

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CONSTRUCCIONES

INGENIERÍA CIVIL



TESIS DE DIPLOMA

Título: Evaluación de la eco-eficiencia en los hormigones hidráulicos
producidos en la provincia de Villa Clara en los últimos 10 años

Autor: Rosa Yanelly López Hernández.

Tutora: Lic. Sofía Sánchez Berriel

Consultantes: DrSc. Ing. Vitervo A. O'Reilly Díaz
MSc. Yudiesky Cancio Díaz

Santa Clara

Junio, 2014

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la mujer que me dio la vida, que me ha acompañado incondicionalmente y ha guiado cada uno de mis pasos y me ha mostrado el camino correcto, mi madre.

Al mi amigo que estuvo a mi lado un tiempo importante de mi vida, me educó con amor y respeto y me sigue acompañando por siempre en mi corazón, mi padre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mi tutora Sofía y su familia por sus atenciones paciencia y dedicación.

A mi madre y mis hermanas porque siempre han estado cerca acompañándome, apoyándome y ayudándome.

A todas las personas que me han brindado su ayuda para poder llegar a esta etapa de mi carrera y mi vida, que mencionarlos uno por uno sería difícil. Solo quiero destacar su apoyo, el de mi familia y mis amistades.

RESUMEN

El patrimonio construido por el hombre está constituido en un 90% de hormigón, cuyo componente principal es el cemento. Tanto la producción como el consumo del cemento y el hormigón, se asocian con el nivel de desarrollo de un país, sin embargo ellos son también responsables de la degradación ambiental del planeta, debido fundamentalmente a la explotación intensiva de recursos no renovables y la emisión de grandes volúmenes de gases de efecto invernadero. El presente trabajo forma parte de una investigación realizada para una tesis de diploma, con el fin de diagnosticar y evaluar el eco-eficiencia de los hormigones hidráulicos producidos en la provincia de Villa Clara, comparando sus resultados con los de los hormigones elaborados a partir del cemento B-45. Fueron procesados un total aproximado de 332 archivos, los que comprende 301 informes del laboratorio de materiales de la ENIA en VC y 31 informes por trimestres pertenecientes al MICONS en la provincia. La introducción de cementos más ecológicos como el “cemento de bajo carbono”, muestran que la industria cubana de cemento intenta reducir el impacto ambiental asociado a sus producciones. El estudio de la eco-eficiencia de los hormigones fabricados con este cemento constituye una necesidad para probar el rendimiento del mismo y su eficiencia, comparada con los hormigones que tradicionalmente se producen.

ABSTRACT

The patrimony built by the men is constituted in a 90% by concrete, with main component is cement. The production of cement and concrete is associated with the development of a country, although they are also responsible for the environmental pollution of the planet, due to the exploitation of non-renewable resources and the emission of high amounts of greenhouse gases (GHG). The objective of this paper is to diagnose and assess the eco-efficiency of hydraulic concretes produced in Villa Clara province, comparing its results with concretes prepared based on low carbon cement (LCC). A total amount of 332 files were processed. Of them, 301 are reports of the materials laboratory of ENIA and 31 are quarterly reports from MICONS in Villa Clara. The introduction of more ecologic cements like LCC, shows that the Cuban cement industry tries to reduce the environmental impact of its productions. The study of eco-efficiency in concretes made with this LCC is needed to prove the performance of it and its efficiency, compared with traditional concretes that are already produced.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I: La producción de hormigones y el comportamiento de la eco-eficiencia en el sector de la construcción.....	3
1.1 La industria del hormigón.....	3
1.1.1 Proceso productivo del hormigón hidráulico	7
1.1.2 Impactos ambientales asociados a la producción del hormigón	11
1.1.3 Retos de la industria del hormigón en Cuba.....	19
1.2 Eco-eficiencia en el sector de la construcción.....	24
1.2.1 Surgimiento del concepto eco-eficiencia	24
1.2.2 Indicadores de eco-eficiencia propuestos.....	25
1.3 Conceptualización de modelos. Modelos econométricos	28
Capítulo II: Metodología para medir la Eco-Eficiencia de los Hormigones Hidráulicos producidos en la provincia de Villa Clara	32
2.1 Industria del hormigón en Villa Clara	32
2.2 Creación de la base de datos de hormigón	36
2.3 Metodología para medir la eco-eficiencia de los hormigones hidráulicos producidos en Villa Clara	39
2.3.1 Indicadores a evaluar	39
2.3.2 Modelo de regresión múltiple.....	42
Capítulo III: Evaluación de la Eco-Eficiencia de los Hormigones producidos en la provincia de Villa Clara en los últimos 10 años	44
3.1 Estudio de la eco-eficiencia de hormigones producidos en Villa Clara.....	44
3.2 Evaluación de la eco-eficiencia de hormigones producidos con CBC y hormigones producidos tradicionalmente en Villa Clara.....	49
3.3 Diseño y aplicación de un modelo de regresión lineal para evaluar base de datos de hormigón en Villa Clara.....	52
3.3.1 Determinación de las variables y especificación del modelo	53
3.3.2 Características de la muestra	54
3.3.3. Estimación y aplicación del modelo. Análisis de los resultados.....	55
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES	59
ANEXOS	60
BIBLIOGRAFÍA	62

