



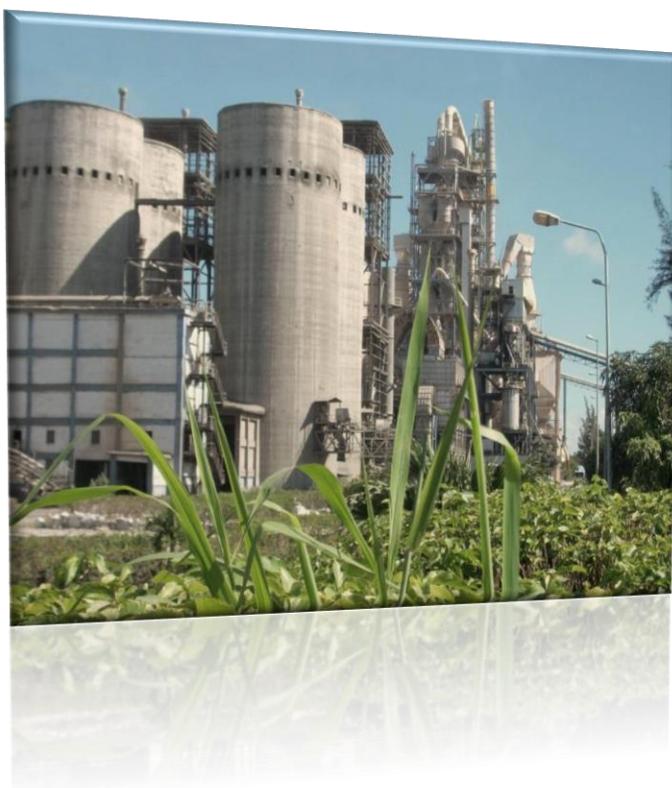
REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS  
“Carlos Rafael Rodríguez”

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

# **TESIS DE DIPLOMA**

**Título:**

**VALORACION ENERGETICA DE LOS CEMENTOS PRODUCIDOS POR LA  
EMPRESA MIXTA CEMENTOS CIENFUEGOS S.A.**



**AUTOR:**

Dayan Miguel Muñoz Carrodegua.

**TUTORES:**

MSc. José Luis Romero Cabrera.

MSc. Claudia Águila Prado

Realizado en Cienfuegos, República de Cuba.  
Curso 2019 - 2020.



Guabairo, Cienfuegos, 24 de abril 2020

A: Comité Académico Facultad de Ingeniería.  
Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael  
Rodríguez”

Estimado:

Hago constar que la Tesis de Grado: “Valoración Energética de los Cementos Producidos por la Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A.”, realizada por el estudiante: Dayan Miguel MUÑOZ CARRODEGUAS, ha sido elaborada en estrecha vinculación con la Gerencia de Optimización y tutorado por el MSc., Ing.: José Luis ROMERO CABRERA. El mismo ha cumplido el objetivo de Valorar los consumos energéticos y ambientales, asociados a la producción de cementos con adición de tobas puzolánicas y la caliza utilizando las herramientas del ciclo de vida, en la empresa Cementos Cienfuegos, S.A.

La determinación de la cantidad de combustible por tonelada de cemento para los tipos de cemento que actualmente se produce en nuestra empresa con adiciones de caliza y tobas puzolánicas, es un objetivo de trabajo de la empresa en este año, por lo que su implementación es una prioridad y se le da un seguimiento al primer nivel, y además representa una valiosa contribución a la demostración ante la autoridad reguladora del CITMA de los esfuerzos de la Dirección General en el cumplimiento nuestra estrategia ambiental y la visión de mantener el liderazgo en la fabricación del cemento y una de las mejores empresas industriales de Cuba,

Para que así conste firma la presente.

Lic.: Carlos LÓPEZ MESA  
Vice Gerente Técnico.



Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A. en cooperación con la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” como parte de la terminación de los estudios en la Especialidad de Ingeniería Química, por lo que solo se autoriza su presentación en eventos, ni publicado sin la aprobación de Cementos Cienfuegos S.A.

---

Firma del AUTOR

Los que abajo firmamos, certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la Dirección de nuestro centro y que el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

---

Información Científico Técnica

Nombre, Apellidos y Firma

---

Computación

Nombre, Apellidos y Firma

---

Firma del TUTOR

*Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.*

*Albert Einstein*



# DEDICATORIA

*A mi mamá por ser la persona más querida e importante en mi vida, por su constante preocupación y apoyo incondicional, por ser la mejor madre de este mundo.*

*A mi papá por estar siempre pendiente a mis estudios, fuiste mi principal tutor en cuanto a ellos, siempre tan atento día a día.*



# AGRADECIMIENTOS

*A mis padres por su dedicación, apoyo, empeño y confianza brindada durante todo el período de mi formación.*

*A mi familia por su apoyo día a día por lograr mi sueño.*

*A mis tutores en especial a José Luis Romero Cabrera que desde un principio me dio la confianza de que este proyecto se iba a realizar exitosamente, gracias y mil gracias por tu trabajo constante en dicho proyecto por el cual le estaré agradecido toda la vida.*

*A mis compañeros de aula que fueron un factor primordial por su amistad, apoyo y momentos especiales a sus lados que me hacen muy orgulloso de haber sido parte de ese colectivo.*

*A mis profesores por sus conocimientos aportados que sin duda son los principales artífices de mi formación como ingeniero.*

*A la memoria del Ing. Mario Moreira Quiñones quien fue el iniciador de esta investigación y quien no tuvo tiempo de concluir.*



# RESUMEN

La producción de clinker es el proceso que mayor impacto tiene en el consumo de energéticos, materias primas y es el de mayor influencia sobre la totalidad de las categorías de impacto ambiental de la industria del cemento, asociadas a la emisión de  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$  en el proceso de combustión para el secado de las materias primas y la clinkerización. En la producción de 1 t de clinker se consumen 87,55 l fuel-oíl (102,30 kg de petcoke) y se emiten 981 kg  $\text{CO}_2$  y 3 kg  $\text{SO}_2$ . Al sustituir 1 t de clinker por 1 t de caliza se ahorran 85,3 l fuel-oíl, y 83.1 l fuel-oíl si se adiciona toba puzolánica. Por concepto de emisión de gases de efecto invernadero por cada t de clinker sustituida por caliza se dejan de emitir 904,68 t  $\text{CO}_2$  (92,2 %) y 0,13 t  $\text{SO}_2$ , para la toba puzolánicas 911,06 t  $\text{CO}_2$  (93 %) y 0,07 t  $\text{SO}_2$ . Estos resultados se obtienen si modificar los requerimientos normativos de las propiedades físico-químicas del cemento. En el presente trabajo se exponen los resultados para cada tipo de cemento y clinker a partir del modelo de ciclo de vida del producto.

**Palabras claves:** caliza, toba puzolánica, fuel-oíl, consumo energético.



# ABSTRACT

Clinker production is the process that has the greatest impact on the consumption of energy, raw materials and is the one with the greatest influence on all the categories of environmental impact of the cement industry, associated with the emission of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> in the combustion process for drying raw materials and clinkerizing. In the production of 1 t of clinker, 87,55 l of fuel-oil (102,30 kg of petcoke) are consumed and 981 kg CO<sub>2</sub> and 3 kg SO<sub>2</sub> are emitted. By replacing 1 t of clinker with 1t of limestone, 85,3 l fuel oil is saved, and 83,1 l fuel-oil if pozzolanic tuff is added. Due to the emission of greenhouse gases for each t of clinker replaced by limestone, 904,68 t CO<sub>2</sub> (92,2 %) and 0,13 t SO<sub>2</sub> are no longer emitted, for pozzolanic 911,06 t CO<sub>2</sub> (93 %) and 0,07 t SO<sub>2</sub>. These results are obtained without modifying the regulatory requirements of the physico-chemical properties of the cement. In this work, the results for each type of cement and clinker are presented based on the product life cycle model.

**Keywords:** limestone, pozzolanic toba, fuel oil, energy consumption

## **Contenido:**

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. MARCO TEORICO. ....	6
1.1 El cemento como aglutinante en la construcción. ....	6
1.2 Tipos de cemento producidos en el mundo. ....	8
1.3 Composición del cemento Portland.....	8
1.4 Producción y consumo de cemento a nivel mundial. ....	10
1.5 Consumo y producción de cemento en Cuba. ....	13
1.6 Consumo energético en la producción de cemento. ....	14
1.6.1 Consumo energéticos principales de los procesos de producción de cemento. ...	14
1.6.2 Fuentes y costos de energía.....	17
1.7 Impactos ambientales en la producción de cemento. ....	19
1.8 Oportunidades de reducción del consumo de energía eléctrica y térmica.....	20
1.8.1 Sustitución de motores estándar por motores de alta eficiencia.....	21
1.8.2 Molienda de materias primas y clinker. ....	21
1.8.3 Actualización de los hornos rotatorios. ....	21
1.8.4 Uso de combustibles alternativos.....	22
1.8.5 Uso de materias primas alternativas.....	22
1.8.6 Producción de Cementos con adiciones. ....	22
1.9 Ciclo de vida del cemento. ....	25
CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y METODOLOGÍA A EMPLEAR PARA EL ESTUDIO. ....	26
2.1 Caracterización de la empresa Cementos Cienfuegos S.A.....	26
2.1.1 Misión, visión y política de la empresa.....	27
2.2 Descripción del proceso productivo. ....	28
2.3 Efecto de la adición de puzolanas al Cemento Portland (CP).....	32
2.4 Producción de cemento por calidades. ....	34
2.5 Principales indicadores de la planta.....	36
2.6 Justificación de la Investigación.....	39
2.7 Metodología a emplear para la evaluación energética de los cementos. ....	41

CAPITULO III DETERMINACIÓN DE LOS CONSUMOS ENERGÉTICOS EQUIVALENTES Y AMBIENTALES POR TIPOS DE CEMENTOS. ....	45
3.1 Producción de cemento y consumos energéticos. ....	45
3.2 Producción de cemento por calidades, adiciones y volúmenes de clinker sustituido anualmente como promedio. ....	48
3.2.1 Adiciones medias de zeolita y caliza por tipo de cemento.....	49
3.3 Determinación de los índices de consumos de combustibles por tonelada de material del transporte de aditivo del cemento. ....	50
3.4 Disponibilidad de estos aditivos para garantizar la sostenibilidad de la producción de cementos. ....	51
3.5 Índices de consumo calórico y eléctrico para el secado de la caliza y la zeolita en el área de materias primas. ....	52
3.6 Índices de consumo calórico y eléctrico por tonelada de clinker en el horno. ....	53
3.7 Índices de consumo eléctrico en la molienda de cemento para diferentes adiciones. ....	53
3.8 Determinación de los índices de consumo de agua en la producción de cemento y clinker, así como el consumo de electricidad. ....	54
3.9 Adiciones medias de caliza y zeolita en los diferentes tipos de cemento.....	56
3.10 Determinación del valor calórico promedio del petcoke y cantidad de fuel-oil equivalente al petcoke. ....	57
3.11 Evaluación energética de la producción de cemento. ....	57
3.12 Representación de los consumos energéticos en gráficos de ciclo de vida. ....	60
3.12.1 Impactos ambientales asociada a la reducción de los consumos de portadores energéticos en la producción de cementos con adición de caliza y toba.....	62
3.13 Evaluación energética y económica de la propuesta de variación de la estructura de producción de cemento en la empresa. ....	63
CONCLUSIONES.....	67
RECOMENDACIONES. ....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS.....	74





# INTRODUCCION

## **INTRODUCCIÓN.**

La producción de cemento es un proceso de alta carga calórica, representando una industria intensiva en energía, con un consumo específico alrededor de 4,0 GJ/t de cemento producido, durante los últimos años se ha intentado reducir la demanda de energía utilizando equipos más eficientes y sustituyendo combustibles y materias primas para abaratar los costes de producción, además de introducir un significativo impacto ambiental ya que por cada tonelada de clinker producido se emite a la atmósfera una cantidad equivalente al doble de gases (Conesa, Rey, Egea, & Rey, 2011).

En energía primaria en este tipo de industria, el 25 % de la energía de entrada es electricidad y el 75 % es energía térmica. Los costos de energía representan aproximadamente el 26 % de los costos de fabricación del cemento. La mayor parte del consumo energético para la fabricación de cemento se concentra en el precalcinado y en la clinkerización de las materias primas en el horno, operación que consume cerca del 90 % de la energía total consumida en la planta (Kawai & Osako, 2015).

La energía eléctrica se consume en su mayor parte en las operaciones de molienda, tanto de materias primas como de cemento, que representan aproximadamente el 75 % de la energía eléctrica total consumida. La impulsión de gases y la manipulación y transporte de materiales suman prácticamente el 25 % restante (Osorio, Marín, & Restrepo, 2017).

Los costos energéticos —combustibles y electricidad— están en alrededor al 30 % de los costos de operación, en los dos componentes térmico y eléctrico. El proceso de cocción de las materias primas requiere de un aporte energético teórico (reacciones químicas endotérmicas) de 1 700 MJ/t a 1 800 MJ/t de clinker (Osorio et al., 2017).

En los procesos de molienda el tipo de equipamiento y de la dureza de los materiales a moler son relevantes en el consumo de energía eléctrica, con consumos específicos de energía eléctrica en el mundo entre 80 kWh/t a 140 kWh/t de cemento. Como valor medio en el Grupo Cementero Lafarge Holcim los valores de consumo específico de energía térmica oscilan entre 97 kWh/t y 100 kWh/t de cemento equivalente (FICEM, 2019).

En las plantas de cemento en el mundo el consumo específico de energía térmica es de aproximadamente 700 kcal/kg de clinker, con un potencial significativo de ahorro de energía térmica, por reducción de pérdidas aprovechando los gases de combustión del horno. Como valor medio en el consumo específico de energía térmica para el Grupo Cementero Lafarge Holcim es aproximadamente 745 kcal/kg de clinker (3 140 MJ/tonelada de clinker) (FICEM, 2019).

La producción de cemento se encuentra entre las mayores fuentes de emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), aproximadamente el 5 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Worrell, 2008) y este es un porcentaje que en años sucesivos no solo se mantendrá sino que se incrementará conforme se activen las economías emergentes asiáticas. Tengamos en cuenta que el cemento es el elemento fundamental del hormigón, y este es junto con el acero y el aluminio los productos más consumido mundialmente en la construcción. Para cuantificar de una manera sencilla la aportación de cemento a la producción de CO<sub>2</sub> basta con echar un vistazo a los siguientes ratios: cada tonelada de cemento producida por el sistema convencional produce una tonelada de CO<sub>2</sub> (IFC, 2018a).

La producción de clinker (producto intermedio obtenido en el proceso de fabricación del cemento) es la responsable del total de las emisiones directas de CO<sub>2</sub> en esta industria. Aproximadamente el 60 % de estas emisiones se deben a las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno, y el 40 % restante son debidas a la combustión. El resto de las emisiones de dicho GEI (6 %-10 %) proviene del consumo energético (tanto térmico como eléctrico) de las diferentes fases del proceso, que comprende desde la extracción de la materia prima hasta la expedición de los productos fabricados.

Una de las medidas viables para reducir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la producción de cementos que tengan menor impacto medioambiental, bien a través de mejoras en la producción de los existentes (con la sustitución parcial de clinker o mejorando las propiedades de los cementos mezclados) o desarrollando nuevos productos con menor proporción de clinker y de material calcáreo, y que requieran menos tiempo de procesamiento. Si en vez de cemento convencional, producimos cementos especiales podemos llegar a reducir la cifra de emisiones de CO<sub>2</sub> a 0,4 toneladas por tonelada producida.

Se ha reconocido que la sustitución de porciones de clinker con materiales cementicios suplementarios es una de las formas más efectivas de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuir los gastos energéticos asociados a la producción del cemento sin afectar propiedades como la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón .

La búsqueda de alternativas para el ahorro de energía en la Industria del Cemento, ha producido el desarrollo de diferentes tipos de cementos con adiciones, llegando a extenderse en los años setenta la lista de materiales utilizados en tal concepto, entre los que se encuentran: caliza, arena, puzolana natural y artificial y escorias. Con el fin de reducir el consumo de energía se emplea la caliza, como material de adición a los cementos portland tipo. Estas adiciones se vienen considerando no solo para los cementos “puros”, sino también para los cementos con adiciones de escorias y puzolanas.

En la actualidad Cementos Cienfuegos S.A. implementa diferentes medidas para reducir sus emisiones de gases, utilización de los recursos naturales y obtener un aumento en la calidad del producto entre la que se destaca, el potenciar el uso de cementos con adiciones o cementos mixtos, que incluyen el uso de tobas puzolánicas y caliza, que no requiere ser procesada en los hornos de clinker. Esta medida no solo repercute en el cuidado del medio ambiente, sino que también se presentarán beneficios económicos, sociales y productivos; aumentando la competitividad de la empresa.

Dentro de esta problemática se enmarca este trabajo que tiene como ***Problema de Investigación:*** ¿Cómo determinar los consumos de portadores energéticos y ambientales en la producción de cementos con adición de tobas puzolánicas y caliza en Cementos Cienfuegos S.A.?

Como ***Hipótesis*** se plantea que si se adiciona tobas puzolánicas y caliza disminuye el consumo de portadores energéticos y los impactos ambientales en la producción de cemento.

Como ***Objetivo General*** se Propone: valorar los consumos energéticos y ambientales, asociados a la producción de cementos con adición de tobas puzolánicas y la caliza utilizando la herramienta del ciclo de vida,

### ***Objetivos específicos:***

1. Realizar el estudio documental y bibliográfico crítico de la producción de cemento con adiciones en relación a los consumos de portadores energéticos y el comportamiento de los impactos ambientales.
2. Determinar los consumos energéticos para cada fase del proceso de producción de cemento.
3. Calcular las reducciones de portadores energéticos y ambientales para cada tipo de cemento producido.
4. Elaborar los gráficos de ciclo de vida para consumo y ahorros de portadores energéticos y ambientales para cada tipo de cemento con adiciones.

### ***Valor práctico de la investigación.***

Los resultados de la investigación constituyen una herramienta para determinar en primer lugar los consumos de portadores energéticos totales por toneladas y por tipos de cemento; así como, sus posibles reducciones en combustible equivalente, derivados de la introducción de las tobas puzolánicas y calizas como aditivos al cemento; así como las disminuciones de emisiones de gases de combustión y descarbonatación asociadas a la disminución del contenido de clinker. Estos resultados facilitarán la toma de decisiones para el desarrollo de la comercialización y consumo de estos cementos en el país.

### ***Viabilidad.***

Cementos Cienfuegos S.A cuenta con la información, las herramientas necesarias, así como el personal calificado para asesorar, la investigación.

### ***Fiabilidad.***

Cementos Cienfuegos S.A., cuenta con un sistema de calidad, medio ambiente y gestión energética certificado que garantiza la calidad de los resultados.

### ***Tipo de investigación.***

Descriptiva porque a partir del análisis del comportamiento de los consumos de portadores energéticos y las emisiones de contaminantes utilizando datos y modelos estadísticos se

determina los ahorros de combustibles y emisiones por cada tipo de cemento con adición, que permitan verificar el grado de cumplimiento de la normativa de calidad del producto y el cumplimiento de la política nacional de ahorro y la preservación del medio ambiente.

***Estructura del trabajo.***

El trabajo se estructura en tres grandes capítulos un ***Capítulo I*** con título Generalidades teóricas y estudios documentales que parte del estudio bibliográfico de las temáticas y técnicas afines con la investigación.

Un ***Capítulo II***: Caracterización y diagnóstico del objeto de estudio, valoración de la situación actual en relación a los consumos de portadores energéticos y emisiones asociadas a la producción de materias primas, productos intermedios y cementos.

El ***Capítulo III***: Se realiza la determinación de los consumos energéticos equivalentes y ambientales por tipos de cementos y la elaboración de los gráficos de ciclo de vida de consumo y emisiones correspondientes.



# CAPITULO I

## **CAPITULO I. MARCO TEORICO.**

### **1.1 El cemento como aglutinante en la construcción.**

El cemento, un material de construcción omnipresente en casi todos los proyectos de construcción, de urbanismo y arquitectónicos es un conglomerante hidráulico al cual, mediante la adicción de productos pétreos (sobre todo grava y arena) y agua produce una mezcla maleable, uniforme y plástica. Es uno de los materiales más utilizados en las obras. Después de su fragua y endurecimiento adquiere una resistencia y una textura similar a la piedra. Tras su fraguado y la adquisición de fisonomía pétreo el resultado se denomina hormigón. El uso más habitual de este conglomerado es la construcción y la ingeniería civil y hay auténticos expertos en los estudios de arquitectura sobre este material. La función que realiza el hormigón es la de servir de aglutinante.

