

**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES  
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título: Evaluación de la influencia de la molienda separada e inter-molienda del cemento de bajo contenido de carbono (CBC), en las propiedades físico mecánicas de morteros.**

**Autor: Asiel Carmona Pérez**

**Tutores: Ing. Abdel Hernández**

**Dr. Ing. Raúl González López**

**Santa Clara  
2014**

## ***Pensamiento***

*El futuro está en las grandes innovaciones técnicas, que constantemente van cambiando el aspecto del mundo.*

*Ernesto Che Guevara.*

## ***Dedicatoria***

A mis padres por su apoyo incondicional y enseñanza en la vida.

## ***Agradecimientos***

A los tutores Abdel y Raúl.

A todos mis compañeros de aula por los 5 años de universidad juntos.

A los profesores de la facultad que me han enseñado y ayudado.

A todos los amigos que me brindaron su ayuda.

A mi familia que siempre me ha apoyado.

A Evelyn por su ayuda y su apoyo.

En especial a mi papá y mi mamá.

## Resumen

Se presenta una producción a través de molienda y evaluación de parámetros físico-mecánicos, a escala de laboratorio y semi-industrial, de un cemento ternario de bajo carbono, con un 45% de sustitución de clínquer a partir de materias primas procedentes de la fábrica de cementos Siguaney. Las materias primas son sometidas a dos procesos de molienda, en una primera etapa es remolido un cemento ya elaborado en la fábrica hasta alcanzar una alta finura, debido al mayor grado de finura, mostrando un ligero aumento de la demanda de agua con respecto al cemento P-35, lográndose una mejora considerable de esta demanda ante la utilización de aditivos como es el caso del SF 20 de producción nacional.

En una segunda etapa, se produce el cemento a partir de clínquer, arcilla calcinada, carbonato de calcio y piedra de yeso mediante la molienda conjunta y por separado de cada componente, los cuales son mezclados después de alcanzada la finura proyectada para cada uno.

Se demuestra que el aumento de la finura genera un incremento en la demanda de agua, disminuyéndose mediante la utilización de aditivos, los que le confieren al cemento una fluidez comparable con la del P-35.

## ***Abstract***

Is presented a production through grinding and evaluation of parameters physical-mechanics, to laboratory scale and semi-industrial, of a ternary cement of low carbon, with a 45% of clinker substitution starting from raw matters coming from the factory of cements Siguaney. The raw matters are subjected to two grinding processes, in a first stage it is already to grinding a cement elaborated in the factory until reaching a high fineness, due to the biggest degree of fineness, showing a slight increase of the demand of water with regard to the cement P-35, being achieved a considerable improvement of this demand before the use of additives like it is the case of the SF 20 of national production.

In a second stage, the cement takes place starting from clinker, roasted clay, carbonate of calcium and stone of plaster by means of the combined grinding and for separated from each component, which are blended after having reached the fineness projected for each one.

It is demonstrated that the increase of the fineness generates an increment in the demand of water, diminishing by means of the use of preservatives, those that confer to the cement a fluency comparable with that of the P-35.

**Contenido**

*INTRODUCCIÓN*.....1

*CAPITULO I Fundamentos del proceso de molienda del cemento Portland y de cementos con adición e influencia en sus propiedades físico mecánicas*.....7

*1.1 Cemento Portland*.....7

*1.1.1 Composición Química y mineralógica del cemento Portland*.....7

*1.1.2 Tipos y clasificación de los cementos Portland*.....8

*1.1.3 Producción de cemento a nivel mundial*.....8

*1.1.4 Producción de cemento en Cuba*.....11

*1.2 Particularidades de la fabricación de cementos Portland y mezclados*.....12

*1.2.1 Impactos ambientales y producción sostenible de cemento*.....14

*1.3 Propiedades físico-mecánicas del cemento Portland*.....17

*1.3.1 Fraguado y endurecimiento*.....17

*1.3.2 Desprendimiento de calor*.....18

*1.3.3 Variación de volumen*.....19

*1.3.4 Finura de molido*.....19

*1.3.5 Resistencia a compresión*.....19

*1.4 Adiciones al cemento Portland*.....20

*1.4.1 Las puzolanas en la industria del cemento en Cuba*.....21

*1.4.2 Sistemas binarios de cementos con adiciones*.....23

*1.4.3 Sistemas ternarios clínquer-arcilla calcinada-carbonato de calcio*.....24

*1.5 Proceso de molienda de los cementos* .....26

*1.5.1 Molinos empleados a escala industrial*.....27

*1.6 Influencia de los resultados de la molienda en las propiedades cemento*.....29

1.7 Conclusiones del capítulo.....	30
------------------------------------	----

*CAPITULO II Remolienda de un cemento ternario producido en la fábrica de cementos de Siguaney en agosto del 2013.....*

2.1 Materiales y Métodos.....	32
-------------------------------	----

2.2 Molinos y proceso de molienda.....	33
--	----

2.2.1 Preparación de los molinos.....	34
---------------------------------------	----

2.2.2 El proceso de molienda.....	34
-----------------------------------	----

2.3 Caracterización del cemento ternario remolido.....	35
--	----

2.3.1 Ensayo del minicono.....	35
--------------------------------	----

2.4 Demanda de agua y aditivos.....	36
-------------------------------------	----

2.4.1 Caracterización del aditivo GENIOTEC SF/20.....	38
---	----

2.5 Conclusiones parciales.....	40
---------------------------------	----

*Capítulo III Resultados del estudio de la cinética de molienda para la optimización del proceso de producción de un cemento ternario.....*

3.1 Caracterización y dosificación de las materias primas.....	41
--	----

3.2 Intermolienda.....	42
------------------------	----

3.3 Molienda por separado.....	43
--------------------------------	----

3.4 Ensayos mecánicos.....	45
----------------------------	----

3.5 Resultados y análisis.....	45
--------------------------------	----

3.6 Conclusiones parciales.....	45
---------------------------------	----

Conclusiones generales.....	46
-----------------------------	----

Recomendaciones.....	47
----------------------	----

Bibliografía.....	48
-------------------	----

Anexos.....	52
-------------	----

## Introducción

El cemento juega un papel clave en nuestras vidas: es un material básico para la construcción de un gran número y variedad de estructuras e incluso se puede utilizar en la arquitectura decorativa, como mesas y librerías; es un polvo inorgánico, finamente molido y no metálico que, cuando se mezcla con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación. Se utiliza principalmente para producir hormigón actuando como el ligante de otros ingredientes como la arena y la grava y representa típicamente el 12% de la mezcla. Las masas que se obtengan al mezclarlo con agregados y agua deberán ser plásticas y trabajables antes de alcanzar rigidez, durante un tiempo no muy corto que evite manipularlo o tan largo que demore el proceso constructivo. Al producto final, ya sea hormigón o mortero, se le exigirán características de resistencia mecánica y durabilidad, entre otras, acordes al uso a que se aplique.

El hormigón es la segunda sustancia más consumida en la Tierra después del agua y es un producto esencial e irremplazable para la construcción. Como material de construcción contribuye positivamente a la obtención de una mayor eficiencia energética de los edificios y tiene una probada resistencia al fuego. En relación con la lucha contra el cambio climático, el hormigón ofrece, además, soluciones para la prevención de inundaciones y otras situaciones adversas del clima. CEMBUREAU (2009)

Considerando al cemento como uno de los componentes esenciales en los hormigones, se puede afirmar que si bien se emite CO<sub>2</sub> como parte del proceso de producción debido a la química de la calcinación de caliza a hidróxido de calcio se han desarrollado estrategias para minimizarlo; que incluyen, la utilización de combustibles alternativos, las mejoras en la eficiencia energética, asociadas a la fabricación del cemento y el uso de materiales que permitan sustituir parte del clínker sin afectar las propiedades del hormigón (materiales cementicios suplementarios), lo cual sigue siendo una prioridad fundamental. AFCP (2010)

Se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor nivel de producción a escala mundial, fabricándose en más de 150 países. En su tesis de doctorado Adrián Alujas plantea que sus crecientes volúmenes de producción lo hacen responsable de cerca del 7 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> de origen antropogénico a nivel mundial y del 5 % del consumo de energía en el sector industrial. Estos son los principales factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental. Alujas (2010)

Ante un futuro con un desarrollo socioeconómico mayor, se impone la fabricación de cementos donde se sustituya el clínquer por materiales cementicios suplementarios (MCS) en función del uso constructivo, convirtiéndose en la alternativa más eficiente y sustentable para esta industria.

La sustitución de una porción de clínquer con MCS está reconocida como la manera más efectiva de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuir los gastos energéticos asociados a la producción del cemento, al mismo tiempo que puede mejorarse o mantenerse la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón. La búsqueda de materiales que puedan sustituir el clínquer ha sido una ardua tarea, encargada a investigadores y especialistas, en los últimos años.

El factor de reducción de clínquer mediante la utilización de estos materiales cementicios suplementarios (MCS) (tobas zeolíticas, arcillas calcinadas y sílica fume, entre otros) en este sentido está limitado por la disminución de la resistencia, sobre todo a edades tempranas, lo cual depende de la disponibilidad de hidróxido de calcio proveniente de la hidratación del cemento y del aumento de la demanda de agua. Lawrence (2005)

Si bien las cenizas volantes, las escorias de altos hornos y el humo de sílice se encuentran dentro de las puzolanas de más amplia utilización, todos estos materiales derivan de procesos y tecnologías industriales no siempre disponibles. Por tales motivos el empleo de arcillas calcinadas, ya sean ricas o de pobre contenido de caolinita, se ha convertido en una fuente de materiales Puzolánicos. AMBROISE (1994)

En Cuba se han tomado algunas iniciativas desde el punto de vista del manejo eficiente de la energía para la producción de cemento, existen en el país seis plantas productoras ubicadas en Mariel, Artemisa, Cienfuegos, Siguaney, Nuevitas y Santiago de Cuba con una producción total anual de aproximadamente 3 millones de toneladas. La mayoría de las plantas productoras han cambiado de un proceso húmedo donde se utiliza, para la producción del clínquer, una pasta con un contenido de agua de un 35-50% a un proceso seco en el cual la materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta (aproximadamente 2% de humedad) en la búsqueda de eficiencia energética y la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>. De estas, sólo dos llevan una política ambiental eficiente por ser empresas mixtas que cuentan con la tecnología y los recursos para minimizar los impactos negativos hacia el medio ambiente, generados por la producción de cemento. VANDERBOGHT (2001)

Desde el año 2005 se han llevado a cabo una serie de investigaciones en el país, específicamente en el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas y algunas investigaciones especiales en el Instituto de Tecnología de Lausana, Suiza, con el objetivo de activar mediante un proceso de calcinación de arcillas cubanas de bajo contenido de caolinita para la producción de un material equivalente al metacaolín (MK), el cual en combinación con la adición de carbonato de calcio en proporción 2:1, puede ser aprovechado en la obtención de cementos compuestos del tipo ternario sustituyendo hasta un 45% del contenido de clínquer, estos sistemas además de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> también disminuyen los costos de producción, lo que pone al país en la punta de los países que buscan alternativas ecológicas para la producción de materiales de construcción.

Estudios realizados (Martirena, 2010) prueban que el metacaolín usado en diversas proporciones en la producción de cemento le confieren a este mejores propiedades, mediante un proceso más barato y con menores portadores energéticos. En pruebas de laboratorio realizadas, este nuevo cemento es más resistente y estable que el cemento Portland tradicional. Como resultado de dichos estudios se realizó una prueba que incluyó la molienda de 137 toneladas del cemento, provisionalmente denominado como “SIG-B45” (45% de sustitución de clínquer), que fue producido en la fábrica de cemento de Siguaney con resultados de resistencia a compresión superiores a los exigidos en la norma cubana (NC96-2011) para un cemento pp-25.

Muchos especialistas como el Ing. Abad Lévano (2010) plantean que la influencia que el cemento Portland ejerce en el comportamiento y propiedades de la pasta cementante, derivan fundamentalmente de la composición química del clínquer y de su finura de molido, sabiendo que los cementos que presenten mayor finura son los que ofrecen mejores resultados (máximo de prestaciones) con el inconveniente de que también son los que demandan más agua ya que a mayor finura, mayor superficie específica. Las operaciones de reducción de tamaño representan las etapas de mayor consumo de energía junto con la de cocción del clínquer, además de influir directamente en las propiedades y calidad final del producto.

Entonces si se conoce que la finura tiene gran influencia en la resistencia a compresión del cemento, con una mayor cantidad de material pasado por el tamiz de 90 micras este cemento puede alcanzar valores de resistencia superiores a 35 MPa, basados en este planteamiento se propone el siguiente:

### **Problema científico**

En qué medida se incrementa la eficiencia de la molienda de un cemento ternario a base de clínquer-arcilla calcinada-caliza-yeso para cumplimentar los principales parámetros de la norma cubana NC 95- 2011, CEMENTO PORTLANS-ESPECIFICACIONES, mediante la instrumentación y valoración de la finura de molido del cemento modelada a escala de laboratorio.

## **Hipótesis**

Si se parte en la obtención de los cementos ternarios de un diseño experimental integral del proceso de molienda del cemento, se obtiene un producto cementante de similares propiedades a los cementos Portland producidos en Cuba.

## **Objetivo General**

Obtener los principales parámetros de la molienda apropiados durante la producción del cemento ternario mediante el empleo de formulaciones antes fabricadas en Siguaney, a escala de laboratorio del CTDMC, de La Habana, para que cumplimente requerimientos vigentes de los cementos Portland en Cuba

## **Objetivos Específicos**

- Revisión bibliográfica sobre los cementos Portland y con adiciones, las propiedades de los cementos así como los procesos de molienda.
- Ensayar en laboratorio diferentes procesos de molienda del cemento ternario SIG B45, con materias primas procedentes de la fábrica de cemento Siguaney hasta obtener la finura de molido previamente establecida.
- Determinar la influencia de parámetros de la molienda en las propiedades físico-mecánicas de los cementos y morteros producidos.

## **Tarea Científica**

- Revisión de la literatura científica sobre procesos y sistemas de molienda utilizados en la producción de cemento y su influencia en las propiedades del mismo.
- Caracterización de las materias primas para la producción industrial de cementos ternarios.

- Obtención mediante molienda a escala de laboratorio y semi-industrial del cemento ternario.
- Evaluación en pastas y morteros de los cementos obtenidos a escala de laboratorio y semi-industrial.
- Determinación de las características físico-mecánicas de los cementos obtenidos.

### **Estructura del trabajo**

La estructura del trabajo está organizada de la siguiente forma para su presentación:

#### **Capítulo 1 Fundamentos del proceso de molienda del cemento Portland y de cementos con adición e influencia en sus propiedades físico mecánicas.**

Se presenta una revisión bibliográfica sobre el cemento, cementos con adiciones, los cementos ternarios, molienda de cemento, influencia de la molienda en las propiedades del cemento (polvo, pasta y endurecido).