INTRODUCCIÓN

El patrimonio construido por el hombre está constituido en un 90% de hormigón, cuyo componente principal es el cemento. (Rosell Lam, 2010) Tanto la producción como el consumo del cemento y el hormigón, se asocian con el nivel de desarrollo de un país, sin embargo ellos son también responsables de la degradación ambiental del planeta, debido fundamentalmente a la explotación intensiva de recursos no renovables y la emisión de grandes volúmenes de gases de efecto invernadero. El impacto ambiental asociado a esta industria, está aumentando rápidamente por la tendencia ascendente de la producción que, entre 2005 y 2050, se estima aumentará en 2,5 veces a nivel global, con mayor incidencia en los países subdesarrollados. (Vanderley, 2010)

Existen varias estrategias consolidadas para reducir las emisiones de CO₂ resultantes de la producción de cemento como: (a) la sustitución de clínker por mezclas minerales como puzolanas; (b) aumento de la eficiencia energética; y (c) el uso de combustibles alternativos. Aunque son importantes, estas estrategias y otras más novedosas, por si solas nos son capaces de reducir las emisiones originadas a niveles satisfactorios. Por lo tanto, la aplicación de mejoras en el diseño y fabricación de hormigones se hacen necesarias ya que pueden contribuir a una mejor eficiencia en el uso del cemento. El cálculo de la eco-eficiencia de hormigones usando indicadores como la intensidad de aglomerantes, ha sido probada como una vía para optimizar desde el punto de vista técnico, económico y ecológico la producción de materiales derivados en el cemento.

En Cuba, la producción de hormigones ha aumentado hasta llegar cerca de los 200 mil m³ en la actualidad. La provincia de Villa Clara produce la quinta parte del hormigón en el país, debido fundamentalmente a la dinámica inversionista de las obras turísticas ubicadas en la Cayería Norte.

La introducción de cementos más ecológicos como el “cemento de bajo carbono”, muestran que la industria cubana de cemento intenta reducir el impacto ambiental asociado a sus producciones. El estudio de la eco-eficiencia de los hormigones fabricados con este cemento constituye una necesidad para probar el rendimiento del mismo y su eficiencia, comparada con los hormigones que tradicionalmente se producen.

Con este estudio se pretende evaluar la eco-eficiencia de los hormigones producidos en Villa Clara desde hace 10 años, para perfeccionar su proceso productivo y comparar con nuevas alternativas como el hormigón de “bajo carbono”, que se encuentra en fase de prueba.

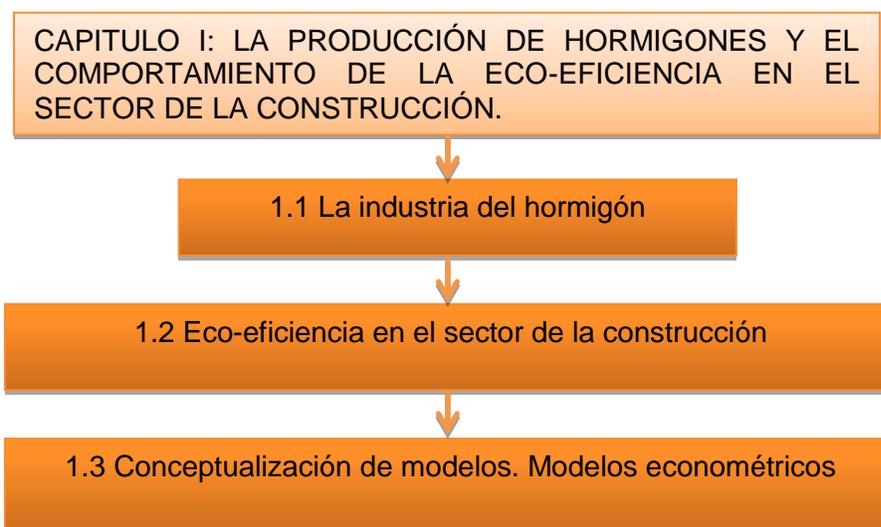
Como problema científico tenemos, ¿Es posible evaluar la eco-eficiencia de los hormigones producidos en Villa Clara, durante los últimos 10 años? El objeto de la investigación es la evaluación de eco-eficiencia. El Campo de acción es La producción de hormigones en Villa Clara. El objetivo general de la investigación es: Evaluar la eco-eficiencia de los hormigones producidos en la provincia de Villa Clara en los últimos 10 años.

Los objetivos específicos planteados son: analizar los principales fundamentos teóricos, metodológicos e instrumentales acerca de la producción de hormigones y su eco-eficiencia. Diagnosticar el estado actual y potencial de la producción de hormigones en la provincia de Villa Clara. Evaluar la eco-eficiencia de los hormigones producidos en la provincia de Villa Clara en los últimos 10 años. La hipótesis de la investigación que se deriva es la siguiente: la evaluación de la eco-eficiencia de los hormigones producidos en la provincia de Villa Clara durante los últimos 10 años, contribuirá al diagnóstico y optimización de este proceso productivo incidiendo sobre el consumo de recursos y el impacto ambiental asociado.