El uso del cemento se remonta a muchos siglos atrás. Ya en la antigüedad existían morteros y pastas que estaban formados por conglomerado; en aquellos tiempos se mezclaba la arcilla, el yeso y la cal. También encontramos, en la Grecia Clásica, el uso de tobas volcánicas provenientes de la isla de Santorini que seguramente fueron los primeros cementos naturales que existieron dentro de la arquitectura y la construcción.

Con la llegada de la edad moderna, el británico John Smeaton, en el siglo XVIII, diseñó y construyó los cimientos de un faro en un acantilado utilizando un mortero de cal calcinada. Llegados al siglo XIX Joseph Aspdin y James Parker construyeron, en el año 1824 una categoría de cemento que todavía se utiliza en estos momentos: el cemento Portland. Este conglomerado recibió el nombre de la ciudad norteamericana por su aspecto gris y rugoso.

El siglo XX es la consolidación del cemento como material de construcción. Este desarrollo se produce gracias a diversos químicos que mejoran las prestaciones de los cementos; entre los químicos que lograron mejorar las prestaciones del cemento podemos citar a Vicat, Le Chatelier, o Michaélis.

En la actualidad encontramos en el mercado dos tipos diferentes de cemento, por un lado aquel que es de origen arcilloso y otro que es de origen puzolánico; este último tipo de cemento es de tipo orgánico o volcánico, mientras que el de origen arcilloso suele estar

formado por mezcla de arcilla y caliza en una proporción de 1:4. El cemento puzolánico está más indicado, por ser un material “noble”, para remodelaciones de edificios históricos (IFC, 2018b).

Los tipos de cementos, dentro de esas dos grandes categorías son variados, dependiendo el uso de un tipo específico a cual sea la misión de ese cemento. Cada uno de los diferentes tipos de cemento depende de la resistencia y durabilidad. Si analizamos los cementos desde un punto de vista químico nos encontramos en que los mismos se forman por una mezcla de silicatos de aluminatos de calcio. La mezcla se muele para obtener un grano muy fino.

Joseph Aspdin y James Parker patentaron el 21 de octubre de 1824 el primer Cemento Portland, obtenido a partir de caliza arcillosa y carbón; calcinados a alta temperatura. La denominación Portland responde a su color grisáceo, muy similar a la piedra de la isla de Portland del canal inglés. Más adelante, Isaac Johnson mejoró este proceso de producción aumentando la temperatura de calcinación, obteniendo en 1845 el prototipo del cemento moderno elaborado con base en una mezcla de caliza y arcilla calcinada a altas temperaturas, hasta la formación del clinker. Esta es la razón por la que hoy se conoce a Johnson como el padre moderno del cemento Portland.

Cuando el grano se mezcla con el agua se convierte, a medida que va fraguando, en un compuesto sólido. Cuando se ha solidificado completamente lo que se logra es un material con textura pétreo que tiene una gran resistencia estructural, por lo cual diversos tipos de cemento se utilizan para la construcción de edificios. El cemento portland ha adquirido carta de naturaleza y es uno de los elementos indispensables en cualquier paisaje urbano. Este tipo de cemento es el que más se utiliza para la construcción de hormigón. Para lograr este tipo de cemento es necesario que todos sus componentes se pulvericen al mismo tiempo que el clinker mientras se va añadiendo una o varias formas de sulfato de calcio. También es posible la pulverización de otros compuestos en cuanto no afecten a las cualidades esenciales del cemento.

Cuando al cemento portland se le añade agua se forma una pasta sólida que se va endureciendo progresivamente. El logro de su resistencia característica se logra en varias semanas. Este cemento Portland, mediante la adicción de otros componentes es posible transformarlo en cemento plástico que tiene como característica esencial que fragua de una manera mucho más rápida, además que permite un mejor moldeado.

## 1.2 Tipos de cemento producidos en el mundo.

En la actualidad los cementos se agrupan en dos tipos: los cementos orgánicos basados en polímeros y los cementos inorgánicos son aquellos productos naturales o artificiales, que tienen como constituyentes principales compuestos de calcio, que tienen la propiedad de que al mezclarlos con determinados productos líquidos, fundamentalmente agua, forman masas plásticas que a medida que pasa el tiempo van aumentando su resistencia a la compresión y volviéndose rígidas, es decir endurecen y cohesionan. Los cementos inorgánicos del tipo anterior pueden clasificarse en dos grandes grupos: HIDRÁULICOS y NO HIDRÁULICOS. Los cementos hidráulicos son aquellos en que la masa plástica aumenta su resistencia tanto al aire como bajo el agua, es decir pueden ser usados como cementos bajo el agua. No solo endurecen por reacción con el agua, sino que se forman compuestos que resisten a su acción. Sin embargo, los no hidráulicos no pueden ser usados bajo el agua (Sus productos de hidratación no son resistentes al agua) y solo endurecen al aire, así las cales no hidráulicas (cales aéreas o duras) endurecen al aire por combinación del  $\text{CO}_2$ , formando otra vez carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), pero bajo el agua solo forman una pasta de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) que no endurece.

Dentro de los cementos inorgánicos hidráulicos el más importante es el cemento portland y su predominancia en la industria de la construcción y en las grandes obras de ingeniería civil es tal que cuando se habla simplemente de cemento se sobreentiende que es del cemento portland. El cemento Portland debido a su importancia será el tratado en este trabajo.

## 1.3 Composición del cemento Portland.

El cemento Portland actual se obtiene al calcinar mezclas de calizas y margas; preparadas artificialmente a una temperatura de aproximadamente  $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ . El producto resultante que es el denominado clinker, se muele añadiendo una cantidad adecuada de regulador de fraguado; que suele ser piedra de yeso natural.

Se presenta en la literatura especializada que la composición química media aproximada de un cemento Portland está formada por un porcentaje oscilante entre 61 % y 67 % de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), entre 19 % y 23 % de óxido de silíceo ( $\text{SiO}_2$ ), entre 2,5 % y 6 % de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), entre 0 % y 6 % de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), y entre 1,5 % y 4,5 % de otros compuestos

químicos minoritarios. Los cuatro primeros componentes (el primero básico y los otros tres ácidos) son los principales; sin embargo, no se encuentran libres, sino combinados formando los silicatos, aluminatos y ferritoaluminatos .

Pueden referirse también otros tipos de cementos, tales son los casos de los cementos Portland con adiciones activas, los cementos especiales, los siderúrgicos, los puzolánicos y los aluminosos. Los cementos Portland con adiciones activas son aquellos que además de los componentes principales del clinker y de la piedra de yeso, contienen también algunas adiciones minerales, tales como la escoria siderúrgica, humo de sílice, puzolana natural, ceniza volante, entre otras.

Los cementos especiales (de alta resistencia inicial, resistentes a los sulfatos, de bajo calor de hidratación, cementos blancos) suelen ser cementos Portland especiales, solo que en estos se limitan o fortalecen alguno de los cuatro componentes básicos del clinker. En el caso del cemento siderúrgico, se refiere a que se obtiene por molturación conjunta de clinker de Portland con un regulador de fraguado, (yeso natural en proporciones oscilantes entre 5 % y 7 %); en proporción de entre 15 % y 65 %, con ceniza de carbón proveniente de las centrales termoeléctricas, o con escoria de fundiciones, en proporción oscilante entre 35 % y 85 %. Los cementos siderúrgicos forman parte de la familia de los llamados cementos fríos. En estos casos, la escoria se obtiene enfriando bruscamente en agua la espuma fundida, procedente de procesos siderúrgicos. En este enfriamiento la escoria se vitrifica y se vuelve activa hidráulicamente por su contenido en cal combinada, fraguando por sí misma y endureciendo lentamente; por lo que para acelerar el endurecimiento, se añade el clinker de Portland.

Los cementos puzolánicos resultan de una mezcla de clinker de Portland, y el mismo regulador de fraguado referido anteriormente, en proporción oscilante entre 45 % y 85 %, con puzolana en proporción que varía entre 15 % y 55 %. La puzolana natural tiene origen volcánico, y contiene sílice y alúmina que al combinarse químicamente con la cal en presencia de agua, da como resultado el denominado cemento puzolánico (el mismo que en su tiempo obtenían los antiguos romanos). Por su parte, la puzolana artificial tiene propiedades análogas y se encuentra en las cenizas volantes, la tierra de diatomeas o las arcillas activas.

Por último, los cementos aluminosos se obtienen por fusión de caliza y bauxita, y su constituyente principal es el aluminato monocálcico. En el crudo de un cemento aluminoso, si

bien está presente la calcita, las arcillas desaparecen a favor de las bauxitas; lo que aporta al compuesto un alto contenido de  $(Al_2O_3)$ . Son cementos a los que no se le añade yeso en su proceso de fabricación y por tanto no contiene sulfatos. Poseen un endurecimiento muy rápido que les permite adquirir la resistencia necesaria en pocas horas; razón que justifica su mayor empleo en la fabricación de elementos prefabricados de concreto.

Un punto importante en el proceso de producción de cemento es la necesidad de someter las materias primas a un proceso de pre triturado y posterior calentamiento a una temperatura de entre  $1\ 400\ ^\circ C$  y  $1\ 500\ ^\circ C$ , y para ello, se emplea, por un lado energía eléctrica, del orden de  $100\ kWh/t$  producida y por otro entre  $80\ kg$  y  $110\ kg$  de combustible. La energía eléctrica (por parte de energías renovables) cada vez es más cara de producir, y el gran volumen de producción de energía eléctrica se realiza mediante centrales térmicas. Otro elemento importante en la fabricación del cemento tradicional es que se parte de la piedra caliza ( $CaCO_3$ ); pero lo que realmente se necesita es el  $CaO$ , por lo que en el proceso de fabricación debemos eliminar ese carbono emitiendo en consecuencia una gran cantidad de  $CO_2$  (Suárez, 2015).

En la etapa de sinterización (tratamiento térmico a temperatura menor que el punto de fusión) durante la fabricación del clinker, se producen los componentes principales o potenciales que constituyen el 95 % de dicho material, los cuales se conocen como mineral, debido a las impurezas de las materias primas. Al silicato tricálcico se le conoce como Alita ( $C_3S$ ), al silicato dicálcico se le denomina Belita ( $C_2S$ ), el ferritoaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) es la ferrita y celita al aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). El motivo de añadir yeso al cemento es para retardar (controlar) el fraguado, ya que si solo se muele el clinker, al mezclarlo con el agua fraguaría casi inmediatamente, y no permitiría ni su manipulación ni su instalación. La retardación de la hidratación inicial del cemento depende de la presencia de los iones  $SO_4$  (Suárez, 2015).

#### **1.4 Producción y consumo de cemento a nivel mundial.**

La producción ha aumentado en más de treinta veces desde 1950 y casi cuatro veces desde 1990. China usó más cemento entre 2011 y 2013 que Estados Unidos en todo el siglo XX. Ahora que el consumo chino parece estabilizarse, se espera que la mayor parte del crecimiento futuro de la construcción se produzca en los mercados emergentes del sudeste asiático y el África subsahariana, impulsados por la rápida urbanización y el desarrollo económico.

Las previsiones indican que las áreas edificadas del mundo se duplicarán en los próximos 40 años, lo que requiere que la producción de cemento aumente un 25 % de cara al 2030. Pero, a pesar de su presencia generalizada, las credenciales ambientales del concreto han sido objeto de un mayor análisis en las últimas dos décadas.

El consumo mundial de cemento alcanzó las 4 129 Mt en el 2016, logrando un avance de 1,8 % con respecto al año 2015 y, en el 2015, se contrajo en 2,4 % con respecto al 2014. China continuó liderando la demanda de cemento con 2 395 Mt en el 2016, alcanzando el 58 % de la participación mundial. Dicha participación alcanzó su punto máximo en el año 2014 con 59,4 %. Excluyendo a China, el consumo mundial de cemento alcanzó las 1 734 Mt en el 2016, creciendo un 1,0 % con respecto al 2015 ("THE GLOBAL CEMENT REPORT," 2017).

En la Fig. 1.1 se muestra que la producción y el consumo de cemento ha experimentado un sensible aumento desde el 2006 hasta el 2014 a partir del cual, comenzó un proceso de estabilización tanto de la producción como del consumo, al parecer motivado por la crisis financiare internacional, no obstante los valores actuales demuestra que el cemento sigue siendo un material ampliamente utilizado. En el Fig. 1.2 se muestra que el norte de Asia es la región de mayor producción de cemento en el mundo principalmente por el aporte de China que se comporta como mayor productor y consumidor de cemento debido a su acelerado desarrollo económico que ha venido mostrando y que la ha llevado a ocupar el segundo lugar en la economía mundial (FICEM, 2019).



Fig. 1.1. Consumo y Producción de cemento, y PIB del mundo (2006-2018).  
 Fuente: Internacional Cement Review, Banco Mundial y FMI. Elaboración: ASOCCEM.

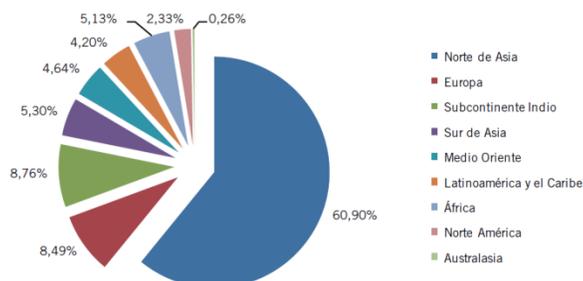


Fig. 1.2 Participación por regiones en la producción de cemento. Fuente: International Cement Review.

El consumo per-cápita alcanzó los 557 kg en el 2016, logrando un avance de 0,7 % con respecto al 2015. Sin embargo, aún se encuentra por debajo de los niveles alcanzados en el 2014 (574 kg) y en el 2013 (565 kg). Excluyendo a China, el consumo per-cápita alcanzó los 287 kg en el 2016. En el 2015, Qatar alcanzó el consumo per-cápita más alto (2 952 kg), China es el tercer con 1 705 kg y Burundi, en África, alcanzó el consumo per-cápita más bajo (19 kg) (FICEM, 2019).

La producción de cemento mundial alcanzó el 4 174 Mt en el 2016, obteniendo un crecimiento de 2,3 % con respecto al 2015. China mantiene el liderazgo con el 57,6 % de la producción mundial, seguida de India con el 6,9 % (FICEM, 2019).

La capacidad de producción de cemento se ubicó en 6 141 Mt en el 2016, alcanzando un avance de 7,8 % con respecto al 2014. El ratio de utilización alcanzó el 68 % en el 2016, mientras que el 2014 llegó a 73,6 %. El grado de asociación entre el consumo de cemento mundial y el PBI mundial se ubica en 95,8 %. Excluyendo a China, se ubica en 79,5 %. En el 2016, 106 países exportaron cemento y clinker con un valor estimado de 198 Mt. El mercado de la exportación es liderado por China con 17,56 Mt en el 2016, seguido por Vietnam (17,5 Mt) e Irán con (15 Mt).

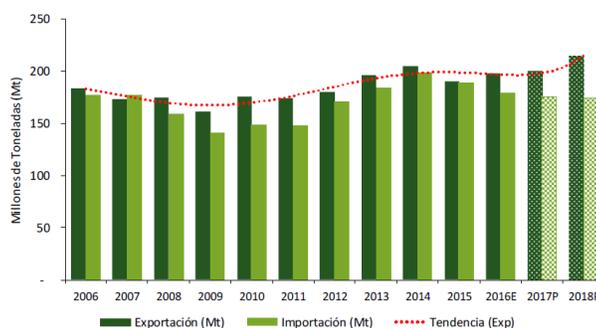


Fig. 1.3: Comercio de Cemento y Clinker del Mundo (2006-2018P). Fuente: Internacional Cement Review, Banco Mundial y FMI. Elaboración: ASOCEM.

### 1.5 Consumo y producción de cemento en Cuba.

En nuestro país la producción y consumo de cemento se ha visto afectada en los últimos años, como consecuencia de la situación económica del país, que ha impactado en la disponibilidad técnica de las plantas productoras que ha obligado al cierre de líneas de producción de las 5 plantas existentes. En la actualidad, solo tres plantas producen clinker, de ellas la ubicada en el Mariel y en Cienfuegos producen el 98 %, el resto solo producen cemento a partir del clinker de estas dos plantas (GECEM, 2015).

El consumo de energéticos es otra de las causas de los bajos niveles de desarrollo de la industria, que se ha visto afectada por el bloqueo económico y financiero que dura más de cinco décadas y que ha impactado negativamente en la disponibilidad de las plantas ubicadas en el país.

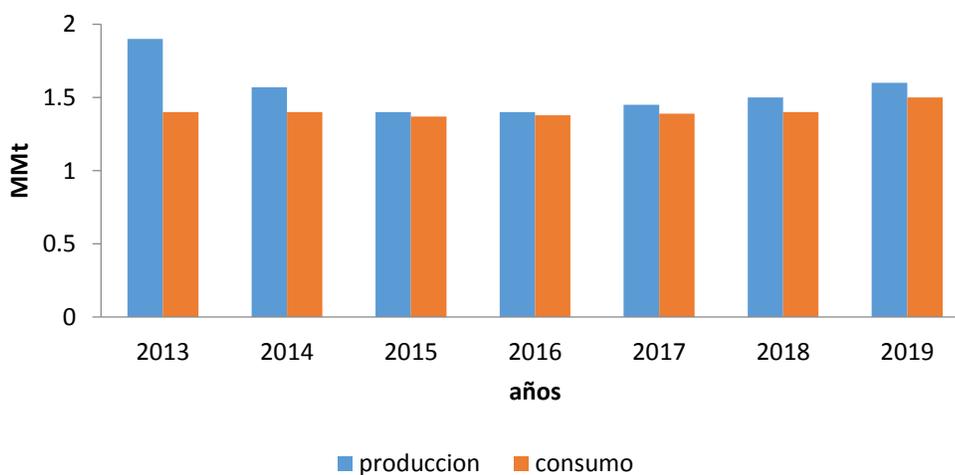


Fig. 1.4 Producción y consumo de cemento en Cuba. Fuente: GECEM 2020.

En el Fig. 1.4 se muestra el consumo y producción de cemento, observándose que a partir del año 2013 la producción y consumo de cemento no muestran ningún crecimiento.

## **1.6 Consumo energético en la producción de cemento.**

La industria cementera procesa como materia prima para obtener el cemento piedra caliza, arcilla y hierro, las que se mezclan, se chancan, trituran y muelen. Se homogeniza la mezcla molida y se la lleva a un proceso de pre calcinación en un intercambiador de calor en contracorriente se calcinan. La mezcla pre calcinada ingresa a un horno rotativo, en el que se desarrollan reacciones físicoquímicas, calcinándose la mezcla hasta el punto fundente, dando origen al clinker. El clinker se somete a un proceso de enfriamiento rápido y luego se muele agregando una pequeña proporción de yeso (sulfato de calcio), con la molienda se obtiene el cemento como un producto finamente pulverizado. Luego vienen los procesos de almacenado, envasado, paletizado y despacho.

Estos procesos tienen asociados elevados consumos específicos de energía (cantidad de energía que se consume para producir una unidad de producto terminado) y costos específicos de energía asociados a este consumo (costo de la energía consumida para producir una unidad de producto terminado). La comparación (benchmarking) de estos indicadores con otras empresas, permite determinar cuan competitiva es la empresa cementera en el mercado global

### **1.6.1 Consumo energéticos principales de los procesos de producción de cemento.**

Extracción de materias primas: incluye todas las operaciones de canteras desde la voladura de los frentes hasta la carga y transporte de las materias primas, el consumo fundamental de portadores energéticos es el combustible para el transporte, en este caso se trata de utilizar equipos de alta eficiencia con el objetivo de disminuir el consumo de diésel.

Trituración y secado de las materias primas: las materias primas procedentes de las canteras son trituradas y secadas para disminuir su granulometría y garantizar su posterior almacenamiento y dosificación, en este caso los consumos fundamentales son la energía eléctrica para la operación de los equipos y el combustible para el secado.

Dosificación de materias primas: en este proceso se realiza previo a la molienda de crudo para garantizar las proporciones de caliza, marga, perdigón y tobas necesarias para la fabricación de la harina. En este proceso la energía eléctrica constituye el consumo fundamental de energéticos.

Molienda del crudo: la materia prima que ha sido dosificada ingresa a los molinos en los que es reducida a polvos finos mediante el proceso de trituración y molturación. En este proceso la energía eléctrica constituye el consumo fundamental de energéticos.

Homogenización: es el proceso en el que las materias primas utilizadas para la fabricación del clinker deben cumplir unas especificaciones definidas, antes de proceder a su cocción para lo cual es necesario realizar ajustes. La etapa de homogenización permite la mezcla proporcionada y el contacto íntimo de los componentes del crudo. En este proceso la energía eléctrica constituye el consumo fundamental de energéticos

Pre calcinación: la mezcla de materia prima es sometida a altas temperaturas para ser precalcinada con el objeto de disminuir la variabilidad de la composición química del material, obtener una mayor uniformidad en la mezcla y mejorar el uso de las materias primas no homogéneas. En este proceso el combustible y electricidad constituye el consumo fundamental de energéticos.