#### **Capítulo 2 Remolienda de un cemento ternario producido en la fábrica de cementos de Siguaney en agosto del 2013.**

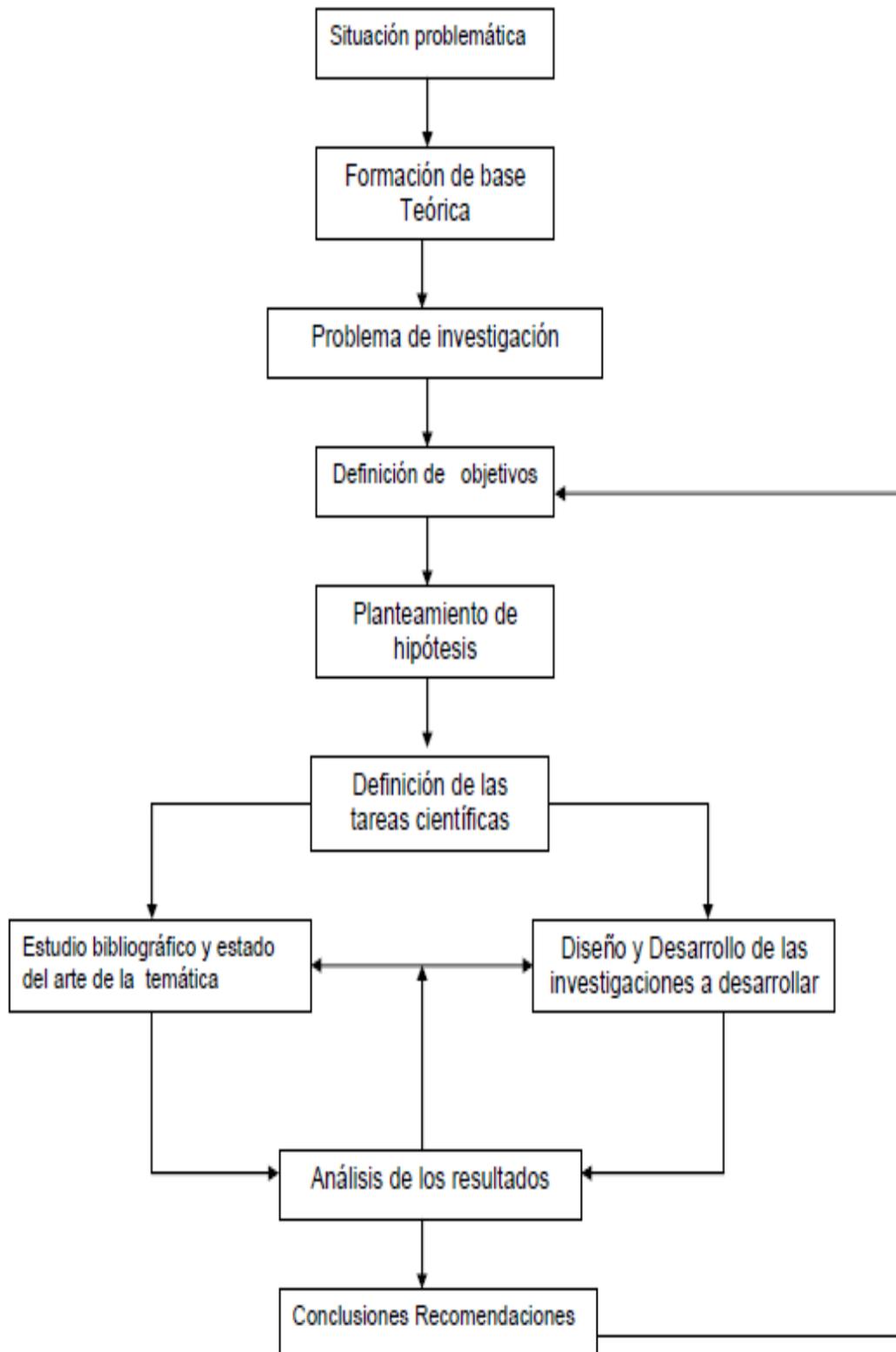
Resultados de la remolienda de un cemento ternario producido en la fábrica de cemento de Siguaney en agosto de 2013.

- Remolienda hasta óptimo.
- Ensayos de evaluación.
- Comparación de resultados.
- Conclusiones.

#### **Capítulo 3 Resultados del estudio de la cinética de molienda para la optimización del proceso de producción de un cemento ternario.**

- Intermolienda.
- Molienda por separado.
- Ensayos de evaluación.
- Comparación de resultados.
- Determinación del óptimo.
- Conclusiones.

## Esquema Metodológico de la Investigación



# **CAPITULO I Fundamentos del proceso de molienda del cemento Portland y de cementos con adición e influencia en sus propiedades físico mecánicas.**

## **1.1 Cemento Portland**

El cemento Portland, llamado así por su aspecto, que asemeja una vez fraguado al de la piedra de las Canteras inglesas de Portland, es un conglomerante hidráulico obtenido por la pulverización del clínquer, con la adición de piedra de yeso natural, en un porcentaje no superior al 5%, para retrasar el fraguado de los aluminatos cálcicos que forman el clínquer. Su color es gris, más o menos oscuro, según la cantidad de óxido férrico que presente. Cuando se mezcla con el agua, produce un material con características plásticas y propiedades adhesivas que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica, (lo cual puede suceder incluso debajo del agua).<http://es.wikipedia.org/wiki/CementoPortland>. (2013). Actualmente, el cemento Portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo. Se puede decir que el cemento es el alma del hormigón Gadoret. (2005).

### **1.1.1 Composición Química y mineralógica**

Se le llama así al conjunto de los contenidos de sus componentes simples expresados en forma de óxidos, pueden variar dentro de cierto rango sin que el cemento pierda su condición de Portland:

- ❖ Óxido de calcio (CaO)..... (60---67%).
- ❖ Óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)..... (17---25%).
- ❖ Óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)..... (2---9%).
- ❖ Óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)..... (0.5---6%).
- ❖ Óxido de manganeso (Mg<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)..... (0---5%).

Estos elementos se hallan en forma más o menos pura en estado natural, y sus proporciones se logran con distintos tipos de caliza y arcillas, aunque a veces es necesario añadir algún elemento faltante incorporando arenas de un alto contenido sílice o tierras con alto contenido de hierro. Los componentes relacionados se presentan dentro del cemento formando compuestos, la composición sería la siguiente:

- Silicato tricálcico .....35---50%
- Silicato bicálcico .....20---35%
- Aluminato tricálcico .....1-----15%
- Ferrito aluminato tetracálcico .....8-----20%

Estos cuatro componentes mineralógicos forman la parte más importante del clínquer del cemento y por lo tanto son los que le dan sus características de acuerdo a la proporción en que se hallen.

### **1.1.2 Tipos y clasificación de los cementos Portland**

Los cementos Portland especiales son los que se obtienen del mismo modo que el cemento Portland normal, pero tienen características diferentes a causa de variaciones en el porcentaje de los componentes que lo conforman. <http://es.wikipedia.org/wiki/CementoPortland>. (2013)

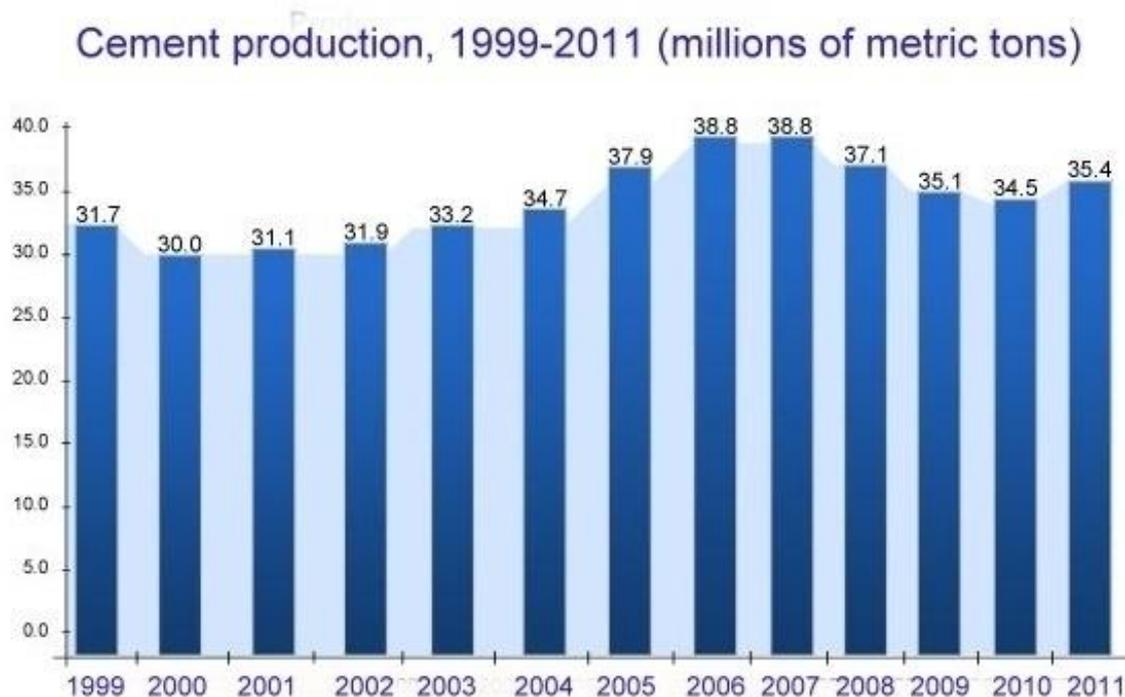
- ✓ Cemento Portland normal (CPN) o común, sin aditivos, es el más empleado en construcción.
- ✓ Cemento Portland blanco (PB), compuesto por materias primas pobres en hierro, que le dan ese color blanquecino grisáceo. Se emplea para estucos, terrazos, etc.
- ✓ Cemento Portland de bajo calor de hidratación (CBC), produce durante el fraguado una baja temperatura de hidratación; se obtiene mediante la alteración de los componentes químicos del cemento Portland común.
- ✓ Cemento Portland de elevada resistencia inicial (CER), posee un mayor contenido de silicato tricálcico que le permite un fraguado más rápido y mayor resistencia. Se emplea en muros de contención y obras hidráulicas.
- ✓ Cemento Portland resistente a los sulfatos (CPS), tiene bajo contenido en aluminato tricálcico, que le permite una mayor resistencia a la acción de sulfatos contenidos en el agua o en el terreno.
- ✓ Cemento Portland con aire ocluido, tiene un aditivo especial que produce un efecto aireante en el material.

### **1.1.3 Producción de cemento a nivel mundial**

La mayor producción de cemento en el mundo tiene lugar principalmente en los países más poblados e industrializados, aunque también es importante la Industria Cementera en los países de menos desarrollo. La antigua Unión Soviética, China,

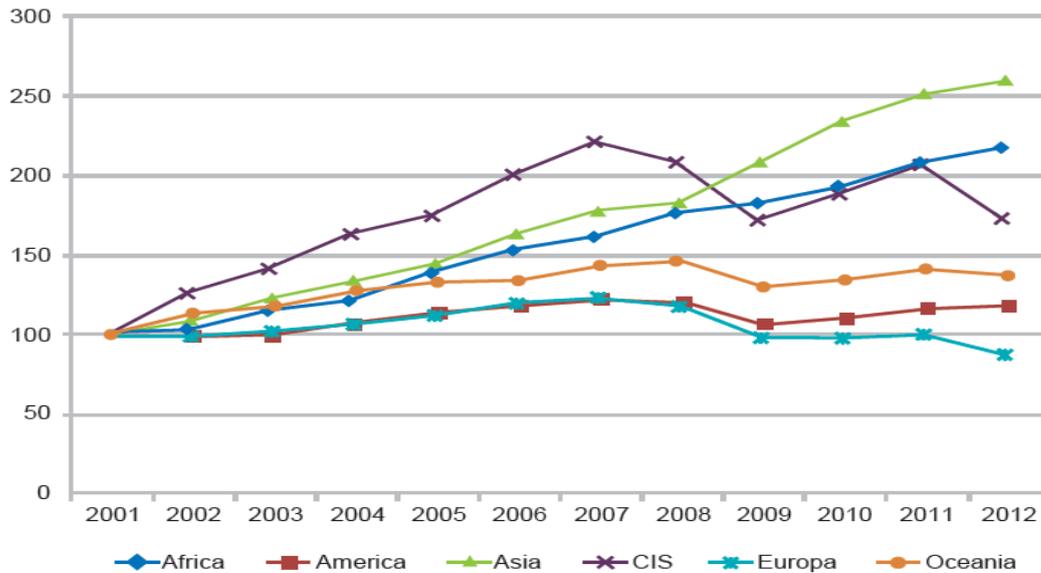
Japón y Estados Unidos son los mayores productores, pero Alemania, Francia, Italia, España y Brasil son también productores importantes. FICEM (2013)

La producción de cemento a nivel mundial durante la última década ha tenido una tendencia creciente, el 2008 fue el año de menor crecimiento, justificado por el comienzo de la crisis financiera, energética y ambiental, que estalló en este año. Esta última comenzó por el sector inmobiliario, lo que afectó sensiblemente la producción de cemento mundial. A pesar de la crisis, ya en el 2009 el sector experimentó un crecimiento de más del 7 % anual, lo que muestra señales evidentes de una rápida recuperación. Survey ()



**Figura 1.1** Producción de cemento mundial 1999-2011 (tomado de info-word-cement)

En el reporte de actividades de CEMBUREAU (2013), se estima que la producción global de cemento en el año 2012 alcanzó los 3,6 billones de toneladas, lo que se traduce en un incremento del 3% en comparación al año anterior. La producción continuó en aumento en 2012, en comparación con los años anteriores en América del Sur, África y Asia. Estas regiones fueron responsables del 3%, 4% y 80% de la producción de cemento respectivamente.

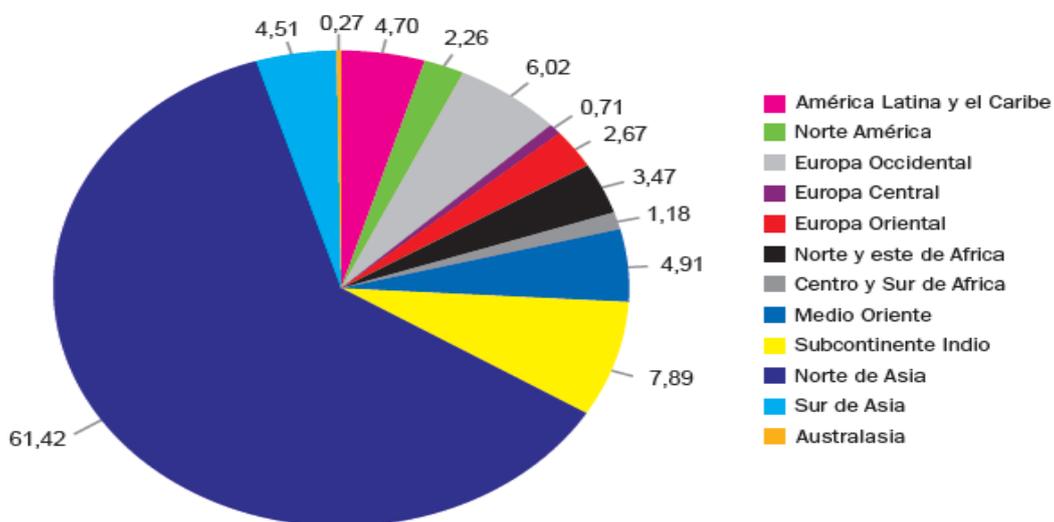


**Figura 1.2** Evolución de la producción de cemento en el mundo por región 2001-2012 (millones de toneladas, base 2001=100). Fuente: The European Cement Association.

