenta que, en condiciones normales el HC endurecido incorpora un contenido variable de humedad (0 al 5 % para condiciones estables). Para alcanzar otros rangos de densidades debe recurrirse a otros valores de la relación agregado / aglomerante, según ya se indicó en la TABLA V.

*) Absorción por capilaridad

Se determinó sobre probetas prismáticas de 4 x 4 x 28,5 cm colocadas en posición vertical en una bandeja con una altura constante de agua de 4 cm. Los resultados se presentan en el GRAFICO 2.

Al disminuir la densidad del HC la absorción por capilaridad también disminuye, debido a que la presencia de poros de mayor tamaño detiene el ascenso capilar del agua.

*) Porosidad total

Se define como el cociente entre el volumen de vacíos totales (comunicados o no con el exterior) y el volumen total aparente. Puede calcularse, por lo tanto, a partir de las densidades absoluta y aparente del material:

$$P_o = \frac{\text{volumen de vacíos}}{\text{volumen aparente}} = \frac{V - V_o}{V} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_o}$$

Valores en TABLA VIII.

*) Absorción por inmersión

Se aplicaron dos procedimientos diferentes:

- a) el procedimiento establecido en la Recomendación RILEM LC N° 6.1 [5], consistente en la inmersión de las probetas en agua a temperatura ambiente hasta su saturación aparente.
- b) el procedimiento especificado por la Norma IRAM 1549 por inmersión en agua en ebullición durante 5 horas.

Los resultados obtenidos se indican en la TABLA VIII, donde se aprecia que:

-) los valores de absorción por inmersión en agua en ebullición coinciden prácticamente con la porosidad total calculada a partir de las densidades absoluta y a aparente del HC.
-) ésto inclina a suponer que los poros están intercomunicados, por lo cual el agua en ebullición logra penetrar en la totalidad de los poros desalojando el aire contenido en ellos.
-) el coeficiente de saturación resulta en todos los casos menor al 70 %, por lo que, según criterios generalmente adoptados, el material es "no heladizo".

***) Variaciones volumétricas**

Dentro de este concepto deben distinguirse las variaciones volumétricas por secado (son las más importantes, producidas por el cambio de volumen de los compuestos hidratados, la evaporación del agua y la carbonatación) y las variaciones debidas a los cambios ambientales de humedad y temperatura, que son de orden secundario.

La retracción por secado tiene una magnitud mucho mayor en los HC que en los hormigones convencionales, debido ésto principalmente a la facilidad con que accede el aire a través de su estructura porosa.

Experimentalmente la retracción se determinó sobre probetas prismáticas de 4 x 4 x 28,5 cm que, en el caso de estar sometidas a un curado con vapor, comenzaron a medirse una vez finalizado el mismo conservándolas en el ambiente normal del laboratorio.

En el **GRAFICO 3** se presentan resultados representativos del comportamiento del HC con EGAH en este sentido. Se puede observar que:

- *) en muestras sin curar con vapor la incorporación de EGAH produjo una retracción mayor.
- *) el curado con vapor hace disminuir los niveles de retracción.

Observación:

Se sabe que la disminución de la retracción de fraguado puede conseguirse aumentando la finura de la EGAH utilizada. La explicación de este comportamiento aparentemente contradictorio (ya que la retracción está ligada a la presencia de granos finos) reside en el hecho de que la cristalización del trisulfoaluminato tricálcico (etringita) produce un aumento de volumen que compensa ampliamente la mayor retracción. Este trisulfoaluminato

tricálcico se forma por la reacción del CaSO_4 y el CA_3 del clinker y la alúmina de la EGAH (Al_2O_3); el molido muy fino de la EGAH facilita dicha reacción.

***) Aislación térmica**

El coeficiente de conductividad térmica del HC con EGAH fue determinado por el método de Lees y Chorlton, resultando similar al de otros tipos de HC. Depende básicamente de la densidad del material y, en menor medida, de la temperatura, el contenido de humedad, la dosificación del HC, etc. En la TABLA IX se indican sus valores normales.

2.5.2. Propiedades mecánicas

***) Resistencia a la compresión**

La resistencia mecánica de un HC está ligada a numerosos factores, entre los que se destacan:

-) la densidad aparente del HC
-) la dosificación empleada, especialmente en lo relativo al contenido unitario de aglomerante
-) el contenido de humedad del material

y, naturalmente, debe tenerse en cuenta la evolución de la resistencia con la edad.

Las resistencias obtenidas sobre medias probetas de 4 x 4 x 16 cm ya se han presentado en la TABLA VII y se representan en el GRAFICO 4 en función de la densidad. Se aprecia, naturalmente, un considerable aumento de la resistencia con la densidad.

En lo que respecta a la evolución de la resistencia con el tiempo, es importante señalar el aumento de la resistencia en un 60 a 180 % entre las edades de 3 y 28 días. A partir de allí la ganancia en resistencia fue de sólo un 10 o 15 % para plazos de varios meses.

***) Resistencia a la flexión**

Se determinó sobre probetas de 4 x 4 x 16 cm. Los resultados mostraron que:

-) la relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión varió entre un 50 - 100 % a la edad de 3 días y entre un 30 - 80 % a los 28 días. Los mayores valores correspondieron a los materiales muy livianos de baja resistencia.
-) El incremento de resistencia entre los 3 y los 28 días fue del 25 al 80 %.

3. ASPECTOS TECNOLOGICOS PRACTICOS

Ante todo es necesario señalar que, debido a las características particulares del proceso de producción del HC con EGAH, es necesario disponer de una serie de instalaciones y equipos apropiados, aunque siempre dentro del marco de lo que se denominan "tecnologías sencillas".

Para enumerar los mismos se describe a continuación el proceso industrial:

a) Preparación de las materias primas:

En este punto es de principal importancia la molienda de la EGAH, prevista inicialmente en forma conjunta con la cal, por vía seca. La posibilidad de disponer comercialmente de la EGAH molida simplificaría notablemente el proceso, ya que el molino es uno de los equipos más importantes y costosos de la planta de producción. Para elegir un molino adecuado debe contemplarse el consumo de 250 a 500 kg de EGAH por metro cúbico de HC a elaborar (dependiendo del tipo del mismo).

También puede considerarse la posibilidad de efectuar la molienda de la EGAH por vía húmeda, procedimiento frecuentemente utilizado en la industria europea.

El aluminio en polvo debe "disolverse" en agua antes de incorporarlo al hormigón fresco, para facilitar la mezcla. Además, para una adecuada distribución de las partículas es conveniente el uso de un agente dispersor. Lo más práctico resulta entonces preparar una lechada de aluminio disuelto que puede dosificarse incluso en volumen, descontando del agua de dosificación la que se incorpora con el aluminio.

El resto de los materiales (cemento, arena, agua) no necesitan ninguna preparación especial.

b) Dosificación y mezclado:

La dosificación de los materiales debe realizarse necesariamente en peso, ya que las dispersiones provocadas por una dosificación en volumen no son aceptables (como podrían serlo en un hormigón convencional).

La mezcla se realiza en una hormigonera convencional, realizando primero la mezcla homogénea del mortero de cemento + EGAH + cal + arena + agua. Finalmente se incorpora el aluminio disuelto. A partir de este momento es necesario controlar el tiempo de mezclado, de modo que la reacción generadora de gases sólo comience una vez que el hormigón fresco se ha vertido en los moldes; de no ser así,

el mezclado produce la rotura de burbujas que ya no se recuperan, por lo que la densidad del material resultará mayor que la esperada.

c) Llenado de moldes:

El material fresco se vierte en los moldes llenándolos parcialmente, de modo que al producirse el esponjamiento se complete el volumen de los mismos. Se recomienda disponer la menor dimensión del elemento a moldear en dirección vertical a fin de minimizar los efectos de irregularidad en la densidad debido al aplastamiento de las burbujas en las capas más profundas del material.

Las reacciones generadoras de los gases se inhiben a bajas temperaturas y se activan a medida que aumenta la misma, por lo que es necesario contar con un recinto cerrado donde pueda garantizarse una temperatura mínima de 13 - 17 °C. Si la temperatura ambiente no puede controlarse debe ajustarse la dosificación del agente activante.

El proceso de esponjamiento se completa en un plazo de 2 a 1 hora. Comienza entonces un período de "maduración" durante el cual el mortero adquiere una rigidez suficiente como para poder cortar el material sobrante en la cara superior. En algunos casos también es factible un desmolde parcial (lateral) de los elementos elaborados.

d) Curado

El HC se somete entonces al curado con vapor a presión atmosférica. Para ello se requiere la siguiente instalación:

- +) Cámara de curado: puede utilizarse un recinto fijo en el cual se introducen los moldes o bien dispositivos móviles que se ubican sobre los moldes sin cambiar éstos de lugar.
- +) Productora de vapor: la capacidad de la misma dependerá de las propiedades aislantes de la cámara de curado utilizada, el grado de ocupación de la misma, etc. A modo de ejemplo, los autores han registrado para una cámara de 4 m³ con aislación de 50 mm de poliestireno expandido un consumo de 5 kg de vapor por hora y por m³ de cámara.

e) Desmolde y almacenamiento:

Finalizado el curado los elementos premoldeados pueden desmoldarse y manipularse para su almacenamiento en un espacio cubierto durante un lapso de 3 a 4 semanas en el cual se continúa desarrollando la resistencia mecánica y tienen lugar las principales variaciones dimensionales

(retracción por secado).

Resumiendo, y para dar una idea concreta de las necesidades de equipamiento, se detallan a continuación las necesidades que surgen del planteo de una pequeña planta de elaboración de HC con EGAH de una capacidad de producción de 25 m³ por día:

- *) Molino para EGAH, capacidad 1 a 2 ton/h.
- *) Báscula para dosificación en peso.
- *) 2 hormigoneras de 750 lt.
- *) Moldes metálicos para los elementos a elaborar.
- *) Cámara de curado, volumen 50 m³.
- *) Productora de vapor, capacidad 250 kg/h.
- *) Local cerrado para la elaboración del material.
- *) Espacio cubierto para almacenamiento de elementos premoldeados.
- *) Personal: 1 técnico para supervisión, 3 oficiales, 10 ayudantes.

4. ASPECTOS ECONOMICOS

Estos estudios tuvieron origen en la necesidad de disminuir los costos de otras variedades de HC con cemento portland previamente desarrollados mediante el reemplazo del mismo por EGAH. Se obtuvo un resultado positivo, con reducciones del 40 al 50 % en el costo de HC de similares características físico-mecánicas.

Aún así, el costo del cemento portland tiene una importante participación en el costo del HC con EGAH. En la **TABLA X** se detalla la composición relativa del mismo: un 77 % corresponde al rubro "materiales", dentro del cual sobresalen el cemento portland con un 38 % y el agente activante con un 34 %. A la EGAH (principal componente en peso) corresponde sólo el 16 % del costo de materiales.

En estos cálculos se consideró dentro del costo de la EGAH molida: el costo inicial de la EGAH sin moler en la planta siderúrgica, el flete para una distancia de 100 km, un consumo de energía eléctrica para molienda de 70 kWh/ton y los gastos de mano de obra de la misma.

En la **TABLA XI** se presentan los costos del HC con EGAH y de otros materiales de construcción habitualmente usados en muros y techos, expresados en valores relativos. Sobre la misma pueden hacerse algunas observaciones:

- *) El precio por m³ de HC con EGAH es superior o igual al de los mampuestos habituales (ladrillos comunes

de mano y ladrillos cerámicos huecos) pero inferior al de las mamposterías elaboradas con los mismos.

*) El precio por m3 es menor que el de otros tipos de hormigones comunmente utilizados.

Una comparación más representativa surgirá si se tiene en cuenta la posibilidad de reducir espesores al utilizar HC con EGAH, basada en su mayor capacidad de aislación térmica. Para ello se presentan en la TABLA XII los costos por metro cuadrado de diferentes muros de HC y de mampostería; se aprecia que la comparación resulta positiva.

Otros factores que pueden considerarse favorablemente en la evaluación del costo de la construcción con paneles de HC con EGAH son los inherentes a su menor peso específico (abaratamiento del transporte y montaje, reducción de estructuras y fundaciones) y los propios de cualquier sistema constructivo que emplee elementos premoldeados: rapidez de montaje, uniformidad de dimensiones que permite la reducción de espesores en juntas y revestimientos (e incluso su eliminación), etc.

También es interesante considerar el bajo insumo energético del HC, tema que los autores han desarrollado detalladamente en otro trabajo [6] y cuyos resultados se sintetizan en las TABLAS XIII y XIV.

5. CONCLUSIONES

Las experiencias realizadas permiten concluir que la utilización de la escoria granulada de alto horno en la elaboración de hormigones celulares es una alternativa sumamente interesante desde diversos puntos de vista.

Esta aplicación cuenta con ventajas técnicas y económicas que se han ido enumerando en el desarrollo del trabajo. Las ventajas económicas estarán sujetas a diversos factores macroeconómicos y de las características particulares de un eventual emprendimiento industrial.

Finalmente, es de destacar que este tipo de aplicación de la EGAH, plantea la generación de un material no tradicional capaz de acompañar un proceso de industrialización y mejoramiento de los procesos y técnicas de construcción en nuestro país.

REFERENCIAS:

- [1] RILEM: "Recommendation LC1: terminology and definitions of lightweight concrete", 1975.
- [2] GRAF O.: "Hormigón de gas, hormigón de espuma, hormigón liviano de cal". Ed. Sudamericana, Buenos Aires, 1951.
- [3] MIRETTI R. y otros: "Hormigón gaseoso a partir de cemento portland normal curado en autoclave o al aire". Jornadas en Español y Portugués sobre Estructuras y Materiales "COLLOQUIA '88", Madrid, mayo 1988.
- [4] VENUAT M., PAPADAKIS M.: "Control y Ensayo de Morteros y Hormigones". Ed. Urmo, Bilbao, 1975.
- [5] RILEM LC Committee: Final Recommendation N° 6.1 "Determination of water absorption after immersion".
- [6] MIRETTI R. y otros: "Hormigón liviano de bajo insumo energético". III Simposio CIB/RILEM "Materiales y Tecnologías para la Construcción de Viviendas de Bajo Costo", México, 1989.

TABLA I: características físico-mecánicas del cemento portland utilizado.

COMPOSICION QUIMICA ELEMENTAL		
Bióxido de silicio	SiO ₂	21.40 %
Oxido de aluminio	Al ₂ O ₃	3.69 %
Oxido de calcio	CaO	61.60 %
Oxido de hierro	Fe ₂ O ₃	3.72 %
Oxido de magnesio	MgO	3.51 %
Oxido de sodio	NaO	0.21 %
Oxido de potasio	K ₂ O	0.67 %
Oxido de sodio equiv.	Na ₂ O eq	0.65 %
Trióxido de azufre	SO ₃	1.99 %
CaO libre		1.26 %
Pérdida por calcinación		2.56 %
Residuo insoluble		1.04 %

Retenido sobre tamiz 74 μ	3.90 %
Superficie específica (m ² /kg)	300
Pasta consistencia normal	24 %
Tiempo de fraguado inicial	2h 37m
Tiempo de fraguado final	4h 25m
Contracción por secado	0.09 %

RESISTENCIA MECANICA (MPa)	1d	3d	7d	28d
Flexión	2.0	4.8	6.2	7.6
Compresión	7.7	22.8	32.8	44.6

TABLA II: Composición química de la EGAH utilizada.

COMPOSICION QUIMICA ELEMENTAL		
Bióxido de silicio	SiO ₂	34.90 %
Oxido de aluminio	Al ₂ O ₃	11.00 %
Oxido de calcio	CaO	43.60 %
Oxido de hierro	Fe ₂ O ₃	2.10 %
Oxido de magnesio	MgO	5.28 %
Oxido de sodio	NaO	0.32 %
Oxido de potasio	K ₂ O	0.51 %
Trióxido de azufre	SO ₃	0.29 %
Oxido de calcio libre		- -
Pérdida por calcinación		- -
Residuo insoluble		0.93 %
Alcalinidad total		0.65 %
Fase vítrea		98.0 %

TABLA III: Características físicas de la arena utilizada.

Densidad seca	kg/m ³	2629
Densidad saturado superficie seca	kg/m ³	2639
Absorción	%	0.385
Peso unitario seco y suelto	kg/m ³	1556
Peso unitario seco y compactado	kg/m ³	1679
Pasante # N°200 (74 μ)	%	0.19
Módulo de fineza		1.78

TABLA IV: Hormigones celulares con EGAH curados al aire.

EGAH/aglom. (% en peso)	Densidad seca (kg/m ³)	Resistencia a comp. (MPa)	
		3 días	26 días
25	765	0.84	1.94
33	792	1.13	2.13
50	854	1.00	2.19
75	1010	0.44	2.13

TABLA V: HC con EGAH, relaciones agregado/aglomerante recomendadas para diferentes rangos de densidades.

Relación agregado/aglomerante (en peso)	Rango de densidades (kg/m ³)
0	300 a 600
0.5	500 a 900
1	600 a 1000
2	800 a 1200
3	1000 y más

TABLA VI: Incidencia de los distintos tipos de curado empleados en los HC.

Tipo de curado	Resistencia a compresión (val. relativos)					
	HC sin EGAH			HC con EGAH		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
(a)	1	1	1	1	1	1
(b)	1.1	-	-	2 a 2.6	-	-
(c)	1.4	1.1	-	6 a 8	1.5 a 4	1.5 a 4

(a) Curado simple al aire.

(b) Curado en autoclave (vapor a alta presión).

(c) Curado con vapor a presión atmosférica.

TABLA VII: HC con EGAH curados con vapor.
Densidades y resistencias obtenidas.

Relación agregad/ aglomer.	Relación activ/ aglomer.	Densidad seca	Resistencia a compresión (28 d)	Contenido de cemento
(en peso)	(%)	(kg/m3)	(MPa)	(kg/m3)
0.40	0.15	718	3.26	116
	0.25	839	3.69	136
	0.35	763	2.40	123
0.45	0.15	665	2.44	108
	0.25	676	2.01	109
	0.35	736	2.13	119
0.50	0.05	1082	7.38	175
	0.10	819	2.21	132
	0.15	754	1.90	122
	0.25	559	0.69	90
0.55	0.05	1055	3.60	171
	0.10	841	2.18	136
	0.15	645	1.58	104
	0.25	630	1.33	102
	0.35	575	1.01	93
0.60	0.05	1070	9.67	173
	0.10	772	2.27	125
	0.25	517	0.82	84
	0.35	490	0.77	79

Para todos los casos:

- *) Composición aglomerante = 25 % cemento + 3 % cal + 72 % EGAH.
- *) Relación agregado/aglomerante = 0.50
- *) Curado con vapor 8 horas a 70 °C.

TABLA VIII: Valores de absorción y porosidad determinados en muestras de HC.

Densidad seca (kg/m3)	Absorción volumétrica (%)		Porosidad total (%)	Coeficiente saturación (%) (d)
	(a)	(b)		
455	53	83	82	64
679	46	76	73	60
722	48	71	71	68
954	34	54	53	64
1139	22	56	54	39
1636	18	32	33	56

- (a) Por inmersión en agua a temperatura ambiente.
- (b) Por inmersión en agua en abullición.
- (c) Calculada a partir de las densidades aparente y absoluta.
- (d) Calculada como

$$(d) = \frac{(a)}{(c)} \times 100$$

**TABLA IX: Valores medios de la conductividad
térmica en los HC.**

Densidad seca	Conductividad térmica	
	(kcal/h.m.�C)	(W/m.K)
500	0.14	0.17
600	0.17	0.20
700	0.20	0.24
800	0.24	0.28
900	0.27	0.32
1000	0.31	0.37
1100	0.35	0.41

TABLA X: composición relativa del costo
del HC con EGAH.

Cantidad	Unidad	Item	Composición del Item	Composición del total
			(%)	(%)
113	kg	MATERIALES		
324	kg	Cemento	38	
14	kg	EGAH molida	16	
0.15	m3	Cal viva	6	
0.70	kg	Arena	6	
		Aluminio	34	
		Subtotal	100	77
4.25	hh	MANO DE OBRA		
		Elab. y curado	93	
		Supervisión	7	
		Subtotal	100	20
3	kWh	ENERGIA		
4.1	kg	Energía eléct.	40	
		Fuel oil	60	
		Subtotal	100	3
		TOTAL		100

TABLA XI: Costos unitarios (por m3) del HC con EGAH y de otros materiales, expresados en forma comparativa.

MATERIAL	COSTO (valores relativos)
HC con EGAH curado con vapor (750 kg/m3)	1
HC sin EGAH curado al aire (750 kg/m3)	1.74
Ladrillos comunes de mano	0.67
Ladrillos cerámicos de máquina (huecos)	1.00
Mampostería ladrillos comunes de mano	1.18
Mampostería ladrillos cerámicos huecos	1.40
Hormigón de cascotes	1.27
Hormigón de peso normal	1.62
Hormigón de arcilla expandida	2.45

TABLA XII: comparación de costos por m2 de distintos tipos de muro.

TIPO DE MURO	COSTO POR m2 (valores relativos)
Bloques de HC con EGAH 60 x 90 cm Espesor 8 cm	0.80
Paneles de HC con EGAH 30 x 240 cm Espesor 10 cm	1.00
Bloques de HC con EGAH 20 x 40 cm Espesor 20 cm	2.38
Mampostería ladrillos comunes de mano Espesor 15 cm	1.36
Mampostería ladrillos comunes de mano Espesor 30 cm	2.72
Mampostería de ladrillos huecos Espesor 12 cm	1.29

TABLA XIII: Insumos energéticos del HC con EGAH.

	(kWh/t)	(ton/m3)		(kWh/m3)	
		I	II	I	II
Cemento	2320	0.122	0.125	283	290
EGA	80	0.351	0.360	28	29
Cal	500	0.015	0.015	8	8
Arena	10	0.244	0.500	2	3
Aluminio	75500	.0007	.0005	53	38
Total materiales				368	370
Elaboración				86	110
Curado con vapor				35	35
TOTAL				489	515

CARACTERISTICAS		I	II
Densidad seca	kg/m3	750	1000
Resistencia compresión	MPa	2.5	2.5
Conductividad térmica	W/m.K	0.26	0.37
Contenido de cemento	kg/m3	122	125

TABLA XIV: Comparación de los insumos energéticos del HC con EGAH y de otros materiales de construcción.

Material	Densidad seca	Conductividad térmica	Costo energético	
			(a)	(b)
	(kg/m ³)	(W/m.K)	(kWh/m ³)	---
HC con EGAH	750	0.26	489	1
	1000	0.37	515	1.50
Mampostería de ladrillos cerámicos	1400	0.60	650	3.07
Hormigón de peso normal	2200	1.74	850	11.6
Hormigón de arcilla expandida	1000	0.36	800	2.26

(a) Valores absolutos (calculados para 1 m³ de material).

(b) Valores relativos (calculados para una misma capacidad de aislación térmica).

GRAFICO 1

HC con EGAH: curado con vapor.

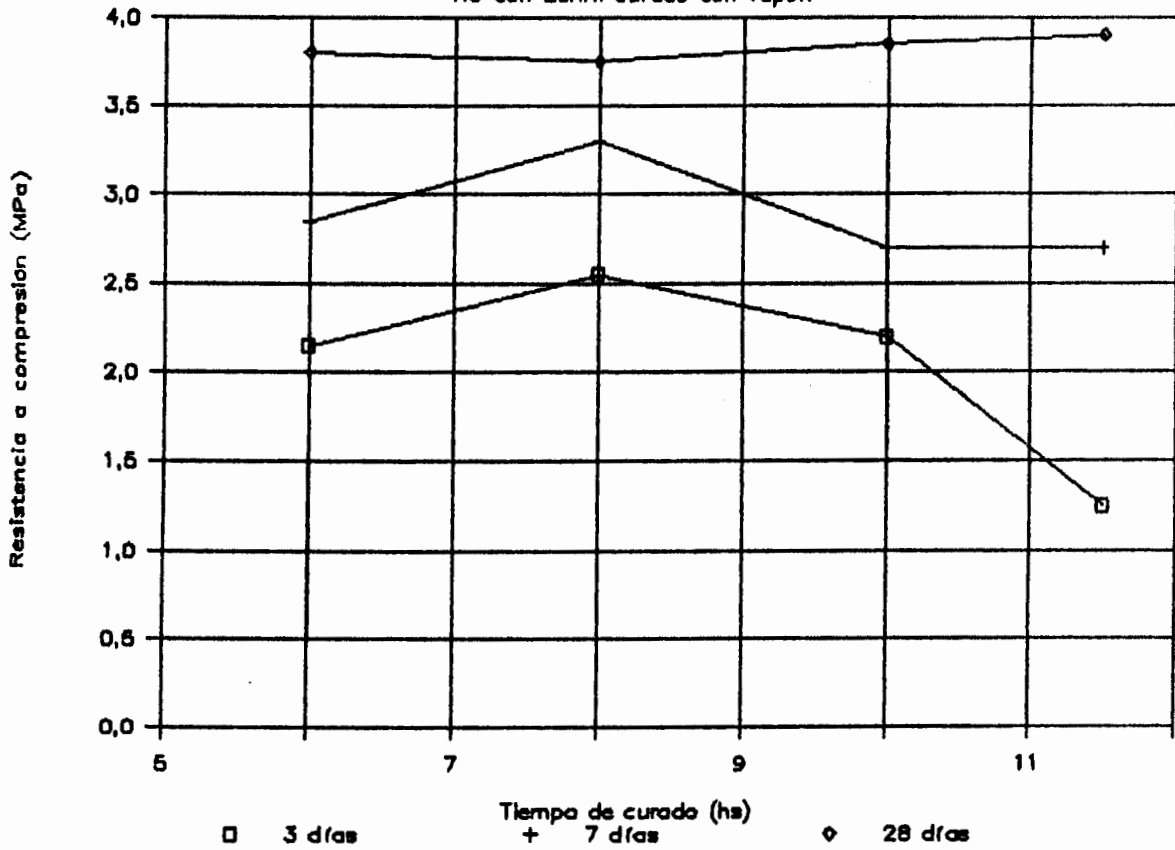


GRAFICO 2

Absorción por capilaridad.

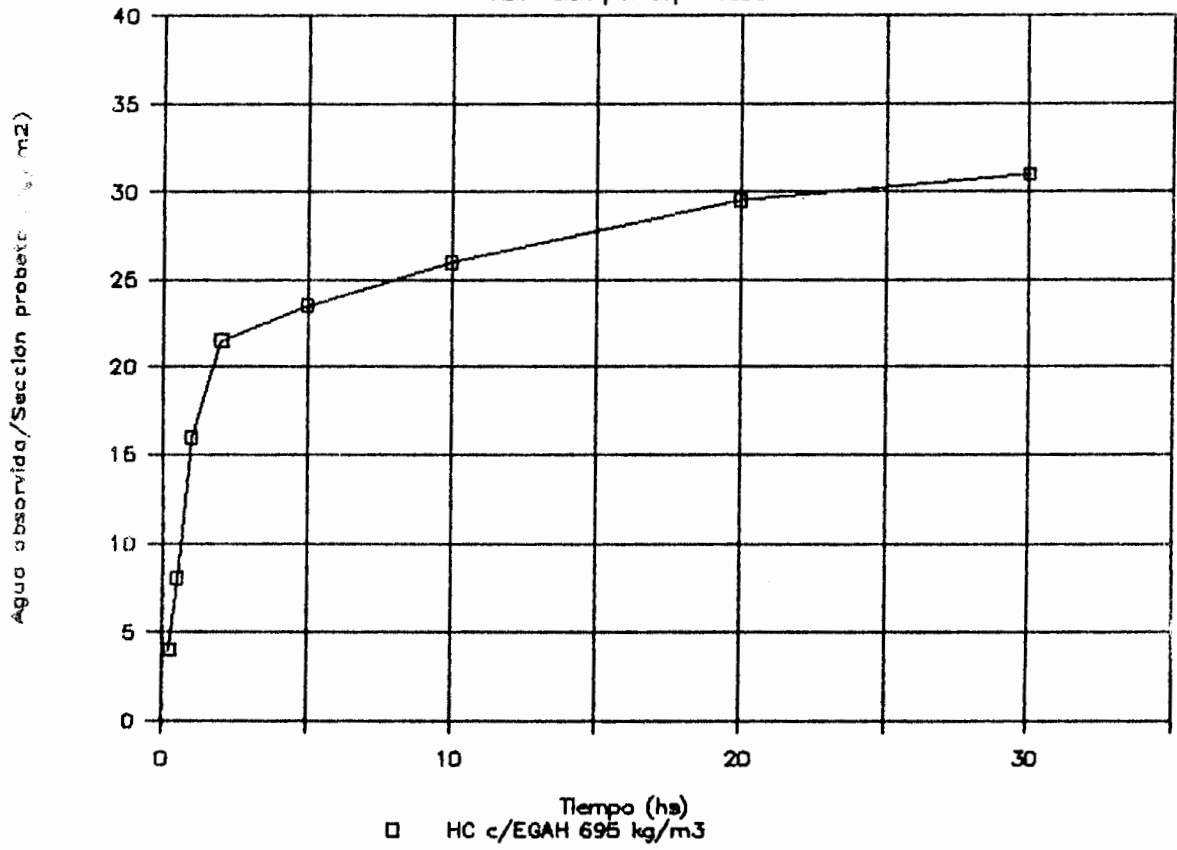


GRAFICO 3

Retracción por secado

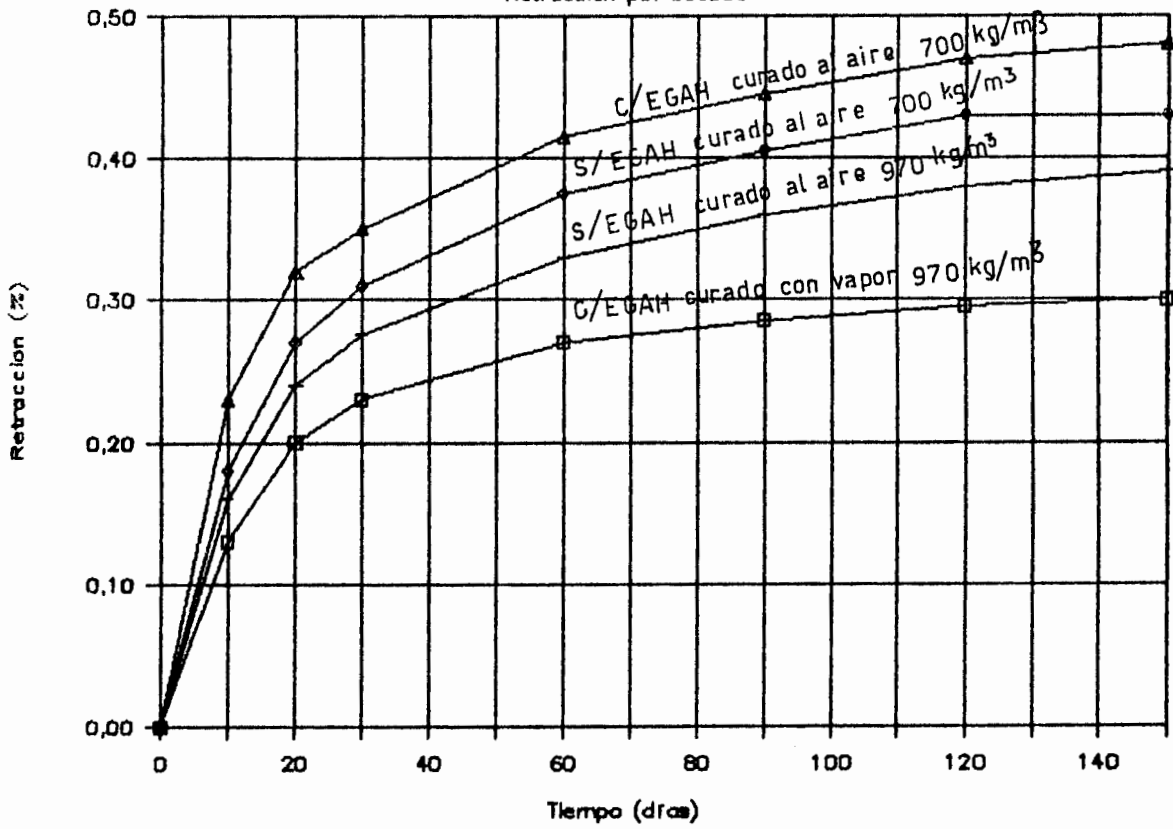
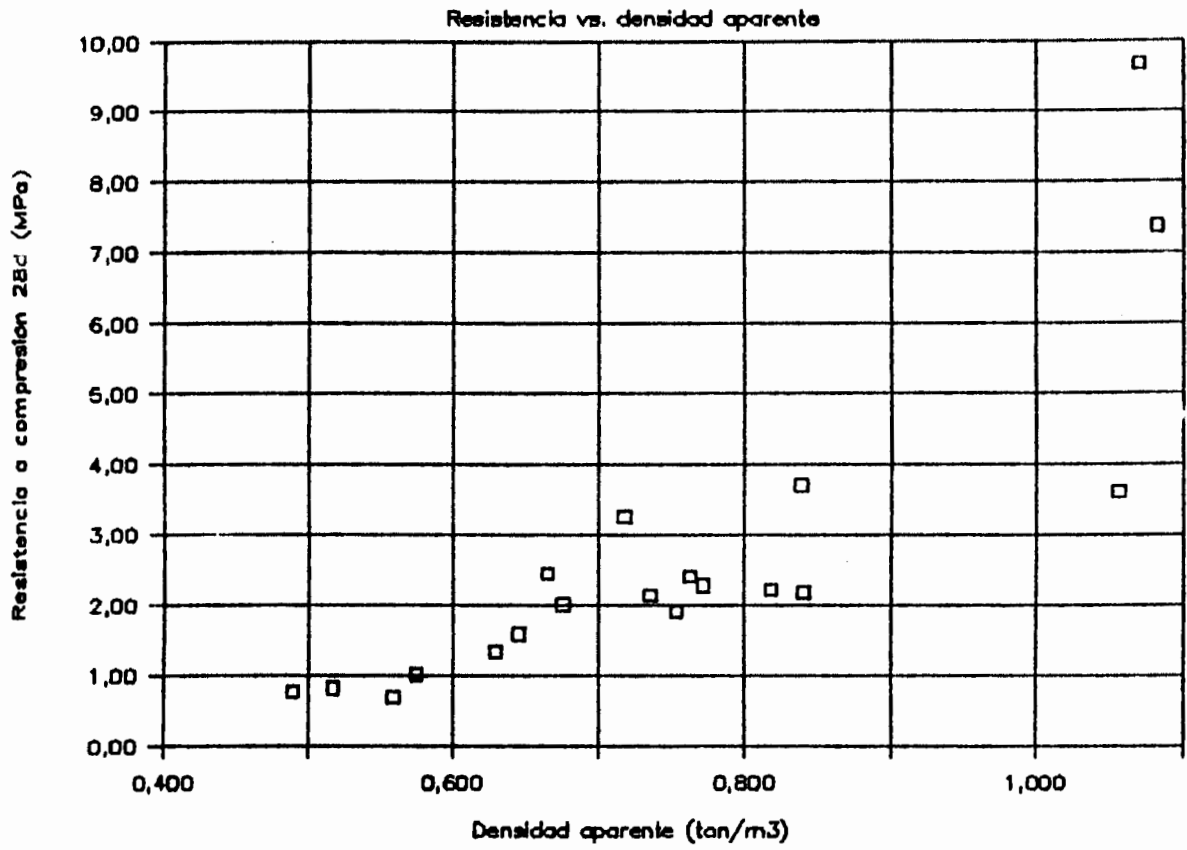


GRAFICO 4



O EMPREGO DA ESCÓRIA GRANULADA DE
ALTO-FORNO EM CIMENTOS PORTLAND NO BRASIL

Mario William Esper (*)

Vahan Agopyan (**)

RESUMO

O cimento portland de alto-forno, é um produto tradicional da construção civil no Brasil, ocupando cerca de 15% da produção dos cimentos portland, cujo teor da escória atinge até 70%. Desde 1977, os cimentos comuns, admitem por norma adição de até 10% de escória.

Após breve história, o artigo apresenta as características dos cimentos de alto-forno quanto a: resistência à compressão, calor de hidratação, resistência à sulfatos, inibição de reação álcali-agregado.

São citadas algumas obras de grande porte onde empregou-se estes cimentos.

(*) ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

(**) EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

M.W.Esper - Chefe do Departamento de Normalização e Qualidade da ABCP e Presidente do CB-18 da ABNT

V.Agopyan - Professor do Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP

1- INTRODUÇÃO

Cimento portland de alto-forno, de acordo com a NBR 5735¹ é o aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer portland e escória granulada de alto-forno, moídos em conjunto ou em separado. Durante a moagem é permitida a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e 5% de carbonato de cálcio. O teor de escória deve estar compreendido entre 35% e 70% da massa total do aglomerante.

A escória granulada, por sua vez, é o subproduto da fabricação do gusa nos altos-fornos, constituído em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio sob forma vítrea. Resulta da combinação dos minerais de ganga do minério de ferro, das cinzas do coque e da cal utilizada como fundente. Além dos aluminossilicatos cálcicos, ocorrem, secundariamente, sulfetos de cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês. A presença de magnésio está condicionada à utilização de cal dolomítica, calcário magnesiano ou serpentinito como fundentes.

As principais características desse produto são as seguintes:

- . propriedades específicas ao concreto, tais como baixo calor de hidratação, baixa permeabilidade, inibição de reação álcali-agregado, resistência à ataques químicos etc.
- . diminuição do consumo energético específico de fabricação do cimento.
- . razões ecológicas, como aproveitamento de rejeitos industriais poluidores.
- . razões estratégicas, evitando que as jazidas de calcário sejam esgotadas prematuramente.

Apesar de todas as vantagens mencionadas o consumo no Brasil é ainda considerado baixo em relação ao volume do sub-produto disponível.

2- HISTÓRICO DO USO DA ESCÓRIA NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA BRASILEIRA

No Brasil, a fabricação de cimento portland de alto-forno é recente, com produção em 1952, de 71.765 toneladas de cimento, pela Cimento Tupi S.A., em Vonta Redonda/RJ, utilizando escória proveniente da Companhia Siderúrgica Nacional numa proporção de 30%. Esse teor, similar ao do cimento alemão *Eisen Portland*, foi aumentado para 50%, já a partir de 1954.

Em 1977 é admitido o uso de até 10% de escória no cimento portland comum através da NBR 5732², antiga EB-1.

3- PRODUÇÃO NACIONAL DE CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO

No ano de 1990 a produção nacional de cimento portland de alto-forno foi de cerca de 3,5 milhões de toneladas correspondendo a 14% da produção total de cimento do país. Mais ainda, a produção nacional de cimento portland comum foi de cerca de 19 milhões de toneladas (86% da produção total) contendo a adição de 10% de escória.

3.1 Teor Médio de Escória no Cimento Portland de Alto-Forno

Atualmente 15 fábricas produzem cimento portland de alto-forno com teor médio de cerca de 50% de adição de escória.

3.2 Escórias Brasileira Utilizadas

Atualmente o Brasil possui 5 Siderúrgicas que produzem cerca de 4.500.000 t/ano de escória granulada de alto-forno básicas.

As propriedades do cimento portland de alto-forno dependem em grande parte do teor e das características das escórias. A atividade hidráulica das escórias depende principalmente da sua composição química e do seu grau de vetrificação.

A norma NBR 5735/87 avalia a qualidade da escória através da relação $\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1$.

O *Quadro 1* apresenta a composição química das escórias básicas.

Destas escórias, três delas as da USIMINAS, COSIPA e CSN estão detalhadamente caracterizadas em outro artigo deste Seminário³.

4- ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS PARA O CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO

No Brasil, a NBR 5735/87 especifica as características exigíveis no recebimento do cimento portland de alto-forno.

No *Quadro 2* apresenta as exigências físicas, químicas e mecânicas especificadas pela norma.

5- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DOS CIMENTOS PORTLAND DE ALTO-FORNO

Os *Quadros 3* e *4* apresentam, respectivamente, os resultados relativos à composição química média de todos os cimentos portland de alto-forno produzidos em 1990.

5.1 Resistência à Compressão

A *Figura 1* apresenta o desempenho das resistências mecânicas dos cimentos brasileiros produzidos em 1990.

Verifica-se que às idades de 3 e 7 dias das resistências das argamassas de cimento portland comum são maiores que a dos cimentos pozolânicos e alto-forno, mostrando que as adições se comportam como inertes nas primeiras idades.

Para a idade de 28 dias, as argamassas de cimento de alto-forno apresentam resistências superiores as de cimento comum.

A *Figura 2* mostra o desempenho das resistências mecânicas com as idades em função do teor de adição de escória granulada de alto-forno.

Constata-se que nas primeiras idades as resistências

são menores e para as idades acima de 28 dias há um ganho significativo de resistência com aumento do teor de adição de escória.

A *Figura 3* apresenta a evolução da resistência à compressão aos 28 dias de idade de todos os cimentos brasileiros desde o ano de 1981.

Constata-se o bom desempenho dos cimentos de alto-forno em relação ao comum e pozolânico.

5.2 Calor de Hidratação

O calor de hidratação do cimento portland de alto-forno é sensivelmente menor do que o cimento portland comum.

A *Figura 4* apresenta a evolução do calor de hidratação determinado pelo calorímetro de Langavant em função do acréscimo de escória granulada de alto-forno.

5.3 Resistência aos Sulfatos

A *Figura 5* apresenta o desempenho dos cimentos com adição de escória granulada de alto-forno no tocante à resistência química medida através do procedimento de Kock e Stejneger, que consiste em determinar resistência à tração de barras de mesma argamassa imersas em águas destilada e sulfatada. O índice de resistência química é definido pelo quociente entre as resistências à tração na flexão das barras em solução sulfatada e água destilada.

Constata-se que o cimento sem adição é considerado não resistente aos sulfatos, enquanto que os cimentos com 50% de adição de escória apresenta excelente resultado.

5.4 Inibição de Reação Álcali-Agregado

A *Figura 6* apresenta a eficiência da adição de escória granulada de alto-forno na minimização da reação álcali-agregado. O ensaio foi realizado conforme procedimento ASTM C-441. Verifica-se a inibição da reação álcali-agregado para teores acima de 45% da adição de escória.

6- PRINCIPAIS OBRAS REALIZADAS

No Brasil, a utilização deste tipo de cimento começou quando da produção nacional em 1952. Atualmente existem muitas obras, algumas com mais de 30 anos que encontram-se em perfeitas condições apesar do ambiente agressivo a que estão submetidos, como por exemplo obras marítimas.

Uma das obras mais importantes realizadas no Brasil com cimento portland de alto-forno é a Barragem do funil, em Itatiaia/RJ, concluída em 1969, com consumo de 286.000 m³ de concreto⁴.

Dentre as obras que merecem destaque apontam-se as seguintes:

- . Estaleiro da Verolme, Rio de Janeiro/RJ
- . Estaleiro de Ishikawagima, Rio de Janeiro/RJ
- . Adultora do Gandu, Rio de Janeiro/RJ
- . Barragem da Ponte Coberta, Rio de Janeiro/RJ.
- . Estações do Sistema Metroviário do Rio de Janeiro e São Paulo
- . Terminal Rodoviário Tietê, São Paulo/SP

7- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o potencial hidráulico da escória e o emprego ainda reduzido, em comparação ao volume produzido, intensificam-se no país os estudos de maior aproveitamento de escória como aglomerante.

Atualmente, encontra-se em fase final a normalização do cimento composto, que permite a adição de até 34% de escória, pelo Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18) da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cimento portland de alto-forno*; NBR 5735. Rio de Janeiro, 1987.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cimento portland comum*; NBR 5732. Rio de Janeiro, 1980.
3. CINCOTTO, M.A & AGOPYAN, V. *Novos Empregos da Escória de Alto-Forno: Estudos Realizados no Brasil*. In: *Seminário Lationamericano sobre Utilización de Escórias de Altos Hornos em la Construcción, Proceedings*. Buenos Aires, 1991.
4. ANDRADE, Walton Pacelli de. *O controle do concreto na Barragem do Funil*. São Paulo, Central Elétrica de Furnas, 1969.

QUADRO 1 - Composição química das escórias brasileiras

COMPONENTE (% em massa)	PROCEDÊNCIA				
	USIMINAS (MG)	COSIPA (SP)	C S N (RJ)	C S T (ES)	AÇOMINAS (MG)
SiO ₂	35,15	33,85	32,90	35,47	35,39
Al ₂ O ₃	12,79	13,00	15,44	13,20	13,88
CaO	43,58	42,22	40,97	41,97	40,99
Fe ₂ O ₃	0,37	0,68	0,91	0,83	1,97
FeO	0,29	0,33	0,43	-	-
MgO	5,48	7,08	5,81	5,69	6,31
K ₂ O	0,45	0,70	0,73	0,28	0,49
Na ₂ O	0,13	0,21	0,19	0,10	0,12
TiO ₂	0,54	0,48	0,49	0,53	-
Mn ₂ O ₃	0,88	0,69	0,86	0,84	-
SO ₃	0,05	0,12	-	0,07	-
S	1,10	0,67	1,03	0,87	0,87
Fe	0,07	0,13	0,25	-	-
NATUREZA DA ESCÓRIA	BÁSICA	BÁSICA	BÁSICA	BÁSICA	BÁSICA

QUADRO 2 - Exigências físicas, químicas e mecânicas
para o cimento portland de alto-forno

CARACTERÍSTICAS		CIMENTO			
		UNIDADE	AF-25	AF-32	AF-40
Perda ao fogo (P.F.)		%	< 4,0	< 4,0	< 4,0
Resíduo Insolúvel (R.I.)		%	< 1,5	< 1,5	< 1,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)		%	< 4,0	< 4,0	< 4,0
Finura (resíduo na peneira ABNT 0,075mm)		%	< 8,0	< 8,0	< 8,0
Tempos de pega	início	h	> 1,0	> 1,0	> 1,0
	fim ^(*)		< 12,0	< 12,0	< 12,0
Expansibilidade	a quente	mm	< 5,0	< 5,0	< 5,0
	a frio		< 5,0	< 5,0	< 5,0
Resistências à compressão	3 dias	MPa	> 8,0	> 10,0	> 12,0
	7 dias		> 15,0	> 20,0	> 23,0
	28 dias		> 25,0	> 32,0	> 40,0
			< 42,0	< 49,0	
	91 dias ^(*)		> 32,0	> 40,0	> 48,0
Teor de escória ^(*)		%	35 a 70	35 a 70	35 a 70
Teor de enxofre ^(*)		%	< 1,0	< 1,0	< 1,0

(*) Características que poderão ser exigidas pelo consumidor através de ensaios facultativos.

QUADRO 3 - Composição química média dos cimentos portland de alto-forno de todos os fabricantes produzidos em 1990

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	P.F. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	S (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	CaO Livre (%)	R.I. (%)
n	164	164	164	164	164	164	164	164	164	164	164	164
$\bar{x}$	2,59	26,52	8,29	2,23	52,47	4,13	2,21	0,42	0,13	0,57	1,09	0,64
s	0,958	2,038	1,059	0,421	2,818	0,930	0,652	0,115	0,053	0,170	0,540	0,248
Limite da NBR 5735/87	4,9	-	-	-	-	-	< 4,0	< 1,0	-	-	-	< 1,5

QUADRO 4 - Características físico-mecânicas médias dos cimentos portland de alto-forno de todos os fabricantes produzidos em 1990

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	RESÍDUO NA PENEIRA ABNT 0,075 mm (%)	ÁREA ESPECÍFICA BLAINE (M ² /kg)	TEMPO DE INÍCIO DE PEGA (min.)	MASSA ESPECÍFICA (Mg/m ²)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
					3 dias	7 dias	28 dias
n	162	162	162	162	162	162	162
$\bar{x}$	1,6	422	192	2,99	16,5	26,3	41,3
s	1,19	46,0	64,7	0,050	3,42	4,03	4,64
Limite da NBR 5735/87	< 8,0	-	> 60	-	> 10	> 20	> 32 < 49

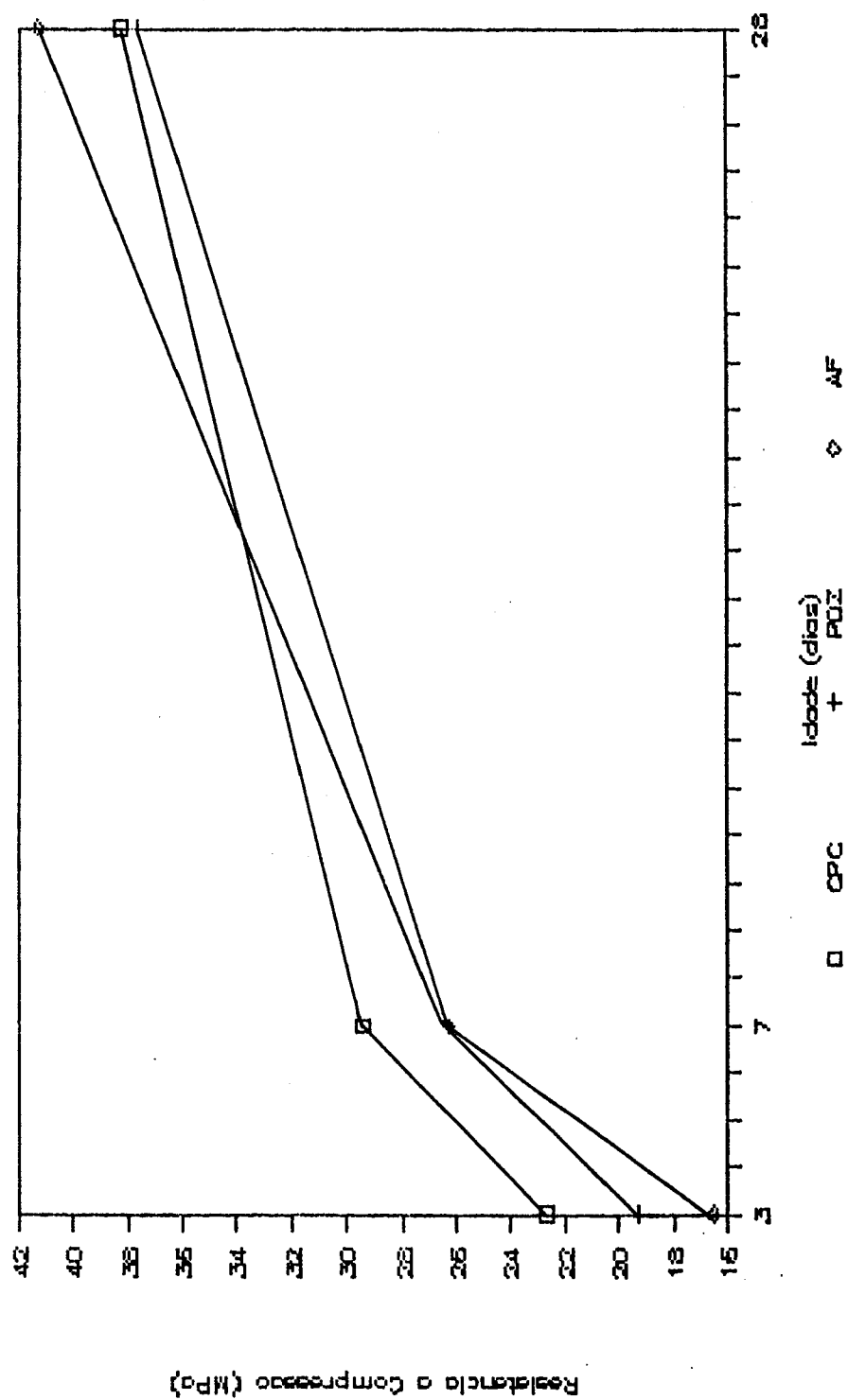


FIGURA 1

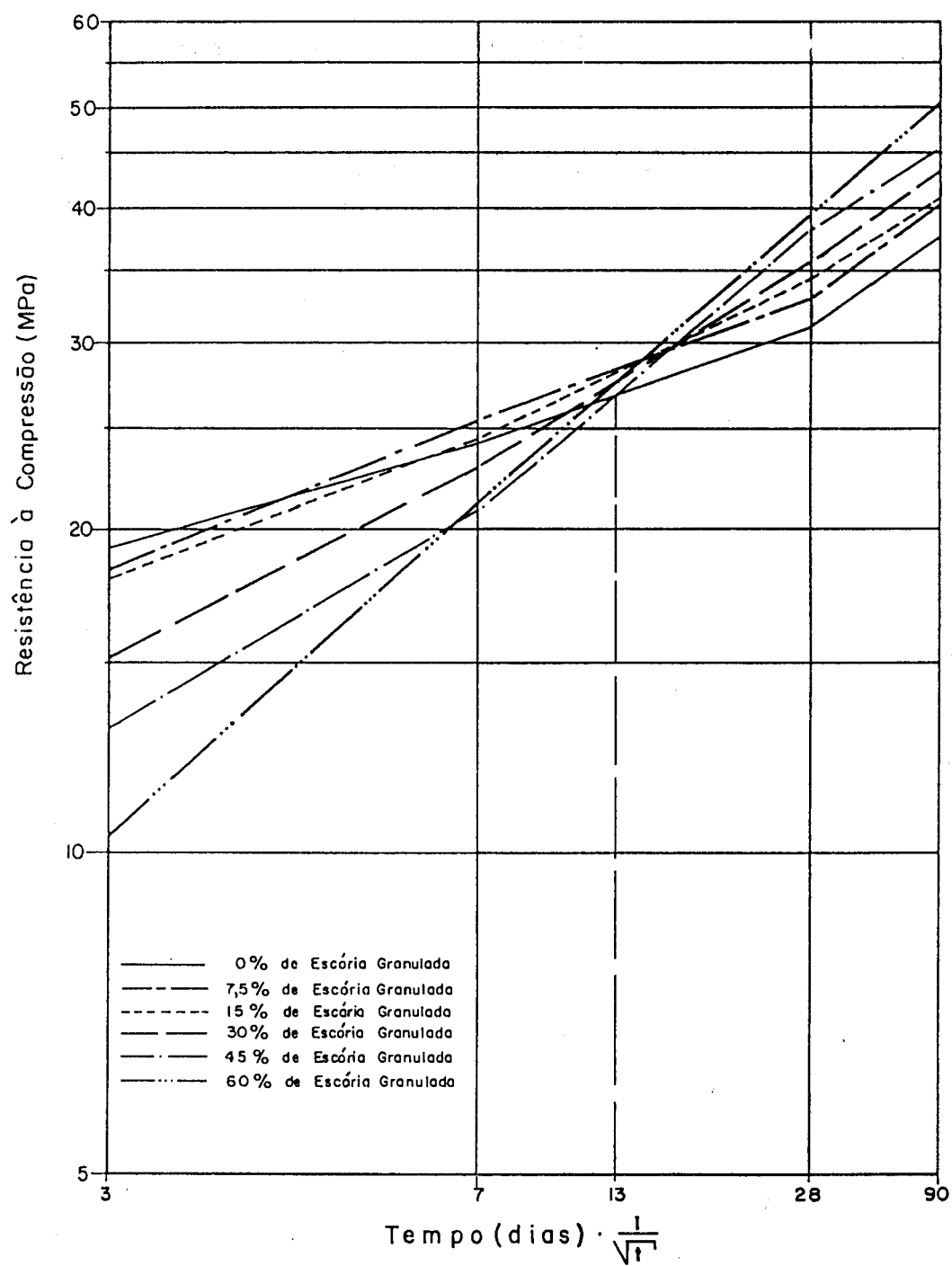


FIGURA 2 - Resistência à compressão de argamassas de cimentos de laboratório com diferentes teores de escória em função da idade

