

GRUPO

**INETTI**

Reportes Técnicos

1. CEMENTOS A MEDIDA

2. ULTIMOS DESARROLLOS EN LA TECNOLOGIA DEL HORMIGON



## CEMENTOS A MEDIDA

Por Uwe Schütz (Alemania).

Holderbank Management and Consulting.

Introduce concepto de los Cementos Compuestos, describiendo sus componentes, tecnología de producción, propiedades y campos de aplicación.

El Dr. Uwe Schütz posee una vasta formación académica que incluye un Postdoctorado en la Universidad Politécnica Federal de Zúrich (1997).

Ha desarrollado actividades en distintas fábricas de cemento del grupo Holderbank como Cuma-rebo, Cementos Caribe / Venezuela; Macuspana y Ramos Arizpe, APASCO / México.

Ha sido responsable de varios proyectos internacionales e interdisciplinarios de asesoría en el grupo "Holderbank", jefe del proyecto de investigación "Ayudantes de molienda para escoria granulada de alto horno" de Holderbank Administración y Asesoría (HAA) y miembro de equipos de diversos proyectos de HAA en las áreas de desarrollo y aplicación de productos, tecnología de proceso, componentes minerales.

Desde 1998 es asesor de HAA en áreas relacionadas con la química del cemento, el diseño de cemento, y la evaluación de componentes minerales y aditivos químicos de cemento.

## 1. CEMENTOS FABRICADOS A LA MEDIDA DE LAS NECESIDADES.

### 1.1 INTRODUCCION

En la actualidad, en muchos países se utiliza la especificación del hormigón basada en el desempeño y se ha desterrado el concepto de hormigón multipropósito para especificar "hormigones adaptados a diferentes aplicaciones". De aquí surge el concepto de un producto para cada necesidad, o dicho de otra manera, "el producto a medida". Esto es, un hormigón del que se prevén determinadas prestaciones en condiciones de servicio.

Las prestaciones son definidas a través del requerimiento de ciertas propiedades, por ejemplo: un determinado desarrollo de calor, resistencia a medios agresivos específicos (sulfatos, cloruros o ambientes industriales) o resistencia al congelamiento y deshielo. En este contexto, el diseño de la mezcla y la selección de los materiales adquiere gran relevancia, a la vez que los cementos compuestos se vuelven cada vez más populares.

El uso de cementos compuestos tiene para sus usuarios ventajas indiscutibles:

Mejora las características del hormigón fresco y endurecido a largo plazo, mejora la durabilidad y reduce del calor de hidratación inicial. Puede decirse que en la mayoría de los casos estos cementos se comportan mejor que los Cementos Portland Normales.

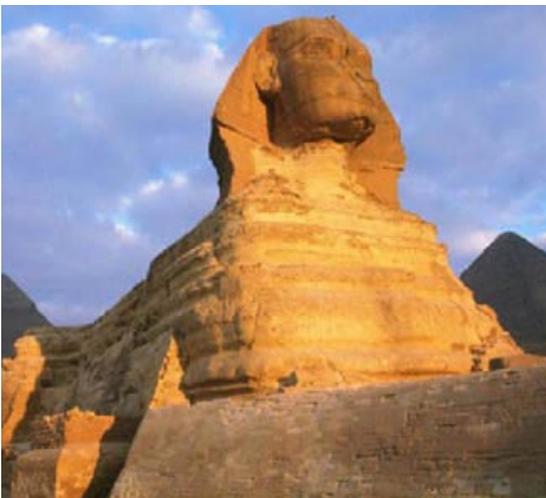


Fig. 1 A largo plazo la durabilidad es más beneficiosa que la resistencia mecánica.



Fig. 2 Ventajas del cemento con escorias

Además la producción de cementos compuestos permite obtener productos "a medida" según sea la necesidad del cliente, mejorando las propiedades del hormigón para aplicaciones especiales.

La producción de cementos compuestos tiene también ventajas económicas y ambientales. Por medio de su producción la industria cementera cuenta con una poderosa herramienta para reducir la emisión de dióxido de carbono. Además, se conservan las reservas de minerales y combustibles naturales.

### 1.2 ¿QUE SON LOS CEMENTOS COMPUESTOS?

Los cementos compuestos son aglomerantes que contienen, además de clinker de cemento Portland y yeso, uno o más de los siguientes materiales:

- Material hidráulico latente, generalmente escoria granulada de alto horno.
- Componentes puzolánicos tales como puzolana natural, ceniza volcánica, humos de sílice, arcilla calcinada, etc.
- Aditivos inertes, en la mayoría de los casos caliza.

En particular, en Argentina existe normalizado un Cemento pòrtland compuesto (IRAM 1730) que en su constitución debe incorporar más de un componente mineral.