Clinkerización: la materia prima en polvo pre calcinada se introduce en un horno rotatorio en el que alcanza una temperatura de aproximadamente 1 450 °C, obteniéndose el clinker, cuyos componentes confieren al cemento la actividad hidráulica. El clinker, a la salida del horno, se somete a un proceso de enfriamiento con el fin de que no se reviertan las reacciones que acaban de producirse. La electricidad es el principal consumo energético.

Molienda del cemento: el clinker obtenido, independientemente del proceso utilizado en la etapa de homogenización, es molido (trituración y molturación) con pequeñas cantidades de yeso para finalmente obtener cemento. La electricidad es el principal consumo energético en este proceso. Almacenamiento del cemento: Se almacena en silos por calidades para ser despachado a granel o para ser envasado en bolsas de papel duro kraft con capacidad de 42,5 kg. La electricidad es el principal consumo energético en este proceso. En la Fig. 1.5 se muestran consumos energéticos por etapas en la producción de cemento.

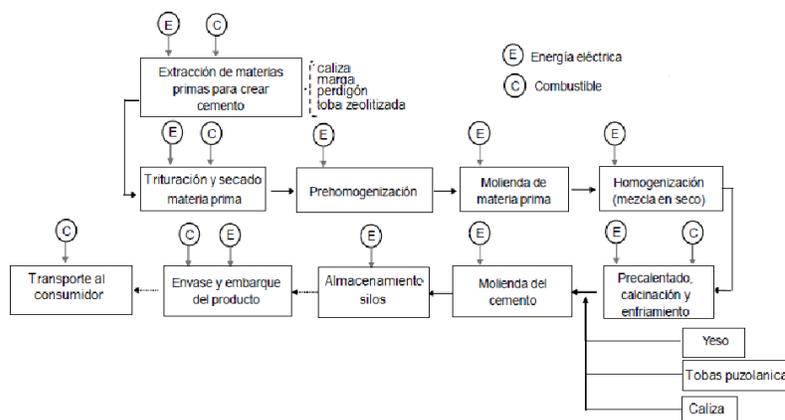


Fig. 1.5 Consumos energéticos por etapas en la producción de cemento.  
Fuente: FICEM 2018.

Entre 2007 y 2010 el consumo de energía térmica por tonelada de clinker en América Latina se mantuvo prácticamente constante, alrededor de 3 700 MJ/t clinker. Para 2011 este consumo disminuyó un 2,2 %, es decir, se ubicó en 3 623 MJ/t clinker. En 2011, el consumo de energía térmica en Latinoamérica para producir una tonelada de clinker superó ligeramente al promedio mundial en 1,7 %. Esta pequeña variación fue debido a las diferencias de tecnologías, un mayor uso de hornos secos con precalentador y sin precalciner, que son menos eficientes que aquellos que presentan precalciner adicional. Los datos claramente demuestran que Latinoamérica ha entrado en el proceso de eficiencia energética tal como lo han hecho los países industrializados (Osorio et al., 2017).

Desde 2006 hasta 2010 el consumo de energía eléctrica de la industria del cemento latinoamericana fue ligeramente superior al promedio mundial, alrededor de 1 %. En 2011, el consumo de energía eléctrica en Latinoamérica para producir una tonelada de cemento coincide con el valor promedio a nivel mundial, 107 kWh/t de cemento, lo cual conjuntamente con el consumo de energía térmica para la producción de Clinker (Osorio et al., 2017). En las Tablas 1.1 y Tabla 1.2 se presentan como referencia los indicadores de consumo de energía térmica y eléctrica para la producción de cemento. Fuente: (FICEM, 2019).

Tabla 1.1. Indicadores energéticos para la producción de cemento.

Insumo por unidad de producto	Unidad	Indicador del sector
Energía combustible	GJ/t cemento	3,0 - 4,2
Energía eléctrica total	kWh/t cemento	90 - 150
Energía eléctrica molienda clinker	kWh/t clinker	40 - 45

Tabla 1.2 Comparativos de indicadores de eficiencia en la fabricación de cemento. Fuente: (Arena, 2017; Ruiz, 2015).

INDICADOR	2015		2016	
	Mundo	Latinoamérica	Mundo	Latinoamérica
Emisiones brutas de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /t producto cementante)	640	588	640	597
Consumo de energía térmica (MJ/t clinker)	3 530	3 630	3,54	3,6
Consumo de energía eléctrica (kWh/t cemento)	101	104	103	103
Sustitución de combustible (%)	15,82	14,68	16,7	14.19
Relación clinker/cemento (%)	74,9	69,9	75	69,3

### 1.6.2 Fuentes y costos de energía.

En la industria cementera se utiliza electricidad y combustibles como fuentes de energía para el proceso productivo y áreas auxiliares. En el Fig. 1.6 se presenta la distribución porcentual del consumo de energía eléctrica y térmica en una planta típica.

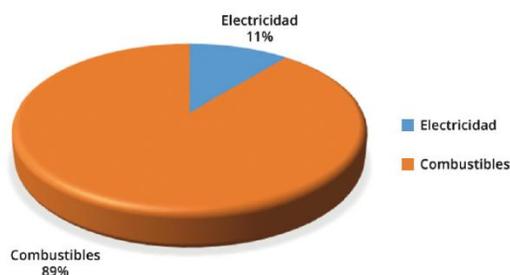


Fig. 1.6 Distribución del consumo energético en planta cementera.

Elaboración FONAM, Fuente: MINEM.

En la Tabla 1.3 se muestra la distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en una planta cementera.

La mayor parte del consumo energético para la fabricación de cemento se concentra en el precalcinado y en la clinkerización de las materias primas en el horno, operación que consume cerca del 90 % de la energía total consumida en la planta. La energía eléctrica se consume en su mayor parte en las operaciones de molienda, tanto de materias primas como de cemento, que representan aproximadamente el 75 % de la energía eléctrica total consumida. La impulsión de

gases y la manipulación y transporte de materiales suman prácticamente el 25 % restante. Ver Figura 1.5 (I. Sánchez, Oshiro, & Positieri, 2012).

Tabla 1.3 Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en una planta cementera.

It	Proceso	Consumo de energía eléctrica (%)
1	Preparación de las materias primas	3
2	Chancado, triturado y molienda del crudo	32
3	Homogenización, precalcinado y clinkerización	21
4	Molienda de cemento, envasado	41
5	Servicios generales	2
6	Iluminación	1

La fabricación de cemento consume altos montos de energía eléctrica y térmica. Es una industria intensiva en energía, con un consumo específico alrededor de 4 GJ/t de cemento producido. En energía primaria el 25 % de la energía de entrada es electricidad y el 75 % es energía térmica. Los costos de energía representan aproximadamente el 26 % de los costos de fabricación del cemento. El consumo específico de energía se define como el consumo de energía por unidad de producto terminado y es el indicador usado para medir la eficiencia energética de una planta. En la industria cementera el consumo específico de energía eléctrica sería en kWh/t de cemento y en energía térmica MJ/t de cemento o MJ/t de clinker (I. Sánchez et al., 2012).

Un indicador con influencia en el consumo de energía en procesos es el consumo específico de materias primas. En la Tabla 1.4 se presentan estos consumos para una planta con una producción de clinker de 3 000 t/días (1 000 000 t de clinker/a) y 1 230 000 t de cemento/a. En los países de la Unión Europea la media en la relación de producción cemento/clinker es 1,23 (Ruiz, 2015).

Tabla 1.4 Consumos para una planta con una producción de clinker de 3 000 t/d.

Materias primas (base seca)	Por tonelada de clinker	Por tonelada de cemento	Consumo anual Por millón de toneladas de clinker
Caliza, arcilla, pizarra, marga, otros	1,57 t	1,27 t	1 568 000 t
Yeso, anhídrita	-	0,05 t	0,05 t
Adiciones	-	0,14 t	172 000 t

### **1.7 Impactos ambientales en la producción de cemento.**

La producción de cemento Portland a nivel global ha significado la extracción, transformación y disminución de recursos naturales y ha promovido un aumento en impactos ambientales significativos en cada una de sus etapas de fabricación, generando la liberación de aproximadamente 0,85 kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por cada kilogramo de cemento procesado representando 5 % ÷ 7 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, adicionalmente se requieren 3 400 MJ/t para su elaboración que corresponden a 2,50 % de la energía mundial utilizada (Hoyos et al., 2018).

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. Asimismo, 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.

Los impactos ambientales negativos de las operaciones de cemento ocurren en las siguientes áreas del proceso: manejo y almacenamiento de los materiales (partículas), molienda (partículas), y emisiones durante el enfriamiento del horno y la escoria (partículas o "polvo del horno", gases de combustión que contienen monóxido (CO) y CO<sub>2</sub>, hidrocarburos, aldehídos, cetonas, y óxidos de azufre y nitrógeno). Los contaminantes hídricos se encuentran en los derrames del material de alimentación del horno (alto pH, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, principalmente potasio y sulfato), y el agua de enfriamiento del proceso (calor residual). El escurrimiento y el líquido lixiviado de las áreas de almacenamiento de los materiales y de eliminación de los desechos puede ser una fuente de contaminantes para las aguas superficiales y freáticas (León, 2010).

En la producción de cemento se necesita alrededor de 1,6 t de materia prima por cada tonelada de cemento, además de yeso, consumiéndose en total 1,65 t aproximadamente de materia prima. En la producción de cal el consumo de materia prima, con cerca de 1,8 t por tonelada de producto final, es aproximadamente un 10 % mayor que en la fabricación de cemento (Sanjuán, 2007).

Es el proceso de producción de clinker se emite la mayor cantidad de CO<sub>2</sub>. En 2016, la producción mundial de cemento generó alrededor de 2 200 000 t de CO<sub>2</sub>, equivalente al 8 % del total mundial. Más de la mitad provino del proceso de calcinación. Junto con la combustión térmica, el 90 % de las emisiones del sector podrían atribuirse a la producción de clinker ("THE GLOBAL CEMENT REPORT," 2017).

Debido a esto, el experto de Chatham House argumenta que el sector necesita con urgencia seguir una serie de estrategias de reducción de CO<sub>2</sub>. Los esfuerzos adicionales en materia de eficiencia energética, el menor uso de combustibles fósiles y la búsqueda y el almacenamiento de carbono ayudarán, pero de forma aislada pueden hacer poco. Lo que la industria realmente necesita hacer es afianzar los esfuerzos para producir nuevos tipos de cemento ("THE GLOBAL CEMENT REPORT," 2017). En la actualidad se están aplicando varias acciones dirigidas a la disminución efectiva de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante la producción de cemento como captura y almacenamiento de carbono, producción de nuevos cementos, sustitución de clinker, uso de combustibles alternativos.

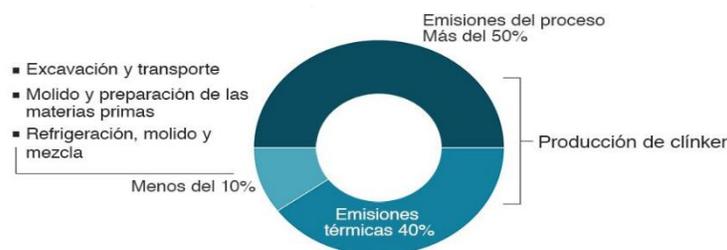


Fig. 1.7 Componente de las emisiones de CO<sub>2</sub>.  
Fuente Cathan House.

El Fig. 1.7 muestra como la producción de clinker representa más del 90 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, por dicha razón es que en la actualidad una de las acciones que se están aplicando para la disminución de esas emisiones es la sustitución de clinker.

### 1.8 Oportunidades de reducción del consumo de energía eléctrica y térmica.

La reducción del consumo de portadores energéticos se presenta como una de las acciones inmediatas para alcanzar la sostenibilidad de la industria del cemento, a partir de la optimización del consumo de energía eléctrica y térmica en la producción de cemento.

### **1.8.1 Sustitución de motores estándar por motores de alta eficiencia.**

El principal consumo de energía eléctrica en una planta de producción de cemento se presenta en motores de diversas potencias que se encuentran instalados en los procesos de molienda, transporte de materiales, bombas y ventiladores. Entre 500 y 700 motores de diferentes capacidades se usan en una planta de cemento. El reemplazo de equipos antiguos con eficiencias entre 80 % y 85 % por motores de eficiencias superiores al 94 %, generan ahorros de energía entre 10 % y 15 % del consumo actual en estos equipos.

Teniendo en cuenta que el mayor costo en el ciclo de vida de un motor tiene relación con el consumo de energía eléctrica, el desarrollo de este tipo de proyectos retorna las inversiones en periodos entre 2 y 5 años dependiendo del costo de energía en la planta. Las inversiones dependen de la potencia del motor que se sustituye. Para motores con capacidades superiores a 300 kW la inversión específica es del orden de 75 USD/kW, y para motores entre 30 kW y 300 kW la inversión está en el rango entre 120 USD/kW y 140 USD/kW (Nodarse, 2014).

### **1.8.2 Molienda de materias primas y clinker.**

El costo de la electricidad es la tercera variable de costos de producción en el proceso cementero. Las otras dos variables corresponden a las materias primas y el combustible para el horno, 42,2 % del consumo de energía eléctrica se presenta en la molienda del cemento y el 22,4 % en la molienda de materias primas.

El uso de molinos verticales en comparación con los molinos de bolas tradicionales, reduce el consumo específico de energía con respecto al proceso de molienda tradicional de rangos de 55 kWh/t a 70 kWh/t a valores entre 25 kWh/t y 30 kWh/t, dependiendo del tamaño de molienda final. Las inversiones se estiman entre 2,5 USD/t y 8 USD/t de capacidad anual de producción de cemento. Los retornos simples de las inversiones suceden entre 3 y 5 años dependiendo del costo de la energía eléctrica con la que opere la planta (Nodarse, 2014).

### **1.8.3 Actualización de los hornos rotatorios.**

En el caso de plantas nuevas y reestructuraciones significativas de plantas existentes, las buenas prácticas internacionales para la fabricación de clinker implican la utilización de un horno de proceso seco con precalentamiento y precalcificación (PCP) en etapas del horno.

Los hornos PCP son los más utilizados en la industria cementera, son los que menos combustible consume (debido a la elevada recuperación de calor del gas del horno en los ciclones y a las escasas pérdidas de calor del horno), y no tienen agua alguna que evaporar (a diferencia de los hornos húmedos, que utilizan lechada).

Las inversiones requeridas dependen de la capacidad de producción del horno, para una planta con una capacidad de 2 500 t/día, la inversión es del orden de 6,0 MMUSD y el retorno de la inversión está entre 1 y 3 años dependiendo del precio del combustible que se usa.

#### **1.8.4 Uso de combustibles alternativos.**

Es posible usar combustibles alternativos como llantas usadas, biomásas residuales como la cascarilla de arroz, e incluso residuos sólidos urbanos como combustible alternativo en los hornos, que permiten reducciones entre 20 % a 25 % en las emisiones de (Gases de Efecto Invernadero (GEI) debidas al uso de combustibles fósiles como carbón o gas natural. Por las condiciones de operación de los hornos y las materias primas que se usan en el proceso, el sector cementero tiene potencial para realizar la incineración de residuos especiales y peligrosos cumpliendo con la normatividad ambiental de emisiones para este tipo de procesos.

#### **1.8.5 Uso de materias primas alternativas.**

El proceso de calcinación genera importantes emisiones debidas al proceso de decarbonatación y liberación del CO<sub>2</sub>. Es posible reemplazar una fracción del cemento en la producción de concreto utilizando materiales denominados puzolánicos que tienen un comportamiento similar al del clinker en la mezcla, entre estos materiales se encuentran lodos de altos hornos de la industria siderúrgica, cenizas volantes resultantes de la quema de carbón en centrales térmicas, y puzolanas naturales como la ceniza de cascarilla de arroz. La reducción de emisiones de GEI depende de la cantidad de cemento que se pueda sustituir en la mezcla final de concreto.

#### **1.8.6 Producción de Cementos con adiciones.**

En la fabricación del cemento, aproximadamente la mitad del costo de la producción se deriva del consumo de energía, hecho que ha llevado a establecer medidas enfocadas tanto en la reducción del consumo de energía necesaria para la cocción de clinker, como en la sustitución

de combustibles, impulsándose con ello el uso de materiales secundarios en el concepto de Cemento Portland.

Los cementos con adiciones minerales constituyen una herramienta fundamental en la durabilidad de las estructuras, sin embargo aún hoy no están lo suficientemente difundidos entre los proyectistas ni entre los agentes responsables de la elaboración de los pliegos de obra, probablemente porque existe una tendencia a seguir utilizando materiales tradicionales, como el cemento portland normal (sin adiciones). En el marco actual, la durabilidad juega un papel preponderante en lo que respecta a su incidencia sobre la economía de la obra y fundamentalmente en el caso de los pavimentos de hormigón, donde uno de los beneficios más importantes es una larga vida en servicio con bajos costos de mantenimiento. Es decir, el concepto de estructura durable lleva implícito el de estructura económica.

Entre las adiciones activas, sin duda, figuran las de escorias de alto horno, que incluso tienen propiedades hidráulicas propias y las puzolanas naturales y artificiales. Como adiciones inertes, actualmente de gran uso, están los fillers, sobre todo los calizos; se debe considerar que esos fillers son en razón de su constitución y composición afines al clinker y a la pasta hidratada; resulta claro y entendible que se produzca un efecto epitáxico debido a la similitud de las estructuras. Sin duda alguna, la introducción de cementos mezclados ha sido difícil debido al prejuicio del consumidor, manteniéndose aún en muchas regiones la idea que el cemento mezclado es de menor calidad, cuando realmente es de calidad distinta.

Los cementos mezclados producen un menor calor de hidratación, la trabajabilidad de los concretos elaborados a base de cementos mezclados es sin duda mejor que la obtenida con cemento Portland, hecho que resulta importante en los concretos pobres, reduciendo al mismo tiempo el módulo de elasticidad y el deslavado que minimizan el agrietamiento. De la misma forma, el tiempo de fraguado tiende a ser mayor en los cementos mezclados al desarrollarse las reacciones hidráulicas con menor rapidez, sobretodo en el caso de la arena volcánica y la escoria, hecho que puede ser contrarrestado con un aumento en la finura del cemento.

La mayor resistencia que presentan los cementos puzolánicos al ataque de agentes químicos en general, es atribuible a la eliminación de hidróxido de calcio constituido durante la hidratación del cemento por los compuestos formados en la reacción con la puzolana.

El aumento de resistencia a la compresión y de impermeabilidad en los cementos mezclados, encuentra su origen en la formación de fases menos densas, así como de poros de menor tamaño, hecho que permite alcanzar mayor durabilidad y mejorar la resistencia al ataque de sulfatos, sobretodo en cementos con adición de escoria de alto horno.

Sin duda alguna las ventajas más grandes que presentan los cementos mezclados en la construcción radican en:

- ✓ Incremento en la capacidad de producción con inversiones limitadas y realización rápida.
- ✓ Reducción de los costos de energía necesaria para la cocción del clinker.
- ✓ Utilización óptima de materia primas
- ✓ Mayor resistencia al ataque de medios agresivos

La elaboración de cementos mezclados constituye además una intersección con la energía, economía y ecología, ya que hasta la fecha en muchos países es apreciable la reducción de la cantidad de energía consumida para la cocción del clinker, sobretodo en Estados Unidos y Canadá; obteniéndose de igual forma mejoras en algunas de las propiedades del cemento a través de una considerable disminución de problemas ambientales derivados de las emisiones emitidas durante el proceso de fabricación del material (Godoy-Fernández, 2006).

En la actualidad existe una amplia variedad de cementos mezclados. Los materiales inorgánicos que son usados para reducir el consumo de cemento pueden ser mezclados y/o molidos íntimamente con el clinker, y/o mezclados durante la fabricación de este, o mezclados durante la fabricación del hormigón o morteros. Las cenizas volantes, escorias granuladas, microsílíce y otras puzolanas naturales o calcinadas son reportados como las adiciones minerales más utilizadas.

A partir de esta fecha el sector cementero, que genera como promedio unas 0,89 t de CO<sub>2</sub> / t de clinker ÷ 1,00 t de CO<sub>2</sub> / t de clinker, se ha sumado al empeño de contribuir no solo en el aspecto del ahorro energético sino también a fomentar la cultura del desarrollo sostenible en el contexto medioambiental actual (González, 2015; Sanjuán, 2007).