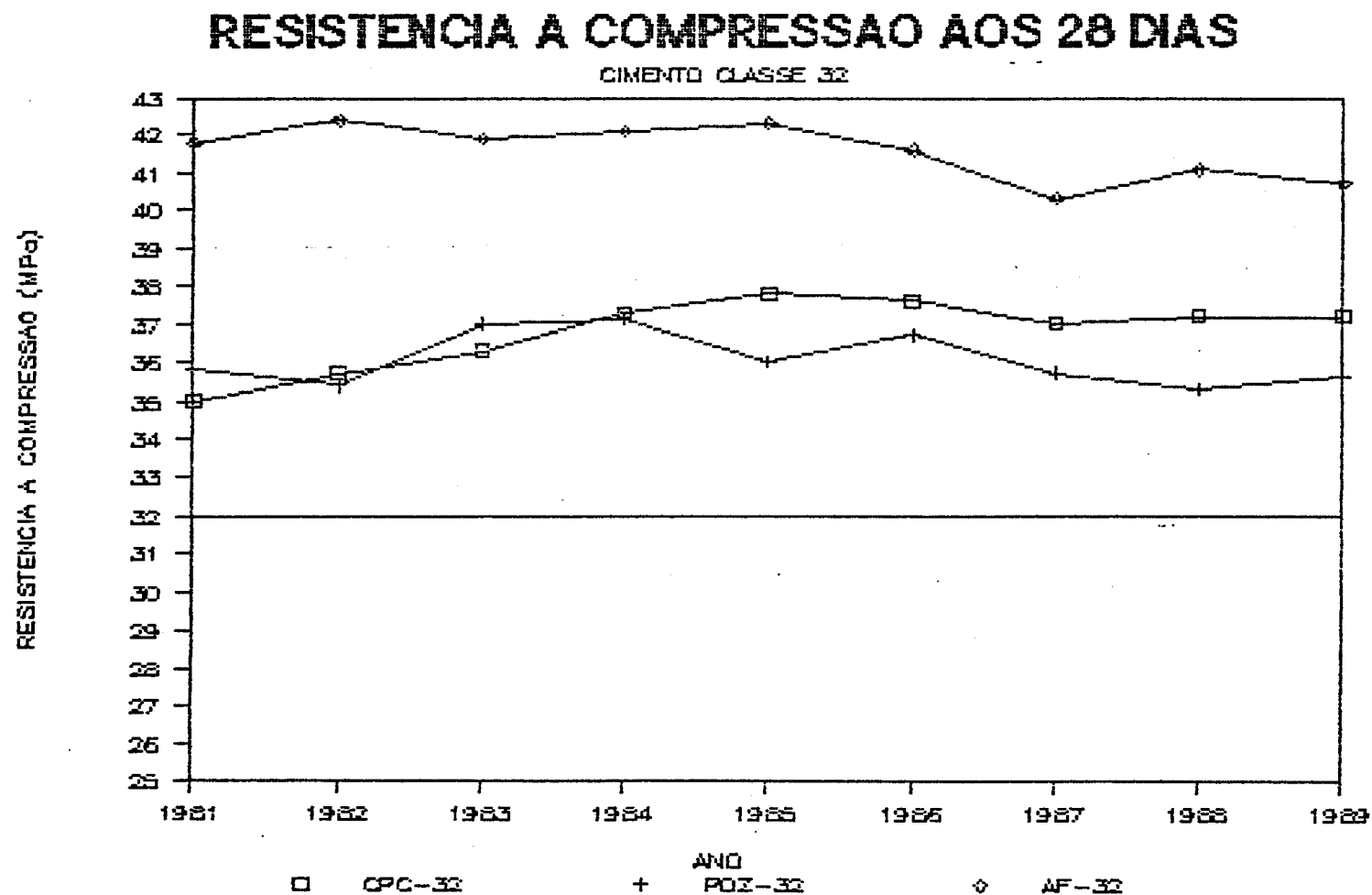


FIGURA 3

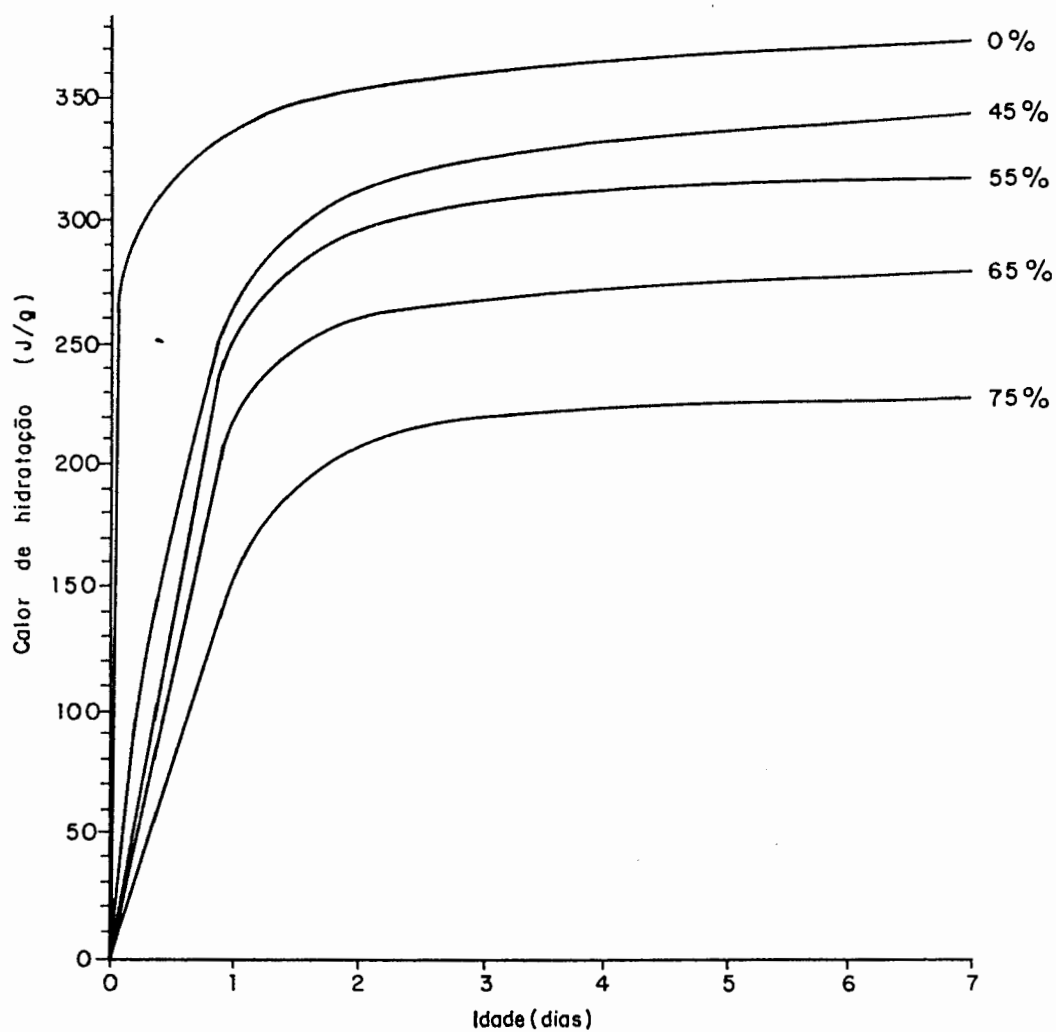


FIGURA 4 - Evolução do calor de hidratação do cimento A com diferentes teores de escória em massa (Método da Garrafa de Langavant)

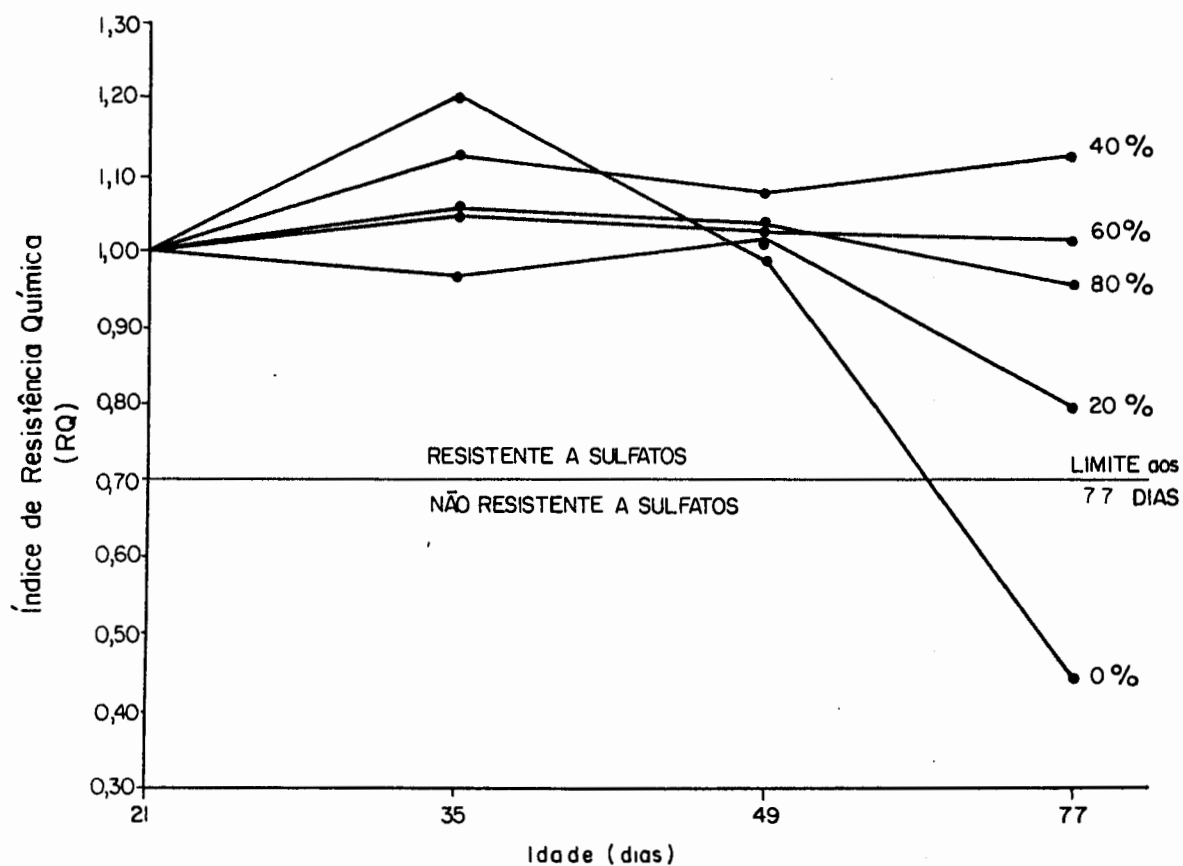


FIGURA 5 - Índice de resistência química em função da idade e do teor de escória, de acordo com o ensaio de "Koch-Steinegger"

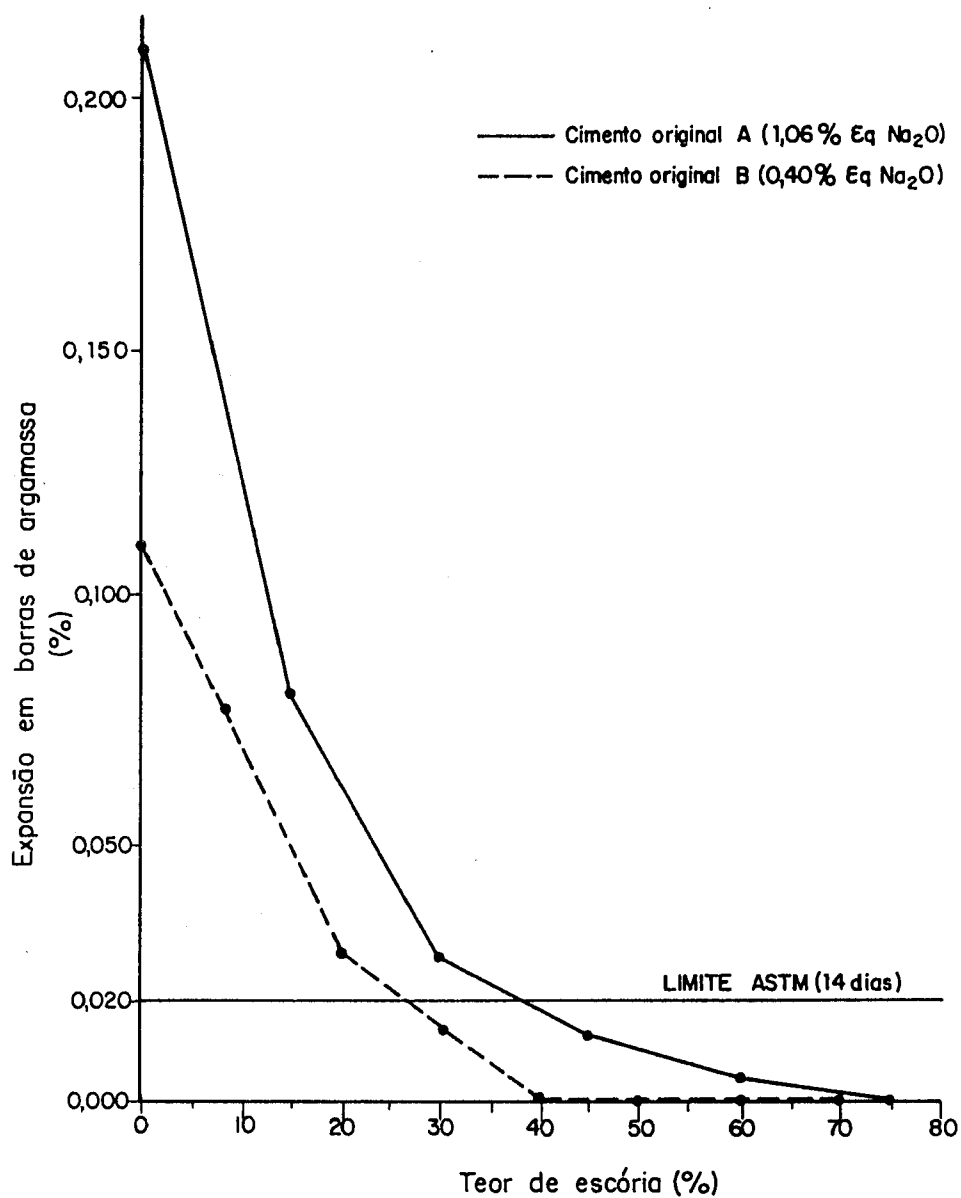


FIGURA 6 - Eficácia da adição de escória granulada de alto-forno na redução da expansão de argamassas com vidro "pirex"

NOVOS EMPREGOS DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO:

ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL.

Maria Alba Cincotto (*)

Vahan Agopyan (**)

RESUMO

Os autores resumem resultados de estudos realizados por pesquisadores brasileiros, de aproveitamento da escória de alto-forno granulada: a) como agregado miúdo e graúdo, na produção de blocos, argamassas e concretos; b) como aglomerante, apresentando resultados de caracterização e de ativações com soda, cal, soda e gipsita. São também apresentados resultados de resistências mecânicas de compósitos produzidos com escória ativada com cal e gipsita e fibra de coco. Os resultados são positivos requerendo estudos mais detalhados para aplicações desejadas.

(*) IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

(**) EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Maria Alba Cincotto - pesquisador do Agrupamento de Materiais de Construção Civil, Divisão de Construção Civil - IPT.

Vahan Agopyan - professor do Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1. INTRODUÇÃO

Em outro artigo deste Seminário (1) já foi apresentado o emprego de escória granulada de alto-forno em cimentos portland, emprego este já consagrado e com boa aceitação no meio consumidor.

No entanto, o excedente deste subproduto está crescendo já que o seu consumo na indústria cimenteira é inferior aos 4 milhões de toneladas de escória que aproximadamente são produzidos no país, anualmente. Em apenas uma das grandes siderúrgicas, o estoque de escória existente é superior à produção nacional anual.

Desde a década de 70, pesquisadores brasileiros, incentivados pela indústria siderúrgica, vêm buscando empregos alternativos a este sub-produto. Entendem-se como alternativas os empregos que não são a sua adição ao clínquer portland ou a sua simples deposição como aterro ou base de pavimentação.

Como a maior parte da escória disponível é granulada, isto é, vítrea, os empregos mais promissores são aqueles que aproveitam a sua reatividade. Foram realizados estudos prevendo o seu emprego como aglomerante alternativo, sem adições ou aditivado com outros agentes que não o próprio clínquer, e até como agregado (grauído ou miúdo) de concreto e argamassas.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA BRASILEIRA

A propriedade fundamental desejada é a hidraulicidade que, por sua vez, depende da composição química e da sua obtenção em estado sólido vítreo. Estas características foram estudadas por Battagin (2), resumindo-se em seguida os resultados obtidos para as escórias de alto-forno para as três siderúrgicas principais brasileiras.

2.1 - Composição Química

Está relacionada à eficiência de operação do forno, isto é, está relacionada à homogeneidade da escória líquida, à sua elevada capacidade de dessulfuração e baixa viscosidade, a qual é afetada:

- a) pelo teor de alumínio, sendo tanto mais viscosa quanto maior o seu teor, mas, não podendo ultrapassar a faixa de 20% a 25% por trazer dificuldades à operação do alto-forno. Nas escórias brasileiras o teor de alumina varia entre 11% e 18%
- b) pelo valor da relação CaO/SiO_2 . Quando acima de 1,4 é mais refratária, porém fundida tem baixa viscosidade e escoamento fácil; abaixo de 1,4 tem uma viscosidade que decresce com o aumento da temperatura, mas com escoamento difícil. As escórias brasileiras têm relação CaO/SiO_2 na faixa de 1,29 a 1,33.

Na Tabela 1 estão indicadas as faixas de variação dos elementos constituintes da escória citados em literatura e as encontradas para as escórias brasileiras (2).

A faixa de variação torna-se mais estreita quando as escórias destinam-se à indústria de cimento.

2.2 - Índice de Hidraulicidade

Muitos autores procuraram relacionar a reatividade da escória com a água, com desenvolvimento de resistência mecânica, existindo assim uma série de índices válidos. A Norma Brasileira (NBR-5735/87) adota a seguinte relação, válida para todas as idades.

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

Nos estudos que o IPT vem desenvolvendo tem sido adotado o índice sugerido por Dron (3). Segundo este autor a reatividades hidráulica das escórias pode ser medida pela determinação da sua solubilidade em uma solução de soda em pH 12,6. O estudo com vidros sintéticos mostram que esta solubilidade varia proporcionalmente com a relação:

$$R' = \frac{\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)^2}$$

e o estudo com escórias industriais mostrou que há uma correlação satisfatória com a resistência das argamassas à base de mistura escória-cal hidratada.

Para este autor a escória é de qualidade aceitável quando a relação R' é superior a 0,18 e cita que para as escórias francesas R' varia de 0,20 a 0,30.

Dos resultados da análise química apresentados por Battagin (1) para as escórias brasileiras(*) os valores de R' são os abaixo citados para os lotes analisados:

- USIMINAS: 0,22 - 0,25
- CSN: 0,27 - 0,27 - 0,27
- COSIPA: 0,24 - 0,26 - 0,28

2.3 - Fração Vítrea

Além da composição química adequada o resfriamento brusco é essencial para que se tenha a propriedade hidráulica desejada. O nível de vitrificação bem como outros de talhes, função do processo de resfriamento, são observáveis ao microscópio óptico, por exemplo: grau de vitrificação, natureza mineralógica das inclusões cristalinas, a presença de inclusões gasosas e metálicas (ferro), morfologia dos grãos, fraturamento, compacidade, índice de refração e luminescência à luz polarizada a qual indica a presença de fase cristalina. Diz-se também que a tonalidade tem importância, pois quanto mais escura, menos potencialmente hidráulica. Quanto à compacidade, quanto mais porosas, mais vítreas e claras, mais reativas. As observações feitas ao microscópio óptico de luz transmitida estão resumidas em seguida.

USIMINAS - Grãos equidimensionais, vítreos, pouco porosos, claros e incolores. Inclusões esféricas gasosas e fratura concoidal. Matriz isotropa, não apresentando evidências de estágio incipiente de hidratação/carbonatação. Inclusões cristalinas na matriz de fenocristais de formas retangulares, estriadas e espiculares, provavelmente de melilita e mervinita. Observação esporádica de grãos individualizados de quartzo. Uma amostra apresentou como caráter secundário grãos ligeiramente acastanhados e outros grãos alongados. Índice de refração $>1,64$.

(*) USIMINAS - Usina Siderúrgica de Minas.

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional.

COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista.

- CSN - Grãos equidimensionais, pouco porosos, transparentes e incolores. Matriz isotropa e vítrea, com inclusões cristalinas em formas quadrangulares e irregulares. Algumas inclusões cristalinas com alta birrefringência, podendo tratar-se de pseudo wollastonita. Inclusões esféricas gasosas com relativa frequência, grãos individualizados, opacos ou cristalizados raros. Quanto à tonalidade, diferiram quanto ao lote recebido, com cor castanha, castanho claro e incolor. Em caráter secundário duas amostras apresentaram grãos alongados em forma de bastonetes. Índice de refração $>1,64$.
- COSIPA - Grãos vítreos isotropos com fratura concoidal e com inclusões esféricas gasosas. Em caráter secundário grãos parcialmente cristalizados com superfície estriada. Baixa frequência de grãos alongados, opacos, não magnéticos e grãos de calcário. Inclusões cristalinas também com aspecto pontilhado. Os grãos isotropos são claros e transparentes enquanto os parcialmente cristalizados são mais escuros, com tonalidade acastanhada. Índice de refração $>1,64$.

A reatividade é também avaliada pelo teste de Michelson, ao microscópio óptico, pela determinação do tempo de início de formação de cristais aciculares de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quando se adiciona solução aquosa de sulfato de alumínio à escória em pó. A reatividade é elevada quando o tempo é de 1 a 2 min. O resultado observado variou com o lote, de 2'50" a 5'30". As amostras que apresentaram maior tempo eram mais escuras, evidenciando a importância da cor como características de avaliação prévia da hidraulicidade da escória.

Em resumo, segundo o autor desse estudo, o controle da escória por microscopia pode indicar rapidamente, de 10 a 15 minutos, o seu estado físico, vítreo ou cristalino, e a natureza mineralógica das inclusões cristalinas, presença de hematita residual do processo de fabricação e outras contaminações eventuais.

Ao microscópio de luz refletida, pela observação de seções polidas, devidamente atacadas com reagentes químicos apropriados, pode-se observar detalhes da estrutura das escórias, dificilmente observáveis ao microscópio de luz transmitida.

3. ESTUDOS DE ATIVAÇÃO DA ESCÓRIA PARA USO COMO AGLOMERANTE.

Segundo dados constantes da literatura, a reação de hidratação da escória é acelerada em meio fortemente alcalino, pela ação de sulfatos, ou ambos, sendo a velocidade de reação ainda favorecida pela finura da escória. Estes dados foram aplicados aos estudos realizados no IPT com a escória COSIPA, em diferentes etapas.

3.1 - Efeito comparativo da soda cáustica e da cal hidratada

O efeito ativador de soluções fortemente alcalinas foi estudado (4) com escória moída até finura Blaine de 400m²/kg, 600 m²/kg e 900m²/kg (tempos de moagem: 2,5h, 5,5h e 11h, respectivamente). Os ativadores foram adicionados à água de amassamento, sendo a soda cáustica adicionada até elevar o pH para um valor acima de 12 e a cal hidratada o suficiente para a saturação.

De fato, observa-se que a escória sem ativador tem hidratação muito lenta, embora favorecida pela finura. Nos períodos iniciais de hidratação o íon OH⁻ acelera a reação, cuja velocidade vai depender do cátion presente. Em presença de Na⁺ nenhum efeito é observado em função da finura, mas, com Ca²⁺ o início e a continuidade da hidratação são acelerados (Figura 1). O mesmo pode ser concluído dos resultados da resistência à compressão: aos 7 dias de idade a resistência é maior para a soda, invertendo-se o resultado aos 28 dias, quando a escória sem ativador ou com cal apresentam melhores resultados (Figura 2).

3.2 - Efeito do teor de cal na ativação da escória

Foram realizados estudos com escória Cosipa, no IPT (5), e com escória francesa, no INSA - Lyon, este último com detalhamento da composição dos hidratos formados (6).

No estudo realizado no IPT, foi empregada cal hidratada para construção, com elevado teor de cálcio, finura Blaine de 1000m²/kg e adicionada à escória Cosipa com teores percentuais de 0.1, 0.5, 2.0, 5.0, 9.0, 13.0, 17.0 e 20.0. O lote de escória empregado tinha um teor de vidro de 94%, moída à finura Blaine de 600 m²/kg. O efeito do teor de cal foi observado nos valores da consistência, tempos de início e de fim de pega e de resistência à compressão de argamassas preparadas com areia-normal brasileira, proporção 1:3 em volume. A título de comparação, os mesmos ensaios foram realizados com escória somente e com cimento Portland comum de composição: 33,6% C₃S, 32,0% C₂S, 11.8% de C₃A e 9.6% de C₄AF; resistência à compressão aos 28 dias de 33,4 mPa.

Consistência normal (NBR-7215/82)

A escória sem ativador requer menor quantidade de água para a consistência normal, não se alterando praticamente até 1,0%, e aumentando em seguida progressivamente com o teor de cal (Figura 3).

Tempos de pega (NBR-7215/82)

A escória sem ativador apresenta início de pega após 57 horas de mistura, sem fim de pega observável até 84 horas após a mistura. Nota-se que a simples adição de 0,1% de cal hidratada acelera as reações, diminuindo o tempo de início de pega para 16 horas e o fim de pega para 48 horas. Com 0,5% os tempos de início e de fim de pega igualam-se aos do cimento Portland. A partir desse valor a diminuição é mais acentuada de modo a evidenciar a partir de 5%, tendência à estabilização.

Resistência à compressão axial (NBR-7215/82)

A consistência normal média das argamassas de escória e areia normal brasileira situaram-se na faixa de 164 ± 2 cm, enquanto com o cimento de referência o valor foi de 162 cm, mantida a relação água/aglomerante igual a 0,48. A Figura 4 ilustra a variação do teor de água necessário à consistência normal, em função do teor de cal.

A desmoldagem dos corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão aos 3 dias só é possível a partir de 0,5% de cal. O ensaio de argamassa sem cal só é possível aos 14 dias de idade e aos 9 dias com 0,1% de cal. Para seis corpos-de-prova ensaiados, nas primeiras idades a resistência à compressão apresentou desvios relativos máximos elevados para a escória sem cal e para as misturas com teores de cal 0,1%; 0,5% e 1%.

A Figura 5 ilustra a evolução da resistência à compressão em função do teor de cal, evidenciando o crescimento da resistências nas primeiras idades, até o valor de 5% e, a partir dos 91 dias, até 2%.

A partir destes teores praticamente não há crescimento da resistência até os 28 dias e um decréscimo a partir dos 91 dias. Estes resultados permitem concluir que para a ativação do potencial hidráulico da cal são suficientes de 2% a 5% de cal. Quantidades maiores resultam em reações sem ganho de resistência mecânica. Com 2% existe dificuldade em se desmoldar os corpos-de-prova nas primeiras idades, concluindo-se ser mais adequada a ativação com 5% de escória.

Os resultados da resistência à compressão das argamasas de escória (Re) referidos à resistência à compressão do cimento tomado como referência (Rc) estão indicados na Figura 6. Conclui-se que, a partir dos 28 dias, teores iguais ou acima de 5% situam a resistência da escória entre 70% e 80% da resistência do cimento. Em idades superiores, os melhores resultados são obtidos com teor de cal até 2%. O teor de 5%, considerado o mais adequado, apresenta os seguintes percentuais em relação ao cimento: 72% (28d), 75% (91d), 80% (182d) e 88% (364d), valores que podem considerar a escória como de boa capacidade aglomerante.

Outros ensaios foram realizados com a escória francesa (SOLLAC - FOS-SUR-MER) em corpos-de-prova cilíndricos, de 20mm x 40mm, em pasta, com 10%, 15% e 20% de cal. Os resultados da resistência à compressão estão indicados na Tabela 2. O difratograma de raios-X e a análise térmica diferencial apresentam picos característicos ao carbo-aluminato de cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$), aluminato de cálcio (C_4AH_{13}) e calcita (CaCO_3). Os picos devidos à calcita e ao carbo-aluminato intensificaram-se com o tempo.

3.5 - Efeito de ativantes combinados

O emprego de gipsita como um dos ativantes altera o desenvolvimento de resistência mecânica, em virtude da formação de etringita ($3\text{CaSO}_4 \cdot \text{C}_3\text{A} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Na ativação com só da e gipsita foi identificada no difratograma de raios-X picos de etringita, como hidrato mais evidente, aluminato (C_4AH_{13}) e calcita (CaCO_3); o pico de etringita intensifica com o tempo. Na ativação com cal e gipsita encontram-se etringita, calcita e aluminato, como produtos formados; a cal mostra uma diminuição, embora não acentuada, ao longo do tempo, devendo ter sido consumida na formação do CaCO_3 e C_4AH_{13} , cujos picos aumentam de intensidade com o tempo.

Não se observou intensificação dos picos devido à etringita. Estes ensaios foram realizados com a escória francesa, estando os resultados da resistência à compressão indicados na Tabela 2.

Na aplicação de escória para produção de compósitos à base de fibra vegetal (8) foi estudada a sua ativação com cal e gipsita. O teor destes ativantes foram variados com o objetivo de minimizar o teor de cal livre, agente de teriorante da fibra. Os resultados da resistência à compressão e à flexão (ASTM C 349) de corpos-de-prova de (4x4x16)cm, bem como da cal livre determinada com etileno glicol estão indicados na Tabela 3.

Os resultados indicam que fixado o teor de cal em 5%, as resistências caem com o aumento do teor de gipsita, nos teores estudados de 5%, 10% e 15%. Fixado o teor de gipsita em 10% as resistências diminuem com o aumento do teor de cal de 0,3% para 0,9%.

O estudo deverá ser retomado para detalhamento da correlação entre estes dois ativadores. Destas misturas a de número (4) mostrou-se a mais adequada pelo baixo valor de cal livre determinado, e melhores resistências.

4. AGREGADOS

Por ser a escória disponível granulada, o seu emprego tem que ser cuidadoso para controlar a atividade, e tirar proveito da mesma. Coincidentemente os três estudos mais consistentes prevêm o uso da escória como agregado miúdo.

Houve um pequeno estudo com escória resfriada a frio e britada, sendo usada como agregado graúdo. O agregado, segundo as normas utilizadas, não se mostrou reativo, e chegou-se a empregá-lo como agregado graúdo em um edifício de estrutura de concreto armado. Porém, os estudos não avançaram e não se tem notícias de outros empregos deste tipo.

4.1 - Agregado para blocos de concreto

A escória granulada de alto forno foi empregada na confecção de blocos de concreto em substituição à areia natural (7), obtendo-se resistências à compressão similares, atendendo à especificação brasileira da época: média de 2,5 MPa e mínima individual de 2,0 MPa.

No entanto, deve-se frisar que a massa dos blocos sofreu uma redução de quase 20% com o uso de escória, de 10,418 kg por unidade para apenas 8,545kg por unidade, o que significa uma sensível redução de massa das paredes. A absorção de água não aumentou sensivelmente pela redução de massa (blocos com areia: 5,99% e os com escória 6,52%).

4.2 - Agregado miúdo para argamassas e concretos

O emprego da escória para esta finalidade teórica mente é bem interessante pois utiliza-se o sub-produto sem ter que moer-lo, e com isso necessitar de uma instalação industrial e consumo de energia. Ainda mais, como é um produto com certa atividade, a adição da escória poderá reduzir o consumo de aglomerante.

Logicamente, nos estudos experimentais estas reposições não se verificaram com tanto ressaltado, porém conclusões importantes foram obtidas.

Silva e Almeida (8) compararam concretos feitos com areia natural e escória granulada, ambas com módulos de finura de mesma ordem de grandeza. Os concretos estudados tinham o teor de argamassa seco de 0,48 ou 0,49, consistência de 60 ± 10 mm ("slump") e consumo de cimento variando de 260 a 450 kg/m³.

Pelos resultados obtidos, os concretos com escória apresentaram níveis de resistência à compressão axial de até 59% do concreto de referência (com areia) para consumos de cimento da ordem de 260kg/m³ e praticamente 100% para consumos acima de 350kg/m³.

Quanto às demais propriedades: módulo de deformação estática, retração por secagem, aderência armadura-concreto e corrosão da armadura, os resultados se apresentaram compatíveis àqueles apresentados pelo concreto de referência quando não melhores.

Por isso, os autores concluíram que nada impede o uso da escória granulada de alto forno como agregado miúdo, desde que se estabeleçam especificações que fixam as características químicas e físicas exigíveis no recebimento deste material.

Num trabalho mais recente, Scanduzzi e Battagin (8), retomaram o tema estudando argamassas contendo escória em comparação com areia natural, (granito britado e areia normal brasileira, nos traços 1:2; 1:2 1/2 e 1:3 1/2 (cimento: agregado miúdo), sendo o aglomerante o cimento portland de alto forno (AF). Todas as argamassas tinham escoamento igual a 110 ± 5% ("flow-table").

Os autores conduziram um trabalho exaustivo avaliando a ação da escória quanto ao desempenho mecânico das argamassas, a sua reatividade química e a interface pasta-agregado. Os resultados obtidos indicaram que nas primeiras idades a resistência à compressão das argamassas com escória foi menor, sendo esta diferença minimizada ao longo do tempo. A explicação dos autores é que a resistência baixa inicial é devida à maior quantidade de água necessária para a consistência requerida e o aumento da resistência nas idades mais avançadas deve-se à maior aderência pasta-agregado. Os autores constataram o desenvolvimento de uma camada ou película superficial de hidratação da escória, hidratação incipiente, fenômeno não expansivo que contribui, adicionalmente, para uma maior aderência pasta-agregado.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Os exemplos citados neste artigo demonstram o grande potencial de uso das escórias brasileiras na construção civil.

No entanto, dois fatores ainda dificultam a efetivação do uso em larga escala. Um deles é a própria aquisição de escória, que está localizada em pontos fixos e que não tem uma política de comercialização ampla e aberta; na verdade, as siderúrgicas querem solucionar o problema de estocagem deste sub-produto, o qual teria um retorno econômico positivo se fosse adequadamente comercializado. Por outro lado, os possíveis usuários não conhecem o produto não tendo capacidade para avaliar o seu potencial.

Deve-se por fim alertar que é um sub-produto, com propriedades nem sempre homogêneas e que seu uso, apesar de ser interessante e útil à Construção Civil, deve ser realizado com os devidos cuidados.

6. REFERÊNCIAS

- (1) ESPER, M.W.; AGOPYAN, V. O emprego da escória granulada de alto-forno em cimentos Portland no Brasil - Seminário Latino Americano sobre utilização de escórias de Altos-Hornos en la construcción.
- (2) BATTAGIN, A.F. Aplicação de técnicas físico químicas na caracterização mineralógica das escórias de alto-forno das principais usinas siderúrgicas do Brasil. In: 31ª REUNIÃO DE TÉCNICOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 31. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland. 1980.
- (3) DRON, R. Structure et reactivité du laitier granulé, 8th Int. Congre. on the Chem. Cem. 22-27 set, 1986, 6 vol, Vol VI, p.81-85.
- (4) TEZUKA, Y.; FLORINDO, M.C.; SILVA, E. Cement based on blast-furnace slag. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT OF LOW-COST AND ENERGY SAVING CONSTRUCTION MATERIALS. Rio de Janeiro, jul. 9 - 12. v.1, p.315-330.
- (5) INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. "Estudo e avaliação comparativa do poder aglomerante da escória de alto-forno granulada". 1989. (Rel. IPT nº 21.031).
- (6) TANGO, C.E.S., Estudo sobre a ativação de uma escória de alto-forno, INSA - Institut National des Sciences Appliquées - Lyon - França - Em curso de publicação pelo IPT.
- (7) MOURÃO, J.N.; CARDOSO, E.V. Uso da escória granulada de alto-forno como agregado na fabricação de blocos de concreto. São Paulo, IBRACON, 1977. 33p.
- (8) SCANDIUZZI, L.; BATTAGIN, A.F. A utilização de escória granulada de alto-forno como agregado miúdo. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1990. 35p. (Estudo Técnico, 95).

TABELA 1 - Composição de escórias de alto-forno (1)

Constituintes	Porcentagem indicada na literatura	Porcentagem das escórias brasileiras.
SiO ₂	23 - 55	30 - 35
CaO	27 - 55	40 - 45
Al ₂ O ₃	5 - 25	11 - 18
MgO	2 - 12	2,5 - 9
MnO	0,5 - 3	-
Fe ₂ O ₃	-	0 - 2
FeO	0,5 - 2	0 - 2
S	0,4 - 1,2	0,5 - 1,5

TABELA 2 - Resultados de ensaios de resistência à compressão

Condição de ensaio	Ativante/Escória (%, massa)			Resistência à Compressão * (MPa)			
				7 dias	29 dias	63 dias	91 dias
	gipsi	cal	soda				
	ta			■	■	■	■
1	-	-	-	9,3	17,6	17,0	20,5
2	5	5	-	25,0	42,8	46,3	47,7
3	5	10	-	29,7	41,9	51,4	55,5
4	5	15	-	32,5	41,0	43,4	47,7
5	5	-	1	16,6	21,5	23,0	26,5
6	5	-	2	23,7	25,5	44,5	44,4
7	5	-	3	28,4	38,4	38,0	37,3
8	-	10	-	21,4	30,6	32,9	32,6
9	-	15	-	21,6	30,1	26,5	30,1
10	-	20	-	18,0	26,0	33,8	33,5

* Valor mais alto da série de 3 (três) corpos de prova

TABELA 3 - Resultados de ensaios de compósitos de fibra vegetal;
Aglomerante: escória + cal + gipsita

Constituintes do compósito	Proporção dos constituintes					
	(1)	Série A (2)	(3)	(4)	Série B (5)	(6)
Escória Cosipa	0,90	0,85	0,80	0,897	0,894	0,891
Cal hidratada	0,05	0,05	0,05	0,003	0,006	0,009
Gipsita	0,05	0,10	0,15	0,100	0,100	0,100
Areia	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Água	0,419	0,419	0,419	0,419	0,419	0,419
Fibra de coco	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Propriedades:	Resultados					
Resistência à flexão (MPa) .	6,12	5,28	4,38	6,64	6,66	5,28
Resistência à compressão (MPa)	22,12	17,01	12,63	40,15	34,52	18,77
Cal livre (CaO,%)	0,96	1,06	1,34	0,79	0,82	0,98

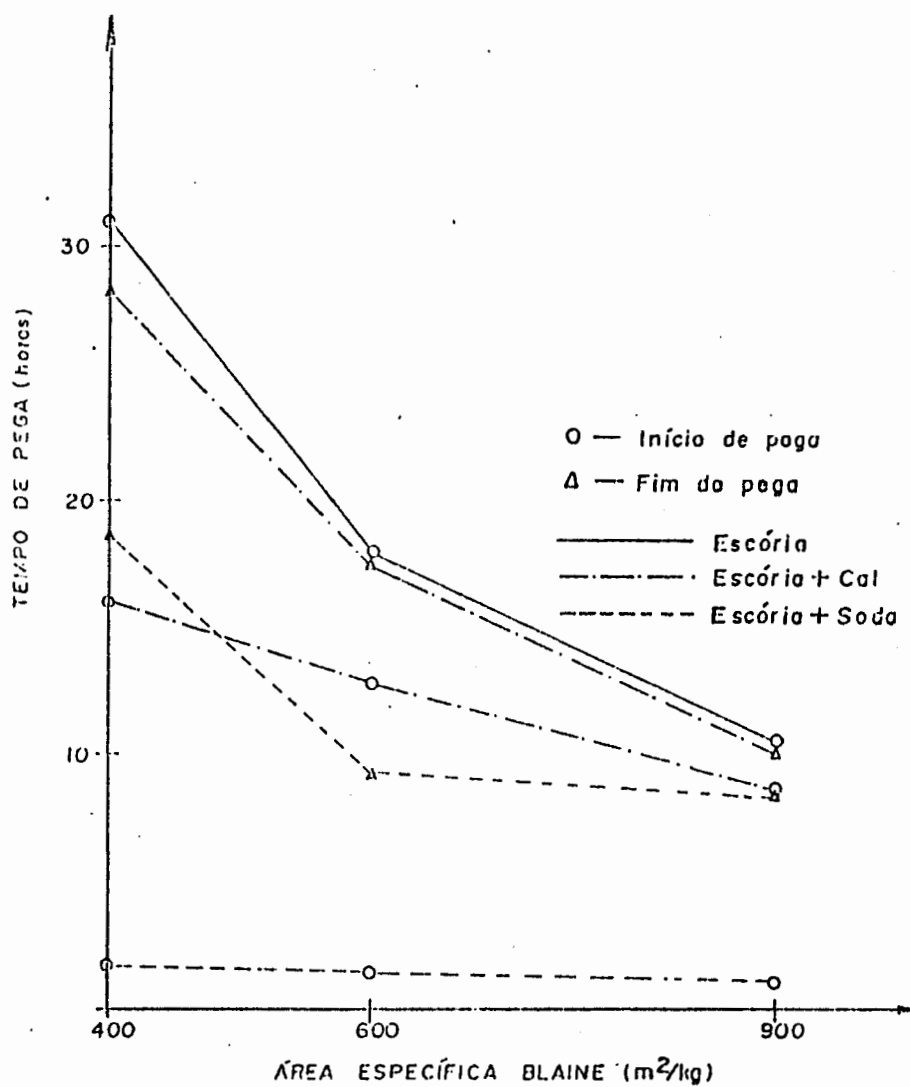


FIGURA 1 - Efeito da ativação da soda e da cal nos tempos de início e de fim de pega da escória.

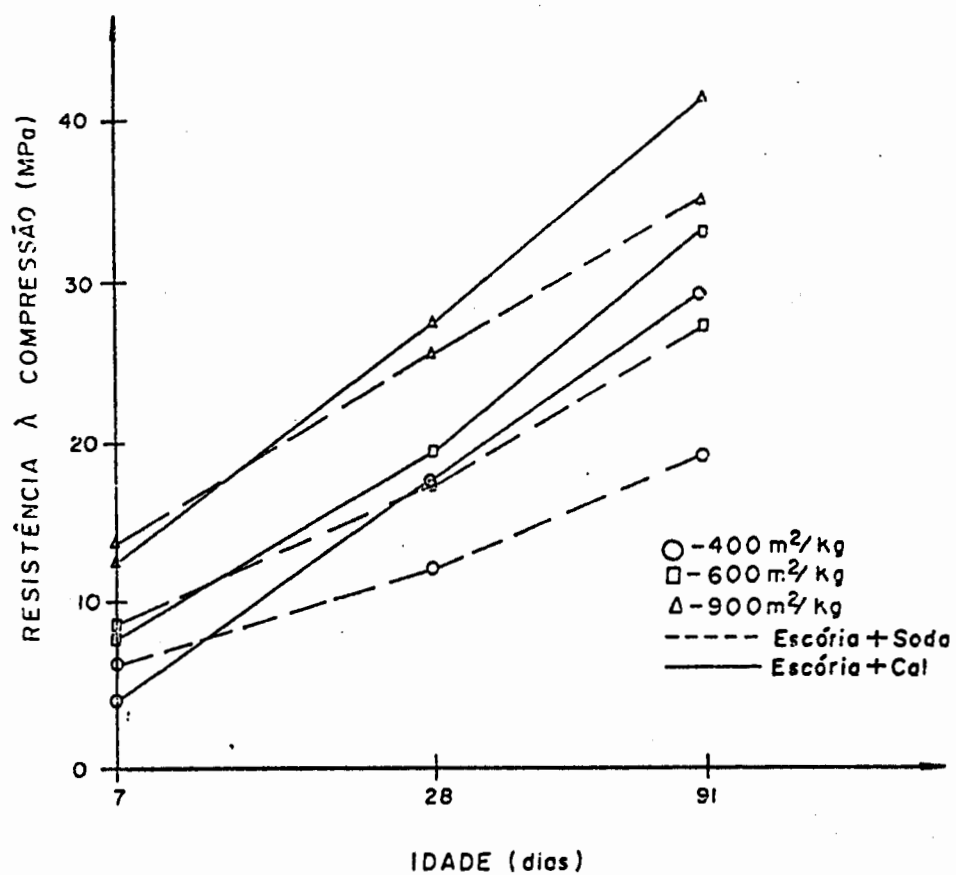


FIGURA 2 - Efeito da finura e da ativação da soda e da cal na resistência à compressão da escória.

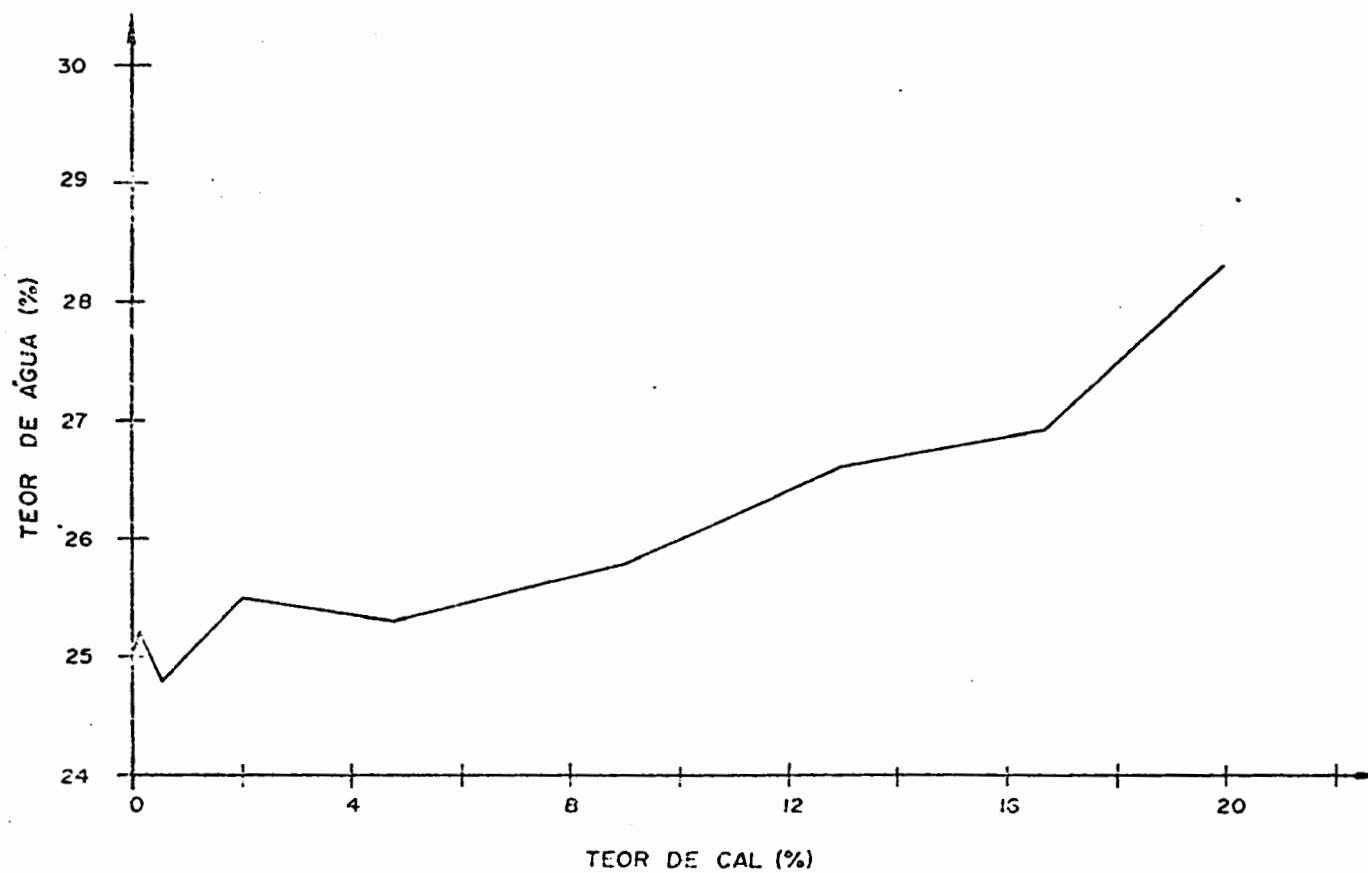


FIGURA 3 - Efeito da ativação da cal no teor de água para consistência normal da pasta de escória.

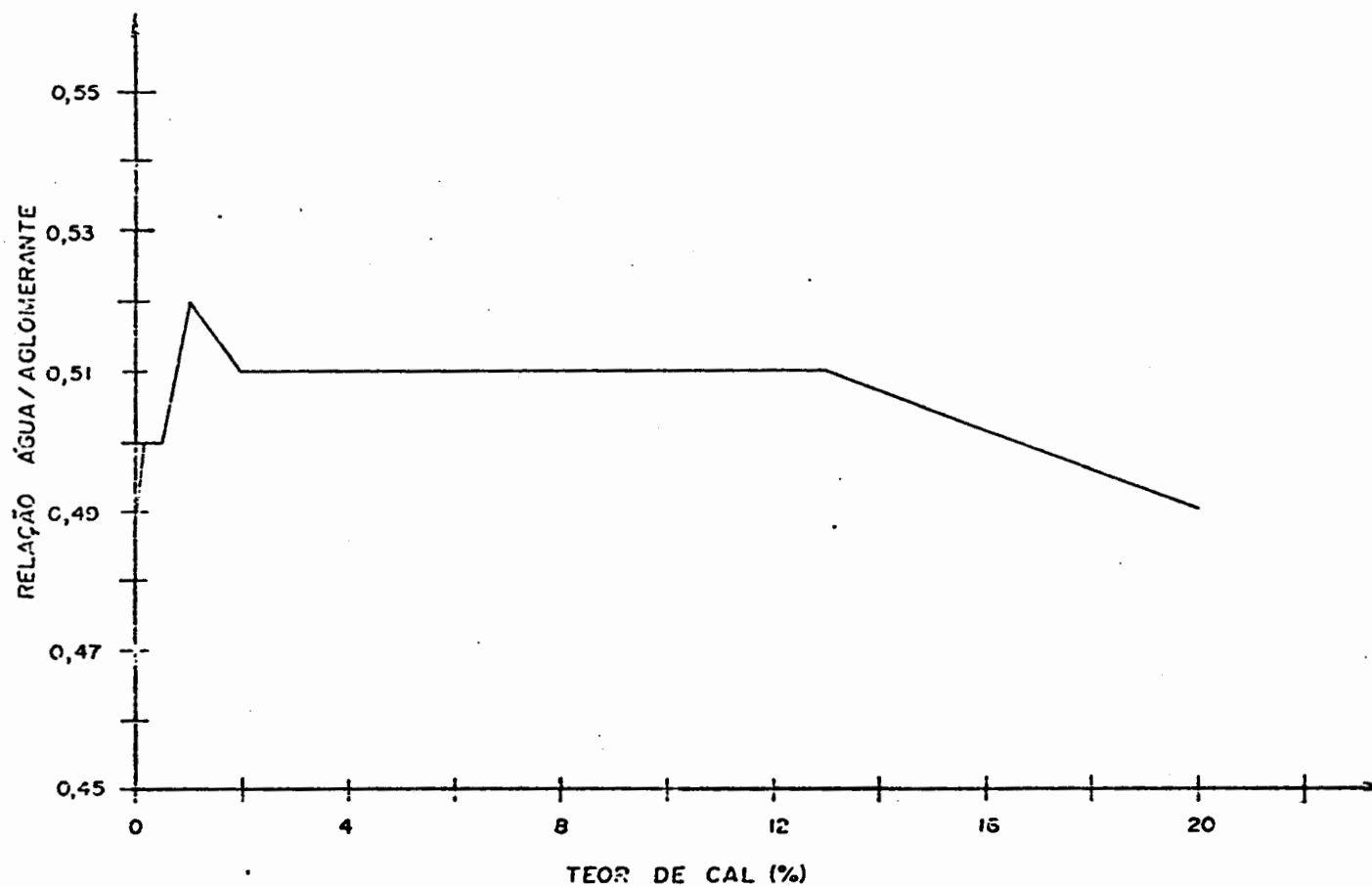


FIGURA 4 - Efeito da ativação da cal no teor de água para consistência normal da argamassa de escória.

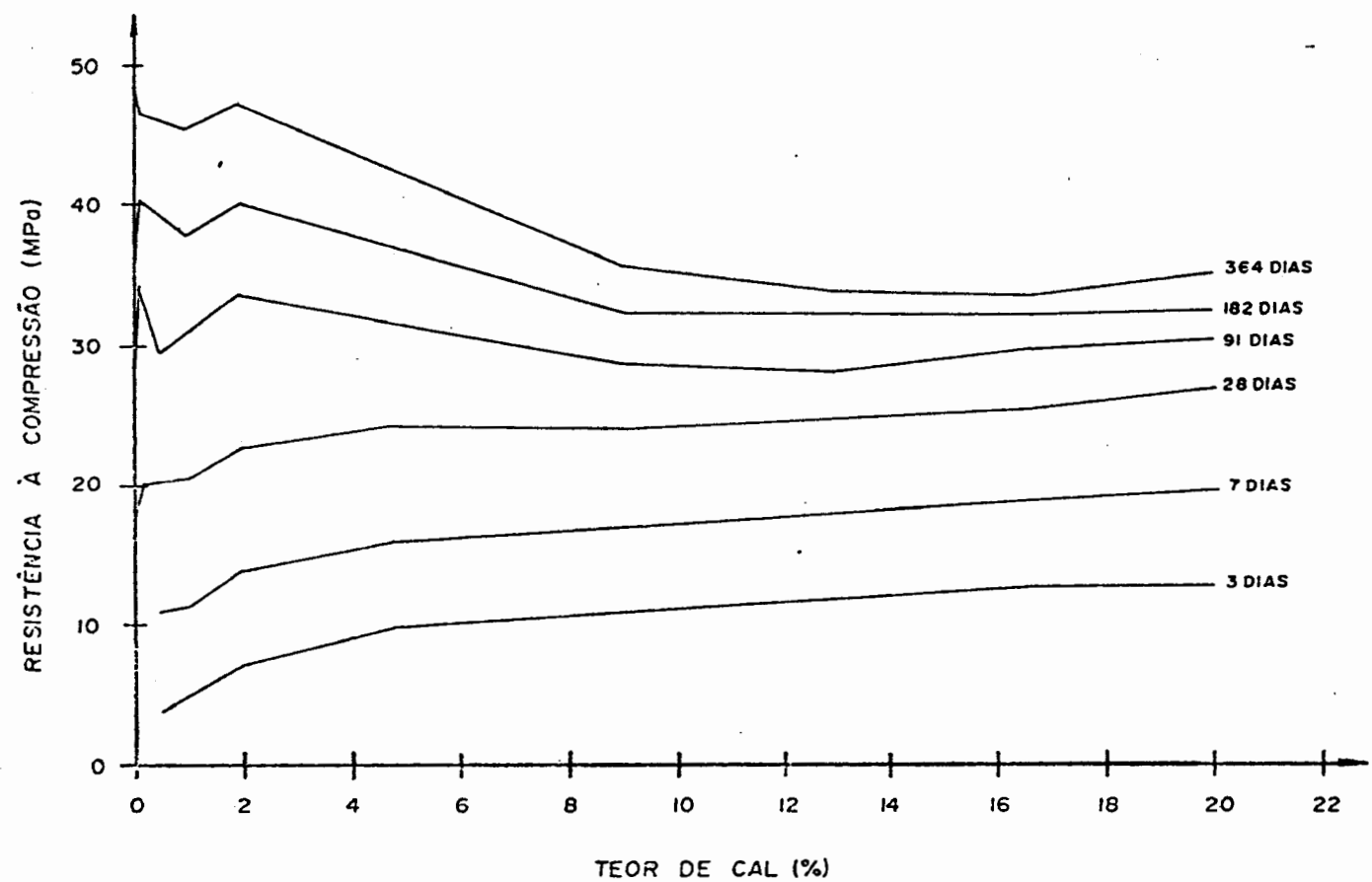


FIGURA 5 - Evolução da resistência à compressão de argamassas de escória-cal, em função do teor de cal.