# ▼ Cementos a Medida

- ▶ 1. Cementos fabricados a la medida de las necesidades.
- ▶ 2. Tecnología de la producción.



Los cementos compuestos se hacen cada vez más populares, en particular, los cementos con escoria. Las encuestas en el mundo así lo demuestran (Figura 3).

## 1.3 CEMENTOS ESPECIALES Y A PEDIDO

Las nuevas tecnologías en molienda y mezcla, y la utilización de los diversos tipos y proporciones de componentes minerales, permiten la producción de diferentes productos de acuerdo a las necesidades del cliente.

En la industria de la construcción actual, las exigencias en las propiedades del cemento progresan rápidamente; el desarrollo de la resistencia es sólo una de las características entre un sin número de otros requerimientos. Consecuentemente, existe una creciente necesidad de proporcionar cementos especiales y a pedido, productos que difieran del propósito general de la producción masiva porque necesitan adaptar sus características a las necesidades específicas del cliente o de un proyecto específico (Figura 4) Las expectativas del cliente en cuanto al cemento se relacionan, generalmente, con una o más de las siguientes propiedades del cemento, mortero u hormigón:

- Buena fluidez y comportamiento del cemento almacenado
- Buena trabajabilidad y baja pérdida de asentamiento.
- Tiempo de fraguado regulado a las necesidades.
- Desarrollo favorable de la resistencia.

- Bajo calor de hidratación.
- Gran durabilidad.
- Baja contracción.
- Resistencia a los sulfatos/ agua de mar.
- Prevención de la reacción álcali-agregado.

## 2. TECNOLOGIA DE LA PRODUCCION

### 2.1 MOLIENDA

Actualmente los cementos compuestos se producen por medio de molienda conjunta del clinker, yeso y una cierta cantidad de componentes minerales ó por molienda separada del

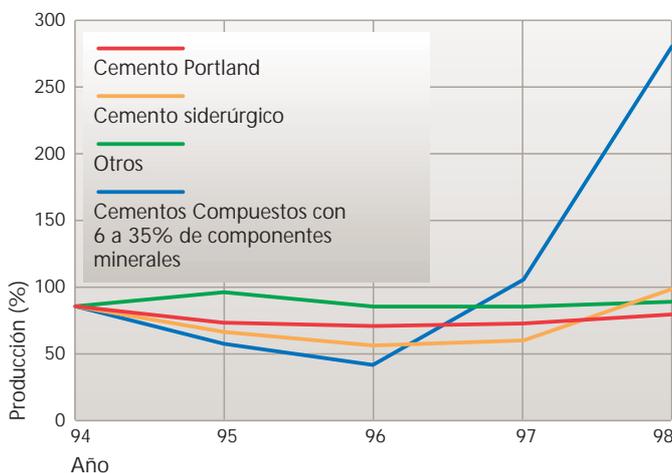


Fig. 3 Aumenta la popularidad de los cementos compuestos



Fig. 4 Necesidad de hormigones de diferentes características

Fuente: Hochofenzement - Eigenschaften und Anwendungen im Beton. Verlag Ban + Technik. 2 Aufl. Düsseldorf



Fig. 5 Tecnología de la producción

clinker/yeso y de los componentes minerales con su posterior mezcla (Figura 5).

Para éste propósito se cuenta con modernos sistemas de molienda como el molino vertical de rodillos (Figura 6), de probada eficiencia energética y fiabilidad operativa, que permite obtener cementos de excelentes características granulométricas.

La molienda conjunta no permite el ajuste por separado de la finura de cada componente del cemento (Figura 7).

La molienda de los componentes por separado otorga flexibilidad para producir una gran variedad de cementos basados en muy pocos componentes y además permite optimizar la curva granulométrica de cada uno de ellos individualmente.

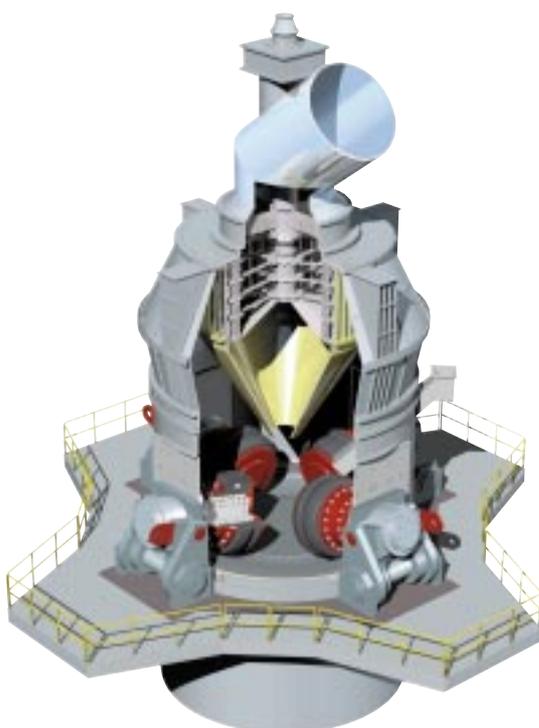


Fig. 6  
Esquema del molino vertical

## 2.2 MEZCLADO

El diseño de las instalaciones de mezcla de cemento se basa típicamente en el concepto de la mezcladora batch ó en el del mezclado continuo (Figs. 8 y 9). En el sistema de mezclado continuo, cada tipo de cemento es almacenado en su propio silo.