En los últimos años se han producido cambios en las zonas geográficas donde se realizan las mayores producciones de CPO, considerada en sus inicios como una producción de países industrializados. Desde los años 1999 - 2000, la misma se ha abierto paso en los países en vías de desarrollo con crecimientos de más de un 55 %, mientras que en las naciones desarrolladas solo creció un 3 %, resultado de la tendencia mundial de desplazar las producciones contaminantes hacia otras latitudes Martirena (2003).

En 2012 la producción de cemento en Latinoamérica alcanzó el 4,7% de los 3.8 billones de toneladas correspondientes a la producción mundial.FIIC (2012)

**PARTICIPACIÓN POR REGIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO 2012 (%)**



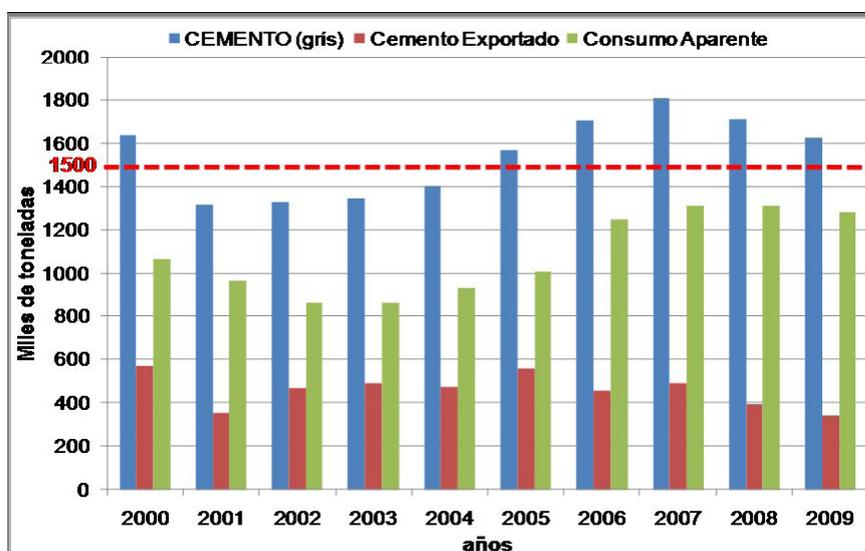
**Figura 1.3** Producción de cemento por regiones (2012)

#### 1.1.4 Producción de cemento en Cuba

La capacidad de producción de cemento Portland gris al triunfo de la Revolución era de 720 Mt. Posteriormente, fueron modernizadas las fábricas existentes y se construyeron tres nuevas fábricas en Nuevitas, Siguaney y Cienfuegos. En el año 1989, se logró una producción por encima de los 3,5 millones de toneladas. A partir del año 1990, la industria cementera comenzó a presentar un deterioro en sus producciones, debido al Período Especial, lo que provocó la necesidad de crear dos corporaciones con capital extranjero en las plantas del Mariel y Cienfuegos. TORAYA (1993)

Derivado de la caída del proceso inversionista el aprovechamiento de la capacidad instalada se reduce vertiginosamente. Puede señalarse cómo en 1993 se produjo el 23 % de lo obtenido en 1990.

En 1993 concluye el proceso inversionista de la fábrica René Arcay del Mariel, situándola como la más moderna del país por su proceso tecnológico seco (más avanzado), las operaciones de producción automatizados y los consumos de materiales y materias primas más eficientes.



**Figura 1.4** Producción de cemento en miles de toneladas hasta el año 2009. Elaboración a partir de Pérez, 2011.

Se evidencia en la tabla 1 que en el país la mayoría (66,67%) de las fábricas de cemento presentan un proceso de elaboración por vía húmeda, por lo que una disminución del consumo de energía por la sustitución parcial de una porción de

clínquer en el cemento, tendría un mayor impacto en la eficiencia de los procesos de fabricación y en los resultados económicos de la industria cementera.

**Tabla 1.1** “Fábricas de cemento y sus tipos de proceso”

Fábrica	Ubicación	Tipo de Proceso
Mártires de Artemisa	Artemisa	Vía húmeda
René Arcay	Mariel, Habana	Vía seca
Karl Marx	Cuabairo, Cienfuegos	Vía seca
Siguaney	Siguaney, Sancti Spiritus	Vía húmeda
26 de Julio	Nuevitas, Camagüey	Vía húmeda
José Merceron	Santiago de Cuba	Vía húmeda

Fuente: Elaborado a partir de Pérez, 2011.

## 1.2 Particularidades de la fabricación de cementos Portland y mezclados

La fabricación del cemento Portland consiste en la preparación de una mezcla de materias primas con granulometría establecida, sometida a cocción a altas temperaturas y finalmente molido a polvo fino y reactivo: el cemento. Según bibliografías consultadas del continente europeo y latinoamericano como “CEMBUREAU” y “CEMEX Nicaragua” se pueden distinguir cuatro etapas en la fabricación del cemento:

### I. **Extracción y triturado de la materia prima.**

En esta primera etapa las materias primas (caliza, margas y arcillas) se extraen de las canteras y son transportadas a la fábrica de cemento, donde son sometidas a una primera trituración, que también puede ocurrir en las canteras. Luego se deposita en un parque de almacenamiento, donde después de haberse verificado su composición química, pasa a una etapa de trituración secundaria que reduce el tamaño de partícula a un tamaño de 2 mm aproximadamente.

Las **calizas**, que afortunadamente se presentan con frecuencia en la naturaleza, están compuestas en un alto porcentaje (más de 60%) de carbonato de calcio o calcita ( $\text{CaCO}_3$ , cuando se calcina da lugar a óxido de calcio,  $\text{CaO}$ ), e impurezas tales como arcillas, sílice y dolomita, entre otras. Hay diferentes tipos de caliza y prácticamente todas pueden servir para la producción del cemento, con la condición de que no tengan cantidades muy grandes de magnesio, pues si el cemento contiene mayores cantidades del

límite permitido, el concreto producido con él, aumenta de volumen con el tiempo, generando fisuras y por tanto pérdidas de resistencia.

**Pizarra:** Se les llama "pizarra" a las arcillas constituidas principalmente por óxidos de silicio de un 45 a 65%, por óxidos de aluminio de 10 a 15%, por óxidos de hierro de 6 a 12% y por cantidades variables de óxido de calcio de 4 a 10%. Es también la principal fuente de álcalis.

La **arcilla** que se emplea para la producción de cemento, está constituida por un silicato hidratado complejo de aluminio, con porcentajes menores de hierro y otros elementos. La arcilla aporta al proceso los óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

El **yeso**, sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), es un producto regulador del fraguado, este se agrega al final del proceso de producción.

## **II. *Mezclado y reducción de la materia prima hasta una finura similar a la de la harina.***

En esta etapa se efectúa la selección de los materiales de acuerdo al diseño de mezcla previsto. La formulación que se utiliza es de aproximadamente 70 – 80 % de caliza, 20 – 30 % de arcilla, 1 – 3 % de hierro y a veces, arena sílice. Estas materias primas se trituran en un molino primario que las llevan a una granulometría de 0 – 25 mm lo cual permite que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan desarrollarse adecuadamente. La harina que sale de los molinos es analizada y elevada a los silos, donde se hacen las mezclas definitivas con que se alimentarán los hornos.

## **III. *Cocción de la harina y transformación en Clínquer.***

La harina correctamente homogenizada entra al horno donde la temperatura aumenta a lo largo del mismo hasta llegar aproximadamente a unos 1450 °C, esto hace que los minerales se combinen y reaccionen sin que exista una fusión total y por tanto una vitrificación. En la zona de menor temperatura, el carbonato de calcio (calcáreo o caliza) se disocia en óxido de calcio y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio ( $\text{Ca}_2\text{Si}$  y  $\text{Ca}_3\text{Si}$ ). Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{Al}$ ) y ferroaluminatotetracálcico ( $\text{Ca}_4\text{AlFe}$ ). El material resultante es denominado clínquer. El clínquer puede ser conservado durante años antes de proceder a la producción del cemento, con la condición de que no entre en contacto con el agua.

En función de cómo se procesa el material antes de su entrada en el horno se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación:

-vía seca (es el proceso más económico).

-vía semi-seca.

-vía semi-húmeda.

-vía húmeda (mayor consumo de combustible requerido para evaporar la gran cantidad de agua que lleva la pasta, que oscila entre el 35 y el 50%, y el mayor costo y dimensión de los hornos).

La tecnología que se aplique depende fundamentalmente del origen de las materias primas, el tipo de caliza y de arcilla y el contenido en agua (desde el 3% para calizas duras hasta el 20% en algunas margas), son los factores decisivos. En todos los casos el material procesado en el horno es enfriado bruscamente al salir del mismo a una temperatura de 60-70°C aproximadamente.

#### **IV. Molienda del clínquer con yeso y adiciones**

El proceso de fabricación termina con la molienda conjunta del clínquer formado por nódulos esféricos de tamaño variable y el yeso (sulfato de calcio dihidrato), a un grado de finura elevado, la proporción de yeso a emplear depende del contenido de aluminato tricálcico. Generalmente se utilizan para esta etapa molinos de bolas que trituran el material a elevadas finuras con costos relativamente bajos. Los molinos de bolas están formados por un tambor de acero, horizontal y giratorio, revestido interiormente de placas muy resistentes al desgaste y con formas adecuadas para voltear eficazmente a las materias primas junto con una carga muy importante de bolas de gran dureza. Luego de este proceso se almacena el cemento en silos para posteriormente ser ensacado o cargado a granel. AFCP (2010)

##### **1.2.1 Impactos ambientales y producción sostenible de cemento.**

La producción convencional de cemento puede ocasionar algunos impactos ambientales negativos:

- Enorme erosión del área de las canteras por la extracción continua de la piedra caliza y otros materiales.
- Transporte inadecuado de materiales para su almacenamiento.
- Producción de gran cantidad de polvos provocados por el triturado de la piedra en la planta.
- Emisión de contaminantes al aire (monóxido de carbono, monóxido de

nitrógeno, dióxido de azufre y partículas muy finas) dependiendo del tipo de combustible y proceso empleado durante la calcinación en el horno (combustión).

- El polvo de los residuos del horno forma el llamado clínquer, que puede contener metales pesados y otros contaminantes. Si el polvo del clínquer se desecha en las canteras donde se extrajo la piedra caliza o en un relleno sanitario puede contaminar los mantos de aguas subterráneas.
- Finalmente, se tiene que transportar largas distancias para llegar a los centros de distribución y sitios de construcción. Guerrero (2012)

Por otra parte, las plantas de cemento pueden tener impactos ambientales positivos en lo que se relaciona con el manejo de los desechos, la tecnología y el proceso son muy apropiados para la reutilización o destrucción de una variedad de materiales residuales, incluyendo algunos desperdicios peligrosos. Así mismo, el polvo del horno que no se puede reciclar en la planta sirve para tratar los suelos, neutralizar los efluentes ácidos de las minas, estabilizar los desechos peligrosos o como relleno para el asfalto. mundial (2012) VANDERBOGHT (2001)

De acuerdo a las indagaciones científicas, la producción de cemento es responsable de entre un ocho y un diez por ciento de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> originadas por la actividad humana; por cada tonelada de cemento producida, se genera aproximadamente una de dióxido de carbono, un importante gas de efecto invernadero (GEI), y si tenemos en cuenta que solo en el año 2010 se produjeron a escala planetaria un total de 3 300 millones de toneladas de ese aglomerante, podremos comprender la magnitud del daño causado. *Fernando Martirena citado en www.granma.cubaweb.cu (abril 6/ 2012)*

Estudios han evaluado el posible incremento de la fabricación de CPO, tanto en las zonas del primer mundo como en países en vías de desarrollo, y como es conocido, en estos últimos las tecnologías empleadas no son las más eficientes, por tanto el volumen de CO<sub>2</sub> emitido representa la mayor fracción con respecto a las emisiones totales, sucediendo de igual manera para el consumo energético. M. SCHNEIDER (2011)

Se espera que en un futuro el CPO permanezca como uno de los materiales de construcción más empleados. Por tanto, es necesario importantes cambios en la industria cementera para lograr un desarrollo sustentable. Ante esta problemática, la tendencia del CPO será hacia la disminución del contenido de clínquer por el empleo

de MCS y al aumento del uso de combustibles alternativos para su fabricación. Aitcin P (2000)

Desde el punto de vista ecológico, el empleo de adiciones minerales activas puede ser una de las vías más importantes para contribuir a la disminución de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), en la industria del cemento al disminuir el contenido de cemento en los hormigones. Adicionalmente permite el reciclado de desechos industriales y agrícolas que de otra forma tendrían que ser depositados en el Medio Ambiente sin un uso económico. Martirena. (2009), (Elena Alcántara Ortega )

La industria de cemento es intensiva en energía. El energético es el principal factor de costo, significando 30-40% del costo total de producción.

En el proceso de fabricación del cemento es necesario alcanzar una elevada temperatura, recurriendo de esta forma a la utilización de gran cantidad de energía. La producción de una tonelada de clínquer requiere 100 m<sup>3</sup> de gas, lo que equivale aproximadamente a 100 kg de carbón. Hendriks (1998)

La utilización de residuos como combustibles alternativos, también llamada coprocesado, disminuye la dependencia energética de los combustibles fósiles o tradicionales y, al mismo tiempo, reduce las emisiones. Por otra parte, su uso como materias primas alternativas tiene un gran número de beneficios, entre los que podemos destacar la menor necesidad de explotación de las canteras y una mejora en la huella medioambiental de tales actividades. La sustitución del clínquer en la producción del cemento es otro ejemplo de la contribución positiva del sector a la gestión de los recursos. CEMBUROU (2009) <http://www.buenastareas.com/> (2011)

En 2006, aproximadamente el 5% de las materias primas utilizadas en la producción de clínquer fueron alternativas: un total de 14,5 millones de toneladas; estas se pueden utilizar para sustituir las materias primas tradicionales extraídas de las canteras, como las arcillas, esquistos y calizas que se introducen en el horno. Algunos ejemplos de materias primas alternativas son los suelos contaminados, residuos de limpieza de carreteras y otros residuos que contienen hierro, aluminio o sílice, tales como cenizas volantes y escorias de alto horno. Las mismas deben tener una adecuada composición química para asegurar que proporcionan los componentes necesarios para la formación del clínquer. CEMBUROU (2009)

El desarrollo y aplicación de los materiales puzolánicos en la fabricación de CPO ha sido hasta ahora una estrategia desarrollada sobre todo a partir de las características propias de los países industrializados. Sin embargo, el consumo del aglomerante, en

los últimos años, se ha desplazado hacia las naciones menos industrializadas. Esto implica el desarrollo de tecnologías y estrategias que permitan la obtención y empleo de materiales puzolánicos bajo las condiciones propias de los países en vías de desarrollo (Alujas, 2010).