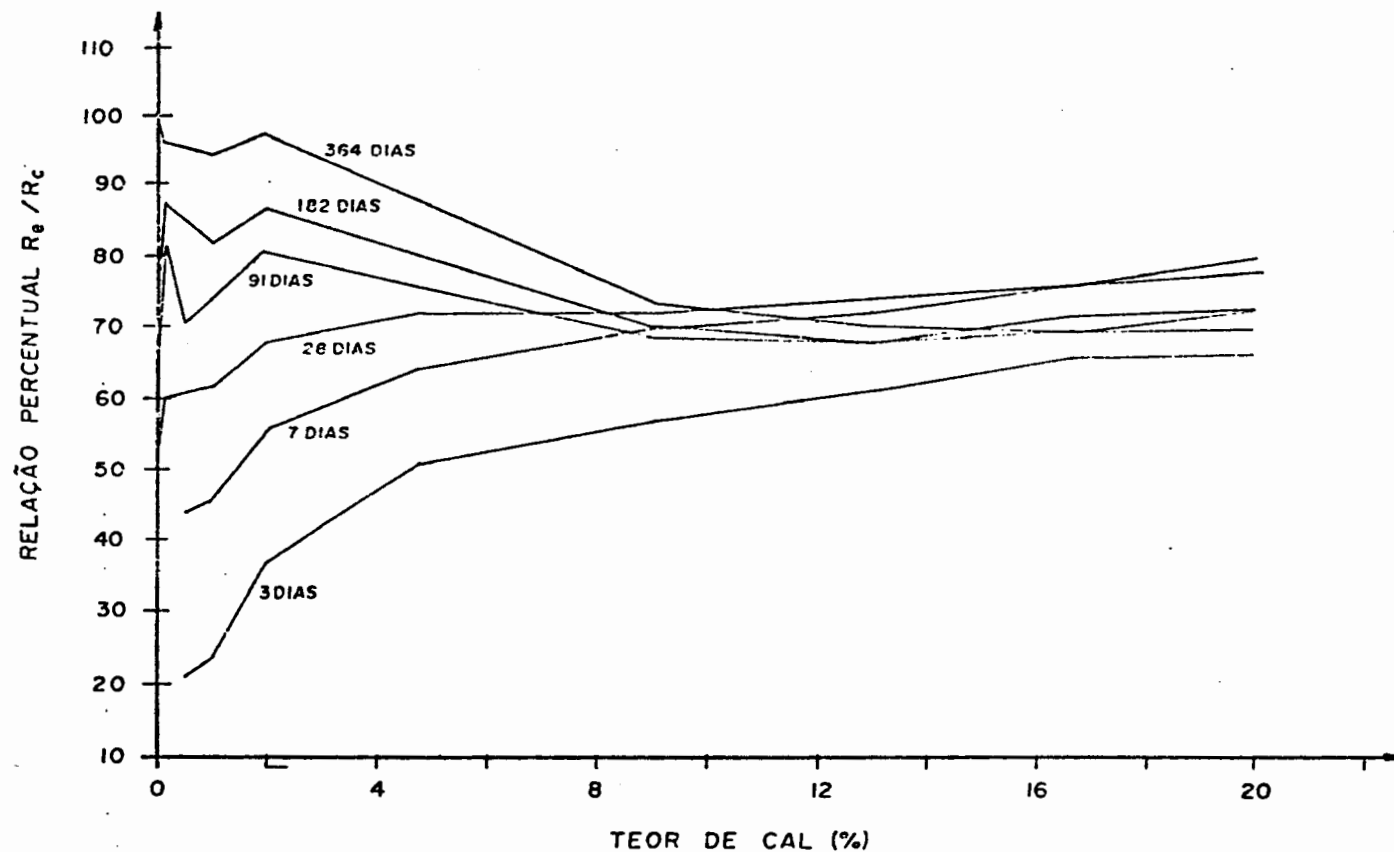


FIGURA 6 - Porcentual da resistência à compressão axial da argamassa de escória-cal (R_e) em relação ao cimento de referência (R_c) em função do teor de cal.

USE OF GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG IN CONCRETE IN CANADA--A REVIEW

V.M. Malhotra (*)

RESUME

This paper reviews the development and use of granulated blast-furnace slag in Canada. Reference is made to the slag production and its use as a separately-batched material in concrete. Data are presented on the mechanical properties and durability of concrete incorporating Canadian slags. The paper is concluded with relevant parts of a Canadian standard dealing with pelletized/granulated slags.

(*) Concrete Technology Section, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada.

ACI Honorary Member V.M. Malhotra is Head of the Concrete Technology Section, Canada Centre for Mineral and Energy, Technology (CANMET), Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Canada. He is a former member of the ACI Board of Direction, and has served on numerous ACI and ASTM committees. He is a prolific author, editor, and researcher, and has received many awards and honors from ACI and other institutions throughout the world.

1. INTRODUCTION

Historically, granulated blast-furnace slag has been in use in concrete in Europe for well 50 years. However, immediately after the Second World War, when portland cement was in short supply, the use of slag became more commonplace. This was particularly so in Germany and the Netherlands. Till recently, in Canada and the U.S.A. portland cement was relatively cheap, and there was no incentive for the ready-mixed concrete industry to use alternative cementing materials. The energy shortages of the 70's changed all this. The environmental concerns combined with high-energy costs, have forced cement companies to seek alternative cementing materials which can partially replace portland cement in concrete. Granulated blast-furnace slag is one such less energy-intensive material. This paper reviews the Canadian developments in the use of blast-furnace slags in concrete, and gives chemical and mineralogical properties of the Canadian slags. The properties of the fresh and hardened concrete incorporating the slags are discussed, and data are presented on the durability aspects of the slag concretes.

2. DEVELOPMENT OF PELLETIZED AND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAGS IN CANADA

The granulated blast-furnace slags for use in concrete were developed in Canada in the late 1960's. Emery et al (1) describe the earlier Canadian developments as follows:

"The slag pelletizer was developed by National Slag Limited in Hamilton as a positive means of bringing the very high gas emission levels typical of the "pit foaming" process under control. Pelletized slag is produced by expanding molten blast-furnace slag under water sprays, and then passing the flow of this pyroplastic material over a spinning drum on which fins are mounted that break it up, and fling the slag in the air for a sufficient time (and distance of approximately 15 metres) that surface tension forms pellets. From an air pollution viewpoint this process has two advantages. First, while previous expanding processes have been of the batch type, this is a continuous process so that gaseous emissions are effectively diluted by generation

over a long period of time. More importantly, the mass of pyroplastic foaming slag is dispersed into relatively small individual particles, which by immediate contact with air, cool the surfaces sufficiently quickly that further release of gases is terminated. Because of this rapid cooling, the pelletizer can be thought of as an "air granulator".

National Slag Limited now has licences of the process in many countries around the world including Australia, England, France, Japan, Sweden and the U.S.A. Fig. 1 shows a sketch of a pelletizer.

Currently, in Canada about 400,000 metric tons of slag is pelletized annually and separately ground for use as a cementing material by the St. Lawrence Cement Co., Lafarge Canada Inc. and St. Mary's Cement. The pelletizers are installed near Hamilton, Ontario where the major steel producers are located.

In 1984, as a result of the development work at the Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), Reiss Lime Company of Canada became interested in the possibility of producing ground, granulated blast-furnace slag in Sault Ste. Marie, northern Ontario, where the Algoma Steel Corporation is located. In mid-1985, construction began at two sites, the conventional water granulation plant situated at the No. 7 blast-furnace of the Algoma Steel Corporation Ltd., and the grinding plant located adjacent to the Reiss Lime production facility 150 km east of Sault Ste. Marie. The first load of ground, granulated slag was shipped in October 1986. The current annual production is about 150,000 metric tons.

3. CHARACTERIZATION OF CANADIAN SLAGS

The ground pelletized or granulated slag is off-white in colour, with a specific gravity of about 2.9. The mean particle size is about 10 μm , same as for normal portland cement.

The glass content of the slag is about 90 per cent. The predominantly glassy nature of the slag shows a broad band which extends from 20 to 40 deg. 2θ and is centred at approximately 32 deg. 2θ in the X-ray diffractograms (Fig. 2). Also, melilite has been identified as the minor crystalline phase.

The typical chemical analysis of the Canadian slags is given in Table 1. The magnesium content of one of the slags is very high i.e. about 18%. XRD analysis indicates that the magnesium is distributed between the melilite and the glass rather than being present in a more liberated form such as periclase (MgO). Therefore, the slag with a high magnesium content may be considered as a calcium magnesium aluminosilicate glass in which the magnesium is a glass modifying element with a similar function to calcium (2).

4. MIXTURE PROPORTIONS AND PROPERTIES OF FRESH CONCRETE INCORPORATING SLAG

4.1 Mixture Proportions

The proportions of ground granulated or ground pelletized blast-furnace slag* to be used in concrete depend upon the job requirements. In normal ready-mixed concrete operations, in which the primary aim is to conserve cement, the usual proportions vary from 25 to 50 per cent by weight of cement on a cement replacement basis. However, if the purpose is to enhance some aspect of concrete durability, e.g., sulphate resistance, then the slag content is at least 50% of the total cementitious material. As each slag has a unique chemical composition, glass content, and fineness, it is necessary to perform exploratory investigations with the cement, aggregates, and chemical admixtures to be used in each specific project.

The specific gravity of the Canadian slags ranges from 2.85 to 2.95, compared to 3.15 for portland cements. Thus, a given replacement of cement by slag on a weight basis results in higher volume of paste in a concrete mixture. This result is of little consequence at lower percentages of cement replacement. If, however, 50 to 75 per cent cement replacements is being considered, this will affect the rheology of the concrete mixtures.

4.2 Time of Setting

The incorporation of slag as a replacement for cement in concrete may result in somewhat increased setting time for concrete. In one CANMET study, at 25 per cent cement replacement there was no significant increase in the initial setting time whereas final setting time increase ranged from 16 to 101 min (3). At 50 per cent cement replacement, the increase in the initial setting time of the concretes ranged from 17 to 80 min., whereas the increases in the final setting time ranged from 93 to 192 min (3).

4.3 Bleeding

Few published data are available on the bleeding of slag concretes. Slags are generally ground to a higher fineness than normal portland cement and, therefore, a

*Granulated slag implies that the slag is granulated by rapid-water quenching of the molten slag, whereas pelletized slag implies that the granulation is achieved by a pelletizing process in air. Hereafter, these are referred to either as granulated or pelletized slag, or only as slag when reference is made to both types.

given mass of slag has a higher surface area than the corresponding mass of portland cement. As the bleeding of concrete is governed by the ratio of the surface area of solids to the volume of water, in all likelihood the bleeding of slag concrete will be lower than that of the corresponding control concrete. The slags now available in Canada have finenesses, as measured by the Blaine surface area method, greater than 1000 cm²/g compared with that of about 3000 cm²/g for portland cement. Thus, in concrete in which a given mass of portland cement is replaced by an equivalent mass of slag, bleeding should not be a problem.

4.4 Dosage of Chemical Admixtures

The dosage requirement of an air-entraining admixture to entrain a given volume of air in slag concrete increases with increasing amounts of slag. The increased demand for the admixture is, once again, probably due to the higher total surface area of the slag particles as compared with that of the portland cement particles. For example, in one CANMET investigation, the dosage of admixture needed to entrain about 5 per cent air increased from 177 mL/m³ for the control concrete to 562 mL/m³ for the concrete mixture incorporating 65 per cent pelletized slag (3). The water-to-(cement + slag) ratio was 0.30. At higher water-to-(cement + slag) ratios, the increase was not as marked as that at lower water-to-(cement + slag) ratios.

Limited investigations at CANMET have shown that superplasticizers (high-range water-reducing admixtures) are as effective in slag concrete as they are in normal portland cement concrete, in spite of different dosage requirements (3). In one investigation dealing with the pelletized slag, the dosage required for a melamine formaldehyde, sulphonated-type superplasticizer decreased from 1.3 per cent by weight of cementitious material for the control concrete to 1.0 per cent for the concrete mixture incorporating 65 per cent slag. This finding may or may not be true for concretes incorporating other types of slags, or superplasticizers, or both.

5. MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE INCORPORATING SLAG

5.1 Compressive Strength

The compressive strength development of slag concrete depends primarily upon the type, fineness, activity index, and the proportions of slag used in concrete mixtures. Other factors that affect the performance of slag in concrete are the water-to-cementitious materials ratio and the type of cement used. In general, the strength development of concrete incorporating slags is slow at one to five days compared with that of the control concrete. Between 7 and 28 days, the strength approaches that of the control concrete and beyond this period, the strength of slag concrete exceeds the strength of control concrete. The strength versus age relationships of concrete incorporating pelletized slag are shown in Fig. 3 and 4. The data presented in the figures indicate that, for the pelletized slag investigated, the compressive strength of

the slag concrete is lower than that of the control concrete, particularly at early ages, and this is markedly so for the concretes with low water-to-(cement + slag) ratios. Malhotra et al. reported investigations in which small amounts of condensed silica fume have been added to pelletized slag concrete to increase the early-age strength (3). Fig. 5 illustrates the strength development of concrete from 1 day to 180 days. The authors concluded:

- "The low early-age strength of portland cement concrete incorporating blast furnace slag can be increased by the incorporation of condensed silica fume. The gain in strength is, in general, directly proportional to the percentage of the fume used.
- At three days, the increase in strength is generally marginal especially for concrete with high $W/(C+BFS)$. However, at the age of 14 days and beyond, with minor exceptions, the loss in compressive strength of concrete, due to the incorporation of BFS, can be fully compensated for with a given percentage of condensed silica fume, regardless of the $W/(C+BFS)$. This is also true for the flexural strength.
- The continuing increase in strength at 56, 91 and 180 days of the concrete incorporating BFS and condensed silica fume indicates that sufficient lime (liberated during the hydration of portland cement) is present at these ages for cementitious reaction to continue."

5.2 Flexural Strength

In general, at seven days and beyond the flexural strength of concrete incorporating slag is comparable to, and in some instances greater than, the corresponding strength of plain portland cement concrete. Typical data are shown in Fig. 6.

5.3 Young's Modulus of Elasticity

Regardless of the water-to-cementitious ratio, the Young's modulus of elasticity of slag concrete is comparable to that of plain portland cement concrete (3). For example, in one investigation, for a water-to-(cement + slag) ratio of 0.55, when 50 per cent of cement was replaced by slag, the Young's modulus of elasticity for plain portland cement concrete and granulated slag concrete was 31.1 and 32.0 GPa, respectively (3).

5.4 Drying Shrinkage and Creep

There are few published data available on the drying shrinkage and creep of concrete incorporating Canadian slags. Furthermore, the available data from South Africa and Japan are conflicting because of the fineness of the slags used, methods of tests, age of testing, humidity conditions, and the stress-strength ratio employed (3). However, it is believed that like the fly ash concrete, the drying shrinkage and creep of slag concrete would be comparable or lower than that of the plain portland cement concrete because of the comparable or lower water requirement, and hence lower paste content.

6. DURABILITY OF CONCRETE INCORPORATING SLAG

The increased durability of portland cement concrete incorporating slag results primarily from a finer pore structure and reduced contents of easily leached calcium hydroxide in the hardened cement paste. Also, the dilution of the reactive C_3A component of the portland cement by the replacement of cement by slag contributes to increased resistance of slag concretes to sulphate attack. Some aspects of durability of slag concrete are discussed below.

6.1 Resistance to Repeated Cycles of Freezing and Thawing

Several research investigations at CANMET have shown that slag concrete has excellent resistance to repeated cycles of freezing and thawing when tested in accordance with ASTM Test C 666 Procedure A or B, with durability factors in excess of 90 (4,5). Test data from one such investigation are shown in Table 2.

6.2 Resistance to Sulphate Attack

Hooton (6) has published some data on the resistance of pelletized slag concrete to sulphate attack. He concluded as follow:

Concretes made with 45 and 72% slag replacement of portland cement are not exhibiting any deterioration after 10.5 years in 3000 mg/L SO_4 sulfate solutions, while those made only with portland cement, having C_3A contents ranging from 3.5 to 12.3% are all showing various degrees of damage.

Accelerated mortar bar tests, similar to the ASTM C1012 test procedure, have demonstrated that 50% slag replacement (with a low Al_2O_3 slag), regardless of cement C_3A content (up to 12.3%) is adequate to provide better performance (i.e. lower expansions and less visual damage) than a CSA Type 50 sulfate resistant portland cement with a C_3A of 3.1%.

It should be cautioned that the results of this study are based only on pelletized slags produced at Dofasco's blast furnaces in Hamilton, Ontario, and ground to a specific Blaine fineness, and should not be extrapolated to other sources of slag. It is recommended that each source of slag be tested by ASTM C 1012 in order to judge its sulfate resistance. Further, it is cautioned that regardless of cementing materials, the sulfate resistance of concrete is largely governed by proper concrete proportioning and practices.

6.3 Deicing Salt Scaling Resistance

The data on deicing salt scaling resistance of slag concretes are limited and inconclusive. The ASTM Standard C 672 which is used to evaluate the deicing salt scaling resistance has poor reproducibility, and is very subjective. Research investigations by CANMET and Ontario Ministry of Transportation (MTO) show that slag concretes perform poorly in the laboratory scaling test as compared with plain portland cement concrete (6,7). Notwithstanding the above, the field performance of slag concrete is satisfactory, and the MTO has allowed the use of up to 25 per cent slag replacement in concrete subjected to deicing salt scaling (6).

6.4 Resistance to Penetration of Chloride Ions

The slag concretes show considerably more resistance to the penetration of chloride ions than plain portland cement concrete (8). Data by Fernandez and Malhotra developed using chloride-ion permeability test (AASHTO T 277-83) are shown in Fig. 7. It is generally agreed that for concretes with very low permeability, the value of coulombs should be below 1000.

6.5 Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete

Research work has been sponsored by CANMET to evaluate the use of slag for controlling alkali-aggregate expansive reactions. Soles et al (9) have shown that for highly expansive alkali-carbonate reactive rock, expansions were greatly reduced when 50 per cent of high-alkali cement was replaced by slag.

6.6 Abrasion Resistance of Concrete

The data on the abrasion resistance of slag concrete are scarce. Exploratory studies at CANMET show that the abrasion resistance of slag concretes may be lower than that of plain portland cement concrete (8). However, in these studies, this was perhaps due to the lower compressive strength of the slag concrete as compared with that of the control concrete. Research should be undertaken to determine comparative data on the abrasion resistance of slag and plain portland cement concretes at equal strength levels.

6.7 Standards and Specifications

Canada and several other countries have published specifications and standards to cover the use of slags in concrete. Canadian standard CAN3-A23.5-M82, "Supplementary Cementing Materials and Their Use in Concrete Construction" is a performance oriented document, and parallels ASTM specification on the subject (10). Table 3 gives the essential clauses of the Canadian Standard. In addition to the above specifications, Canadian Standards Association has also published a Standard dealing with cementitious hydraulic slag (11). This specification was developed primarily to cover the use of a pelletized slag produced in southern Ontario.

7. CONCLUDING REMARKS

The Canadian slag industry has come of age, and slag is being used increasingly in concrete. Research is needed to develop more detailed data on creep, abrasion and long-term performance of slag concrete exposed to deicing salt scaling.

Research is also needed to obtain information on temperature rise in mass concrete when high-volumes of slag are used to replace portland cement.

8. REFERENCES

1. Emery, J.J., Cotsworth, R.P. and Hooton, R.D. "Pelletized Blast-Furnace Slag"; Proceedings, CANMET Seminar on Energy and Resources Conservation in the Cement and Concrete Industry, Paper No. 4.1, 1976.
2. Douglas, E., Wilson, H.S. and Malhotra, V.M. "Production and Evaluation of a New Source of Granulated Blast-Furnace Slag"; ASTM Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 10, No. 2, Winter 1988, pp. 75-87.
3. Malhotra, V.M. "Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Ground Granulated Blast-Furnace Slag"; Chapter 5 in CANMET Special Publication SP86-8E: Supplementary Cementing Materials, 1987, pp. 291-331.
4. Malhotra, V.M. "Strength and Durability Characteristics of Concrete Incorporating a Pelletized Blast-Furnace Slag"; ACI SP79, 1983, pp. 891-922. (Editor: V.M. Malhotra).
5. Malhotra, V.M. "Mechanical Properties and Freezing and Thawing Durability of Concrete Incorporating a Ground-Granulated Blast-Furnace Slag"; CANMET Int. Workshop on Granulated Blast-Furnace Slag in Concrete, Toronto, 1987, pp. 229-274.

6. Hooton, R.D. "Applications and Durability of Slag Cements in Concrete"; Proceedings, Int. Conf. on the use of fly Ash, Slag, Silica fume, and other Silicious Materials in Concrete, Leura, Australia, 1990.
7. Bilodeau, A., Carette, G.G., and Malhotra, V.M. "Resistance of Concrete Incorporating Granulated Blast-Furnace Slags to the Action of Deicing Salts"; CANMET-sponsored International Workshop on Granulated Blast-Furnace Slag in Concrete, Toronto, Canada, 1987, pp. 459-484.
8. Fernandez, L., and Malhotra, V.M. "Mechanical Properties, Abrasion Resistance, and Chloride Permeability of Concrete Incorporating Granulated Blast-Furnace Slag"; ASTM Cement, Concrete and Aggregates, Winter 1990, Vol. 12, No. 2, pp. 87-100.
9. Soles, J.A., Malhotra, V.M., and Chen, H. "CANMET Investigations of Supplementary Cementing Materials for Reducing Alkali-Aggregate Reactions: Part I--Granulated/Pelletized Blast-Furnace Slags"; ACI SP114, Vol. 2, 1989, pp. 1137-1657. (Editor: V.M. Malhotra).
10. CSA Standard CAN3-A362 M83, "Blended Hydraulic Cements", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1983.
11. CSA Standard A363-M 1983, "Cementitious Hydraulic Slag", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1983.

Table 1 - Typical Chemical Analysis of Canadian Slags

	Granulated, Sault Ste. Marie	Pelletized
	4600 cm ² /g	4200 cm ² /g
SiO ₂	38.35	38.8
Al ₂ O ₃	8.76	6.55
Fe ₂ O ₃	0.61	1.30
CaO	32.34	35.1
MgO	18.64	12.1
Na ₂ O	0.22	0.37
TiO ₂	0.36	0.30
K ₂ O	0.71	0.47
MnO	1.41	1.19
P ₂ O ₅	<0.01	0.02
BaO	0.03	---
SrO	0.05	0.04
ZrO ₂	0.01	---
LOI	-2.01	-0.84
SO ₃	2.36	3.30
Total	99.48	100.3

NOTE: LOI = loss on ignition

Table 2 - Summary of Test Results on Concrete Prisms after 300 cycles* of Freezing and Thawing

Mixture series	Mixture no.	$\frac{W}{C+S}$	Slag as replacement for cement, %	Air content in fresh concrete, %	Per cent change at the end of freeze-thaw cycling				Durability factor
					Weight	Length	Pulse velocity	Resonant frequency	
I	1	0.70	0	6.6	-1.47	-0.005	+0.42	-0.92	98
	2	0.70	25	6.0	-2.43	-0.014	-1.25	-2.34	95
	3	0.70	50	5.9	-1.85	-0.006	-2.22	-2.46	95
	4	0.70	75	6.1	-1.52	-0.001	+4.84	-2.70	95
II	5	0.55	0	6.0	-0.49	+0.004	-2.10	-0.61	99
	6	0.55	25	6.0	-0.61	+0.001	+1.06	-1.43	97
	7	0.55	50	6.2	-1.36	+0.012	+0.45	-1.85	96
	8	0.55	75	6.7	-0.62	-0.011	+0.42	-3.42	93

* Actual number of cycles of freezing and thawing at the termination of the test varied between 310 ± 10 .

Table 3 - CSA Standard CAN3-A23 5-M82*: Supplementary Cementing Materials and Their Use in Concrete

Chemical Requirements		
Property	Ground, granulated blast-furnace slag	Minimum frequency** of testing
SO ₃ , max., %	5.0	Lot of 1000 metric tons
Loss on Ignition, max., %	---	Lot of 100 metric tons

*From reference (11).

**When sufficient test data have been accumulated showing to the satisfaction of the owner that a source consistency complies with the requirements, the test frequencies may be reduced up to 10 times the stated value.

Supplementary Optional Chemical Requirements*

Property	Ground, granulated blast-furnace slag	Minimum frequency** of testing
Moisture content, max., %	3.0	Lot or 100 metric tons

*From reference (11).

**When sufficient test data have been accumulated showing to the satisfaction of the owner that a source consistently complies with the requirements, the test frequencies may be reduced up to 10 times the stated values.

cont'd...

Table 3 - CSA Standard CAN3-A23-M82: Supplementary Cementing
Materials and Their Use in Concrete (cont'd)

Physical Requirements

Property	Ground, granulated furnace slag	Minimum frequency** of testing
Slag Activity Index: with portland cement at 28 d, min. % of control	80	Lot of 1000 metric tons
Soundness: Autoclave expansion or contraction, max., %	0.5	Lot of 1000 metric tons
Fineness: when wet sieved on 45- μ m sieve max. % retained	20	Lot or 100 metric tons
Uniformity Requirements: The relative density and fineness of individual samples shall not vary from the average established by the 10 preceding samples, or by all preceding samples if fewer than 10, by more than: Relative Density max. variation, from average, %	5	
Percentage retained on the 45- μ m sieve, max. variation from average, percentage points+	5	

*When sufficient test data have been accumulated showing to the satisfaction of the owner that a source consistently complies with the requirements, the test frequencies may be reduced up to 10 times the stated value.

+If average is equal to 20%, then allowable variation = 15% to 25%.

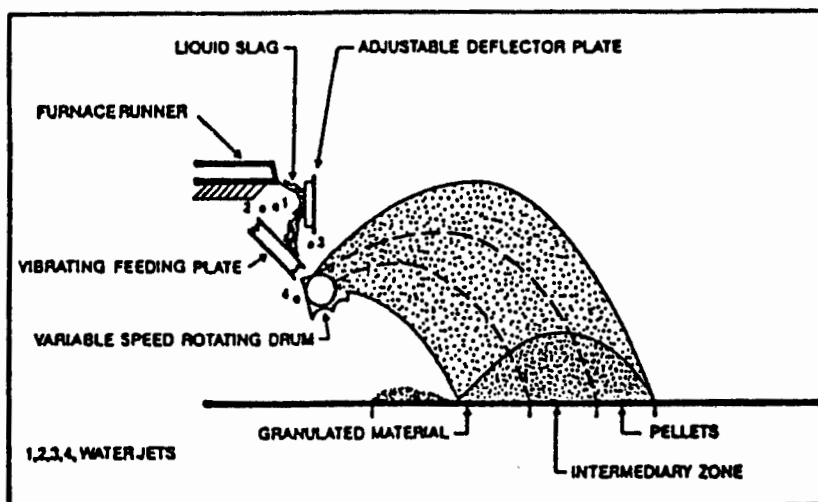


Fig. 1 - Sketch showing a pelletizer.

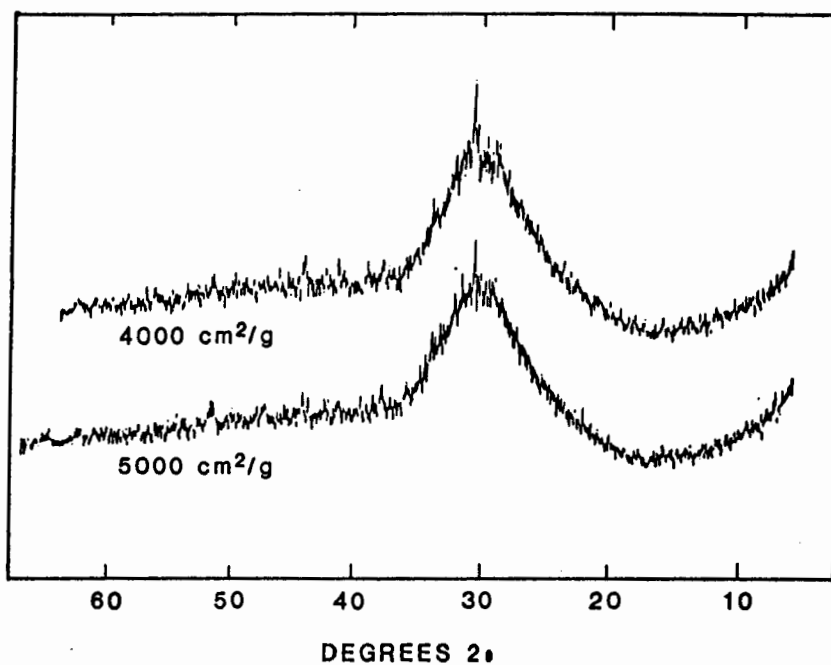


Fig. 2 - XRD traces (CuKα) for slags.
From reference (2).

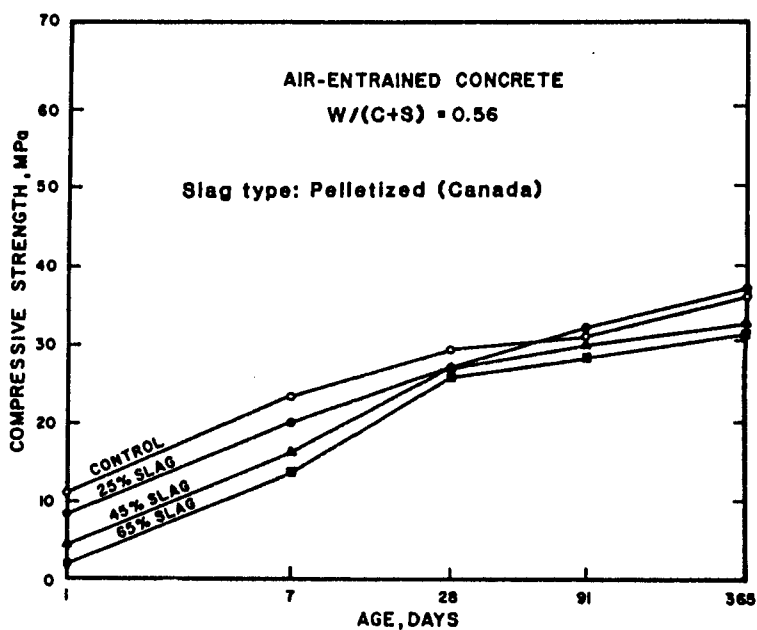


Fig. 3 - Age versus compressive strength relationship for air-entrained concrete: W/(C+S) = 0.56.
From reference (3).

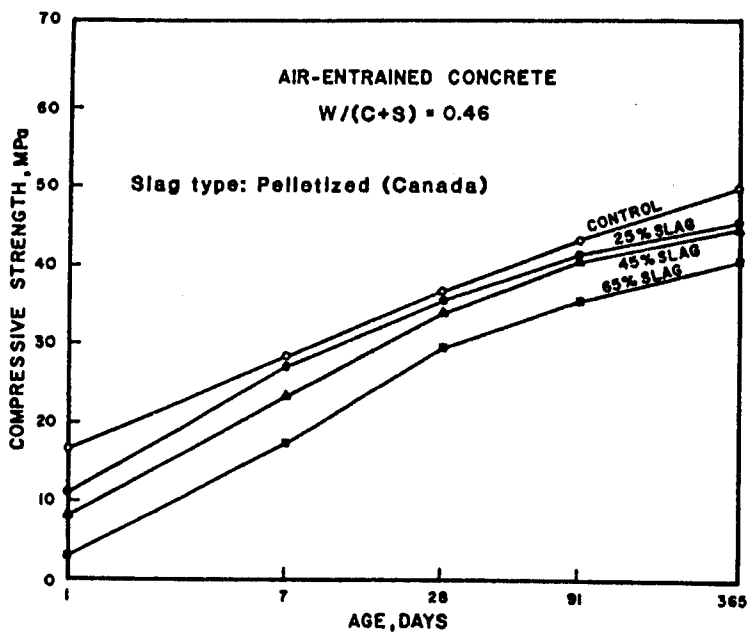


Fig. 4 - Age versus compressive strength relationship for air-entrained concrete: W/(C+S) = 0.46.
From reference (3).

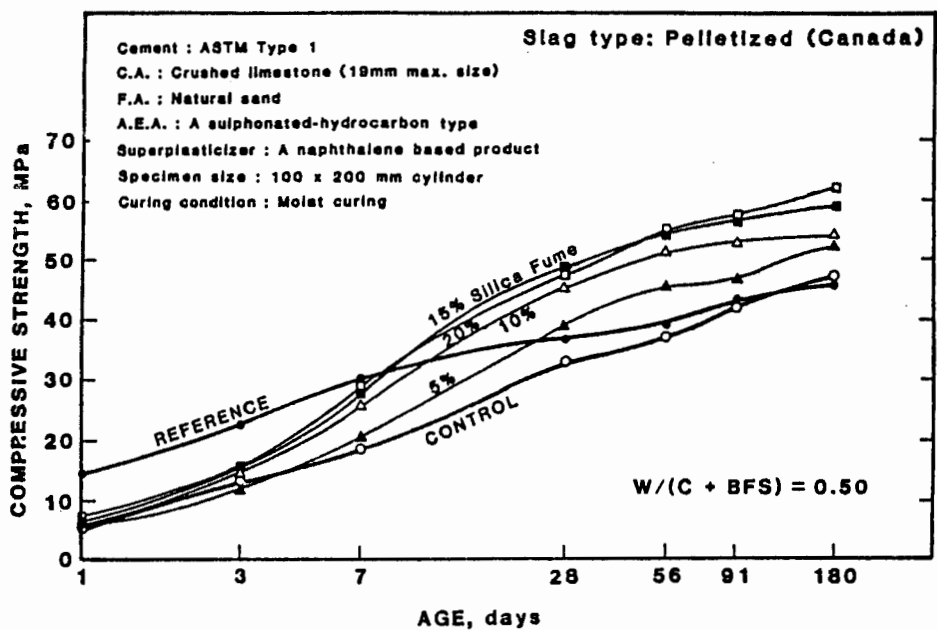


Fig. 5 - Age versus compressive strength relationship for concrete incorporating condensed silica fume and pelletized slag: $W/(C+BFS) = 0.50$.
 From reference (3).

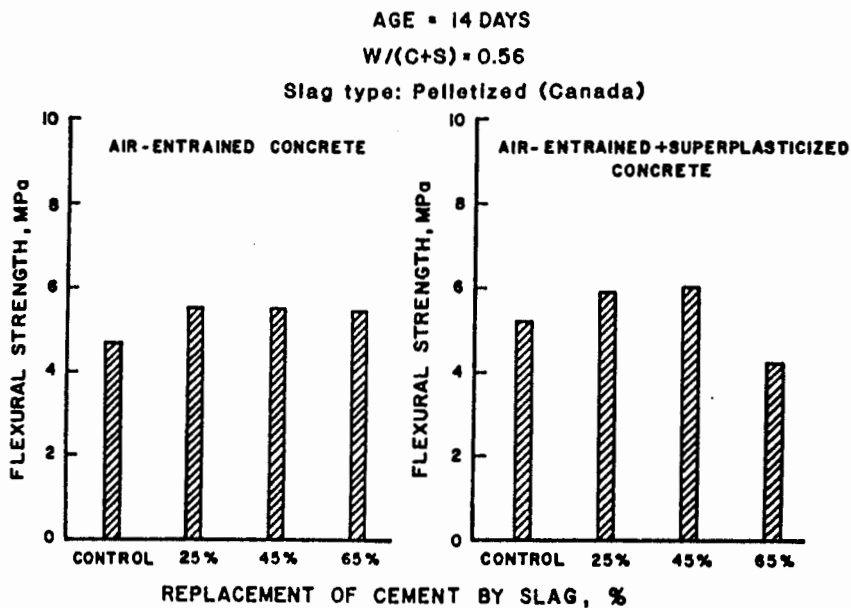


Fig. 6 - Flexural strength of air-entrained concrete at 14 days: $W/(C+S) = 0.56$.
 From reference 3.

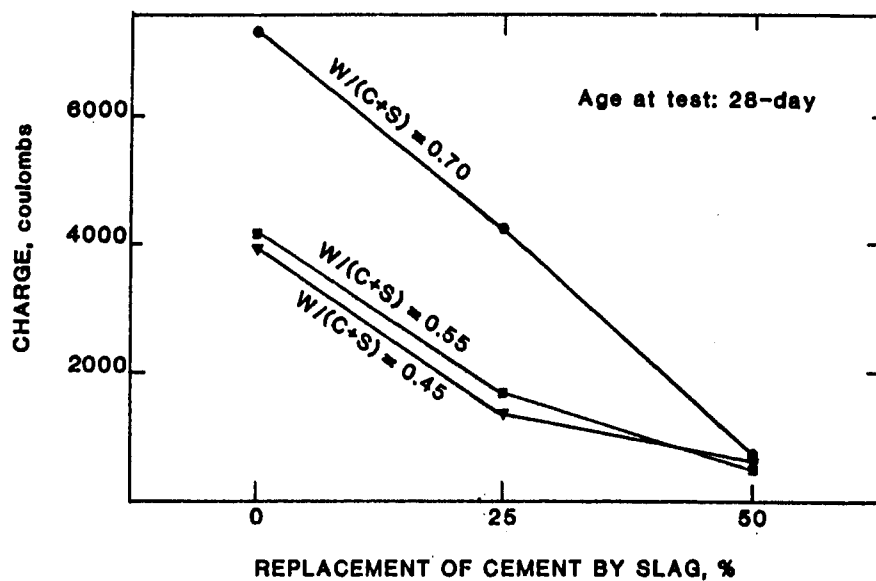


Fig. 7 - Values of coulombs as an indicator of chloride ion permeability of concrete.
From reference (8).

ALKALI ACTIVATED BLAST-FURNACE SLAG CONCRETES: PROPORTIONING AND PROPERTIES

E. Douglas, A. Bilodeau, and V.M. Malhotra (*)

RESUME

The purpose of this study was to formulate the proportioning of concrete mixtures made with ground granulated blast-furnace slag activated with sodium silicate, and to determine their properties. Six mixtures were made with a sodium silicate solution having silicate modulus of $M_s = 1.47$ and one mixture with a sodium silicate solution of $M_s = 1.22$. All the mixtures were air entrained. Properties of the fresh concrete as well as compressive and flexural strengths, and Young's modulus of elasticity of the hardened concrete at various ages were determined. The study shows that air content, volume of air-entraining admixture, slump and early-age compressive strength are affected by the sodium silicate-to-slag ratio. Compressive and flexural strengths of the concretes at 7 days and beyond are comparable or better than those of a portland cement concrete with equivalent water-to-cement ratio and workability.

(*) Concrete Technology Section, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada.

Esther Douglas is a research scientist, Concrete Technology Section, Mineral Sciences Laboratories, Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), Ottawa. She obtained a B.Sc. in Chemical Engineering from the University of Litoral, Argentina, and a Ph.D. from the Department of Civil Engineering and Applied Mechanics at McGill University. With CANMET since 1982, Dr. Douglas has been involved with studies on the utilization of ferrous and non-ferrous slags in mine backfill and in concrete as well as alkali-activation of blast-furnace slag and utilization of waste from fluidized bed combustion operations for concrete manufacturing.

A. Bilodeau is a concrete engineer with Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. His current research interests are in the areas of durability of concrete and in the use of supplementary cementing materials in concrete.

V.M. Malhotra is Head, Concrete Technology Section, CANMET, Department of Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa. He is a member of ACI Technical Activities Committee and a former Board of Directors member. He is a recipient of numerous awards from ACI and ASTM. In 1984, he was awarded an Honorary Degree of Doctor of Laws from the University of Dundee, Dundee, Scotland.

1. INTRODUCTION

The present environmental regulations related to disposal of wastes generated by mining, mineral and metallurgical processes have created an added interest in the use of those wastes in the construction industry to partially replace high energy consuming portland cement in concrete. The utilization of granulated blast-furnace slag at high replacement levels in concrete has been known in Europe for many years to obtain high sulphate resistance concretes. However, the level of replacement is limited by the relatively slow strength development of the slag. In slag concretes, strength development can be accelerated by the addition of alkali activators such as lime, sodium hydroxide, sodium carbonate, sodium silicate and, in general, salts of weak acids and strong bases, as shown by results of intensive research carried out in Europe, the USSR and the Scandinavian countries (1-4). These studies led to the conclusion that alkali activated slag concretes possess improved properties such as higher resistance to chemical attack than concrete made with normal portland cement (2,4).

The purpose of this study was to formulate the proportioning of concrete mixtures made with ground granulated blast-furnace slag activated with sodium silicate, and to determine their properties.

2. SCOPE OF INVESTIGATION

Based on results previously obtained, a sodium silicate solution was used in the concrete mixtures No. (5,6). Six mixtures were made with a solution having a silicate modulus $M_s = 1.47$, and one mixture was made with sodium silicate of $M_s = 1.22$. All the mixtures were air-entrained.

A total of seven 0.06 m³ concrete mixtures involving 12 batches were made. The water-to-binder ratio of the mixtures was 0.48 except for two mixtures, one with a w/b = 0.41 and one with a w/b = 0.49. A number of 152 x 305-mm cylinders were cast for testing in compression, and for determining the Young's modulus of elasticity. Test prisms, 76 x 102 x 390-mm in size, were also cast for determining the flexural strength after 14 days of moist curing.

3. CONCRETE MIXTURES

The concrete mixtures were made in the CANMET laboratories using the following materials:

3.1 Slag

A commercially available ground granulated blast-furnace slag was used in all the mixtures. The chemical composition, glass content and fineness of the slag are shown in Table 1.

3.2 Sodium Silicate

The sodium silicate solutions used in the concrete mixtures were prepared using sodium silicate having 29.73% SiO₂, 10.78% Na₂O and specific gravity and silicate modulus values of 1460 and 2.85 respectively. The sodium silicate solution of $M_s = 2.85$ and a 50% NaOH solution were used to obtain sodium silicate solutions of lower silicate modulus.

A sodium silicate solution of $M_s = 1.47$ containing 14.12% Na₂O and 20.20% SiO₂ was added to six of the concrete mixtures. A sodium silicate solution of $M_s = 1.22$ containing 16.41% Na₂O and 19.47% SiO₂ was added to concrete mixture No. 7.

3.3 Lime

Hydrated lime of commercial grade was used in all mixtures to control the setting. The lime was added as a slurry containing equal parts of hydrated lime and water.

3.4 Aggregates

Minus 19-mm crushed limestone was the coarse aggregate, and the fine aggregate was natural sand. To keep the grading uniform for each mixture, the sand was separated into different size fractions which were then combined to a specific grading. The grading and physical properties of both the fine and coarse aggregates are shown in Tables 2 and 3.

3.5 Air-Entraining Admixture (AEA)

A sulphonated hydrocarbon type air-entraining admixture was used in all the mixtures.

3.6 Mixture Proportioning

The proportioning of the concrete mixtures is summarized in Table 4. For the first mixture, the graded coarse and fine aggregates were weighed in the room dry condition. The coarse aggregate was then immersed in water for 24 h, the excess water was decanted and the water retained by the aggregate was determined by the weight difference. A predetermined amount of water was added to the fine aggregate which was then allowed to stand for 24 h. In this first mixture, it was observed that it was difficult to control the amount of water to be added for a given slump, therefore, dry aggregates were incorporated in the other six mixtures. In these mixtures, the aggregates, the slag, the lime slurry and the water were mixed for two minutes before adding the sodium silicate solution and the air-entraining agent. Six mixtures were made using a sodium silicate solution of $M_s = 1.48$, with sodium silicate-to-slag ratios ranging from 0.48 to 0.32, and a water-to-binder ratio constant at 0.48, except for mixture No. 6. The purpose of the reduction of the amount of sodium silicate added in mixtures No. 1 to 5 was to reduce the cost of the mixture, but it was also assumed that it would decrease the strength and the overall performance of the concrete. The water-to-binder ratio of mixture No. 6 was lowered to 0.41 while the sodium silicate-to-slag ratio was kept at 0.32 to produce a more cost effective mixture due to a possible improvement of the performance of the concrete. For the same purpose, a solution of sodium silicate of $M_s = 1.22$ was used in mixture No. 7 while using a high sodium silicate-to-slag ratio of 0.48. Two batches were made for all the mixtures, except for mixtures No. 6 and 7, in order to obtain sufficient test specimens for determining the compressive and flexural strengths.

The concretes were mixed in a laboratory counter-current mixer for a total of 6 min. All mixtures were air-entrained.

3.7 Properties of Fresh Concrete

The properties of the freshly mixed concrete, i.e., temperature, slump, unit weight and air content are shown in Table 5.

4. PREPARATION AND CASTING OF TEST SPECIMENS

Ten 152 x 305-mm cylinders were cast from batch A of each mixture to determine compressive strengths up to one year. In the present study, compressive strengths up to only 91 days are reported. Young's modulus of elasticity at 28 days were also determined.

Two 152 x 305-mm cylinders for 28-d compressive strength, and two 75 x 102 x 406-mm prisms for flexural strength at 14 days were cast from batch B of five of the mixtures. Both the cylinders and prisms were cast in two layers, each layer being compacted using an internal vibrator for the cylinders and a vibrating table for the prisms. After casting, all the moulded specimens were covered with water saturated burlap and left in the casting room at $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ for 24 h. The specimens were then demoulded and, after density measurements of the 152 x 305-mm cylinders of batch A, transferred to the moist curing room until required for testing.

5. TESTING OF SPECIMENS

All specimens for compression testing were capped with a sulphur and flint mixture before testing. The specimens for testing flexural strength were kept in a moist curing room for 14 days prior to testing.

6. TEST RESULTS

Mixture proportions are shown in Table 4, and properties of the fresh concretes are shown in Table 5. The densities of the cylinders at one day, compressive and flexural strengths and Young's modulus of elasticity are shown in Table 6.

7. DISCUSSION

7.1 Air Content and Dosage of Air-Entraining Admixture

The mixtures were proportioned to have an air content of 6.0 ± 1.0 percent, however this was not always achieved (Table 5). Some noticeable variations in air content can be seen between the two batches of the same mixture for similar dosages of air-entraining admixture. Nevertheless, the data show that it was relatively easy to entrain air in this type of concrete, the dosages being comparable to those of portland-cement mixtures or mixtures incorporating high percentage of slag as replacement for cement (7).

Data in Tables 4 and 5 show that the dosage of air-entraining admixture decreases with the reduction of the ratio of sodium silicate to slag when the water-to-binder ratio and the sodium silicate modulus are kept constant. In this case, the decrease might be related to the total amount of binder in the mixtures which also decreased with the reduction of the ratio of sodium silicate to slag.

7.2 Water Requirement and Slump

The total amount of water used for the determination of the water-to-binder ratio includes the water in the sodium silicate solution, the water in the lime slurry and the water added to the mixture. The total binder includes the slag, the solids in the sodium silicate solution and the lime in the lime slurry. The total amount of water in the mixtures varies from about 135 to 160 kg/m³ (Table 4). These amounts are noticeably lower than the approximate mixing water requirements for normal portland-cement concrete of similar slumps provided in ACI Manual of Concrete Practice (8). They are also in accordance with quantities of water used in concretes incorporating large amounts of slag as cement replacement, or even 100 percent slag (7). When the sodium silicate to slag ratio was reduced, less total water was needed to obtain a given slump (Table 4). Thus the ratio of sodium silicate to slag appears to be an important factor affecting the workability of the mixtures.

7.3 Compressive and Flexural Strengths

The compressive strengths range from 35.3 to 43.4 MPa at 28 days and from 42.3 to 51.6 MPa at 91 days. These levels of strength are high for concretes with water-to-binder ratio of 0.48 especially considering the relatively low amounts of binder of these mixtures.

For the mixtures with a water-to-binder ratio of 0.48, and made with a sodium silicate solution of modulus $M_s = 1.48$, the compressive strength at all ages was noticeably reduced when the sodium silicate-to-slag ratio decreased from 0.48 to 0.39, but did not seem to be influenced by further reduction of that ratio, the strengths of mixtures No. 3, 4 and 5 being very similar. It is possible that the difference in sodium silicate-to-slag ratio of these three mixtures was not large enough to make noticeable differences in compressive strength, or that the potential differences were masked by other factors like compaction or air content of the hardened concrete.

For mixtures with similar sodium silicate-to-slag ratio, the reduction of the water-to-binder ratio increased the compressive strength of the concrete at all ages. Mixture No. 6 with a water-to-binder ratio of 0.41 and a sodium silicate-to-slag ratio of 0.32 shows higher strengths than mixture No. 5 which had a higher water-to-binder ratio of 0.48, and a similar sodium silicate-to-slag ratio of 0.33. The difference is especially marked at one day.

The effect of reducing the modulus (M_s) of the sodium silicate solution can be seen by comparing mixtures No. 2 and 7. These had very similar water-to-binder ratios, and the same sodium silicate-to-slag ratio. Mixture No. 2 made with a solution of modulus $M_s = 1.48$ shows higher compressive strengths at all ages than mixture No. 7 which was made with a solution of $M_s = 1.22$.

The 14-day flexural strength of all the mixtures are in the same range, between 6.0 and 6.8 MPa, comparable to or higher than the values for the portland-cement concretes of the same water-to-binder ratio.

7.4 Young's Modulus of Elasticity

The values of the Young's modulus of elasticity of test cylinders range from 28.3 to 33.7 GPa at 28 days and from 30.9 to 34.8 GPa after 91 days of moist curing. These values, both at 28 and 91 days increased with the reduction of the sodium silicate-to-slag ratio of the concrete when the water-to-binder ratio was kept constant. This is not consistent with the compressive strength values obtained which decreased with the reduction of the sodium silicate-to-slag ratio in the concrete mixtures made with the same water-to-binder ratio. In addition, the 28-day Young's modulus of elasticity values are lower than the values calculated according to ACI Building Code 318 for mixtures with high sodium silicate-to-slag ratio (mixtures No. 1 and 2), but higher for mixtures with low sodium silicate-to-slag ratios (mixtures No. 3,4 and 5).

8. CONCLUSIONS

1. The sodium silicate-to-slag ratio is an important factor affecting the dosage of air-entraining admixture, water requirement and properties of the fresh and hardened concrete.
2. Independently of the sodium silicate-to-slag ratio and the silicate modulus of the solution used, compressive strengths at seven days and beyond are comparable to or higher than those of portland cement concrete with equivalent water-to-cement ratio and workability.
3. Compressive and flexural strengths of the concretes at 7 days and beyond are comparable or better than those of a portland cement concrete with equivalent water-to-cement ratio and workability.

9. REFERENCES

1. Voinovitch, J.A. and Dron, R. "Effect of various activators on the hydration of granulated slag"; *Silicates Industriels* 41:209-212; 1976.
2. Glukhovsky, V.D. et al. "High strength slag-alkali cements"; 7th International Congress on the Chemistry of Cement; V/164-168; Paris; 1980.
3. Glukhovsky, V.D., Krinenko, P.V., Rostovskaya, G.S., Timbovich, V.J. and Pankratov, V.L. U.S. Patent No. 4, 410, 365; 1983.
4. Talling, B. and Brandstetr, J. "Present state and future of alkali-activated slag concretes"; *Proceedings of the 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway; pp. 1519-1545, ACI SP-114, Vol. 2; V.M. Malhotra, Editor; 1989.

5. Douglas, E. and Brandstetr, J. "A preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast-furnace slag"; Cement and Concrete Research; Vol. 20, pp. 746-756; 1990.
6. Douglas, E., Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. "Alkali activated ground granulated blast-furnace slag concrete: preliminary investigation"; MSL Division Report 90-14; pp. 11; 1990.
7. Malhotra, V.M. "Mechanical properties and freezing and thawing durability of concrete incorporating ground granulated blast-furnace slag"; Can. J. Civ. Eng., Vol. 16, pp. 140-156; 1989.
8. American Concrete Institute, "ACI Manual of Concrete Practice, Part 1", 1989.

**Table 1 - Physical Properties and Chemical Analysis
of the Granulated Blast-Furnace Slag**

Description of Test	Slag
<u>Fineness</u>	
Passing, 45 μm	97
Surface area, Blaine, m^2/kg	460
<u>Chemical analysis</u>	
SiO_2	38.00
Al_2O_3	8.74
Fe_2O_3	0.55
CaO	32.00
MgO	18.60*
SO_3	2.45
K_2O	0.76
Na_2O	0.22
Loss on ignition	1.98
Glass content	90.3
Compressive strength (MPa) of mortars (ASTM C 989)	
7 days	18.7
28 days	31.4
Slag activity index, % (ASTM C 989)	
7 days	69.8
28 days	100.0

*No periclase detected by x-ray diffraction analysis.

Mg O assumed to be in the form of a calcium-magnesium aluminosilicate glass.