La mezcladora batch, en cambio, otorga una gran flexibilidad y uniformidad de producción. Este concepto tiene ventajas en los casos en donde hay una gran variedad de productos comercializados ó cementos especiales ya que:

- Otorga una gran flexibilidad para abastecer diferentes demandas.
- Cada componente del cemento es molido por separado a su finura óptima y almacenado en su propio silo o en un silo de múltiples compartimentos.
- Los componentes son dosificados desde sus respectivos silos hacia la mezcladora batch.
- Diseño óptimo del producto.

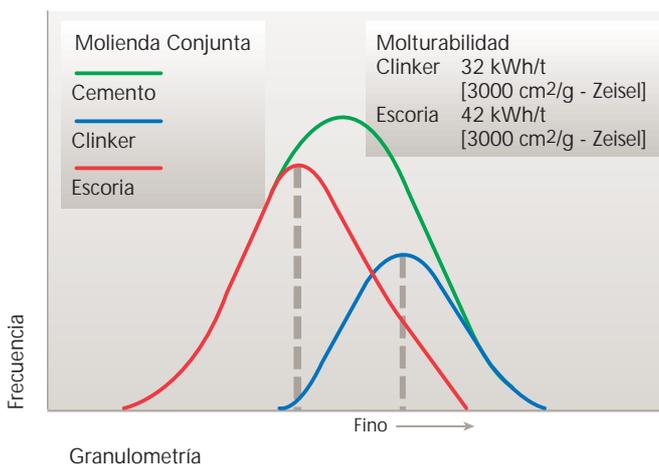


Fig. 7 Distribución granulométrica  
 Fuente: Krupp Polysius Alemania

## ▼ Cementos a Medida

- ▶ 2. Tecnología de la producción.
- ▶ 3. El producto y sus componentes

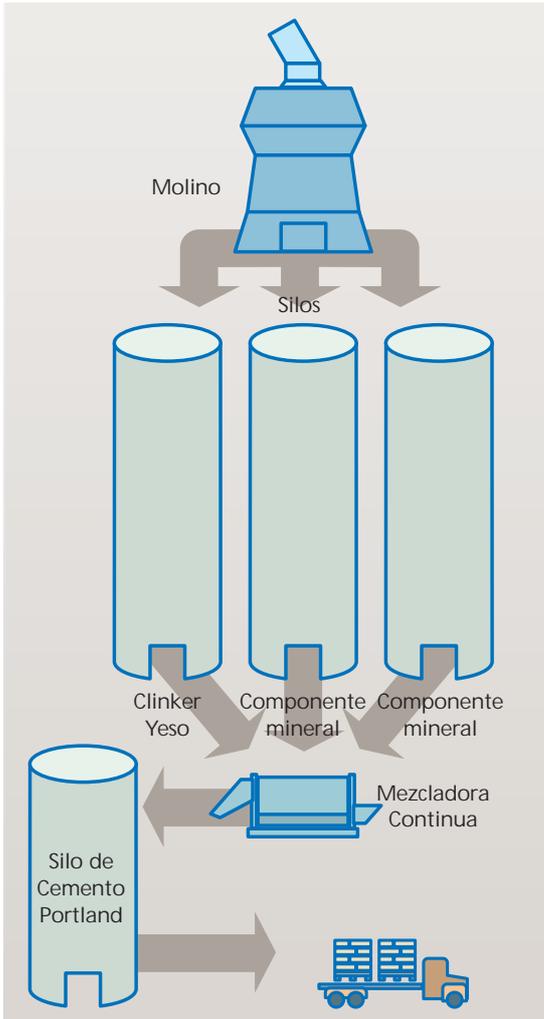


Fig. 8 Esquema del proceso productivo en molienda separada. Mezcla continua.