La incorporación de caliza molida como reemplazo parcial del clinker genera dos efectos sobre la hidratación del mismo: por un lado el efecto químico que tiene como consecuencia la

formación de carboaluminatos de calcio hidratado, que contribuyen al refinamiento de la estructura de poros de la matriz cementicia y por otro, el efecto físico que provoca la dispersión de los granos de cemento acelerando la velocidad de hidratación del mismo. El efecto de dispersión se atribuye a la ubicación de la adición entre los granos de cemento, que aumenta su área de contacto con el agua, y posibilita un aumento en la velocidad de hidratación inicial. Además, este incremento también se atribuye a que las partículas de caliza actúan como centros de nucleación alrededor de las cuales se depositan los cristales de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Desde el punto de vista de la resistencia, el efecto físico es el principal responsable del aumento de este parámetro a edades tempranas.

### **1.9 Ciclo de vida del cemento.**

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de un producto, proceso o tecnología es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Básicamente, se enfoca al rediseño de productos bajo el criterio de que los recursos energéticos y materias primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido de cómo se reemplazan o como surten nuevas alternativas. Por este motivo, la conservación de recursos privilegia la reducción de la cantidad de residuos generados (a través del producto), pero ya que éstos se seguirán produciendo, el ACV plantea manejar los residuos de una forma sostenible, desde el punto de vista ambiental, minimizando todos los impactos asociados con el sistema de manejo.

### **Conclusiones parciales.**

1. El principal impacto ambiental de la producción de cemento es el consumo de portadores energéticos y la emisión de gases de efecto invernadero.
2. La fabricación de clinker constituye el proceso químico de mayor consumo de combustible en el cual se incluye la descarbonatación del  $\text{CaCO}_3$ .
3. Los procesos de molienda de crudo y cemento constituyen los mayores consumidores de energía eléctrica debido a la potencia de los motores y el tiempo de trabajo.



# CAPITULO II

## **CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y METODOLOGÍA A EMPLEAR PARA EL ESTUDIO.**

### **2.1 Caracterización de la empresa Cementos Cienfuegos S.A.**

En la finca El Guabairo se encuentra ubicada la mayor fábrica de cemento del país y una de las de más capacidad en Latinoamérica, la cual desarrolla un amplio plan de acciones con vistas a minimizar los daños ecológicos, a la vez que pone en práctica un sistema integrado de gestión, con escenarios superiores para la eficiencia económica; así como situarse en un destacado lugar entre las de más ahorro de portadores energéticos, al producir el cemento con adición de tobas zeolitizadas.

Inaugurada por el líder histórico de la Revolución, Fidel Castro, el 29 de mayo de 1980, surge como empresa mixta Cementos Cienfuegos SA. el 1ro de junio de 2001, entre las empresas Geominera del Cemento S.A. (en representación del Gobierno de Cuba) y Las Pailas de Cemento S.A., con la responsabilidad de que cada parte aportara el 50 % del capital de inversión, con el objeto social de modernización, rehabilitación, optimización, operación, mantenimiento, expansión de la capacidad de operación de la planta de procesamiento, explotación, extracción, transporte de los minerales de calizas, margas, depósitos de tobas limoníticas y areniscas ubicado en las concesiones mineras autorizadas, para ser transferidos o concedidas posteriormente, y la producción, exportación, almacenamiento, transporte por tierra y mar, distribución y comercialización de clinker, cemento, aditivos de cemento y modificadores especiales.

A partir de este momento se desarrolla un proyecto de modernización: equipamiento de fabricación alemana con molinos de bolas, hornos rotativos y precalentador de cuatro etapas; renovación de la línea uno, que por su capacidad y eficiencia sustituye otra y la instalación de un precalciner; molino de carbón vertical, primero en el país para el uso de un combustible más limpio y económico; reestructuración del área de materias primas; sistema de control distribuido, con tecnologías de las más modernas del mundo, entre otras. Con el empleo del petcoke (sólido carbonoso derivado de las unidades de coquización en una refinería de petróleo) en sustitución del crudo cubano, lograron una significativa disminución de las emisiones de azufre a la atmósfera, con lo cual se reduce el fenómeno conocido como lluvia

ácida. La modernización de los sistemas de depuración de gases (precipitadores electrostáticos y filtros) fue otros de los objetivos principales del proceso de rehabilitación.

Estas acciones han permitido aumentar la eficiencia, con una reducción significativa del consumo de energía y factor de clinkerización, por lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. En septiembre de 2004 comenzó a producir clinker y cemento P-35 (5 % de tobas puzolánicas adicional) y PP-25 (18 % de adición de tobas puzolánicas), manteniendo estas producciones hasta la fecha. Todo esto ha hecho que la empresa ostente desde sus inicios y de forma consecutiva el Reconocimiento Ambiental Territorial del CITMA y de calidad y Ambiental del MICONS en su Edición 2017.

Cementos Cienfuegos S.A. tiene implementado un monitoreo por parte del Laboratorio del Centro de Estudios Ambientales del CITMA y acreditados los ensayos por la Norma Cubana NC ISO 17 025; realiza contactos con las universidades del país con vistas a la realización de investigaciones e intercambios sobre el tema; tiene implantado y certificado un sistema de gestión que integra las normas NC ISO 9 001:15, NC ISO 14 001:2015, NC ISO 50 001:2015 y NC ISO 45 001:2018. La implementación de la norma de gestión energética y la producción de los cementos con alta adición de tobas puzolánicas PP-35 y PZ-25, ha facilitado un ahorro considerable de portadores energéticos y una sensible disminución de las emisiones de gases de combustión, además el bajo contenido de clinker en estos cementos, produce una sensible reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Nodarse, 2014).

### **2.1.1 Misión, visión y política de la empresa.**

La empresa tiene como objeto social la modernización, rehabilitación, optimización, operación, mantenimiento, ampliación de la capacidad y explotación de la planta, la explotación, extracción, transporte y proceso industrial de los minerales de calizas, margas, tobas, limonitas y areniscas ubicados en los yacimientos autorizados en las concesiones mineras que se transferirán o que posteriormente se otorguen, así como la producción, exportación almacenamiento, transporte terrestre y marítimo, distribución, comercialización de clinker, cemento, aditivos de cemento y modificantes especiales de cemento.

Su visión 2021 es la de ser productora y exportadora de clinker y cemento líder en Cuba y el Caribe a través del:

- ✓ Uso eficiente de recursos energéticos.
- ✓ Co-procesamiento de desechos.
- ✓ Desarrollo de las personas.
- ✓ Innovación de productos

Garantizando la imagen de la empresa a nivel internacional.

Para ello establece como Política: “Producir y comercializamos *clinker* y cemento para el servicio de sus clientes, priorizando su capital humano, usando eficientemente los portadores energéticos, garantizando la sostenibilidad ambiental de la empresa, con un mejoramiento continuo de los procesos, creando valores para las partes interesadas”

En tal sentido se han venido ejecutando acciones dirigidas a disminuir sus impactos ambientales negativos fundamentalmente en el uso de los recursos naturales, energéticos y el control de emisiones. El estudio del Ciclo de vida del producto realizado por personal especializado de la Dirección Técnica de la empresa ha confirmado que las emisiones de CO<sub>2</sub> constituyen el 95 % del impacto global al efecto del cambio climático derivado de sus operaciones.

Una de las vías propuestas en la empresa para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> es el uso de cementos con mayor contenido de adición activa y no activa, con la finalidad de disminuir la cantidad de clinker responsable mayoritario de dicha emisión, debido al proceso de descarbonatación de la caliza y a la quema del combustible fósil (*petcoke* y diésel), contribuyendo de manera doble al desarrollo sostenible y a la sostenibilidad ambiental.

En el anexo I se muestran la filosofía empresarial y los valores.

## **2.2 Descripción del proceso productivo.**

El proceso de producción de cemento se divide en tres etapas básicas: (anexo (II))

Primera etapa: extracción de las materias primas, caliza, marga y mineral de hierro, se extraen de las canteras, las que son transportadas hasta el área donde se trituran y secan.



Fig. 2.1 Equipos de canteras.

Para el acarreo de estos materiales en las canteras se cuenta con el siguiente equipamiento:

- ✓ Camiones TEREX 20 t, VOLVO 40 t y ASTRA 30 t.
- ✓ Cargadores frontales (LIEBHERR) 6 m<sup>3</sup>, 5 m<sup>3</sup> 3,8 m<sup>3</sup> y frente pala (YUTONG) 5 m<sup>3</sup> y LIEBHERR 3,8 m<sup>3</sup>.

El consumo energético en esta etapa es a base de combustible diésel para motores de combustión.

Segunda Etapa: trituración y secado, las materias primas procedente de las canteras son trituradas hasta una granulometría de < 75 mm y tamizadas para separar finos de los gruesos. Los finos con humedad son enviados hacia un tambor secador donde se secan hasta una humedad inferior al 12 %.



Fig. 2.2 Secador de materias primas.

El calor al secador se produce por la combustión de petcoke y diésel, este último durante los arranques de la instalación. La instalación es también consumidora de energía eléctrica fundamentalmente para el funcionamiento de motores.

Tercera etapa: almacenamiento y dosificación de materias primas, las materias primas una vez trituradas y secadas, son conducida mediante bandas transportadas hacia los silos y

almacenes ubicados a 2,5 km. Una vez en los silos y almacenes las materias primas son dosificadas en las proporciones necesarias para su posterior envío a los molinos de crudo, para ellos se utilizan dosificadoras de bandas. El consumo eléctrico en motores es el principal energético en esta etapa.



Fig. 2.3 Silos de caliza y almacén de marga, tobas y perdigón.

Cuarta Etapa: molienda de crudo, las materias primas dosificadas son enviadas al proceso de trituración en molinillos y molinos horizontales de bolas donde son trituradas, molturadas y secadas, hasta alcanzar granulometría inferior a  $< 90 \mu\text{m}$  (harina). Una vez triturada se almacena en silos de harina donde después de ser homogenizadas se envían a los silo de almacenamiento. En este proceso se consume energía eléctrica y térmica (gases del horno).

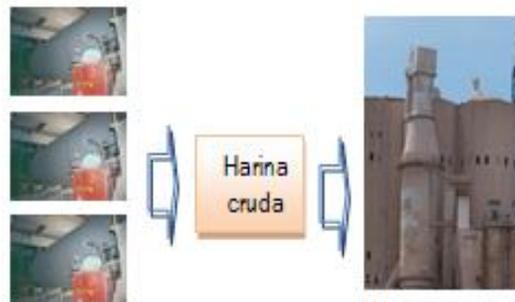


Fig. 2.4 Molienda de crudo y almacenamiento de harina.

Quinta etapa: cocción del crudo en hornos rotatorios, el calor suministrado por los gases de combustión provoca la descarbonatación del Carbonato de Calcio, que se descompone en  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$ , la pérdida de agua de constitución de la marga que proporciona la alúmina y sílice, la fundición de óxidos de hierro y la elevación de temperaturas hasta los  $1\ 700\ ^\circ\text{C}$  aproximadamente. Alcanzadas estas condiciones los óxidos se combinan en distintas formas entre sí, con lo cual se obtiene el clinker, como producto fundamental a la salida del horno, el  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  se transforman en  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  con la emisión de  $\text{CO}_2$ , terminando su

cocción en el horno rotatorio donde ocurre la clinkerización, que da lugar a un producto intermedio denominado clinker, el cual es descargado al enfriador de parrillas para su enfriamiento mediante aire suministrado por varios ventiladores. Posteriormente el clinker es transportado hacia los silos de almacenamiento.

La fuente de calor del horno es el petcoke durante el proceso normal y durante la arrancada se utiliza el diésel para el precalentamiento por un tiempo de duración (10 - 24 horas) según se muestra en la Fig. 2.5. Una vez homogenizada la harina entra al precalentador donde se produce la descarbonatación, se extrae el agua químicamente enlazada y los compuestos orgánicos, y de ahí se envía al horno rotatorio, en los que se desarrolla el principal proceso de la planta: la clinkerización.



Fig. 2.5 De izquierda a derecha aparecen: precalentador, molino de petcoke hornos y enfriador de clinker.

En esta etapa se consume además energía eléctrica para el funcionamiento de equipos.

Sexta etapa: molienda de cemento, el clinker es extraído mediante extractoras de los silos (con sistema de desempolvado) a la banda donde se dosifica junto con yeso y otros componentes a la mezcla, tales como puzolana, consideradas como adiciones activas, o calizas y se envía a los molinos de cemento para su molienda y la obtención de Cemento Portland Gris. Para la separación de los gruesos y los finos a la salida del molino se encuentran instalados ciclones separadores, los finos son enviados a las tolvas y de ahí a los silos de cementos mediante bandas transportadoras; la mezcla de gases y polvo generado en los ciclones pasan a un electrofiltro, donde son finalmente separados enviándose los gases a la chimenea y los finos se incorporan a las tolvas nuevamente y de ahí a los silos.

El producto final transportado a silos de almacenaje es posteriormente despachado a granel o en bolsas por medios de transporte automotor o por ferrocarril. Para el llenado de bolsas se cuenta con 3 máquinas ensacadoras

En este caso solo se consume energía eléctrica en el funcionamiento de equipos.

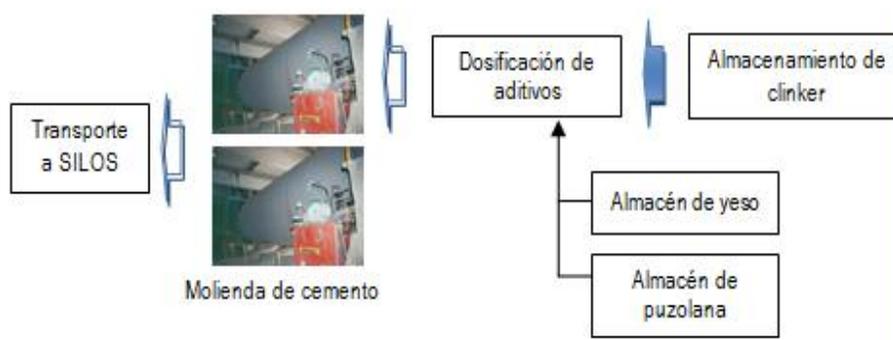


Fig. 2.6 Flujo de materiales en la molienda de cemento.

### 2.3 Efecto de la adición de puzolanas al Cemento Portland (CP).

El primer criterio que apoyó la producción de cementos puzolánicos fue el corregir el cemento Portland, al fijar la cal libre, generada durante la formación de los silicatos bicálcicos y tricálcicos, la cual es inestable a  $\text{pH} < 12$ , para formar compuestos estables que no son vulnerables a la acción lixiviante de las aguas ácidas. Pero adicionalmente estos materiales tienen otros efectos sobre el cemento y el concreto.

- ✓ Reemplazan una buena porción del Cemento Portland (CP) del 15 % al 40 %, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clinker y más económica de moler.
- ✓ Reduce el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción exotérmica.
- ✓ Evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.
- ✓ Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados del concreto.
- ✓ Aligera las mezclas, debido a la disminución de su densidad.

Uno de los efectos físicos que ocurren producto de la adición de una puzolana al CP, es el aumento de la compacidad por efecto filler y la nucleación heterogénea por el aporte de las puzolanas de una superficie adicional que favorece la nucleación y crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del CP. Estos efectos no dependen de la reactividad química de la adición mineral, sino de la cantidad de superficie disponible y del porcentaje de sustitución. Otro efecto muy importante, es el de dilución, debido al cual se produce un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas, lo que favorece la reacción de hidratación.

El efecto químico fundamental está dado por la reactividad puzolánica de la adición mineral. Las puzolanas pueden reaccionar con parte del  $\text{Ca(OH)}_2$ , también denominado Pórtlandita (CH), presente en la pasta hidratada, densificando la microestructura de la pasta y refinando la estructura de poros, con la disminución de la permeabilidad y el aumento de la resistencia mecánica. Al mismo tiempo, como la CH presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico (Frías et al, 2000).

Puede afirmarse que con la sustitución del CP 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 CP, si se quiere mantener una laborabilidad constante de la mezcla (Castillo et al, 2010).

Las calizas contaminadas (< 70 % de  $\text{CaCO}_3$ ) son una muy buena opción de adición para el cemento Pórtland, aún en cantidades superiores al 20 %. Lo cual, proporciona ahorros importantes en consumo energético y en emisión de gases a la atmósfera al incrementar el volumen producido de cemento dejando constante el consumo de combustible. Además, alarga la vida útil de las minas.

Las calizas con título inferior al 70 % de  $\text{CaCO}_3$  tienen efectos menos negativos sobre las resistencias mecánicas en comparación a las calizas de alta pureza y prácticamente no

modifican los tiempos de fraguado, la expansión y la demanda de agua de los morteros adicionados con ellas.

La adición de caliza influye en la resistencia a la compresión de forma directa. Según estudios realizados por Otero; Ramirez; Bukasa & Seke (2016), es posible preparar diferentes clases de cemento por adición de caliza hasta un 15 % y alcanzar resistencias de hasta 40 MPa a los 28 días y hasta un 20 % de caliza con resistencias de hasta 35 MPa adiciones superiores al 20 % conllevan a disminuciones considerables de la resistencia. La disminución de la resistencia es linealmente dependiente del contenido de caliza adicionado o lo que es igual a la disminución del contenido de cemento.

En este sentido, es posible preparar cementos con adiciones de caliza de hasta un 20 % logrando resistencia a la compresión por encima de los 30 MPa. Se pudo comprobar a nivel industrial que adiciones de hasta un 12 % de caliza intermolida con clinker no afecta de forma considerable las propiedades mecánicas. Los resultados permiten establecer pautas para la elaboración y diversificación de diferentes tipos de cemento de acuerdo a las necesidades.

#### **2.4 Producción de cemento por calidades.**

Los cementos se clasifican de acuerdo a la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en MPa. El tipo de cemento se define además por el por ciento de adición. El cemento se designa con las letras que inician el nombre, separadas por un guión del valor numérico de la resistencia a la compresión a los 28 días mínima exigida por la norma.

Los cementos portland están constituidos por clinker portland y yeso, que pueden contener hasta un 5 % de adición activa o inerte. Por su parte, los cementos portland puzolánicos están constituidos por clinker portland, yeso y entre (6 % y 20 %) de adición activa. Los cementos puzolánicos están constituidos por clinker portland, yeso y entre (21 % y 35 %) de adición activa. En el caso de los cementos portland puzolánicos y puzolánicos se permite hasta un 5 % de adición de caliza.

Cemento Portland:

- ✓ Cemento Portland 35: cemento P-35
- ✓ Cemento Portland 45: cemento P-45
- ✓ Cemento Portland 55: cemento P-55

#### Cemento Portland Puzolánico:

- ✓ Cemento Portland Puzolánico 25 (con un % adición activa natural entre 6 % y 20 %): cemento PP 25.
- ✓ Cemento Portland Puzolánico 35 (con un % adición activa natural entre 6 % y 20 %): cemento PP-35.

#### Cemento Puzolánico:

- ✓ Cemento Puzolánico 25 (con un % de adición activa natural entre 21 % y 35 %): cemento PZ-25.

Los cementos ternarios están constituidos por clinker portland, yeso, puzolana hasta un 40 % por masa de cemento mezclado y caliza hasta un 15 % por masa de cemento mezclado, el contenido total de puzolana, caliza y escoria será menor que el 70 % por masa de cemento mezclado.

#### Cemento Ternario:

- ✓ Cemento Ternario 35 (con un % de adición de puzolana natural hasta 40 % y caliza un hasta 15 %) Cemento TPC-35.
- ✓ Cemento Ternario 25 (con un % de adición de puzolana natural calcinada hasta 40 % y caliza hasta un 15 %) Cemento TPC-25.
- ✓ Cemento Ternario 35 (con un % de adición de puzolana natural calcinada hasta 40 % y caliza hasta un 15 %) Cemento TQC-35.
- ✓ Cemento Ternario 35 (con un % de adición de puzolana natural calcinada hasta 40 % y caliza hasta un 15 %) Cemento TQC-25.

Finalmente, el cemento de albañilería está constituido por clinker portland y adición de hasta un 60 %.

#### Cemento de Albañilería:

- ✓ Cemento albañilería 16: cemento CA-16 (con un % adición de hasta un 60 %).

Cuando se utiliza caliza como adición inerte, se debe cumplir con los siguientes requisitos:

a) El contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), calculado a partir del óxido de calcio, no debe ser inferior al 75 % en masa.

b) El contenido de arcilla, determinado mediante el ensayo del azul de metileno de acuerdo con la NC 885, no debe exceder de 1,20 g/100 g de material. Para este ensayo la caliza debe

estar molida a una finura aproximada de 5 000 cm<sup>2</sup>/g, determinada como superficie específica de acuerdo con la NC 980.

## 2.5 Principales indicadores de la planta.

El comportamiento productivo de la fábrica ha tenido un incremento hasta el 2013 para la producción de cemento a partir del cual experimentó un descenso hasta al 2016 motivado por la variabilidad del mercado nacional, mostrando una recuperación a partir del 2017, (como se muestra en la Fig. 2.7), hasta la fecha derivado del incremento del consumo en el país y el deterioro de la industria cementera del país, lo que ha motivado que Cementos Cienfuegos S.A. asuma la el déficit de esta producción.