Table 2 - Grading of Aggregates

Coarse Aggregate		Fine Aggregate		
Sieve Size	Cumulative Percentage Retained	Sieve Size	Cumulative Percentage Retained	
			Mix 1, 2 and 3	Mix 4 and 5
19.0 mm	0.0	4.75 mm (No. 4)	0.0	0.0
12.7 mm	35.0	2.36 mm (No. 8)	10.0	8.5
9.5 mm	60.0	1.18 mm (No. 16)	32.5	28.0
4.75 mm	100.0	600 μ m (No. 30)	57.5	49.5
		300 μ m (No. 50)	80.0	68.5
		150 μ m (No. 100)	94.0	80.5
		pan	100.0	100.0

Table 3 - Physical Properties of Aggregates

	Coarse Aggregate*	Fine Aggregate*
Specific Gravity	2.69	2.70
Absorption, %	0.82	1.1

*Crushed limestone

**Natural sand

Table 4 - Mixture Proportions of Slag Concrete

Mix No.	Batch	W/B	Added Water kg/m ³	Slag kg/m ³	Na-Sil. Solution*		Lime Slurry** kg/m ³	Total Water ⁺ kg/m ³	Coarse Agg., kg/m ³	Fine Agg., kg/m ³	AEA mL/m ³
					Na-Sil./Slag	kg/m ³					
1	A	0.48	58	264	0.48	127	30	157	1052	827	285
	B	0.48	56	259	0.48	124	30	153	1029	809	280
2	A	0.48	58	269	0.48	129	24	155	1073	843	290
	B	0.48	57	262	0.48	125	23	152	1044	821	285
3	A	0.48	71	269	0.39	106	23	153	1044	820	190
	B	0.48	69	269	0.39	104	23	150	1026	807	170
4	A	0.48	71	255	0.38	96	17	143	1067	839	135
	B	0.48	68	249	0.37	93	17	138	1039	816	140
5	A	0.48	75	246	0.33	81	14	135	1065	838	110
	B	0.48	75	246	0.33	81	14	135	1065	838	110
6	A	0.41	71	308	0.32	99	18	145	1064	772	190
7	A	0.49	63	252	0.48	120	21	151	1057	832	180

*M_s = 1.48 for all mixtures except #7 where M_s = 1.22

**Lime slurry = 50% lime + 50% water

⁺Total water includes added water, water in sodium silicate solution and water in lime slurry

Table 5 - Properties of Fresh Concrete

Mix No.	Batch	W/B*	Na-Sil./Slag	Slump, mm	Unit Weight, kg/m ³	Air, %	Temp., °C
1	A	0.48	0.48	30	2360	4.5	23
	B	0.48	0.48	100	2305	6.2	21
2	A	0.48	0.48	20	2395	3.6	22
	B	0.48	0.48	40	2330	5.2	21
3	A	0.48	0.39	180	2330	4.9	24
	B	0.48	0.39	205	2295	7.3	23
4	A	0.48	0.38	150	2345	5.1	22
	B	0.48	0.37	150	2280	7.2	23
5	A	0.48	0.33	150	2320	5.8	23
	B	0.48	0.33	150	2320	5.7	23
6	A	0.41	0.32	120	2330	6.0	27
7	A	0.49	0.48	75	2345	4.9	27

*Water-to-binder ratio

Table 6 - Densities, Compressive and Flexural Strengths, and Modulus of Elasticity of Concrete

Mix No.	Batch	W/B	Na-Sil./Slag	Compressive Strength, MPa				Flexural Strength, MPa	Modulus of Elasticity, GPa		Densities of Cylinders,* kg/m ³
				1d	7d	28d	91d	14d	28d	91d	
1	A	0.48	0.48	27.9	35.3	42.4	46.3	-	30.2	31.1	2375
	B	0.48	0.48	-	-	39.8	-	6.1	-	-	2360
2	A	0.48	0.48	26.9	39.2	43.4	51.6	-	29.7	31.2	2395
	B	0.48	0.48	-	-	41.7	-	6.8	-	-	2390
3	A	0.48	0.39	18.9	30.9	36.2	42.3	-	30.7	32.3	2410
	B	0.48	0.39	-	-	34.6	-	6.0	-	-	2385
4	A	0.48	0.38	12.9	33.2	39.2	44.3	-	32.1	33.5	2410
	B	0.48	0.37	-	-	37.7	-	6.5	-	-	2385
5	A	0.48	0.33	17.1	32.4	39.0	43.9	-	33.7	34.8	2425
	B	0.48	0.33	-	-	37.6	-	6.5	-	-	2420
6	A	0.41	0.32	27.8	38.9	41.2	48.4	6.8	29.4	32.1	2405
7	A	0.49	0.48	23.9	30.0	35.3	43.4	6.0	28.3	30.9	2405

*At one day

PRODUCCION DE CEMENTOS CON ESCORIAS
DE ALTOS HORNOS

Aníbal Avendaño Cruz (*)

RESUMEN

El siguiente es un resumen de la experiencia de la Fábrica de Cemento Paz del Río en la producción de cementos con escoria de Alto Horno y tiene el propósito de contribuir al esclarecimiento de las moliendas con escoria en circuito cerrado, al mejoramiento de la productividad y disminución de costos manteniendo como norma la producción de una excelente calidad acorde con los requerimientos del mercado.

(*) Acerías Paz del Río S. A. Fábrica de Cemento CPR, Belencito, Boyacá, COLOMBIA.

Aníbal Avendaño Cruz, Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Bogotá, Colombia.
Magister en Administración, Universidad de los Andes, Bogotá.
Curso sobre Tecnología del cemento de Holderbank, Bogotá.
Director de Producción, Fábrica de Cemento CPR.

INTRODUCCION

Acerías Paz del Río S. A. desde hace más de tres décadas, ha sido uno de los pilares de desarrollo del país y del departamento de Boyacá, por su aporte a la industria de la construcción y a las demás industrias.

Acerías Paz del Río es la única siderúrgica integrada del país, su proceso se inicia desde la explotación de las materias primas en las minas, pasando posteriormente por los procesos de coquería, alto horno, calcinación, laminación y otros, hasta la obtención del producto final. Dentro de este proceso se generan varios subproductos, siendo uno de ellos la escoria.

Conocedores de la problemática de la construcción y de las dificultades causadas al país por la falta de oferta de cemento, se realizaron los estudios para la construcción de una fábrica de cemento, aprovechando que Acerías contaba con todas las materias primas, incluyendo la escoria.

El montaje de la Fábrica se inició con el aporte tecnológico de la firma KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, quien suministró los diseños, los equipos y el montaje.

La operación de la planta es completamente sistematizada, lo cual la convierte en una de las fábricas más modernas del país.

La puesta en marcha fué en 1981, para suplir el déficit de cemento en la región central del país, especialmente en Bogotá, de la cual dista la planta 220 kms en dirección noroeste.

INSTALACION DE GRANULACION DE ESCORIA

OBJETO

La instalación tiene capacidad para granular 1000 t/día de escoria del alto horno, evacuar la escoria granulada y filtrar el agua de granulación para su posterior recirculación.

DATOS BASICOS

Número de coladas por día	7
Duración de la colada	30 minutos

Cantidad de escoria por colada	130 t
Caudal de escoria	Variable de 5 a 7 t/min
Temperatura de la escoria líquida	1400 - 1480oC
Composición química de la escoria	Cao 41-44.8% Al2O3 16.8 - 19.7% Mgo 1.1 - 1.5% SiO2 33.1 - 36.5 %
Peso específico de la escoria seca	1.06 t/m3
Consumo específico de agua	10 m3/t
Consumo máximo de agua por colada	1500 m3
Caudal de agua de granulación	3000 m3/h
Presión del agua de granulación	1.5 a 2 bar
Temperatura del agua de granul.	30 a 40 oC
Humedad de la escoria después de un escurrimiento de 20 min.	15% - 18%

DESCRIPCION DE LA INSTALACION DE GRANULACION

La instalación de granulación de escoria comprende esencialmente:

- sistemas de inyectores de agua
- un foso doble de granulación con fondo filtrante
- un puente-grúa para la evacuación de la escoria del foso
- un conjunto de transportadores y silo para el manejo y despacho de la escoria.

Foso doble de granulación

El foso de granulación está dividido en dos estanques iguales. El estanque tiene las dimensiones siguientes:

Longitud	15 m
Ancho,	12 m
Volumen útil	683 m3
Superficie útil	180 m2

El estanque además tiene una tubería de rebose y una salida de vaciado con válvula manual. Los estanques divididos en células de filtración, en número de 8. Cada célula tiene 12 m de longitud y 3.5 m de ancho y constituye un lecho filtrante formado por piedras de granulometría creciente de arriba abajo. El agua filtrada es recogida por una red de tuberías en el fondo del lecho filtrante y evacuada por un colector con válvula electromecánica.

Puente grúa de evacuación de la escoria

Los muros del foso hacen parte de la estructura que soporta la

via de rodadura del puente grúa que evacúa la escoria granulada echándola en una tolva suspendida del puente y que se mueve con él.

Las características del puente son las siguientes:

Luz	17 m
Fuerza de levantamiento	7.5 t
Capacidad horaria	100 t
Altura de levantamiento	8 m

Comando automático con posibilidad manual.

Funcionamiento del foso de granulación

La escoria granulada cae con el agua dentro de los estanques, alternativa o simultáneamente. Las válvulas de agua normalmente abiertas y las válvulas de vaciado están cerradas.

El comando del sistema de lavado se realiza a partir de la sala de control central por medio de un pulsador para cada estanque. Los dos estanques se lavan alternadamente.

SECADO DE ESCORIA

Una de las materias primas para la producción del cemento Paz de Río, es la escoria proveniente del Alto Horno.

Transporte de escoria húmeda

La escoria húmeda proveniente de la planta de granulación del alto horno, se trae en volquetas a la Fábrica donde se recibe en una tolva que tiene un volumen de 50 m³. Debajo de esta tolva está un alimentador de banda que tiene una capacidad de 200 ton/hr.

El material que sale de este alimentador lo transporta a una banda, que tiene una capacidad de 200 ton/hr. Sobre esta banda se encuentra un separador magnético, cuyo fin es retirar las partículas metálicas grandes que vengan con la escoria y el arrabio que llega mezclado.

La escoria después de pasar por este separador pasa a la tolva del apilador, que apila el material en semicírculo. La capacidad del patio de apilado es de 12000 m³.

El material se transporta del patio a una banda que tiene una capacidad de 120 ton/hr. El material se descarga en una tolva que tiene una capacidad de 35 m³. Esta tolva tiene un indicador con alarmas cuando se presenta nivel alto o bajo.

En la parte inferior de la tolva se encuentra un alimentador de mesa, que es el encargado de dosificar la escoria húmeda al secador, dicho alimentador tiene una capacidad de 15 a 75 ton/hr.

Secador de Escoria

Para secar la escoria, se tiene un secador rápido tipo HAZEMAG que tiene una capacidad de 50 ton/hr.

El secador consiste en una cámara de sección elíptica construida en acero y con estanco al aire. En la parte inferior se tienen dos rotores provistos con paletas de proyección. Los rotores tienen una potencia de 130 kw.

Los rotores dispersan la escoria húmeda en el seno de la corriente de aire caliente. De este modo queda expuesta a la acción del aire caliente una gran superficie de la escoria, con lo que se genera un intercambio de calor bastante rápido. El giro de los rotores también sirve para llevar la escoria con determinada velocidad hacia la salida del secador. Los gases se transportan mediante el tiraje que efectúa un ventilador. Este ventilador tiene una capacidad de 1600 m³/min. El movimiento de los gases y la escoria se efectúa en paralelo.

En la entrada de la escoria húmeda y la salida de escoria seca, existen válvulas de compuerta que trabajan como sellos para el aire caliente, evitan que éste se escape del secador en casos de sobrepresión e impiden la entrada de aire falso.

Para producir el gas caliente se tiene un generador; en condiciones normales este generador funciona con carbón pulverizado, que se envía desde las tolvas de carbón pulverizado por medio de una bomba kynion.

Los gases de salida con polvo de escoria pasan por el colector de polvos, donde la escoria que se recupera cae sobre la banda que descarga la escoria seca que salió del secador. Los gases limpios que son succionados por el ventilador exhalador, ya mencionado anteriormente, se descargan a la atmósfera por una chimenea.

Por el peligro que existe de que se quemen las lonas del colector de polvos, cuando la temperatura de los gases de salida supera los 1100°C, existen dos compuertas de emergencia, para aliviar la temperatura de los gases.

La primera se encuentra en el ducto de conducción, entre el generador de aire caliente y el secador, por medio de ella se pueden evacuar gases calientes del generador a través de una chimenea, para que no pasen por el secador.

La segunda está situada a la salida de los gases del secador y permite la entrada de aire frío del ambiente al colector de polvos.

Generador de aire caliente. Este generador posee las siguientes características:

- capacidad = 11×10 kcal/h
- dimensiones = 2.8×11 m de longitud
- ventilador de aire primario o de combustión con una capacidad de 600 m³/min y una presión de 250 mm H₂O.
- ventilador de aire secundario o de dilución con una capacidad de 700 m³/min y una presión de 100 mm H₂O.
- cuando se emplea carbón la temperatura de salida del generador debe estar entre 900 y 1.000 °C.
- bombeo de ACPM desde un tanque. La capacidad de bombeo es de 1900 kg/hr de ACPM.

Cuando se va a efectuar el encendido del generador, éste inicialmente se realiza con gas propano y la chispa se genera eléctricamente. Una vez se comprueba que existe llama se le inyecta al generador ACPM y la cantidad de combustible se va incrementando paulatinamente hasta que la temperatura de salida del generador alcance los 700 °C.

Cuando se alcanza esta temperatura se mantiene la misma por unos 5 o 10 minutos; pasado este lapso de tiempo se empieza a inyectar carbón pulverizado lentamente, si la llama permanece se sigue incrementando la cantidad de carbón quemado, a la vez que se va disminuyendo el consumo de ACPM. Se tiene que llegar a la condición de consumir aproximadamente 0.9 ton/hr de carbón sin ACPM.

La presión de salida del generador se controla mediante el tiraje del ventilador exhalador.

La temperatura de salida del generador se controla por la cantidad de aire secundario admitido al generador.

Transporte de escoria seca

La escoria que sale del secador y del colector se transporta por medio de una banda que tiene una capacidad de 70 ton/hr.

Esta banda posee un pesómetro para medir la rata de flujo de la escoria seca, éste tiene un rango de 15 a 75 ton/hr.

La escoria que descarga de la banda pasa al separador de arrabio. Este separador se instaló porque se hace necesario separar el arrabio de la escoria seca porque los molinos tienen tabiques que con la presencia del arrabio se "obstruyen"; además el arrabio se acumula en el bolsillo de salida del molino y su paso a través del circuito desgasta el equipo, en especial las lonas de los aerodeslizadores.

El contenido de arrabio antes del separador magnético es del 2.5 al 3.0% y a la salida es del 1.0 y el 1.5%, dependiendo de la humedad de la escoria.

La función del circuito de secado de escoria es quitarle la humedad a la escoria hasta un valor no superior al 2%; a su vez se aprovecha el secado para poder eliminar el arrabio que contiene la escoria que es de un valor del 3% aproximadamente; arrabio que no se podría separar si no se seca la escoria, hasta un determinado porcentaje menor al 5% de humedad.

Características generales del sistema original

Capacidad del secador	50 ton/hr
Humedad de la escoria a la entrada	10 - 15%
Humedad de la escoria a la salida	1%
Temp. gas a la entrada del secador	900 - 1000 oC
Temp. gas a la salida del secador	110 oC
Temp. de la escoria a la entrada	20 oC
Temp. de la escoria a la salida	85 oC
Flujo del gas del generador a 800 oC	41667 Nm ³ /hr
Capacidad normal del generador	9.03 x 10 ⁶ kcal/hr
Capacidad máxima del generador	11 x 10 ⁶ kcal/hr
Capacidad calórica del ACPM	10.500 kcal/kg
Capacidad calórica del carbón	7.000 kcal/kg
Capacidad de inyección de carbón	1.5 ton/hr

MOLIENDA DE CEMENTO

El cemento es el producto fino de moler conjuntamente la escoria, el clinker y el yeso. Los objetivos en resistencias a 1, 3, 7 y 28 días (R1, R3, R7 y R28) varían según la clase de cemento a fabricar, ya que la planta produce principalmente, cemento Portland Tipo I, Cemento Portland Tipo III, Cementos Siderúrgicos y Cementos Especiales para fabricación de tejas, tubos, tanques, etc., según los requerimientos de los clientes.

La planta cuenta con dos rutas en paralelo que son completamente independientes, las cuales tienen por diseño una capacidad de producción de 50 t/h cada una a 3300 Blaine, para el 50% de escoria.

1. RECUPERACION DE MATERIAS PRIMAS EN EL CEMENTO

El clinker es recuperado de un patio de almacenamiento con capacidad de 30.000 toneladas a una tolva que tiene dos rutas de extracción una para el circuito 1 y la otra para el circuito 2.

La escoria es recuperada por vibradores o por una tolva de un patio de almacenamiento y llevada a una tolva de almacenamiento similar a la de clinker.

El yeso es recuperado del patio de almacenamiento de yeso triturado y llevado hasta una tolva.

Existe una tolva con posibilidad de extraer por las dos rutas, que puede ser llenada con clinker, escoria u otro aditivo que se pueda dosificar en la molienda.

2. DOSIFICACION

Los materiales son descargados de las tolvas por cuatro dosificadoras, las cuales funcionan con celdas de carga. Las dosificaciones son controladas por el Laboratorio por medio de un espectrómetro de rayos X para mantener los porcentajes de las diferentes materias primas de acuerdo al cemento a producir.

3. MOLIENDA Y SEPARACION

El proceso de molienda es en circuito cerrado, controlando la operación por granulometría y por Blaine. Estos dos parámetros se varían dependiendo del producto que se quiere obtener.

El consumo de potencia de cada molino es de 2.300 kw, y con 15.8 RPM.

Tal como se puede apreciar en el diagrama del sector, el material es alimentado a un molino de dos cámaras.

El diámetro efectivo interno es de 3.625 mm, con una longitud efectiva de 3.250 mm para la cámara 1, lo cual da un volumen interno de 33.54 m³. Esta cámara cuenta con placas levantadoras.

En la segunda cámara el diámetro interno efectivo es de 3.635 mm, una longitud efectiva de 8.250 mm para un volumen interno de 85.62 m³. Esta cámara tiene placas clasificadoras que permiten una buena distribución de los cuerpos molidores.

La siguiente es la carga de cuerpos molidores con la cual se está trabajando.

Cámara 1

Diámetro mm	Ton.	%
90	4	8.5
80	14	29.8
70	17	36.2
60	12	25.5
	--	
Total	47	

Cámara 2

Diámetro mm	Ton.	%
50	11	8.40
40	7	5.34
30	18	13.74
25	26	19.85
20	25	19.08
17	44	33.59

Total	131	

El material que sale del molino es transportado por un aerodeslizador a un elevador de cangilones que a su vez lo envía por un aerodeslizador al separador de aire. El material llega a un plato distribuidor, el cual le comunica la fuerza centrífuga para que las partículas lleguen a la zona de separación. Las partículas gruesas retornan al molino y las partículas finas son transportadas por aire a uno de los 8 ciclones del separador, de donde son descargadas a un aerodeslizador.

El separador tiene una capacidad nominal de 50 t/h y maneja un rango de revoluciones entre 0 y 150 RPM, consta de 8 ciclones, un plato distribuidor, un plato clasificador que puede tener un máximo de 40 aletas y un ducto de descarga de gruesos.

Para controlar y manejar la separación de partículas en el separador se tiene un ventilador de circulación, el cual maneja mayor o menor cantidad de aire dependiendo de la condición de operación.

El producto fino del separador es enviado a la tolva de un transportador neumático o bomba neumática, en donde el material es fluidificado para enviarlo a los silos de cemento.

La planta cuenta con 4 silos de concreto con una capacidad de 3000 toneladas cada uno y 2 silos metálicos con capacidad de 500 toneladas cada uno. De los silos de concreto se puede extraer cemento para empacarlo en sacos o enviarlo a granel. Los silos metálicos solo se utilizan para despacho a granel.

CALIDAD DEL CLINKER

CRUDO

Conscientes de la importancia de tener un buen clinker para lograr obtener un cemento de alta calidad, en especial cuando se realizan adiciones en un porcentaje significativo de la mezcla, la fábrica ha puesto especial atención a la producción y control del clinker.

Nuestra calidad del clinker está relacionada con la calidad y el control físico y químico de la harina cruda. El control de la materia prima se realiza por medio de un analizador de Rayos X que permite una reducción en la variación de la composición química para permitir una condición de marcha estable en el horno.

El análisis de una harina standard utilizada en el proceso es el siguiente.

CaO	43.66%
SiO ₂	12.93%
Al ₂ O ₃	3.315
Fe ₂ O ₃	1.97%
K	105.91
MS	2.45
A/F.	1.68

La granulometría del crudo producido presenta un valor que gira en torno al 14% sobre malla 90 micrones.

Los anteriores porcentajes están calculados para compensar las variaciones de composición por la adición de las cenizas del carbón de combustión.

CARBON

El carbón utilizado proviene de los ricos yacimientos de la región, contiene un máximo de cenizas del 15%, la materia volátil es del 35%, tiene un poder calorífico entre 6500 y 7000 kcal/kg.

La composición química promedio de las cenizas es la siguiente:

SiO ₂	64.32%
Al ₂ O ₃	25.31%
Fe ₂ O ₃	5.12%
CaO	2.10%
S	1.08%
Otros	1.77%

El carbón es finamente molido hasta obtener una finura promedio del 15% sobre malla 90 micrones.

CLINKER

Las resistencias iniciales del cemento con escoria, están directamente relacionadas con la calidad del clinker, en especial con el mayor porcentaje de C₃S contenido en él.

La operación del horno para obtener valores altos de C₃S es más difícil y necesita un gran control para evitar

sobrecalentamientos o enfriamientos bruscos, con el consecuente aumento de la cal libre. En la fábrica los efectos por cal libre son mínimos ya que por el contrario en los ensayos de autoclave se presentó contracción de los cementos con escoria.

El enfriamiento del clinker es brusco para evitar el desdoblamiento del B-C2S.

Una composición típica del clinker producido en la fábrica es la siguiente:

	%
CaO	66.18
SiO ₂	20.64%
Al ₂ O ₃	5.25%
Fe ₂ O ₃	3.30%

Total S

como SO ₃	0.72
Mn ₂ O ₃	0.04
P ₂ O ₅	0.30
TiO ₂	0.34
MgO	0.90
K ₂ O	0.95
Na ₂ O	0.10
F	0.07
Cl	0.003
F ₂ O	<0.01
Cal libre	0.80

La composición potencial del clinker es:

LSF	0.98
SR	2.41
A/F	1.59
C ₃ S	70.47
C ₂ S	6.01
C ₃ A	8.33
C ₄ AF	10.04
PL	0.25
FQ	25.06

Los resultados de microscopia han demostrado que el clinker es fuertemente quemado estimando que el promedio del tamaño de los cristales de alita es de 35 micrones. El nivel de quemado permite una buena distribución de las cenizas del carbón y los cristales de belita se dispersan entre cristales de alita.

La íntima mezcla de las fases de aluminado y ferrita indican que el clinker experimenta un enfriamiento rápido.

TAMAÑO DEL CLINKER

La granulometría del clinker después de pasar por el rompedor del enfriador es la siguiente:

Malla mm	% pasante acumulado
1.18	1.29
2.36	2.79
4.75	10.30
9.50	30.76
12.70	46.27
19.0	69.31
25	84.78
37.5	95.61
>37.5	100.00

ESCORIA COMO ADICION

Entre las adiciones activas figuran las escorias básicas granuladas de Alto Horno, con propiedades latentes o potenciales, las cuales son activadas por álcalis y sulfatos.

La escoria como el clinker manifiesta su potencial hidráulico, por el hecho que al amasarse con agua, fraguan y endurecen por si mismos.

La escoria al ser un producto de alto horno contiene una serie de compuestos silico-aluminosos, melilitas y otros. La composición química de la escoria de la fábrica es muy estable, predominando la cal, la sílice, la alúmina, que forman compuestos como la alita y la belita, principales constituyentes del clinker.

En cuanto al vidrio se quiere que las escorias contengan un máximo posible de él, por lo menos 90%, ya que para una misma composición química, una escoria es potencialmente más hidráulica cuanto mayor sea su proporción de fase amorfa, frente a la fase cristalina.

Un alto contenido de fase vítrea en la escoria, implica que la escoria ha sido enfriada bruscamente, generalmente por agua a la salida del alto horno, para evitar la cristalización por un enfriamiento lento. La escoria utilizada en la fábrica cumple con todos los requerimientos anotados anteriormente por lo cual es de gran actividad.

Por el hecho de ser necesaria la activación de la escoria para desarrollar resistencias es fundamental o preciso molerla finamente para compensar la resistencia inicial comparada con el clinker.

Esto conlleva como en el caso de la Fábrica a moler más fino con bajo rechazo y alto blaine.

El hecho de moler tan fino 17% bajo $3\ \mu$ implica perder potencial para desarrollar más resistencias ya que las partículas extrafinas se hidratan tan rápido que no permiten formar ligaduras estables, por lo cual estas partículas se comportan como elementos inertes.

En general siempre se quiere que la escoria sea fina para que desarrolle su actividad hidráulica, esto puede llevar a sobremoler el clinker, porque la activación está basada en la cal de hidrólisis, debiendo presentar una gran superficie para la acción de la fase líquida sobre ella. El clinker debe ser más grueso para permitir que la cal de hidrólisis generada sea captada en forma gradual por la escoria y así aprovechar toda su potencialidad.

MOLTURABILIDAD DE LA ESCORIA

Según análisis de Laboratorio la escoria utilizada en la Fábrica de Cemento tiene las siguientes características granulométricas:

Malla	% retenido acumulado	% pasante acumulado
8	9.8	90.2
10	24.7	75.3
14	42.2	57.8
20	61.7	38.3
28	77.6	22.4
35	85.8	14.2
48	90.4	9.6
65	93.2	6.8
100	94.7	5.3
150	95.6	4.4
200	96.6	3.4
325	98.0	2.0

La escoria tiene una gravedad específica de 1.06 y los ensayos de molturación realizados en el Laboratorio, dieron un índice de work = 16.9 = W_i .

Esta escoria fué molida separadamente en el laboratorio. El Bond Work Index de este material de 16.9 es muy similar al clinker. De acuerdo con lo anterior los requerimientos de capacidad del motor del molino para un circuito cerrado a diferentes niveles de finura serían los siguientes, según Fuller Company.

Blaine	3.200	3.500	3.800
Kwh/ton	36.5	41.5	47.0

El análisis químico para una escoria típica utilizada en la fábrica es:

SiO ₂	35.26%
Al ₂ O ₃	18.26
Fe ₂ O ₃	1.69
CaO	44.29
MgO	1.42
K ₂ O	0.41
Na ₂ O	0.13
SO ₃	2.08
LOI	-0.86

PRODUCCION DE CEMENTO CON ESCORIA EN CPR

Durante la historia de la Fábrica se ha querido obtener un cemento de óptima calidad tanto física como químicamente, adicionando la mayor cantidad posible de escoria porque sabemos de la buena calidad del clinker producido y de la escoria utilizada.

Por lo anterior durante los nueve años de existencia de la fábrica se han estado efectuando ensayos para variar nuestras condiciones de operación, adicionando escoria en diferentes proporciones, u otros aditivos teniendo como meta mantener nuestra calidad, disminuyendo los costos operativos que se pueden ver afectados no solo por las variaciones de consumo de energía, sino también por la disponibilidad de equipo para producir el volumen requerido por el mercado.

ASPECTOS GENERALES DE LA OPERACION

Manejo del separador

Durante los primeros ocho años de la planta, a pesar que en calidad de experimento se variaba el número de aletas del separador, siempre se mantuvo el concepto de trabajar con 40 aletas para permitir una mejor resistencia del producto ya que de esta forma se podía mantener una Blaine más alto con un rechazo bajo.

Este concepto se revalidó en 1990 por lo cual nos fijamos como objetivo el trabajar con mayor rechazo pensando que las resistencias no desmejorarían ya que al estar moliendo tan fino perdíamos parte de desarrollo de resistencias por la parte extrafina.

Lo anterior trajo como consecuencia que disminuyéramos el número de aletas inicialmente a 36 y luego a 32 ya que según los ensayos industriales realizados anteriormente, ésto nos permitía trabajar dentro del rango de rechazo esperado que era del 8% sobre 40μ.

Ventilador de circulación del separador

La importancia para la eficiencia de separación que tiene la aireación del separador nos llevó a efectuar ensayos para operar el circuito suministrando el mayor volumen de aire posible hasta donde lo permitían los motores de los ventiladores.

Al iniciar la operación de la planta una de las formas de obtener el blaine y las finuras deseadas era cerrando o abriendo la compuerta del ventilador para regular el flujo de aire. Posteriormente hemos visto que obtenemos una mayor estabilidad en los parámetros de operación si mantenemos al máximo el flujo de aire del separador.

Molino

La operación del molino se ha mantenido estable, continuando con el sistema de placas levantadoras en la primera cámara y placas autoclasificantes en la segunda cámara. De otra parte, salvo problemas con la consecución rápida de cuerpos moledores, hemos trabajado con una carga de bolas similar a la que teníamos inicialmente para las dos cámaras.

La ventilación del molino se realiza al máximo permitido por el sistema de colección de polvo.

Elevador de cangilones

Durante la operación siempre se ha tratado de mantener una recirculación entre el 200 y 300%, de acuerdo a la producción y a la capacidad de los elevadores. Se presentan modificaciones en los valores de recirculación cuando producimos cementos de alto rechazo, donde la molienda trabaja casi en circuito abierto a pesar de la buena producción de los molinos.

CALIDAD DEL CEMENTO

La composición química de los cementos producidos varía de acuerdo al porcentaje de escoria y a la calidad del clinker adicionados.

El siguiente es el análisis químico de dos cementos producidos en la Fábrica:

	Muestra 1	Muestra 2
	%	%
SiO ₂	25.9	24.84
Al ₂ O ₃	8.3	9.32
Fe ₂ O ₃	2.3	2.70

Mn203	0.12	-
P205	0.25	-
Ti02	0.37	-
CaO	56.80	55.91
MgO	1.1	1.25
SO3	2.1	1.72
K2O	0.75	0.59
Na2O	0.11	0.16
R.I	1.10	1.20
LOI	2.00	2.40
Cal libre	0.30	0.80

En la muestra No.2 se observa un aumento del residuo insoluble por la baja en calidad del yeso adicionando respecto a la muestra No. 1.

GRANULOMETRIA DEL CEMENTO CPR

De acuerdo al análisis efectuado por Magotteaux de una muestra de cemento de los molinos 1 y 2, el 27 de septiembre de 1982 se obtuvieron los siguientes resultados:

% pasante	molino 1	molino 2
1 micrón	6.4	5.5
2	11.4	9.3
4	22.8	18.1
8	37	30.4
16	58.4	52.3
32	88.3	86.4
64	100	100
100	100	100
Blaine	3.708	3.109
% Escoria	30%	30%

El 22 de julio de 1989 se tomaron otras muestras que fueron analizadas pr Magotteaux las cuales dieron los siguientes resultados:

mall de % pasante en mall de	molino 1	molino 2
1 micrón	6.7	6.6
2	12.0	11.6
4	22.4	21.8
8	36.2	35.6
16	57.6	56.6
32	88.3	86.9
64	98.9	99.1
100	99.8	99.9
Blaine	3.926	3.737
% escoria	37.28	38.27

Como se puede apreciar la granulometría actual de los molinos 1 y 2 (ver gráficos 1 y 2) es muy similar a la obtenida en 1982 a pesar del incremento en el% de escoria utilizado. Se puede observar que el porcentaje menor de 3 μ es alto con un 17% y el mayor a 30 μ es de 16% cifra relativamente baja. Siendo el comportamiento muy similar en las dos fechas.

De estas cifras se puede observar que estábamos moliendo muy fino, pero podemos decir también que el hecho de haber aumentado el porcentaje de escoria no implica un aumento en los extrafinos, ni un aumento en las partículas mayores de 30 μ . El hecho de tener variaciones tan pequeñas en la granulometría para una variación sensible en el porcentaje de escoria, en el rango comprendido de 30% a 38% y apesar de trabajar con un blaine más alto en la segunda muestra, nos demuestran que para nuestra planta no se presentan diferencias sustanciales en el comportamiento de dureza de la escoria y el clinker, para este rango de mezcla, por lo cual el clinker no se remuele tanto ni aumenta el porcentaje de los extrafinos al aumentar al porcentaje de escoria.

MOLIENDA SEPARADA DE ESCORIA Y CLINKER

Con relación a la molienda de solo escoria se puede decir que la capacidad de molienda es buena con 40 t/hr para un rechazo de tan solo el 3 al 3.5% sobre 40 μ . Esto indica que los resultados de molienda serian mejores si se tuviera un cargue de bolas adecuado, para el tamaño de entrada de la escoria al molino. Es decir sería preciso cambiar la carga de cuerpos moledores y variar la longitud de las cámaras.

El control del circuito es fácil y responde a las variaciones de ventilación y velocidad del separador, de tal manera que cuando se aumenta el volumen de aire en el separador y se bajan las revoluciones del separador se obtienen fácilmente rechazos del 15 y 18 sobre 40 μ .

Con relación al ensayo con solo clinker y yeso, podemos decir que el resultado no es tan bueno como se esperaba puesto que la capacidad de molienda cuando ya se estabilizó el molino fué de tan solo 52.8 ton/hr para un rechazo de 6% sobre 40 μ . Es presumible que la capacidad de molienda aumente ostensiblemente cuando se aumente el rechazo. Como en el caso de la escoria sería necesario efectuar alguna reclasificación de cuerpos moledores aunque sería solamente en el volumen de cada tipo de cuerpo molidor.

CEMENTO SIDERURGICO

Caracterización 1

Con el propósito de determinar las propiedades del cemento siderúrgico y proceder a su posterior comercialización se

realizó un ensayo a escala industrial de cemento siderúrgico, con las siguientes características:

1. Características de operación

kw/ton	50
capacidad t/hr	43.96
3 aletas	40

2. Características físicas

Blaine (cm ² /gr)	4161
Rechazo 40	2.34
Estabilidad	-0.020
Fraguado inicial	3:23
Fraguado final	4:36
R1 (kg/cm ²)	46
R3 "	114
R7 "	192
R28 "	322

3. Análisis químico %

MgO	1.54
SO ₃	1.73
R.I.	0.74
Escoria	69.79
Na ₂ O	-
K ₂ O	0.45
Cal libre	-
Densidad	2.95

Como resultado de los ajustes del circuito para mantener el Blaine, la alimentación del molino disminuyó de 48.65 ton/hr a 44 más o menos 1 ton/hr; el porcentaje de recirculación al molino aumentó de 207% a un rango de 230-240%. El Blaine fue alto y descendió desde 4998 hasta 4223 en promedio.

Para este ensayo el circuito se manejó en automático es decir controlando la alimentación con la variación de la potencia del elevador de cangilones.

Caracterización 2

1. Características de operación

kw/ton	49.85
ton/hr	42.12
# aletas	36

2. Características físicas

Blaine (cm ² /gr)	3629.1
Rechazo 40	3.7
Estabilidad	-0.033 mm
Fraguado inicial	3:38
Fraguado final	4:50
R1 (kg/cm ²)	41

R3	"	89
R7	"	169
R28	"	280

3. Análisis químico

MgO	1.33%
SO3	1.58%
R.I.	0.15%
Escoria	70.29%

Como diferencia sustancial con el ensayo de caracterización No. 1 estuvo el trabajo del separador con 36 aletas en posición completamente afuera. De otra parte el objetivo de Blaine fué inferior en 600 puntos respecto al ensayo anterior. El rechazo sobre 40 μ fué un poco más alto ya que el anterior fué 2.34% y este último 3.7%

En este segundo ensayo la potencia del molino fué un poco más baja como resultado de una menor carga de cuerpos moledores en la cámara 1 del molino, esta diferencia de 98 kw explica el por qué a pesar de haberse trabajado a un blaine más bajo se tuvo una menor productividad.

Aspectos Generales

La experiencia obtenida para la molienda de cemento siderúrgico nos ha mostrado la necesidad de alimentar la escoria con una humedad menor del 1% para evitar atascamientos en especial en la segunda cámara, en años anteriores se habían presentado limitantes en la productividad de los molinos por la baja capacidad de los elevadores que no permitían un un aumento de la recirculación, éstos se han cambiado a unos de doble capacidad que permitirán efectuar variaciones en el volumen de material alimentado al separador.

El cemento siderúrgico producido en la Fábrica presenta una mayor facilidad de manejo en el circuito de molienda, comparado con el cemento normal, disminuyendo la frecuencia de atascamientos de los aerodeslizadores y de los colectores de polvo. El único inconveniente en el circuito es el incremento de arrabio acumulado en el circuito, el cual termina evacuado con el mismo cemento cuando alcanza la granulometría efectiva para ser separado de los gruesos.

A nivel industrial la capacidad de producción para un cemento con 70% de escoria es de 43 ton/hr con un consumo de energía de 50 kw/ton. Estos valores son susceptibles de mejorar ostensiblemente si hubiera continuidad en la fabricación de este tipo de cemento, ya que por la baja demanda de este producto, las producciones son a escala muy baja, lo cual no permite una estabilidad del proceso, ni permite variar en

manera significativa los parámetros de operación y las condiciones de equipo.

El comportamiento del crecimiento de las resistencias comparado con el cemento Tipo I producido en la Fábrica, muestra como entre 1 a 3 días, hay un incremento de solo 57 kgs mucho menor que el del tipo I, pero por el contrario el incremento en las resistencias entre 3 y 7 días es mayor en el cemento siderúrgico con 85 kgs contra 62 en el cemento normal; el incremento entre 7 a 28 días es muy similar con 121 kg para el siderúrgico y 137 para el normal.

De acuerdo a los resultados industriales, la resistencia del cemento siderúrgico es muy sensible a las variaciones de granulometría, de tal manera que para el mismo porcentaje de escoria el de menor rechazo sobre 40 μ presenta las mejores resistencias, registrando además un mayor incremento entre 1 y 3 días.

En los ensayos de autoclave el cemento siderúrgico presenta contracción por lo cual la estabilidad nos da un valor negativo de -0.02 a -0.03, esto a pesar de el C3S alto contenido en el clinker, factor importante para la utilización de este cemento en obras de gran magnitud y altos consumos de cemento.

Con relación al fraguado éstos son mayores en el cemento siderúrgico en 30' tanto para el fraguado inicial como final.

CEMENTO CORRIENTE TIPO I

En la producción de cemento tipo I, se han utilizado diferentes porcentajes de escoria, siendo del 30% en promedio hasta el año 83. A partir de ese año hasta la fecha el porcentaje de escoria ha variado entre el 30 y el 40% Estas variaciones se han enmarcado dentro de parámetros de calidad en los cuales la resistencia a un día estaba en valores superiores a 90 kg/cm².

Dentro de todos estos resultados observamos que las resistencias para cementos con 29% de escoria a 39% de escoria, presentan valores de resistencias a 1, 3 y 28 días muy similares como es el caso de los promedios obtenidos entre el año 1983 y 1989 para el molino 1.

Para estos dos casos la capacidad de producción no presenta sino una diferencia de 2 ton/hr, esto como resultado de moler más fino el cemento con 39% de escoria.

Para el caso del molino 2 el comportamiento para los mismos años es muy similar en lo relacionado al porcentaje de escoria y resistencias, pero en la capacidad de producción hay una diferencia de 6 ton/hr que básicamente se puede explicar por la carga de bolas del molino y por el trabajo del separador.

En vista de la importancia de la carga de bolas para tener una buena capacidad de producción y una mayor utilización de adiciones, a partir del año 1989 se comenzó como objetivo a trabajar los molinos a su capacidad máxima de potencia.

Con base en la experiencia de años anteriores en 1990 se cambió el concepto de trabajo con relación al rechazo sobre 40 μ , lo cual permitió aumentar de un valor de alrededor de 5% a un valor superior al 7%, con lo cual se mejoró en forma sustancial la capacidad de molienda.

COMPORTAMIENTO GENERAL

A pesar del comportamiento diferente de la operación de los molinos 1 y 2 de cemento, las características físicas son muy similares, de tal manera que haciendo un resumen de todos los cementos producidos hasta el año 1990 por cada circuito, logramos obtener los siguientes resultados.

Las resistencias a 1 día, son de 94.17 kg/cm² y 94.23 kg/cm² para las producciones del molino 1 y 2 respectivamente; siguiendo el mismo orden a 3 días son de 186.79 kg/cm² y 187.48 kg/cm², a 7 días 248.23 kg/cm² y 249.50 kg/cm², para 28 días 384.57 kg/cm² y 387.60 kg/cm².

Las anteriores cifras de resistencias nos muestran una gran estabilidad del cemento producido, independiente del circuito utilizado, de la calidad de las materias primas y de las condiciones operativas propias de cada circuito.

Los resultados obtenidos corresponden a porcentajes de escoria de 25.21% a 43.16% para el molino 1 y de 25.41% a 42.49% en el molino 2.

El comportamiento de las resistencias a 1, 3, 7 y 28 días muestra una relación que se cumple para este rango de escoria, el cual es muy diferente si se trata de cementos con mayor porcentaje de escoria, de un rechazo sobre 40 μ más alto del obtenido o de valores de Blaine más bajos.

Las relaciones obtenidas son las siguientes:

$$R_3 = R_1 + 92.5$$

$$R_7 = R_3 + 61.7$$

$$R_{28} = R_7 + 137$$

Como se aprecia el desarrollo de las resistencias de los morteros de nuestro cemento, difieren con el de un cemento con adiciones diferentes a la escoria o las de un cemento portland puro, esto se explica porque la alta actividad del clinker desarrolla las resistencias a 1 y 3 días, se aprecia el desarrollo de las resistencias por parte de la escoria, el cual aunque es más lento sigue desarrollando resistencias en forma continua aún después de los 90 días.

En términos generales para mantener las resistencias del cemento en el rango estudiado, no ha sido necesario sobremoler el cemento, aunque hay que destacar cómo se disminuye el rechazo sobre 40 μ en un dos a tres por ciento a partir del 39% de escoria para mantener los valores objetivos de escoria, el Blaine sufre un incremento entre 100 y 200 puntos para ese valor en adelante.

Las variaciones en el Blaine no son apreciables en el rango de 25% a 39% de escoria para el caso del molino 1, donde fluctuara de 3800 cm²/g a 3950 cm²/g., lo mismo que el rechazo que está entre el 3% al 6% sobre 40 μ .

Para el molino 2 el Blaine presentó valores muy bajos para el 30, 31 y 32% entre 3400 a 3600 cm²/gr, mientras para el 33% al 40% está entre 3800 a 4000 Blaine.

Para los dos molinos el comportamiento entre el rechazo y el Blaine es inverso.

Teniendo en cuenta que la capacidad de molienda y el consumo específico de energía dependen de la carga de cuerpos moledores, de la distribución de tamaños, del estado de las placas levantadoras y de clasificación, del estado de las placas del diafragma y del tiraje dentro del molino, como aspectos más sobresalientes, encontramos una tendencia inversa entre el porcentaje de escoria y la capacidad horaria, que varía entre 44 ton/hr a 52 ton/hr para el molino 1 y de 42.5 ton/hr a 53 ton/hr para el molino 2.

La capacidad de molienda presenta un rango estable entre el 33% al 38% el cual varía especialmente por los cambios operativos.

El consumo específico de energía es directamente proporcional al porcentaje de escoria, pero presentando un menor rango de variación comparado con la capacidad, lo cual demuestra la influencia de los cambios operativos.

CEMENTO TIPO III

Por los bajos consumos de cemento tipo III en la industria de la construcción en Colombia, la Fábrica ha producido solo algunos miles de toneladas de esta clase de cemento, por eso se tiene una información menos representativa que en los casos del cemento tipo I y en el de cemento siderúrgico, sin embargo los datos que se tienen permiten caracterizar muy bien el cemento.

El cemento tipo III se ha producido con adición de escoria entre el 12 al 16%, con Blaine promedio de 3.875 y un rechazo sobre 40 μ , menor de 4%, para lograr resistencias promedio de 130 kg/cm² a un día, 231 kg/cm² a tres días, 300 kg/cm² a 7 días y 394 kg/cm² a 28 días, las cuales son superiores a las exigidas por la norma ASTM.

El incremento de resistencias para los diferentes periodos tiene un comportamiento diferente al de los cementos siderúrgicos, y los cementos normales.

$$R3 = R1 + 100$$

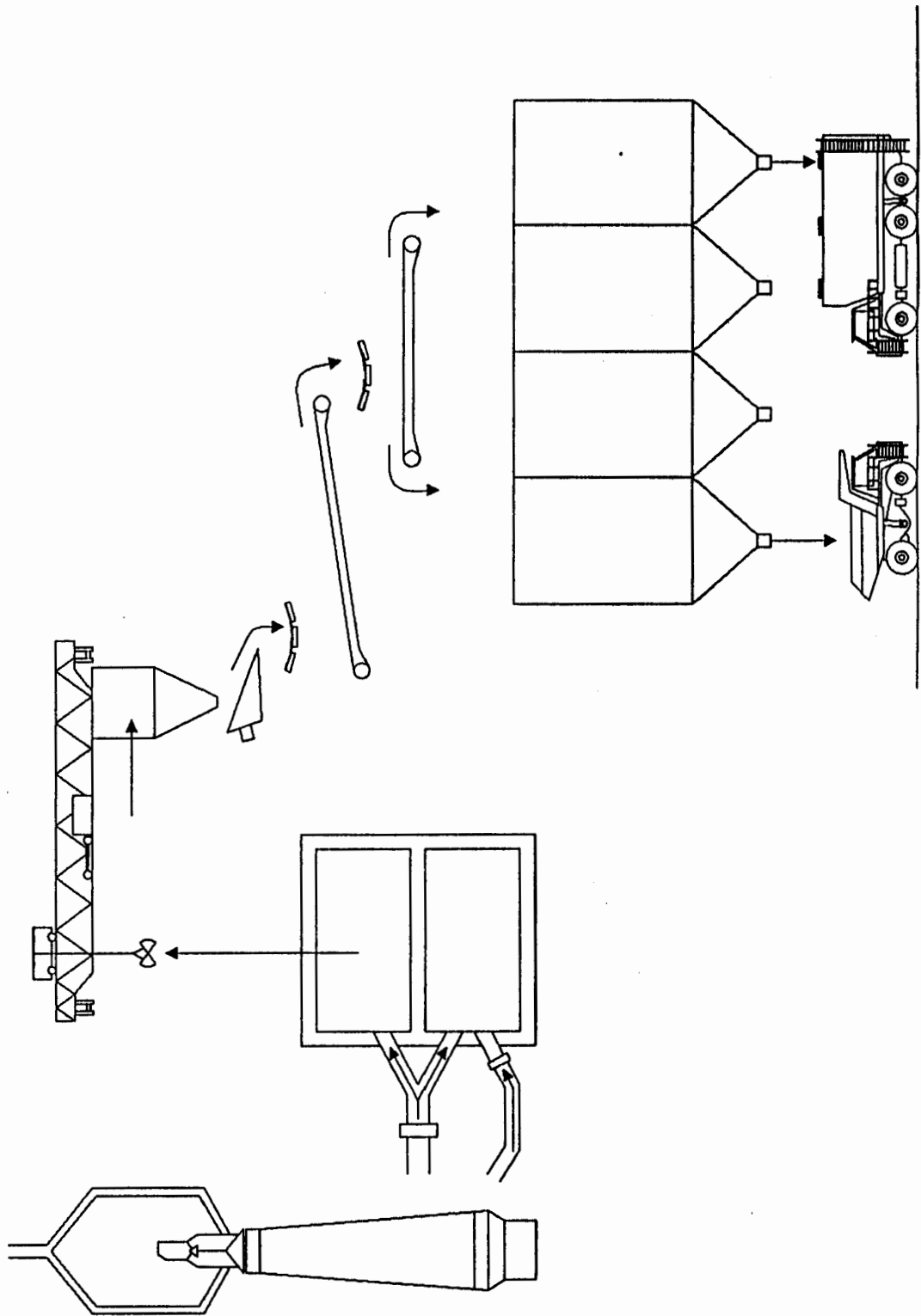
$$R7 = R3 + 70$$

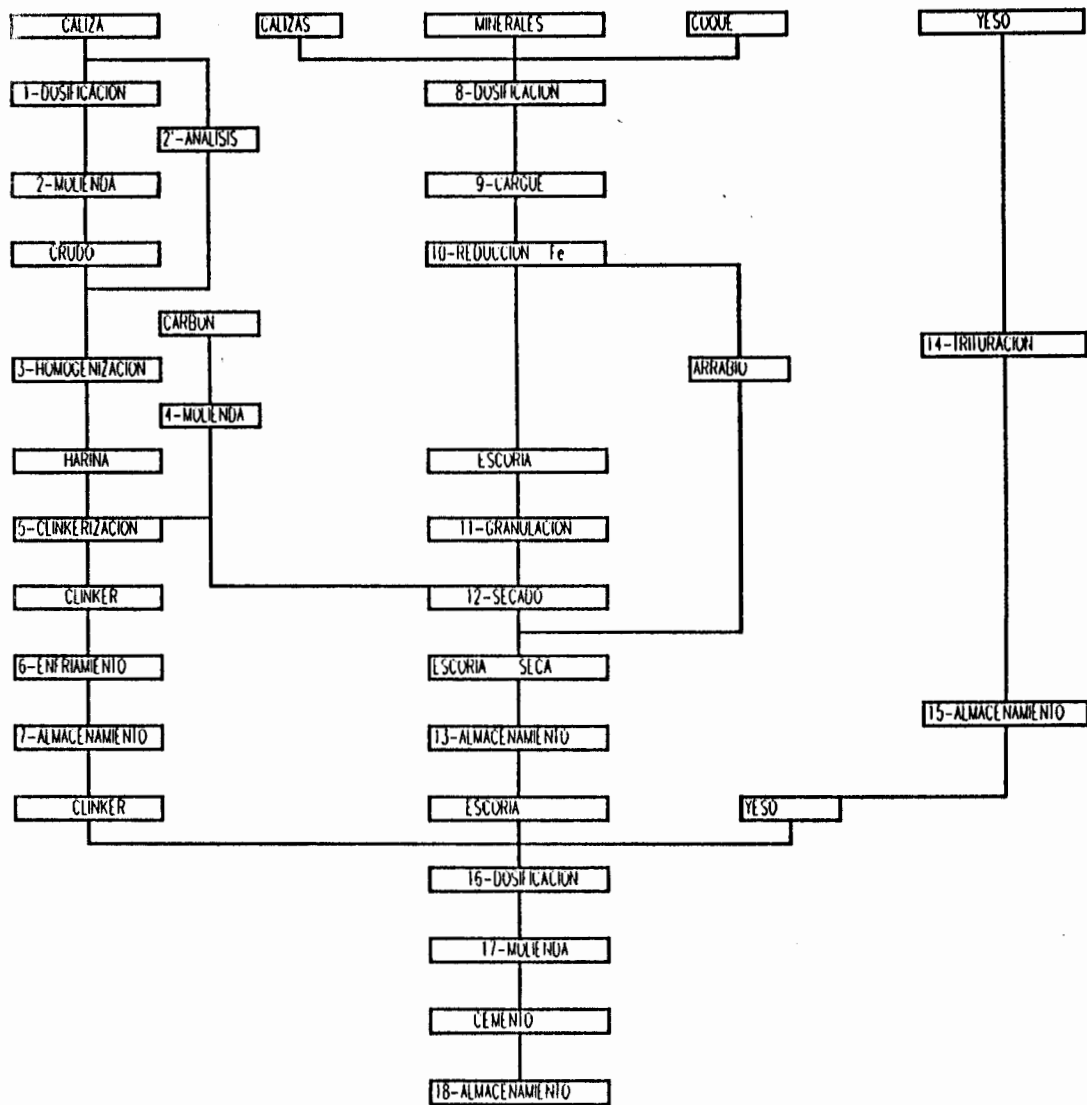
$$R28 = R7 + 94$$

El cemento tipo III presenta el mayor incremento de 1 a 3 días como resultado del mayor contenido de clinker, pero en el periodo de 3 a 7 días es menor que el cemento siderúrgico y mayor que el cemento normal. Para el periodo entre 7 y 28 días la resistencia presenta el menor incremento como resultado del menor contenido de escoria.

En la producción de este cemento los molinos han operado a una capacidad promedio de 52 ton/hr, la cual es resultado de trabajar en un rango de rechazo muy bajo.