Capítulo I: La producción de hormigones y el comportamiento de la eco-eficiencia en el sector de la construcción

El patrimonio construido en el mundo es hoy en un 90% de hormigón y es el principal destino del cemento. Tanto la producción y consumo del cemento y del hormigón se asocian con el nivel de desarrollo de un país. Sin embargo también han resultado ser, de forma paradójica, los principales responsables de la degradación ambiental del planeta, debido a que su proceso productivo, en lo fundamental, está basado en la explotación intensiva de recursos no renovables (RNR), (materias primas y combustibles), y que emite significativos volúmenes de gases de efecto invernadero. (Rosell Lam, 2010) El presente capítulo se resumen aspectos concernientes a esta problemática y sus posibles soluciones. La grafica 1 muestra el hilo conductor del capítulo I.

Grafico 1.1 Hilo conductor del Capítulo I



Fuente: Elaboración propia

1.1 La industria del hormigón

El hormigón es un material esencial para la construcción de infraestructuras que la sociedad utiliza alrededor del mundo. Es el segundo material más producido y consumido por la sociedad en todo el planeta, antecedido solo por el agua El cemento es el “pegamento” esencial en el hormigón y como tal es usado en grandes volúmenes. (CSI, 2009)

La producción de cemento a nivel global alcanzó en el año 2013,8 millones de toneladas (FICEM, 2013). La producción global de acero es de aproximadamente 5.8 108 ton/año y

aproximadamente 10% de esta, está destinada a la producción de acero reforzado. Luego de ser mezclado con agua, gravilla y otras adiciones, el cemento –convertido en hormigón- permite la producción de aproximadamente 1.05 1010 ton1 de materiales de la construcción que son usados para producir casas, oficinas, tuberías de alcantarillado, presas, carreteras e incluso suelos estabilizados. (Habert & Roussel, 2009)

La producción de cemento está distribuida por todo el mundo, en aproximadamente 150 países, siendo China responsable por aproximadamente 1/3 del total reducido cada año. Hoy en día la producción global de cemento continua creciendo sobre todo debido al consume de los países en vías de desarrollo. Entre 1990 y 2000 la producción de cemento creció en 55% en países subdesarrollados y solo 3% en países desarrollados. La demanda de cemento estimada para el 2020 se espera sea entre 120-180% mayor que en 1990. La mayor parte de este crecimiento se deberá al aumento de la demanda en países subdesarrollados. Esto es reflejo de que los países subdesarrollados están todavía en construcción. En estos países la mayoría de las carreteras están todavía sin pavimentar y una parte importante de la población no tiene acceso a servicios sanitarios todavía. En materia de vivienda América Latina y el Caribe enfrentan un considerable y creciente déficit habitacional. Según un estudio del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2011), una de cada tres familias de América Latina y el Caribe —un total de 59 millones de personas— habita en una vivienda inadecuada o construida con materiales precarios o carentes de servicios básicos.

La gráfica 1.2 muestra una relación de las familias en AL y el Caribe que no cuentan con un techo para vivir o habitan en un techo de mala calidad.

Gráfica 1.2: Porcentaje de familias que en AL y el Caribe no tienen vivienda o viven en condiciones de precariedad.



Fuente: (BID, 2011)

La red vial de América Latina y el Caribe está constituida por tres millones de kilómetros aproximadamente, de los cuales cerca del 20% se encuentran pavimentados, según el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF). [Ref. 8].

La CAF señala que existen grandes diferencias entre países: Antillas Holandesas, Barbados, Bahamas, Cuba, Dominica, Granada, Jamaica, Puerto Rico y Uruguay al ser pequeños tienen más de la mitad de la red pavimentada. En otros de mayor potencial económico pero territorialmente mucho más extensos este porcentaje es sustancialmente menor. Brasil es el ejemplo paradigmático de esto último con sólo el 15% de la red pavimentada. En situación intermedia se encuentran países como Argentina, Chile, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, México y Venezuela, que varían entre el 25% y el 35% de la red en estas condiciones. Entre los países menos favorecidos con menos del 20% de las carreteras pavimentadas se encuentran Bolivia, Colombia, Ecuador, Guyana, Nicaragua y Paraguay. La tabla 1.1 muestra indicadores de la red vial en AL y el Caribe.

Tabla 1.1: Indicadores de la red vial de América Latina y el Caribe, 2012

INDICADOR	PROMEDIO AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE
Porcentaje pavimentado (%)	21.8
Km de carreteras/Km ²	0.16
Km de carretera pavimentada/Km ²	0.03
Km de carreteras/ 1.000 habitantes	5.1
Km de carretera/1.000.000 de PBI	0.60
Km de carretera/1.000 vehículos	29.33

Fuente: Banco de Desarrollo de América Latina [Ref. 8]

Fuente: (BID, 2011)

Satisfacer las enormes demandas de infraestructura en los países subdesarrollados con la capacidad y tecnología instaladas hoy requerirá incrementos sustanciales en la producción de hormigón y consecuentemente la producción de cemento y sus productos complementarios.