El uso de estas adiciones en el CPO han demostrado ser eficientes, incrementando propiedades del hormigón como la resistencia mecánica y la durabilidad frente a agentes ambientales, obteniendo grandes beneficios ingenieriles, económicos y medioambientales. Sin embargo el uso de MCS en países en vías al desarrollo se ven afectados por derivar de procesos y tecnologías industriales que no siempre se encuentran disponibles. Sabir (2001)

Actualmente hay movimientos hacia la construcción ecológica, combinando los métodos del pasado con el conocimiento técnico moderno. El doctor Martirena expone también que se ha demostrado la posibilidad de emplear varios tipos de arcillas cubanas en la elaboración del mencionado producto; verificándose asimismo que existen reservas geológicas capaces de garantizar al menos 100 años de explotación en la producción de cemento. [www.granma.cubaweb.cu](http://www.granma.cubaweb.cu) (abril 6/ 2012)

### **1.3 Propiedades físico-mecánicas del cemento portland**

Estas permiten complementar las propiedades químicas y conocer algunos aspectos de su bondad, dependen del estado en que se encuentre y son medidas a través de ensayos sobre el cemento, la pasta del cemento y sobre el mortero los cuales determinan las características físicas y mecánicas del cemento. Holcim (2011)

#### **1.3.1 Fraguado y Endurecimiento**

Cuando un cemento se amasa con agua, después de cierto tiempo, empieza a dar señales de actividad química en su superficie, ya que aparecen cristales que van creciendo lentamente y se forma un gel, se obtiene una pasta que mantiene su plasticidad durante un tiempo muerto después del cual empieza a rigidizarse rápidamente hasta que desaparece su plasticidad a la vez que va aumentando su resistencia de forma gradual. Este fenómeno es consecuencia de los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante las reacciones de hidratación y que dan lugar a un aumento progresivo de la viscosidad de la pasta.(OTERO)

Hay que distinguir dos fases:

Fraguado:

La pasta pierde su plasticidad llegando a adquirir algo de resistencia; va acompañado

de desprendimiento de calor; al principio se observa una elevación fuerte de temperatura seguida de un fuerte descenso con un mínimo y luego, un pico que puede considerarse como el final del fraguado.

Endurecimiento:

Ganancia progresiva de resistencias de una pasta fraguada. Al ser un progresivo desarrollo de resistencias mecánicas queda regulado por la naturaleza y estructura de las películas coloidales que recubren los granos y que avanzan hacia el núcleo en la hidratación. Es frecuente confundir los términos fraguado y endurecimiento cuando en realidad son dos fenómenos distintos. En la velocidad de fraguado y endurecimiento entran en juego:

- Finura de molido del cemento.
- Temperatura del agua de amasado.
- Presencia o no de materias orgánicas e inorgánicas.

Tiempo de fraguado:

Se denomina así al tiempo máximo desde que hay contacto entre el cemento y el agua hasta que se pueda manipular sin afectar su resistencia, durante este tiempo la mezcla permanece en estado plástica. Si lo manipulamos cuando ha pasado este tiempo romperíamos los enlaces de los cristales que están formándose, a partir de este punto se obtiene una masa totalmente endurecida que no se puede moldear. En el tiempo de fraguado influyen varios factores como la composición química y la finura del cemento, la temperatura ambiente y la cantidad de agua en la mezcla. El proceso y los aparatos para determinar este tiempo puede ser consultado en la norma cubana (NC524-2007), CEMENTO HIDRÁULICO- MÉTODO DE ENSAYO- DETERMINACIÓN DE CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO POR AGUJA VICAT.

### **1.3.2 Desprendimiento de calor**

La reacción entre el cemento y el agua es exotérmica produciéndose desprendimiento de calor. Este fenómeno tiene importancia al utilizar el cemento para hormigones en grandes masas debido a que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso térmico, se origina contracción del material, que puede conducir a graves agrietamientos, por otra parte es benéfica en tiempo frío, ya que ayuda a mantener temperaturas de curado favorable. PortlandCementAssociation (2013) <http://www.cement.org>

En un cemento Portland normal el calor de hidratación es de 80-100 calorías por gramo el aluminato tricálcico (C3A) desarrolla el más alto calor de hidratación por lo cual se debe controlar su contenido en un cemento. Las especificaciones respecto al

calor de hidratación y su determinación se presentan en la norma cubana (NC525-2007), CEMENTO HIDRÁULICO- MÉTODO DE ENSAYO- DETERMINACIÓN DEL CALOR DE HIDRATACIÓN.

### **1.3.3 Variación de volumen**

El cemento Portland sufre un ligerísimo aumento de volumen durante el fraguado y luego una disminución por ser menor el volumen de los hidratos que el de los componentes anhidros y el agua, y además de la pérdida de agua que presenta al endurecer. Esta disminución se llama retracción y su efecto es menor en hormigones que en pastas de cemento y agua, y se puede disminuir manteniendo la pasta en humedad de manera que pueda absorber agua. (OTERO), (NC504-2013)

### **1.3.4 Finura de molido**

Esta propiedad determina el tamaño de los granos de clínquer o agregados en el cemento e influye grandemente en las características del mismo. Esta puede expresarse indicando el porcentaje en peso que es retenido por un tamiz determinado. El sistema tiene el inconveniente de que nada dice de la granulometría y superficie de los granos de cemento. Esta incertidumbre se elimina por medio de la determinación de la superficie específica de las partículas, expresada en  $\text{cm}^2/\text{g}$  y medida por medio del Permeabilímetro de Blaine, en el cual una muestra de cemento de un peso fijado, compactada en un molde cilíndrico a una porosidad del 50 % es atravesada por un volumen determinado de aire a una presión media normalizada. La superficie específica es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo que tarda el flujo de aire en pasar entre dos marcas determinadas del manómetro del aparato. Los valores típicos de la superficie específica de los cementos oscilan entre los 2500 y 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Otros métodos para determinar la finura de molido son por tamizado en seco y por tamizado húmedo.

En la actualidad, el mejor sistema para determinar la granulometría de un cemento es mediante laser, que proporciona la distribución por tamaños a partir de 1 micrómetro Holcim (2011).

### **1.3.5 Resistencia a compresión**

Es la propiedad que resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales. Es importante tener en cuenta las causas que puedan provocar pérdidas de resistencia de este material: envejecimiento, humedecimiento e incorrecto almacenamiento. La resistencia a la tracción y compresión del cemento Puzolánicos es un poco menos que la del cemento corriente durante el primer año,

pero no hay ningún aumento más después de dicho período en el cemento corriente. Gracias a la reacción físico-química de absorción de la cal por la puzolana aumenta la resistencia mecánica a largo plazo superando el valor de resistencia del corriente con una actividad que se desarrolla durante muchos años. La resistencia de los cementos se desarrolla en períodos de tiempo relativamente largos. El crecimiento es rápido en los primeros días y después de cuatro semanas es poco importante en los cementos Portland, no así en los cementos con adiciones, en los cuales, dependiendo del tipo de adición y de su contenido, el aumento de resistencia más allá de los 28 días puede llegar a ser fundamental para determinado tipo de obras. PortlandCementAssociation (2013) <http://www.cement.org>. La norma cubana (NC506-2007), CEMENTO HIDRÁULICO—MÉTODO DE ENSAYO— DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA describe un método para la determinación de las resistencias mecánicas a compresión y flexión del mortero de cemento.

#### 1.4 Adiciones al cemento Portland.

En la norma cubana (NC120:2004) además de yeso se mencionan otros materiales denominados "adiciones" que no son más que sustancias que, adicionadas en una cantidad limitada, son molidas simultáneamente o mezcladas con el cemento hidráulico durante su fabricación, con el objetivo de mejorar determinadas características como resistencia al ataque de sulfatos y reducir el calor de hidratación, entre las más difundidas se encuentran:

- **Escorias:** las sustancias vítreas que flotan en el acero en los procesos de fundidos. Son impurezas del acero que se retiran y que se aprovechan para el cemento a precio muy barato.
- **Cenizas volantes:** son las cenizas que salen por las chimeneas de las centrales termoeléctricas, en estas hay unos filtros para que estas cenizas no salgan al ambiente.
- **Humo de sílice:** procede de la producción de microprocesadores. Directamente de la fundición de sílice.
- **Puzolanas naturales o artificiales:** es un tipo de piedra de naturaleza volcánica procedente de Puzoli (Italia). Esta piedra ya la conocían los romanos y la empleaban para sus construcciones.
- **Fillers calizos:** es el polvo de las canteras de caliza, lo que sobra de las canteras. De todas las adiciones es la menos contaminante, y junto con el humo de sílice la que más resistencia aporta al cemento.

Entre las soluciones más extendidas se encuentra el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico, o puzolanas (término utilizado de forma más general para designar todos los materiales que muestran reactividad con cal, sean capaces de fraguar, endurecer y desarrollar resistencia en presencia de humedad), como sustitutos parciales de cemento, lo que incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad en los hormigones. Al mismo tiempo, la utilización de materiales cementicios suplementarios, favorece la disminución en el empleo de energías no renovables y contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante. HABERT (2009)

Según la norma ASTM C 618-03 citada por Rancés Castillo en su tesis de doctorado las puzolanas son materiales silíceos o aluminio-silíceos compuestos principalmente por sílice amorfa, que por sí solas poseen poco o ningún valor cementante o propiedades hidráulicas, pero que finamente dividido y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio o cal a temperatura ambiente y forman un compuesto que posee propiedades aglomerantes.

Puede afirmarse que con la sustitución del CPO por materiales puzolánicos, se mantienen o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad, sin embargo las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas y la necesidad del empleo de superplastificantes o de relaciones agua / aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo CPO, si se quiere mantener una laborabilidad adecuada de la mezcla. Lara (2010)

La actividad puzolánica está influenciada tanto por factores inherentes a la puzolana como por otros de carácter externo. Entre los primeros se destaca la composición química y mineralógica, morfología interna, contenido de fase vítrea y finura. En efecto, las reacciones puzolánicas ocurren según las leyes cinéticas de las reacciones heterogéneas en estado sólido, por lo que la velocidad de reacción con la cal estará en función directa de la superficie específica, es decir con su grado de finura, además de que la mezcla de dichos compuestos debe ser lo más homogénea posible. (Marsh, 1988)

#### **1.4.1 Las puzolanas en la industria del cemento en Cuba**

En Cuba, desde principios de los años 1980-90 comenzó la utilización de puzolanas como extensores del clínquer de cemento Portland. En el país existe un gran potencial de puzolanas naturales con numerosos yacimientos de rocas zeolitizadas y de vidrio volcánico diseminado por prácticamente todo el territorio nacional, las cuales

generalmente muestran una elevada actividad puzolánica. Estas fueron utilizadas como adiciones en fábrica para producir otras variedades de cemento Portland.

#### **Cementos con adición activa según NC 96-2001:**

Se clasifica en tres grados de calidad de acuerdo al por ciento de adición y la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en kgf/cm<sup>2</sup>:

##### **Cemento Portland Puzolánico:**

a) Cemento Portland Puzolánico 250 (con un por ciento adición activa natural entre 6 y 20):

Cemento PP-250

b) Cemento Portland Puzolánico 350 (con un por ciento adición activa natural entre 6 y 20):

Cemento PP-350.

##### **Cemento Puzolánico:**

a) Cemento Portland 250 (con un por ciento de adición activa natural entre 21 y 35):

**Cemento PZ-250.**

Por otra parte, la norma cubana (NC120:2004) hace referencia a las puzolanas como parte de un término más general: *adiciones*, definiendo éstas últimas como: “Materiales inorgánicos finamente molidos incorporados al hormigón con el objetivo de mejorar ciertas propiedades o de alcanzar propiedades especiales”.

Existen 2 tipos de adiciones según la clasificación de dicha norma:

a) Adiciones del tipo I (Aproximadamente inertes)

b) Adiciones del tipo II (Puzolánicos o hidráulicamente latentes)

En las de **tipo I** están los fillers calizos o silíceos, cuya función principal es suplir la carencia de los finos aportados por los áridos, lo que puede proporcionar mayor laborabilidad, compacidad y retención de agua en la mezcla. Además, pueden reducir la demanda de cemento en la mezcla sin afectar sus propiedades ni las prestaciones del hormigón endurecido.

En las de **tipo II** están las puzolanas naturales y las artificiales. Éstas reaccionan con la cal resultante del proceso de hidratación del cemento en presencia de agua y forman silicatos cálcicos hidratados, dando lugar a hormigones más densos y compactos, con mayor durabilidad y resistencia mecánica.

Existen otras maneras de clasificar las puzolanas según su naturaleza; en este sentido, se consideran 2 tipos: las naturales y las artificiales.

#### **1.4.2 Sistemas binarios de cementos con adiciones**

A los cementos mezclados también se les conoce como cementos compuestos, como enuncia el profesor Harold F.W. Taylor, el cual los cataloga como cementos hidráulicos compuestos por cemento Portland y uno o más materiales inorgánicos que forman parte en las reacciones de hidratación y que por ello realizan una importante contribución a la formación de productos de hidratación, en su origen, los cementos mezclados conformaban sistemas binarios al combinar el cemento Portland con un material cementicio suplementario. TAYLOR (1990)

Como es característico de los materiales puzolánicos, ellos poseen altos contenidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y en ocasiones también alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Es por ello que cuando reaccionan a temperatura ambiente con agua y cal forman los hidrosilicatos de calcio. De esta forma, cuando son usados como adiciones minerales en los cementos mezclados, ofrecen nuevos productos de hidratación a la matriz. La cal consumida es suministrada por la portlandita formada durante el proceso de hidratación del cemento Portland. Lara (2010)

Dentro de las ventajas que ofrecen los cementos mezclados respecto al Portland ordinario se encuentran la transformación de la portlandita, la cual se forma mediante la hidratación del cemento Portland, en hidrosilicato de calcio mediante la reacción puzolánica, una reducción del desprendimiento de calor durante la hidratación y un refinamiento de la porosidad en la pasta de cemento. Esto permitió la obtención de materiales con aplicaciones específicas como son los hormigones de altas resistencias, los de bajo calor de hidratación, los resistentes a las expansiones causadas por la reacción álcalis – sílice y el ataque de sulfatos y la elaboración de sellantes de grietas por inyección. CODINA (2008)

Es evidente que, además del uso eficiente de materiales de desecho de otras industrias y de la disminución del consumo total de energía, los productores de cemento se benefician con la flexibilidad que ofrece la inter-molienda en ajustar los volúmenes de producción para satisfacer la demanda. Esto ha tenido una favorable aceptación en Europa, donde la industria cementera tiene recogido en sus requerimientos normativos 26 tipos de cementos mezclados. Lara (2010)

La incorporación de materiales cementicios suplementarios no solo representa beneficios económicos al disminuir el contenido de clínquer en el cemento, sino que también tiene beneficios ambientales por la reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  asociadas, y los nuevos cementos pueden tener nuevas propiedades no consideradas en los cementos tradicionales. Esto permite, además, la elaboración de hormigones

con mayor durabilidad y más resistentes, disminuyendo los costos de reparación asociados.

