



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

SIMPOSIO DE CONSTRUCCIONES

Título

Evaluación técnico-económica de la fabricación de la adición mineral LC² en la Fábrica de Cemento Siguaney.

Title

Technical-economic evaluation of the manufacture of the mineral addition LC² at Siguaney Cement Factory.

Ing. María Antonieta Clemente-Corujo¹, Dr. C. Fernando Martirena-Hernández².

1. Ing. María Antonieta Clemente-Corujo. Departamento Técnico, Empresa de Prefabricado y Premezclado Sancti Spíritus, Cuba. Email: isabellafrancisco@nauta.cu
2. Dr. C. Fernando Martirena-Hernández. Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas, Cuba. Email: f.martirena@enet.cu

Resumen

La adición mineral LC² es una combinación de dos partes de arcilla calcinada, conocida como metacaolín, una parte de carbonato de calcio en forma de piedra caliza y yeso. Se usa en la obtención del cemento ternario LC³, sustituyendo hasta un 50 % del clínquer; uno de los componentes más costosos de la producción del cemento, cuya fabricación demanda altos consumos de energía y emite grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera.

La presente investigación, tiene como finalidad la evaluación técnico-económica de la fabricación a escala industrial de dicha adición, en la Fábrica de Cemento Siguaney, obtenida a partir de la calcinación a temperaturas entre 700 y 850 °C de la arcilla caolinítica del depósito El Yigre, ubicada en Yaguajay en la provincia Sancti Spíritus.



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

Para ello, se realiza un estudio de los parámetros técnicos y económicos de los resultados obtenidos en la prueba industrial, incluyendo la extracción del material en la cantera, homogeneización del mismo, la molienda de pasta, calcinación y molienda del material calcinado con caliza y yeso, para demostrar la viabilidad de la fabricación del LC².

Los resultados arrojan que la adición mineral LC² como sustituto del clínquer de cemento Portland es viable, ya que, desde el punto de vista técnico, conlleva a un mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas y desde el punto de vista económico, a la disminución de los costos de producción; además, contribuye a la disminución del consumo de combustibles fósiles y la emisión de dióxido de carbono al medio ambiente.

Abstract

The LC² mineral addition is a combination of two parts of calcined clay, known as metakaolin, one part of calcium carbonate in the form of limestone and gypsum. It is used to obtain ternary cement LC3, replacing up to 50% of the clinker; one of the most expensive components of cement production, whose manufacture demands high energy consumption and emits large amounts of carbon dioxide into the atmosphere.

The present research has as a purpose the technical-economic evaluation of the industrial scale manufacture of said addition, in the Siguaney Cement Factory, obtained from the calcination at temperatures between 700 and 850 ° C of the kaolinitic clay from the deposit "El Yigre", located in Yaguajay in the Sancti Spíritus province.

For this, a study of the technical and economic parameters of the results obtained in the industrial test is carried out, including the extraction of the material in the quarry, homogenizing it, grinding the paste, calcining and grinding the material calcined with limestone and gypsum, to demonstrate the viability of manufacturing of LC².

The results show that the mineral addition LC² as a substitute for Portland cement clinker is viable, because, from the technical point of view, it leads to an improvement in the physical-



mechanical properties and, from the economic point of view, to the decrease in production costs; in addition, it contributes to the reduction of the consumption of fossil fuels and the emission of carbon dioxide to the environment.

Palabras claves: Adición mineral LC²; Arcillas calcinadas; Cemento ternario LC³

Keywords: Mineral addition LC²; Calcined clay; Ternary cement LC³

1. Introducción

La industria de la construcción, es imprescindible para el desarrollo socioeconómico de un país, pero su crecimiento influye en el aumento del deterioro del medio ambiente. Es responsable del agotamiento de recursos naturales, generación de residuos, de una gran cantidad de gases de efecto invernadero, destacándose las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂). (6). El material de construcción más extensamente usado es el hormigón, cuyo principal componente es el cemento, que, por sus altos volúmenes de producción, su elaboración está asociada a un alto consumo energético y a grandes volúmenes de emisiones de CO₂, fundamentalmente durante la producción del clínquer, factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental.(5, 2).

Datos internacionales reflejan que la fabricación del cemento es responsable del 5 al 8 % de las emisiones de CO₂ y consume el 2 % de la energía global y el 5 % de la energía global industrial. Durante el proceso de fabricación del clínquer más del 50 % del CO₂ liberado se debe a la descomposición de la caliza, por tal motivo, en la elaboración del cemento Portland ordinario (CPO) la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO₂. Debido a esto se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan a la mitigación de estos daños y al crecimiento de su producción de manera sustentable.