En este contexto, adquieren especial relevancia construcciones sustentables y el papel de la durabilidad y la vida útil de las construcciones. La previsión de la vida útil y la durabilidad de las estructuras de hormigón tienen dimensiones ambientales importantes, en algunas lenguas construcción sustentable es traducida como construcción duradera. Durabilidad es una cuestión mucho más basada en conocimiento que en recursos pues es posible aumentar la vida útil sin

augmentar el impacto ambiental durante la fase de producción. Por estas razones, la producción sostenible, especialmente en el sector público, se convertirá en una práctica común en los próximos años. El sector de la construcción tiene un alto impacto ambiental y económico que necesita ser reducido. De los 2.4 billones de toneladas de CO₂ anualmente emitidas en la producción de cemento Portland destinado fundamentalmente para la producción de hormigón, al menos 1/3 puede ser reducido a través de mejores prácticas en la sostenibilidad del hormigón. En este proceso, la industria puede ser transformada en un sector de alta tecnología. Los beneficios económicos del hormigón hacen de este el producto de la construcción más usado en el mundo.(Piscaer, 2010)

El desarrollo científico técnico en las tecnologías constructivas, dado por el crecimiento vertical de las urbanizaciones, así como, las necesidades de construcciones con fines industriales, hidráulicas, viales, sociales y edificaciones de gran esbeltez y altura, han requerido de la introducción variaciones en los diseños del hormigón para cumplir las cualidades geológicas específicas para su colocación y conformación en estado fresco y con los requisitos, de altas resistencias, prestaciones mecánicas y elevada durabilidad en el estado endurecido. (Rosell Lam, 2010)

El sector de la construcción es el mayor productor de CO₂ y las perspectivas del cambio climático exigen la reducción de estas emisiones. El impacto de las construcciones de hormigón sobre el medioambiente esta debido principalmente al clínker, que es el principal material usado en todo el mundo para producir cemento, que libera un poco menos de 1 tonelada de CO₂ por tonelada de clínker producido.

Varias son las estrategias de la industria de cemento y hormigón para reducir el impacto ambiental asociado a su actividad. En general se puede hablar de tres grandes estrategias: 1) la sustitución del clínker por adiciones minerales en el cemento; 2) la sustitución del cemento en el hormigón por otras adiciones; 3) la reducción del volumen de hormigón requerido para un proceso constructivo perfeccionando el rendimiento del mismo. El impacto en las emisiones de CO₂ de estas estrategias han sido ampliamente estudiadas. (Habert & Roussel, 2009).

Según (John, 2012)(Vanderley, otras estrategias consolidadas para reducir el impacto ambiental a traves del ciclo productivo del hormigon son:

Estrategias para reducir el impacto de la produccion de clinker: (a) la sustitución del clínker por adiciones minerales como puzolanas y cenizas de alto horno; (b) aumentar la eficiencia

energética del proceso productivo; y (c) el uso de combustibles alternativos como bio-combustibles y desechos.

Aunque son importantes, estas estrategias por si solas no son capaces de reducir las emisiones generadas a niveles satisfactorios. Otras como el secuestro de carbón, el uso de nuevos aglomerantes, el uso de nuevas materias primas para la producción de clinker , el aumento de la reactividad del cemento y la sustitución de cemento por uso de la caliza como filler son otras estrategias enfocadas en la reducción de CO₂ emitido por la industria del cemento. Otra estrategia para reducir las emisiones de CO₂ es mejorar la eficiencia en el uso del cemento. Esto dependerá de la capacidad de los consumidores del cemento para formular productos derivados del cemento más eco-eficientes, pero también demandara de los productores de cemento el desarrollo de un producto más eficiente.

Esta alternativa no ha sido ampliamente estudiada, pero algunas opciones pudieran ser: (a) el uso de aditivos, mejor conocidos como superplastificantes; (b) mejores técnicas de compactación en el hormigón; (c) un aumento de la Resistencia a compresión, y (d) una combinación de todas las estrategias anteriores dirigidas a lograr la producción de “hormigones más verdes”.

A diferencia de las estrategias enfocadas solo en la producción de cemento, que solo pueden actuar a nivel de la fábrica de cemento (sustitución, combustibles alternativos, eficiencia energética...), las estrategias que incluyen la optimización del uso del cemento pueden impactar también a nivel de hormigón (uso de aditivos, mejor compactación, diseño estructural).

Por eso conocer el proceso productivo del hormigón resulta de vital importancia para esta investigación.

1.1.1 Proceso productivo del hormigón hidráulico

Proceso de diseño del hormigón

El hormigón será diseñado de manera que se minimice la segregación y exudación de la mezcla fresca. Cuando no sean previamente especificados por el usuario, el productor de hormigón selecciona los tipos de materiales constituyentes de entre todos los posibles que estén comprobadamente aptos para las condiciones ambientales a que va a estar expuesto el hormigón.