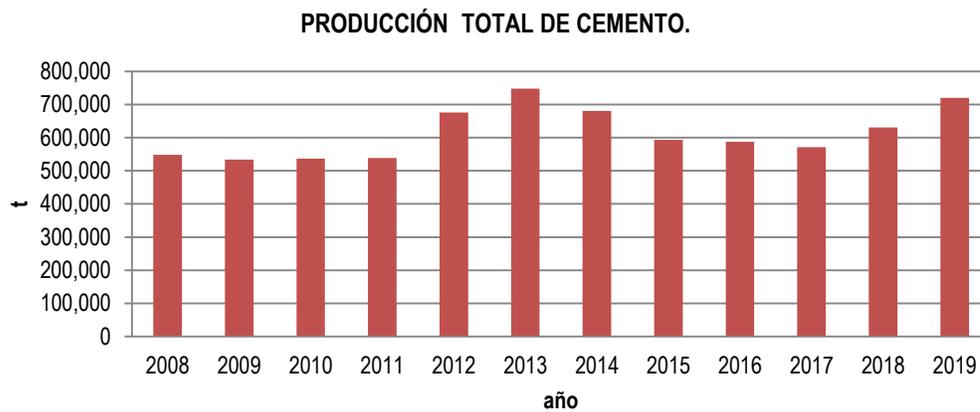


Fig. 2.7. Comportamiento de la producción de cemento.  
Fuente: Gerencia técnica Cementos Cienfuegos S.A.

En relación a las calidades de los cementos, el Fig.2.8, muestra que hasta el 2014 la producción de cemento P-35 disminuyó incrementándose la producción de PP-25 con un (18 % de adición de toba puzolánica). Entre los años 2012 y 2015 se produjo cemento P-35 Tipo I (sin adición activa de toba) para el mercado de Venezuela.

A Partir del 2014 hasta el 2018, se incrementa la producción de P-35 y disminuye la de PP-25 esto está motivado par la demanda de este tipo de cemento para las construcciones de las instalaciones turísticas. A partir de este año se comienzan a producir nuevos tipos de cemento: PP-35 y PZ-25 que van a ir desplazando la producción del P-35 y el PP-25. Ya en el 2019 se deja de producir el cemento Tipo I y el PP-25.

Este incremento de los cementos con alta adición está acompañado con tendencia a la disminución del consumo térmico y eléctrico ya que disminuye la cantidad de clinker en su composición, la que es sustituida por la toba puzolánicas y la caliza según se muestra en las Fig. 2.8, Fig. 2.9, Fig. 2.10 y Fig. 2.11.

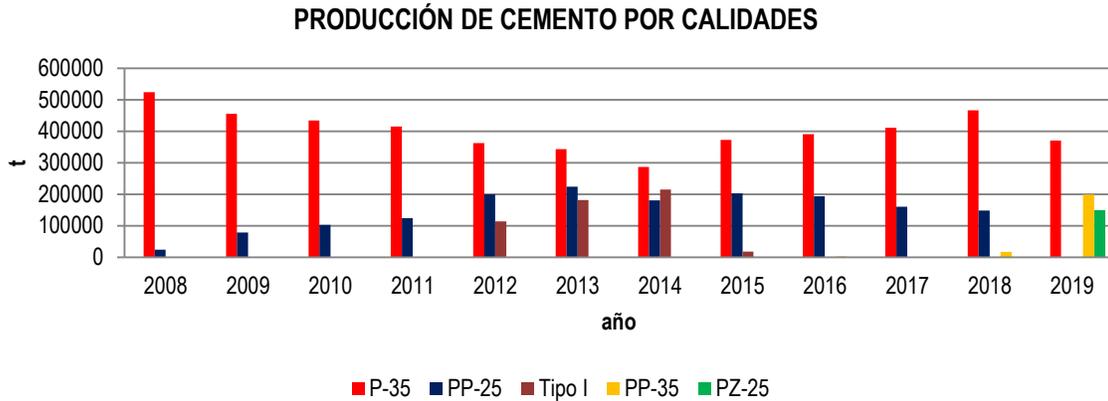


Fig. 2.8 Comportamiento de la producción de cemento por calidades.  
Fuente: Gerencia técnica Cementos Cienfuegos S.A.

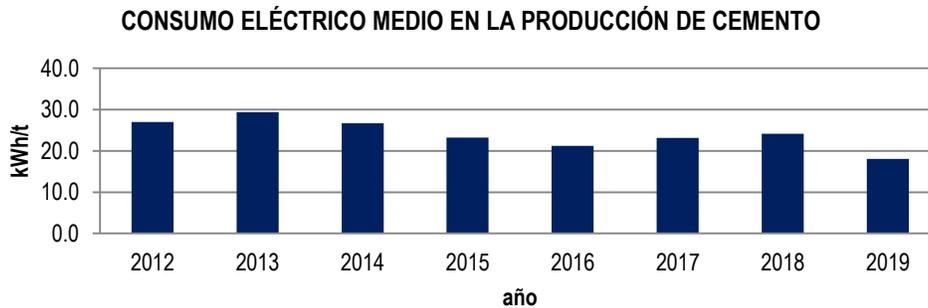


Fig. 2.9. Consumo eléctrico medio en la producción de cemento.  
Fuente: Gerencia técnica Cementos Cienfuegos S.A.

El consumo de clinker por su parte, experimento un crecimiento hasta el 2013 motivado por los niveles de exportaciones que hasta ese año se realizaban, a partir de este año estas exportaciones se cancelaron hasta el 2019, mostrando un ligero incremento a partir del 2018 ya que aumentan también las ventas de clinker a nivel nacional para compensar los niveles dejados de producir por el deterioro de la industria en el país. El consumo calórico del clinker muestra un incremento hasta el 2013 debido al aumento de las paradas del horno por falta de financiamiento para los mantenimientos, a partir de este momento comienza a disminuir el

número de paros ya que se realiza un mantenimiento general que restablece en parte la capacidad de trabajo del horno. A partir del 2018 comienza a incrementarse ligeramente por las paradas asociadas a la inestabilidad del suministro de combustible (petcoke) proveniente de Venezuela.



Fig.. 2.10 Comportamiento de la producción de clinker.  
Fuente: Gerencia técnica Cementos Cienfuegos S.A.



Fig. 2.11 Consumo calórico en la producción de clinker.  
Fuente: Gerencia técnica Cementos Cienfuegos S.A.

El consumo eléctrico hasta clinker, también muestra un incremento a partir del 2012 debido a la variabilidad en el trabajo de los equipos por fallas asociadas a la falta de mantenimiento por financiamiento. El comportamiento del consumo de agua también muestra una tendencia a aumento después del 2016 debido al mal estado de la conductora de Codicia situada a 8 km de la fábrica con niveles de pérdida del 30 % y sujeta a una posible inversión aún en fase de aprobación.

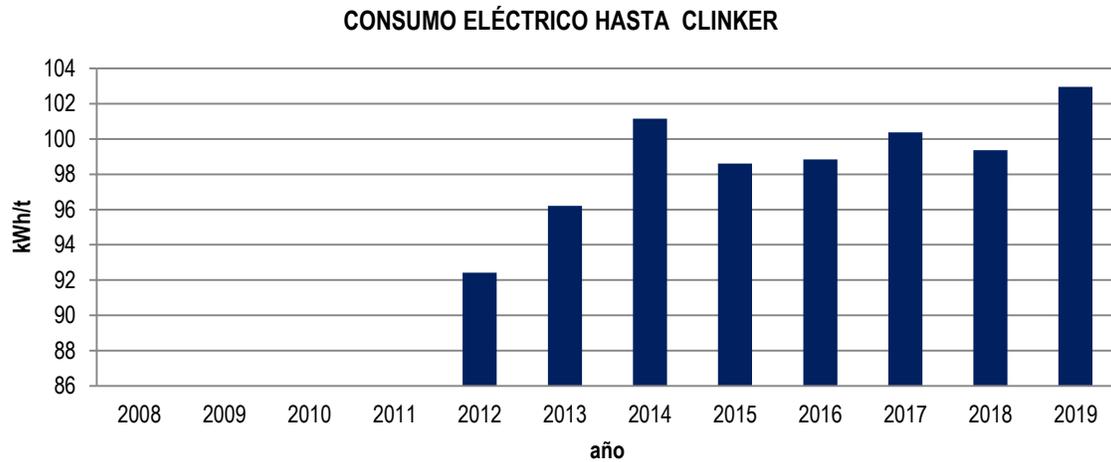


Fig. 2. 12 Consumo eléctrico en la producción de clinker.  
Fuente: Gerencia técnica Cementos Cienfuegos S.A.

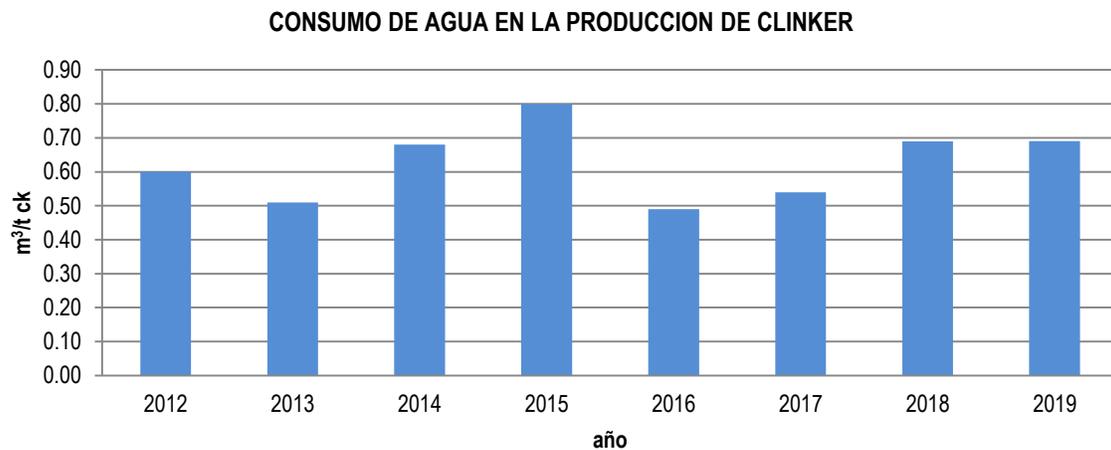


Fig. 2.13 Consumo de agua en la producción de clinker.  
Fuente: Gerencia técnica Cementos Cienfuegos S.A.

## 2.6 Justificación de la Investigación

La importancia de la presente investigación en una empresa cementera radica en la propuesta de un modelo para la evaluación energética de los tipos de cemento producidos en el país para determinar sus aportes económicos, además la investigación tendrá una aplicación práctica en la medida que se conozcan los detalles de la influencia de las adiciones activas y no activas en los costos del cemento, es decir, permitir tanto a las productoras como a los consumidores de estos cementos identificar las fuentes de potenciales de la adición,

evaluarlas e inmediatamente tomar una decisión para su introducción en la producción dirigidas a la reducción del consumo de energía, comprobándose con el ahorro económico que ésta genera.

Los resultados de la investigación constituyen una herramienta para determinar en primer lugar los consumos de portadores energéticos totales por toneladas y por tipos de cemento; así como, sus posibles reducciones en combustible equivalente, derivados de la introducción de las tobas puzolánicas y calizas como aditivos al cemento; así como las disminuciones de emisiones de gases de combustión y descarbonatación asociadas a la disminución del contenido de clinker. Estos resultados facilitará la toma de decisiones para el desarrollo de la comercialización y consumo de estos cementos en el país.

Hoy en día, diversas investigaciones han demostrado ya que mezclas con hasta un 60 % de Materiales Cementantes Suplementarios (MCS) en vez de cemento Portland, son factibles. Aunque probablemente este porcentaje siga siendo todavía alto, los MCS están cobrando cada vez más importancia en el mercado. Los MCS más empleados son las cenizas volantes (tanto la clase C como la F), la escoria granulada de alto horno y el humo de sílice. Otros MCS son las puzolanas naturales como la arcilla calcinada o el metacaolín.

Esta investigación permitirá determinar la reducciones efectivas de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la cantidad de energía necesaria para la fabricación del hormigón además de reducir la cantidad de residuos y el polvo emitido por el horno de clinker, obteniendo un hormigón de mejores prestaciones.

La puzolana natural y la caliza, que se obtiene directamente de canteras pueden ser utilizadas como aditivo activo de cemento ya que aumenta la resistencia a ataques químicos, y el hormigón alcanza altas resistencias desde una edad más temprana de lo convencional. La sustitución de clinker por estos materiales, introduce una significativa reducción del consumo energético intensivo, especialmente en forma de energía térmica a alta temperatura, lo que exige la aportación de cantidades importantes de combustibles todo esto será cuantificado en esta investigación (anexo III).

La utilización de la zeolita y la caliza en la fabricación de clinker es un hecho completamente incorporado a los procedimientos de fabricación, tanto para la sustitución de combustibles

tradicionales como para la utilización de algunos residuos como materias primas alternativas, dentro de determinados límites impuestos por los rigurosos criterios de calidad de los productos a obtener. Esta investigación permite comprender el estado actual de la logística del sector, la descripción de sus principales procesos y flujos, la identificación de los actores que lo componen, los elementos que lo condicionan y las oportunidades potenciales de mejora. Por lo tanto constituye un referente, para las empresas del sector.

Los actores del sector pueden utilizar esta investigación como base para la toma de decisiones encaminadas a desarrollar la utilización de cementos aditivados para la creación de ventajas competitivas en el área de operaciones. Estas ventajas fortalecerían la participación de las empresas en un mercado cada vez más competitivo y global a partir de la reducción de los costes de producción.

Adicionalmente, este proyecto se establece como una base de conocimiento que la academia puede utilizar con el fin de proponer investigaciones de mayor alcance y profundidad. Esta investigación se convierte en un marco de referencia para plantear metodologías de evaluación de desempeño de las adiciones al cemento, evaluaciones de impacto ambiental y estudios de productividad.

## **2.7 Metodología a emplear para la evaluación energética de los cementos.**

Para la realización de la evaluación energética de los cementos con adición se deben seguir los siguientes

1. La evaluación debe comenzar con la recopilación de la producción de cemento por calidades de los últimos 3 años con el objetivo de determinar las producciones promedios en ese período y los por ciento de adiciones que nos permitan conocer los volúmenes de clinker sustituido anualmente como promedio (Anexo IV).
2. Determinar los índices de consumos de combustibles promedios del transporte y la capacidad de carga, utilizado en el trasiego de los adictivos caliza y zeolita, así como, las distancias desde las canteras, con el objetivo de obtener los consumos adicionales de combustibles del transporte para producir una tonelada de cemento con una determinada adición.

3. Determinar la disponibilidad de estos aditivos para garantizar la sostenibilidad de la producción de cementos aditivados sin comprometer la vida útil de la cantera para la operación de la planta en las condiciones actuales.
4. Obtener los índices de consumo calórico y eléctrico para el secado de la caliza y la zeolita en el área de materias primas en los últimos 3 años.
5. Obtener los índices de consumo calórico y eléctrico por tonelada de clinker en el horno para igual periodo.
6. Determinar los índices de consumo eléctrico en la molienda de cemento para diferentes adiciones.
7. Determinar las índices de consumo de agua en la producción de cemento y clinker, así como el consumo de electricidad.
8. Determinar a partir de los por ciento de adiciones de caliza y zeolita en los diferentes tipos de cemento producidos en los últimos 3 años la cantidad de clinker sustituido.
9. Determinar el valor calórico promedio del petcoke utilizado en la producción del clinker consumido en los cementos con adición y el secado de la caliza y zeolita.
10. Determinar la cantidad de fuel-oíl equivalente al petcoke para estandarizar los consumos de energía y posterior comparación con otros tipos de cemento.
11. Determinar los índices promedios de emisión de CO<sub>2</sub> y gases de combustión.
12. Determinar el nivel base de producción de cemento por calidades. Este se determinará a partir de los volúmenes de producción promedio de los últimos 3 años e incluye la evaluación de los gastos energéticos en la producción de cemento según las calidades y por ciento de adición actual.
13. Realizar la evaluación energética de la producción de cemento, proponiendo una nueva estructura de producción que incluya el aumento de adición y la producción de nuevos cementos. En este caso se analizará la sustitución de un por ciento de P-35 por PP-35 y la sustitución total de la producción de PP-25 por PZ-25.
14. Evaluación de la influencia de las adiciones de caliza y toba en la resistencia de estos cementos para ello se analizarán los resultados del laboratorio.
15. Finalmente se establecerán los índices de consumo de combustibles y electricidad en combustibles equivalente, para cada tipo de cemento.

### **Conclusiones parciales.**

1. Cementos Cienfuegos S.A. es una cementera con buenos indicadores de consumo eléctrico y térmico por tonelada de clinker y cemento con potencialidad de disminuir aún más estos indicadores con la adición de zeolita y caliza al cemento.
2. Es posible preparar cementos con adiciones de caliza de hasta un 20 % logrando resistencia a la compresión por encima de los 30 MPa. Adiciones de hasta un 12 % de caliza intermolida con clinker no afecta de forma considerable las propiedades mecánicas.
3. La sustitución del clinker por materiales puzolánicos, se mantienen o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad del cemento, sin embargo las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas



# CAPITULO III

## **CAPITULO III DETERMINACIÓN DE LOS CONSUMOS ENERGÉTICOS EQUIVALENTES Y AMBIENTALES POR TIPOS DE CEMENTOS.**

### **3.1 Producción de cemento y consumos energéticos.**

La fabricación de cemento es la industria que más fuel consume en Cuba después de las centrales térmicas; lo mismo ocurre en casi todos los países europeos. Por otra parte, la energía en todas sus formas es uno de los componentes principales del coste del cemento. Antes de la crisis energética se estimaba que esta partida suponía el 35 % del precio del cemento en la actualidad supera el 65 %.

El Programa Ecológico de la industria del cemento, hoy es un aspecto vital para su promoción en el mercado aunque choca con que la reducción posible de emisiones de CO<sub>2</sub> es absorbida por el incremento necesario de la producción. Para poder mantener los niveles de consumo energético y emisiones del presente en 10 años, la industria del cemento necesita reducir las emisiones en más del 50 %. Este reto implica, de forma inobjetable, un cambio de paradigmas en la producción y utilización del cemento Portland, que permita una adecuación a las exigencias ambientales actuales.

La adición de tobas puzolánicas y caliza durante la producción de cemento constituye una acción de P+L (Producción más Limpia) que reduce la carga contaminante relacionada con la no producción de clinker, tiene un impacto económico positivo importante por la reducción de los portadores energéticos y permite mantener los requerimientos normativos de las propiedades físico-químicas del cemento. El incremento de la producción y empleo de cementos mezclados de diferentes calidades constituye uno de los avances más importantes de la industria cementera y del sector de la construcción en los últimos años.

La presencia de una puzolana en el Cemento Portland inicialmente, actúa como un inerte no nocivo, con un endurecimiento más lento que el Portland base. Más adelante, aparece como un componente activo, cuyos óxidos (sílice, alúmina e, incluso, óxido de hierro) combinan gradualmente con la cal liberada en la hidratación de los silicatos del Portland, para formar nuevos compuestos hidráulicos estables; las discrepancias mecánicas con el Portland disminuyen, más tarde desaparecen y, finalmente, la resistencia del cemento con adición es superior a la del Cemento Portland, a igualdad de condiciones.

Se ha estudiado el comportamiento de estos cementos en morteros y hormigones. También se han realizado estudios de estabilidad química en medio sulfático y de agua de mar, con mejores resultados para todos los cementos mezclados. Como resultado se definieron los parámetros de calidad para el empleo de las puzolanas en la producción de cementos mezclados. Es evidente la gran importancia que los posibles ahorros de energía en la industria del cemento tienen tanto para la economía nacional como para la de los propios cementeros. En el presente capítulo se realizará el cálculo de la cantidad de fuel-oíl equivalente por tonelada de cemento para las diferentes calidades que actualmente producidas en Cementos Cienfuegos S.A. Además se determinarán los beneficios económicos asociados al cambio de estructura de producción con desplazamiento de la producción de cemento hacia los cementos aditivados, para ello se utilizará el procedimiento descrito en el epígrafe 2.7. Los recursos materiales básicos que se consumen en la fabricación del cemento se dividen en dos subgrupos: las materias primas a partir de las cuales se obtiene el cemento portland (caliza, marga, puzolana, perdigón y yeso); y los energéticos (electricidad, combustibles, agua). A continuación se exponen en las Tablas 3.1, Tabla 3.2, Tabla 3.3, Tabla 3.4 y Tabla 3.5, los datos de referencia de la empresa.