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

La manera más efectiva de reducir las emisiones de CO₂ y disminuir los gastos energéticos asociados a la producción del cemento es la sustitución de una porción de clínquer con materiales cementicios suplementarios (MCS). Al mismo tiempo que puede mejorar o mantener la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón, permite ampliar las capacidades productivas y aminora los costos de inversión.(8, 7, 4)

La mayor parte del volumen de MCS empleados, lo constituyen los subproductos del sector industrial, pero en Cuba, no se obtienen subproductos del sector industrial ni se produce energía a partir del carbón a gran escala, por tanto, se ha hecho necesario la investigación acerca de fuentes alternativas de MCS para la fabricación de cementos ecológicos, destacándose los estudios de las arcillas activadas térmicamente para la obtención de la adición mineral LC², realizados por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) y el Instituto Federal de Tecnología de Lausana (EPFL); haciendo énfasis en las arcillas con bajo grado de pureza debido a su amplia disponibilidad y a que las arcillas con alto grado de pureza son muy demandadas por otras industrias.(3)

Las arcillas al ser sometidas a la activación térmica se convierten en puzolanas y mezcladas con caliza y yeso constituyen la adición mineral denominada LC² usada en la formulación del cemento ternario LC³; estas son las siglas del Limestone Calcined Clay Cement. La sustitución de clínquer hasta un 50% es posible debido a la reacción sinérgica que se produce entre la arcilla caolinítica calcinada y la caliza, que, al hidratarse el cemento, permite formar compuestos estables que mejoran la reacción puzolánica, sin afectar las propiedades físico-mecánicas del cemento en todas las edades.

En Siguaney, en diciembre de 2018 tuvo lugar una prueba industrial con la utilización de arcillas caoliníticas del depósito "El Yigre", ubicado en Yaguajay, municipio de la provincia de Sancti Spíritus, formando parte del estudio desarrollado en la búsqueda de MCS para la obtención de nuevos cementos, logrando de esta forma, soluciones más económicas, menos contaminantes y con similares prestaciones a la del CPO.

La presente investigación muestra los principales resultados obtenidos, incluyendo la extracción del material en la cantera, homogeneización del mismo, la molienda de pasta, calcinación y molienda del material calcinado con caliza y yeso. Sobre la base de estos



resultados se realiza un análisis técnico-económico, con el objetivo de demostrar la viabilidad de producir arcillas calcinadas, para la fabricación de la adición mineral LC² en la Fábrica de Cemento Siguaney.

2. Metodología

El depósito conocido como Manifestación Yaguajay-Arcillas Bamburanao, se encuentra ubicado a 300 m al sur de la ciudad de Yaguajay, provincia de Sancti Spíritus y a una distancia de 60 km al norte de Siguaney, poblado del municipio Taguasco donde se localiza la Fábrica de Cemento Siguaney. En este depósito de tipo sedimentario, las arcillas constituyen el componente principal, con presencia de minerales arcillosos del grupo de la caolinita, en contenidos no inferiores al 40 %, el cual constituye la materia prima fundamental para la fabricación del LC². Esta cantera posee un gran volumen de recursos, garantizando su explotación a escala industrial por un período mayor de veinte años.

Estudios realizados han demostrado que, desde el punto de vista físico, químico y mineralógico, las arcillas de este depósito, poseen condiciones adecuadas para el uso y explotación como fuente de materia prima, para la obtención de puzolanas a partir de la activación térmica de los minerales arcillosos presentes en las mismas y su utilización como MCS. Las arcillas se caracterizaron basándose en su coloración y composición química (contenido de CaO y Al₂O₃), apreciándose tres tipos tecnológicos A, B y C y en dependencia de esto se extrajo el material, el cual fue transportado hacia una nave de la Fábrica de Cemento.

Se realizó el mezclado y homogeneización de las arcillas en dependencia de su composición mineralógica (Figura 1), formando una pila principal; de la misma, se fue depositando el material en cinco pilas alrededor de esta, tomando porciones a partes iguales. Luego de agotado el material de la pila principal se toma el material de las cinco pilas para formar nuevamente una pila principal, realizando esta operación cinco veces, alternando el sentido de mezclado a favor y en contra de las manecillas del reloj. Luego de terminado este proceso se tomaron cinco muestras, a las cuales se le realizaron los ensayos de composición química.(Figura 2)



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

El proceso de fabricación del cemento de Siguaney es por vía húmeda, es preciso moler la arcilla en los molinos secundarios o de bolas, añadiéndole agua para formar la pasta. Al trasladar a la estera la materia prima, esta contenía grumos e impedía su paso por la misma, lo que implicó secar el material en el patio exterior. Se determinó el porcentaje de humedad y la fluidez de la pasta a la salida del molino. (Tabla 1) También se evaluó la pasta del retorno, realizando los ensayos de peso volumétrico, fluidez y porcentaje de humedad y en el silo se calculó el porcentaje de caolín equivalente. (Tabla 2)(Tabla 3)