GRANULACION Y MANEJO DE ESCORIA

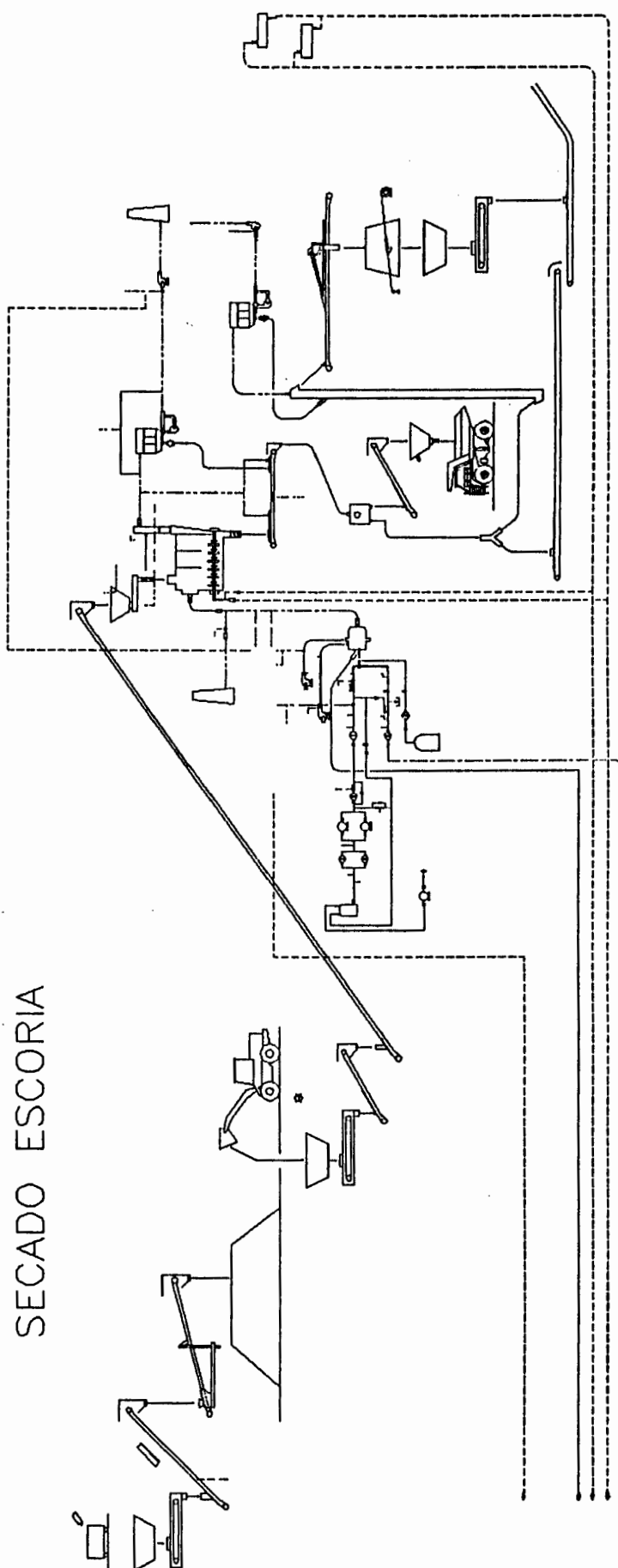




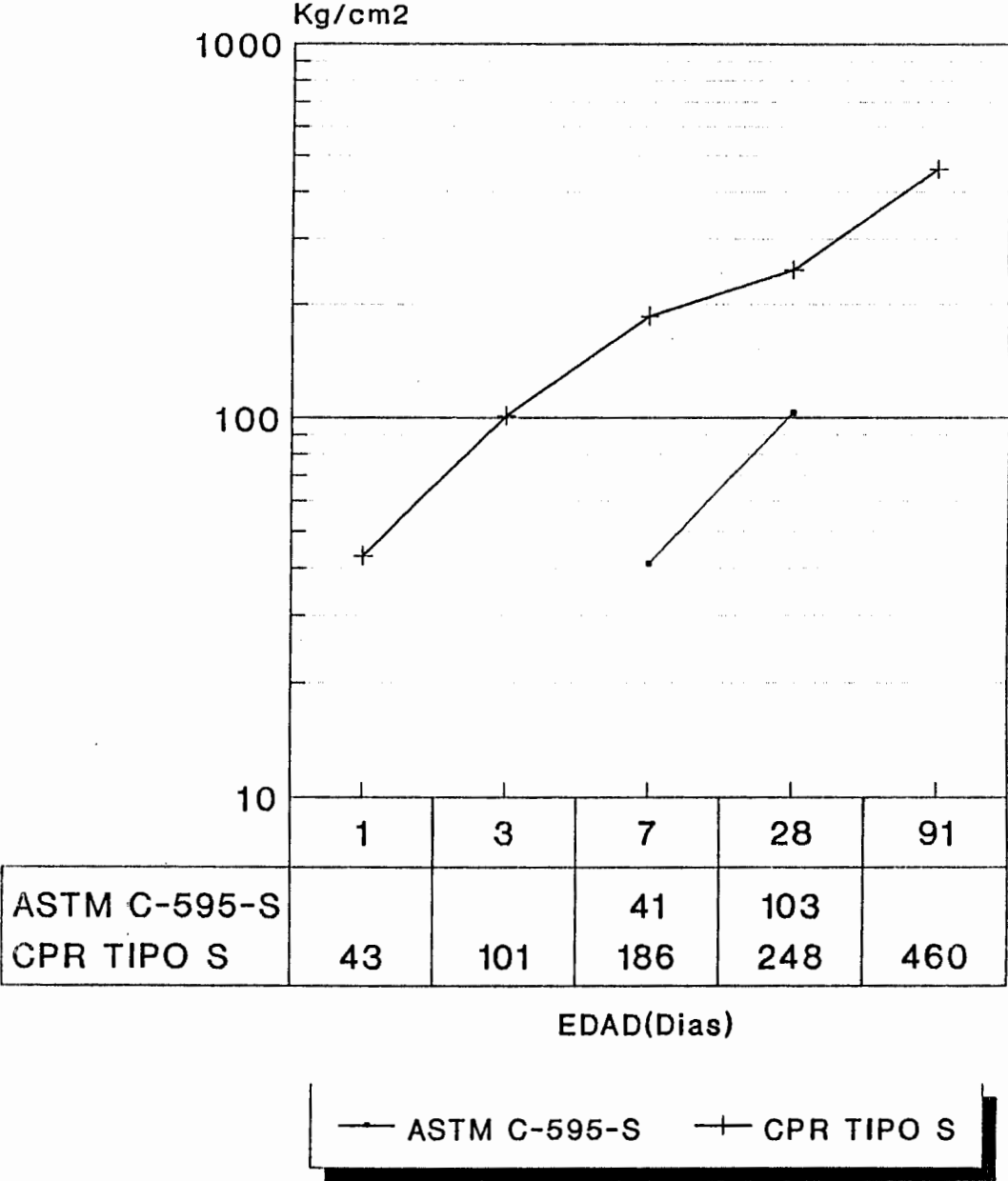
EQUIPOS :

- 1-16 BASCULAS AUTOMATICAS
- 2 MOLINO DE BOLAS CIRCUITO CERRADO EN SECO
- 2' ESPECTROMETRO DE R-X Y COMPUTADOR
- 3 SILOS CON INYECCION DE AIRE
- 4 MOLINO VERTICAL DE RODILLOS
- 5 HORNO ROTATORIO CON PRECALENTADOR DE SUSPENSION
- 6 ENFRIADOR DE PARRILLAS (AIRE)
- 7-13-15 PATIO CUBIERTO
- 8 CARRO BASCULA

- 9 CARROS ELEVADORES
- 10 ALTO HORNO
- 11 INYECCION DE AGUA
- 12 SECADOR RAPIDO CON ALETAS-SEPARADOR MAGNETICO
- 14 TRITURADOR DE MANDIBULAS
- 17 MOLINO DE BOLAS, CIRCUITO CERRADO
- 18 SILOS

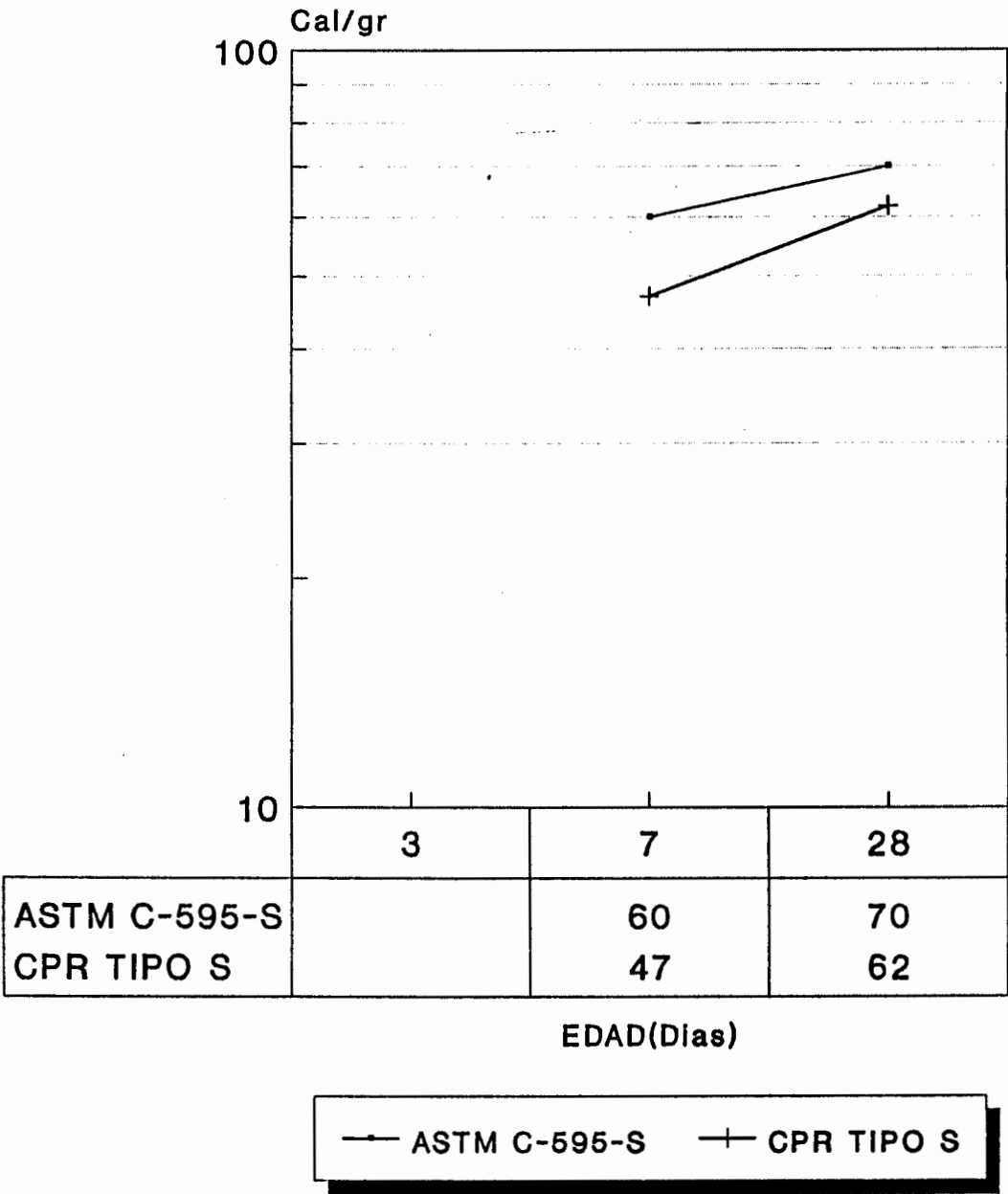


RESISTENCIA A LA COMPRESION CEMENTO SIDERURGICO



CPR

CALORES DE HIDRATACION
CEMENTO SIDERURGICO



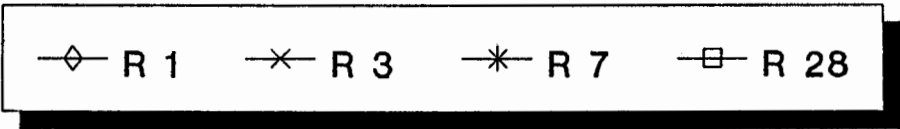
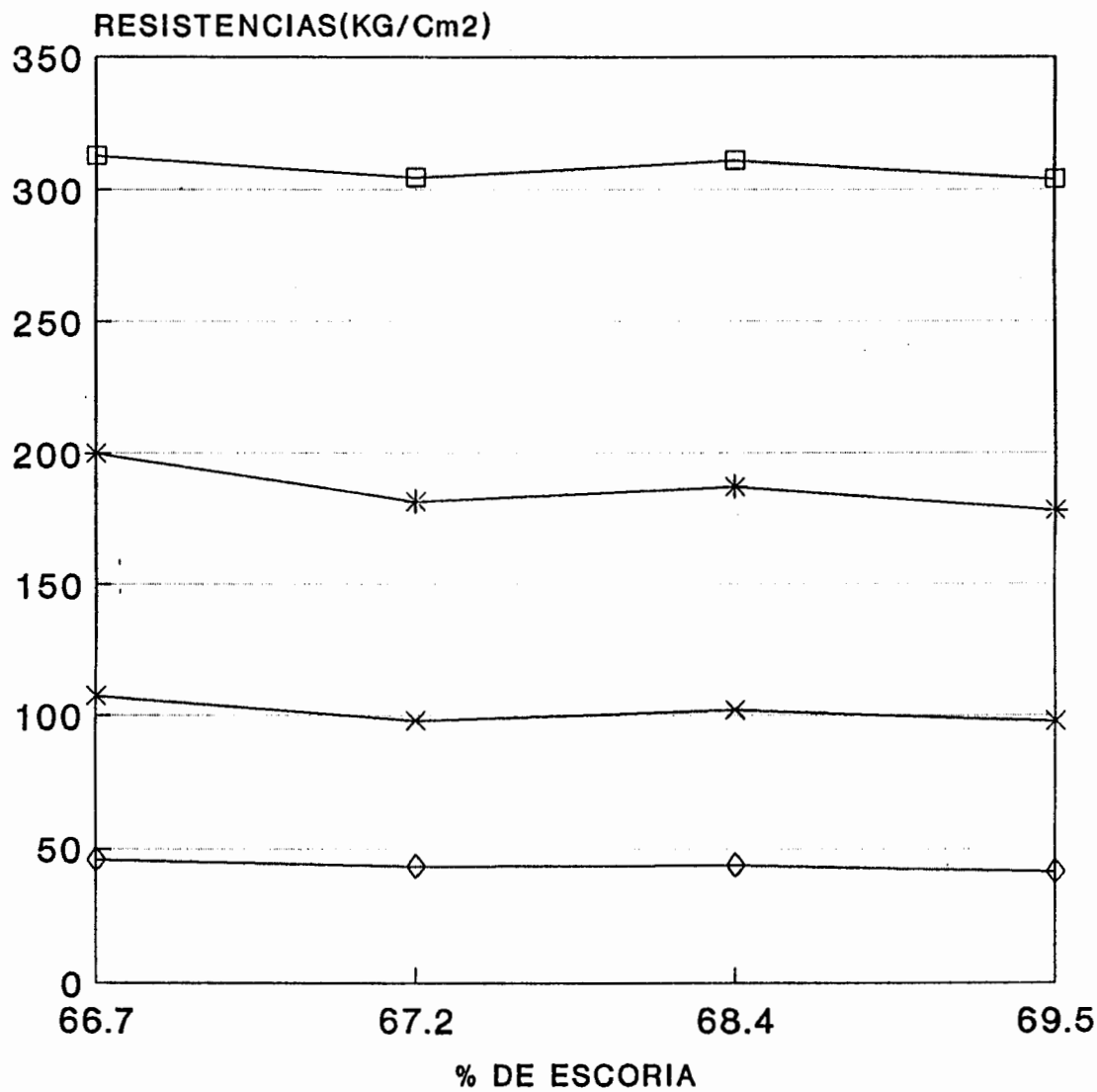
CPR

ACERIAS PAZ DEL RIO SA
FABRICA DE CEMENTO CPR

MOLIENDA DE CEMENTO
CEMENTO SIDERURGICO

	ESCORIA %	BLAINE CM2/G	RECHAZO ± %	R1 KG/CM2	R3 KG/CM2	R7 KG/CM2	R28 KG/CM2
	66.7	3801	3.5	46	107	200	313
	67.3	3728	8.3	44	98	182	305
	68.4	3857	4.0	44	102	187	311
	69.6	3756	3.9	42	98	178	304
PROMEDIO=	68	3786	4.9	44	101	187	308
MAXIMO	70	3857	8.3	46	107	200	313
MINIMO	67	3728	3.5	42	98	178	304
DIFERENCIA					57	85	121

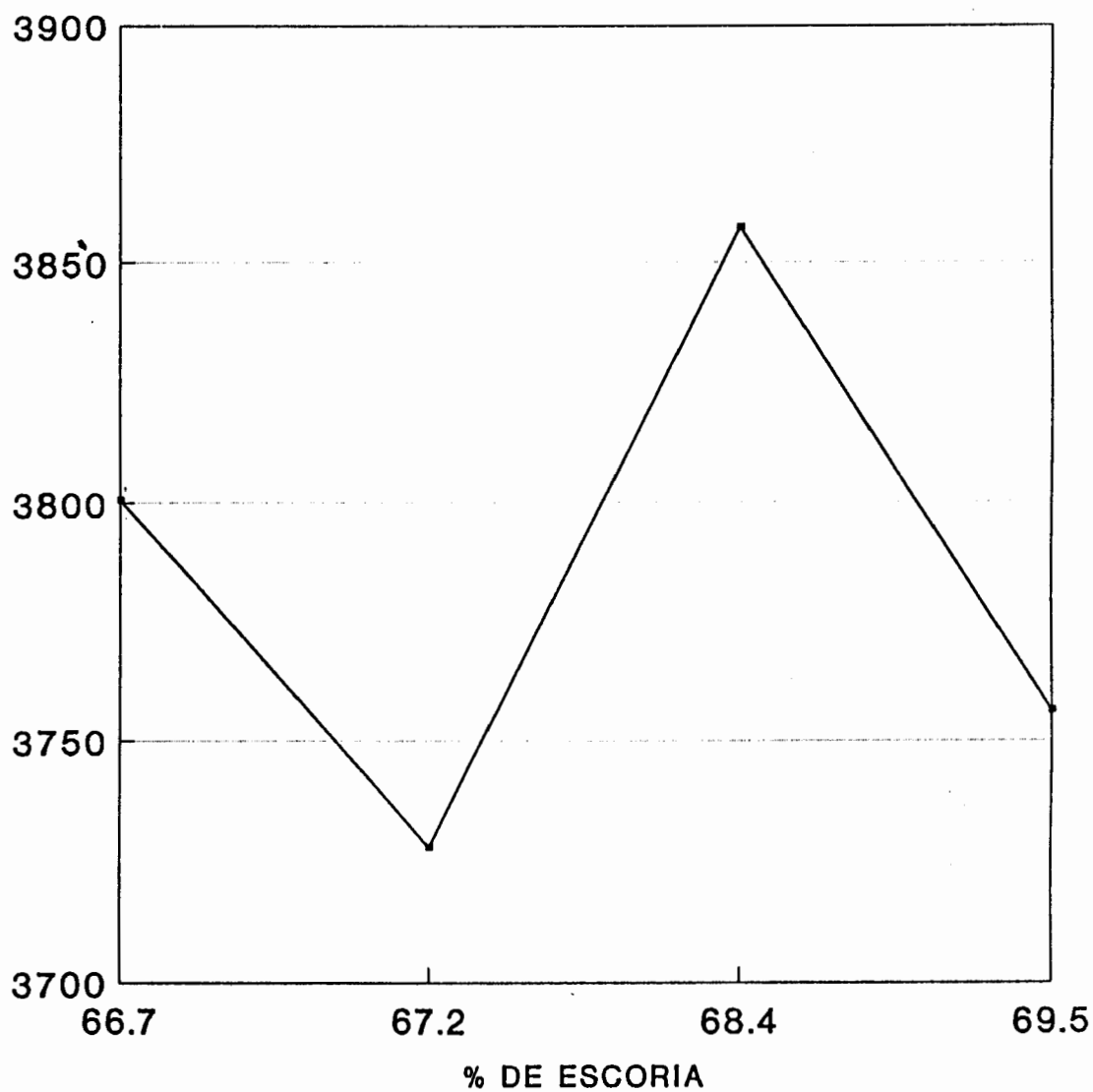
CEMENTO SIDERURGICO
% DE ESCORIA VS RESISTENCIAS



CPR

CEMENTO SIDERURGICO

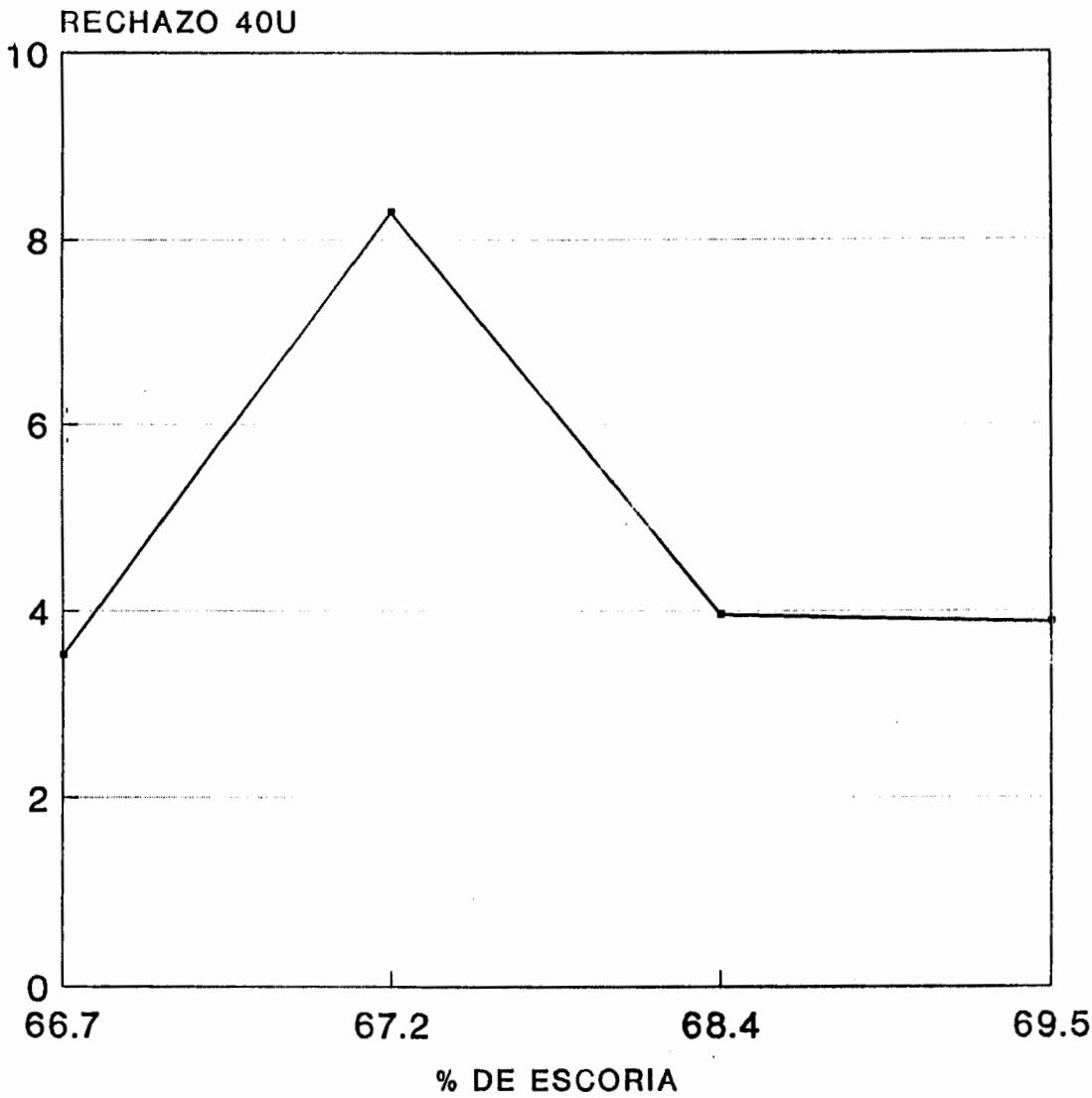
% DE ESCORIA VS BLAINE



—•— BLAINE

CPR

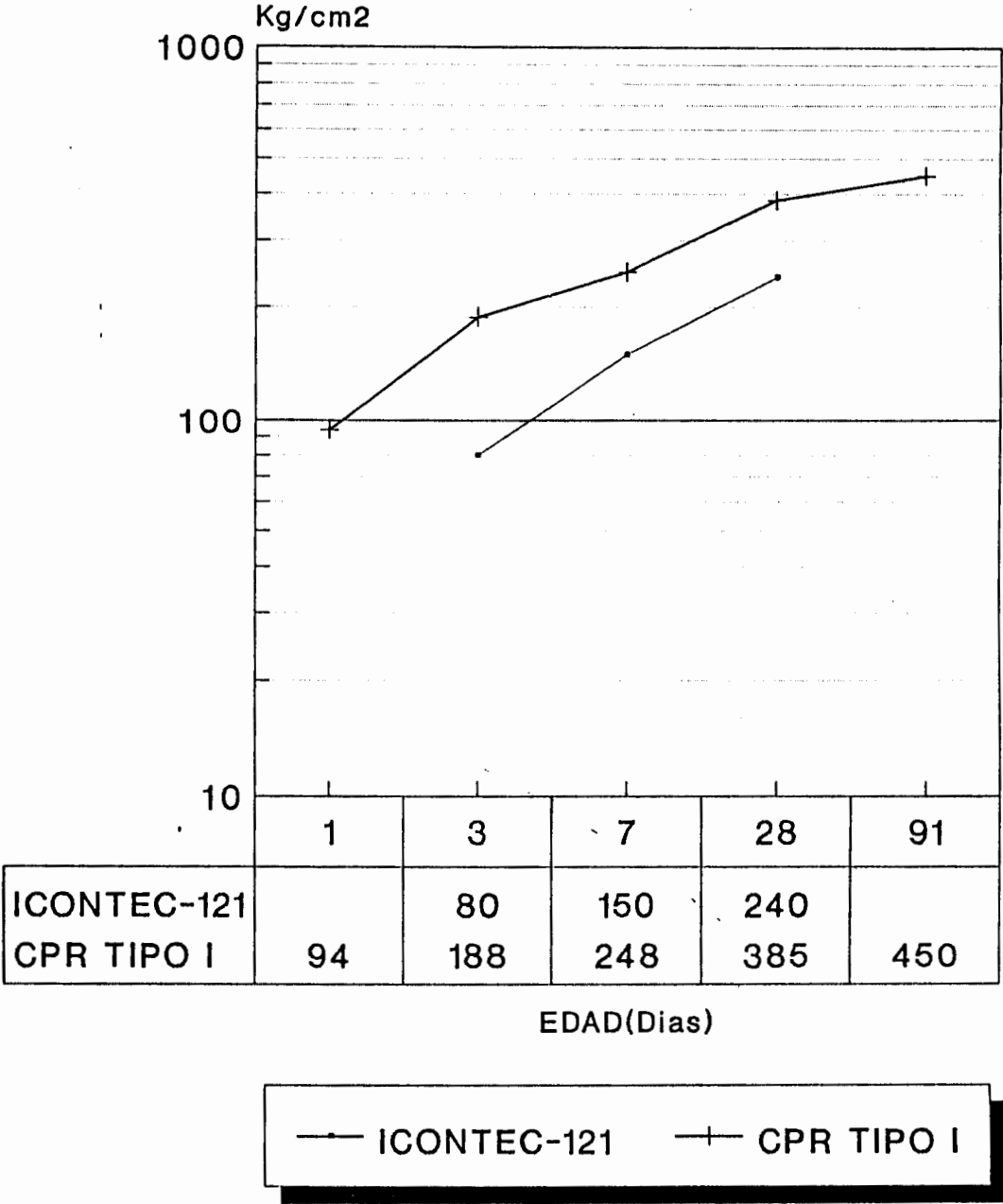
CEMENTO SIDERURGICO
% DE ESCORIA VS RECHAZO 40U



—●— RECHAZO

CPR

RESISTENCIA A LA COMPRESION CEMENTO TIPO I



CPR

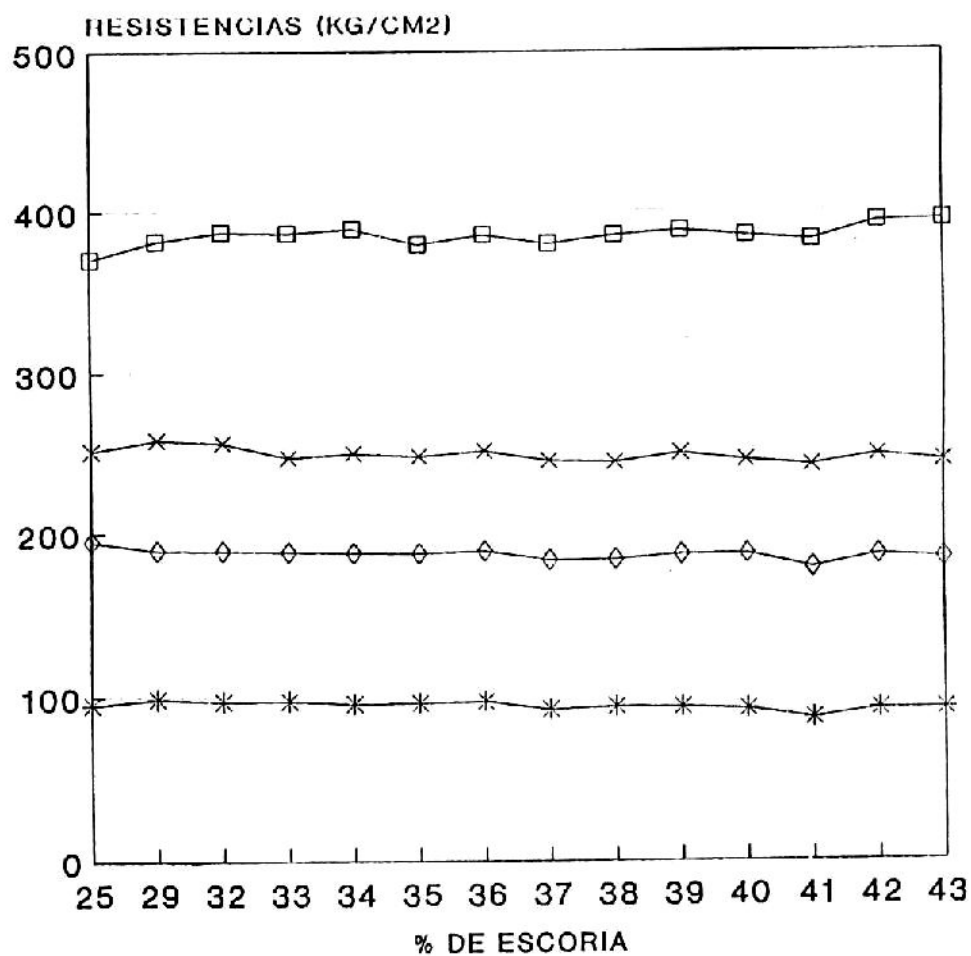
MOLIENDA DE CEMENTO # 1

TIPO I

CAPACIDAD TON/H	ENERGIA KWH/TON	ESCORIA %	BLANE CM2/G	RECHAZO 40 %	R1 KG/CM2	R3 KG/CM2	R7 KG/CM2	R28 KG/CM2
47.27	45.11	25.21	3834.00	5.63	95.00	195.00	251.00	370.67
49.63	43.15	29.35	3804.00	4.22	98.50	189.50	258.00	381.50
52.47	40.79	32.33	3937.00	5.45	97.00	189.00	256.00	387.00
47.62	48.33	33.37	3797.00	4.71	97.20	188.60	245.80	386.40
51.16	45.81	34.67	3881.73	6.23	95.73	187.73	249.45	389.00
49.62	45.74	35.43	3871.00	5.06	96.00	187.64	247.57	379.14
50.09	45.99	36.45	3803.80	5.04	95.87	188.67	250.93	385.20
50.18	45.77	37.42	3843.25	4.54	92.25	183.38	244.75	379.50
46.74	50.15	38.38	3835.25	4.62	93.75	183.50	243.50	384.75
45.84	50.00	39.45	3922.67	2.83	93.33	186.50	249.17	387.83
47.48	49.81	40.55	3985.50	3.03	92.25	187.00	244.50	384.50
44.32	51.37	41.22	3889.00	3.31	86.50	178.50	241.50	381.50
44.08	51.63	42.51	4038.00	2.30	92.00	185.00	248.00	393.00
46.16	47.93	43.16	4060.00	2.20	92.00	184.00	244.00	394.00
PROMEDIO	47.26	36.39	3893.01	4.30	94.17	186.79	248.23	384.57
MAXIMOS	51.63	43.16	4060.00	5.46	98.50	195.00	258.00	394.00
MINIMOS	40.79	25.21	3797.00	2.20	86.50	178.50	241.50	370.67
DIFERENCIA						92.62	61.44	136.34

RESISTENCIAS VS % DE ESCORIA

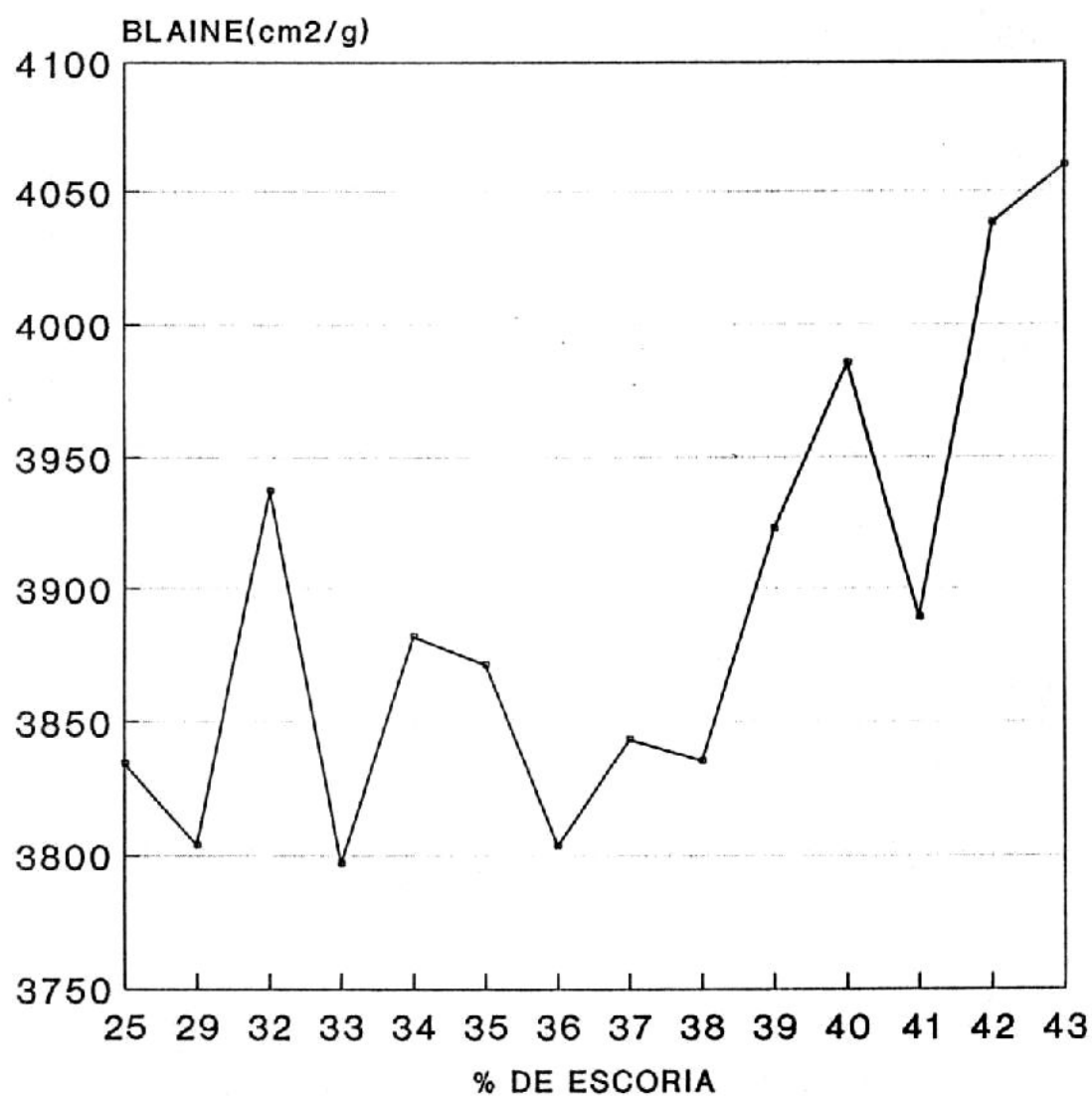
MOLINO #1



* R 1 ◇ R 3 × R 7 □ R 28

CPR

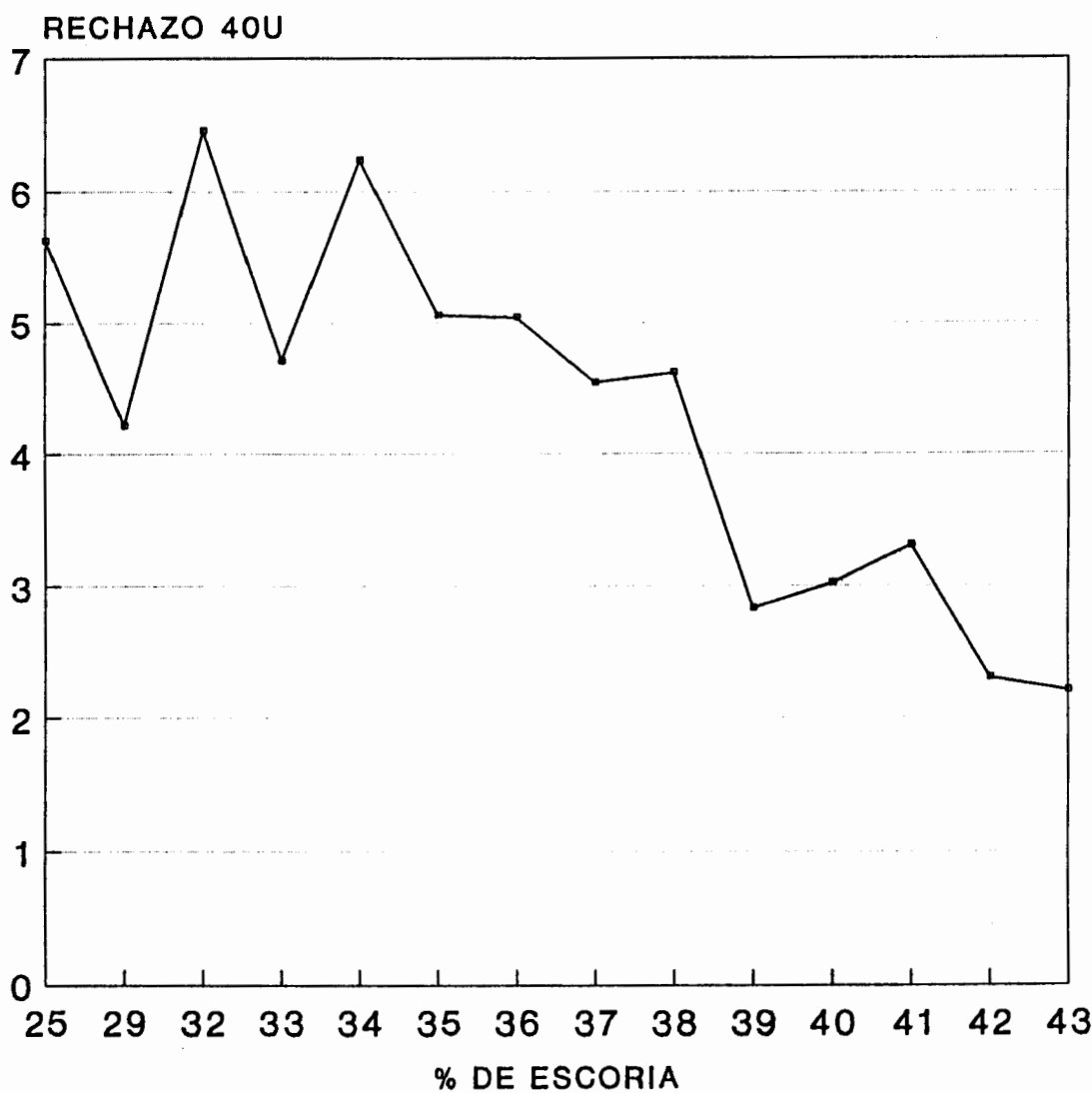
BLAINE VS % DE ESCORIA MOLINO #1



—•— BLAINE

CPR

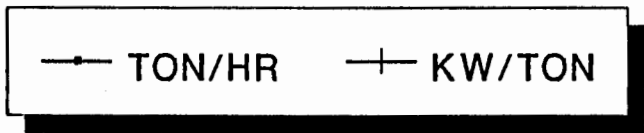
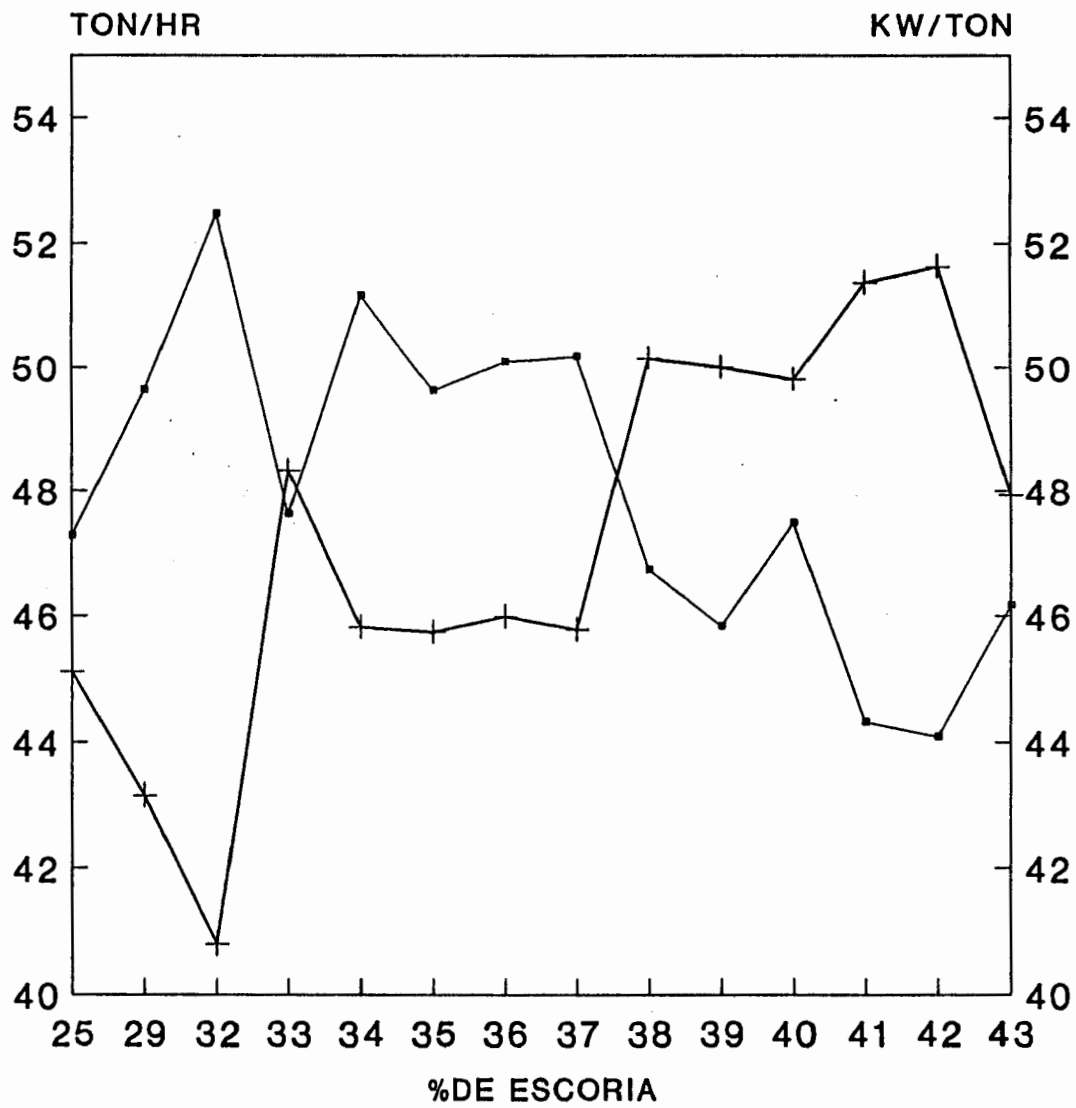
RECHAZO 40U VS % DE ESCORIA
MOLINO #1



—●— RECHAZO 40U

CPR

% DE ESCORIA VS KW/TON,TON/HR
MOLINO #1



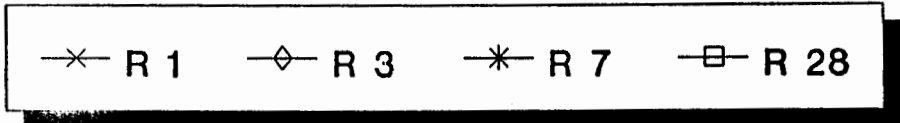
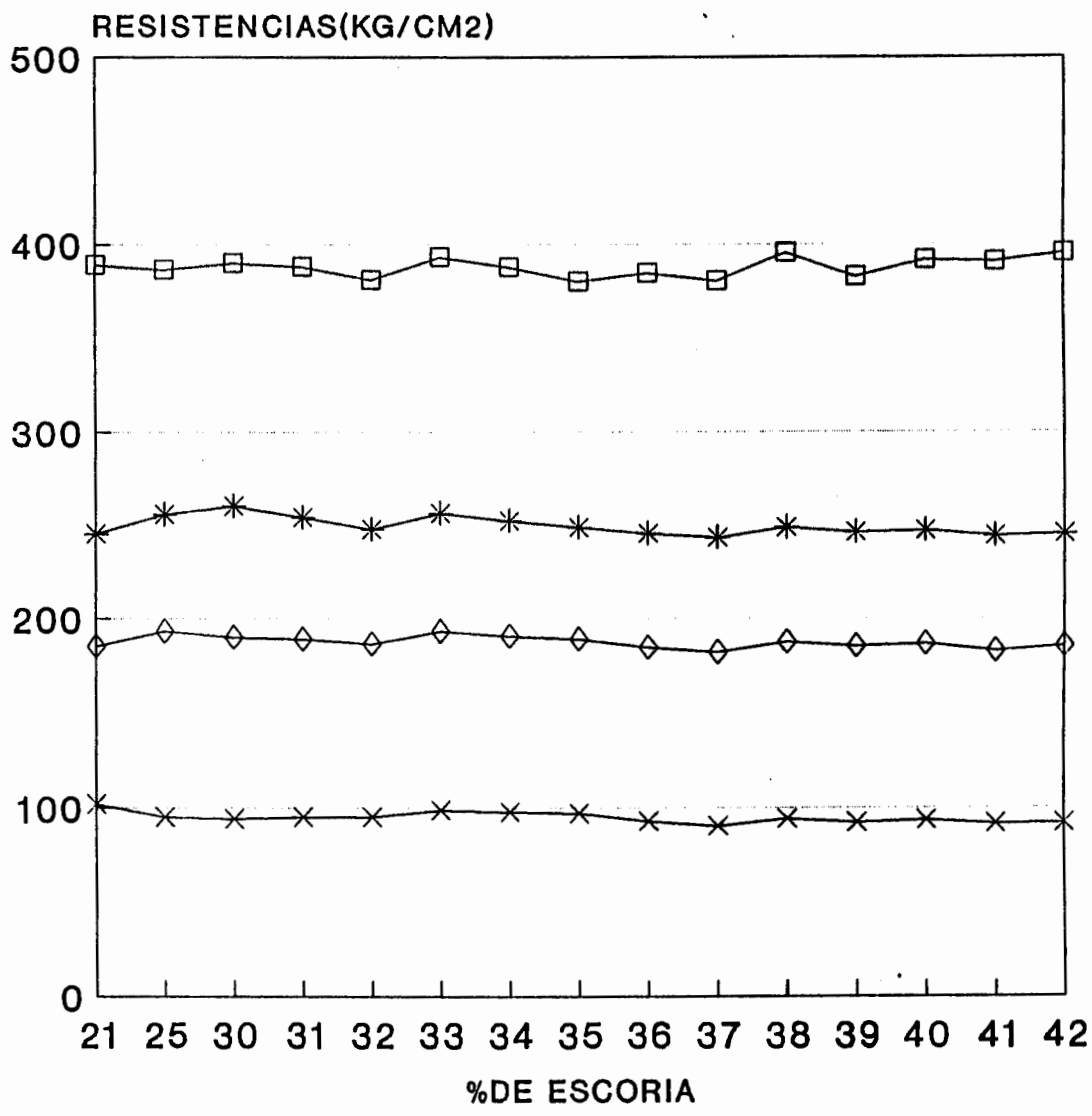
CPR

CEMENTO No 2

TIPO SACOS

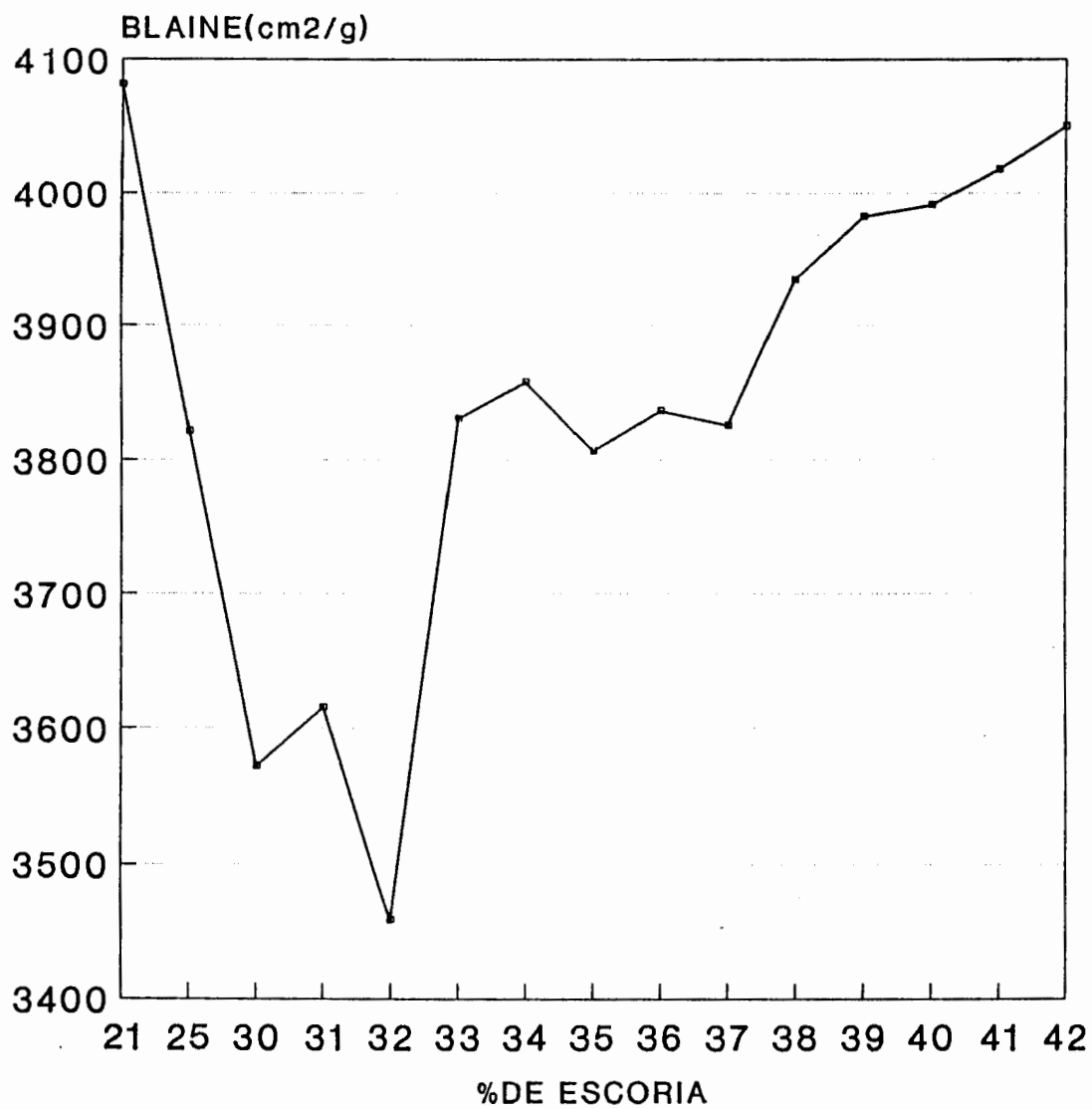
	CAPACIDAD TON/H	ENERGIA KWH/TON	ESCORIA %	BLAINE CM2/G	RECHAZO 40 %	R1 KG/CM2	R3 KG/CM2	R7 KG/CM2	R28 KG/CM2
	50.46	42.84	25.41	3821.25	5.57	95.25	193.25	255.75	386.50
	52.95	39.80	30.10	3572.00	4.70	94.00	190.00	260.00	390.00
	41.54	61.32	31.80	3615.00	5.20	95.00	189.00	254.00	388.00
	47.87	48.51	32.53	3458.50	5.30	95.00	186.50	247.50	381.00
	49.32	48.35	33.56	3830.78	5.25	98.56	193.11	256.33	393.22
	48.20	47.62	34.45	3857.93	4.78	97.53	190.60	252.20	387.60
	49.21	45.94	35.48	3806.93	4.75	97.20	189.00	248.60	380.13
	47.26	49.47	36.51	3836.64	4.18	93.00	184.55	245.27	384.36
	45.84	51.22	37.55	3825.78	3.67	90.22	182.00	243.11	380.22
	46.18	47.66	38.68	3934.00	3.23	94.00	187.50	248.50	395.50
	44.09	51.93	39.41	3982.17	2.73	92.33	185.00	246.17	382.67
	43.80	44.96	40.38	3991.00	3.25	93.50	186.50	247.00	391.50
	47.04	47.95	41.47	4018.33	3.16	91.67	182.67	244.00	390.67
	42.65	51.94	42.49	4050.00	2.50	92.00	185.00	245.00	395.00
PROMEDIO	46.89	48.54	35.70	3828.59	4.16	94.23	187.48	249.53	387.60
MAXIMO	52.95	61.32	42.49	4050.00	5.57	98.56	193.25	260.00	395.50
MINIMO	41.54	39.80	25.41	3458.50	2.50	90.22	182.00	243.11	380.13
DIFERENCIA							93.24	62.05	138.07