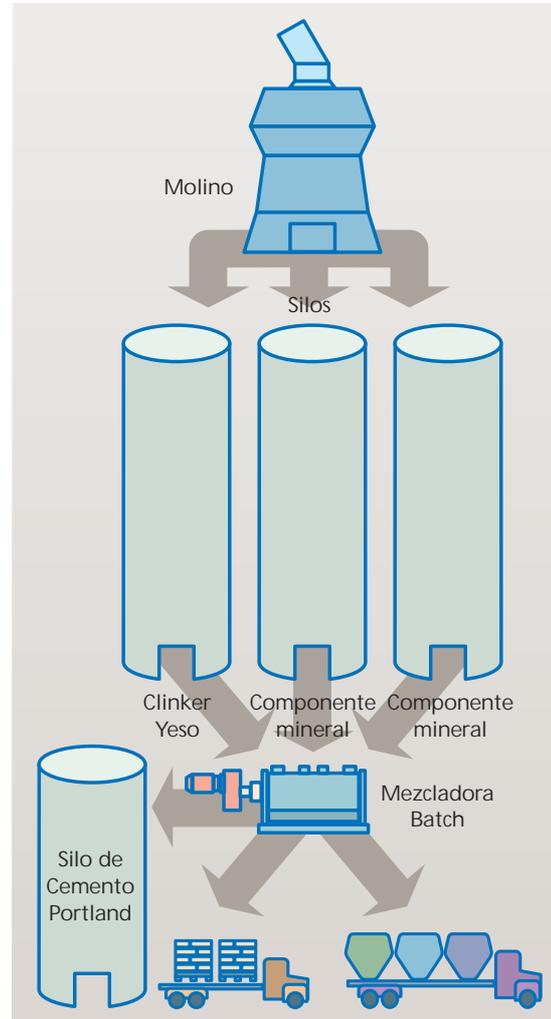


Fig. 9 Esquema del proceso productivo en molienda separada. Mezcla batch.

- Con un molino vertical de rodillos no hay producto de transición en los cambios de tipo de producto a moler.
- Las mezcladoras batch permiten la producción de varios tipos de cementos y el cambio del tipo de cemento muchas veces al día.
- Proporciones exactas de los componentes basado en un sistema de pesada simple y confiable.
- Despacho directo del producto tanto hacia los compartimentos para la carga a granel o hacia la planta de empaque sin almacenamiento intermedio con buena uniformidad del producto.

## 3 EL PRODUCTO Y SUS COMPONENTES

### 3.1 DISEÑO DEL CEMENTO COMPUESTO

La finura del cemento y la proporción de sus componentes tienen una influencia decisiva en sus propiedades.

Para un diseño de cemento óptimo es imperativo:

- seleccionar el conjunto de componentes más conveniente,
- determinar las proporciones relativas de los componentes y
- definir la finura y la distribución del tamaño de

partículas de los componentes del cemento.

Muchas compañías del grupo Holderbank producen cementos compuestos en diversos países del mundo.

### 3.2 TIPOS DE COMPONENTES MINERALES

Se sabe desde hace tiempo que diferentes subproductos pueden ser mezclados con cemento pórtland para producir hormigón con características similares o mejores que las del cemento pórtland común. Estos componentes están actualmente incluidos en la expresión general "componentes minerales" y están compuestos esencialmente por los mismos elementos químicos que conforman el clinker del cemento pórtland.

Algunos de estos componentes minerales tales como la escoria de alto horno, la puzolana natural y las cenizas volantes han sido utilizadas por mucho tiempo.

En la actualidad, la caliza como filler calcáreo y el humos de sílice también se están utilizando en gran medida. Además, materiales como las arcillas calcinadas, la metacaolinita, microcenizas volcánicas y cenizas de cáscara de arroz se utilizan en casos especiales.

Generalmente, los componentes minerales se clasifican en tres categorías principales:

- Materiales hidráulicos latentes (escorias granuladas de alto horno)
- Materiales puzolánicos (cenizas volantes, puzolanas naturales).
- Aditivos inertes (normalmente caliza).

En la industria cementera los componentes minerales activos (hidráulicos latentes y puzolánicos) y especialmente la escoria de alto horno granulada son utilizados predominantemente en los cementos compuestos

## 4. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS COMPUESTOS

Las propiedades de estos cementos dependerán de los tipos de componentes minerales empleados y sus proporciones en la mezcla. Pero, en general pueden resumirse de la siguiente manera:

- Trabajabilidad favorable.
- Menor pérdida de asentamiento.
- Menores requerimientos de agua (no valedero para cementos puzolánicos).
- Comportamiento del fraguado levemente demorado.
- Menor calor por hidratación
- Menor resistencia inicial, pero excelente desarrollo de resistencia a los 28 días.
- Excelente durabilidad del hormigón resultante, en cuanto a:
  - Porosidad total más baja, tamaño del poro más favorable resultando en menor permeabilidad.
  - Menor sensibilidad a la reacción álcali-agregado.
  - Mejor resistencia al ataque químico (sulfatos, agua de mar, ácidos débiles).
  - Menor difusión de cloruros en la masa de hormigón.
  - Mayor resistencia al ciclo congelamiento-deshielo.
  - Mayor resistencia a la carbonatación.
  - Color del hormigón más claro (sólo en cementos con escoria, filler calcáreo y algunas puzolanas).