Tabla 3.1 Consumo específico de materias primas.

Caliza	Marga	Perdigón	Puzolanas	Yeso
<i>t/t crudo</i>			<i>t/t cemento</i>	
0,77	0,21	0,02	0,08	0,05

Tabla 3.2 Rendimiento de la instalación Materias Primas.

Producción de canteras	Caliza	Marga	Perdigón	Puzolanas
<i>Producción t/h</i>	500	400	280	400

Tabla 3.3 Consumos energéticos de maquinaria cantera.

Producción de canteras	Perforadora	Cargador	Pala	Camión
<i>Diésel l/h</i>	6	3	3	4

Tabla 3.4 Consumos energéticos por procesos.

Proceso	Consumo kWh	Producción t/h
<i>Materias Primas</i>	1 997	500
<i>Trituración de Crudo</i>	2 906	135
<i>Cocción del Crudo</i>	5 395	210
<i>Preparación de Combustible sólido</i>	1 385	40
<i>Fabricación de Cemento</i>	2 810	80

Tabla 3.5 Consumos térmicos del horno.

Horno	kg comb /kg clinker	kcal/kg clinker
Horno	110	790
Secador	5,04	20

En relación al combustible fósil que se utiliza en el quemador del horno de la fábrica en estudio, está compuesto 100 % de petcoke y el diésel solo en el calentamiento. Por su parte en el secador de materias primas se utiliza un 90 % de petcoke y un 10 % de diésel. En la siguiente tabla se muestran el poder calórico medio.

Tabla 3.6 Poder calórico del combustible.

Combustible	Poder calórico kcal/kg
Petcoke	7 546
Diésel	10 158

Así pues, de la misma forma se han obtenido los valores del consumo energético referenciado en la unidad 1 kg de cemento portland.

Tabla 3.7 Consumos energéticos por procesos para 1000 kg de cemento Portland. [kJ/kg de cemento].

Proceso	Electricidad	Combustible
Materias Primas	18,684	82,36
Trituración de Crudo	83,304	
Cocción del Crudo	163,728	3 305,36
Preparación de Combustible sólido	13,464	
Fabricación de Cemento	132,552	

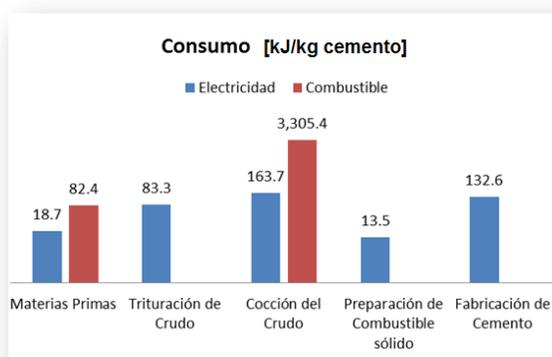


Fig. 3.1 Consumo energético por proceso.

Según Tabla 3.4 y la Fig. 3.1 de todos los consumos por procesos, los que muestran un consumo mayor son: trituración del crudo, cocción del crudo y preparación del cemento, debido al elevado

consumo eléctrico del molino de crudo, del horno y del molino de cemento respectivamente. En relación al consumo total de portadores energéticos el horno es el de mayor consumo eléctrico y calórico.

Para la realización de los cálculos para la determinación de los consumos energéticos para los cementos, se tomarán los valores promedios de los últimos 3 años por ser los de mayor representatividad respecto a los indicadores productivos y la introducción de la zeolita y la caliza en la producción de los cementos.

### 3.2 Producción de cemento por calidades, adiciones y volúmenes de clinker sustituido anualmente como promedio.

La producción de cemento anual se determina a partir de los reporte diarios de producción de los molinos de cementos, estos datos son procesados por el área de indicadores y registrados en la base de “DATOS PRODUCCIÓN ACUMULADA”. En la Tabla 3.7 se muestran las producciones de cemento por calidades, donde se observa que las producciones de cementos con baja adición representan más del 70 %.

Tabla 3.8 Producciones anuales de cemento por calidades.

año	Producción t				
	P-35	PP-35	PP-25	PZ-25	total
2017	460 809	0	145 678	0	606 487
2018	454 978	50 918	147 923	0	653 819
2019	436 956	111 571	0	14 957	563 484
2020 hasta mayo	134 911	77 728	0	49 139	261 778

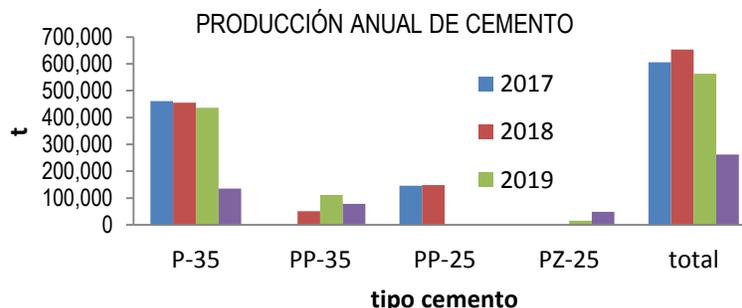


Fig. 3.2 Producción anual de cemento por calidades.

### 3.2.1 Adiciones medias de zeolita y caliza por tipo de cemento.

Como parte de su política de sostenibilidad, la Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A ha comenzado la producción y comercialización de cementos con adición de calizas y tobas puzolánicas P-35, PP-35 y PZ-25, que reducen significativamente el consumo de portadores energéticos así como el nocivo impacto que tiene la generación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. La continuidad y estabilidad de estas producciones están garantizadas a partir de las suficientes reservas de calizas y material puzolánico con gran actividad, clinker de elevada calidad y tecnología adecuada para la producción de estos cementos mezclados.

Los contenidos medios por calidades de los componentes del cemento, fueron obtenidos de las pruebas de laboratorio de control de proceso de Cementos Cienfuegos y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.9 Contenido medio de materiales en el cemento para las distintas calidades.

	contenido			
	clinker	yeso	caliza	toba
P-35	0,90	0,051	0,032	0,015
PP-35	0,78	0,055	0,029	0,140
PP-25	0,72	0,051	0,031	0,204
PZ-25	0,67	0,059	0,032	0,236

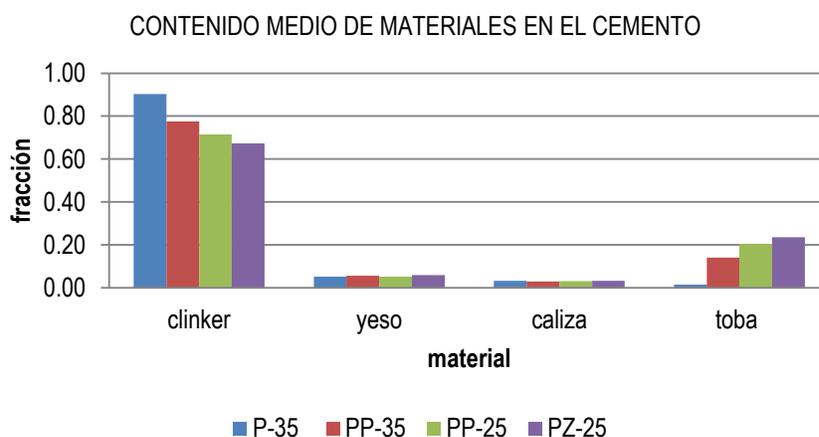


Fig. 3.3 Fracción medio de materiales en el cemento para las distintas calidades.

De la figura anterior, se puede observar que el contenido de caliza y yeso tienen una tendencia estable en su composición independientemente del tipo de cemento, no siendo así para el caso

del clinker que disminuye su composición en la misma medida que se aumenta el contenido de zeolita.

### 3.3 Determinación de los índices de consumos de combustibles por tonelada de material del transporte de aditivo del cemento.

Para los índices de consumo de combustible por tonelada de material se determinará a partir de la capacidad de carga del transporte utilizado en el trasiego de los adictivos caliza y zeolita, así como, las distancias desde las canteras y los índices de consumo del transporte, con el objetivo de obtener los consumos adicionales de combustibles del transporte para producir una tonelada de cemento con una determinada adición.

Para ello se utilizará la siguiente expresión:

$$C_{material_i}^{diesel} = (IC_i^{transporte} * d_i^{recorrida}) / CC_{transporte} \quad (1)$$

Dónde:

$C_{material_i}^{diesel}$ : consumo de diésel por t de material i l/t

$IC_j^{transporte}$ : índice de consumo del transporte j l/km

$d_i^{recorrida}$ : distancia recorrida desde la cantera km

$CC_{transporte}$ : capacidad de carga t

Tabla 3.10 Consumo de diésel para los tipos de transporte.

Tipo transporte	Índice de consumo l/km	Capacidad de carga t
Camión ASTRA	1,65	30
TEREX	4,5	20

Tabla 3.11 Distancias a las canteras.

Cantera	Distancia km
caliza	2
zeolita	28

Para el trasiego de zeolita se utilizan los camiones ASTRA por lo que el índice de consumo de diésel por tonelada de material calculado por la ecuación (1) es de 1,54 l/t, en el caso de la caliza este valor es de 0,45 l/t.

Para determinar el consumo de diésel durante la barrenación se utiliza la siguiente expresión:

$$C_{barrenación}^{diésel} = c/V * \rho \quad (2)$$

Dónde:

$C_{barrenación}^{diésel}$ : consumo de diésel por barrenación l/t  
 c: consumo de combustible para 1 m de barrenación l  
 V: volumen de material volado por barreno m<sup>3</sup>  
 ρ: densidad del material t/m<sup>3</sup>

Aplicando la ecuación (2) e obtienen consumos de combustibles en canteras que se muestran en la siguiente tabla. En este caso se lleva del diésel/t a l fuel-oíl/t.

Tabla 3.12 Consumo total combustible canteras para los distintos materiales.

Actividad	cantera caliza	cantera marga	cantera perdigón	cantera toba	unidad
barrenación	30	50		50	t/m
	1,5	1,9		1,9	l/m
transporte	0,45	0,77	2	1,66	l/t
TOTAL	0,05	0,038	1	0,038	l diésel/t
	<b>0,053</b>	<b>0,040</b>	<b>1,056</b>	<b>0,040</b>	<b>l fuel-oíl/t</b>

En la siguiente tabla se muestran los consumos de combustible necesario para producir una tonelada de clinker, estos valores se determinan a partir del contenido de estos materiales de canteras en la harina necesaria para producir una tonelada de clinker

### 3.13 Consumo de fuel oíl para producir una tonelada de clinker.

l fuel-oíl/ t ck	caliza	0,04
	zeolita	0,06
	marga	
	perdigón	0,01
	<b>total</b>	<b>0,11</b>

### 3.4 Disponibilidad de estos aditivos para garantizar la sostenibilidad de la producción de cementos.

En Cuba, los recursos pronósticos de tobas zeolitizadas, alcanzan el orden de los 430 MMTM, diseminados por todo el país. Según los datos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales ONRM, en el período 2007 ÷ 2008, se reportan más de 22 yacimientos, de los cuales alrededor de 8 están siendo explotados para diferentes aplicaciones. El yacimiento Caimanes, situado en la región de Moa, es el tercer depósito en cantidad de reservas con 36,0 MMTM, sin embargo

aún no se aprovecha todas sus potencialidades para su aplicación. Estudios recientes han confirmado su posibilidad de empleo como aditivo puzolánico en su forma natural (Almenares, 2011), aunque no con una alta reactividad.

En el caso de cementos Cienfuegos S.A. las reservas de toba zeolitizada están valoradas en 145,0 MMTM. Por su parte el yacimiento de caliza posee una reserva de 226,6 MMTM y el material es trasladado hasta la fábrica por camiones y esteras transportadoras, ninguno de los dos materiales la utilización como aditivo al cemento compromete la vida útil de la cantera para la operación de la planta en las condiciones actuales.

### **3.5 Índices de consumo calórico y eléctrico para el secado de la caliza y la zeolita en el área de materias primas.**

Los índices de consumo calórico se determinan en cada turno de trabajo a partir de la producción total del material que pasa por el secador y el valor integrado del consumo de combustible de los pistones (dosificadores de combustible). De igual forma se determina el índice de consumo eléctrico, con el volumen de producción y las lecturas de los contadores de energía del secador. Al final del día se determina el índice de consumo total y se registra en la base “DATOS PRODUCCIÓN ACUMULADA”.

En la Tabla 3.14 se muestran los índices de consumo eléctrico y calórico medios para la caliza y la toba (zeolita).

Tabla 3.14 Índices de consumo eléctrico y calórico de la zeolita y caliza.

material	Calórico	Electricidad
	kcal/t	kWh/t
caliza	16 000	6,63
toba	22 000	8,26

De la tabla anterior se demuestra que la mezcla de toba más caliza requiere una mayor cantidad de energía térmica para su secado (~2,18 veces) debido a la característica de la toba de tener un poder de absorción de agua mucho mayor que la caliza (más hidrófuga). En relación con la energía eléctrica aunque en menor proporción se mantienen este mismo comportamiento debido a que la zeolita tiene que permanecer mayor tiempo en el secador.

### 3.6 Índices de consumo calórico y eléctrico por tonelada de clinker en el horno.

Los índices de consumo calórico y eléctrico se determinan en cada turno de trabajo a partir de la producción total del clinker. Para determinar la producción de clinker se toman los valores de las toneladas de harina crudo que envía al precalentador mediante los pistones y se divide entre el factor crudo clinker (1,78).

Este valor crudo clinker nos da la cantidad de harina que se necesita para hacer una tonelada de clinker. En todos los casos la cantidad de harina es mayor que la cantidad de clinker, esto se debe a que junto con la harina vienen materiales orgánicos y agua que son eliminados de la masa durante el proceso, además durante la descarbonatación del  $\text{CaCO}_3$  se emite  $\text{CO}_2$ . El consumo eléctrico incluye a todos los procesos involucrados en la producción de clinker (Dosificación, molienda, homogenización y clinkerización) y se determina de las lecturas de los contadores de energía instalados en los diferentes subestaciones a las que están conectados los diferentes equipos de estas áreas. Al final del día se determina el índice de consumo total y se registra en la base “DATOS PRODUCCIÓN ACUMULADA”.

Tabla 3.15 Consumo calórico y eléctrico en la producción de clinker

material	Caloric	electricidad
	kcal/t	kWh/t
clinker	779 900	48,75

### 3.7 Índices de consumo eléctrico en la molienda de cemento para diferentes adiciones.

El índice de consumo eléctrico en la molienda de cemento se obtiene a partir del valor de la producción de cemento por calidades en un turno de trabajo y la cantidad de energía eléctrica gastada en el trasiego, dosificación de aditivos (clinker, yeso, toba y caliza), molienda de cemento y las bandas transportadoras de cemento hasta los silos. El mayor consumo de energía se produce en los motores del molino de cemento con potencia de 6 kV, los que se mantienen en funcionamiento 18 h al día y son los encargados de mover la gran masa de los cuerpos molidores y del molino. Los valores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.16 Índices de consumo eléctrico por calidades para los molinos de cemento.

Tipo de cemento	MOLIENDA		
	kWh/t		
	Molino Cemento 2	Molino Cemento 1	media
P-35	36,31	34,33	35,32
PP-35	32,91	31,40	32,15
PP-25	0,00	26,75	26,75
PZ-25	29,45	28,34	28,90

De la tabla anterior se tiene que el consumo eléctrico del molino 2 es superior al del molino 1 a pesar de ser del mismo tipo y capacidad, esto se debe a que el molino 1 fue sometido a una inversión y le fue instalado un nuevo reductor y el motor fue reemplazado por otro de mayor eficiencia, además el circuito de separación está en mejoras condiciones técnicas.

### **3.8 Determinación de los índices de consumo de agua en la producción de cemento y clinker, así como el consumo de electricidad.**

En la planta el consumo de agua se produce principalmente en el enfriamiento de los equipos tecnológicos principales y en los sistemas de desempolvado de los electrofiltros, estos volúmenes de agua a pesar de mantenerse en un circuito cerrado de enfriamiento se producen pérdidas en la torre de enfriamiento por formación de neblinas y arrastres durante el rociado. En el caso de los sistemas de desempolvado del electrofiltros esta agua se pierde debido a su inyección en la mezcla de gases para su enfriamiento.

En este sentido existen pérdidas del inventario de agua circulante, por lo que es necesario que el bombeo de agua compense estas pérdidas del ciclo y por tanto aumente el consumo eléctrico por este concepto.

Principales puntos de consumo de agua.

En los molinos se consume agua en el enfriamiento de las chumaceras y en los reductores de los molinos según se muestra en las Fig. 3.4 y Fig. 3.5.

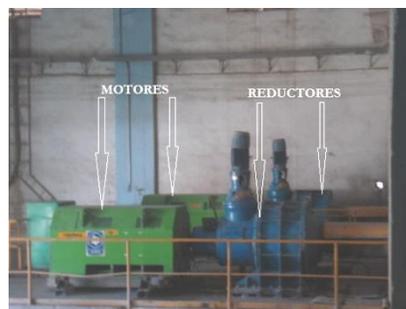


Fig.3.4. Chumacera de molino de crudo. Fig. 3.5 Motores y Reductores de los molinos de crudo y cemento.

Por su parte en el área de prioproceso también se consume agua para el enfriamiento (circuito cerrado) de equipamiento (Fig. 3.6), (Fig.3.7). Las mayores pérdidas de agua en este sistema se producen en las torres estabilizadoras de los electrofiltros, por evaporación directa y su posterior expulsión a la atmósfera.



Fig. 3.6 Sistema de enfriamiento de los rolos del Horno.

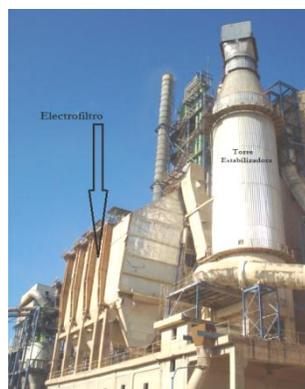


Fig. 3.7 Electrofiltro y Torre Estabilizadora.

Este indicador se mide por el consumo eléctrico de las bombas de agua ubicadas en la estación de situado en Codica (8 km) y el volumen de agua de los tanques de recepción ubicados en la fábrica, al finalizar el turno se mide el consumo de agua de los tanques y se le resta la cantidad de agua no asociada al proceso de producción mediante la lectura de los flujómetros ubicados en los sistemas tecnológicos, dando finalmente la cantidad de agua para producir 1 t de clinker. Para llevarlo a consumo de agua por tonelada de cemento se utiliza la siguiente expresión;

$$C_{cemento\ i}^{agua} = C_{ck}^{agua} * \%Ack \quad (3)$$

Donde:

$C_{cemento\ i}^{agua}$ : índice de consumo de agua en el cemento i  $m^3/cmto$ .

$$C_{ck}^{agua} : \text{índice de consumo de agua en el clinker} \quad m^3/tck$$

$$\%Ack : \text{contenido de clinker en el cemento}$$

Para determinar el consumo eléctrico asociada al bombeo de agua consumida por t de cemento por calidades se utiliza la siguiente expresión.

$$C_{cemento i}^{elect} = C_{cemento i}^{agua} * KE \quad (4)$$

Donde

$C_{cemento i}^{elect}$  : consumo eléctrico por consumo de agua para el cemento i kWh/t

KE: consumo eléctrico por m<sup>3</sup> bombeado kWh/m<sup>3</sup>

Tabla 3.17 Índices de consumo eléctrico por calidades para los tipos de cemento.

Tipo de cemento	CONSUMO ELECTRICICO POR CONSUMO DE AGUA
	kWh/t
P-35	0,50057
PP-35	0,4711
PP-25	0,42
PZ-25	0,336

### 3.9 Adiciones medias de caliza y zeolita en los diferentes tipos de cemento.

La adición de toba y caliza se realiza mediante dosificadoras situadas sobre la banda de alimentación a los molinos de cemento cumpliendo con requisitos de cantidad según el tipo de cemento, estas cantidades dosificadas son monitoreadas mediante ensayos de calidad realizadas por el laboratorio de control de calidad. Los valores medios de dosificación que se alcanzan en Cementos Cienfuegos S.A. se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.18. Valores medios de dosificación de los aditivos toba y caliza.

Tipo de cemento	clinker	yeso	caliza	toba
P-35	0,9	0,051	0,032	0,015
PP-35	0,78	0,055	0,029	0,140
PP-25	0,72	0,051	0,031	0,204
PZ-25	0,67	0,059	0,032	0,236

En la tabla anterior se puede observar que en ninguna de las producciones de cemento se ha logrado alcanzar el máximo de adición de caliza y toba según lo establece la norma (ver 2.4), por lo que existe una potencialidad de seguir disminuyendo el contenido de clinker en el cemento.