RESISTENCIAS VS % DE ESCORIA
MOLINO #2



CPR

BLAINE VS % DE ESCORIA MOLINO #2

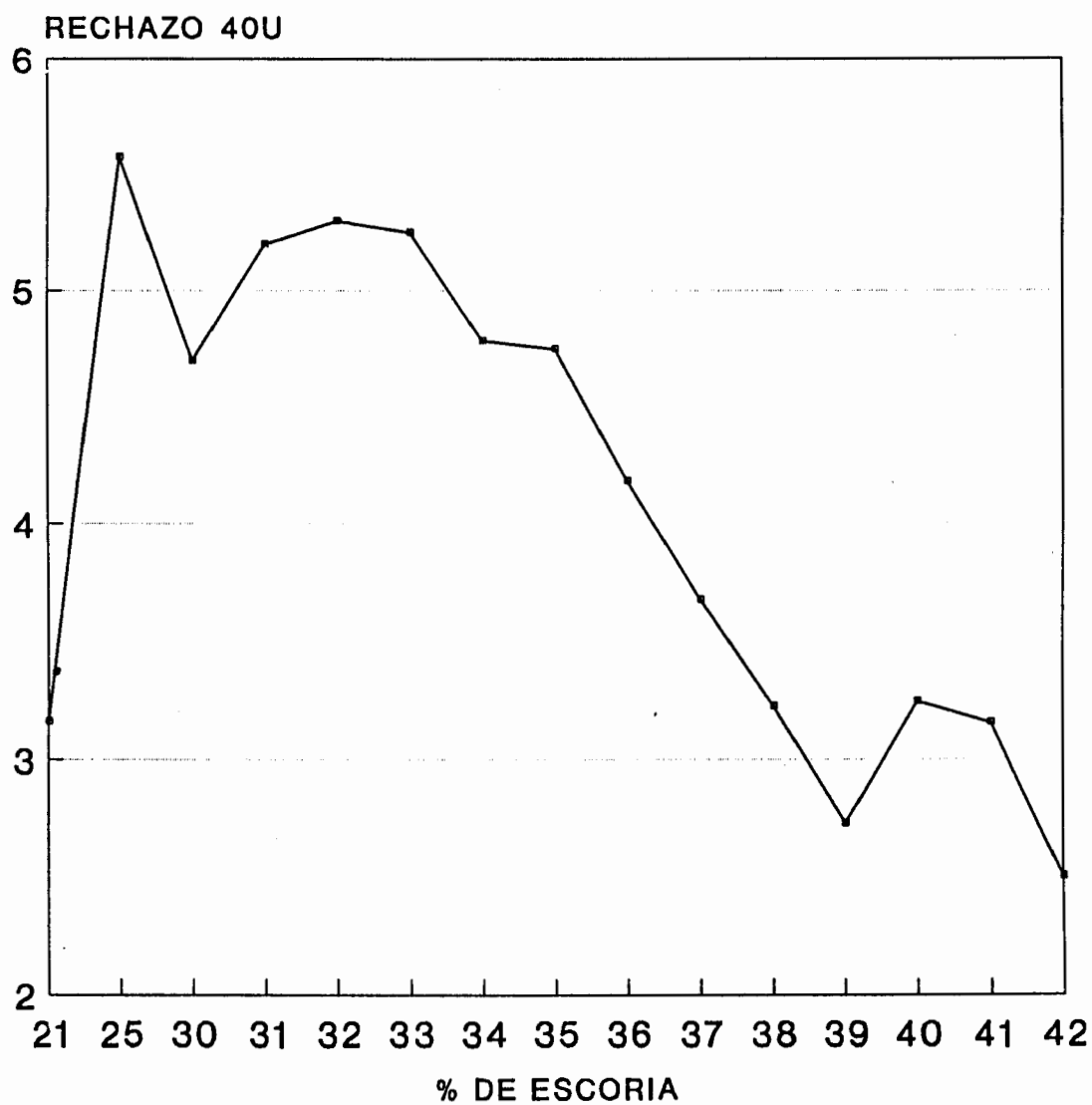


—●— BLAINE

CPR

RECHAZO 40U VS % DE ESCORIA

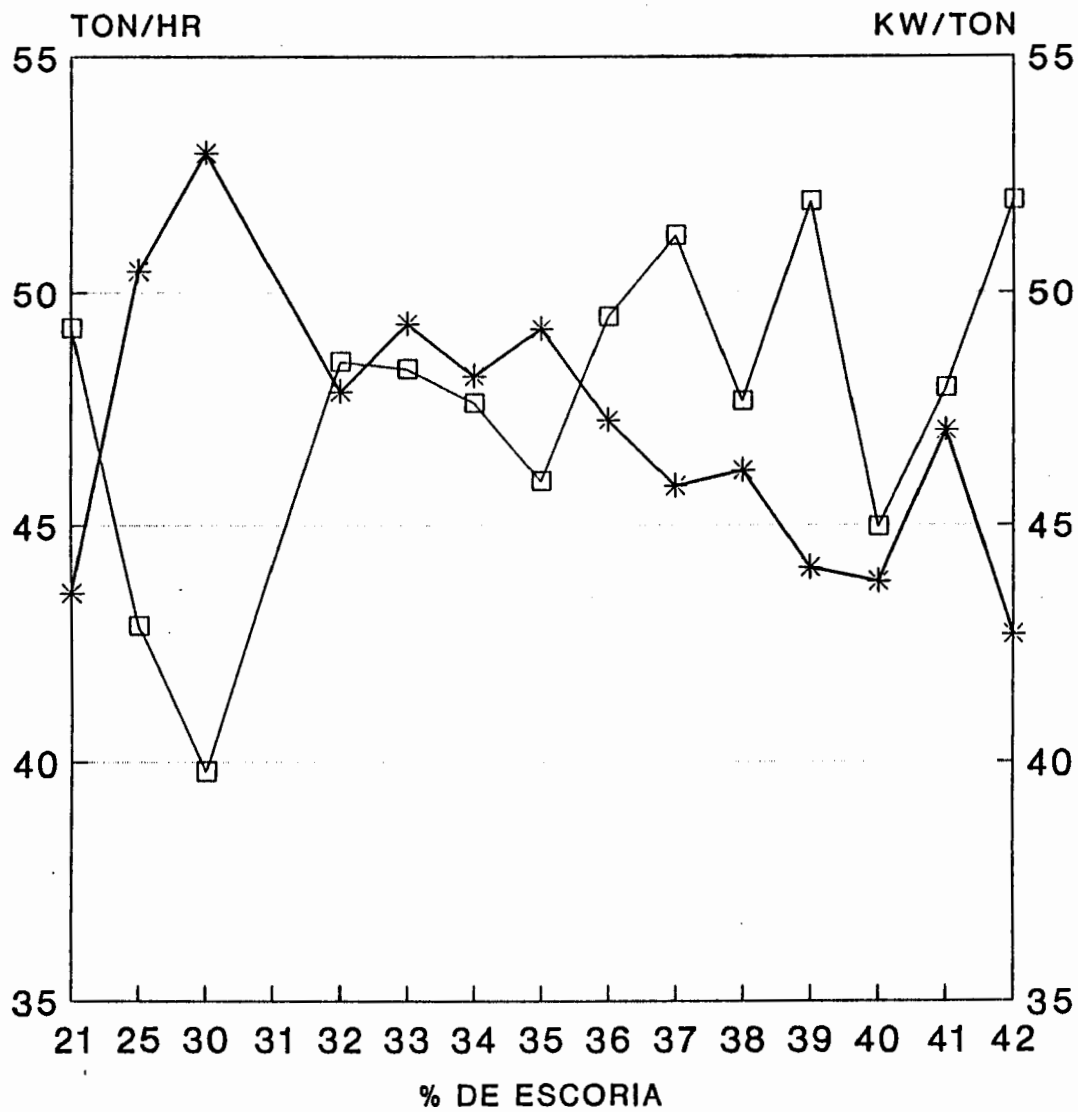
MOLINO # 2



RECHAZO 40U

CPR

% DE ESCORIA VS TON/HR,KW/TON MOLINO #2

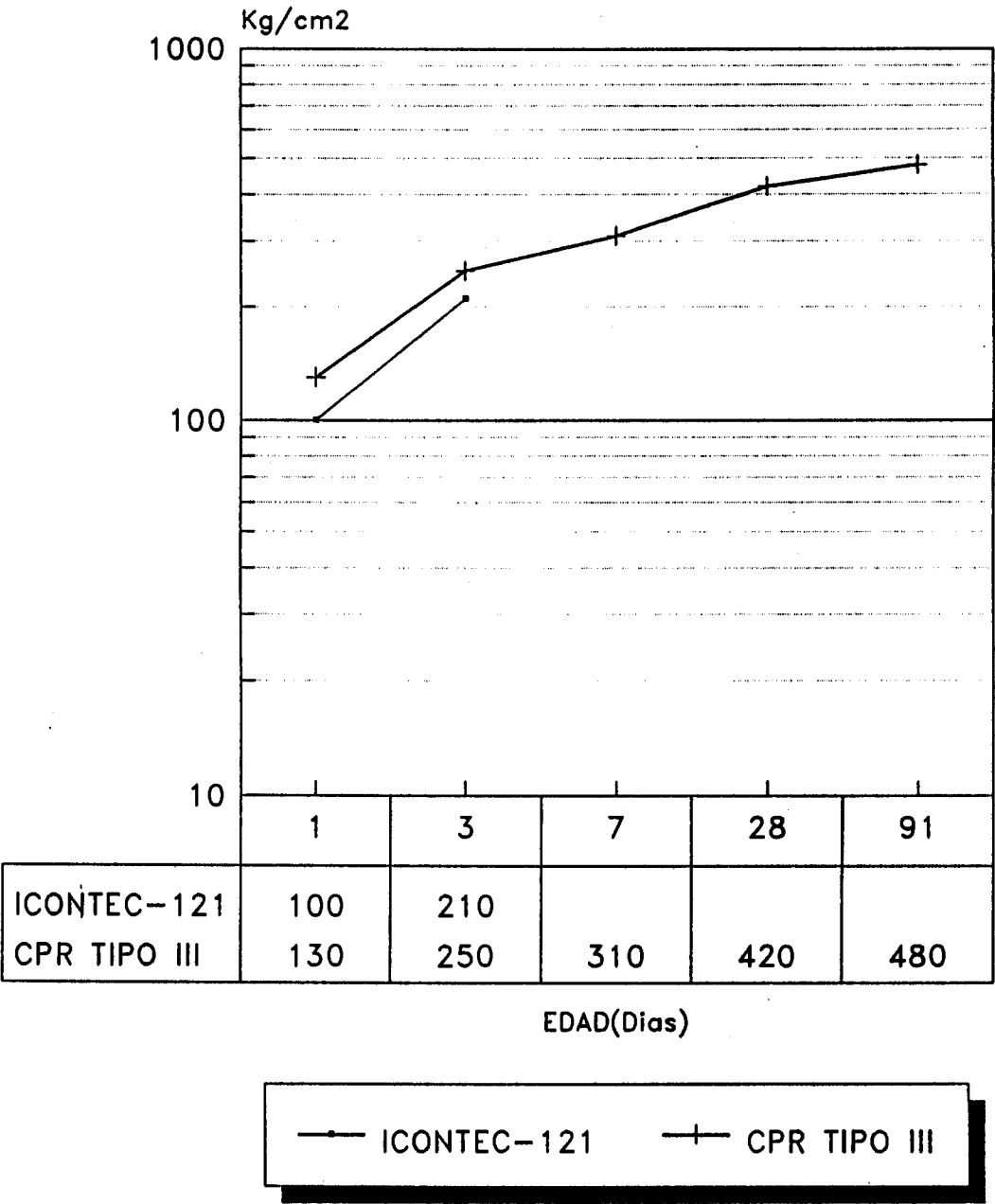


—*— TON/HR —□— KW/TON

CPR

RESISTENCIA A LA COMPRESION

CEMENTO TIPO III



CPR

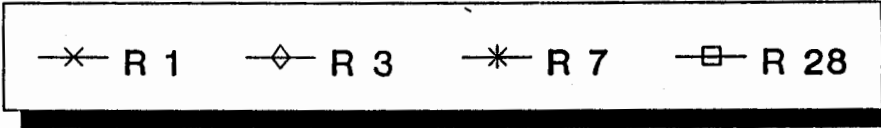
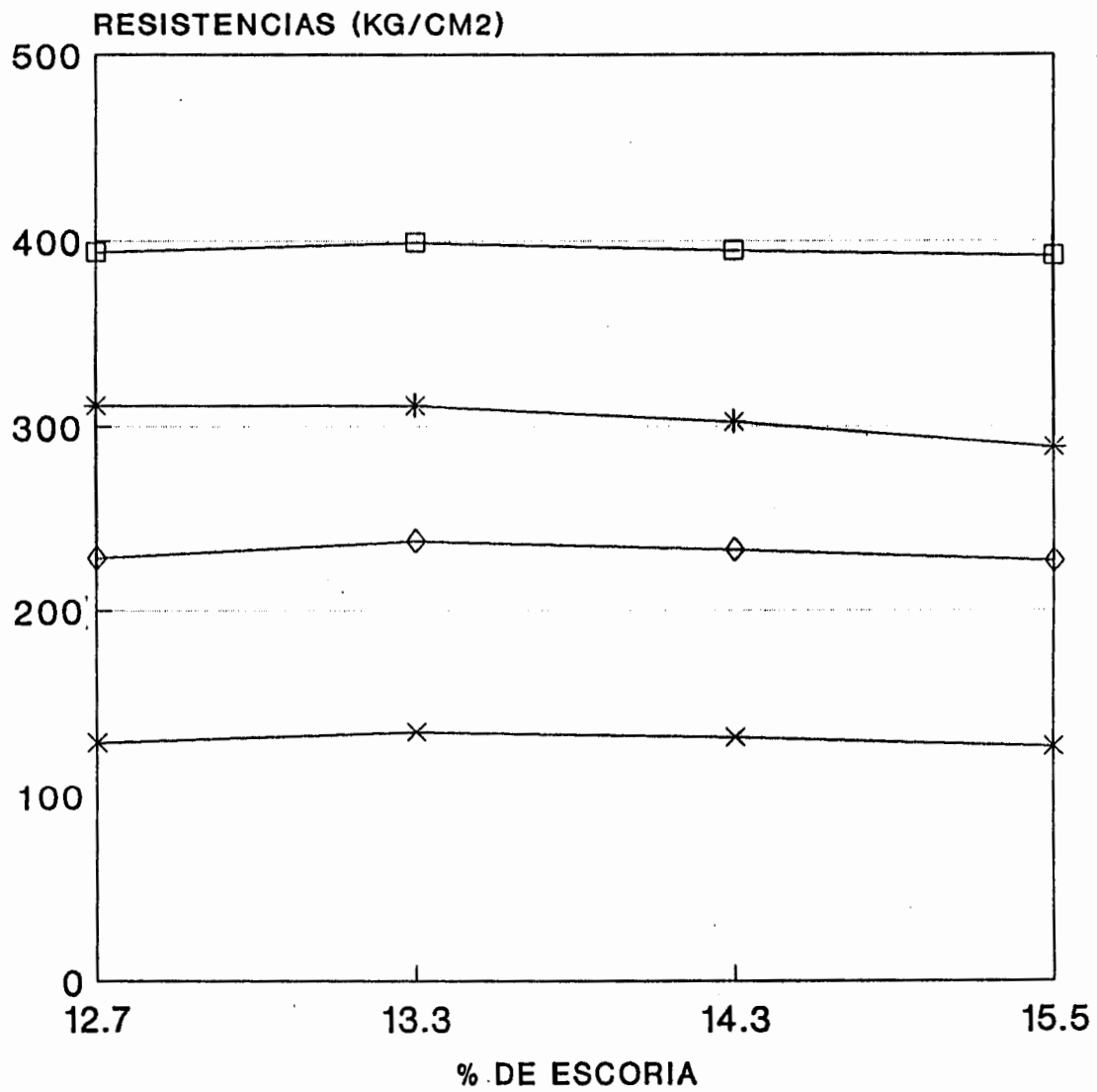
CEMENTO No 3

TIPO III SACOS

	ESCORIA %	BLAINE CM2/G	RECHAZO 40 %	R1 KG/CM2	R3 KG/CM2	R7 KG/CM2	R28 KG/CM2
	13	3914	4.45	129	228	311	394
	13	3924	3.25	135	237	311	399
	14	3858	3.52	132	233	303	395
	16	3859	4.09	127	226	289	392
PROMEDIO	14	3875	3.79	130	231	300	394
MAXIMO	16	4030	5.90	141	240	318	405
MINIMO	12	3657	2.40	120	220	230	381
DIFERENCIA					100	70	94

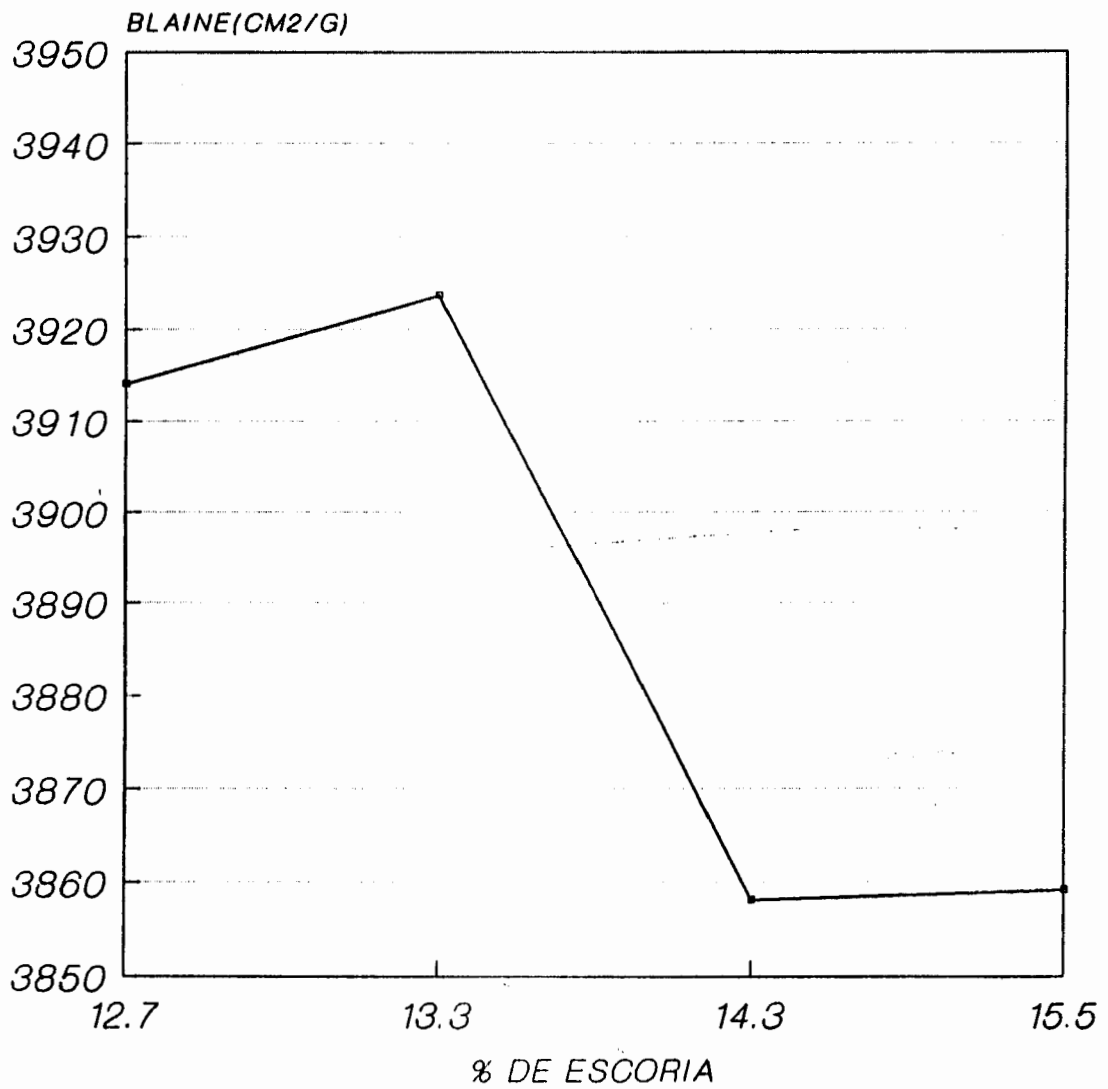
CEMENTO TIPO III

%DE ESCORIA VS RESISTENCIAS



CPR

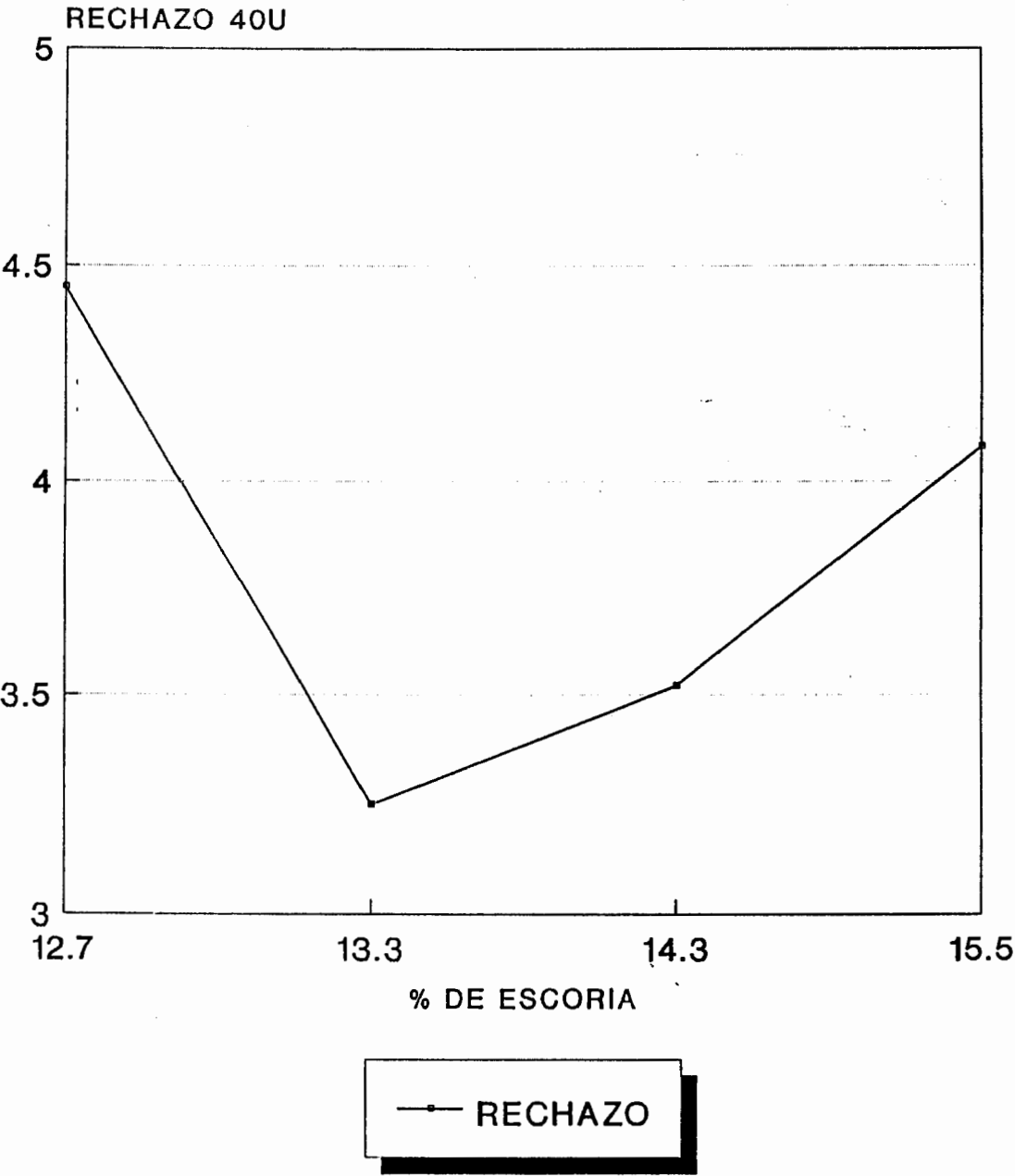
CEMENTO TIPO III % DE ESCORIA VS BLAINE



—●— BLAINE

CPR

CEMENTO TIPO III
% DE ESCORIA VS RECHAZO 40U



CPR

CONCRETO CON CEMENTO SIDERURGICO

María del Pilar Velasco B. (*)

RESUMEN

El Concreto con cemento siderúrgico que se presenta en este trabajo incluye la descripción del proceso de fabricación y comportamiento físico-químico del cemento siderúrgico, obtenido a partir de la adición de las escorias del Alto Horno de Acerías Paz del Río, así como una breve historia de su utilización.

En los capítulos 2 y 3 se incluyen propiedades, procedimientos y resultados obtenidos en la investigación a nivel de laboratorio y se compara el concreto con cemento siderúrgico con el concreto con cemento convencional.

El último capítulo contiene información obtenida de la aplicación práctica en proyectos de ingeniería de concretos con diferentes porcentajes de escoria.

Se incluyen gráficas que permiten observar y concluir sobre el comportamiento térmico, físico y mecánico de estos materiales.

(*) Ingeniera Civil, Universidad Javeriana, Bogota D.E.Colombia.

María del Pilar Velasco Bolaños, Ingeniera Civil recibida en la Universidad Javeriana, Bogotá, D.E., Colombia. Ingeniera en entrenamiento Material Service Co. Chigago USA, ex-Directora Comercial de Concretos Premezclados S.A. y Metroconcreto S.A. en Bogotá, Colombia.

1. INTRODUCCION

Como material de construcción, parece que las escorias siderúrgicas se utilizaron por primera vez en Inglaterra, algunos años después de 1830. Posteriormente Vicat (1786-1861), al analizar el comportamiento de este cemento en los morteros, notó la analogía entre la composición química de las escorias y el cemento portland. Más tarde, en Alemania, Michaelis mezcló las escorias con cal formando conglomerantes y hacia 1862 E. Langen las granuló facilitando su evacuación del alto horno. Kühl descubrió la arena de escorias y en 1880 aparecieron los primeros cementos después de mezclar la escoria granulada finamente molida con el clinker portland.

El empleo generalizado de estos concretos aparece después de la segunda guerra mundial, a partir de los trabajos realizados en agua de mar por los alemanes.

La activación de la arena de escorias por los sultafos fue descubierta en 1907, dando origen a los cementos sobresulfatados.

A partir de 1928 los cementos de escoria figuraron en las normas francesas y en 1967 más del 60 % de la totalidad del cemento francés contenía escorias.

El cemento portland de escoria de alto horno se elabora desde hace varios años en Escocia, E.E.U.U., Alemania, Francia, Bélgica, Inglaterra, Sudáfrica, Chile, Venezuela y Colombia, entre otros países.

2. CEMENTO SIDERURGICO

El cemento de escoria o siderúrgico resulta de la molienda conjunta del clinker portland, escorias de alto horno granuladas y piedra de yeso. El contenido de escoria puede variar entre el 25 % y el 70 %, aunque en algunos casos puede superarse este último valor.

2.1. Características del cemento siderúrgico

Las propiedades de los cementos siderúrgicos dependen del contenido de escoria, aunque también de la finura alcanzada en la molienda. A continuación se resumen las características más importantes de estos cementos.

2.1.1. Fraguado y endurecimiento

Los cementos siderúrgicos presentan tiempos de fraguado algo mayores a los del cemento convencional. Debido a la ganancia de resistencia más lenta, se requiere un cuidado más intensivo y prolongado en la etapa de curado, durante la cual se debe evitar al máximo la desecación.

2.1.2. Comportamiento con los aceros

Se ha creído que los sulfuros provenientes de la escoria granulada y por consiguiente presentes en los cementos de escoria, puedan dar lugar a ácidos susceptibles de atacar los hierros de los concretos armados. Pero estos sulfuros fijan el oxígeno bajo formas de sulfatos antes que afecte a los aceros.

2.1.3. Bajo calor de hidratación

El calor producido por la reacción del agua con el cemento es menor para los cementos que contienen escorias de alto horno, por lo tanto se reduce el riesgo de formación de fisuras de origen térmico en los concretos elaborados con este tipo de cemento.

El calor de hidratación en este cemento es bajo y disminuye en la medida que los cementos contengan mayor cantidad de escorias como se puede ver en la Figura 1.

La capacidad de resistencia a compresión y la velocidad de endurecimiento o incluso el mismo desarrollo de las resistencias se mueven en sentido inverso a la cantidad de calor desarrollado en la hidratación.

2.1.4. Estabilidad de volumen

El reducido aumento de temperatura del concreto durante su fraguado, impide que se presenten variaciones de volumen en la masa del concreto, lo que se traduce en una disminución notable de fisuras y grietas proporcionando un material apto para ser empleado en hormigones masivos.

2.1.5. Aumento de resistencia final

La actividad química de las escorias hace que la reacción de hidratación se prolongue durante un período superior al de los cementos corrientes produciendo una ganancia de resistencia a largas edades. En la Figura 2 se grafica la evolución de resistencia a compresión para cementos CPR tipo I, S y III.

2.1.6. Resistencia al ataque químico

La cal liberada en el proceso de hidratación del clinker es estabilizada por la escoria evitando así su solubilización de la cal por los ácidos o las aguas puras, manteniendo un medio favorable para la conservación de los hierros en el concreto reforzado.

2.1.7. Resistencia a los sulfatos

Las escorias de alto horno permiten una reducción considerable de la formación de sulfoaluminato de calcio, con lo que se evita la desintegración del concreto por ataque químico, manteniendo un medio favorable para la conservación de los hierros en el concreto reforzado.

2.1.8. Impermeabilidad

Las características físico-químicas del cemento siderúrgico permiten obtener concretos y morteros de mayor impermeabilidad que la que se puede lograr con otros cementos.

3. PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO SIDERURGICO EMPLEADO POR ACERIAS PAZ DEL RIO

3.1. Materiales utilizados

3.1.1. Clínter portland

El clínter portland es elaborado por vía seca, completándose las operaciones usuales hasta el enfriado del mismo a la salida del horno rotativo.

3.1.2. Escoria de alto horno granulada

Luego del proceso de granulación, la escoria es sometida a un proceso de secado y de separación magnética, para posteriormente ser almacenada.

3.1.3. Yeso

El yeso o piedra de yeso, se adiciona para regular los procesos de fraguado, evitando el fenómeno de fraguado relámpago o instantáneo.

3.2. Molienda

El circuito de molienda incluye la dosificación de las proporciones deseadas de los diferentes constituyentes, controladas en la alimentación del molino a través de bandas dosificadoras dotadas de celdas de carga como instrumento de control. Periódicamente, cada 8 horas, se determina la pérdida por calcinación y el porcentaje de escoria como parámetro adicional de control.

3.3. Niveles de remplazo

Los porcentajes de escoria utilizados en la producción de Cementos Paz del Río varían de acuerdo con el tipo de cemento y las especificaciones previas a su aplicación.

Denominación	Expendio	Contenido de escoria
CPR tipo I	en sacos	36 al 40 %
CPR tipo S	a granel	70 %
CPR tipo III	a granel	15 %

3.4. Costos de producción del cemento siderúrgico

El siguiente es un análisis de costos unitarios en dólares por tonelada de cemento tipo S producido, calculado en el mes de diciembre de 1990 para el cemento siderúrgico producido en Colombia.

$$CUC \text{ (U\$S)/t} = CV + CF$$

$$CV = \frac{[CVq + CVc + CVy + CVcto + CVd]}{(1 - \% \text{ pérdidas})}$$

CUC	=	costo unitario de cemento (U\\$S/t)
CF	=	costo fijo
CV	=	costo variable de cada centro de costos
q	=	porcentaje de clinker en la mezcla
c	=	porcentaje de escoria en la mezcla
y	=	porcentaje de yeso en la mezcla
cto	=	cemento
d	=	despacho
pérdidas	=	pérdidas de cemento por manejo

remplazando,

$$CV = \frac{[(16.69)0.25 + (3.45)0.7 + (19.69)0.05 + 4.126 + 6.88]}{0.9825}$$

$$CV = 18.9 \text{ U\$S/t}$$

$$CF = 10.126.000 \text{ U\$S/año}$$

Si toda la producción de 600.000 t fuera cemento siderúrgico:

$$CF = \frac{10.128.000}{600.000} = 16,8 \text{ U\$S/t}$$

$$CUC = 18.9 + 16.8 = 35.78 \text{ U\$S/t}$$

3.5. Usos de los cementos siderúrgicos en obras civiles

Entre los antecedentes de obras civiles en las que se emplearon los cementos siderúrgicos elaborados por Cementos Paz del Río podemos citar:

- * Proy. Hidroeléctrico del Guavio CPR I y CPR S
- * Canalización del Río Tunjuelo CPR "especial"
- * Proy. hidroeléctrico de San Carlos-Jaguas CPR S

4. CONCRETO SIDERURGICO vs. CONCRETO CONVENCIONAL

4.1. Trabajo experimental con la Universidad Javeriana

En 1985, en colaboración con la Universidad Javeriana, se realizó un estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico de concretos elaborados con los mismos materiales pero empleando los cementos designados como CPR I y CPR S.

Se adoptaron dos asentamientos en el cono de Abrams, 7 y 15 cm y se dosificaron concretos con contenidos de cemento variables entre 200 y 500 kg/m³. Se evaluaron diferentes parámetros, tanto en estado fresco como endurecido.

4.1.1. Materiales

4.1.1.1. Cemento

Se utilizó cemento CPR I (entre 35 y 40 % de escoria de alto horno) y CPR S (70 % de escoria). Sus propiedades físicas, químicas y mecánicas se indican en Tablas 1 a 3.

4.1.1.2. Agregados

Se utilizaron materiales triturados de cantera. La grava de Tamaño máximo 25 mm con textura áspera y forma angulosa, aunque con algún porcentaje de partículas redondeadas y la arena cuarzosa de Módulo de finura 3.19.

4.1.1.3. Agua y aire

Se utilizó agua procedente del acueducto de la ciudad, apta para ser utilizada como agua de amasado en hormigones y morteros. El contenido de aire de las mezclas se estimó en el 1%, aunque no se verificó experimentalmente.

4.1.2. Diseño y proporciones de las mezclas

Para la dosificación de los concretos se siguió el método de Füller, considerado apto dadas las características no homogéneas de los materiales. La cantidad de agua de las mezclas se ajustó para obtener los asentamientos previstos.

El contenido de cemento se fijó en 200, 300, 400 y 500 kg/m³, para contemplar mezclas ricas y pobres.

En las Tablas 6 y 7 se resumen las cantidades empleadas de cada uno de los materiales en los

concretos con cemento CPR I y S, para los asentamientos de 7 y 15 cm respectivamente.

4.1.3. Ensayos sobre concreto fresco.

Se verificó el asentamiento por medio del ensayo de Tronco de Cono de Abrams (ASTM C-148-66; ICONTEC 396), asegurando que éste se mantuviera en los valores prefijados de 7 y 15 cm, con una tolerancia de 1 cm.

Se moldearon cilindros de 10 x 20 cm para evaluar la resistencia a la compresión y tracción indirecta y cilindros de 15 x 30 cm para determinar el módulo de elasticidad estático en compresión. Para realizar ensayo de flexión se moldearon vigas de 15 x 15 x 60 cm.

4.1.4. Ensayos en estado endurecido y comportamiento mecánico

4.1.4.1. Resistencia a la compresión

Se ensayó una pareja de cilindros por mezcla, para cada una de las siguientes edades: 3, 7, 14, 28, 56 y 91 días. Los resultados se muestran en las Tablas 8 y 9.

4.1.4.2. Resistencia a la flexión y tracción indirecta.

Se determinó la resistencia a la tracción indirecta y el módulo de rotura por flexión, carga en los tercios, a la edad de 28 días. Los resultados para los concretos con 7 cm de asentamiento se informan en Tabla 10 y los correspondientes a las mezclas con 15 cm de asentamiento, en la Tabla 11.

4.1.4.3. Módulo de elasticidad estático

Se evaluó sobre probetas cilíndricas de 15 x 30 cm a la edad de 28 días. Se determinó el Módulo tangente en un punto de la curva (50 % de la tensión de rotura) y el Módulo secante entre dos puntos de la misma. Los valores obtenidos se resumen en Tabla 12.

4.1.5. Interpretación de resultados

Al comparar la resistencia a la compresión entre mezclas con diferentes asentamientos se encontraron valores mayores para las realizadas con 7 cm. Cuando se compararon los dos tipos de cementos para las mezclas con contenidos unitarios de cemento de 300

y 500 kg/m³, se obtuvo un valor mayor para los concretos elaborados con cemento tipo I, aunque para 300 kg/m³ el incremento fue menor y uniforme. Para 400 y 500 kg/m³, los incrementos fueron mayores.

En el caso de los asentamientos de 15 cm y para todas las mezclas pobres en cemento tipo I y S (200 kg/m³ y algunas de 300 kg/m³), se observa un comportamiento similar. A edades mayores, el concreto fabricado con cemento siderúrgico supera al elaborado con cemento tipo I.

En lo que respecta a la relación agua/cemento vs. resistencia a la compresión, se obtuvieron valores mayores de resistencia para el caso del concreto siderúrgico con relaciones agua/cemento altas, si se las compara con los valores que presentó el concreto convencional en iguales condiciones.

En lo que respecta al módulo de elasticidad, no se observaron diferencias significativas entre los dos cementos.

4.2. Proyecto hidroeléctrico del Guavio

Entre 1986 y 1989 se ha empleado en este proyecto la mayor cantidad de cemento siderúrgico, especialmente para concretos masivos (bajo calor de hidratación) y para concretos resistentes al ataque químico.

Guavio está ubicado en el Departamento de Boyacá, a 120 km de Bogotá. El objetivo es restituir el caudal al Río Guavio y formar un embalse de 1140 millones de metros cúbicos. El volumen de la presa es de 17.8 millones de metros cúbicos. Entre sus obras, se incluye a una presa de enrocado y núcleo de arcilla de 250 m de altura, 390 m de longitud de cresta, túnel de desviación de 1500 m, túnel auxiliar, rebosadero con estructura de control con compuertas y dos túneles de 560 m de longitud cada uno y 4 m de diámetro. La primera etapa se construyó para una capacidad final de 1600 megavatios y se instalaron equipos para una potencia de 1000 megavatios.

4.2.1. Materiales utilizados

Se utilizaron 38.000 toneladas de cemento, entre tipo I y tipo S. También se utilizó un cemento tipo III de otra fábrica, sin escorias. La especificación indicaba utilizar cemento siderúrgico para posibilitar una temperatura de colocación de 20 °C en los concretos de la Estructura de Control y de la zona de blindaje de la presa.

Los agregados se obtuvieron a partir de la roca ubicada en una cantera cerca del Río Guavio; se utilizaron dos fracciones de agregado grueso, de 40 mm y 20 mm de tamaño máximo.

Se utilizaron aditivos plastificantes retardantes y normales en algunos concretos para investigaciones de la obra.

4.2.2. Concretos: diseños y aplicaciones

Se utilizaron 170.000 m³ de concreto, entre los que se incluye los elaborados con cemento siderúrgico (CPR S). De las numerosas dosificaciones ajustadas, merece destacarse los concretos con tamaño máximo de 40 mm, especificados para una resistencia a compresión a 28 días de 211 kg/cm². En la Tabla 13 se resumen las proporciones de los concretos de estas características.

Se utilizaron principalmente para:

- a) La estructura de control y revestimiento del túnel auxiliar
- b) El revestimiento de las galerías de las cámaras de válvulas
- c) Los estribos de la presa-casetas de instrumentación de puentes de las carreteras
- d) La conducción
- e) La central subterránea o caverna de máquinas, en los macizos de los caracoles de las unidades de generación (ver ensayos adicionales para medir calor de hidratación).
- f) La gola de la estructura de control
- g) Concretos masivos del blindaje de la presa.

4.2.3. Comportamiento e investigaciones

4.2.3.1. Contenido de aire y resistencia a la compresión.

Se realizaron mediciones sobre los concretos con cemento tipo S e I, para contenidos unitarios de cemento de 330, 285, 290 y 250 kg/m³. El contenido de aire promedio en las mezclas fue de 1.2 %, sin presentar mayor variación entre las mezclas con diferentes calidades de cemento.

La resistencia a la compresión tuvo el comportamiento que se indica en Tabla 14.

Se obtuvo una resistencia de 287 kg/cm², o sea 1,36 f'c. La desviación estandar fue de 42 kg/cm²

y el coeficiente de variación de 14.6, lo que permite concluir sobre su uniformidad.

En cuanto a comparar los cementos CPR S y CPR I, con el primero se obtuvo un 70 % de la resistencia obtenida con el concreto elaborado con cemento CPR I, para edades entre 1 y 3 días. A 1 día de edad, el concreto con CPR S desarrolló un 27 % de la resistencia del concreto con CPR I.

4.2.4. Desarrollo del calor de hidratación

Se midió la elevación de temperatura en condiciones adiabáticas, utilizando un cubo de 0.5 m³. La temperatura de colocación de la mezcla se modificó agregando escarcha de hielo. Se evaluaron mezclas con 300 kg/m³ de cemento y una resistencia especificada de 210 kg/cm², asentamiento entre 6 y 10 cm. Los resultados finales se indican en Tabla 14.

Es clara la ventaja de utilizar CPR S (70 % de escoria) para disminuir el riesgo de fisuraciones de origen térmico.

4.3. Canalización del Río Tunjuelito Bogotá

El proyecto, llamado "Construcción Interceptor Tunjuelo Medio y las Respectivas Estructuras y Elementos", se construyó al sur de la ciudad de Bogotá y forma parte del plan de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Consistió básicamente en la colocación de un sistema de conducción de aguas negras y servidas, para lo que se colocó una tubería de concreto reforzado paralela al Río Tunjuelito, las estructuras de interconexión de embalses, pozos de ventilación, etc.

4.3.1. Especificaciones

Los concretos estarían en contacto directo con aguas negras, gases y vapores. Además, las aguas de contacto estaban contaminadas por las aguas o lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana. Se previó también el ataque por sulfatos contenidos en las aguas.

Por estas y otras características particulares de la obra, se planteó la exigencia de un cemento de alta resistencia inicial y resistente al ataque químico. Se fabricó un cemento CPR ESPECIAL, con un contenido de escorias entre 42 y 45 %, que finalmente se utilizó en todo el proyecto.

4.3.2. Características de los concretos utilizados.

4.3.2.1. Concreto para los tubos

Resistencia especificada:	350 kg/cm ²
Asentamiento:	0 cm
Cemento CPR S Especial	430 kg/m ³
Resistencia a la compresión	
1 día:	150 kg/cm ²
3 días:	230 "
7 días:	338 "
28 días:	465 "

4.3.2.2. Otros concretos convencionales

Se dosificaron otros concretos convencionales, algunos aptos para ser bombeados, utilizando aditivos plastificantes, utilizando cemento CPR S y CPR I. En todos los casos, es de destacar que se cumplieron las especificaciones establecidas.

4.3.2.3. Apreciaciones acerca del comportamiento en obra

a) El cemento CPR S es de características especiales, ofrece una alta resistencia a los sulfatos, a la vez que tiene un bajo calor de hidratación que elimina la formación de fisuras de origen térmico.

b) El cemento CPR S cumple con las especificaciones de las normas ICONTEC 121 y 321 (ASTM C-595, Tipo S).

c) Se observó que las resistencias a la compresión de los concretos producidos con este cemento se alcanzan más lentamente que las obtenidas para concretos elaborados con cementos convencionales (en particular con respecto a cementos tipo III). Sin embargo, a largo plazo, se alcanzan resistencias superiores.

d) En obra no fue necesario utilizar aditivos, aunque en laboratorio se dosificaron y ajustaron distintas mezclas. En todos los casos se observó un comportamiento de acuerdo a lo previsible, esto es, los aditivos comerciales ensayados son compatibles con los cementos siderúrgicos.

4.3.2.4. Otros antecedentes

Entre los diferentes antecedentes no descriptos, merece destacarse el Proyecto

Hidroeléctrico San Carlos-Jaguas, en el que se utilizó 80.000 m3 de concreto convencional y 5000 m3 de concreto lanzado.

El 90 % fue concreto convencional con cemento tipo I y, para concretos masivos se utilizó cemento CPR S, por su menor calor de hidratación.

Tabla 1: Composición química

Componentes	CPR I (promedio)	CPR S (promedio)
Oxido de magnesio (MgO)	1.25	1.05
Trióxido de azufre (SO ₃)	1.85	2.00
Oxido de calcio (CaO)	50.35	57.40
Oxido de silicio (SiO ₂)	29.95	25.90
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	13.60	9.45
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	1.45	2.30
Oxido de sodio (Na ₂ O)	0.15	0.09
Oxido de manganeso (Mn ₂ O ₃)	----	----
Oxido de titanio (TiO ₂)	----	----
Oxido de fósforo (P ₂ O ₂)	----	----
Pérdida por calcinación	0.32	0.70
Residuo insoluble	0.95	1.80

Tabla 2: Propiedades físicas

	CPR I	CPR S
Densidad (g/cm ³)	2.97	2.93
Finura Blaine (m ² /kg)	379	325
Expans. en autoclave	0.01	0.05
Fraguado inicial (h:min)	2:49	3:30
Fraguado final (h:min)	4:06	4:30

Tabla 3: Propiedades mecánicas, resistencia a la compresión de mortero ensayado sobre probetas cúbicas de 50 mm de lado.

Edad (días)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	
	CPR I	CPR S
3	16.4	9.9
7	23.4	16.4
28	39.2	39.3

Tabla 4: Propiedades físicas de la arena y la grava

		Grava	Arena
Masa unitaria suelta	kg/m3	1407	1751
Masa unitaria compacta	"	1534	1827
Densidad aparente	g/cm3	2.47	2.50
Densidad nominal	"	2.66	2.60
Absorción	%	3.0	2.0
Desgaste (Los Angeles)	%	34.5	----

Tabla 5: Distribución granulométrica para la grava y la arena

GRAVA			ARENA		
Tamiz Pulg.	mm	Retenido %	Tamiz #	mm	Retenido %
1	25.4	0.0	4	4.76	18.4
3/4	19.0	17.0	8	2.38	38.6
1/2	12.7	52.0	16	1.19	50.0
3/8	9.5	76.0	30	0.60	57.6
# 4	4.7	99.0	50	0.30	67.6
Fon.	--	100.0	100	0.15	87.1
			200	0.07	96.9
			Fon.	----	100.0

Tabla 6: Dosificación de los hormigones para As. = 7
cm y CPR S/CPR I

Material kg/m3	Designación de los concretos			
	I / A	J / B	K / C	L / D
Cemento	200	300	400	500
Agua	198/221	196/189	199/185	214/204
Ag. Grueso	864/976	859/874	834/851	834/851
Ag. Fino	936/1057	793/807	684/697	600/612
Aire (est)	1 %	1 %	1 %	1 %
Agua/cemto	0.99/0.98	0.65/0.64	0.50/0.46	0.43/0.41

Tabla 7: Dosificación de los hormigones para 15 cm de
asentamiento y CPR S/CPR I

Material kg/m3	Designación de los concretos			
	M / E	N / F	O / G	P / H
Cemento	200	300	400	500
Agua	202/203	202/193	211/197	220/210
Ag. Grueso	786/827	808/850	823/846	827/847
Ag. Fino	858/896	746/785	686/694	602/609
Aire (est)	1 %	1 %	1 %	1 %
Agua/cemto	1.01/1.04	0.68/0.66	0.53/0.49	0.44/0.42

Tabla 8: Resultados de Resistencia a la compresión, en kg/cm², sobre probetas cilindros de 10 x 20 cm, para los concretos con As = 7 cm.

Edad (días)	Cemento CPR I			
	A	B	C	D
3	23.3	73.4	152.8	172.0
7	51.9	135.8	232.3	267.6
14	78.2	172.7	328.5	353.5
28	119.4	249.1	388.0	436.0
56	162.7	314.0	439.0	503.4
90	---	370.0	482.0	528.0

Edad (días)	Cemento CPR S			
	E	F	G	H
3	12.3	46.4	61.4	93.9
7	34.3	80.7	125.6	132.7
14	77.9	158.2	190.2	201.6
28	148.9	237.1	289.1	301.3
56	207.6	313.6	385.7	390.0
90	238.0	351.0	421.0	425.0

Tabla 9: Resultado de resistencia a compresión en kg/cm², sobre cilindros de 10 x 20 cm, para concretos con asentamiento de 15 cm.

Edad (días)	Cemento CPR I			
	I	J	K	L
3	23.0	56.2	92.6	105.6
7	47.0	101.5	160.2	174.6
14	69.5	147.7	226.1	250.6
28	106.7	205.4	289.6	321.8
56	142.6	251.6	335.1	398.4
90	---	306.0	381.0	416.0

Edad (días)	Cemento CPR S			
	M	N	O	P
3	18.6	21.7	56.1	68.9
7	41.3	51.3	82.7	111.5
14	66.5	103.2	156.9	170.7
28	148.7	192.4	247.1	248.6
56	201.8	259.5	321.0	348.5
90	216.0	294.0	344.0	382.0

Tabla 10: Valores de rotura por flexión (F) en kg/cm² y valores de resistencia a la tracción (T) en kg/cm² a 28 días para concretos con 7 cm de asentamiento.

	Cemento CPR I				Cemento CPR S			
	A	B	C	D	E	F	G	H
(F)	14.4	30.1	33.9	47.7	22.4	34.5	32.7	33.2
(T)	10.0	18.5	24.8	25.5	13.7	18.8	20.5	22.7

Tabla 11: Valores de rotura por flexión (F) en kg/cm² y valores de resistencia a la tracción (T) en kg/cm² a 28 días para concretos con asentamiento = 15 cm.

	Cemento CPR I				Cemento CPR S			
	A	B	C	D	E	F	G	H
(F)	----	27.4	36.2	37.3	17.7	30.8	29.7	36.4
(T)	9.2	11.4	14.3	22.9	15.7	11.1	16.1	18.9

Tabla 12: Valores del Módulo elástico (E) en kg/cm² x 1000, Resistencia a la compresión a 28 días (f'c) y la constante (K) para concretos con CPR I y CPR S y asentamientos de 7 y 15 cm.

Asentam	Cemento CPR I			
7 cm	A	B	C	D
(E)	105.6	157.7	178.9	357.7
(f'c)	257.6	224.7	356.5	268.9
(K)	6553	10519	9472	34064*

Asentam	Cemento CPR S			
7 cm	E	F	G	H
(E)	357.7	154.4	178.8	367.9
(f'c)	117.9	222.5	253.0	246.2
(K)	14220	11989	8615	23447*

Asentam	Cemento CPR I			
15 cm	I	J	K	L
(E)	477.3	155.4	132.9	124.9
(f'c)	237.1	181.0	253.6	288.8
(K)	30992*	11549	8342	7350

Asentam	Cemento CPR S			
15 cm	M	N	O	P
(E)	111.0	118.1	113.5	204.4
(f'c)	125.9	182.5	240.3	246.9
(K)	9899	8742	7255	13008

* Valores descartados para el cálculo de los promedios

Tabla 13: Dosificación de mezclas para T.M. = 40 mm, 211 kg/cm² de resistencia especificada y cementos CPR I y CPR S.

Materiales kg/m ³	CEMENTO CPR S		CEMENTO CPR I	
	227A	230	239	217
Cemento	280	350	330	270
Agua	158	203	195	152
Agreg.Gr.(3/4")	575	520	550	555
(1 1/2")	382	340	366	450
Arena	955	880	916	933
Aditivo (l/m ³)				
Plastif.normal	1	---	---	0.9
Plast.Reductor	2	---	---	1/8
Asentamiento	14 cm	11 cm	14 cm	11 cm
Relación w/c	0.56	0.58	0.59	0.56

Tabla 14: Resistencia a la compresión de las mezclas en kg/cm² para CPR S y porcentaje con respecto a la edad del concreto (según figura 15).

Edad en días	Cant. de cemento por m ³ de concreto				%
	260	280	300	320	(Prom.)
1	30	30	32	35	10
3	45	65	75	90	30
7	135	145	160	175	60
28	245	250	260	280	100

Tabla 15: Temperaturas máximas alcanzadas en el centro del cubo en condiciones adiabáticas, sometido a elevación de temperatura.

CEMENTO CPR	I	I + hielo	S	S + hielo
Temp.Max (°C)	64	54	54	40
Temp.Ambiente	20	21	20	21
Días de moldeo a la temp.máx.	1.5	2.5	1.4	2.5

REFERENCIAS

- [1] Concreto con Cemento Siderúrgico.
Ingenieros María del Pilar Velasco B, Luis Alfredo López B.. Proyecto de Grado. Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia. 1985
- [2] INGETEC. Proyecto Hidroeléctrico del Guavio. Ing. Javier Pinilla, Ing. Germán Arias Lewin, Ing. Luis Francisco Eslava. Bogotá, Colombia.
- [3] Informes Proyecto Hidroeléctrico Guavio.
Consorcio Vianini-Entrecanales. Bogotá, Colombia.
- [4] Dragados y Construcciones de España. Informes Proyecto Canalización del Río Tunjuelo. Bogotá, Colombia.