### Trabajabilidad

Los cementos compuestos otorgan, para un valor de asentamiento dado, una mejor trabajabilidad del hormigón (mejores características reológicas).

Particularmente, la incorporación de escoria facilita la compactación bajo vibración y la terminación. También mejora la bombeabilidad del hormigón y debido a la naturaleza vítrea y no-absorbente del polvo de escoria se favorece la trabajabilidad. Más allá de esto, los componentes minerales ayudan a dispersar mejor las partículas del cemento (Figura 10).

### Demanda de agua

El requerimiento de agua del hormigón depende principalmente del diseño de la mezcla y del tipo de agregado. La incorporación de escoria en el cemento conduce generalmente a un menor requerimiento de agua que en un cemento normal (Figura 11).

### Tiempo de fraguado

Los tiempos de inicio y finalización del fraguado de los cementos compuestos pueden ser usualmente mayores si se los compara con los del cemento normal (excepto en el caso de cementos pórtland con humos de sílice).

Esto puede significar una ventaja para las operaciones con hormigón elaborado y para utilizarlo en clima caluroso y en construcciones de hormigón masivo.

El tiempo de fraguado se encuentra fuertemente influenciado por:

- La reactividad del clinker empleado.
- El contenido y tipo de componente mineral utilizada
- La relación agua/cemento.
- La temperatura de curado inicial del hormigón.

Se ha observado un retardo a bajas temperaturas. Sin embargo, en caso que se requiera un fraguado más rápido, se pueden aplicar aditivos químicos para acelerar el fraguado y el proceso de endurecimiento.

### Calor de hidratación

Cuando se utilizan cementos compuestos los valores de calor generado inicialmente son siempre menores (excepto en el caso de cementos pórtland con humos de sílice). Esta reducción es directamente proporcional a la cantidad de componentes minerales incorporados en el cemento compuesto.

El calor de hidratación también depende del cemento base utilizado y de la calidad y tipo de componentes minerales utilizados.

En la Figura 12 se indican algunas cifras en donde se compara el pico de temperatura del hormigón sin adiciones, hormigón con 75% de escoria y hormigón con 30% de ceniza volantes.

### Curado

El hormigón realizado con cementos con contenidos de adiciones mayores al 35% es más sensible a condiciones de curado deficientes. Esto se debe principalmente a la menor velocidad de hidratación.