### 3.10 Determinación del valor calórico promedio del petcoke y cantidad de fuel-oil equivalente al petcoke.

El valor calórico del petcoke se determina de los reportes de calidad entregados por el suministrador en cada embarque, en este trabajo se tomaron los promedios de los embarques recibidos en los años 2019 y 2020. El valor base seca es de 7 271 kcal/kg y el que será considerado para la totalidad de los cálculos.

Para la determinación de la equivalencia con el petcoke se tomó un poder calórico del fuel-oíl de 9 474 kcal/l y una densidad de 0,96 kg/l estos valores fueron suministrados por CUPET. En el caso de la energía eléctrica, es necesario determinar la cantidad de combustible que se consume para producir 1 kWh, para ello se parte del consumo medio de la generación del país 250 g/kWh.

$$(250 \text{ g/kWh}) \cdot 10^{-3} / (0,96 \text{ [kg/l fuel-oil]}) = 0,26 \text{ l fuel-oil/kWh.} \quad (5)$$

### 3.11 Evaluación energética de la producción de cemento.

Para la determinación del consumo de combustible para la producción de una tonelada de cemento según su calidad se tomarán en cuenta todos los gastos de combustible a lo largo del ciclo de vida de la cuna a la puerta. Para facilitar los cálculos, la energía tanto térmica como eléctrica se llevará a kcal para finalmente llevarlos a litros de fuel-oíl equivalente.

$$1 \text{ kcal} = 1,16 \text{ kWh}$$

Para facilitar los cálculos se determinarán los índices de consumo para producir una tonelada de clinker, y el consumo eléctrico en la producción de una tonelada de cemento según el tipo, y adicionalmente se determinará por separado los consumos energéticos para la preparación de los adictivos que se le adicionarán al cemento en este caso la caliza y la toba zeolitizadas. Las ecuaciones para la determinación de estos índices se describen a continuación.

$$CC = \sum_{ij}^k CC^i_j \quad (6)$$

Donde.

$CC$  : índice de consumo energético total por tonelada de clinker      kcal/tck  
 $CC^i_j$  : índice de consumo energético de la actividad j para el material i      kcal/tck

Finalmente para estandarizar los consumos se convertirán las kcal /t ck a l de fuel-oíl. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los consumos energéticos para el secado del aditivo y la producción de clinker. En dicha tabla se utiliza el índice de consumo de combustible pertcoke y se transfiere a l fuel-oíl. En el caso del consumo eléctrico se convirtieron los kWh a kcal para llevarlos a l fuel-oíl y poder finalmente estandarizar los resultados.

Tabla 3.19 Índices de consumo de energía en la preparación de los aditivos al cemento y la fabricación de clinker.

	Q (consumo de calor)		consumo combustible			consumo electricidad			Consumo total l fuel-oíl/t
	kcal/kg	kcal/t	kg petc/t	l fuel-oíl/t	kg fuel-oíl/t	kWh/t	kcal/t	l fuel-oíl/t	
<b>ADITIVOS</b>									
Caliza	16	16 000	2,201	1,7	1,621	5,23	4 496,99	1,36	<b>3,09</b>
Toba	22	22 000	3,026	2,3	2,229	7,26	6 242,48	1,89	<b>4,27</b>
<b>CLINKER</b>									
clinker	828,26	828 263,28	113,91	87,4	83,931	100,03	86 008,60	26,05	<b>113,59</b>

En la tabla anterior se incluye la cantidad de petcoke con un poder calórico medio de 7 272 kcal/kg necesaria para fabricar 1 t de clinker y se convierte a l fuel-oíl, para el caso de la energía eléctrica también se convierte a l de fuel-oíl a partir del consumo medio de la red nacional para producir 1 kWh. En este caso se demuestra que la producción de clinker (componente fundamental del cemento constituye la fuente de mayor consumo de energéticos en el cemento. En la siguiente tabla se muestra los consumos de combustibles asociados a la electricidad utilizada en la molienda por tipos de cemento.

Tabla 3.20 Consumo de combustibles por tipos de cemento asociada a la molienda de cemento.

<b>MOLIENDA DE CEMENTO</b>		
TIPO CEMENTO	kWh/t	l fuel-oíl/t
	media	media
P-35	35,41	9,22
PP-35	31,42	8,18
PP-25	28,53	7,43
PZ-25	29,26	7,62

La cantidad de combustible para la preparación de la mezcla de materiales necesarios para producir una tonelada de cemento por tipo, se determina a partir del consumo de combustible de cada material y ponderado por la fracción del material en la masa total de la mezcla. En la tabla siguiente se muestran los resultados de los cálculos.

Tabla 3.21 Consumo total de combustible en la preparación de la mezcla para los distintos tipos de cemento.

contenido				cemento	PREPARACIÓN						
clinker	yeso	caliza	toba		kcal/kg	kcal/t	kg petc/t	l fuel-oil/t	kWh/t	lfuel-oil/t	TOTAL
0,90	0,051	0,032	0,015	P-35	747,9	748 753,5	102,978	79,145	90,598	23,593	102,739
0,78	0,055	0,029	0,140	PP-35	642,6	646 193,1	88,781	68,224	78,553	20,457	88,681
0,72	0,051	0,031	0,204	PP-25	592,3	597 256,1	81,999	63,013	72,816	18,962	81,976
0,67	0,059	0,032	0,236	PZ-25	557,4	563 124,6	77,280	59,386	68,786	17,913	77,299

Finalmente si adicionamos el consumo de combustible asociado a la molienda obtendremos el consumo total de la producción de una tonelada de cemento en sus diferentes tipos. El valor final se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.22 Consumo de combustible total por tonelada de cemento.

Tipo de cemento	CONSUMO COMB TOTAL
	l fuel-oil/t
P-35	111,959
PP-35	96,861
PP-25	89,406
PZ-25	84,919

De la tabla anterior se observa que el cemento P-35 tiene un consumo muy superior al resto de los cementos, esto se debe en lo fundamental al mayor contenido de clinker en la mezcla, este material consume más del 80 % de los energéticos en el cemento tanto en calor como en electricidad, de ahí la importancia de su sustitución por otros aditivos que no introduzcan alteraciones en las propiedades del cemento. En este caso la caliza hasta un 5 % y la toba hasta un 35 % es una opción viable económica y técnicamente para disminuir los consumos energéticos.

Estos ahorros son respecto al cemento P-35 es para darnos cuenta que el aumento de la adición de caliza y toba en la producción de cementos aportan un ahorro significativo de combustible. Además para la producción de estos combustibles no hace falta inversión, solo modificar la estructura de producción y consumo en el país.

Tabla 3.23 Ahorros por sustitución de clinker en el cemento por toba y caliza.

	Q	E	Q	E	AHORROS
	kcal	kWh	kcal	kWh	l fuel-oil
1 t de caliza	16 000	5,230	812 263,3	94,798	110,497
1 t de toba	22 000	7,26	806 263,3	92,768	109,317
1 t de clinker	828 263	100,03	0,0	0,000	0,00

Ahorros respecto a la producción de 1 t de P-35.

1t	PP-35	15,098
	PP-25	22,553
	PZ-25	27,4

Si sustituyéramos el consumo de P-35 por otros tipos de cemento según las necesidades y prestaciones tendríamos ahorros entre 15 l fuel-oil/t y 27 l fuel-oil/t de cemento consumido. La producción de cementos con mayores contenidos de caliza y toba que los actualmente comercializados conocidos como cementos ternarios (TPC-25 y TPC-35) introducirá una sensible disminución de los consumos energéticos y contribuirán sustancialmente a la sostenibilidad de la industria del cemento. En la siguiente tabla se muestra los consumos energéticos de estos tipos de cementos.

Tabla 3.24 Consumo total de combustible utilizados en la preparación de la mezcla para los cementos ternarios.

contenido				cemento	PREPARACIÓN						
clinker	yeso	caliza	toba		kcal/kg	kcal/t	kg petc/t	l fuel-oil/t	kWh/t	l fuel-oil/t	TOTAL
0,60	0,060	0,100	0,240	<b>TPC-35</b>	497,0	503 838	69,179	53,161	61,998	16,145	69,306
0,48	0,070	0,150	0,300	<b>TPC-25</b>	397,6	406 566	55,792	42,873	50,671	13,196	56,069

Tabla 3.25 Consumo de combustible total incluyendo la molienda.

Tipo de cemento	CONSUMO COMB TOTAL
	l fuel-oil/t
TPC-35	76,876
TPC-25	63,639

### 3.12 Representación de los consumos energéticos en gráficos de ciclo de vida.

Para realizar una estandarización de los consumos energéticos y materiales en la fabricación de clinker y facilitar la comparación con otras plantas cementeras tanto nacionales como del resto del mundo se realizaron los gráficos de ciclo de vida donde se reflejan los principales indicadores

que permitan evaluar la eficiencia de las operaciones tecnológicas y por supuesto los indicadores de eficiencia energética.

Para la realización de este estudio se tomaron como referencia los valores de producción estándares de la planta promediados en los últimos 5 años y que se muestran en la tabla siguiente.

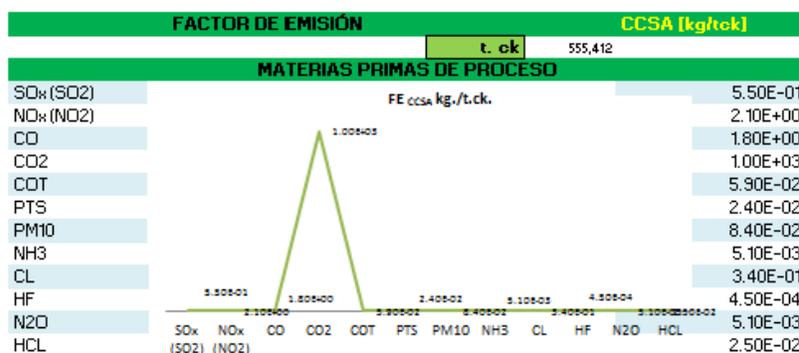
Tabla 3.26 Masa minera para producir 1 t de clinker.

MATERIAS PRIMAS	% mezcla	factor crudo clinker	Masa kg
Caliza	75,11	1.72	1 291,892
Marga+Toba	23,61		406,092
Perdigón	1,28		22,016
TOTAL			1 720

El resto de los valores son el resultado de los obtenidos en los epígrafes anteriores. En este caso se han incluidos las emisiones de gases producto de la combustión y de la del CO<sub>2</sub> producto de la descarbonatación del CaCO<sub>3</sub> presente en la piedra caliza.

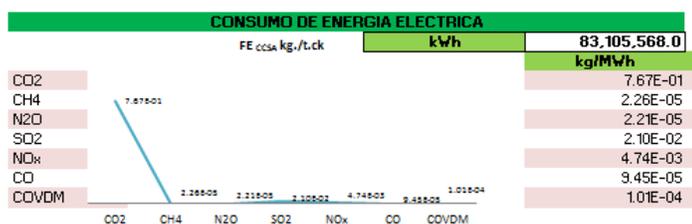
Los factores de emisión considerados para determinar las emisiones han sido determinados a partir de los resultados del programa de monitoreo ambiental realizado por el Laboratorio del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos durante más de 15 años y que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.27 Factores de emisión para la producción de 1 t de clinker.



Las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica de la red nacional se determinan a partir de los factores de emisión de la red y que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.28 Factores de emisión para el consumo de 1kWh de energía eléctrica de la red nacional.



### 3.12.1 Impactos ambientales asociada a la reducción de los consumos de portadores energéticos en la producción de cementos con adición de caliza y toba.

En relación a los impactos ambientales, la producción de clinker (componente fundamental del cemento) genera emisiones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> por combustión en el secado de las materias primas y la clinkerización e importantes cantidades de CO<sub>2</sub> durante la descarbonatación del CaCO<sub>3</sub>, en total considerando tanto la combustión como la descarbonatación se emiten 981 kgCO<sub>2</sub>/t clinker y 3 kgSO<sub>2</sub>/t clinker.

Por su parte, en el secado de la caliza se emiten 13,2 kg CO<sub>2</sub>/t y 0,13 kg SO<sub>2</sub>/t, y para la toba 6,94 kg CO<sub>2</sub>/t y 0,07 kg SO<sub>2</sub>/t. Por tanto al sustituir 1 t de clinker por caliza se dejan de emitir 904,68 t CO<sub>2</sub> (92,2 %) y 911,06 t CO<sub>2</sub> (93 %) para el caso de la toba puzolánica. Un comportamiento similar lo se produce para el SO<sub>2</sub>, por cada t de clinker sustituida por caliza se dejan de emitir 0,13 t SO<sub>2</sub> y 0,07 t SO<sub>2</sub> para el caso de la toba puzolanica.

Tabla 3.29 Emisiones en la producción de cemento con adición de caliza y toba puzolanica.

Emisión producción de clinker kg/t			
Gas	combustión	Descarbonatación	total
CO <sub>2</sub>	341,8	575	981
SO <sub>2</sub>	3	0	3
emisión por secado kg/t			ahorros al sustituir clinker
caliza	CO <sub>2</sub>	13,32	904,68
	SO <sub>2</sub>	0,13	2,87
toba	CO <sub>2</sub>	6,94	911,06
	SO <sub>2</sub>	0,07	2,93

Finalmente en los siguientes gráficos se muestran los resultados del estudio energético para la producción de cemento por tipos en la empresa Cementos Cienfuegos S.A.

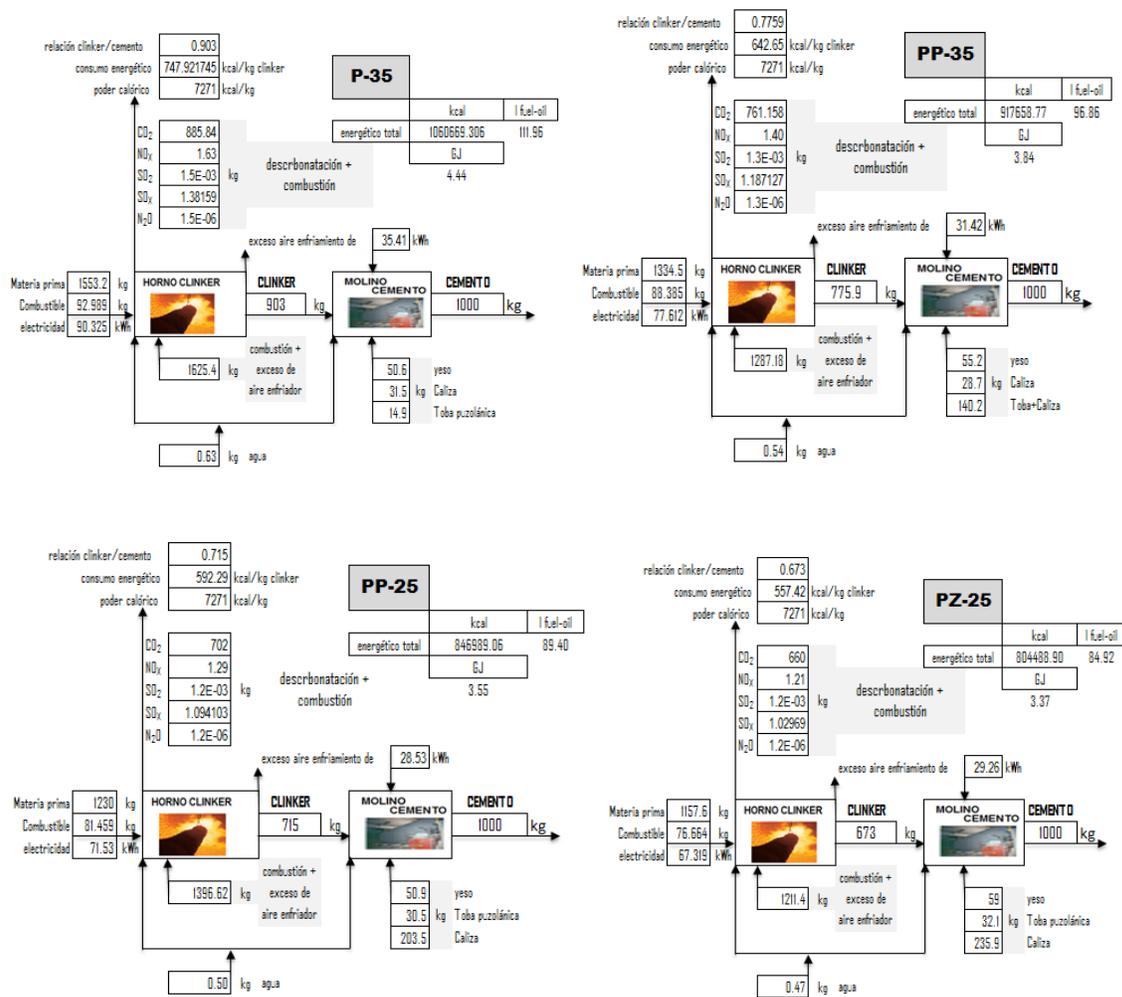


Fig. 3.8 Resultados de los estudios energéticos por tipos de cemento.

### 3.13 Evaluación energética y económica de la propuesta de variación de la estructura de producción de cemento en la empresa.

Para la realización de esta evaluación se parte de la estructura de producción media de los últimos 3 años y que es muy similar a la del 2018, utilizando los factores de consumo de electricidad, agua y combustibles medios en igual período. La nueva estructura de producción está fundamentada en la necesidad de disminuir los consumos de portadores energéticos y sus costos asociados que representan el 75 % del total, con el objetivo de aumentar la rentabilidad

de la empresa y disponer de recursos financieros generados de los ahorros para la capitalización de la empresa mediante el financiamiento con los fondos de ahorros de nuevas inversiones.

Tabla 3.30 Consumo eléctrico y gastos por ese concepto.

Cemento tipo	Producción anual 2018	fracción de clinker	contenido de clinker	factor de consumo de electricidad	electricidad consumida	costo electricidad	Gasto electricidad
	t		t		kWh/tck		kWh
P-35	465 905	0,903	420 712	48,75	20 509 720	0,12	2 461 166
PP-35	16 918	0,7759	13 127		639 925		76 791
PP-25	147 923	0,7151	105 780		5 156 762		618 811
PZ-25	0	0,6722	0		0		0
Total	630 746		539 619		26 306 408		3 156 769

Tabla 3.31 Consumo de agua y gastos por ese concepto.

Cemento tipo	Producción anual 2018	contenido de clinker	factor de consumo de agua	Agua consumida	costo agua	Gasto en agua
	t			t		m³/tck
P-35	465 905	420 712	0,7	294 499	0,10	29 450
PP-35	16 918	13 127		9 189		919
PP-25	147 923	105 780		74 046		7 405
PZ-25	0	0		0		0
Total	630 746	539 619		377 733		37 773

Tabla 3.32 Consumo de combustible y gastos por ese concepto.

Cemento tipo	Producción anual 2018	factor de consumo de petcoke	consumo de petcoke	costo petcoke	Gasto en petcoke
	t		t comb/tck		t
P-35	465 905	0.11	47 925	100	4 792 470
PP-35	16 918		1 495		149 530
PP-25	147 923		12 050		1 204 971
PZ-25	0		0		0
Total	630 746		61 470		6 146 971

Por otro lado los combustibles que utiliza la empresa: el petcoke es un combustible importado que genera una derogación de divisas libremente convertibles que nuestro país tiene que destinar a los precios fluctuantes del mercado internacional. Desde el punto de vista energético la producción de cemento es un proceso energointensivo con altos consumos de este tipo de energético donde además se consume para su producción grandes cantidades de combustibles fósiles que pudieran ser destinados a otras ramas incluyendo la residencial para generar recursos y bienestar a la población y al país.

La nueva estructura que se propone básicamente consiste en sustituir los cementos actuales con bajo contenido de aditivos por otros de similares características y prestaciones que pueden ser utilizados en las construcciones del país y que por sus propiedades son más ventajosos que los cementos con baja adición principalmente porque las adiciones de toba mejoran la resistencia a los sulfatos aumentando la durabilidad de los hormigones. Esto ha sido demostrado por los ensayos de laboratorio del país y por la experiencia internacional en el uso de estos cementos. En nuestro caso se pretende sustituir hasta un 70 % del total de la producción de cemento P-35 por el PP-35 y eliminar la producción del PP-25 sustituyendo el volumen anual de producción por el PZ-25. Bajo estas condiciones los valores de consumo de portadores energéticos se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 3.33 Ahorros generados en la producción de clinker.

Cemento tipo	Producción anual 2018	fracción de clinker	contenido de clinker	fracción producción propuesta	contenido de clinker
	t		t	%	t
P-35	465 905	0,903	420,712	0,3	126 214
PP-35	16 918	0,7759	13,127	0,7	253 047
PP-25	147 923	0,7151	105,780	0	0
PZ-25	0	0,6722	0	1	99 434
Total	630 746		539,619		478 694
<b>AHORRO</b>					<b>60 924</b>

El ahorro de 60 924 t de clinker que no será necesario producir para lograr el mismo volumen de producción de cemento total se traduce en los siguientes ahorros de portadores energéticos ya que como se ha mencionado más arriba constituye el producto intermedio que más gasto energético necesita para su obtención en el proceso.