Fig.1 Calor de Hidratacion

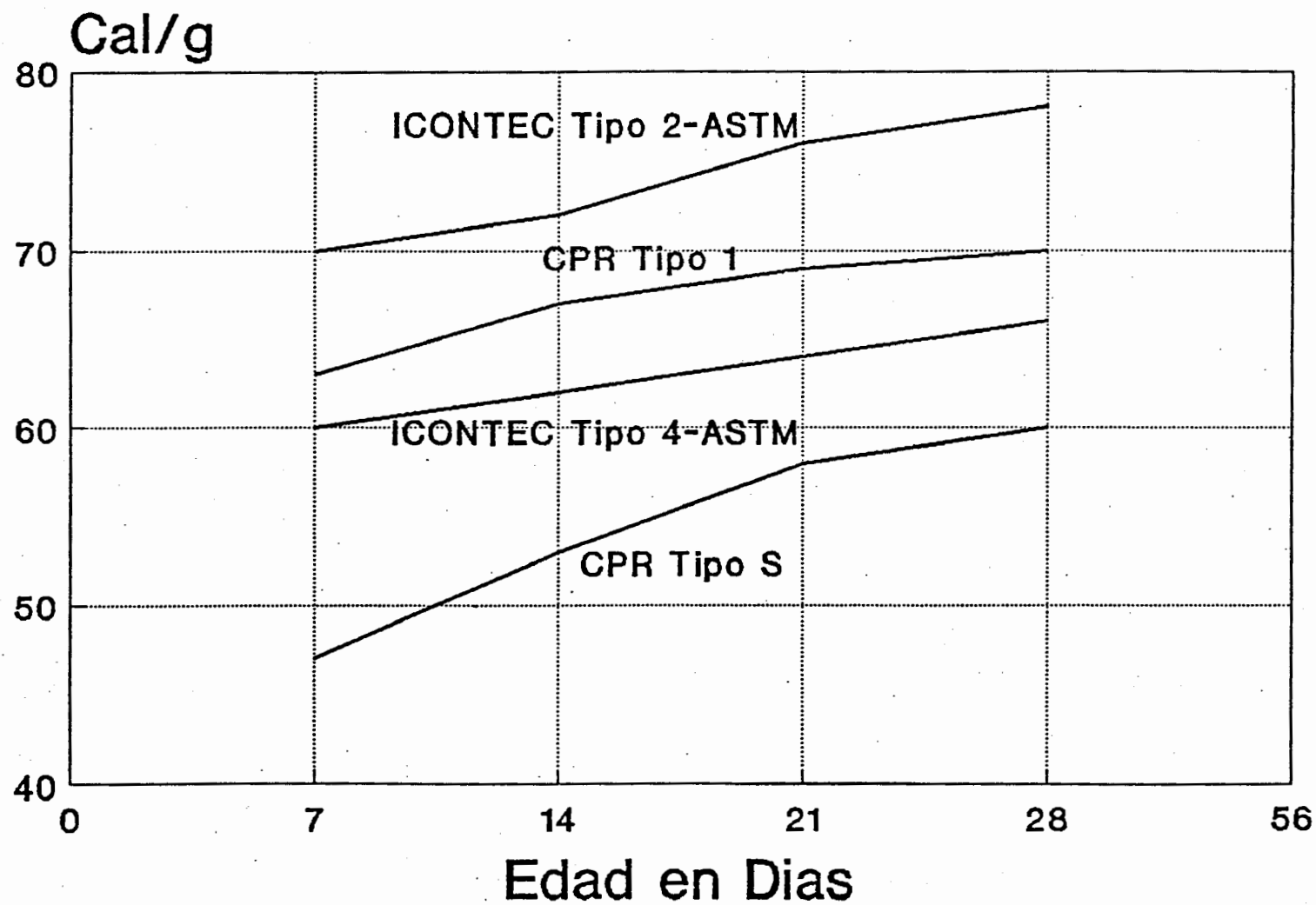


Fig. 2. Resistencia a Compresion
Cementos Paz del Rio, Tipo 1,3 y S

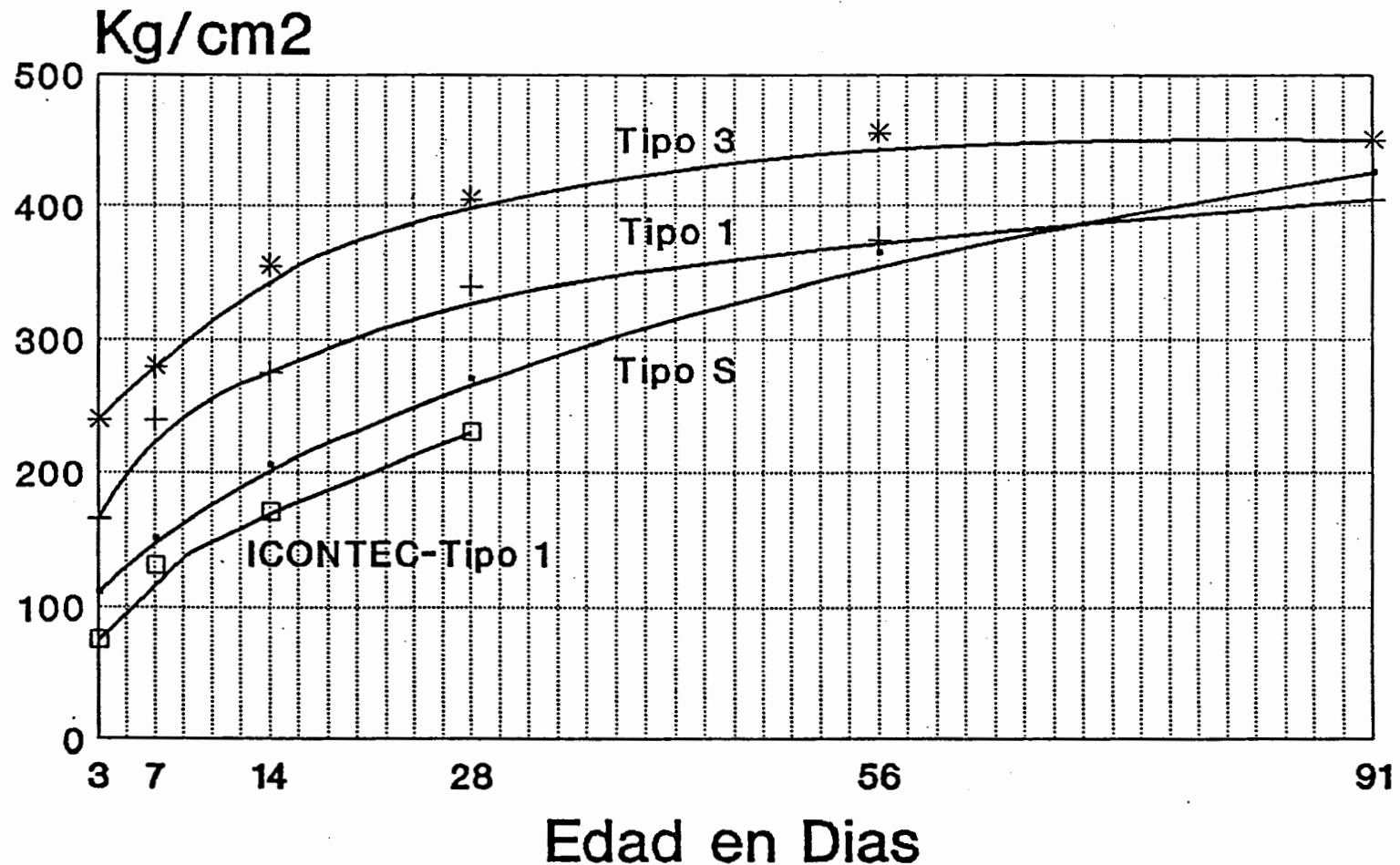


Fig.3. Combinacion de Agregados

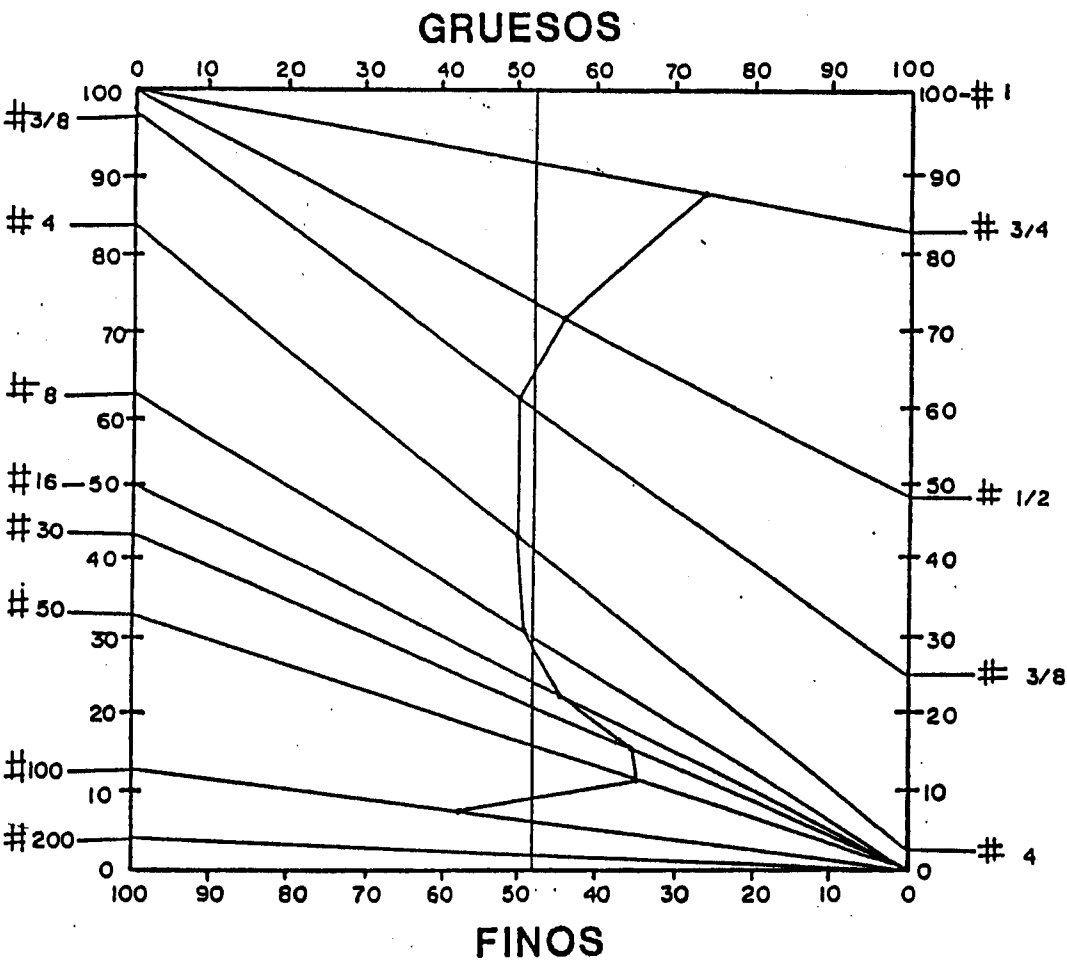


Fig.4. Agregados Sobre Füller

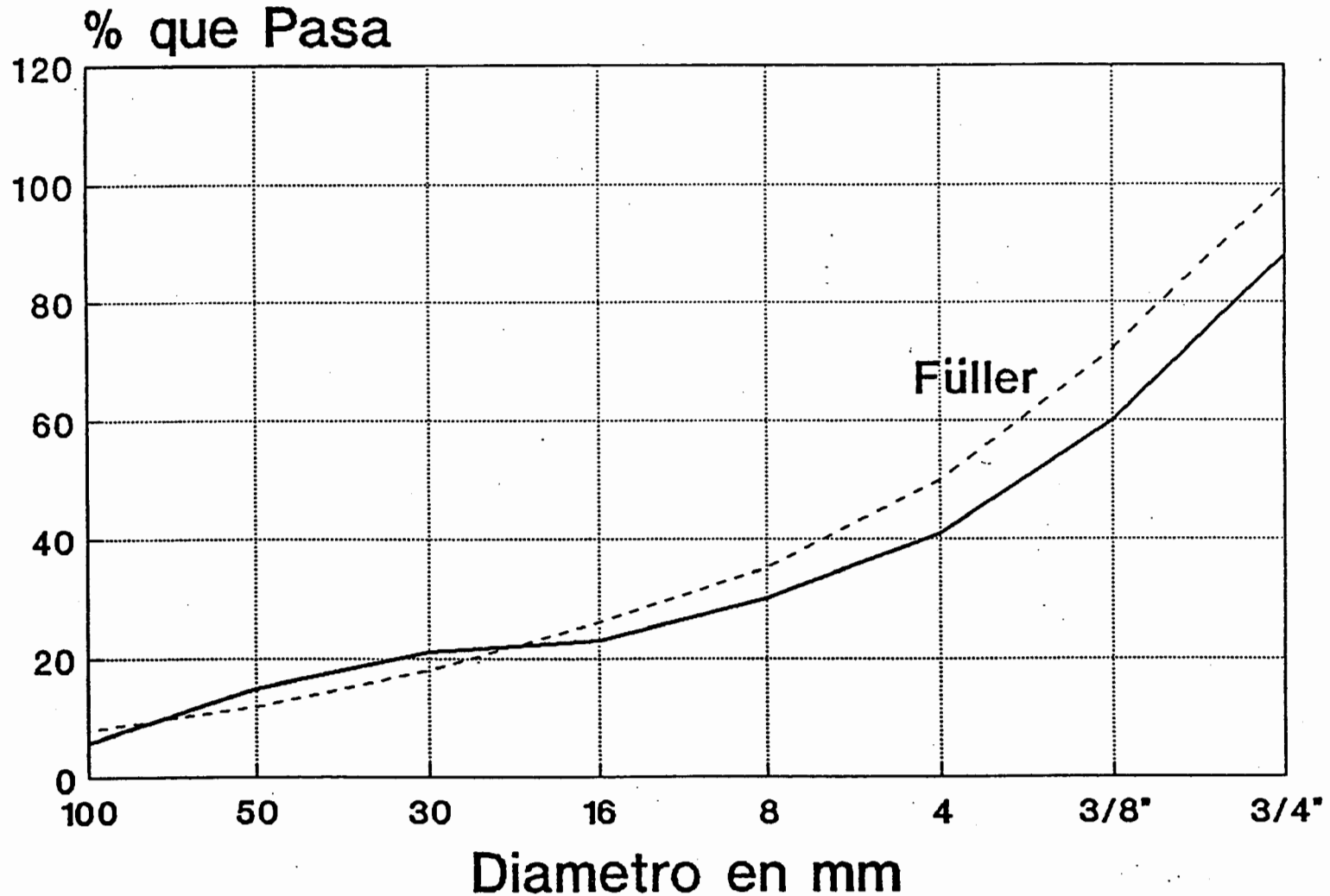


Fig. 5. Agua vs. Tamano Max (25 mm)

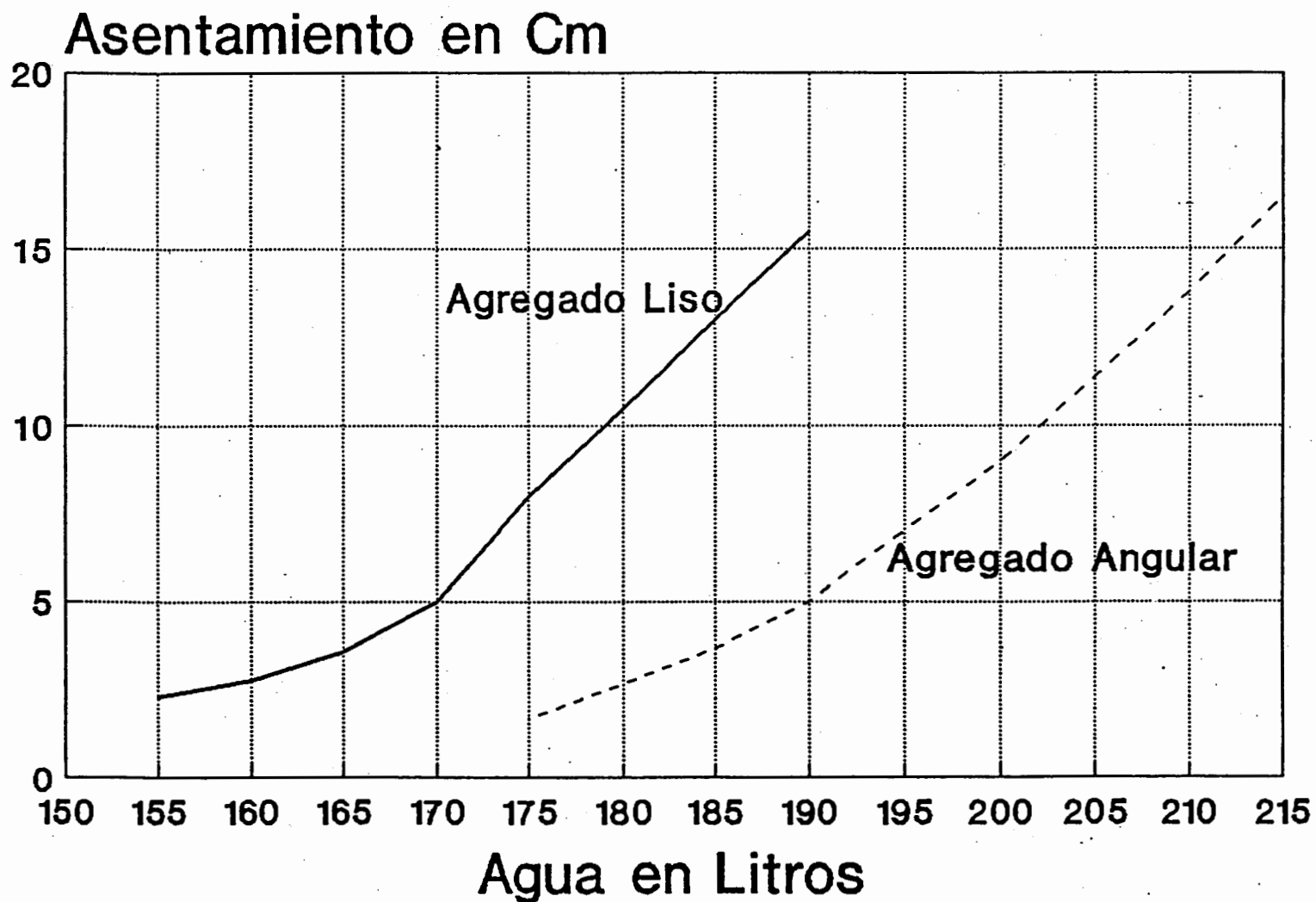


Fig. 6 Resistencia a Compresion CPR 1 (7 cm)

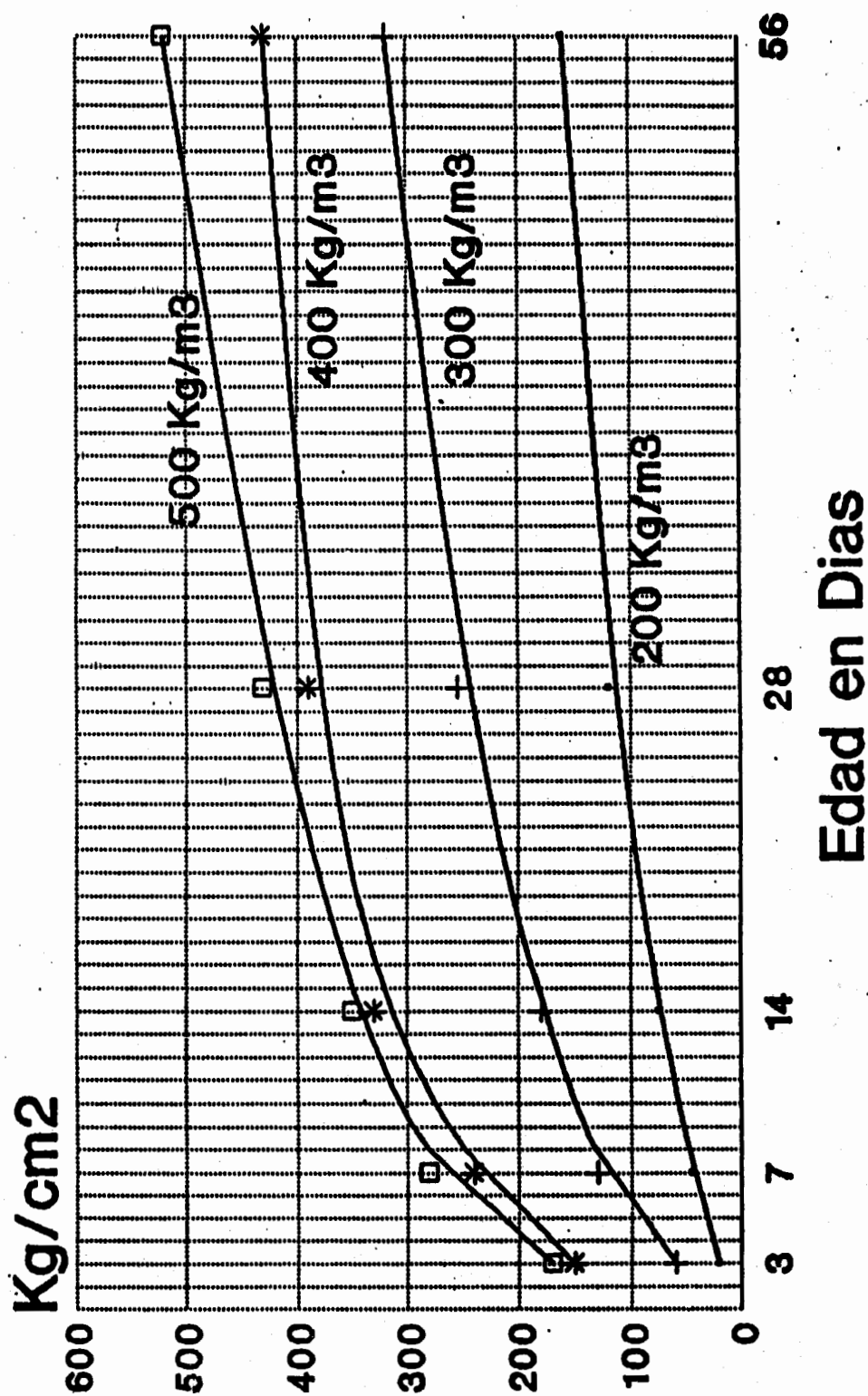


Fig. 7 Resistencia a Compresion
CPR S (7 cm)

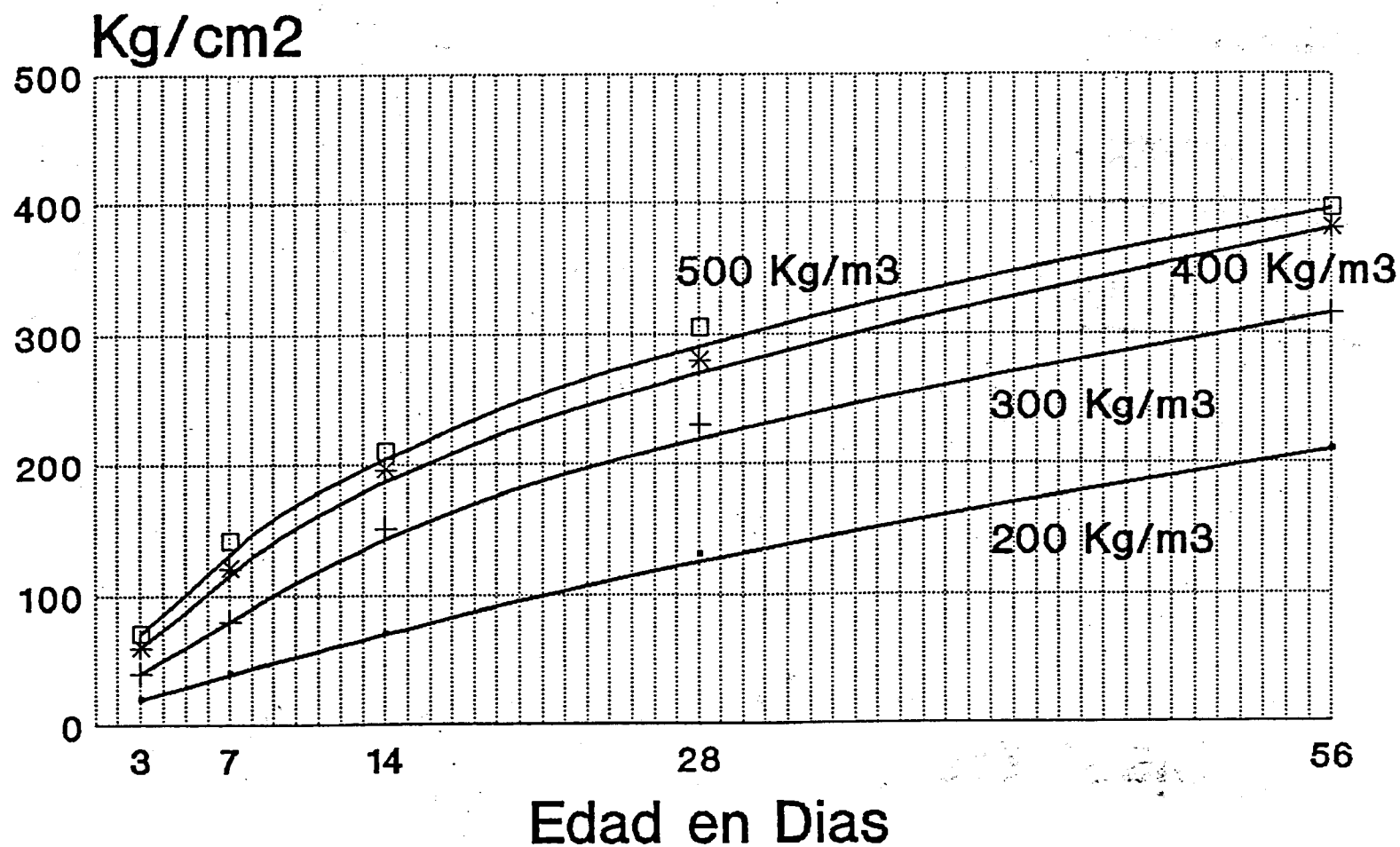


Fig. 8 Resistencia a Compresion
CPR 1 (15 cm)

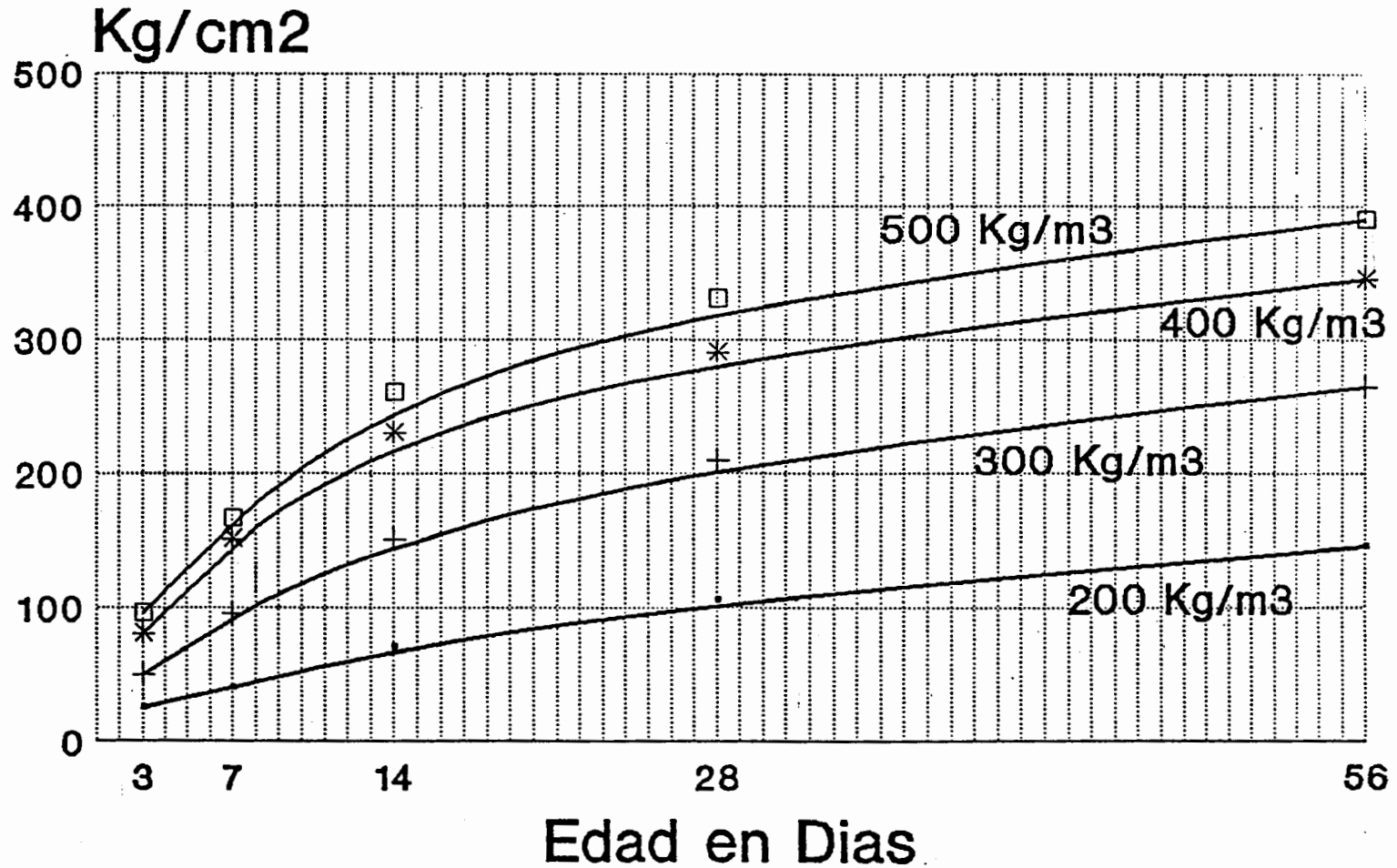


Fig. 9 Resistencia a Compresion
CPR S (15 cm)

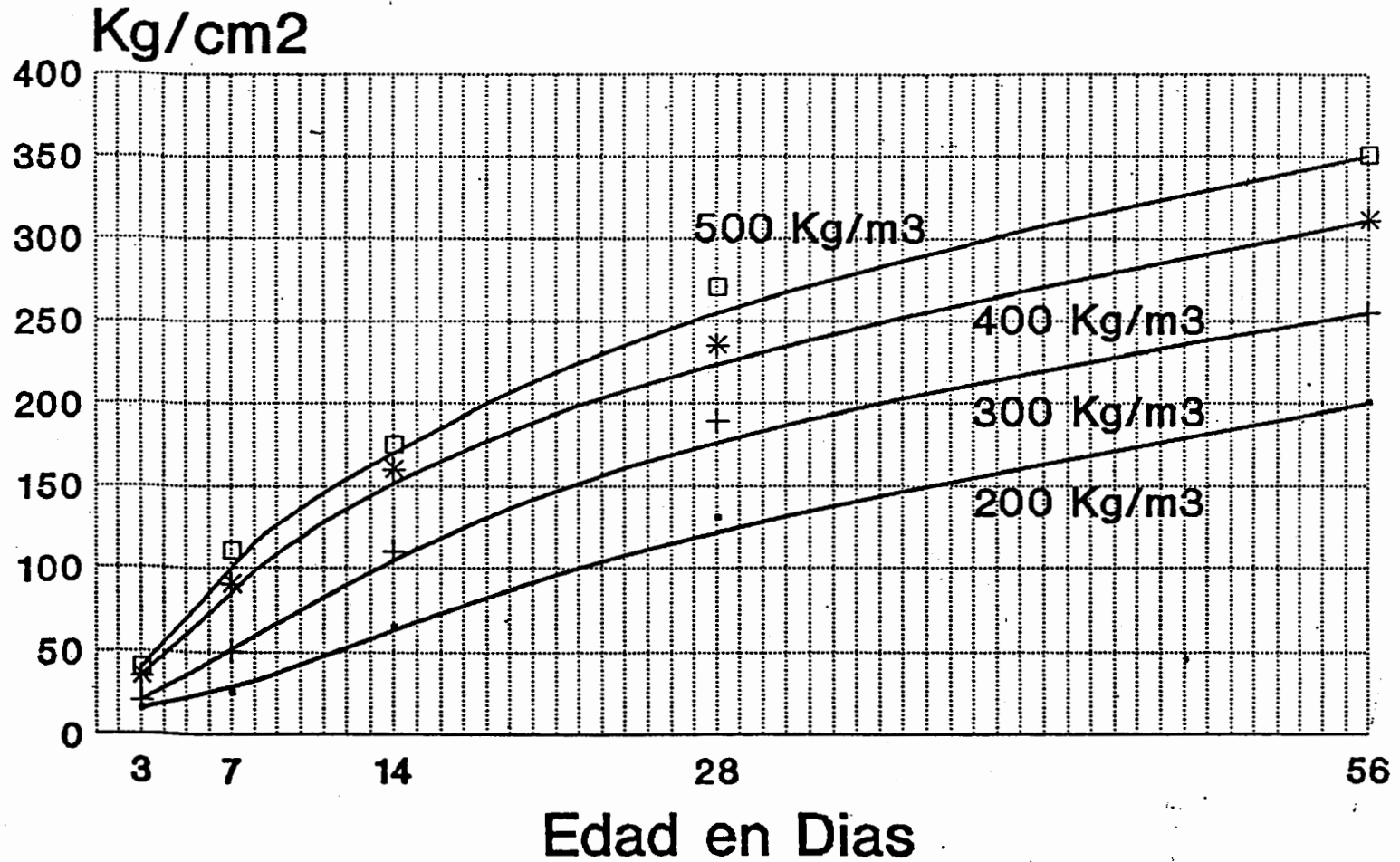


Fig.10 Relacion Agua/Cemento

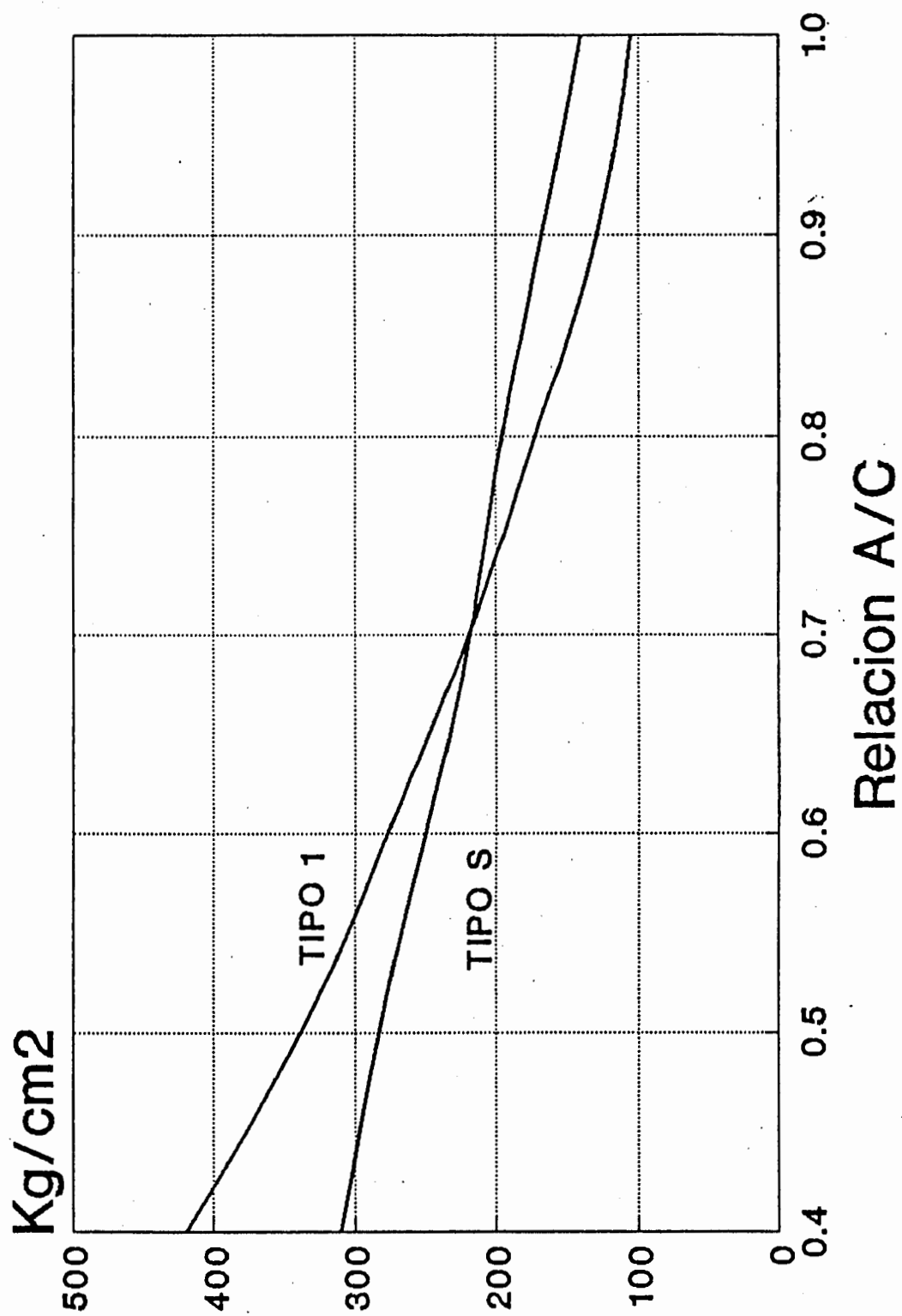


Fig.11 . Tension Indirecta vs.
Resistencia a Compresion (7 cm)

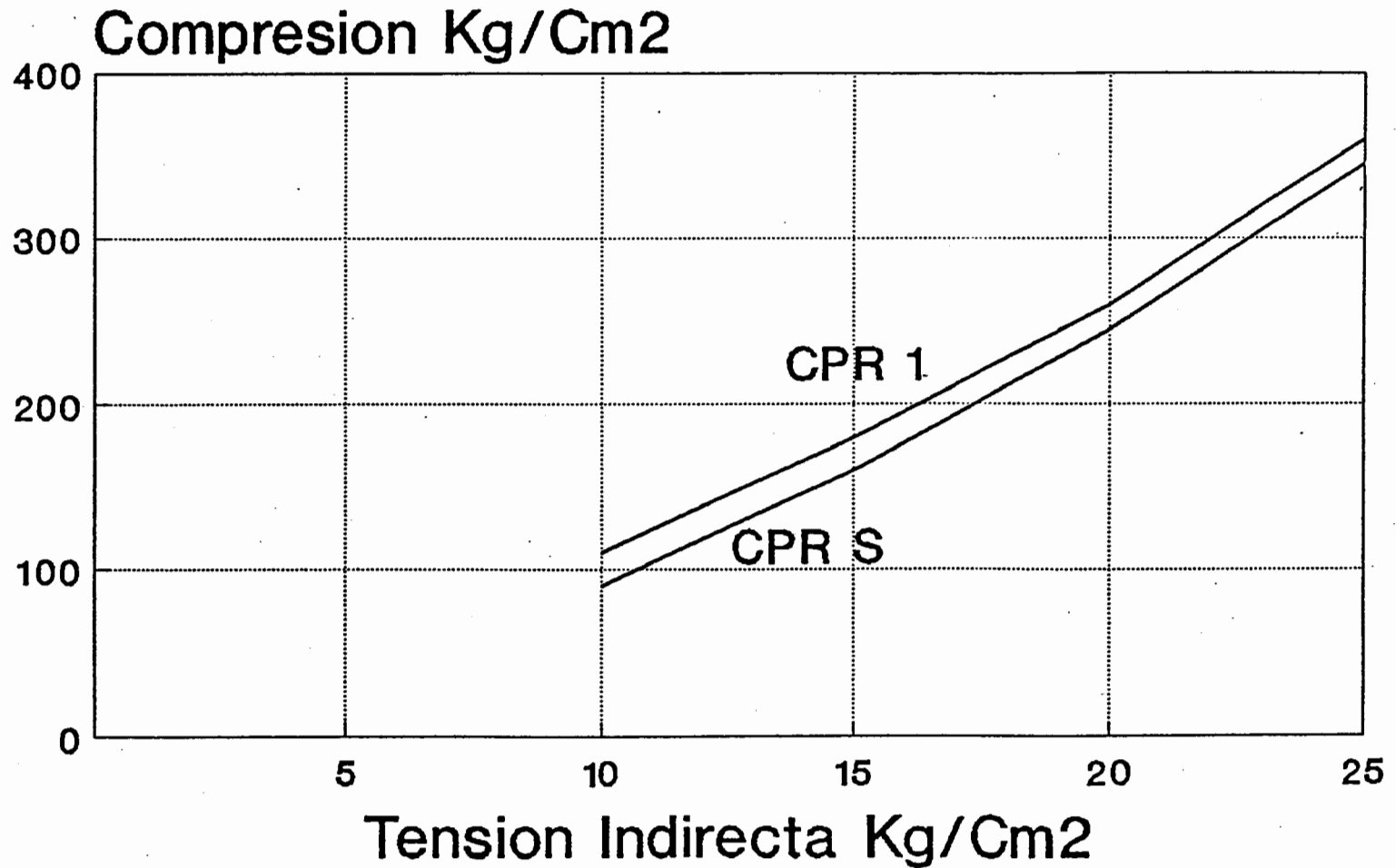


Fig.12. Esfuerzo-Deformacion

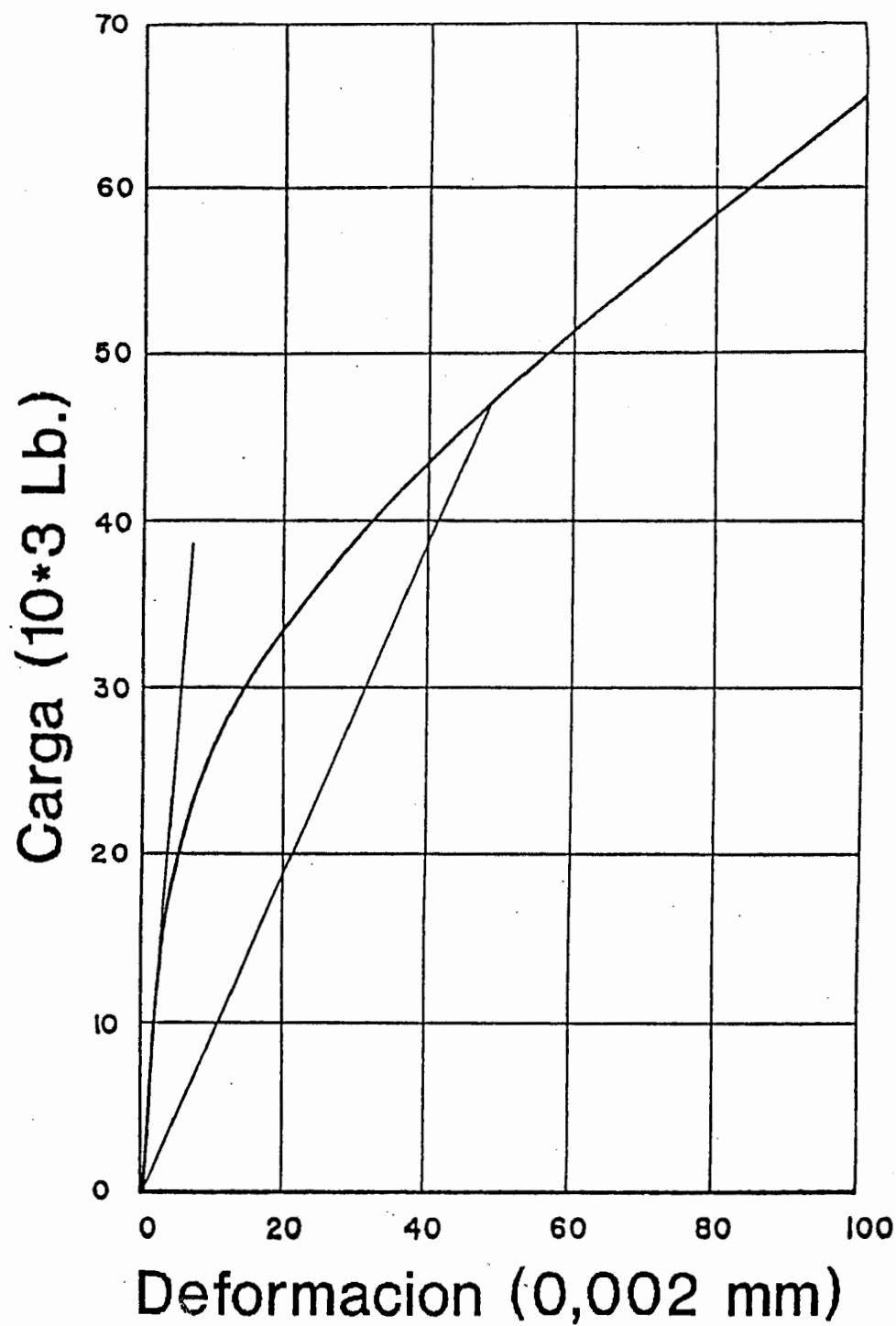


Fig.13. Resistencia a Compresion
Contenido de Cemento

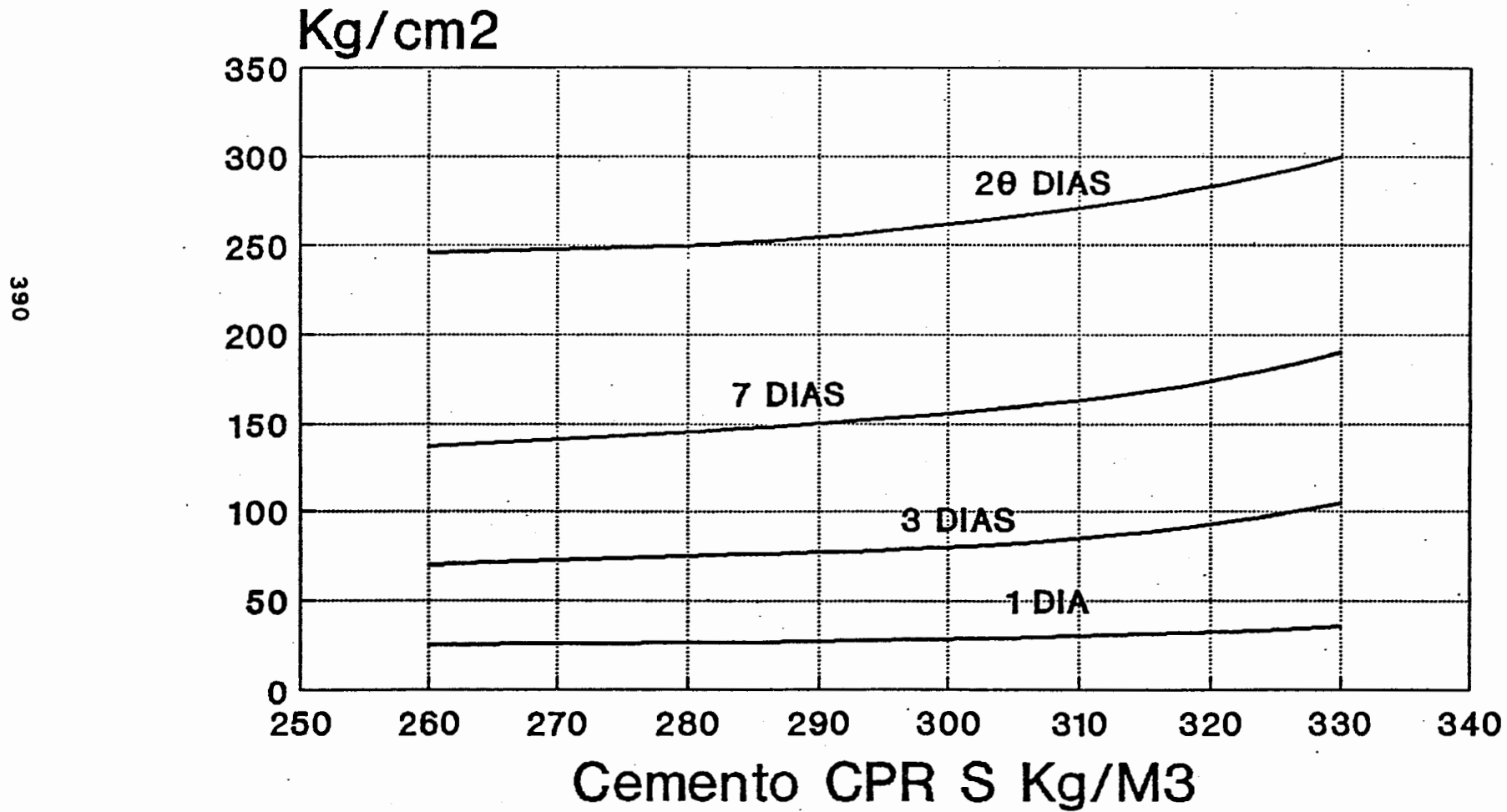
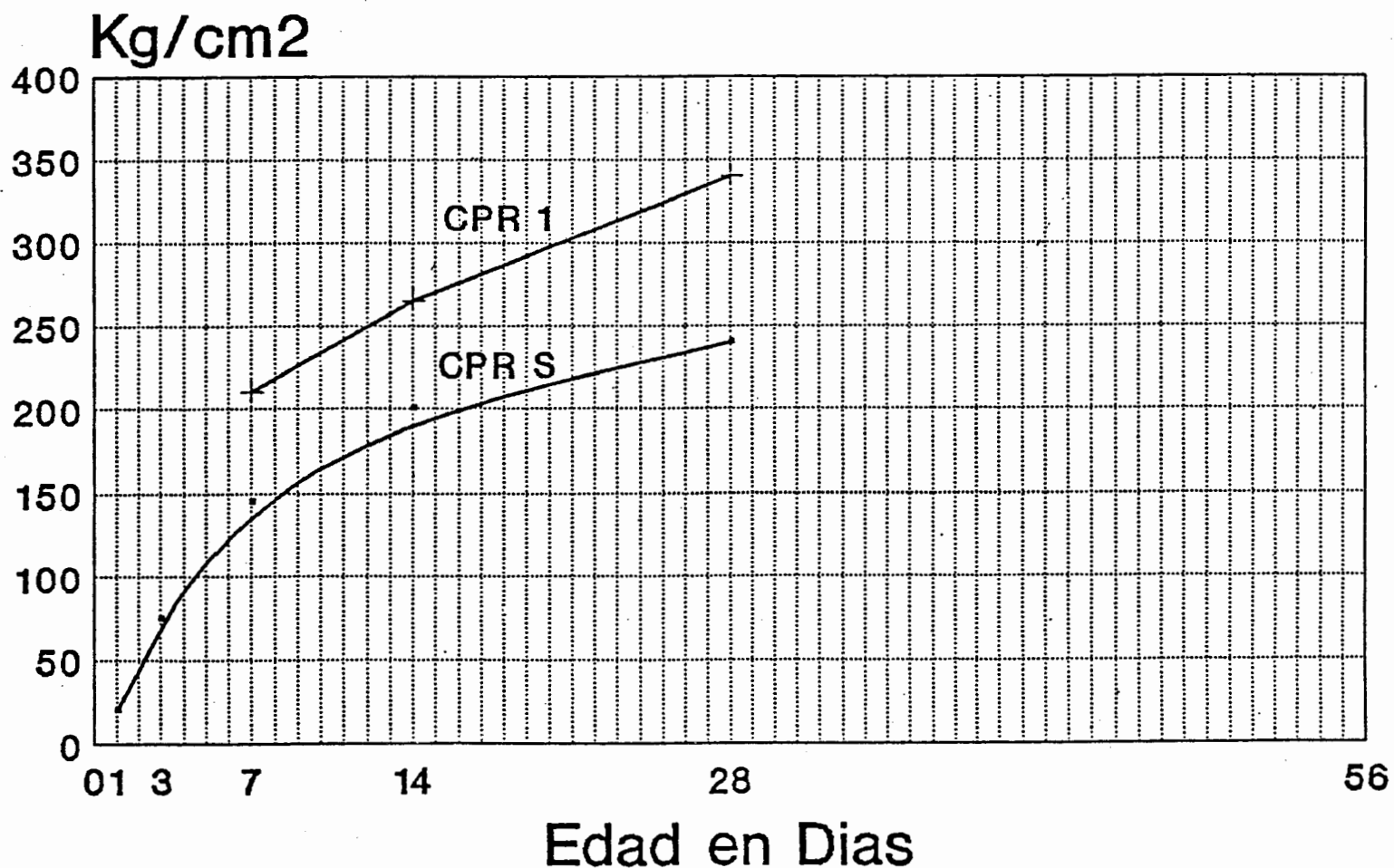


Fig. 14 Resistencia a Compresion
Concreto CPR 1 y S (Guavio)



ESTUDIO DE UNA ESCORIA SIDERURGICA PRODUCIDA EN MEXICO PARA SU USO COMO MATERIAL CEMENTANTE

Claudio Eberhardt *

David López *

RESUMEN

En el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto se realizó en 1988, un trabajo con la escoria de la planta de SICARTSA (Siderúrgica Lázaro Cárdenas, Las Truchas), para conocer la posibilidad de su utilización como material cementante.

En laboratorio se hicieron análisis químicos, microscopía de polarización y difracción de rayos X. Se realizaron moliendas de la escoria y se la mezcló con diferentes cementos de producción nacional, evaluando su comportamiento. Con uno de ellos se variaron las proporciones y finezas de los componentes.

Se realizaron comparaciones del comportamiento de las diferentes mezclas en estado fresco y endurecido con el cemento patrón.

* Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, D.F., México.

Claudio Eberhardt se recibió de Ingeniero Químico en la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina. Desempeñó actividades en una empresa cementera durante 9 años en el área de procesos y control de calidad, desde 1987 es Director Técnico del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

David López se recibió de Ingeniero Químico en la Universidad Nacional Autónoma de México. En la misma Casa de Estudios cursó la Maestría en Química Inorgánica Cerámica, desde 1988 se desempeña como investigador en el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

1- INTRODUCCION

De Mayo a Diciembre de 1988 se hizo una evaluación de la escoria de una planta siderúrgica ubicada en el puerto de Lázaro Cárdenas en el Pacífico Mexicano.

Luego de convenir con las autoridades de SICARTSA la modalidad del trabajo, se procedió a visitar la planta para recabar información directa de los aspectos operacionales de la misma y tomar las muestras de material a ensayar.

La escoria fue analizada en los laboratorios del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto y de la Universidad Nacional Autónoma de México.

2- SITUACION ACTUAL

En México hay 6 Altos Hornos, uno situado en el Puerto

de Lázaro Cárdenas en la costa del Pacífico, con una producción de 1.100.000 t/año, de las que se obtienen unas 330.000 t/año de escoria con posibilidad de enfriarlas con agua.

Los otros 5 Altos Hornos se encuentran en la ciudad de Monclova, estado de Coahuila, en el norte del país.

En lo referente a cemento, existen en México 29 plantas con una distribución geográfica como la que se muestra en la figura 1. A mediados de 1991 se espera la puesta en marcha de una nueva unidad con lo que la capacidad de producción estará en los 29.000.000 t/año.

En el año de 1990 se produjeron 22,700,000 t de cemento de las cuales se consumieron 20,200,000 t en el mercado interno y 2,500,000 t se exportaron principalmente al mercado de los Estados Unidos de Norte América.

En 1989, México ocupaba el lugar número doce como país productor de cemento.

Se fabricó cemento de escoria durante algún tiempo, hasta que se produjo el cierre del Alto Horno que lo proveía de escoria, Fundidora Monterrey, en el año de 1985. En este momento no existe en el mercado de México este tipo de cemento.

3- VISITA A SICARTSA

En Mayo de 1988 se convino que el IMCYC hiciera un estudio sobre la escoria de SICARTSA (Siderúrgica Lázaro Cárdenas Las Truchas), ya que desde algunos meses atrás se la estaba enfriando con agua y existía interés por saber si era

posible utilizarla para fabricar cementos de escoria o cementos de Alto Horno.

Se visitó la planta en la ciudad de Lázaro Cárdenas en junio del mismo año, haciendo una recorrida por el Alto Horno y la parte del proceso que era de nuestro interés.

El sistema de enfriamiento de la escoria era bastante rudimentario. Se aplicaba un chorro de agua en forma de spray en la vena de escoria fundida al abandonar ésta la canaleta de material refractario que la transportaba, cayendo, previo choque con agua, a una pileta donde se terminaba de granular y enfriar.

A primera vista la escoria se veía de color claro, en forma de pequeños gránulos o esferas huecas, del tamaño de una arena gruesa.

Una vez fría la escoria era retirada con palas mecánicas y llevada a un stock, que en aquel momento tendría unos 3.000.000 t de escoria enfriadas al aire, encima de las cuales se almacenaba la granulada con lo que se las estaba mezclando y esto hacía imposible su utilización para producir cemento.

La escoria fundida chocaba con el agua a una temperatura de aproximadamente 1.500°C desde la cual debería enfriarse bruscamente manteniendo su estructura en estado vítreo, sin darle tiempo a que se formaran cristales.

De cada colada se obtenía una muestra de la escoria a la que se le realizaba análisis químico, el cual era utilizado como un control de proceso.

Revisando los archivos de laboratorio de planta se observó que existía una gran constancia en los análisis químicos de la escoria, tanto entre los de las diferentes coladas de un día, como entre los promedios diarios en distintas épocas del año.

Esto era de esperar pues en este proceso se utilizan materias primas de una sola fuente, se hace un solo producto, a través de un solo equipo.

4- ENSAYOS DE LABORATORIO

En Junio de 1988 se recibieron en nuestro laboratorio unos 100 kg de escoria para realizar los ensayos correspondientes, los que deberían estar terminados para el primero de diciembre del mismo año.

4.1 Análisis Químico

El análisis químico de una muestra representativa de los 100 kg de escoria dió el siguiente resultado:

Humedad	17%
SiO ₂	33,4%
Al ₂ O ₃	11,4%
Fe ₂ O ₃	0,4%
OCa	43,6%
OMg	7,9%
SO ₃	0,3%
S ⁼	1,9%
OK ₂	0,2%
ONa ₂	0,2%

4.2 Microscopía de Polarización

Se analizó una muestra en el microscopio de polarización, para hacer una determinación por conteo de partículas cristalinas y vítreas, y así tener una primera impresión de la posible actividad hidráulica a desarrollar por esa escoria.

El conteo realizado en varias muestras indicó una fase vítrea de 80% y cristalina de 20%.

Esto nos dice 2 cosas, primero que hay una proporción muy interesante de esta escoria en fase vítrea y que por lo tanto es de esperar que tenga una considerable actividad hidráulica. Segundo, todavía hay un 20% de esa escoria que se podría aprovechar si el proceso de enfriamiento fuera más eficiente. Esto último no sería muy difícil de conseguir, ya que la forma en que se estaba enfriando era bastante rudimentaria, y con una inversión baja se podría mejorar sustancialmente este proceso.

En la figura 2 se ven dos fotos al microscopio de polarización de una misma muestra girada 90° , donde están encerradas con un círculo las partículas en las que se ve fase vítrea.

4.3 Rayos X

Se sometió una muestra de polvo de escoria a difracción de R-X. En la misma se detectó la presencia de cristales de Merwinita (un mineral comunmente presente en las escorias enfriadas lentamente). No se detectó Periclasa, que por el alto contenido de Oxido de Magnesio en el análisis químico, nos podía hacer temer por su presencia. Al no encontrarse,

esto elimina la posibilidad de que existieran problemas de expansión en autoclave.

5- NORMALIZACION

En México existen dos normas que regulan la utilización de escorias como material cementante.

La primera es la DGN-C-184-1970 "Norma de calidad para Cemento de Escoria". En la definición de "Cemento de Escoria" dice que es la mezcla de Escoria Granulada de Alto Horno y Cal Hidratada y limita su uso a morteros y cementos de albañilería.

La DGN-C-175-1969 "Norma Oficial de calidad para Cemento Portland de Alto Horno", define este tipo de cemento como la mezcla de Escoria Granulada de Alto Horno, Clinker Portland, y Yeso. No limita su uso ni da proporciones de los materiales componentes.

Establece las siguientes Especificaciones Químicas Máximas:

SO ₃	4%
S ⁼	2%
R.I.	1%
P.C.	3%

En cuanto a las Especificaciones Físicas vamos a establecer una comparación entre las exigencias a los Cementos de Alto Horno, Tipo I y Puzolánico, las mismas se observan en la siguiente tabla:

<u>Característica</u>	<u>Alto Horno</u>	<u>Tipo I</u>	<u>Puzolánico</u>
Finura:			
Retenido en #325 (Máx)	12%	-	18%
Blaine: [cm ² /g]			
Valor Promedio Mínimo	2800	2800	3000
Valor Mín. cualquier muestra	2600	-	2800
Expansión en Autoclave (Máx)	0,2%	0,8%	0,5%
Tiempo de Fraguado:			
Inicial (Mín)	45 min.	45 min.	45 min.
Final (Máx)	7 hr.	8 hr.	7 hr.
Resistencia Compresión: [kg/cm ²]			
3 Días	85	130	130
7 Días	150	200	200
28 Días	250	-	255
Calor de Hidratación: [Cal/g]			
7 Días (Máx)	70	-	-
28 Días (Máx)	80	-	-

6- INDICE DE KEIL

Este es un índice para medir la compatibilidad de las adiciones con cemento y está definido por la siguiente fórmula:

$$I = \frac{R_E - R_I}{R_P - R_I} \times 100$$

Donde:

I = Índice de Keil

R_E= Resistencia de una mezcla de 30% Escoria, 70% Cemento.

R_I= Resistencia de una mezcla de 30% Inerte, 70% Cemento.

R_P= Resistencia del Cemento Puro.