#### **1.4.3 Sistemas ternarios clínquer –arcilla calcinada –carbonato de calcio**

En la actualidad, el estudio e incorporación de nuevas adiciones ha devenido en el surgimiento de formulaciones más complejas como son los sistemas ternarios y los cuaternarios. Los sistemas ternarios de clínquer -metacaolín –carbonato merecen mayor atención debido al potencial que presentan para la obtención de sistemas cementicios ternarios con altos por cientos de sustitución de clínquer, aprovechando la fuente de aluminatos presentes en las arcillas con alto contenido de caolín mezclando grandes cantidades de la misma con la caliza y con yeso para disfrutar de las ventajas que pueden ofrecer los sistemas (clínquer – metacaolín - piedra caliza - yeso). El carbonato de calcio presente en la piedra caliza triturada tiene un doble papel durante los procesos de hidratación, una parte reacciona sinérgicamente con las fases aluminicas de las arcillas calcinadas, dando lugar a la obtención de fases que estabilizan la fase etringita, propiciando con ello un incremento del volumen total de productos de reacción, el decrecimiento de la porosidad y por tanto el aumento de la resistencia. La otra parte de la caliza actúa como filler inerte, proporciona superficie específica adicional para la precipitación de los productos de reacción, favoreciendo con ello las resistencias iniciales. En estos sistemas reaccionan las fases con altos contenidos de alúmina de la arcilla calcinada con la portlandita que se libera durante la hidratación del clínquer, los carbonatos contenidos en la roca caliza y los sulfatos contenidos en el yeso adicionado a la mezcla, para formar fases del tipo (hemicarbo y monocarboaluminatos). Rossen (2010)

Las arcillas calcinadas y el carbonato de calcio, son alternativas interesantes para países industrializados y en vías de desarrollo. La mayoría de las arcillas y el carbonato de calcio están distribuidos de forma uniforme en la geografía del Planeta, de forma que pueden ser considerados materiales de abundante disponibilidad. Ambos son comúnmente utilizados en la producción de cemento, así que cerca de las fábricas de cemento existen reservas de estos materiales, e instalaciones para su procesamiento. Las reservas existentes de ambos materiales, aunque no renovables, pueden ser explotadas hasta cierto punto sin infringir un severo daño ambiental, y su disponibilidad excede la de cualquier otro MCS conocido.(Gesog̃lu)

Los minerales arcillosos poseen características típicas que impiden su uso como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables con

baja solubilidad química impide la liberación de Si y Al como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. Su pequeño tamaño de partícula, su estructura en forma de capas propensas al deslizamiento y al agrietamiento, y la presencia de una alta superficie específica con capacidad para inmovilizar grandes cantidades de moléculas de agua, son factores que pueden afectar negativamente la resistencia mecánica y la reología en un material cementicio, mientras que su alta capacidad de adsorción de iones modificaría la composición química de las soluciones acuosas, afectando las propiedades tecnológicas. Muller (2005)

Esto hace necesario que, para poder ser empleados como materiales puzolánicos, su estructura deba ser modificada a través de procesos de calcinación. La activación térmica de un material arcilloso consiste en calentar la arcilla hasta una temperatura dada para eliminar su agua estructural, modificando así su estructura cristalina original para hacerlo químicamente más reactivo. Este proceso es conocido como desoxhidroxilación. Nielsen (1991)

La calcinación de arcillas caoliníticas a temperaturas que oscilan entre 550 y 900 °C produce un compuesto de sílice amorfa, lo que es un aluminosilicato puzolánico muy reactivo. Janotka I. (2010)

El ahorro de energía se debe a que la temperatura de calcinación de las arcillas es más baja que la del clínquer y son fáciles de moler Duda (1997). Por otro lado, una gran cantidad de CO<sub>2</sub> es generado en la descomposición de la calcita durante la producción del clínquer, mientras que la deshidroxilación de las arcillas caoliníticas emiten vapor de agua. Tironi Alejandra (2012)

Durante los años 1990, el uso de cementos ternarios aumentó considerablemente debido a que ellos presentaban algunas ventajas sobre los cementos binarios. En este tipo de cemento, el efecto sinérgico producido entre los componentes de la mezcla permite que algunos de ellos compensen parcial o totalmente las deficiencias de otro componente y/o multiplique sus propias virtudes. Adicionalmente, presentan una oportunidad inmejorable para elaborar cementos y hormigones con menor impacto ambiental, con propiedades adecuadas al requerimiento del mercado y sin aumento en el costo de producción. I. Elkhadiri (2002)

Debido al comportamiento complementario de las adiciones, el cemento ternario presenta ventajas frente al cemento portland y al cemento binario. El material calcáreo mejora la resistencia a edades tempranas mientras que la escoria contribuye con la resistencia a edades más avanzadas, esto hace que el cemento ternario presente un adecuado desarrollo resistente. M. F. Carrasco (2005)

## 1.5 Proceso de molienda de los cementos

La molienda de cemento se realiza en equipos mecánicos en los que la mezcla de materiales es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas, debido a lo anterior en los molinos de cemento hay que controlar la temperatura para que no llegue a producir la transformación del yeso dihidrato en hemihidrato o en anhidrita, que se caracterizan por tener gran afinidad por el agua y ser más fácilmente solubles que el yeso. Al amasar con agua un cemento de molienda "caliente", se forma inmediatamente una disolución saturada de yeso, de la cual precipitan cristales aciculares de dihidrato, que se entrecruzan formando un fieltro y dan lugar al "falso fraguado", consistente en una rigidización prematura aunque pasajera de la masa, la cual se elimina sin más que proseguir el amasado.(AUSTIN)

Entre los equipos más empleados en el mundo para la molienda de cemento se encuentran:

- Molinos de bolas.
- Prensa de rodillos.
- Molinos verticales de rodillos.
- Molinos horizontales de rodillos.

En la actualidad, la industria cementera está transitando por cambios importantes, la meta es producir un cemento compuesto, en el cual, un por ciento elevado de clínker sea remplazado por MCS y moler es un elemento importante dentro de este plan. El principal inconveniente referido a la molienda para este tipo de cementos es que los materiales presentan durezas diferentes y durante la intermolienda actúan recíprocamente entre sí provocando que los de mayor dureza sobre muelan a los de menor dureza y estos a su vez amortiguan las colisiones a los de mayor dureza lo que provoca demoras en el tiempo en alcanzar la finura requerida o no llegar a alcanzarla ya que un componente escuda al otro. Debido a esto se ha planteado la molienda por separado de cada material para luego realizar la mezcla, de esta manera se puede controlar la finura de cada componente, si se muele separado o se realiza una intermolienda depende del tipo de MCS, si es posible obtener la finura requerida de todos los componentes mediante la intermolienda, la viabilidad técnica-económica y la demanda de tiempo, así como la disponibilidad.

Con el objetivo de determinar cómo debe ser molido un cemento generalmente se realizan pruebas de molienda en molinos de bolas de laboratorio en los cuales se asemejan las características de la producción industrial, existiendo siempre diferencias

debido a que es prácticamente imposible recrear a escala industrial lo que se realiza en el laboratorio y viceversa.(Weerdt)

### 1.5.1 Molinos empleados a escala industrial

Entre las tendencias más diseminadas en el mundo se encuentra la de realizar la fragmentación de las partículas en el interior de unos equipos cilíndricos rotatorios de acero que se conocen con el nombre de **molinos de rodamiento de carga**. Estos llevan en su interior una mezcla de mineral a fragmentar junto con cuerpos molturantes o moledores que pueden ser barras, bolas, guijarros de sílex o incluso fragmentos gruesos del propio mineral.

Por lo tanto la PortlandCementAssociation (2013) <http://www.cement.org> realiza una clasificación según el tipo de **cuerpos molturantes** que emplean:

- Molinos de bolas: (bolas de acero muy duro y aleaciones), estos alcanzan las mayores finuras.
- Molinos de barras: (fabricadas de acero con alto contenido en carbono), más utilizados en moliendas gruesas.
- Molinos autógenos (AG) o Semiautógenos (SAG): Los cuerpos de molienda van a ser el propio mineral (AG) o un porcentaje de mineral y otro de bolas u otro tipo (SAG).
- Molinos de pebbles (cuerpos no metálicos; naturales o fabricados): guijarros de sílex o porcelana.

Estos equipos pueden trabajar de **forma discontinua** y de **forma continua**.

**Forma discontinua:** cuando el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, terminada esta operación, el molino se abrirá para a continuación separar el mineral de los cuerpos molturantes. Esta forma de trabajar se utiliza en molinos pequeños de laboratorio.

**Forma continua:** El molino se alimenta de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo (o por el centro según el molino). La operación únicamente se detendrá para trabajos de mantenimiento o recarga de los cuerpos molturantes.

La molienda se puede realizar por **vía seca** o por **vía húmeda** dependiendo principalmente del tipo de etapa siguiente (húmeda o seca), la disponibilidad de agua, el menor consumo de energía en la molienda húmeda (la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos). Teniendo presente que la molienda por vía húmeda tiene un mayor desgaste de cuerpos moledores y blindajes (principalmente debido a la

corrosión), y también que existen sustancias que reaccionan con el agua, produciéndose cambios físico-químicos (clínquer del cemento).

**Vía seca:** Molienda de materiales prácticamente **secos** (2 % de agua) o con una determinada humedad (30 % de humedad).

**Vía húmeda:** Molienda de materiales que forman una pulpa (30-300 % de agua).

Estos equipos pueden trabajar en **circuito abierto** o **circuito cerrado**; dependiendo si se dispone de una criba o clasificador a la salida del producto que devuelva los sobretamaños. En molienda con barras se emplea el circuito abierto generalmente, al contrario de la molienda con bolas o autógena. Los molinos de cuerpos molturantes (de bolas, barras, etc.), son grandes tubos cilíndricos, dispuestos horizontalmente, están contruidos a base de planchas de acero, protegidas contra el desgaste y la corrosión por revestimientos metálicos generalmente intercambiables. La cámara cilíndrica gira alrededor de su eje horizontal apoyada en los extremos sobre unos cojinetes cilíndricos que descansan sobre unos soportes. Esta clase de molinos depende de varios parámetros técnicos para su correcto funcionamiento:

**1. Velocidad Crítica:** Es aquella velocidad de giro mínima alcanzada por el molino (RPM), de forma que la fuerza centrífuga creada es suficiente para conseguir que las partículas queden adheridas a los revestimientos del molino. Es lógico que si queremos moler el mineral; la velocidad a la que gire el molino deberá estar por debajo de dicha velocidad crítica y así se crea un efecto conocido como efecto cascada.

**2. Carga de cuerpos moledores:** Es importante que los molinos tengan un grado de llenado (relación entre el volumen de bolas y el de la cámara) adecuado, oscilando entre el 25 % y el 45 % como también la granulometría de las bolas si es el caso.

**3. Tiempo de residencia:** El tiempo que se mantiene el material a moler dentro del molino es fundamental, a mayor tiempo, más colisiones y en consecuencia una mayor finura.

**4. Alimentación:** Se refiere a la velocidad de alimentación en un proceso continuo y a la carga a moler en un proceso discontinuo. RESTREPO (2009)

Estudios realizados en *el Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia*, en 2008 demuestran que la producción de material fino menor a 45 micras, está fuertemente influenciada por factores como la velocidad de giro del molino y el tiempo de residencia. No sucede lo mismo con la carga de cuerpos moledores, para la cual la cantidad de material producido por debajo de la malla 325 no varía significativamente con cambios en la carga. Asimismo, el área superficial se

incrementa al aumentar tanto la velocidad como el tiempo y la carga. Sin embargo, la mayor incidencia la tiene el factor velocidad. El mayor impacto de la velocidad de giro del molino tanto sobre la cantidad de masa pasante malla 325 como sobre el área superficial, se debe probablemente al alto grado de tensiones creadas sobre la estructura cristalina del material y en consecuencia, al aumentar la velocidad se incrementa en varios órdenes de magnitud el número de fracturas en las fronteras e imperfecciones estructurales de las partículas lo que conduce a la producción de una mayor cantidad de finos y a la generación de la nueva área superficial asociada a los tamaños más pequeños.

Los molinos de cargas molturantes no son los únicos empleados, existen varios modelos, durante las últimas tres décadas se han incorporado otras tecnologías como **molinos de rodillos** (horizontales o verticales) en el cual la molienda tiene lugar exponiendo una cama de material a una presión suficientemente alta para causar la fractura de las partículas individuales en la cama, aunque la mayoría de las partículas son considerablemente más pequeñas que el espesor de la cama. Estos molinos pueden llegar a conseguir una calidad del material molido similar a la de un molino de bolas y emite menos ruido al medio con el inconveniente de un mayor consumo de energía lo cual resulta su principal desventaja en el campo industrial.

En la industria del cemento se realiza la molienda generalmente en molinos de bolas, principalmente de circuito cerrado y de 2 o 3 cámaras, al girar estos por debajo de su velocidad crítica (aquella en la que la fuerza centrífuga anula la gravedad sobre las bolas), las bolas caen junto con las materias primas desde una altura grande chocando con los trozos de material situado entre ellas y entre el revestimiento y, por tanto, desmenuzando a las materias primas hasta convertirlas en un material pulverulento.(Joergensen) (AUSTIN)

## **1.6 Influencia de los resultados de la molienda en las propiedades del cemento**

Como sabemos una de las etapas del proceso de fabricación del cemento es la molienda del clínquer con el yeso. La finura es una de las propiedades más importantes, está ligada a su valor hidráulico ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado. Esto se debe a que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie al interior sólo en una profundidad de 0,01mm, el área total superficial de las partículas del cemento constituye el material de hidratación.(OTERO)

Al aumentar finura aumenta la rapidez a la que se hidrata el cemento dando una mayor retracción después de endurecido y por tanto es más susceptible a la fisuración.

Es decir que una molienda muy fina dará lugar a cementos que endurecen rápidamente y por tanto también tienen un desarrollo más rápido de su resistencia, cuanto más fino sea un cemento este se deteriora más rápido por la exposición a la atmósfera. Por otro lado los cementos con granos gruesos se hidratan y endurecen lentamente al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte y pueden producir exudación de agua por su escasa capacidad para retenerla. Se estima que la velocidad de hidratación es de 3.5 micras en 28 días, lo cual indica que las partículas pueden demorar varios años en hidratarse e incluso no hacerlo, esto provocaría un rendimiento muy bajo del mismo en cuanto a características mecánicas. Holcim (2011) Estudios recientes han demostrado la influencia que existe entre la finura o superficie específica de las arcillas calcinadas y su reactividad. Tal es el caso de las investigaciones desarrolladas por FERNANDEZ (2009), las cuales demostraron como a medida que aumenta la temperatura de calcinación existe una caída en la superficie específica del material y por ende en la reactividad del mismo.