Para la calcinación se alimentó el horno desde el silo de pasta. Se prepararon boquillas de menor diámetro para garantizar que la llama fuese más pequeña, se reguló el flujómetro de petróleo y se ajustaron los termopares. El horno debe tener una temperatura entre 800 y 850 °C en la zona de calcinación, para que la temperatura a la que se somete el material esté por debajo de los 750 y 800 °C. La presión de combustible debe mantenerse entre 30 y 40 kg/cm². La velocidad de rotación debe ser lo más alta posible, entre 40 y 60 rph y el material debe estar al menos 30 min en la zona de calcinación. Previamente se elaboraron patrones de arcilla calcinada en condiciones controladas en el laboratorio, para determinar los pesos volumétricos y compararlos con los obtenidos durante la prueba industrial. (Gráfico 1) Se tomaron muestras del material calcinado y se le realizaron los ensayos de peso volumétrico y pérdida de masa, para verificar la calidad del proceso. Para comprobar la pérdida de masa se pesaron las muestras y se colocaron en la estufa durante una hora a 650, 750 y 950 °C. (Tabla 4)

La calcinación transcurrió de forma muy inestable debido a la mala calidad del combustible, que tenía bolsones de agua; el deficiente funcionamiento de la boquilla del quemador, que provocó la formación de hollín; las constantes paradas tecnológicas, con el consecuente enfriamiento y posterior recalentamiento del horno, que incidió en su baja productividad (el proceso pudo haber durado 8 h menos de haber logrado la producción por hora planificada, 18 t/h de material calcinado). El material calcinado se descargó en la calle paralela al horno 1, para su posterior mezclado con caliza en el almacén de clínquer, en una proporción de dos partes de arcilla y una parte de caliza.



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

La molienda se realizó en el molino de circuito cerrado, de los tres dosificadores de materias primas previstos, sólo se utilizaron dos: uno para incorporar el yeso al sistema y otro para la mezcla de arcilla calcinada y caliza, previamente mezcladas. De encontrarse disponible el tercer dosificador la mezcla debe hacerse por peso, con un 62.5 % de arcilla calcinada y un 30.0 % de caliza. El yeso se adicionó en un 7.5 %, conteniendo un 2.90 % de trióxido de azufre (menor de 3.50 %). A la salida del molino se tomaron muestras cada dos horas, realizándoles los ensayos de Blaine, SO_3 , pérdida por ignición (PPI), yeso, adición y finura. (Tabla 5) Se le realizaron los ensayos de composición química a las muestras de arcilla calcinada. (Tabla 6). Otra forma de evaluar la calidad de la molienda fue mediante el ensayo de calorimetría isotérmica a una muestra de cemento P-35 y a muestras de LC^3 obtenidas a partir del LC^2 . (Gráfico 2)

Basado en la NC 506: 2013 se determinó la resistencia del cemento P-35 y la del LC^3 , elaborado con proporciones de 50 % del cemento P-35 y 50 % del LC^2 . (Tabla 7) Se utilizó como método de ensayo para evaluar la actividad puzolánica la NC TS 527:2013, usado para desarrollar la base de datos comparativos con los requisitos de la NC-TS 528:2013 y determinar si un aditivo mineral da lugar a un nivel aceptable de desarrollo de la resistencia. (Tabla 8)

Se calcularon los costos de la extracción de la arcilla y los consumos de energía en la fabricación del LC^2 , tanto en la prueba industrial, como en condiciones normales. (Tabla 9) (Tabla 10) (Gráfico 3) (Gráfico 4) Se incluyen como referencia los consumos en la producción de los cementos P-35 y PP-25, brindados por el Departamento de Economía de Siguaney. Se calcularon los costos reales de la prueba industrial en Siguaney y los costos estimados de la producción en condiciones normales. (Gráfico 5) (Gráfico 6) (Gráfico 7) (Gráfico 8)

3. Resultados y discusión

El mezclado se realizó teniendo en cuenta el contenido de caolinita y de calcita, buscándose reducir al máximo el contenido de calcita e incrementar el contenido de caolinita, logrando un contenido de caolinita superior al 40 % y de calcita inferior al 8 %.