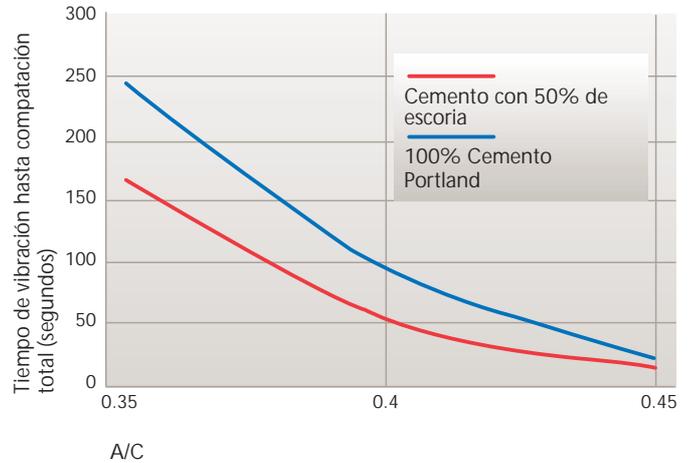


Fig. 10 Trabajabilidad del hormigón fresco

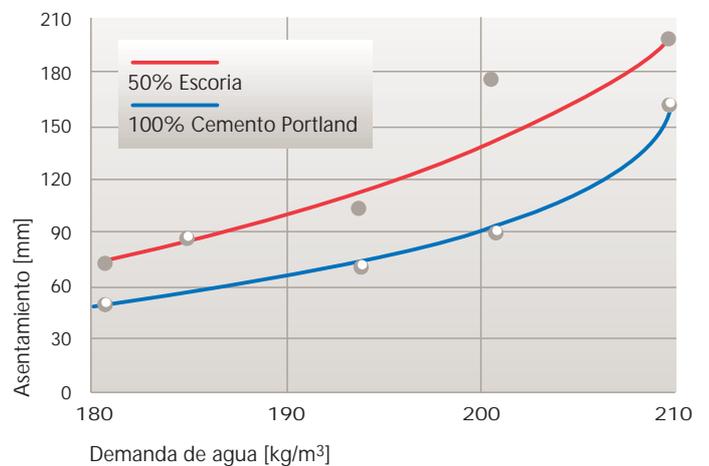


Fig. 11 Asentamiento  
Fuente: Meusel y Rose, 1983 - ACI-233

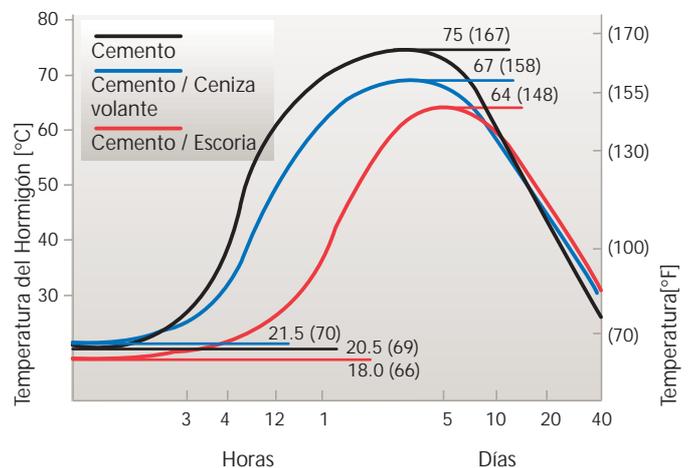


Fig. 12 Calor de hidratación.  
Fuente: Bamforth, 1980 - ACI-233

El grado y la velocidad de la hidratación de los materiales cementíceos se ven afectados por la pérdida de humedad en las primeras edades lo que provoca una disminución en la ganancia de resistencia.

### Resistencia a la compresión

Cuando se utilizan cementos con componentes minerales activos, generalmente la resistencia de las primeras edades es un poco menor, en comparación con la de los cementos pórtland normales, pero a largo plazo la resistencia final se ve mejorada.

Los parámetros de resistencia pueden ser controlados a través del diseño del cemento y por medio del diseño de la mezcla del hormigón.

Los factores más influyentes son:

- La finura de cada componente o del cemento compuesto respectivamente.
- La reactividad del clinker y de los componentes minerales utilizados en el diseño del cemento.
- Las proporciones de los distintos componentes del cemento (por sobre todo el contenido de componentes minerales).
- Relación agua/ligante
- Las condiciones de curado.

En la figura 13 se muestra una comparación entre el desarrollo de la resistencia de cementos compuestos con distintas cantidades de escoria.

### Durabilidad

Los siguientes aspectos de la durabilidad del

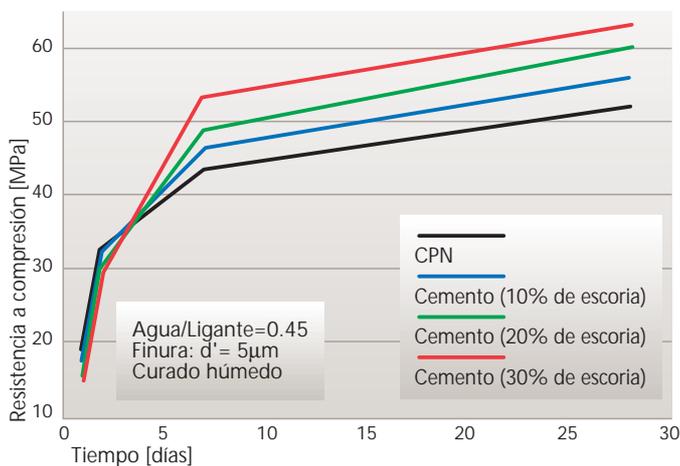


Fig. 13 Resistencia (Diferentes contenidos de escoria)

hormigón se discuten generalmente dentro del contexto de la utilización del cemento con escoria:

- Permeabilidad y porosidad
- Resistencia a la reacción álcali-agregado
- Resistencia a los sulfatos
- Difusión de cloruro
- Carbonatación
- Corrosión de armaduras
- Resistencia a ciclos de congelamiento-deshielo

### Permeabilidad y porosidad

La obtención de hormigones con menor permeabilidad es una de los mayores beneficios del uso de los cementos compuestos. La menor permeabilidad se logra a través de las acciones químicas y físicas de los componentes minerales, que llevan a mejorar la estructura de poros y a un refinamiento de los mismos.

La permeabilidad disminuye con el incremento del contenido de componentes minerales activos.

Los cementos con componentes minerales activos tienen mayor durabilidad siempre y cuando se lleve a cabo un buen curado (Figura 14).



Fig. 14 Aplicaciones donde se necesita baja permeabilidad y alta durabilidad.

### Resistencia a la reacción álcali-agregado

Que el problema de la expansión de la reacción álcali-agregado puede ser reducido mediante la aplicación del cemento con escoria ya fue demostrado por H.G. Smolczyk<sup>1</sup> y confirmado por ensayos adicionales realizados por diversos institutos.