A su vez una finura excesiva conlleva un calor de fraguado muy alto (lo que, en general, resulta perjudicial). Pero conociendo que las resistencias mecánicas aumentan con la finura se llega a la conclusión de que el cemento Portland debe estar finamente molido, pero no en exceso. En este sentido se debe controlar con mayor rigurosidad la intermolienda de cementos con adicciones, dichos cementos poseen materiales con diferentes durezas lo cual puede provocar tanto sobremolienda en unos componentes como la posibilidad de presentar un componente duro como el clínquer que no alcanza la finura esperada. RESTREPO (2009)

## **1.7 Conclusiones del capítulo**

1. La producción de cemento ha resultado ser de forma inevitable uno de los principales responsables de la degradación del Medio Ambiente, esta repercute de manera negativa en la atmósfera y demanda grandes cantidades de energía.
2. El cemento Portland, como uno de los principales componentes del hormigón, es uno de los materiales más empleados a nivel mundial en la actualidad y sus volúmenes de producción van en aumento, debido a lo anterior es necesario encontrar soluciones para su producción como es la sustitución parcial del clínquer.
3. Actualmente, uno de los materiales cementicios suplementarios más estudiados y usados los constituyen las arcillas calcinadas en forma de

metacaolín. Esto se debe a los grandes aportes que brindan a las propiedades de pastas, morteros y hormigones, los que en algunos casos pueden ser superiores con respecto al resto de las puzolanas conocidas.

4. El empleo de sistemas ternarios permite extender los niveles de sustitución del clínquer en el aglomerante con respecto a los sistemas mezclados tradicionales CPO-arcillas calcinadas, por lo que se ha convertido en la temática de mayor interés para investigadores y productores.
5. El proceso de molienda es una parte importante en la producción de cemento, que a demás de su costo e impacto ambiental es necesario estudiarla por la influencia que ejerce en el cemento, sobre todo en su finura y por consiguiente en las propiedades en las cuales esta influye.
6. Los cementos mezclados o con adiciones deben ser tratados de manera especial con respecto a su molienda ya que por su compleja conformación presentan componentes de diferentes durezas lo que podría traer consigo varias consecuencias:
  - El material menos duro se muele primero creando una capa que amortigua al material más duro aumentando el tiempo de molido y por tanto el costo de producción.
  - Si se muele el material menos duro por separado la energía necesaria se puede reducir considerablemente.

## ***CAPITULO II Remolienda de un cemento ternario producido en la fábrica de cementos de Siguaney en agosto del 2013.***

Los resultados finales que pueda tener el cemento ternario producido en la fábrica de Siguaney están muy influenciados por el proceso de molienda y la finura que alcance, partiendo de una buena calidad de la materia prima a calcinar, así como por las condiciones del proceso de calcinación. En este capítulo se exponen los resultados de la remolienda de un cemento ternario producido en la fábrica de cemento de Siguaney en agosto de 2013, así como los ensayos realizados para comprobar que cumplen con las exigencias de las normas cubanas.

### **2.1 Materiales y Métodos**

La materia prima con que se cuenta en la primera etapa es un cemento conocido como SIG-B45 en el cual se sustituye un 45% del clínquer del cemento por la combinación de arcilla calcinada y carbonato de calcio en proporción 2 a 1, el mismo se elaboró en la fábrica de cementos Siguaney obteniéndose las siguientes características:

**Tabla 2.1** Características del cemento SIG B45

<b>Adición %</b>			45
<b>Índice</b>	<b>Parámetros</b>	<b>UM</b>	<b>SIG B-45 Indust.</b>
<b>Físicos</b>	<b>Retenido en el tamiz 4900 (máx.)</b>	<b>%</b>	12.0
	<b>Blaine</b>	<b>cm<sup>2</sup>/g</b>	4190
	<b>Peso Específico</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	2.92
	<b>Consistencia</b>	<b>%</b>	25.0
	<b>Tiempo inicial de fraguado (mín.)</b>	<b>Min.</b>	135
	<b>Tiempo final de fraguado (máx.)</b>	<b>Hrs.</b>	2.9 h
	<b>Estabilidad de volumen</b>	<b>mm</b>	0.3
<b>Mecánicos</b>	<b>Resistencia a la comp. (mín.) 3d</b>	<b>MPa</b>	11.0
	<b>7d</b>	<b>MPa</b>	17.5
	<b>28d</b>	<b>MPa</b>	30.3

En esta fábrica se utiliza un protocolo de molienda donde todas las materias primas son introducidas simultáneamente en el molino, estos funcionan en procesos de

circuito cerrado, los cuales están compuestos por un sistema de paletas que son calibradas en función de garantizar la finura del material exigida en la normativa vigente para los diferentes tipos de aglomerantes.

Con el objetivo de llegar a una finura mayor se remolerá este cemento a escala de laboratorio en dos molinos de 50 litros, de forma elipsoide de la firma KHD Humboldt de Alemania que radican en el Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de la Construcción (CTDMC). Luego de obtenida esta finura se realizarán ensayos al nuevo cemento para verificar que cumple con los requisitos establecidos por las normativas vigentes y de ser así intentar obtener la finura requerida a escala semi industrial. Con el objetivo de tener un patrón con el cual comparar los resultados se cuenta con un cemento P-35 de producción nacional al cual, después de realizarle un ensayo de tamizado en el tamiz de 90 micras se comprobó que tiene una finura de 95,3%.

## **2.2 Molinos y proceso de molienda**

Recientemente los dos molinos (A y B) fueron reactivados mediante un estudio que estuvo basado en la molturación conjunta de clínquer y yeso donde se mantuvieron constantes los siguientes parámetros:

1. La carga de cuerpos moledores en un 30% respecto al volumen interior del molino, el peso de bolas calculado fue de 62,325 Kg.
2. La velocidad de giro del molino en 50 RPM (la velocidad crítica del molino es de aproximadamente 60 RPM).
3. La relación bolas/material igual a 10, lo que corresponde a aproximadamente 6 Kg de material.
4. Se efectuaron mediciones de retenidos en 90 micras cada 15 minutos hasta lograr un 10% como máximo en ese tamiz.

Se realizaron varias calibraciones con respecto a la distribución del diámetro y carga de las bolas hasta obtener la combinación que resultó en la mayor finura con el menor tiempo en busca de economizar el proceso. Este estudio demostró que se pueden obtener cementos en un tiempo aproximado de una hora y donde el por ciento de retenido de partículas superiores a 90 micras está en el rango de los cementos industriales. Conociendo las variables de operación de los molinos como carga de material y carga y distribución de bolas se procede a la remolienda del cemento a

escala de laboratorio. En el centro se cuenta además con una planta semi industrial para la molturación que consta de un molino de bolas el cual trabaja de forma continua, sus respectivas cintas transportadoras y dosificadoras. En esta planta se remolerá el resto del cemento, una vez obtenido el óptimo de finura a escala de laboratorio, simulando el proceso en la fábrica.

### 2.2.1 Preparación de los molinos

Teniendo en cuenta el estudio realizado en los molinos se cargaron los molinos A y B con sus respectivas cargas y distribución de bolas, calculando el peso de los 62,325 Kg correspondientes a cada por ciento de distribución:

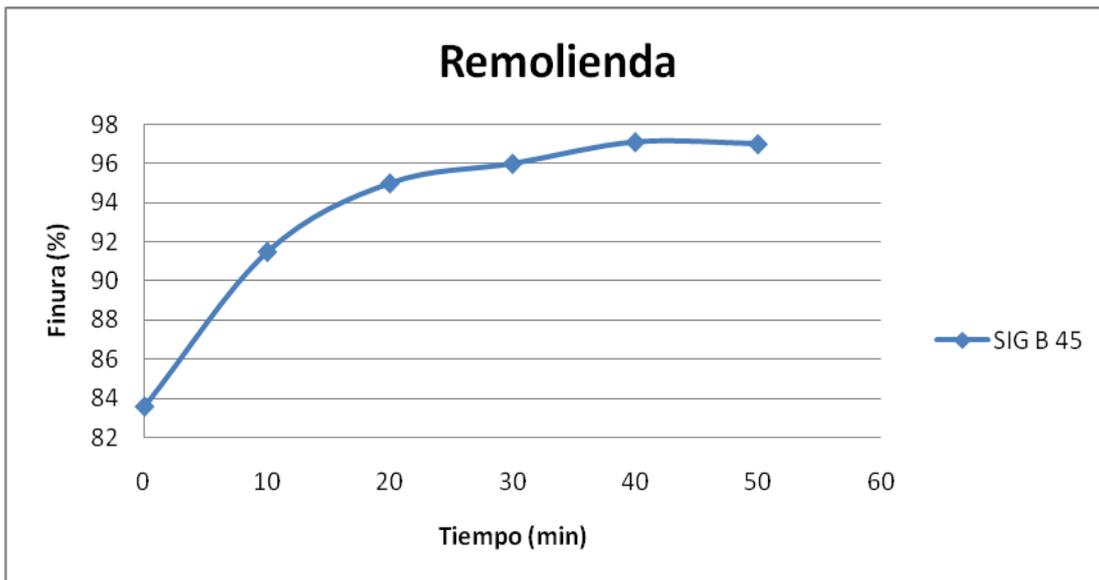
**Tabla 2.2** Carga moledora de los molinos de laboratorio

Molinos	Distribución de bolas			
	40-45mm	25-30mm	20-25mm	15-20mm
A	25%	20%	25%	30%
B	25%	25%	25%	25%

Luego de cargados los molinos se pesaron 6 Kg de cemento SIG-B45 y se remolió durante 15 minutos para eliminar restos de otros materiales que pudieran residir dentro del molino o sobre las bolas, al terminar se descargan los molinos y se vuelven a cargar con las bolas quedando listos para introducir el cemento que se quiere remoler.

### 2.2.2 El proceso de molienda

Antes de comenzar a moler se realiza el tamizado de 10 g de cemento SIG B45 en el tamiz de 90 micras para determinar su finura inicial resultando esta de 83,6%, a continuación se pesan 6 kilogramos y se carga el molino "B" para comenzar con la molienda, después de 10 minutos se detiene el molino y extrae una muestra de diez gramos repitiendo el proceso de tamizado para conocer la finura y continuando con la remolienda a intervalos de 10 minutos hasta que después de dos tamizados consecutivos la finura no presenta ninguna variación o varíe muy poco, los resultados de este proceso se muestran en la siguiente figura donde se puede observar que el cemento alcanzó una finura final de 97% la cual cumple con la norma vigente 95-2001 que es de 90%.



**Figura 2.1** Resultados del proceso de remolienda del cemento SIG B 45

Del mismo modo se repitió el proceso en el molino "A" extrayendo una muestra a los 30 minutos donde se obtuvo una finura de 96,2% y otra a los 50 minutos de la cual se obtuvo un 97,1% de finura como se esperaba.

### 2.3 Caracterización del cemento ternario remolido

Al cemento obtenido, de la remolienda en el laboratorio, se le realizaron varios ensayos los cuales son comparados con las referencias de cemento P-35 con el objetivo de conocer la demanda de agua así como el aditivo más adecuado a emplear y la cantidad de aditivo óptimo para la elaboración de pastas y morteros con el novedoso cemento.

#### 2.3.1 Ensayo del minicono

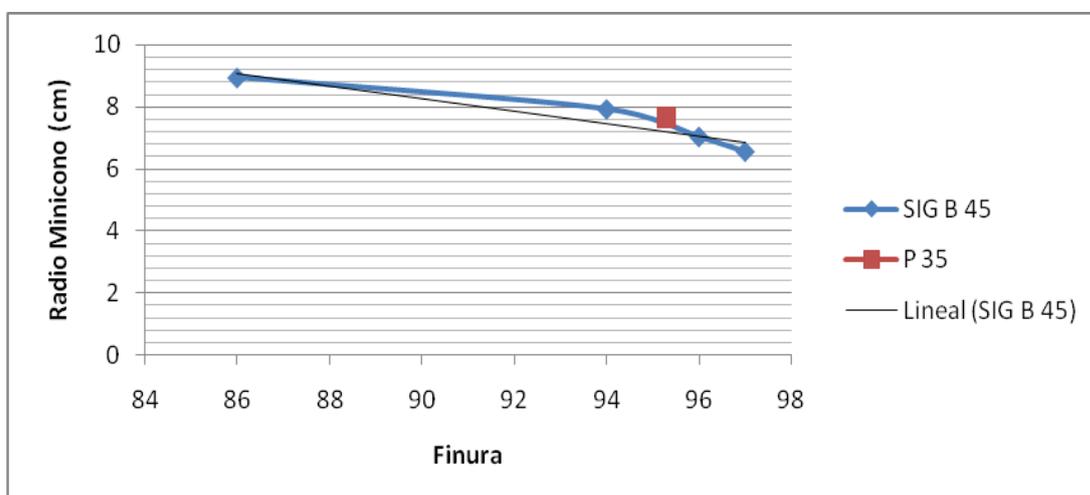
Método para ensayos reológicos de pastas de cemento el cual presenta la ventaja de ser rápido, emplea mínimas porciones de pasta y permite el estudio de un gran número de variables experimentales. Su principio de funcionamiento está basado en la medición del área de esparcimiento alcanzada por la pastilla conformada como consecuencia de la caída por gravedad de la mezcla al retirar el troncocono que la contiene.

Este ensayo se realiza con un cono similar al cono de Abraham pero con menores dimensiones, en la parte superior del cono tiene 19 mm de diámetro, en la parte inferior 38 mm y 56 mm de altura, se utilizará una relación agua/cemento de 0,42 determinada por proyecto y la dosificación utilizada es de 100 gramos de cemento.

Esta mezcla se mantiene en la mezcladora por 3 minutos se le deja reposar 2 minutos y se mezcla por 2 minutos más, luego se vierte el contenido en el minicono, se enraza y se levanta el cono dejando reposar la mezcla por un tiempo después del cual se mide el diámetro de la pastilla de cemento, a mayor diámetro menos agua demanda el cemento. La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo del minicono realizado sin aditivo a los cementos obtenidos a diferentes finuras y al P-35 para poder comprobar las diferencias entre los dos cementos y la influencia de la finura en la plasticidad y la demanda de agua.

**Tabla 2.3** Resultados de los ensayos del minicono a los diferentes cementos.

Cemento	Patrón P 35	Padre 86 %	94%	96%	97%
Diámetro 1	7.64	8.88	8.09	7	6.7
Diámetro 2	7.73	8.93	7.85	7	6.63
Diámetro 3	7.5	9.135	8.1	7.15	6.68
Diámetro 4	7.54	9.1	8.04	7	6.58
Diámetro 5	7.95	8.66	7.8	7.02	6.5
Diámetro 6	7.71	9	7.75	7.15	6.49
Diámetro 7	7.61	9	7.97	6.98	6.44
Diámetro 8	7.63	8.82	7.8	6.975	6.44
Promedio	7.66375	8.940625	7.925	7.034375	6.5575
Finura	95.3	86	94	96	97



**Figura 2.2** Comparación de los radios del minicono del cemento SIG B45 a 97% de finura con el P-35

Como se puede apreciar en la figura 2.2 el cemento ternario remolido disminuye su radio a medida que aumenta la finura lo que significa una mayor demanda de agua, En comparación con el cemento P-35 es mayor esta demanda cuando la finura es superior (96-97%).

## 2.4 Demanda de agua y aditivos

Para mejorar la demanda de agua es muy común la utilización de aditivos que mejoran la plasticidad de las mezclas y reducen la demanda de agua en morteros y hormigones, reduciendo así todos los problemas que acarrea una excesiva cantidad de agua en la mezcla, como se puede apreciar al aumentar la finura se ve incrementada la demanda de agua de este cemento remolido reflejado en la disminución del radio del minicono.