Título Convención 2021
 Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
 TÍTULO

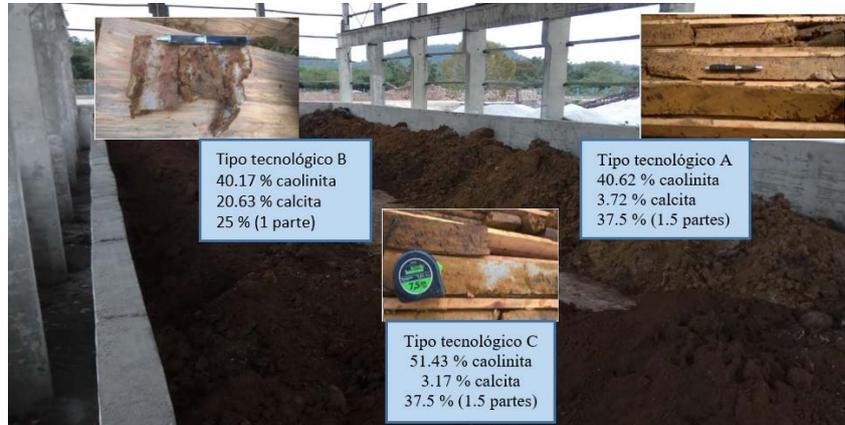


Figura 1: Composición mineralógica de los tipos tecnológicos de arcillas y proporciones para su mezclado (Fuente: Elaboración propia)



Figura 2: Composición mineralógica y química del material mezclado y homogeneizado. (Fuente: Elaboración propia)

El proceso de mezclado y homogeneización fue eficiente, ya que todas las muestras tomadas en diferentes momentos del proceso y en varios lugares de la pila presentan valores similares en todos los indicadores analizados.

Tabla 1: Evaluación del material a la salida del molino de pasta (Fuente: Elaboración propia)

| Muestra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Humedad (%) | 62,6 | 59,7 | 58,6 | 56,5 | 30,4 | 32,5 | 27,2 | 31,1 |
| Fluidez (cm) | 5,6 | 2,3 | 2,6 | 2,0 | 2,4 | 4,5 | 1,5 | 5,2 |

Tabla 2: Evaluación de la pasta de retorno (Fuente: Elaboración propia)

| Muestra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| PV pasta (kg/m ³) | 1304 | 1310 | 1314 | 1300 | 1298 | 1305 | 1281 |
| Fluidez (cm) | 3,1 | 2,6 | 2,2 | 3,0 | 2,8 | 4,0 | 3,3 |
| Humedad (%) | 63,8 | 61,5 | 60,7 | 31,3 | 30,4 | 31,4 | 31,3 |



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

Durante el proceso de molienda de pasta se tomaron varias muestras, a la salida del molino para monitorear la molienda de pasta y en el silo para determinar las características de la pasta, que entraría al horno para su posterior calcinación.

Tabla 3: Porcentaje de caolín equivalente en el silo (Fuente: Elaboración propia)

| Muestra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % k | 80,92 | 86,71 | 84,63 | 86,80 | 82,24 |

Este ensayo demuestra que el material puede ser calcinado para su posterior uso como componente fundamental de la adición mineral activa LC².

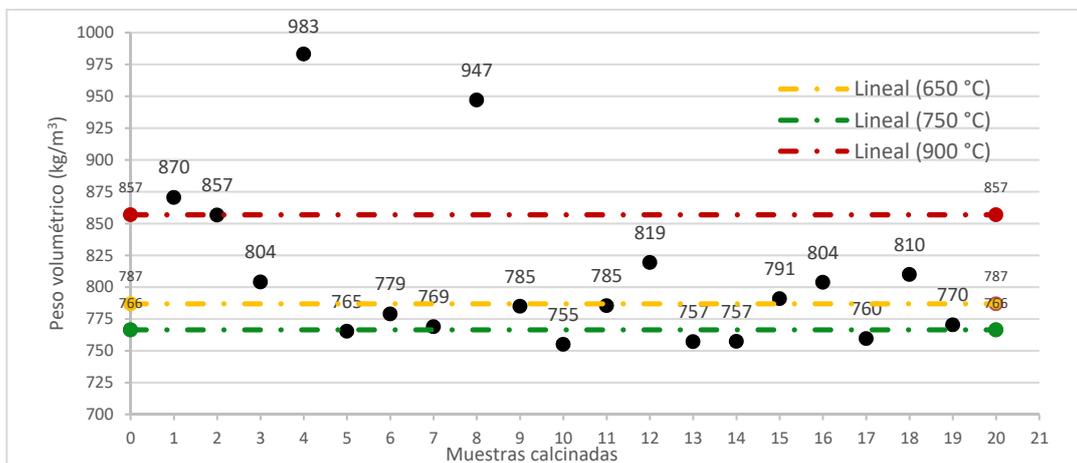


Gráfico 1: Comportamiento del peso volumétrico y rangos de temperatura alcanzados durante la calcinación de la arcilla. (Fuente: Elaboración propia)

La mayoría de las muestras se encuentran en el rango de calcinación esperado, es decir, temperaturas inferiores a 800°C, coincidiendo con los valores de temperatura medidos por el dispositivo instalado en el horno.