El interés por la aplicación de métodos para el diseño de las mezclas de hormigón se evidencia muy tempranamente en nuestro país, en los estudios realizados sobre el comportamiento de los

hormigones hidráulicos colocados en la base de la Carretera Central, los que fueron presentados, a fines del **1927**, por el Ing. M. Villa, en el Primer Congreso Nacional de Ingeniería celebrado en Cuba. Sobre este estudio el Ing. Luis Sáenz observaba:

*“la resistencia de los hormigones que colocamos en nuestras construcciones no puede ser el resultado de los ensayos, **después de construida la obra, sino de las mezclas proporcionadas previamente** con los agregados que vayamos a usar en ellos “*

Las recomendaciones internacionales ACI 332 (Guía para el hormigonado a pie de obra de construcciones residenciales) y el ACI 318 (Requisitos de diseño de hormigones armados), establecen que el hormigón diseñado debe tener, una resistencia media a compresión f_{cm} mayor que la resistencia característica especificada f_{ck} a fin de reducir la probabilidad de que ocurran resistencias menores que la especificada. (Gayoso, 2011)

Proceso de fabricación del hormigón

En el proceso productivo del hormigón intervienen varios factores que inciden directamente en las características finales del producto. Primeramente se debe tener en cuenta la fabricación del aglomerante (cemento), que compone la mezcla de hormigón hidráulico e influye notoriamente en la resistencia del mismo.

Producción del cemento

La fabricación del clínker es uno de los primeros procesos que se realizan para la elaboración del cemento, existen diferentes técnicas para el procesamiento de las materias primas. Se puede realizar por la Vía Seca, Vía húmeda, Vía semi-seca, Vía semi-húmeda. En la actualidad, en torno al 78 % de la producción de cemento de Europa se realiza en hornos de vía semi-seca o semi-húmeda; y un 6 % de la producción europea se realiza mediante vía húmeda [IECA; 2006].

En todos los casos, el material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los 1450°. Este material es enfriado bruscamente al abandonar el horno en enfriadores planetarios o de parrillas obteniéndose de esta forma el clínker. Estas temperaturas permiten las reacciones de los componentes cálcicos y silíceos. El carbonato cálcico (piedra caliza) reacciona para formar óxido de calcio y dióxido de carbono (esto ocurre a unos 900°C) y el óxido de calcio y los silicatos reaccionan para formar di- y tri- silicatos de calcio (a temperaturas entre 900 y 1500°C). Las reacciones que producen aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica ocurren en un grado inferior. La variación en las proporciones de estos cuatro

componentes (disilicato cálcico, trisilicato cálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica) determinan las propiedades del cemento resultante.

Proceso de vía seca

La materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno. El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).

Este proceso de vía seca está probado como el más eficiente energéticamente, requiriendo hasta un 50% menos de energía que el proceso de vía húmeda.

Proceso de vía húmeda

Este proceso es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en el extremo más elevado del horno de clínker.

Procesos de vía semi-seca y semi-húmeda

El material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua respectivamente, al material obtenido en la molienda de crudo. Se obtienen "pellets" o gránulos con un 15-20 % de humedad que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno. Cuando el material alcanza la entrada del horno, el agua se ha evaporado y la cocción ha comenzado.

Molienda de cemento

El proceso de fabricación de cemento termina con la molienda conjunta de clínker, yeso y otros materiales denominados "adiciones" con el fin de conferir al hormigón diferentes propiedades.

Los materiales que están normalizados como adiciones, son entre otros: escorias de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes, caliza.

La composición final del cemento dependerá de la resistencia y características adicionales que se quieran conferir al hormigón. La molienda de cemento se realiza en equipos mecánicos en los que la mezcla de materiales es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas. Estos equipos mecánicos pueden ser de diferentes tipos: prensa de rodillos, molinos verticales de rodillos, molinos de bolas, molinos horizontales de rodillos.

Una vez obtenido el cemento se almacena en silos para ser ensacado o cargado a granel. Esta primera parte de la producción de hormigón (la producción del cemento) genera por cada

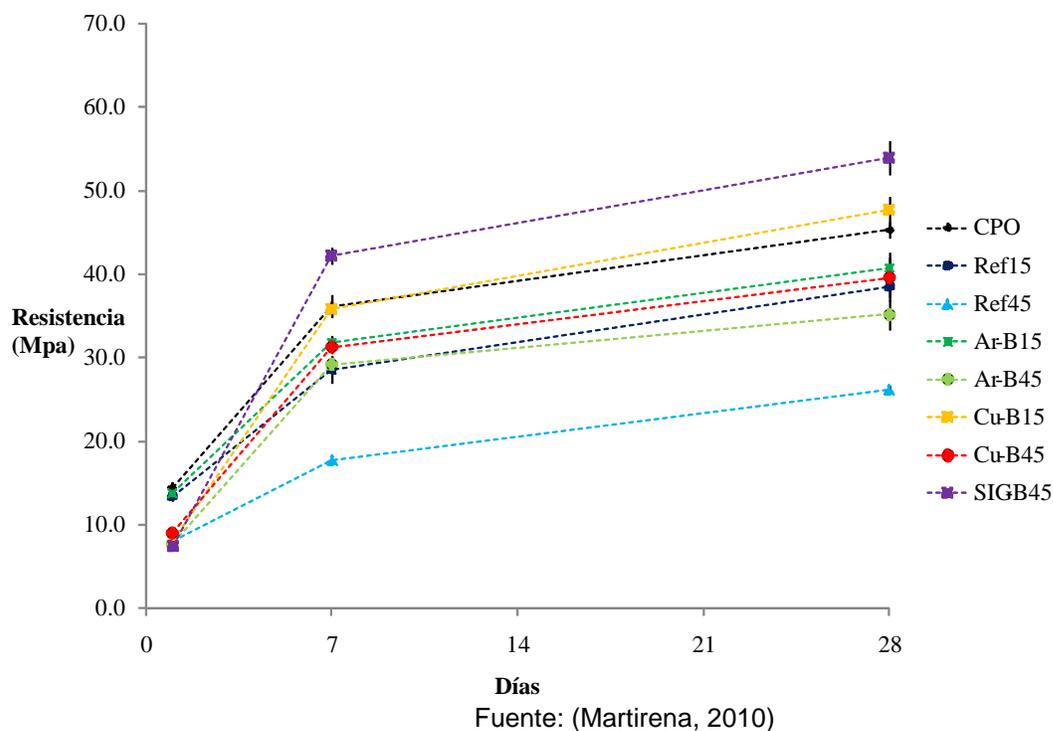
tonelada de cemento una cantidad semejante de dióxido de carbono. Esto implica que una variación en el porcentaje de cemento usado en el hormigón seguramente alterará el impacto medioambiental generado.