En el centro donde se realiza el estudio se cuenta con tres aditivos: A2R9 y SIKAMENT de importación y SF 20 de producción nacional de modo que se prueba cada uno de ellos con el cemento ternario a 97% de finura en el ensayo del minicono para elegir cuál sería el más adecuado a utilizar dado las características de este cemento el cual por su contenido de arcilla puede influir en las reacciones químicas entre el aditivo y la mezcla. En las siguientes figuras se muestra los resultados de cada aditivo:

**Tabla 2.4** Resultados del radio del minicono incorporando diferentes aditivos.

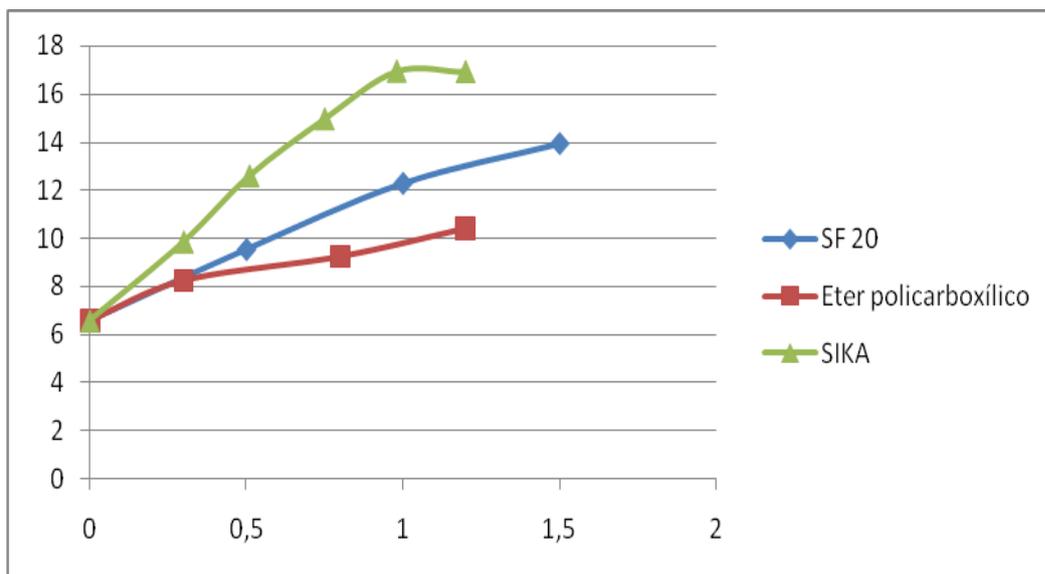
Aditivo	SF 20	Radio 1	Radio 2	Radio 3	Radio 4	promedio
	0					6.5575
Porcentaje de aditivo	0.5	9.65	9.52	9.555	9.42	9.53625
	1	12.22	12.22	12.39	12.335	12.29125
	1.5	13.91	13.98			13.945

Aditivo	A2R9	Radio 1	Radio 2	Radio 3	Radio 4	promedio
	0					6.5575
Porcentaje de aditivo	0.3	8.24				8.24
	0.8	9.25				9.25
	1.2	10.42				10.42

Aditivo	SIKA	Radio 1	Radio 2	Radio 3	Radio 4	promedio
	0					6.5575
Porcentaje de aditivo	0.3	9.92	9.75	10	9.705	9.84375
	0.51	12.56	12.685	12.46	12.66	12.59125
	0.75	15.05	14.82	15		14.9566667
	0.98	16.9	16.93	17		16.9433333
	1.2	16.94	16.9			16.92

Se decidió la utilización del aditivo SF 20 que, a demás de mostrar buenos resultados, es un aditivo de producción nacional con lo que tiene ventajas en la rama económica. En la figura 2.3 se muestra el comportamiento de cada aditivo, reflejando como el

aditivo A2 R9 no tiene gran repercusión en el aumento del radio al contrario de lo que sucede con SIKA y el SF 20.



**Figura 2.3** Radio del minicono VS % de aditivos

#### 2.4.1 Caracterización del aditivo GENIOTEC SF/20

El aditivo **GENIOTEC SF/20** se fabrica en GENIOTEC, sito en Carretera a Casablanca y Calle 70, Reparto Vía Túnel, Municipio Regla, Ciudad Habana, Cuba. Es un aditivo superplastificante que el fabricante clasifica como del tipo F según la Norma ASTM C 494 y que se agrega al hormigón hidráulico durante su preparación con el objetivo de:

- Lograr mayor laborabilidad del hormigón.
- Reducir el agua de amasado sin modificar la consistencia.
- Obtener los efectos anteriores simultáneamente.

**Tabla 2.5** Caracterización del aditivo SF 20

Estado físico	Líquido
Color	Carmelita oscuro
Olor	Característico
Contenido de sustancia seca (%)	40 ± 1
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,20 ± 0,02

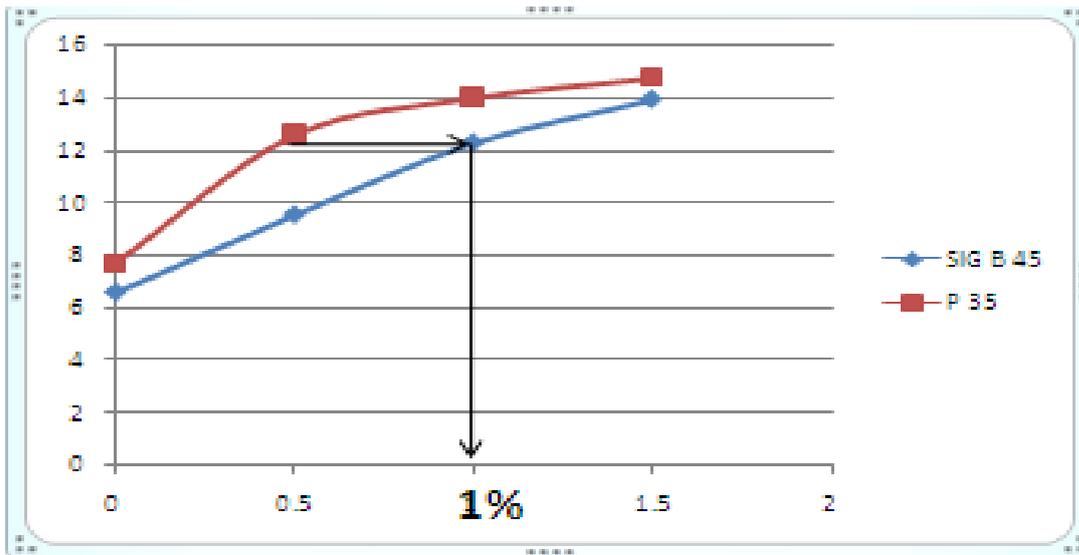
Valor pH	10 ± 1
Solubilidad en agua destilada (% sólido insoluble)	0,99
Solubilidad en agua de cal (% sólido insoluble)	2,00
Contenido de cloruros (%)	0,01 - 0,03
Tensión superficial (dinas/cm a 26°C)	42,9
Espectro de Infrarrojo	Característico

En la tabla 2.6 se muestra los resultados del ensayo de minicono con cemento P-35 y aditivo SF 20, con los cuales se realiza una comparación entre los diámetros de los dos cementos para obtener la dosificación óptima de aditivo SF 20 a utilizar en el cemento ternario.

**Tabla 2.6** Resultados del radio del minicono incorporando aditivo SF 20 al cemento P-35

P 35	Radio 1	Radio 2	Radio 3	Radio 4	
0	7.77	7.51	7.58	7.76	7.655
0.5	12.96	12.88	12.19	12.27	12.575
1	13.94	14.25	14	13.85	14.01
1.5	14.88	14.95	14.71	14.5	14.76

Como se muestra en la figura 2.4 al usar 0.5% de aditivo en la mezcla aumenta el radio del minicono, siendo incluso mayor que el correspondiente al cemento P-35 sin aditivo, sin embargo es mucho menor que al agregar la misma cantidad de aditivo al P-35.



**Figura 2.4** Comparación de radios VS % de aditivo SF 20 de ambos cementos

En cambio muestra resultados satisfactorios a partir del 1% de aditivo puesto que es mucho más significativo el incremento de diámetro en el cemento ternario; por lo que se plantea que a partir del 1% de aditivo SF 20 el cemento presenta una correcta demanda de agua.

## 2.5 Conclusiones parciales

1. Optimizando el proceso de molienda se puede obtener un cemento ternario con un 45% de sustitución de clínquer, que presente una finura de 97% de material pasado por el tamiz de 90 micras.
2. El cemento SIG-B45 remolido a una finura de 97% tiene una demanda de agua ligeramente mayor que el cemento P-35, la cual puede ser disminuida de manera eficaz utilizando aditivos como el SF 20.

### **Capítulo III Resultados del estudio de la cinética de molienda para la optimización del proceso de producción de un cemento ternario.**

En este capítulo se muestran los resultados de la producción a escala de laboratorio en el CTDMC de cemento SIG B45, a partir materias primas proporcionadas por la fábrica de cementos de Siguaney; aplicando dos métodos de molienda diferentes: intermolienda y molienda de cada material por separado, así como algunas de sus propiedades físicas y mecánicas.

#### **3.1 Caracterización y dosificación de las materias primas.**

Se cuenta con piedra de yeso, clínquer, arcillas calcinadas y calizas provenientes de sus respectivos procesos de calcinación y clasificación en la fábrica de Siguaney, es válido comentar que la arcilla calcinada y la caliza ya se encuentran premezcladas en dosificación 2 a 1. Por su parte el yeso presenta un tamaño de partícula que se considera muy grande para introducirlo en el molino de bolas por lo que será triturado en un molino de mandíbulas del laboratorio con el objetivo de obtener una granulometría y un tamaño máximo más adecuado para introducirlo en el primero. Para la producción del cemento ternario se calculó el peso de cada material para completar los 6kg con los que se carga el molino resultando:

Clínquer-----2.88kg  
Arcilla calcinada+caliza-----2.7kg  
Yeso-----0.42kg

Conjuntamente se produjo un cemento P-35 en las mismas condiciones de molienda y con las mismas materias primas con el objetivo de comparar los resultados, quedando el peso de los materiales de la siguiente forma:

Clínquer-----5.82kg  
Yeso-----0.18kg

Como se puede observar en el cemento ternario existe un pequeño incremento del porcentaje de yeso para contrarrestar la rápida reacción de los aluminatos incorporados por la arcilla calcinada que posee mayor presencia de esta sustancia que el clínquer.

### 3.2 Intermolienda.

Después de pesados los 6kg de material se aplicó el procedimiento mencionado en el capítulo dos en los molinos de laboratorio de los cuales resultó un cemento con las siguientes finuras mediante el tamizado de 10 g en el tamiz de 90 micras:

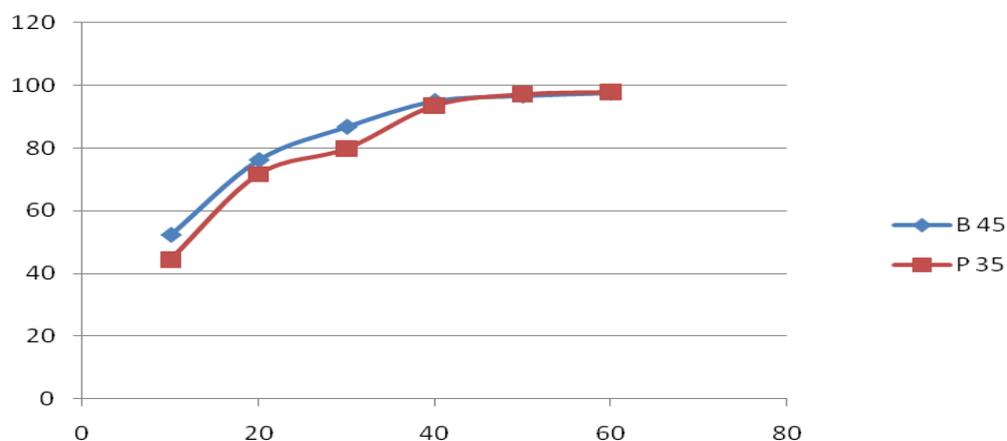
#### Cemento SIG B45

Tiempo de molienda:	% de Finura
10 minutos -----	52.2
20 minutos -----	76.1
30 minutos -----	86.7
40 minutos -----	94.9
50 minutos -----	96.6
60 minutos -----	97.4

#### Cemento P35

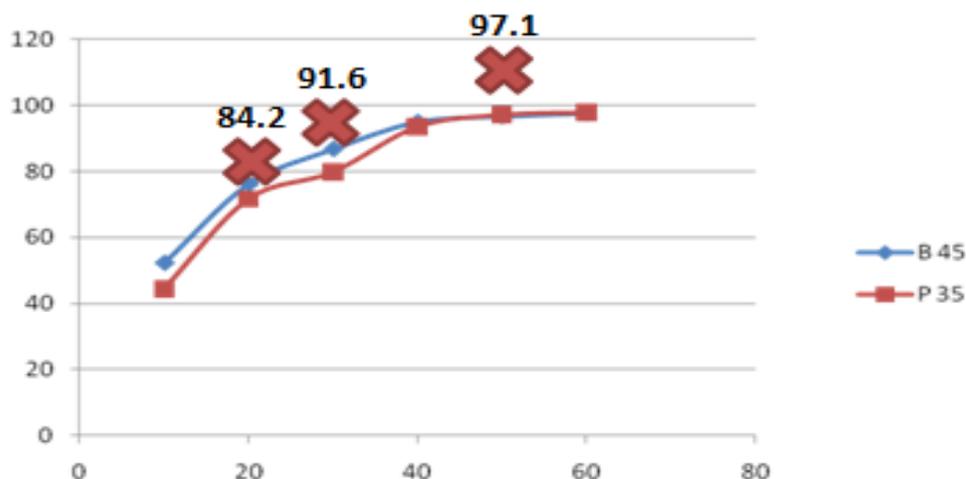
10 minutos -----	44.4
20 minutos -----	71.6
30 minutos -----	79.8
40 minutos -----	93.5
50 minutos -----	97.1

En la figura 3.1 se presenta una comparación entre los resultados de la finura y el tiempo de molienda para cada cemento, en la misma se puede apreciar que no existe gran diferencia en el tiempo de molienda necesario para que ambos cementos alcancen una finura elevada.



**Figura 3.1** tiempo vs finura de los dos cementos

A partir de estos resultados se escogieron tres muestras representativas a diferentes tiempos, teniendo la intención de comparar las diferencias que presenta el cemento SIG B45 molido a 20, 30 y 50 minutos respectivamente.



**Figura 3.2** Cemento molido a diferentes tiempos

A las muestras de los cementos ternarios tomadas de cada tiempo se le aplicaron los ensayos de finura, de minicono y de superficie específica de Blaine; demostrando a través de los resultados, que a mayor finura demanda más agua como ocurrió también con el cemento remolido en el capítulo 2, en la tabla 3.1 se muestran los resultados:

**Tabla 3.1** Ensayos realizados a diferentes tiempos de intermolienda

Tiempo de molienda (min)	Radio del minicono (cm)	Finura (%)	Blaine $\text{cm}^2/\text{g}$
20	9.02	84.2	3540
30	8.95	91.6	4150
50	6.83	97.1	4870

Se puede apreciar además como aumenta la superficie específica de Blaine a medida que se incrementa el tiempo de molienda.