Tabla 4: Pérdida de masa (Fuente: Elaboración propia)

| Muestra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m (750°C) | 8,705 | 9,019 | 8,892 | 8,986 | 9,100 | 8,909 | 8,938 |
| m (900°C) | 8,284 | 8,269 | 7,835 | 8,045 | 7,982 | 7,783 | 7,765 |
| Δm (750°C - 900°C) | 0,421 | 0,750 | 1,057 | 0,941 | 1,118 | 1,126 | 1,173 |



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

Los bajos valores de pérdida de masa indican que el material fue completamente deshidroxilado, es decir, se logró extraer toda el agua presente en forma de OH⁻ estructurales, garantizando la reactividad del material calcinado.

Tabla 5: Resultados de ensayos realizados a las muestras de LC² (Fuente: Elaboración propia)

| Muestra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Blaine | 7420 | 6009 | 6841 | 6000 | 6254 | 6425 | 6928 | 6889 | 7530 | 7246 | 7099 | 7696 | 7641 |
| SO ₃ | 2,40 | 2,35 | 2,56 | | 2,27 | | | 1,47 | 1,79 | | 2,18 | 3,40 | |
| PPI | 17,66 | 19,83 | 22,90 | 21,63 | 22,27 | 20,28 | 21,20 | 18,93 | 21,5 | 18,87 | 17,05 | 18,28 | 16,87 |
| Yeso | 2,59 | 2,42 | 3,11 | | 2,15 | | | 0,50 | 0,56 | | 1,86 | 5,90 | |
| Adición | 28,75 | | | | | | | 32,59 | 40,12 | | 26,58 | 28,68 | |
| Finura | 99,3 | 89,8 | 93,6 | 92,4 | 91,2 | 94,4 | 93,2 | 89,9 | 89,6 | 89,4 | 89,0 | 87,0 | 87,5 |

Tabla 6: Composición química de la arcilla calcinada (Fuente: Elaboración propia)

| Muestra | Composición química (%) | | | | | | Suma Si + Al + Fe |
|----------|-------------------------|-------|------|-------|------|-------|----------------------|
| | Si | Al | Fe | Ca | Mg | PPI | |
| 1 | 39,15 | 17,45 | 7,02 | 16,61 | 0,00 | 8,15 | 63,62 |
| 2 | 39,18 | 19,76 | 7,49 | 14,02 | 0,00 | 10,03 | 66,42 |
| 3 | 40,40 | 18,66 | 7,50 | 13,48 | 0,00 | 16,28 | 66,56 |
| Promedio | 39,58 | 18,62 | 7,34 | 14,70 | 0,00 | 11,48 | 65,53 |

Los resultados de la composición química muestran la homogeneidad del proceso y su posibilidad de ser utilizadas como material puzolánico.

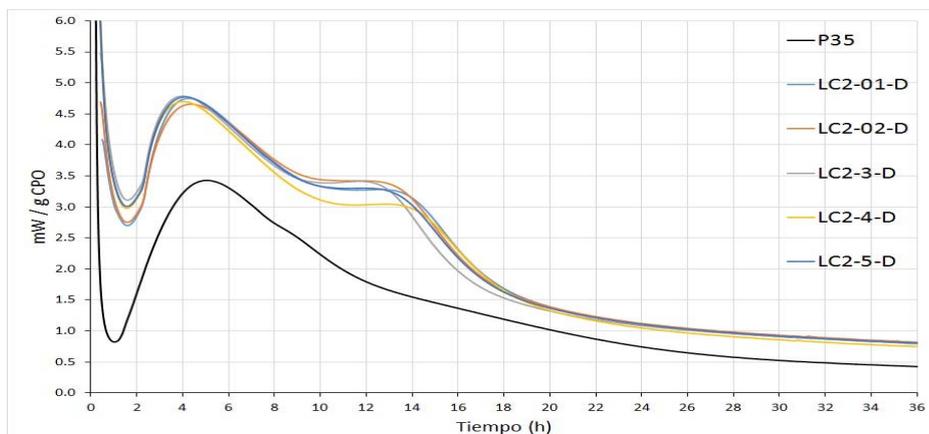


Gráfico 2: Calorimetría isotérmica en pastas de cemento y LC³ (Fuente: Reporte de prueba industrial 2019)(1)



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

La calidad de la molienda fue evaluada a través del ensayo de calorimetría isotérmica, permitiendo conocer la homogeneidad de la muestra y la sulfatación del sistema.