El Cemento de Bajo Carbono en Cuba

El Cemento de Bajo Carbono es un cemento que utiliza el matekaolin (MK) como material cementicio suplementario. El MK es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 650°C y 800°C; con esta temperatura se hace una transformación de su estructura cristalina que al perder el agua combinada por la acción térmica destruye la estructura cristalina del caolín (Alujas, 2010).

Al realizar reemplazos de cemento por MK con porcentajes cercanos al 30% se logra, desde edades tempranas, valores de resistencia a compresión muy superiores que los del CPO, incluso superiores a otros cementos con fines específicos que se producen en el mundo (Martirena, 2010), (Abo-El-Enein, 2009) . En la figura 1.3 se muestra la comparación de las resistencia entre el cemento con adición de MK en un 30% (denominado SIG B45) y otros cementos como el cemento portland ordinario (CPO).

Gráfico 1.3: “Comparación entre la resistencia a la compresión de varios cementos”



También se ha probado que los hormigones adicionados con MK tienen mejor laborabilidad pues se acorta el tiempo de fraguado inicial y ayuda a controlar la reacción alcali agregado que reduce el riesgo de corrosión del refuerzo, la hidratación del cemento y mejora la durabilidad del hormigón por la disminución significativa de la permeabilidad (Martínez Castillo, 2012) a los agentes agresivos a través de la matriz. La incorporación de porcentajes mayores del 20%, muestra una importante reducción del volumen y tamaño de los poros en las pastas, disminuyéndolos hasta un 15% (Restrepo et al, 2006), evitando la penetración de los agentes agresivos. Por lo que uso directo o el uso del CBC para hacer hormigones debe tener efectos positivos en la durabilidad y resistencia de las estructuras.

Fabricación del hormigón hidráulico

Cada planta produce diferentes tipos de hormigón, seleccionado de acuerdo a la capacidad de resistencia requerida por la inversión, los cuales parten del diseño de mezcla (en Cuba) propuesto por O'Reilly¹. Dichos hormigones pueden tener un mayor o menor efecto en la cantidad de energía consumida, el tipo de materias primas utilizadas, las emisiones líquidas y gaseosas producidas y los residuos generados. Los principales materiales requeridos para la fabricación del hormigón incluyen los áridos (habitualmente en forma de arena, constituyendo aproximadamente un 34% de la composición del hormigón), grava (en aproximadamente un 48 % del hormigón), cemento (en un 12% de la composición del hormigón), agua (en proceso seco alrededor de un 6%), y cenizas volantes. Mientras los dos tipos de agregados consumen la mayor proporción de la mezcla de hormigón, el cemento es el ingrediente clave ya que hace posible la unión de los otros componentes.

El hormigón puede ser enviado al lugar de la construcción como prefabricado o realizado in-situ. Si no hay notable diferencia energética entre ambos tipos, el hormigón prefabricado implica menos consumo. Aunque podrían existir limitaciones en la transportación por el tamaño y peso de las piezas construidas.

1.1.2 Impactos ambientales asociados a la producción del hormigón

La responsabilidad de la industria del cemento, hormigón y sistemas constructivos en la carga ambiental emitida al planeta: aproximadamente el 10 % del total de emisiones de CO₂ corresponden al sector, y un 5 % de la energía total consumida en el planeta.

¹ Prof. DR.SC.ING Viterbo A. O'Reilly Díaz. Profesor titular del Instituto Superior de ciencias de la Habana. Presidente de la Comisión Nacional del Cemento y el Hormigón de Cuba.

Si comparamos el impacto ambiental de la producción de 1 m³ de hormigón con el de producir 1 ton de acero, es insignificante el impacto del primero respecto al segundo, pero si a esto le asociamos los niveles productivos anuales de cada uno, el hormigón pasa a ser el producto más nocivo, hablando en términos medioambientales.