### 3.3 Molienda por separado.

En la molienda por separado se procede a moler, a escala de laboratorio 6 kg de cada material, con los cuales, después de haber alcanzado la finura fijada anteriormente para cada uno de ellos, se confecciona en el laboratorio a partir de varias combinaciones distintos tipos de cementos.

Se molió cada componente a tres grados de finura (grueso, medio y fino), invirtiendo un tiempo de 30, 40 y 50 minutos de molienda respectivamente para el clínquer, mientras que para la arcilla calcinada se logró a 20, 30 y 50 minutos de molienda las finuras que se presentan en la tabla 3.2:

- 3 finuras de clínquer
- 3 finuras de arcilla calcinada + caliza (CC+LS)

**Tabla 3.2** Molienda de los componentes a diferentes finuras.

Material	grueso	medio	fino
Clínquer	83.4 (1)	91 (2)	96.7 (3)
CC+LS	84.3 (4)	92.8 (5)	97.3 (6)

En la tabla 3.3 se muestra el diseño de experimento mediante el cual se obtienen nueve tipos de cementos SIG B45 diferentes, en los cuales varía la finura de sus componentes; estos cementos se someterán a ensayos de compresión con el objetivo de comprobar la influencia de la finura y la superficie específica de cada componente en particular sobre el resultado final:

**Tabla 3.3** Matriz de experimentos

1+4	1+5	1+6
2+4	2+5	2+6
3+4	3+5	3+6

### **3.4 Ensayos mecánicos**

El método comprende la determinación de las resistencias a compresión y opcionalmente a flexión de probetas prismáticas, de dimensiones 40mm x 40mm de sección transversal y 160mm de longitud, según los procedimientos descritos por la Norma Cubana (NC506-2007), CEMENTO HIDRÁULICO—MÉTODO DE ENSAYO—DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA. Las probetas se fabrican con una relación agua/cemento de 0.42, una parte de cemento y tres partes de arena normalizada la cual en este caso es arena sílice obtenida en San Francisco de Paula, el molde dispondrá de tres compartimentos horizontales, de forma que se puedan preparar simultáneamente tres probetas prismáticas que seguido a su preparación se conserva en atmósfera húmeda durante 24 h, y las probetas desmoldadas se sumergen inmediatamente en agua hasta el momento de los ensayos de resistencia. A la edad requerida, las probetas se retiran de su medio de conservación húmedo, se rompen en dos mitades a flexión y cada mitad se somete al ensayo de resistencia a compresión.

### **3.5 Resultados y análisis (resultados pendientes)**

Resistencia a la compresión NC 95:2011.

### **3.6 Conclusiones parciales**

1. Durante la intermolienda el cemento SIG B45 presenta finuras similares al cemento P-35 para los mismos tiempos de molienda.
2. Mediante la molienda de cada componente por separado, se puede distinguir que algunos de ellos alcanzan altas finuras, con menos tiempo de molienda respecto a otros más duros como el clínquer.
3. El tiempo de molienda influye considerablemente en las propiedades del cemento ya que al aumentar la finura este experimenta cambios en su superficie específica lo cual proporciona mayor cantidad de material a reaccionar.

## **Conclusiones generales**

1. A partir de un proceso minucioso de molienda se logra un cemento SIG B45 molido a altas finuras (97%) que posee características similares a un cemento P-35.
2. El aumento de la finura genera un incremento en la demanda de agua, disminuyéndose mediante la utilización de aditivos, los que le confieren al cemento una fluidez comparable con la del P-35.
3. Entre la intermolienda y la molienda por separado existen diferencias que pudieran influir en las propiedades del cemento, debido a esto los cementos mezclados son mas propicios a molerse separados por la dureza variable de sus componentes.

## **Recomendaciones**

- Indagar en la posibilidad de aplicar a escala industrial la molienda por separado de los componentes del cemento.
- Fomentar el uso de aditivos, por parte de las empresas constructoras, en los morteros y hormigones para mejorar cualidades como la plasticidad de las mezclas

## Bibliografía

1. AFCP, A. D. F. D. C. P. 2010. LA INDUSTRIA DEL CEMENTO Y LA SOSTENIBILIDAD.
2. AITCIN P, C. 2000. Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow." Cement and Concrete Research.
3. ALUJAS, A. 2010. *Alujás, A., Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente.*
4. AMBROISE, J., MAXIMILIEN, S. & PERA, J. 1994. Properties of Metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials*, . 1.
5. AUSTIN, G. L. Y. C., A.F. Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y clasificación.
6. CEMBUREAU 2009. Producción Sostenible de Cemento.
7. CEMBUREAU 2013. Activity Report 2012. The Cement Sector: a Strategic Contributor to Europe's Future.
8. CODINA, M., CAU-DIT-COUMES, C., LE BESCOP, P., VERDIER, J. & OLLIVIER, J. P. 2008. Design and characterization of low-heat and lowalkalinity cements. *Cement and Concrete Research*,.
9. DUDA, W. H. 1997. Manual tecnológico del cemento, Barcelona: Reverte;. vol. 3.
10. ELENA ALCÁNTARA ORTEGA , C. C., KNIGHT JONATHAN, LOIZIDOU MARIA. Properties of alkali-activated clinoptilolite. *Cement & Concrete Research* Vol. 30.
11. FERNANDEZ, R. 2009. Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries.
12. FICEM 2013. Informe estadístico 2013.
13. FIIC 2012. Evolución de la economía en los países miembros de la Federación Interamericana de la Industria de la Construcción 2011-2012.
14. GADORET., G. 2005. "Dehydroxylated Aluminium Silicate Based Material.
15. GESOG~LU, E. G. N. Æ. M. Properties of self-compacting mortars with binaryand ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin.
16. GUERRERO, L. 2012. ¿El cemento es dañino para el medio ambiente?

17. HABERT, G., CHOUPAY, N., ESCADEILLAS, G., GUILLAUME, D. & MONTEL, J. M. 2009. Clay content of argillites: Influence on cement based mortars.
18. HENDRIKS, C. A. 1998. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. . *Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*.
19. HOLCIM, E. C. C. Y. 2011. Definición y elaboración del cemento.
20. [HTTP://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/CEMENTOPORTLAND](http://es.wikipedia.org/wiki/CementoPortland). 2013.
21. [HTTP://WWW.BUENASTAREAS.COM/](http://www.buenastareas.com/). 2011. *Efectos del cemento en el medio ambiente*. [Online]. Available: <http://www.buenastareas.com/>.
22. I. ELKHADIRI, A. D., A. BOUKHARI, J. ARIDE, F. PUERTAS 2002. Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in Moroccan portland.
23. ING. ABAD LÉVANO, K. D. P.-I. M. H., WILLY ALDO. 2010. *INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE MOLIENDA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Ingeniería.
24. JANOTKA I., P. F., PALACIOS M, KULIFFAYOVÁ M, VARGA C. 2010. Metakaolin sand– blended-cement pastes: rheology, hydration process and mechanical properties.
25. JOERGENSEN, S. W. Cement grinding. Vertical roller mills versus ball mills. *MSc, General Manager, Engineering, Grinding Technology F.L.SMIDTH*
26. LARA, R. C. 2010. *MATERIAL PUZOLÁNICO A PARTIR DE ARCILLAS DE BAJO GRADO CALCINADAS A ALTAS TEMPERATURAS*.
27. LAWRENCE, P. 2005. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, *Cement and Concrete Research* 35.
28. M. F. CARRASCO, V. L. B., G. MENÉNDEZ, E. F. IRASSAR 2005. Cementos a Medida con Material Calcáreo y Escoria Granulada de Alto Horno: Optimización de la Resistencia.
29. M. SCHNEIDER, M. R., M. TSCHUDIN, H. BOLIO 2011. Sustainable cement production present and future. *Cement & Concrete Research*.
30. MARSH, R. L. D. B. K. 1988. Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*,.
31. MARTIRENA, F. 2003. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa.

32. MARTIRENA., F. 2009. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. *In: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL. SANTA CLARA, U. C. M. A. D. L. V. (ed.).*
33. MULLER, C. J. 2005. Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH.
34. MUNDIAL, T. T. D. D. M. A. B. 2012. Impacto ambiental de la industria del cemento.
35. NC96-2011, O. N. D. N. 2011. NC 96- 2011, CEMENTO CON ADICIÓN ACTIVA - ESPECIFICACIONES.
36. NC120:2004, O. N. D. N. 2004. Hormigón hidráulico. Especificaciones.
37. NC504-2013, O. N. D. N. 2013. NC 504 - 2013, CEMENTO HIDRÁULICO- MÉTODO DE ENSAYO -DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE VOLUMEN.
38. NC506-2007, O. N. D. N. 2007. NC 506-2007, CEMENTO HIDRÁULICO— MÉTODO DE ENSAYO— DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA.
39. NC524-2007, O. N. D. N. 2007. NC 524-2007, CEMENTO HIDRAULICO- METODO DE ENSAYO- DETERMINACION DE CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO POR AGUJA VICAT
40. NC525-2007, O. N. D. N. 2007. NC 525- 2007,CEMENTO HIDRAULICO- METODO DE ENSAYO- DETERMINACION DEL CALOR DE HIDRATACIÓN.
41. NIELSEN, K. A. 1991. "Thermal analysis in the research and development of advanced technical ceramics."
42. OTERO, A. V. El Cemento.
43. PORTLANDCEMENTASSOCIATION. 2013. *Cemento Portland, Materiales de Ingeniería Ccivil* [Online]. Available: <http://www.cement.org>.
44. RESTREPO, A. O. G. 2009. CEMENT CLINKER GRINDING: EVALUATION OF MILL SPIN SPEED, RESIDENCE TIME AND GRINDING MEDIA LOAD.
45. ROSSEN, J. 2010. Ternary cement blends based on metakaolin and limestone. Master Thesis-Materials science and engineering.
46. SABIR, B. B. A. J. W. S. B. 2001. "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review." *Cement and Concrete Composites*.
47. SURVEY, U. S. G. *"Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140.*

48. TAYLOR, H. F. W. 1990. Cement Chemistry, London.
49. TIRONI ALEJANDRA, T. M. A., ALBERTO N. SCIAN, EDGARDO F. IRASSAR. 2012. Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. Construction and Building Materials.
50. TORAYA, J. D. L. C. 1993. La Industria Cubana de Materiales de Construcción, La Habana, Cuba.
51. VANDERBOGHT, B. 2001. The cement CO<sub>2</sub> Protocol: CO<sub>2</sub> emissions monitoring and reporting protocol for cement industry.
52. WEERDT, K. D. Comparing Intergrinding and Separate Grinding of Blended Cements
53. [WWW.GRANMA.CUBAWEB.CU](http://WWW.GRANMA.CUBAWEB.CU) abril 6/ 2012. Cemento ecologico, una alternativa viable.

## Anexos

Anexo No 1. Dictamen técnico del aditivo SF 20.

<p>REPUBLICA DE CUBA</p> <p><b>1.7.1 MINISTERIO DE LA CONSTRUCCION</b></p>  <p>CENTRO TECNICO PARA EL DESARROLLO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION</p> <p>Calle 70 y Carretera de Casablanca, La Habana.</p>	<p><b>1.8</b></p> <p><b>1.9 DOCUMENTO DE IDONEIDAD TECNICA</b> PARA PRODUCTOS Y SISTEMAS DE CONSTRUCCION NO TRADICIONALES</p> <p><i>1.9.1.1.1 Aditivo GENIOTEC SF/20</i></p> <p>Producido y comercializado por:</p> <p><b>GENIOTEC</b></p> <p>Carretera a Casablanca y Calle 70, Reparto Vía Túnel, Municipio Regla, Ciudad Habana, Cuba.</p>	<p><b>2 DITEC</b></p> <p><b>59</b></p> <p><i>2.1.1</i> <b>Noviembre 2003</b></p> <p><b>PAGINAS: 6</b></p> <p><i>2.1.1.1.1</i> <b>OTOR GAMIENTO</b></p> <p><i>2.1.2</i> <b>Aditivo superplastificante para hormigón</b></p>
---	---	--

El DITEC indica que el producto o sistema de construcción no tradicional ha tenido una evaluación técnica favorable de la idoneidad para su uso en la construcción en Cuba.

El Titular del DITEC está obligado a que el producto o sistema cumpla siempre con todos los requisitos que se establecen en dicho documento; éste debe ser entregado en su totalidad a sus clientes con la finalidad de que sea conocido antes del uso del producto o sistema.

**La modificación de las características de los productos o el no respetar las condiciones de utilización, así como las observaciones de la Comisión de Expertos, invalida la presente evaluación técnica.**

**El Director del CENTRO TECNICO PARA EL DESARROLLO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION** en virtud de la Resolución Ministerial No. 933 de 1999, donde se faculta al CTDMC para otorgar Documentos de Idoneidad Técnica

para productos y sistemas de construcción no tradicionales y teniendo en cuenta los resultados de la evaluación realizada decide:

**Otorgar el Documento de Idoneidad Técnica No. 59 al Aditivo GENIOTEC SF/20**, producido y comercializado por GENIOTEC, teniendo en cuenta las condiciones siguientes:

#### ***CAMPO DE APLICACION***

El producto **GENIOTEC SF/20** se adiciona al hormigón hidráulico durante su preparación con el objetivo de:

- Lograr mayor laborabilidad del hormigón.
- Reducir el agua de amasado sin modificar la consistencia.
- Obtener los efectos anteriores simultáneamente.

#### ***CONDICIONES DE FABRICACION***

El productor mantendrá el autocontrol que actualmente realiza de las materias primas, el proceso de producción y los productos terminados, según se detalla en el Informe Técnico.

#### ***CONDICIONES DE UTILIZACION***

La presente evaluación técnica es válida siempre que se mantengan las características de identificación del producto y su utilización se realice en las condiciones y campo de aplicación cubiertos por el presente documento y se respeten las observaciones formuladas por la Comisión de Expertos

#### ***VALIDEZ***

La validez de este Documento de Idoneidad Técnica es de 5 años a partir de la fecha de aprobación del mismo, a condición de:

- que el fabricante no modifique ninguna de las características del producto indicadas en el presente Documento de Idoneidad Técnica,
- que el fabricante realice un autocontrol sistemático de la producción, tal y como se indica en el Informe Técnico,
- que se realice un seguimiento por parte de Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción, que constata el cumplimiento de las condiciones anteriores.

Con el resultado favorable del seguimiento, el CTDMC emitirá un Certificado de Conformidad que deberá acompañar al DITEC, para darle validez.

**Dado en la Ciudad de La Habana, a los 18 días del mes de noviembre del 2003,  
"Año de Gloriosos Aniversarios de Martí y el Moncada"**

**Dado en la Ciudad de La Habana, a los 18 días del mes de noviembre del 2003,  
"Año de Gloriosos Aniversarios de Martí y el Moncada"**

\_\_\_\_\_  
**Bueno**\_\_\_\_\_

**Enrique Castellanos Pérez**

Director del CTDMC

*MINISTERIO DE LA CONSTRUCCION*

**Vto.**

**Raquel Rodríguez Gato**

Directora de Normalización

*MINISTERIO DE LA CONSTRUCCIÓN*