La cantidad total de álcalis en el hormigón, proporcionada por el cemento, determinará hasta que punto tendrá lugar la reacción álcali-agregado (expansión del hormigón) con los agregados reactivos. Los cementos con cantidades mayores al 40% de escoria reducen su expansión (debido a la reacción álcali-agregado) con cementos que contienen hasta 1% de álcalis.

La ventaja de utilizar cementos con escoria en áreas de potencial reactividad álcali-agregado es que no se necesita de ningún clinker especial con bajos álcalis para lograr el control de esta reacción (Figura 15).

### Resistencia al ataque con sulfatos

Cuando se utilizan cementos compuestos la permeabilidad del hormigón se ve significativamente reducida; ésto y la menor cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  disponible mejoran la resistencia a los sulfatos.

En el caso particular de la incorporación de escoria, los resultados son más significativos cuando se reemplaza el 40% de clinker con bajo  $\text{C}_3\text{A}$  por escoria, que cuando se reemplaza un 40% de clinker con alto  $\text{C}_3\text{A}$  por escoria (Figura 16)

### Difusión de cloruro

Tal como se menciona anteriormente la permeabilidad de los cementos compuestos disminuye por la utilización de componentes minerales activos y por lo tanto la difusión de cloruro se ve reducida significativamente.

Particularmente, esta ventaja ya es evidente con un contenido de escoria de cerca del 40% en el cemento.

En la Figura 17 se evaluó por más de dos años

el hormigón con relaciones a/c y proporciones de escoria variables frente a la difusión de cloruro.

### Carbonatación

Carbonatación significa la reacción entre el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera y los componentes del hormigón endurecido.

Por medio de la neutralización del  $\text{Ca(OH)}_2$  a través del  $\text{CO}_2$ , la alcalinidad de la solución del poro disminuye, desprotegiendo el hierro de la armadura.

Los factores principales que modifican la velocidad de la carbonatación son:

- La permeabilidad del hormigón
- La porosidad
- La eficiencia del curado

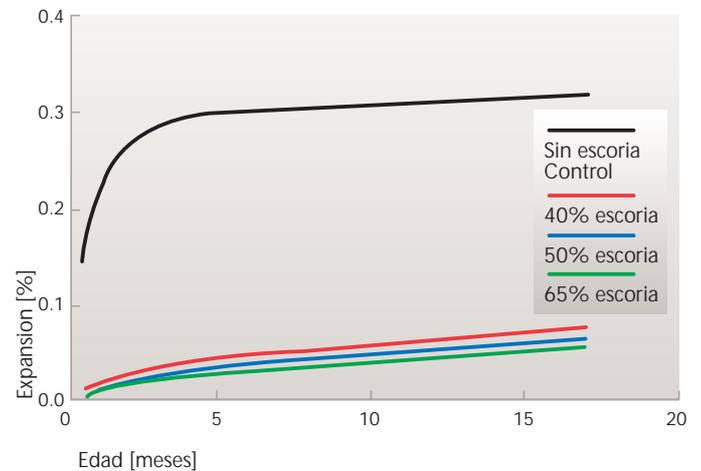


Fig. 15 Reacción álcali-agregado.  
Fuente: Hogan y Meusel, 1983 - ACI-233

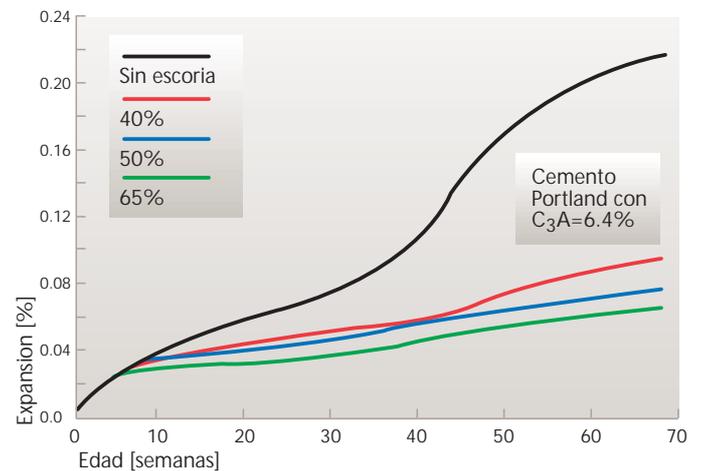


Fig. 16 Resistencia a los sulfatos.  
Fuente: Hogan y Meusel, 1983 - ACI-233

<sup>1</sup> H. G. Smolczyk: (VDZ, Germany) "Slag Cements and Alkali-reactive Aggregates", VI ICCO, Moscow 1974, Suppl. Paper Section III/2; P. Zraggen: "Alkali-Aggregate Reaction", Holderbank report 1991; A. Shayan: "Use of fly ash and blended slag cement in prevention of alkali-aggregate reaction in concrete", Concrete Institute of Australia; M.D.A. Thomas, F.A. Innis: "Effect of slag on expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete", ACI Materials journal 95 (1998) 6, p. 716-724