Tabla 7: Resistencia a la compresión del cemento P-35 y el LC³. (Fuente: Elaboración propia)

| Edad | Resistencia a compresión (MPa) | | | | LC ³ /P-35 (%) |
|------|--------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | Muestra P-35 | P-35 (NC 1340:2021) | LC ³ | CementoTernario-35 (NC 1340:2021) | |
| 24 h | 9,1 | | 8,7 | | 96 |
| 3 d | 19,5 | 17 | 18,5 | 17 | 95 |
| 7 d | 25,8 | 25 | 26,7 | 25 | 103 |
| 28 d | 35,4 | 35 | 37 | 35 | 105 |

Los resultados coinciden con las expectativas del proceso, el cemento ternario LC³ se comporta similar desde las 24 horas a los resultados del cemento P-35. A partir de los 7 días el cemento LC³ aventaja en resistencia al cemento P-35, comportándose de forma similar a los 28 días.

Tabla 8: Actividad puzolánica. (Fuente: Elaboración propia)

| Muestra | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|----|-----|----|
| Actividad puzolánica (%) | 95 | 105 | 98 |

El índice de actividad de resistencia para evaluar las puzolanas arroja excelentes resultados, ya que, el menor porcentaje que establece la NC-TS 528:2013 es 75 %.

Tabla 9: Costos de la extracción de la arcilla. (Fuente: Elaboración propia)

| Elemento del costo | Gastos directo | Otros gastos directos | Gastos de mano de obra | Costo total de la extracción |
|--------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|
| | Combustible y lubricante | Depreciación | Mano de obra | |
| Total unitario | 5,16 | 0,23 | 1,6 | 6,99 |
| CUC | 5,16 | 0 | 0 | 5,16 |

Los valores de los costos de la extracción del material se corresponden con la media mundial.



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

Tabla 10: Consumo de energía total por t de cemento (MJ). (Fuente: Elaboración propia)

| Cementos y adiciones | Consumo total de energía (MJ) | % Ref P-35 |
|--|-------------------------------|------------|
| LC ² (prueba industrial) | 9046,17 | 132 |
| LC ² (condiciones normales) | 4676,14 | 68 |
| LC ³ | 5190,37 | 76 |
| P-35 | 6833,77 | 100 |
| PP-25 | 5853,35 | 86 |

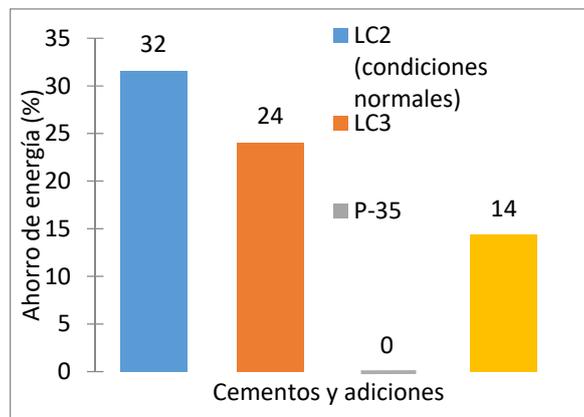


Gráfico 3 Porcentaje de ahorro de consumo de energía referido al P-35 (Fuente: Elaboración propia)

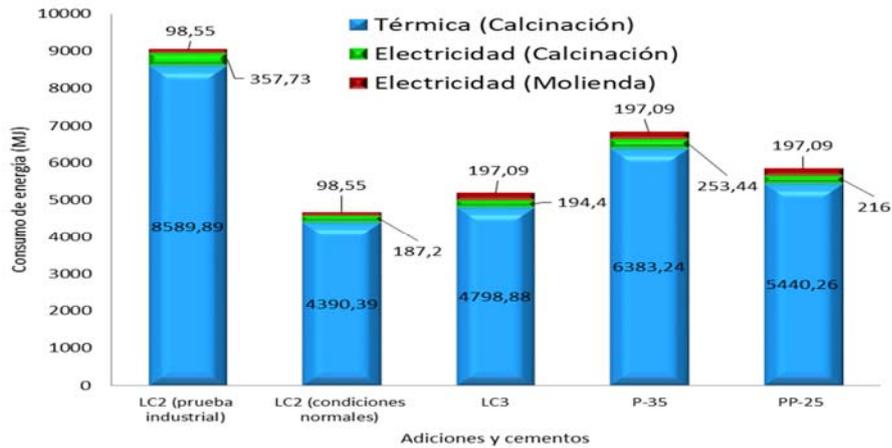


Gráfico 4: Consumo de energía de la fabricación de cementos y de la adición mineral en la prueba industrial y en condiciones normales. (Fuente: Elaboración propia)

El consumo de energía de la prueba industrial fue mucho más elevado que el esperado, presentando un exceso de manipulación del material en la fábrica en los procesos de: mezclado



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

y homogeneizado, los cuales deben realizarse en la cantera en un proceso normal; molienda de pasta, que se realizó de forma intermitente, con interrupciones por contener grumos el material, por lo que se propone para el proceso industrial pasar el material directamente a los diluidores y por tener que mezclar la arcilla calcinada y caliza en la nave al no disponer de un tercer dosificador.