En cuanto al desglose y cuantificación de las emisiones del hormigón, existen inventarios de ciclo de vida para muchos productos industriales dentro de los cuales destaca el hormigón, por su alto impacto ambiental. Hasta la fecha, sólo países avanzados en el campo de los análisis de ciclo de vida han proporcionado inventarios del cemento. Esto obliga a tener que confiar en inventarios elaborados por otros países. Se hace necesaria la adaptación de los datos más formales disponibles. A continuación, la Tabla 1.2 elaborada a partir de [Häkkinen, T.; Vares, S.; 1998] indica los porcentajes de energía y emisiones más relevantes (CO₂, NO_x y metales pesados) que introduce cada etapa del ciclo de vida del hormigón. Los datos porcentuales referentes al cemento contemplan la obtención de materias primas, su transporte y la producción del cemento.

Tabla 1.2 Emisiones y energía en el ciclo de vida del hormigón.

	Fuel fósil y electricidad	Emisiones de CO ₂	Emisiones de NO _x	Emisiones de metales pesados
Cemento	69%	83%	71%	88%
Áridos	3%	1%	1%	1%
Transporte de materias primas	5%	3%	8%	<1%
Producción de hormigón	16%	8%	5%	10%
Transporte del producto	7%	5%	15%	<1%
Total	100%	100%	100%	100%

Fuente:(John, 2003)

En la tabla anterior se aprecia claramente que el cemento es el principal contaminante. Éste representa más del 70% de las emisiones y energía usada en la fabricación del hormigón debido a las altas temperaturas necesarias para su producción y para la descomposición del carbonato cálcico. Así pues, la cantidad total de efectos ambientales producidos por el hormigón depende en gran parte de su contenido de cemento. Dicho contenido se encuentra habitualmente en porcentajes del 10 al 15% en peso.

El contenido mínimo de cemento de un hormigón viene determinado por el ambiente de exposición al que se verá sometida la estructura a lo largo de su vida útil. Así pues, y tal como dicta la normativa Española de Hormigón Estructural (EHE-99) en su tabla 37.3.2ª, el mínimo contenido de cemento para un ambiente de, por ejemplo, clase I será de 250Kg/m³ mientras que para un ambiente de clase IV será de 325Kg/m³ [Ministerio de Fomento, 1999].

$$\boxed{\text{Clase I}} \frac{250\text{Kg cemento}}{\text{m}^3 \text{hormigón}} \cdot \frac{1\text{Kg CO}_2}{1\text{Kg cemento}} \cdot \frac{1\text{m}^3 \text{hormigón}}{2350\text{Kg hormigón}} = 106\text{g CO}_2 / \text{Kg hormigón}$$

El cemento representa el 83% de las emisiones de CO₂ por lo que el total de emisiones de CO₂ será de **128gCO₂/Kg** hormigón.

$$\boxed{\text{Clase IV}} \frac{325\text{Kg cemento}}{\text{m}^3 \text{hormigón}} \cdot \frac{1\text{Kg CO}_2}{1\text{Kg cemento}} \cdot \frac{1\text{m}^3 \text{hormigón}}{2350\text{Kg hormigón}} = 138\text{g CO}_2 / \text{Kg hormigón}$$

En este segundo caso, el total de emisiones de CO₂ será de **166g CO₂/Kg** hormigón.

Los datos sobre la cantidad de emisiones de CO₂ por volumen de hormigón varían de unas fuentes a otras. El rango se encuentra entre 1 y 1.25 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento [Gjorv, O.E.; 2003; Wilson, A.; 1993]. Considerando de forma conservadora emisiones de una tonelada de CO₂ por tonelada de cemento y una densidad del hormigón de 2350Kg/m³ se obtienen las siguientes emisiones de CO₂ por tonelada de hormigón debidas al cemento.

Es frecuente que en el aspecto ambiental se pase por alto el análisis del entorno más cercano del hombre: las edificaciones donde vive y desarrolla su actividad. En las últimas décadas se ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad del hormigón. Ha sido demostrado su sensibilidad al ataque de determinados agentes agresivos, tales como sulfatos, CO₂, álcalis y ácidos que provocan hasta la destrucción de la matriz completa. Deterioros de estructuras en servicio como consecuencia de la acción de estos agentes se han presentado en las estructuras de los viaductos en EEUU y Canadá, presas y embalses en Europa. (1, 66,133).

La vulnerabilidad del hormigón al medio ambiente es consecuencia de las propiedades del clínker del cemento Pórtland y de las características del sistema de poros de la matriz de hormigón, lo que genera cambios en la tecnología de producción de cemento, para hacerlos resistentes a los ataques de los agentes agresivos, y ha provocado la aparición de nuevos aditivos para mejorar la impermeabilidad de los hormigones (1, 22, 66, 112).

El cemento Pórtland, es el aglomerante por excelencia en la sociedad moderna pero el empleo de fuentes no renovables de energía y el alto nivel de emisiones de gases de efecto

invernadero, hacen que su producción a escala mundial, sea insostenible desde el punto de vista ecológico. La solución para la sostenibilidad de esta industria es incrementar los niveles de eficiencia energética del proceso y el uso de extensores que disminuyan el consumo de clínker, lo cual es aplicable en toda su extensión a las industrias cubanas del cemento y del hormigón.