En el caso extremo de que la escoria no tuviera nada de actividad hidráulica, su comportamiento sería el de un material inerte, por lo tanto el numerador de esta fórmula sería cero, y el Índice de Keil sería también de cero.

El otro caso extremo sería que la escoria tuviera un comportamiento igual al del cemento al cual reemplaza, en este caso el numerador y el denominador se igualan y el índice sería del 100%.

Podría ocurrir también, que la escoria tuviera un mejor comportamiento que el cemento al cual reemplaza. En esta situación el índice sería mayor que 100%.

Esta forma de análisis tiene algunos inconvenientes, a saber:

- No se define el Blaine o Finura de la Escoria.
- Fija la proporción de reemplazo en un valor que podría no ser el óptimo.
- No define la relación A/C.
- No define las edades de control.
- Hace un análisis reemplazando una parte del cemento en lugar de considerar un cemento diferente.

Las condiciones en que se realizaron los ensayos fueron las siguientes:

- Se analizaron 6 diferentes cementos Tipo I o II de utilización normal en México.
- La escoria se molió a un Blaine de $3750 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- Las edades de ensayo fueron las exigidas por las normas Mexicanas, 3, 7 y 28 días.
- Se trabajó con una relación A/C fija para todas las muestras.

Los resultados se presentan en la figura 3. Se observa que ya a la edad de 3 días se presenta actividad hidráulica con todos los cementos. La escoria normalmente desarrolla resultados interesantes a edades más tardías, tampoco se esperaban buenos resultados a un tiempo tan corto, debido al bajo Blaine de la escoria.

Es interesante analizar los dos últimos cementos los cuales presentan resultados un tanto irregulares. El cemento E es el que muestra valores más bajos a todas las edades, esto puede deberse a su muy buena resistencia, por lo tanto la influencia de la escoria es comparativamente baja, y esto hace que los índices sean bajos a todas las edades.

El cemento F, por el contrario, en su estado puro tiene resistencias bastante bajas y el aporte que hace la escoria en la mezcla es comparativamente alto, lo que eleva el valor de los índices para dar a 28 días más del 220%.

Podemos concluir lo siguiente:

- Se observa actividad hidráulica (Índice de Keil mayor que cero) a todas las edades y con todos los cementos.
- Si eliminamos los resultados atípicos E y F, en los restantes tenemos un Índice de Keil de aproximadamente 70% a los 7 días y de cerca del 100% a los 28 días.
- Con algunos cementos se obtienen, para algunas edades, resultados mejores que con el cemento puro (Índice de Keil mayor de 100).

7- ENSAYOS CON UN CEMENTO PATRON

A partir de aquí todos los ensayos fueron hechos con un solo cemento, el A de la gráfica de Índice de Keil.

7.1 Variaciones de la finura de los componentes

7.1.1 Escoria

Se hicieron ensayos mezclando 50% de cemento de 3900 cm^2/g de Blaine, con 50% de escoria molida a: 3700, 4500 y 5000 cm^2/g . Se midieron sus resistencias a la compresión a las edades de 3, 7 y 28 días.

Se pueden apreciar los resultados en la figura No 4, en la que se observa un pequeño aumento de resistencia a todas las edades al aumentar la finura de la escoria.

Se hicieron estas mismas comparaciones pero ahora con una mezcla de 25% de cemento, 75% de escoria, vemos los resultados en la figura No 5. Al estar la escoria en una proporción mayor que en el caso anterior, tenemos una mejor apreciación de la influencia de alguna de sus características sobre las propiedades de la mezcla. Se observa que prácticamente no hay influencia del Blaine de la Escoria sobre los valores de la resistencia a 3 días. Entre la más gruesa y la más fina existe a esta edad una disminución del 3%.

A los 7 días observamos un leve aumento, (7%), y a los 28 días el incremento de resistencia es apreciable, al mezclar escoria más fina, pues en este caso la mejora de resistencia llega a un 25%.

Estos resultados parecen bastante lógicos, pues al moler la escoria más fina, estamos creando más superficie de contacto entre los reactivos, por lo que habrá una mayor o mejor reacción, en este caso evidenciada a través de un aumento en la resistencia.

Debido a que la reacción de la escoria es más lenta que la del cemento, se observa poca o nula actividad a edades tempranas, en cambio a los 28 días su influencia ya es apreciable.

7.1.2 Cemento

En la figura 6 se pueden apreciar las variaciones de resistencia a la compresión a 3, 7 y 28 días de una mezcla de 50% de cemento y 50% de escoria donde se ha remolido el cemento hasta llevarlo a Blaines de 4500, 5000 y 5500 cm^2/g más el original de 3900 cm^2/g .

Se observa un fuerte incremento (31%) de la resistencia a 3 días al comparar el cemento más grueso y más fino.

A las edades de 7 y 28 días las variaciones son menores (-4% a 7 y +12% a 28 días). Este resultado se esperaba pues al moler el cemento más fino, dentro de ciertos límites, aumenta la resistencia a edades tempranas, pero modifica muy poco los valores finales alcanzables.

8- VARIACION DE LAS PROPORCIONES DE LOS COMPONENTES

Se midieron resistencias a la compresión a 3, 7 y 28 días, de mezclas entre nuestro cemento patrón de 3900 cm^2/g y la escoria molida a 5000 cm^2/g .

Las proporciones en que se hicieron las mezclas fueron de: 0, 25, 50 y 75 % de escoria, el resto cemento.

Los resultados se pueden observar en la figura No. 7. En la misma se aprecia una disminución de resistencia notable a

la edad de 3 días, a medida que incrementamos el porcentaje de escoria pero la pérdida de resistencia es menor que la cantidad de escoria añadida, pues con valores de ésta del 75% la caída de resistencia es de solo 53%, esto es debido a que ya a la edad de 3 días la escoria tiene actividad hidráulica con este cemento.

A los 7 días la caída es menor, de 26% para una adición del 75%, y a los 28 días casi no hay modificaciones de la resistencia con cualquier valor de adición de escoria entre 0 y 75%.

Esto significa que en estas condiciones y en estos rangos la escoria tiene un comportamiento a 28 días, en cuanto a la resistencia a la compresión, similar al cemento que está sustituyendo.

En la figura 8 se ve una comparación similar a la del caso anterior pero aquí el cemento fue remolido hasta un Blaine de $5500 \text{ cm}^2/\text{g}$.

En este caso las caídas de resistencia son menores a 3 y 7 días, debido a que la elevada superficie específica del cemento está compensando la pérdida de éste a edades tempranas al ser reemplazado por la escoria.

Este comportamiento sugeriría una estrategia para tratar de obtener un cemento con escoria que tenga resistencias similares a todas las edades a aquel a quien reemplaza.

Si en esta gráfica observamos que pasa con una sustitución del 50%, vemos que a los 3 días la pérdida de resistencia a la compresión es de solo 14% y tanto a 7 como a 28 días tenemos mejores valores que los del cemento puro.

9- CURADO FUERA DE NORMA

Todos los ensayos anteriores fueron realizados siguiendo las normas mexicanas para la confección de probetas y su curado en cámara húmeda, en condiciones muy especiales y controladas, las que a veces no se parecen a lo que sucede en la realidad con el concreto, cuando es utilizado en la obra.

Los ensayos que vemos en la figura No. 9 se hicieron siguiendo las mismas normas de confección de los cubos, pero en vez de guardarlos en cámara húmeda se los dejaron en el laboratorio (25°C y 50% de humedad) cubiertos con un paño húmedo por 24 horas. Se desmoldaron y se dejaron en el laboratorio hasta la edad de ruptura. Las dos muestras se prepararon simultáneamente y fueron almacenadas juntas.

Se hicieron cubos de mortero con cemento puro de 3900 cm^2/g de Blaine y de una mezcla con 50% del mismo cemento y 50% de escoria molida a 5000 cm^2/g .

Se observan menores resistencias para la mezcla a 1, 2 y 3 días, las mismas se igualan a los 7 días y de allí en adelante la muestra con escoria da resistencias mayores, siendo a los 28 días un 26% superior que la del cemento puro.

10- CONCLUSIONES

A la luz de estos resultados podemos establecer las siguientes conclusiones:

- 1.- La muestra de escoria granulada producida en SICARTSA tiene actividad hidráulica con todos los cementos y a todas las edades que fue ensayada.

- 2.- Se pueden hacer cementos de escoria, con altas proporciones de ésta, que tengan características similares a los cementos más comunes dentro del mercado de México.
- 3.- El cemento con el que se hicieron la mayoría de los ensayos no es el que presentó mejor compatibilidad. Es probable que utilizando un cemento o clinker que induzca mayor actividad hidráulica a la escoria, se obtengan mayores beneficios.
- 4.- La escoria ensayada ha sido enfriada de una manera rudimentaria. Con una baja inversión se podrían mejorar las instalaciones de granulación y aumentar el porcentaje de fase vítrea con la que aumentaría su actividad.
- 5.- La fabricación de Cemento de Alto Horno con esta escoria, traería para México las siguientes ventajas:
 - Ahorro de unos 30.000 m³ de petróleo por año.
 - Eliminación definitiva de un subproducto, que ahora se acumula, con los consiguientes problemas logísticos y ecológicos.
 - Aparición en el mercado de un cemento de comportamiento similar a los que ya existen pero con características especiales, como son su bajo calor de hidratación y su durabilidad frente a los agentes agresivos. Esta última característica sería altamente apreciada para las construcciones en ambiente marino ya que en México existen 10.000 Km de costas.

BIBLIOGRAFIA

- Seminario del Cemento Holderbank - México 1988.
- Informe del Comité 226 de A.C.I.
- Fulton's Concrete Technology - Portland Cement Institute South Africa.
- Nordic Concrete Research 1987.
- Alkali Activated Slag - Swedish Cement and Concrete Institute.
- Congresos Internacionales de Química del Cemento. París 1974 - Moscú 1980 - Brasil 1986.
- Normas Mexicanas:
 - DGN-C-184-1970
 - DGN-C-175-1969
 - DGN-C- 1-1980
 - DGN-C- 2-1980

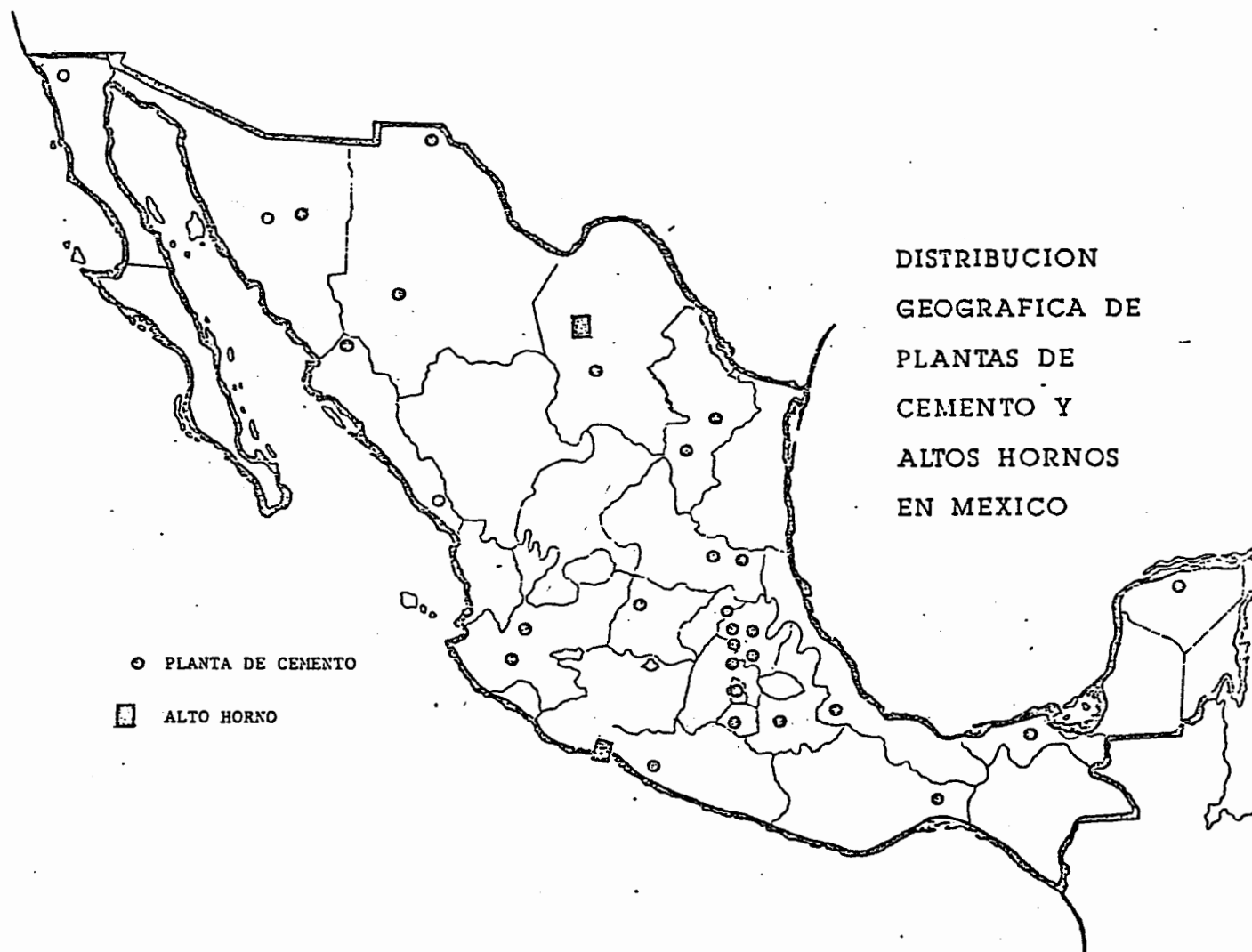
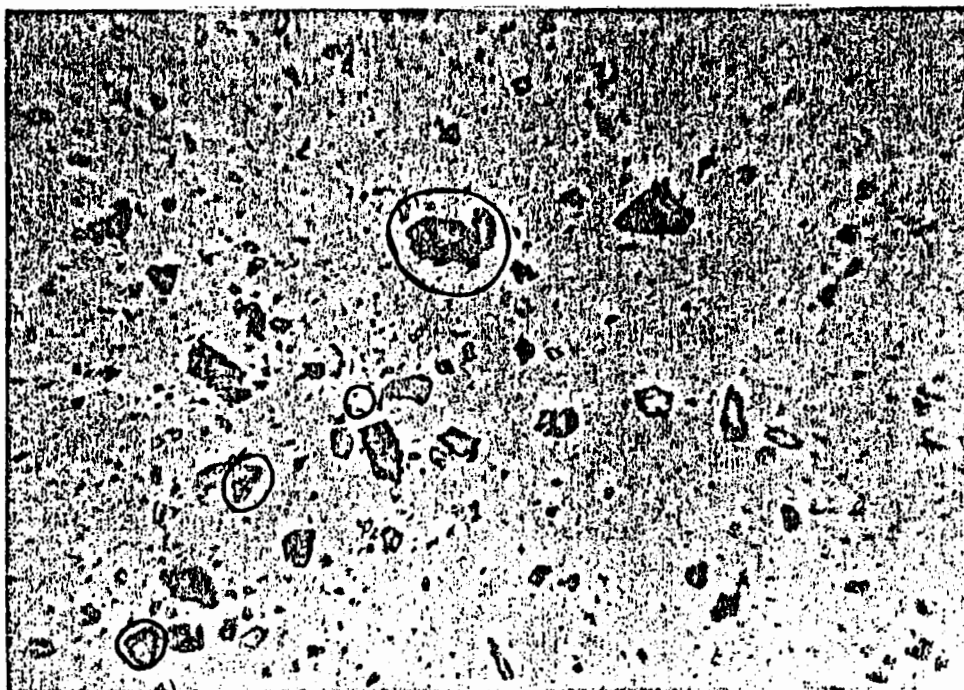


Figura 1



Las partículas encerradas
presentan parcialmente
fase cristalina



Figura 2

INDICE DE KEIL

Blaine Escoria 3750 cm²/gr

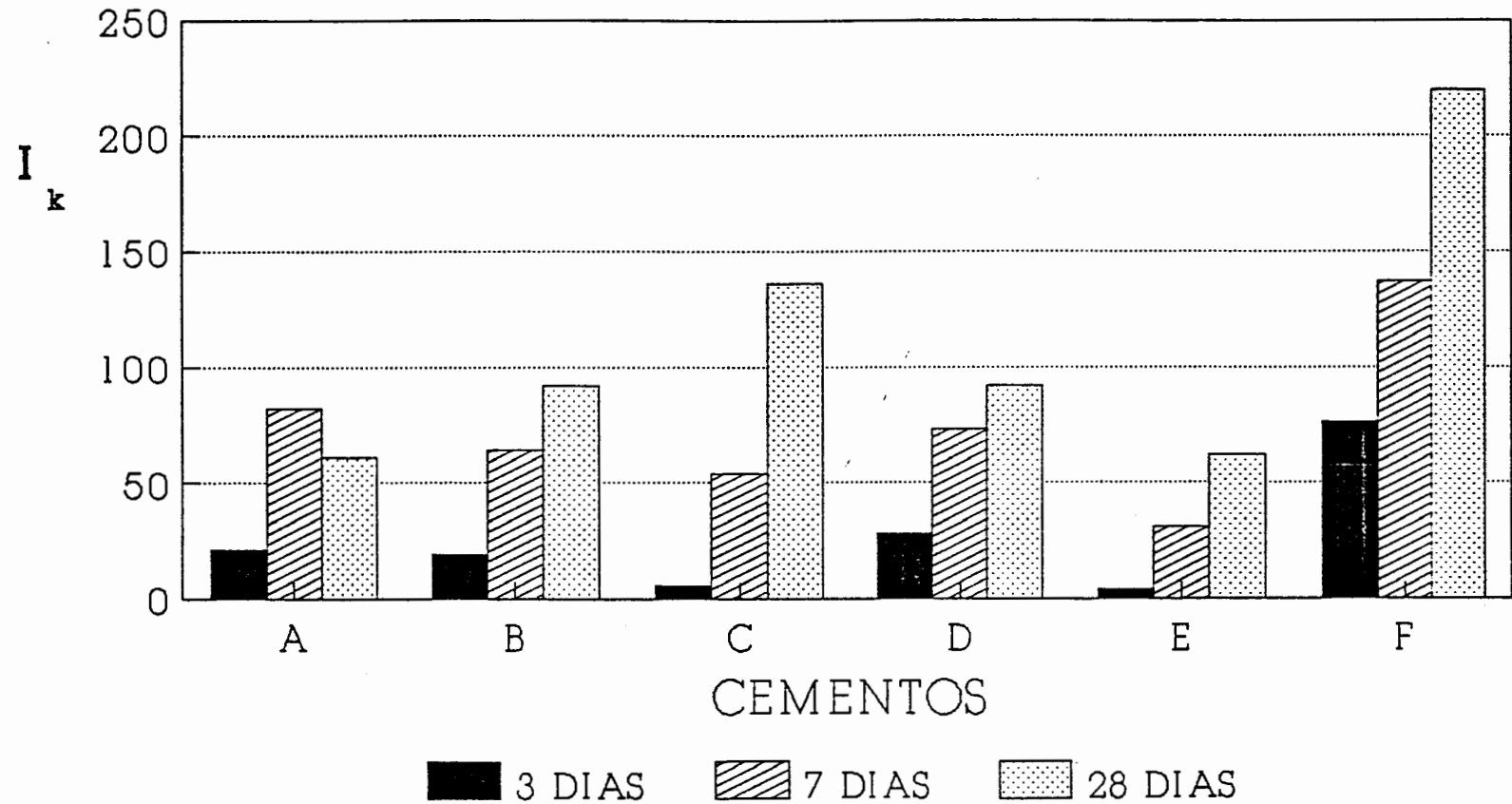


Figura 3

RESISTENCIAS FUNCION BLAINE ESCORIA

Escoria 50%; Blaine Cemento: 3900 cm²/gr

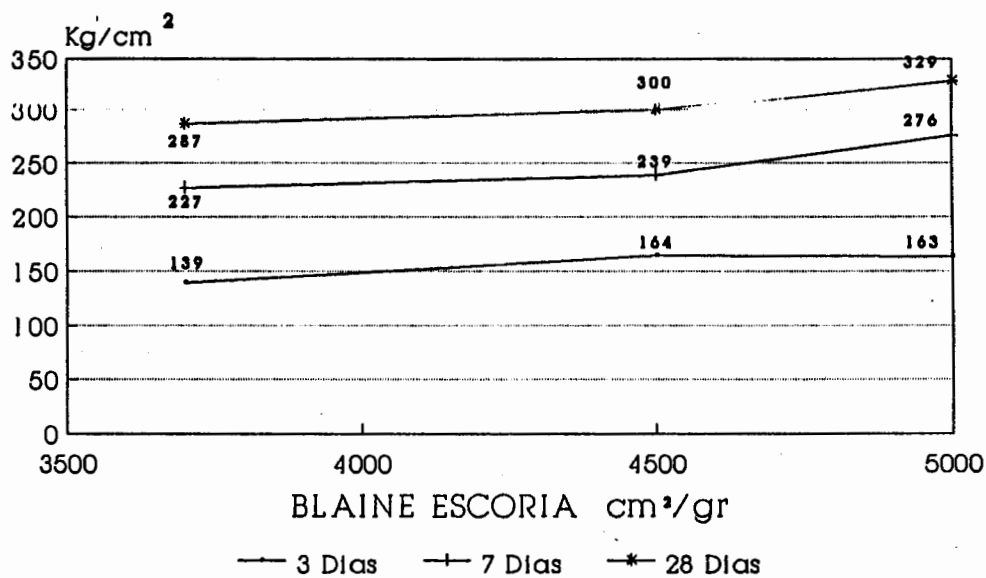


Figura 4

RESISTENCIAS FUNCION BLAINE ESCORIA

Escoria 75%; Blaine Cemento: 3900 cm²/gr

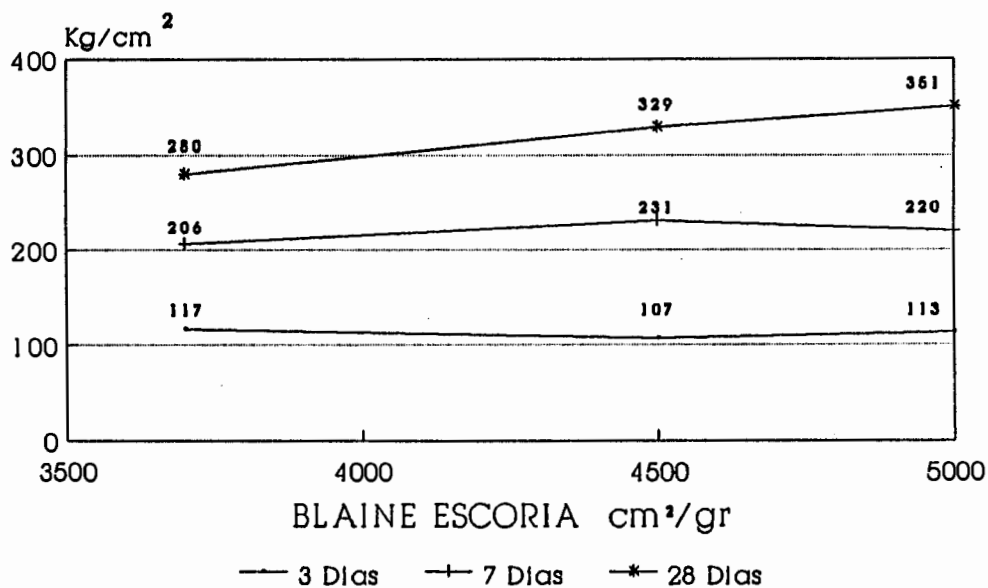


Figura 5

RESISTENCIAS FUNCION BLAINE CEMENTO

Escoria 50%; Blaine Escoria: 5000 cm²/gr

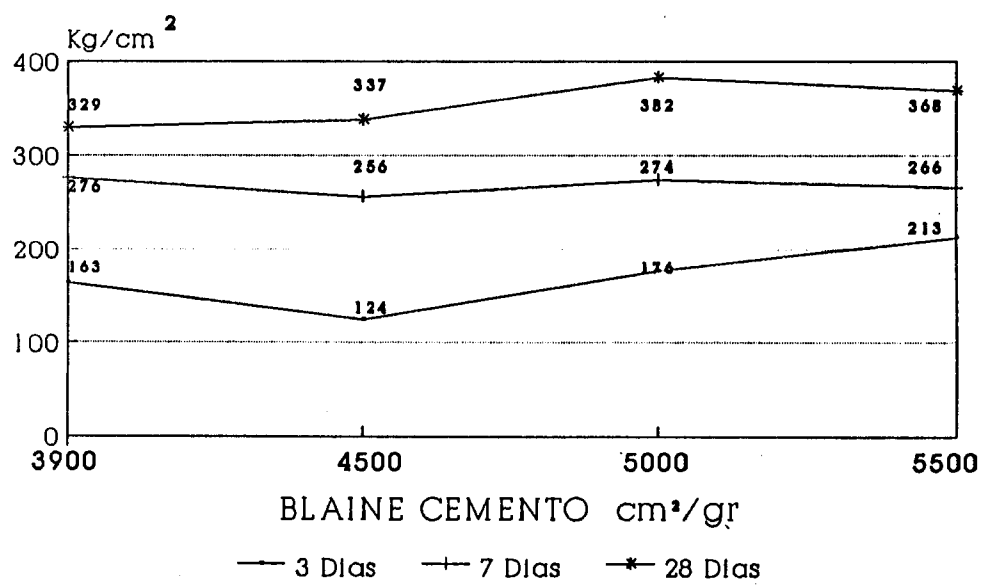


Figura 6

RESISTENCIAS FUNCION PORCIENTO ESCORIA

Blaine: Cemento 3900; Escoria 5000

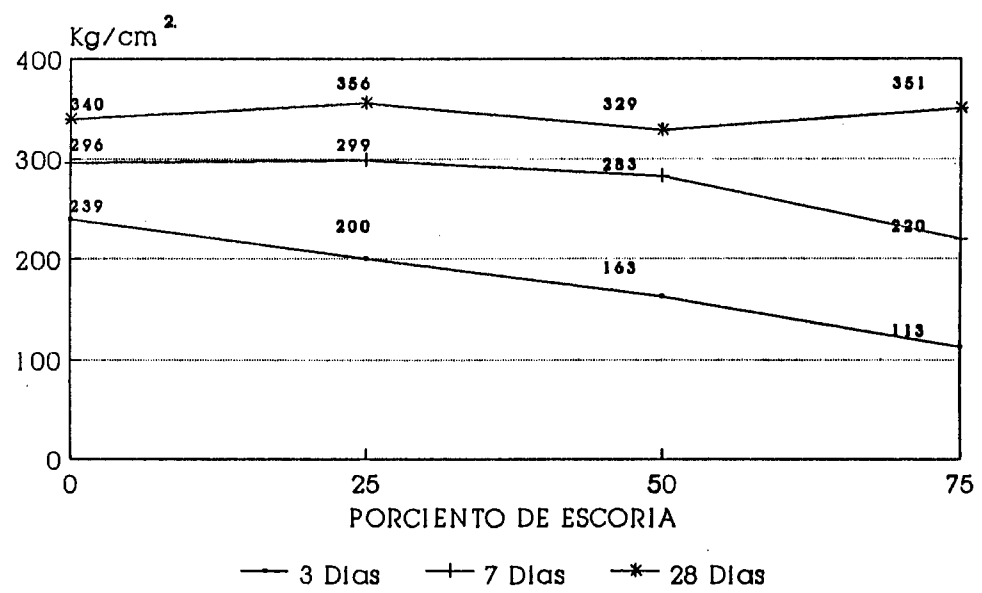


Figura 7

RESISTENCIAS FUNCION PORCIENTO ESCORIA

Blaine: Cemento 5500; Escoria 5000

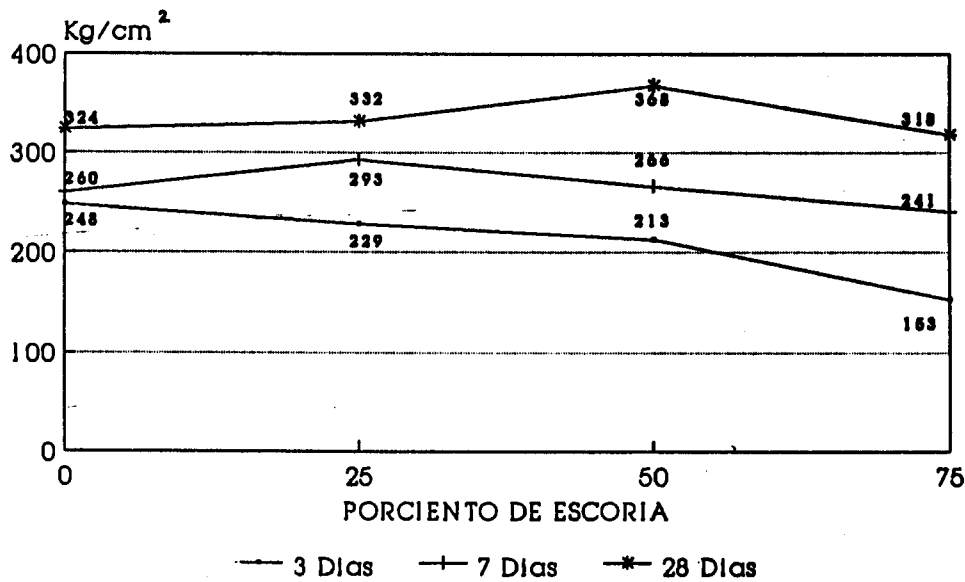


Figura 8

ENSAYOS CON CURADO AL AIRE

Blaine: Cemento 3900; Escoria 5000

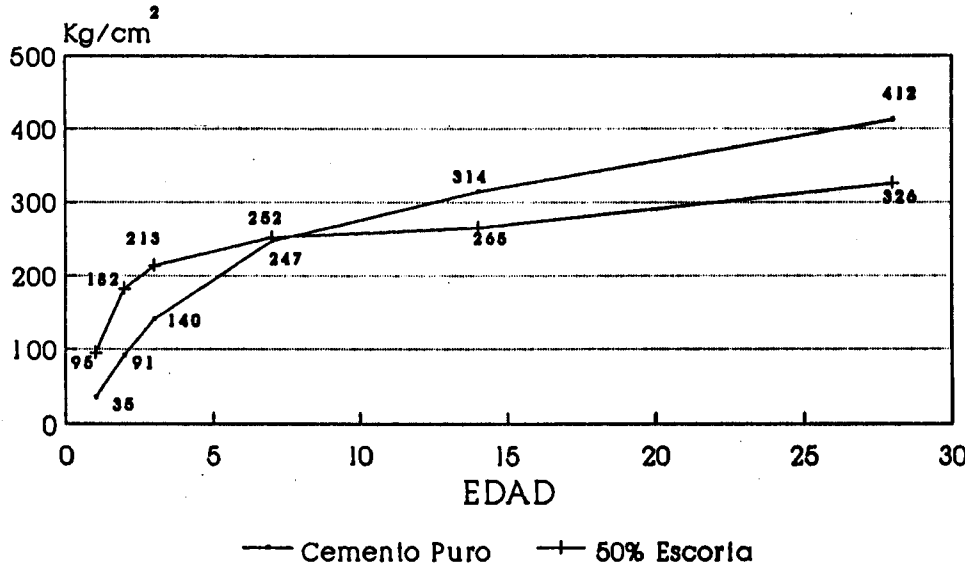


Figura 9

CEMENTOS SIDERURGICOS
UTILIZACION EN CHILE

Arnoldo Bucarey C. (*)

RESUMEN

Los Cementos siderúrgicos se están empleando en Chile desde 1961, fecha en la cual empezó a producir la fábrica de Cementos Bío Bío en Talcahuano, utilizando la escoria básica granulada de los altos hornos de la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.

Los cementos se fabrican de acuerdo a la norma de especificaciones NCh148-Of68 y los ensayos se realizan según las normas correspondientes.

Las características y propiedades de los cementos siderúrgicos chilenos los ubican como cementos de uso universal y se han empleado en todas sus formas desde lechadas para inyección de rocas, hasta hormigonados con técnicas especiales, pasando por producción de elementos prefabricados, hormigones masivos, hormigones estructurales, hormigones de pavimentos, etc.

Destacan las propiedades de bajo calor de hidratación, mayor resistencia a agresivos químicos y altas resistencias finales.

(*) Cementos Bío Bío S.A.C.I., Talcahuano, CHILE

Arnoldo Bucarey C., Constructor Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile. Profesor Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción. Secretario Nacional del Centro Tecnológico del Hormigón. Miembro de la Comisión Técnica del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón. Consultor Técnico de Cementos Bío Bío S.A.C.I.

1- INTRODUCCION

Los Cementos siderúrgicos, definidos como productos obtenidos por molienda conjunta de clinker con escoria básica granulada de alto horno y yeso como regulador de fraguado, se han estado utilizando en Chile desde el año 1961.

Son fabricados por Cementos Bío Bío S.A.C.I., en su planta de Talcahuano, con la escoria granulada de los altos hornos de la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.

2- NORMALIZACION CHILENA

La producción de los cementos siderúrgicos se hace conforme a la norma NCh148 Of68, denominada "CEMENTO-Tecnología, Clasificación y Especificaciones Especiales".

Esta norma define y clasifica a todos los cementos e indica los requisitos físicos y químicos que deben cumplir, según la clase y grado.

La clasificación está dada por la composición, según se muele clinker con yeso, en cuyo caso se obtiene cemento portland, o se muele clinker, yeso y puzolana, cuyo resultado será un cemento puzolánico o bien que se haga la molienda de clinker, yeso y escoria básica granulada de alto horno, obteniéndose cemento siderúrgico.

El grado está dado por las resistencias mecánicas, pudiendo ser de grado corriente o de grado alta resistencia.

En lo que se refiere a la escoria de alto horno, la norma la define e indica la relación que deben cumplir los óxidos principales de la forma siguiente:

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1$$

Otras características de las escorias quedan definidas por los requisitos que deben cumplir los cementos fabricados con ellas.

La norma clasifica a los cementos siderúrgicos en:

- portland siderúrgicos "si el porcentaje de escoria básica granulada de alto horno en el producto terminado no es superior al 30%. Esto en consideración a que hasta este porcentaje de escoria básica, predominan las características del clínquer.
- siderúrgicos si el porcentaje de escoria básica granulada de alto horno está comprendido entre 30 y 75% del producto terminado.

Desde el punto de vista de las resistencias mecánicas, la norma NCh 148 Of68, los divide en dos grados.

- corriente, cuyas resistencias mínimas a compresión son 180 y 250 Kgf/cm² a los 7 y 28 días de edad respectivamente y mínimos de 35 y 45 Kgf/cm² a flexión, a las mismas edades.
- de alta resistencia, con resistencias mínimas de 250 y 350 Kgf/cm² a compresión a edades de 7 y 28 días respectivamente y a flexión 45 y 55 Kgf/cm² iguales edades.

Los requisitos químicos que deben cumplir los cementos siderúrgicos son:

- pérdida máxima por calcinación: 5,0%
- residuo insoluble: máximo 3,0% para los cementos portland siderúrgicos y 4,0% para los cementos siderúrgicos.
- contenido de SO₃: máximo 4,0%
- contenido de Mn₂O₃: máximo 2,0%.

La norma NCh158 Of67, para ensayos de resistencia, concuerda con la norma ISO-RILEM, por lo tanto, se usa razón agua/cemento igual a 0,50, razón cemento/arena igual 1/3, con arena de granulometría continua entre 2,0 y 0,08 milímetros.

Otras normas de ensayo son las de determinaciones de: agua de consistencia normal, tiempos de fraguado con la aguja de Vicat, peso específico, finura por tamizado, superficie específica Blaine, expansión de la pasta en autoclave, indeformabilidad y análisis químico.

En algunos casos se hacen ensayos según normas extranjeras como por ejemplo para la determinación del calor de hidratación, reacción álcalis-árido, exudación y otros que se puedan requerir.

3- CARACTERISTICAS DE LOS CEMENTOS SIDERURGICOS FABRICADOS EN CHILE

La escoria básica de alto horno se controla a la llegada a la fábrica, en cuanto a su composición química, la cual es muy estable

debido a que procede de una sola siderúrgica que procesa minerales de hierro de grandes yacimientos ubicados en la Cuarta Región de Chile.

El índice establecido en la norma fluctúa entre 1,6 y 1,7.

También se controla su actividad hidráulica mediante el ensayo de Feret, que consiste en fabricar probetas con mortero normal con escoria molida a Blaine 3.500 cm²/g y solución de hidróxido de sodio al 20%, las que son ensayadas a 6 y 24 horas de edad.

La calidad hidráulica de la escoria de alto horno de Huachipato se puede catalogar de mediana a alta, lo que permite usar porcentajes relativamente altos en los cementos, cumpliendo con amplitud, las resistencias especificadas.

El clínker se fabrica con caliza de 97% de carbonato de calcio y escoria granulada de alto horno.

En la siderúrgica la escoria se granula con agua en una relación agua/escoria igual a 6/1. En la fábrica de cemento, al entrar a proceso, se le retiran todas las partículas que están contaminadas con fierro metálico y luego se seca en un secador rotatorio aprovechando los gases del horno de clínker.

Cementos Bío Bío S.A.C.I., produce dos tipos de cemento siderúrgico, uno de grado corriente cuyo nombre comercial es Cemento Bío Bío Especial y el otro de grado alta resistencia, bajo el nombre de Cemento Bío Bío Alta Resistencia.

La diferencia está en las relaciones clínker/escoria de alto horno y una pequeña diferencia en la superficie específica Blaine.

Las características y propiedades promedio de los cementos siderúrgicos Bío Bío, son las que se indican a continuación:

CEMENTO		
	Corriente	Alta Resistencia
Resistencia a compresión (Kgf/cm ²)		
a 3 días	150	210
a 7 días	230	310
a 28 días	450	520
a 90 días	600	620
Peso específico (g/cm ³)	3,02	3,06
Super.espec.Blaine (cm ² /g)	4.050	4.100
Retenido en tamíz de 0,08 mm (%)	0,5	0,6
Inicio de fraguado (h:min)	4:00	3:00
Fin de fraguado (h:min)	5:00	4:00
Autoclave, expansión (%)	0,05	0,06
Calor de hidratación a 7 días (cal/g)	68	70

Pérdida por calcinación (%)	1,7	1,8
Residuo insoluble	0,7	0,6

4- EMPLEO DE LOS CEMENTOS SIDERURGICOS EN CHILE

La fabricación de cementos siderúrgicos en Chile, está cumpliendo 30 años y durante este lapso se han fabricado y empleado más de 5,5 millones de toneladas

La capacidad nominal de la fábrica es de 240.000 toneladas al año y actualmente se está ampliando a 400.000 toneladas/año.

Los cementos siderúrgicos producidos, mayoritariamente en el grado corriente, se han empleado en todo tipo de aplicaciones, desde lechadas para inyecciones de rocas hasta hormigones de las más grandes centrales hidroeléctricas.

Se usan en pasta de superficies de baldosas, pero en este caso hay que hacer la salvedad que algunas tierras de color pueden ser alteradas.

En morteros se utilizan en toda la gama: de revoque, de relleno, para elementos prefabricados.

En hormigones, el empleo ha sido en todo tipo: hormigón simple, hormigón estructural de edificios, construcciones industriales, puentes, revestimientos de túneles, vertederos de presas, obras marítimas, pavimento de carreteras, urbanizaciones,

Se han aplicado con técnicas especiales, tales como con moldajes deslizantes, hormigón proyectado, hormigón bombeado, hormigones fluídos, pilotes de fundación fabricados in situ.

No se han usado en hormigones pretensados, debido al desarrollo más lento de sus resistencias.

Algunas características de los cementos siderúrgicos chilenos han sido especialmente explotadas, tales como su bajo calor de hidratación en hormigones masivos, su resistencia química en obras marítimas e industriales, su aumento de resistencia a largo plazo en centrales hidroeléctricas y obras viales, su finura en inyecciones de roca.

5- RESULTADO DE LAS APLICACIONES

Considerando las resistencias mecánicas, los resultados son muy positivos, ya que la resistencia se especifica normalmente a los 28 días de edad y gracias al importante incremento más allá de este período, resuelve algunos problemas de resistencias que no hayan alcanzado a cumplir la exigencia a 28 días y confiere además un coeficiente de seguridad adicional de las obras, lo que ha sido avalado por numerosos testigos extraídos posteriormente, especialmente en pavimentos.

Desde el punto de vista de la durabilidad, tanto las obras marítimas como las construcciones industriales que trabajan con soluciones agresivas, están mostrando muy buen comportamiento.

Las armaduras de los hormigones armados son suficientemente pasivadas y no se han reportado casos de corrosión atribuibles a los cementos siderúrgicos.

El comportamiento con los aditivos usuales es normal.

La retracción no defiere de las retracciones de los otros cementos que se fabrican en Chile.

En resumen, los cementos siderúrgicos chilenos se han utilizado en todo tipo de aplicaciones, en condiciones similares al uso de los cementos portland, con muy buenos resultados. Las preocupaciones que se deben tener en su empleo, son las mismas que se deben tener con otros cementos y que equivalen a hacer cumplir las reglas del arte y tecnología de fabricación, transporte, colocación, compactación y curado de los hormigones.

6- NORMAS CHILENAS:

NCh 148 Of68	CEMENTO, Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales
NCh 147 Of57	Análisis Químico de los Cementos
NCh 149 Of57	Determinación de la superficie específica de los cementos por el turbidímetro de Wagner.
NCh 150 Of57	Determinación de la finura de los cementos por tamizado.
NCh 151 Of68	Cemento, Método de determinación de la consistencia normal.
NCh 152 Of70	Cemento, Método de determinación del tiempo de fraguado
NCh 153 Of73	Cemento, Ensayo de indeformabilidad al vapor de agua.
NCh 154 Of69	Determinación del peso específico de los cementos.
NCh 157 Of67	Cemento, Ensayo de expansión en autoclave
NCh 158 Of67	Cemento, Ensayo de flexión y compresión de mortero de cemento
NCh 159 Of70	Cemento. Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro Blaine.
NCh 161 Of68	Cemento. Puzolana para uso en Cementos. Especificaciones.
NCh 162 Of77	Cemento. Extracción de muestras
NCh 642 EOf68	Cemento Envases de 50 Kg.

USO DE ESCORIA DE ACERIAS ELECTRICAS EN LA PRODUCCION DE CEMENTO DE ESCORIAS Y ARRABIO

Nicolás O. Guevara

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la utilización de escorias líquidas provenientes de acerías eléctricas, con el fin de aprovechar tanto su composición química como su calor sensible en la recuperación de:

- Hierro metálico y óxidos de hierro al ser transformados en arrabio mediante la adición de coque o carbón.
- Sus elementos básicos - cal o silicatos de cal mediante la transformación de la escoria en un clinker con potenciales usos en la industria del cemento.

Estas escorias resultantes son enfriadas bruscamente en agua, separadas y molidas a la fineza del cemento y al ser mezclada conjuntamente con clinker, desarrolla capacidades hidráulicas.

A pesar de que algunos parámetros están aún bajo observación, los resultados del presente trabajo han sido bastante satisfactorios representando potenciales logros desde el punto de vista económico.

El presente informe muestra la fase inicial de un proyecto de mayor envergadura como sería la evaluación a escala industrial.

GERENCIA CENTRO DE INVESTIGACIONES
SIDOR - VENEZUELA

Nicolás Guevara Romero

Ingeniero Metalúrgico con estudios de post-grado en Ciencias de los Materiales egresado de la Universidad Central de Venezuela.

Venezolano de nacimiento, posee once (11) años de experiencia laboral al servicio de la Gerencia Centro de Investigaciones de SIDOR, en donde ha ocupado los cargos de Investigador Entrenante, Nóvel, Especialista, Asociado y Promotor, cargo el cual actualmente ostenta.

Su experiencia involucra al proceso de fabricación de arrabio a través de Hornos Eléctricos de Reducción y fabricación de acero vía Siemens-Martin además de Hornos Eléctricos de ARCO.

Es profesor designado de la Catedra de Siderurgia de la Universidad Central de Venezuela.

I. INTRODUCCION.

El proceso de "Reconversión" de la C.V.G. Siderúrgica del Orinoco (SIDOR) C.A. ha originado el cierre temporal de algunas plantas, entre las cuales podemos mencionar a los Hornos Eléctricos de Reducción, provocando con esto una grave situación para la Industria Cementera establecida en la región.

La total desaparición del mercado de las escorias de reducción resultantes del proceso de fabricación de arrabio, ha impactado drásticamente, debido a que este sub-producto representa un insumo considerado como crítico para el proceso de fabricación de cemento.

No obstante, existe la alternativa del uso de escorias de acerías.

Bajo esta premisa, se inician algunas pruebas en el Laboratorio de Procesos del Centro de Investigaciones de SIDOR, cuyo principal objetivo es el de demostrar que las escorias de acerías pueden ser transformadas, mediante un proceso simple de reducción y dilución, en sub-productos de gran aporte estratégico y económico como lo son el arrabio y una escoria de composición variable, que bien podría representar una solución a la situación planteada.

El presente informe muestra los resultados obtenidos a partir de las pruebas iniciales, demostrativas de la factibilidad técnica del presente proyecto, en extremo novedoso y con grandes potenciales desde el punto de vista económico.

II- CONCEPTOS GENERALIZADOS

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un proceso en su primera fase, que permita la utilización de las escorias de acerías, basándose, principalmente, en su composición química y su gran disponibilidad.

Uno de los procesos es la reducción de los óxidos de hierro presentes en la escoria. Estos son transformados en metálico mediante la adición de coque según las siguientes reacciones:



Otro de los procesos es el aprovechamiento de sus elementos básicos - cal o silicatos de cal - transformando la escoria mediante la adición de alúmina y/o ajuste de la relación del CaO/SiO_2 , en una mezcla de composición similar al Clinker. Ver figura 1.

En general, el proceso de transformación de la escoria de acerías en arrabio y escorias con composición similar al clinker consta de los siguientes pasos:

- Adición de alúmina
- Reducción y extracción del hierro metálico mediante la adición de carbón o coque.
- Ajuste de la relación CaO/SiO_2 mediante dilución y eventual disminución del contenido de MgO (máximo 5%)

Esta investigación abarca en específico pruebas de laboratorio, en un horno a gas, quedando pendiente las pruebas a escala industrial en un horno de más alta capacidad.

III- PARTE EXPERIMENTAL (FASE INICIAL).

Las pruebas realizadas en principio han sido utilizando escorias de acerías, sólidas, con granulometría menor que 2". Su composición inicial se muestra en la tabla I y el horno utilizado fue uno provisto de quemadores oxi-gas-fuel de 300 Kg de capacidad.

TABLA I Compos. Inicial de las Escorias de Acería
Porcentaje (%)

<u>CaO</u>	<u>SiO₂</u>	<u>Al₂O₃</u>	<u>MgO</u>	<u>Na₂O</u>	<u>Fe₂O₃</u>	<u>FeO</u>	<u>Fe</u>	<u>MnO</u>	<u>P₂O₅</u>
38	12	1	3	0,4	7	22	9	6	1

III.1- CONSUMOS ESPECIFICOS

Los consumos específicos se refieren a los consumos de reductores y fundentes utilizados durante la prueba, por unidad de arrabio producido.

En la tabla II siguiente mostramos un balance del tratamiento efectuado a una colada en donde se utilizó escorias de acerías sólidas con una granulometría <2".

TABLA II Balance de masa y energía de una colada en donde se transformaron escorias de acerías en escorias cementantes y arrabio.

<u>Materiales de Partida</u>	<u>Unidades</u>	<u>Consumo Específico</u>
Escoria de Acerías	kg/kg Arrabio	3.17
Alúmina	kg/kg Arrabio	0.53
Oxido de Calcio	kg/kg Arrabio	1.60
Silice	kg/kg Arrabio	0.85
Coque	kg/kg Arrabio	0.45
Gas Natural	m ³ /kg Arrabio	0.065
Fuel-Oil	kg/kg Arrabio	0.021
Oxigeno	m ³ /kg Arrabio	0.080

PRODUCTOS RECUPERADOS

Arrabio	kg	58.5
Escoria Cementante	kg	265.0

III.2- DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

Un aspecto importante es el punto de fusión de las escorias de acerías. Como una manera de reducirlo, se procedió a adicionar la alúmina y la cal antes de cargar el coque requerido para la reducción de los óxidos. De lo contrario, la fusión alcanzaba una temperatura bastante elevada, aumentando con esto el consumo energético y, por ende, el consumo de refractarios del horno.

Las coladas tomaron aproximadamente 4 horas, alcanzándose durante el proceso de reducción del óxido de hierro una temperatura del orden de 1650°C.

Para el caso de la separación del arrabio y de la escoria; ésta fue realizada según una piquera convencional, siendo la escoria enfriada bruscamente en agua buscándose así detener la disgregación de los silicatos de cal y tratando de simular al máximo las condiciones de planta.

III.3- CARACTERISTICAS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS

Cemento de Escorias: Durante las pruebas se produjo un material cuyas características no son idealmente la de un clinker para cemento por su contenido de Al_2O_3 muy elevado y contenido de CaO muy bajo. No obstante su propiedad de temple bajo la presencia de agua fue evaluada. Estas escorias

fueron molidas a la fineza de 4.500 cm²/g y mezcladas con clinker puro y yeso en una proporción 40% 55%-5%, alcanzando después de 28 días resistencias a la compresión de 295 kg/cm², los cuales fueron valores calificados como aceptables.

TABLA II Compos. de la Escoria Cementante Obtenida
%

<u>CaO</u>	<u>SiO₂</u>	<u>Al₂O₃</u>	<u>MgO</u>	<u>Na₂O</u>	<u>FeO</u>	<u>Fe</u>	<u>MnO</u>	<u>P₂O₅</u>
56	23	11	2.5	0,1	1,5	-	2.5	1

Arrabio: El arrabio obtenido durante las pruebas tuvo la siguiente composición química:

4,5% C; 6% Mn; 0.5% P; 0,15% Si.

Con respecto al arrabio común usado en la industria del acero, éste tiene un alto contenido de Mn y uno muy bajo de Si; su contenido de fósforo se ubica en aquel arrabio contentivo de fósforo, siendo de fácil aprovechamiento en estado líquido, sobre todo, tomando como medida de precaución la eliminación del fósforo mediante posteriores tratamientos con escorias sintéticas base cal.

Teniendo algunos datos considerados como suficientes en algunos casos un segundo paso sería la evaluación del uso de escorias de acerías, pero líquidas, directamente de las "ollas" contenedoras o

slag-pots, disponibles en las acerías para recoger toda la escoria que se genera durante la fabricación del acero.

Con estas pruebas quedaría totalmente demostrada la factibilidad de recuperar escorias de acerías, minimizando con esto los costos que su manejo y/o almacenamiento provoca. Se estima que estas pruebas serían realizadas en un horno eléctrico de arco, evaluando con esto el consumo de energía intrínseco del proceso, cuyos resultados se espera sean promisorios debido al aprovechamiento del calor sensible que ésta trae consigo.

IV- CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra la factibilidad técnica de transformar las escorias de acerías en arrabio y escorias cementicias, mediante un proceso de reducción y dilución, utilizando los medios industriales, comunes.

- Los procesos de reducción y dilución son de fácil aplicación, acusando los productos obtenidos una buena calidad.
- Este proceso es potencialmente rentable en el marco de un trabajo en equipo entre fábricas de cemento e Industrias Siderúrgicas debido a que deja abierta la posibilidad de obtener en el mismo sitio arrabio

y cemento, opción particularmente atractiva para los países en desarrollo.

V- BIBLIOGRAFIA

- 1- Heanley C. and P. Cowx - The Smelting of Ferrous Ores Using a Plasma Furnace. Tetronics research and development Co. limited Faringdon, Oxon, England.
- 2- Kaiser F.T. and L. French. Supplementary Hot Metal From Waste Oxides. ISS-AIME, 63rd Noh-Bosc Washington, D.C. 1980.
- 3- Monserratte E. y Mancera A. Investigación del aprovechamiento de la escoria producida en la Siderurgia del Orinoco como constituyente del cemento. Trabajo especial de grado Universidad Católica Andrés Bello. Caracas Venezuela 1985.
- 4- O' Hara P. Recovery of Useful Components From Converters Slags. Iron and steel engineer, february, 1987, p.p. 34-40.

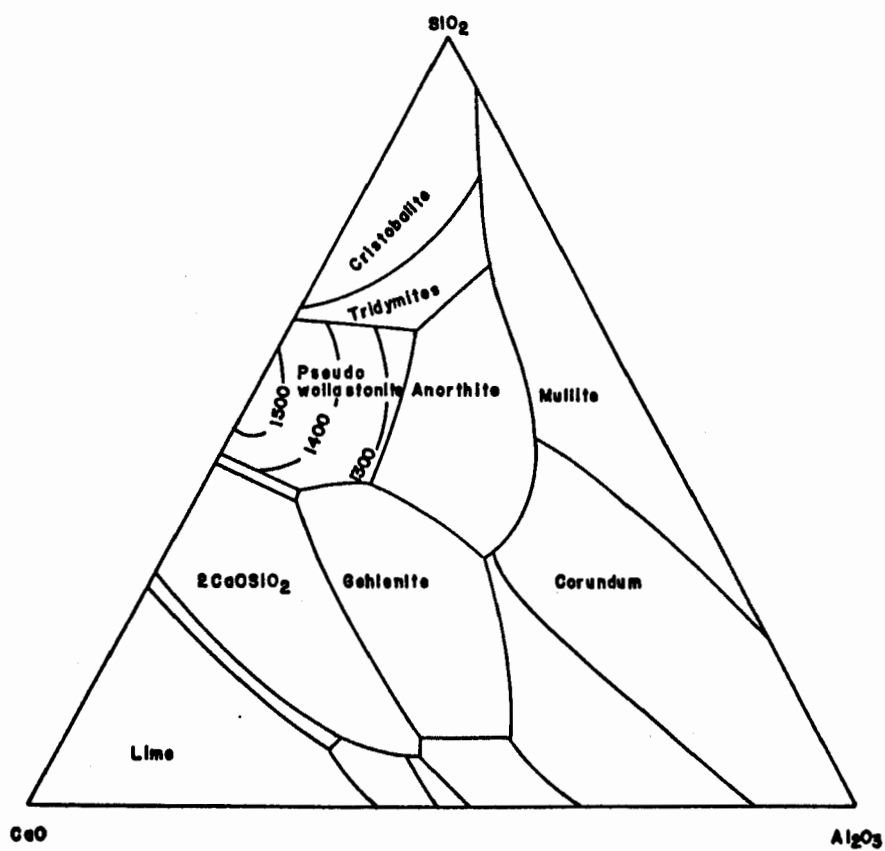
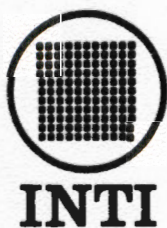


FIG. 1-DIAGRAMA TERNARIO $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ REPRESENTACION DE ALGUNAS TRANSFORMACIONES.

Impreso en junio de 1991
en el Departamento de Ediciones del INTI, Av. General Paz entre Albarelos y Av. de los
Constituyentes, Miguelete, Provincia de Buenos Aires.
Edición de 200 ejemplares.



INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL



**CENTRO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIONES
PARA EL DESARROLLO**