Otro factor que incrementó el consumo energético fueron los problemas en la calcinación en el horno, debido a la utilización de combustible con bolsones de agua y la baja productividad por ineficiencias en la operación (8 horas extra de operación, equivalentes a un 40% de operación extra del horno). Insuficiencias en la molienda del material también provocó un aumento del consumo energético, por interrupciones con la llegada de clínquer a la fábrica. Por tales motivos en la prueba industrial no hubo ahorro en los portadores energéticos.

En condiciones normales la adición mineral LC² sería la que tendría en el proceso un menor consumo energético, con un ahorro de 32 % con respecto al proceso del P-35 y un 20 % con respecto al PP-25 y el LC³ un ahorro de un 24 % con respecto al proceso del P-35 y un 11 % con respecto al PP-25. El proceso de molienda de pasta fue muy ineficiente, siendo el principal factor que encareció la prueba y generó pérdidas del material. En procesos industriales la preparación de pasta debe hacerse en los diluidores, donde se puede lograr el flujo deseado y menor humedad en la pasta.

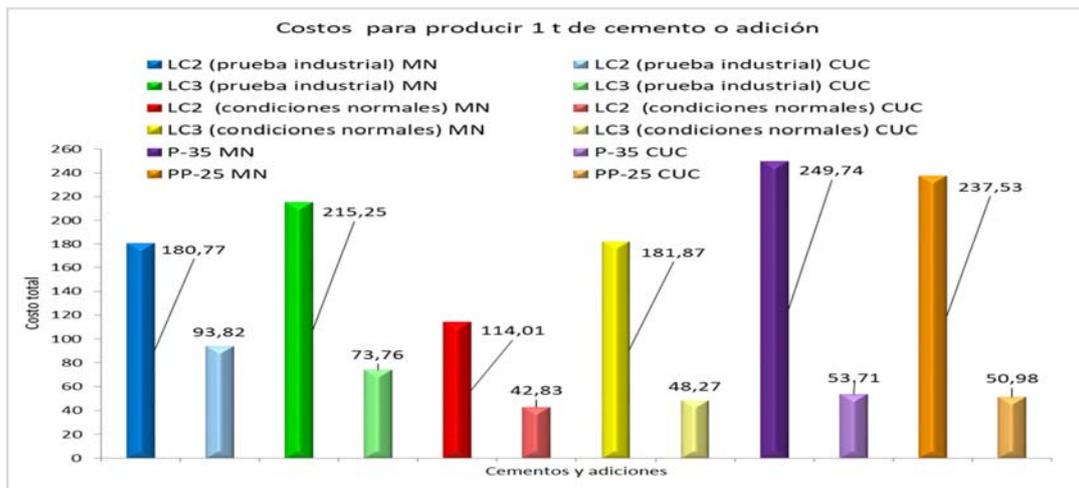


Gráfico 5: Costos para producir una t de cemento o adición . (Fuente: Elaboración propia)



Título Convención 2021
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
TÍTULO