Tabla 3.34 Ahorros generados en el consumo eléctrico.

Cemento tipo	Producción anual 2018	fracción de clinker	fracción producción propuesta	contenido de clinker	factor de consumo de electricidad	electricidad consumida	costo electricidad	Gasto electricidad
	t		%	t	kWh/t <sub>ck</sub>	kWh	CUC/kWh	CUC
P-35	465 905	0,903	0,3	126,214	48,75	6 152 916	0,12	738 350
PP-35	16 918	0,7759	0,7	253,047		12 336 040		1 480 325
PP-25	147 923	0,7151	0	0		0		0
PZ-25	0	0,6722	1	99,434		4 847 400		581 688
Total	630 746		AHORROS	478,694		23 336 356		2 800 363

Tabla 3.35 Ahorros generados en el consumo de agua.

Cemento tipo	Producción anual 2018	fracción de clinker	fracción producción propuesta	factor de consumo de agua	consumo de agua	costo agua	Gasto en agua
	t		%	m <sup>3</sup> /tck	m <sup>3</sup>	CUC/m <sup>3</sup>	CUC
P-35	465 905	0,903	0,3	0,7	88 350	0,1	8 835
PP-35	16 918	0,7759	0,7		177 133		17 713
PP-25	147 923	0,7151	0		0		0
PZ-25	0	0,6722	1		69 604		6 960
Total	630 746	AHORROS			42 647		4 265

Tabla 3.36 Ahorros generados en el consumo de combustible.

Cemento tipo	Producción anual 2018	fracción de clinker	fracción producción propuesta	factor de consumo de petcoke	consumo de petcoke	costo petcoke	Gasto en petcoke
	T		%	t comb/tck	t	CUC/t	CUC
P-35	465 905	0,903	0,3	0,11	14 377	100	1 437 741
PP-35	16 918	0,7759	0,7		28 825		2 882 541
PP-25	147 923	0,7151	0		0		0
PZ-25	0	0,6722	1		11 327		1 132 683
Total	630 746	AHORRO			6 940		694 007

La producción de los cementos con adición de tobas puzolánica según la estructura propuesta, permite producir la misma cantidad de cemento total y disponer de un excedente de clinker de 60,924 t. si no lo producimos nos ahorramos los costos asociados al consumo de energéticos y materias primas.

En caso de producirlos y lo llevamos a cemento podemos adicionalmente producir 85 000 t de cemento (39 260 t de PP-35 y 45 320 t de PZ-25), con una reducción de los costos del 60 %.

Si adicionamos hasta un 5 % de caliza a los cementos PP-35 y PZ-25 obtendríamos un incremento adicional del 5 % (3 046,2 t) en la disponibilidad de clinker para convertirlo en cemento.



# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

1. El principal impacto económico y ambiental de la industria del cemento a nivel mundial lo constituye el consumo de portadores energéticos y la emisión de gases de efecto invernadero y dentro de este, el proceso de clinkerización es el de mayor consumo térmico. Por su parte la molienda de crudo y cemento son los mayores consumidores de energía eléctrica debido a la potencia de los motores y el tiempo de trabajo.
2. Cementos Cienfuegos S.A. es una cementera con buenos indicadores de consumo eléctrico y térmico por tonelada de clinker y cemento con potencialidad de disminuir aún más estos indicadores con la adición de zeolita y caliza al cemento.
3. La sustitución de los cementos tradicionales P-35 y PP-25 por los PP-35 y PZ-25 con adiciones de caliza y toba puzolánica de 5 % y 30 % respectivamente disminuyen el consumo de combustible entre 15 l de fuel-oíl/t y 27 l de fuel-oíl/t de cemento producido por lo que representa una acción necesaria e inmediata de sostenibilidad económica y ambiental para el país.
4. La variación de la estructura de producción actual con un incremento de los volúmenes de producción de los cementos PP-35 y PZ-25 aumentan la disponibilidad de clinker y por consiguiente la producción de cemento en el país sin necesidad de ejecutar nuevas inversiones ni consumo adicional de combustibles y electricidad.
5. Los gráficos de consumo de portadores energéticos y materiales sobre la base del ciclo de vida representan una opción para resumir las principales variables que facilitan la toma de decisiones para la producción de cementos por calidades.



# RECOMENDACIONES

## **RECOMENDACIONES.**

1. Utilizar la metodología desarrollada en este trabajo en el resto de las plantas cementeras del país para determinar los indicadores de consumo de combustibles específicos para cada tipo de cemento según su calidad, con el objetivo de evaluar la gestión energética e identificar las acciones para reducir el consumo de combustible en la empresa .
2. Utilizar el parámetro de combustible equivalente para poder intercomparar los consumos de combustibles tanto calórico como eléctrico entre las distintas plantas del país con diferentes matrices energéticas.

A decorative vertical element on the left side of the page, consisting of three parallel lines of varying shades of blue. The outermost line is a medium blue, the middle line is a lighter blue, and the innermost line is a very light blue.

# BIBLIOGRAFIA

## **BIBLIOGRAFÍA.**

2010. (Mitigating Emissions From Cement). *Columbia Climate Center, Earth Institute Columbia University, United State of American (USA)*.  
<http://climate.columbia.edu/files/2012/04/GNCS-Cement-Factsheet.pdf>
- Alujas, A. (2010). *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. (Tesis de Doctorado), Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Arena, P. (2017). Un instrumento para el análisis y evaluación ambiental de productos y tecnologías. El análisis de ciclo de vida, II–Adecuación para el sector edilicio. 1-10.
- ASTMC150. (2017). Standard Specification for Portland Cement. Pensilvania, United States of American (USA).
- Cancio, Y., Sánchez, S., Heierli, U., Aurélie, R., Inocencio, R., Sánchez, K., . . . Habert, G. (2016). Limestone calcined clay cement as a sustainable solution to meet expanding cement demand in emerging economies. (Artículo en proceso de publicación.).
- Carratalá, F. A. (2015). Arcillas caoliníticas en la región norcentral de cuba para su uso en la fabricación del cemento LC<sup>3</sup>. Presentación power point.
- Conesa, J., Rey, L., Egea, S., & Rey, M. (2011). Pollutant Formation and Emissions from Cement Kiln Stack Using a Solid Recovered Fuel from Municipal Solid Waste. *Environmental Science & Technology*, 45, 5878-5884.
- Chennoufi, L. H., Hilary, G., Breisinger, M., & Boulet, E. (2015). Enfoque para la reconciliación del financiamiento de fábricas de cemento con objetivos referentes al cambio climático, IDB Publications.
- DANE. (2018). Estadísticas de Cemento Gris- Ecg, Colombia.
- EPA. (2018). *Carbon Dioxide Capture and Sequestration*. Washington D.C: United States Environmental Protection Agency (EPA).
- Faulín, J., & Juan, A. A. (2017). Introducción a la investigación operativa (Proyecto e- Math financiado por la Secretaría de Estado de Educación & Universidades (MECD)).  
[http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/\[ntroJO.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/[ntroJO.pdf)
- FICEM. (2019). Informe estadístico Cemento. from  
[www.ficem.org](http://www.ficem.org)InternationalEnergyAgency
- GECEM. (2015). Diagnostico del Grupo Empresarial del Cemento.

- Githachuri, K., & Alexander, M. G. (2018). Durability performance potential and strength of blended Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 39, 115-121.
- . THE GLOBAL CEMENT REPORT. (2017). Tradeship Publications. International cement review Edición VIII. Surrey, England.
- Godoy-Fernández, O. (2006). Desarrollo y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos.
- González, M. (2015). *Estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental de la producción de cemento con adición de puzolana y caliza en Cementos Cienfuegos S.A.* Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos.
- Haymarí, G. M. (2017). Roca sedimentaria. Caliza. Quebrada Segovia. Boconó. Perteneciente a La Formación Capacho. Universidad de Málaga, Venezuela.
- Holcim. (2015). Holcim Premium. Cemento hidráulico Tipo HE de alta resistencia inicial.: Holcim Ecuador S.A.
- Hoyos, A. A., Puertas, F., & Tobón, J. I. (2018). Microcalorimetric Study of the Effect of Calcium Hydroxide and Temperature on the Alkaline Activation of Coal Fly Ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(3), 2395-2410 doi: 10.1007/s10973-017-6715-4
- IFC. (2018a). Environmental, Health, and Safety (EHS) Guidelines. Environmental Energy Conservation.
- IFC. (2018b). Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad. Fabricación de Cemento y Cal.
- ISO14045. (2017). Environmental management, Ecoefciency assessment of product systems, Principles, requirements and guideline. 1-38.
- JRC. (2010). Cientific and Technical Reports. Energy Efficiency and CO2 Emissions: Prospective Scenarios for the Cement Industry. [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC59826/reqno\\_jrc59826\\_as\\_published\\_jrc59826\\_jrc2010energy\\_efficiency\\_and\\_CO2\\_emissions\\_prospective\\_scenarios\\_for\\_the\\_ce%5b1%5d.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC59826/reqno_jrc59826_as_published_jrc59826_jrc2010energy_efficiency_and_CO2_emissions_prospective_scenarios_for_the_ce%5b1%5d.pdf)

- Kawai, K., & Osako, M. (2015). Reduction of natural resource consumption in cement production in Japan by waste utilization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 14(2), 94-101. doi: 10.1007/s10163-012-0042-4
- León, R. M. (2010). *Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la producción de cemento: Caso de estudio Cementos Cienfuegos S.A.* (Tesis de Grado), Universidad de Cienfuegos, Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Marzouki, A., Lecomte, A., Beddey, A., Diliberto, C., & Ouezdou, M. B. (2017). The effects of grinding on the properties of Portland-limestone cement. *Construction and Building Materials*, 48, 1145-1155.
- Meddah, M. S., Lmbachiya, M. C., & Dhir, R. K. (2016). Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production. *Construction and Building Materials*, 58, 193-205.
- Mendieta, M. P. (2013). Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación (NAMAs) en Colombia Bogotá. Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia.
- Molina, J. V. (2014). *Estudio de pre factibilidad de la producción de Cemento de Bajo Carbono en la fábrica de cemento Siguaney.* (Tesis de Grado), Universidad "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Nicolas, M. (2015). Poner la técnica al servicio de la ecología. Nuevo estudio en industria de cementos cubanos, Opciones. <http://www.opciones.cu/cuba/2015-02-18/poner-la-tecnica-al-servicio-de-la-ecologia/>
- Nodarse, M. (2014). Cementos Cienfuegos S.A. Argumentos para explicar la vida <http://guanarocadelsur.blogspot.com/2014/02/cementos-cienfuegos-sa-argumentos-para.html>
- Osorio, A., Marín, J., & Restrepo, G. (2017). Diseño y Evaluación Energética de dos Circuitos de Molienda y Clasificación para un Clincker de Cemento a Escala Piloto. *Información Tecnológica*, 24(2), 99-108 doi: 10.4067/S0718-07642013000200011
- Pérez, L. (2016). Evaluación de cementos de bajo carbono producidos localmente con sustitución del 50 % de cemento P-35 por adiciones de polvo de cerámica roja y caliza. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba. from <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7404/TESIS%20Lizabeth%20Perez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ramírez, J. P. (2015). *Proyección de las capacidades productivas cementeras ante escenarios diversos derivados del despliegue inversionista cubano*. (Tesis de Grado), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Ruiz, Y. (2015). *Análisis de Ciclo de Vida y Ecoeficiencia de la producción de cemento en la fábrica de Siguaney*. (Tesis de Maestría), Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba.
- Sánchez, I., Oshiro, A., & Positieri, M. (2012). Contribución de la Reducción de La Huella Ecológica Del Hormigón. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16.
- Sánchez, S., Favierb, A., Rosa, E., Sánchez, I., R, Machado, U., Heierlic, K., . . . Habert, G. (2016). Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 124, 361-369.
- Sanjuán, M. (2007). Los Cementos de adición en España del 2000 al 2005. 4-55.
- Suárez, F. (2015). Estudio de la resistencia a la compresión del hormigón con adición de puzolana obtenida de la calcinación de residuos del cultivo de maíz producido en la provincia de Santa Elena. Universidad Estatal Península de Santa Elena. <http://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/2272/1/UPSE-TIC-2015-009.pdf>
- Suppen, N. (2005). Conceptos básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación en el Ecodiseño Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable. 1-39.
- UNE-EN15804. (2014). Sostenibilidad en la Construcción. Declaraciones Ambientales de Producto. Reglas de Categoría de Producto Básicas para Productos de Construcción. Madrid, España
- Valencia, U. (2014). ¿Cuánto CO2 se emite cuando empleamos hormigón? . <http://horsost.blogs.upv.es/tag/cemento-con-adiciones/>
- Viduad, E. (2013). De la historia del cemento. Construcción tecnología y concreto.
- Vizcaíno-Andrés, L., Sánchez-Berriel, S., Damas-Carrera, S., Pérez-Hernández, A., Scrivener, K., & Martirena-Hernández, J. (2015). Industrial trial to produce a low Clinker, low carbon Cement. *Materiales de Construcción* 65(317 January–March 2015). <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.00614>
- Worrell, E. (2008). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. . <https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Guide>

[%20for%20the%20Cement%20Industry%2027\\_08\\_2013\\_Rev%20js%20reformat%2011192014.pdf](#)



ANEXOS

## **ANEXOS.**

### **ANEXO I. FILOSOFÍA Y VALORES DE LA EMPRESA**

#### **VALORES:**

Seguridad: “Declaración de Seguridad.”

“El uso del equipo de seguridad, la observación preventiva en busca de condiciones inseguras, y la abstención de cometer actos inseguros, es la norma de conducta de todos los trabajadores de la fábrica, que nos permitirá conservar la integridad física de todos, trabajadores, proveedores y visitantes.”

Rentabilidad: “Es el oxígeno que permite a nuestra empresa seguir viviendo.”

Productividad: Eficiencia + Eficacia = Productividad:

Medio Ambiente: Estamos comprometidos con el medio ambiente en las actividades que realizamos. Salvaguardar el medio ambiente.... Es un principio rector de todo nuestro trabajo

Disciplina y Trabajo en Equipo: “Juntos perseguimos un objetivo en común, la participación y ayuda mutua son factores esenciales”

Confianza: “Conseguiremos lo que deseamos, pues confiamos en la integridad, el carácter y la habilidad de nuestros líderes y colaboradores: **PODEMOS PORQUE CREEMOS**

Gestión de excelencia y Calidad: “Para nosotros la calidad nunca es un accidente; es la gestión de excelencia en todo lo que hacemos, es el resultado de un esfuerzo de la inteligencia: **HAREMOS LO CORRECTO AUN CUANDO NADIE ESTE MIRANDO**

Persona: “Las personas constituyen el valor más importante que garantiza nuestro futuro.”

El verdadero éxito hoy del cambio que estamos emprendiendo, está en lo que realmente sienten, piensan e interpretan las personas y sobretodo en la capacidad de reconocerlo, organizarlo y utilizarlo: somos los protagonistas.

Cementos Cienfuegos SA cuenta con un total de 244 trabajadores distribuidos de la siguiente forma según sexo y categoría ocupacional según plantilla aprobada.



Tabla 1 Composición de la fuerza de trabajo de Cementos Cienfuegos S.A.

<b>Categoría Ocupacional</b>	<b>Total</b>
Obreros	150
Técnicos	51
Servicio	5
Dirigentes	34
Administrativos	4
Total	244

# ANEXO II FLUJO PRODUCTIVO DE CEMENTOS CIENFUEGOS S.A.



**ANEXO III. VISTA SATELITAL DEL EMPLAZAMIENTO DE CEMENTOS  
CIENFUEGOS S.A Y EL YACIMIENTO CANTABRIA (CALIZA).**



**ANEXO III. YACIMIENTO CAROLINAS, TOBAS ZEOLITIZADAS (ZEOLITA).**



**ANEXO IV. DATOS DE PRODUCCIÓN Y CONSUMO MEDIOS UTILIZADOS EN  
EL DESARROLLO DEL TRABAJO.**

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP
<b>2017 - [toneladas]</b>									
CEMENTO	4082	36995	43262	51065	42397	39595	56100	48349	37399
P350	40821	36995	43262	51065	42397	39595	56100	48349	32319
PP-250	0	0	0	0	0	0	0	0	5080
CLINKER	96215	68625	82930	92610	74475	39550	122271	63352	78495
MATERIAS PRIMA TOTAL	152371	115311	129472	154226	117322	64251	200303	109893	125090
TOTAL DE HARINA CRUDA	152060	119034	137552	156676	116390	65961	171377	137012	128655
CONSUMO TOTAL DE CARBÓN	2230	1200	356.1	245.1	28.8	0	0	0	0
CONSUMO TOTAL DE PETCOKE	8669	6493	8026.9	10464.9	8314.2	4629	13636	7485	9141
CONSUMO DE CRUDO OIL	0	23.183	0	0	0	0	0	0	0
CONSUMO TOTAL DE ZEOLITA	2224	2154	2600	2996	2390	1862	2516	2247	2222
CLINKER EXPORTADO	41933.47	63031.420	42830.881	41452.296	21803.499	20942.816	41561.473	20909.00	41897.32
VENTAS NACIONALES DE CLINKER	18112.149	837.3	59.28	1306.42	781.20	903.68	3493.50	5464.06	1895.64
CONSUMO ELÉCTRICO	11,032,620	8,396,363	9,215,040	11,267,335	8,891,547	5,936,318	13,850,336	8,886,798	9,474,298
CONSUMO INDUSTRIAL DE DIESEL (Mlit)	63.48	29.61	49.9	62.33	45.84	89.40	88.48	123.63	143.07
<b>2018 [toneladas]</b>									
CEMENTO	45609	45897	50452	44294	43745	43825	40000	38954	46130
P350	41197	38123	41035	38500	40527	37238	36160	36505	41267
PP-250	4412	7774	9417	5794	3218	6587	3840	2449	4863

CLINKER	92512	66020	91730	92580	74335	85020	78960	59241	102025
MATERIAS PRIMA TOTAL	163812	83357	160824	157437	105598	145481	130253	104996	145631
TOTAL DE HARINA CRUDA	150507	100813	149728	147881	121526	134964	127220	95500	165106
CONSUMO TOTAL DE CARBÓN	0	711,98	0	0	0	0	0	0	0
CONSUMO TOTAL DE PETCOKE	11174	6503	9698	9681	8445	9092	8655	6914	11344
CONSUMO DE CRUDO OIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0,459
CONSUMO TOTAL DE ZEOLITA	2874	3314	3839	3359	2537	3105	2587	2411	3180

CLINKER EXPORTADO	63352,023	0,000	43722,121	43317,189	42523,415	42542,040	42845,534	21015,824	42273,614
VENTAS NACIONALES DE CLINKER	1888,600	2630,300	1619,520	1679,740	3644,119	10069,708	14822,966	7385,980	6848,006
CONSUMO ELÉCTRICO	11.236.370	7.748.220	10.124.140	9.782.900	9.019.570	9.204.590	8.661.150	7.570.690	10.771.860
CONSUMO INDUSTRIAL DE DIESEL (Mit)	70,04	29,04	33,8	13,17	73,33	30,81	38,05	78,42	42,7
2019 [toneladas]									
CEMENTO	35379	30874	43711	43427	56370	36738	48132	45293	46000
P350	28900	25331	35976	35965	42672	30778	38225	37885	36117
PP-250	6479	5543	7735	7462	13698	5960	9907	7408	9883
CLINKER	72328	84277	61625	93105	82425	42325	69317	91125	83390
MATERIAS PRIMA TOTAL	132027	130127	103132	138154	155181	73082	109482	147712	131672
TOTAL DE HARINA CRUDO	121762	132159	101488	148595	137043	65909	107956	147442	139601
CONSUMO TOTAL DE CARBÓN	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CONSUMO TOTAL DE PETCOKE	7613	8877	6461	9740	8752	4462	7604	9748	9128
CONSUMO DE CRUDO OIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CONSUMO TOTAL DE ZEOLITA	3474	2283	3503	3091	4905	3148	4158	3545	3729

CLINKER EXPORTADO	21988.491	42843.197	20810.981	36621.989	26157.273	20627.608	20802.086	41332.812	20639.025	4
VENTAS NACIONALES DE CLINKER	12866.830	11156.659	6103.483	9261.700	3585.100	13295.380	10108.500	5092.600	12677.100	1
CONSUMO ELÉCTRICO	8,079,310	8,527,960	7,489,408	9,794,832	9,685,595	5,626,106	7,943,853	9,641,113	9,387,519	9
CONSUMO INDUSTRIAL DE DIESEL (Mit)	53.84	17.95	62.58	29.96	42.62	12.92	66.21	35.29	45.78	