## ▼ Cementos a Medida

- ▶ 4. Propiedades de los cementos compuestos
- ▶ 5. Aplicaciones de los cementos compuestos

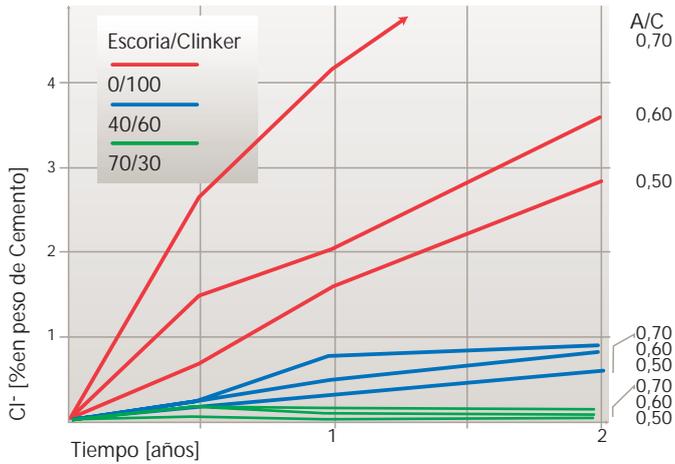


Fig. 17 Difusión de Cloruros en barras de hormigón.

Fuente: H. G. Smolczyk, 1977 - ACI-233

### Color del hormigón

La intensidad del color varía con el tipo de componentes minerales utilizados y el clinker del cemento, así también con la cantidad de componentes minerales en el cemento. En algunos casos el cemento tiene un color más claro que el cemento pórtland normal y va a producir un hormigón, una vez curado, de color más claro (Figura 18).



Fig. 18  
Color del  
hormigón



Fuente: Obourg - Origny. Francia, Bélgica.

## 5. APLICACIONES DE LOS CEMENTOS COMPUESTOS

De acuerdo a la experiencia, en base a cementos con escoria de varios países, se puede reemplazar entre un 25 - 30% del clinker por escoria, sin afectar significativamente las características del cemento pórtland normal. Sin embargo, esto requiere que se utilicen componentes minerales de buena calidad y que los procesos de molienda y mezcla se encuentren óptimamente ajustados.



Fig. 19  
Hormigón  
de alto  
desempeño

Fuente: Hochofenzement - Eigenschaften und Anwendungen im Beton.

## ▼ Cementos a Medida

### ► 5. Aplicaciones de los cementos compuestos

Por lo tanto, los cementos con menos del 35% de escoria son utilizados para aplicaciones en donde sea importante una mejor trabajabilidad, menor pérdida de asentamiento y un favorable desarrollo de la resistencia después de 28 días.

Los cementos con un contenido de escoria superior al 35% son aglomerantes para aplicaciones especiales con características específicas tales como bajo calor de hidratación, gran durabilidad y excelente resistencia a la compresión a los 28 días (Figs. 19 y 20).

Este cemento es empleado para elementos de hormigón de gran espesor u hormigones masivos para represas o en usos especiales como el vial (Fig. 21).

Los principales desafíos para los cementos compuestos son las resistencias en las primeras edades y la atención especial a un curado eficiente.

La pérdida de la resistencia puede ser compensada en gran medida por una molienda más fina de la fracción del clinker, un diseño de cemento apropiado o la utilización de aditivos químicos (mejoradores de desempeño).

Finalmente, está claramente marcada la tendencia mundial: desarrollo de productos específicos para cada necesidad (cementos a medida), con el cuidado del medio ambiente y el máximo aprovechamiento de las ventajas comparativas de las distintas materias primas, respaldados por la optimización del proceso de elaboración industrial, serán los factores que definirán los años venideros.

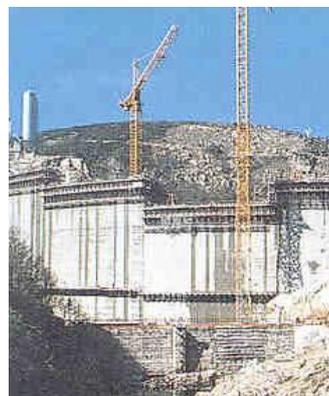


Fig. 20  
Necesidad de  
hormigones de  
baja permeabilidad  
y durabilidad

Fig. 21  
Necesidad de  
hormigones de  
bajo calor de  
hidratación

Fuente: Hochofenzement - Eigenschaften und Anwendungen im Beton.