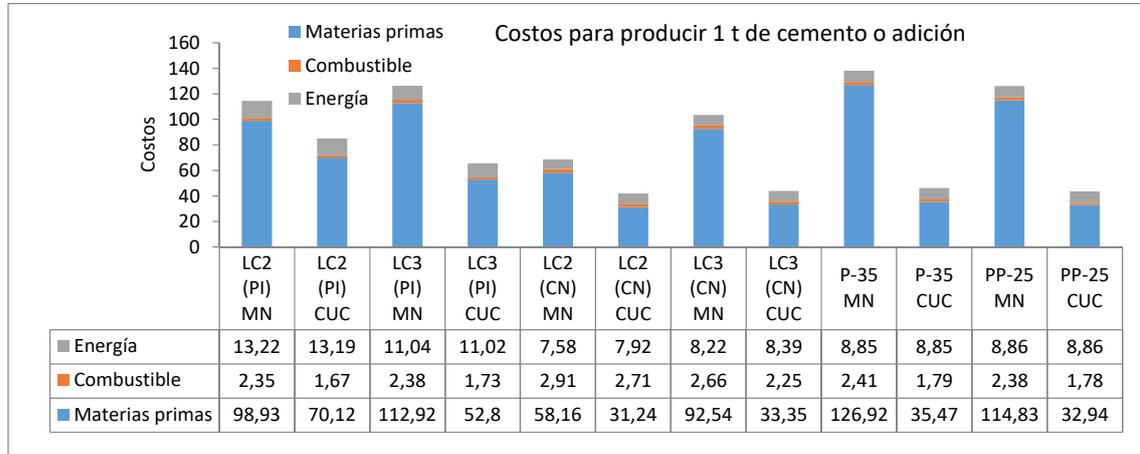


Gráfico 6: Costos reales y estimados de materias primas, combustible y energía en la fabricación de cementos y del LC² en la prueba industrial (PI) y en condiciones normales (CN). (Fuente: Elaboración propia).

El LC² de la prueba industrial (PI), resultó ser, un 28 % más barato que el cemento P-35 y un 24 % más barato que el PP-25 producido en la Fábrica de Cemento de Siguaney. El LC³ es un 14 % más barato que el P-35 y un 9 % más barato que el PP-25. Si se realiza la fabricación de la adición mineral sujeta a condiciones normales (CN) resultaría ser un 54 % más barato que el cemento P-35 y un 27 % más barato que el PP-25 y el LC³ sería un 23 % más barato que el P-35 y un 5 % más barato que el PP-25.

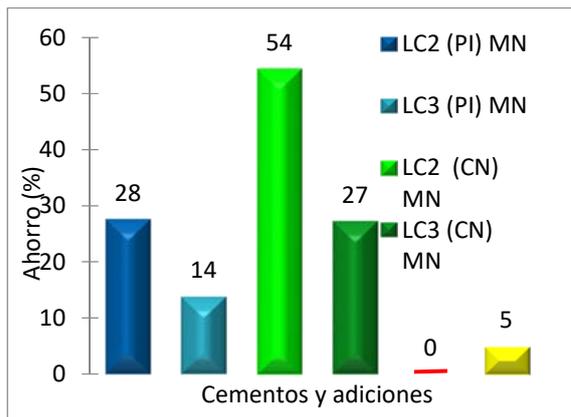


Gráfico 7: Porcentaje de ahorro para producir 1 t de cemento o adición referido al P-35 (Fuente: Elaboración propia)

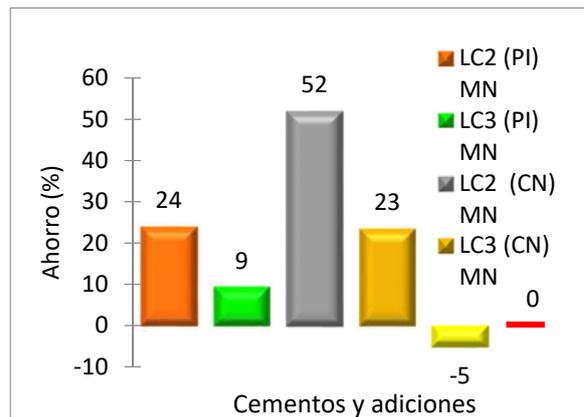


Gráfico 8: Porcentaje de ahorro para producir 1 t de cemento o adición referido al PP-25 (Fuente: Elaboración propia)



4. Conclusiones

Los resultados de la prueba industrial arrojan que la adición mineral LC² como sustituto del clínquer de cemento Portland es viable, ya que, desde el punto de vista técnico, conlleva a un mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas y desde el punto de vista económico, a la disminución de los costos de producción; además, contribuye a la disminución del consumo de combustibles fósiles y por tanto a la reducción de emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente.

5. Referencias bibliográficas

1. CIDEM (2019) Reporte: Prueba Industrial de producción de cemento de bajo Carbono LC³.
2. Martirena, J.F. (2009). Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínquer de Cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa.
3. Martirena, F. (2018). Opciones sostenibles para la producción y uso del cemento. Conferencia.
4. Massazza, F. (1993). Pozzolanic cements. Cement and Concrete Composites.
5. Mehta, P. Kumar. (1998) CONCRETO. Estructuras, propiedades y materiales.
6. Richard C. Hill, Paul A. Bowen. (1997). Sustainable construction: principles and framework for attainment, Construction Management and Economics.
7. Scrivener, K. L., John, V. M. y Gartner, E. M. (2016). Eco-efficient cements: Potencial, economically viable solutions for low-CO₂, cement-based materials industry. Paris.
8. Scrivener, K. L. y Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material», Cement and Concrete Research.