La producción mundial anual de cemento de 1,6 billones de toneladas ocasiona aproximadamente el 7% de la carga total de dióxido de carbono en la atmósfera. El cemento portland, el principal cemento hidráulico en uso en la actualidad, no es solamente uno de los materiales más energo intensivos de la construcción sino también es responsable de una gran cantidad de gases de efecto invernadero. La producción de 1 tonelada de cemento portland requiere aproximadamente 4 GJ de energía, y su fabricación libera aproximadamente 1 tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera. Las grandes cantidades de extracción de materias primas tales como caliza y arcilla, y el combustible como el carbón, a menudo resultan en una deforestación extensiva y pérdida de suelo superficial. El hormigón común contiene aproximadamente un 12% de cemento y 80% de agregados en masa. Esto significa que globalmente, para hacer el hormigón, se están consumiendo arena, grava, y roca triturada a una velocidad de 10 a 11 billones de toneladas por año. Las operaciones de extracción, procesado, y transporte que involucran tales cantidades de agregados consumen a su vez, cantidades considerables de energía, y afectan adversamente la ecología en las áreas forestadas y lechos de los ríos. La industria del hormigón también emplea grandes cantidades de agua: el requerimiento de agua de mezclado solamente es de aproximadamente 1 trillón de litros, cada año. No hay estimaciones confiables, pero grandes cantidades de agua se usan como agua de lavado en la industria del hormigón elaborado y para el curado del hormigón. Además de los tres componentes primarios, esto es, cemento, agregados, y agua, se incorporan numerosos aditivos químicos y minerales a las mezclas de hormigón. Ellos también representan enormes entradas de energía y materiales en el producto final. Qué se puede decir del pastón, el mezclado, el transporte, la colocación, la consolidación, y la terminación del hormigón? Todas estas operaciones son energo – intensivas. Los combustibles fósiles son el recurso primario de energía, y el público está debatiendo seriamente los costos ambientales asociados con el empleo de combustibles fósiles.

Finalmente, la falta de materiales durables también tiene serias consecuencias ambientales. El incremento de la vida en servicio de los productos es una solución a largo plazo y de fácil solución para preservar los recursos naturales de la tierra. Las estructuras de hormigón están generalmente diseñadas para una vida en servicio de 50 años, pero la experiencia muestra que

en ambientes costeros y urbanos muchas estructuras comienzan a deteriorarse en 20 a 30 años o aún menos tiempo. En Abril de 1999 la edición del ASCE News, de la American Society of Civil Engineers dio a la infraestructura de la nación un grado promedio de D y estimó que se necesitarían u\$ 1,3 trillones para resolver los problemas. El costo para reparar o reemplazar varios miles de apoyos de puentes de hormigón solamente sería de u\$ 80 billones, mientras que los fondos federales anuales presentes con este propósito son aproximadamente u\$ 5 a u\$ 6 billones. Considerando las restricciones de fondos, se ha sugerido que en el futuro las estructuras sean diseñadas y construidas para una vida en servicio de como mínimo 100 a 120 años, y los puentes principales en medio urbanos deberían tener por lo menos 150 años de vida útil. La tendencia hacia la infraestructura de diseño basada en el costo del ciclo de vida no solamente maximizará el retorno del capital disponible sino también el de los recursos naturales disponibles. La necesidad para reducir el impacto ambiental del hormigón se reconoce en un reciente informe del Consejo de Desarrollo Estratégico. Como una versión abreviada del informe, " Visión 2030: Una Visión para la Industria del Hormigón Americana " se publicó en Concrete International, de Marzo de 2001. De acuerdo con este informe, los tecnólogos del hormigón se enfrentan con el desafío de conducir el desarrollo futuro en una forma que proteja la calidad del medio ambiente mientras que proyectan al hormigón como un material de construcción elegible. El compromiso público será responsablemente dirigido considerando el cambio climático resultante de la concentración en aumento de los gases de calentamiento global.

Sugerencias para reducir el impacto ambiental (Mehta, 2001)

El impacto ambiental de la industria del hormigón se puede reducir a través de la productividad de los recursos conservando materiales y energía para la fabricación del hormigón y mejorando la durabilidad de sus productos. La tarea es casi un desafío pero se puede lograr si se la persigue diligentemente. Para examinar cómo la industria del hormigón tendrá que reestructurarse cuando el paradigma de los negocios desplace su énfasis de una cultura de aceleración a una cultura de productividad de los recursos, se dividen los impactos ambientales de la práctica moderna de la construcción de hormigón en varias categorías que se tratan separadamente.

Conservación del cemento

La conservación del cemento es la primera etapa para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. La consideración de la productividad de los recursos requerirá minimizar el uso del cemento portland puro mientras se cumplen las demandas futuras

de mayor cantidad de hormigón. Esto puede constituir una prioridad tope para la industria del hormigón viable. Excepto para los cementos portland mezcla que contienen adiciones minerales, ningún otro cemento hidráulico parece satisfacer el fraguado, el endurecimiento, y las características de la durabilidad de los productos basados en cemento. Aunque hay un crecimiento estacionario en el uso de los cementos portland mezcla que contienen sub productos cementicios o puzolánicos, tales como escoria granulada de alto horno y cenizas volantes, vastas cantidades de estos sub productos aún finalizarán ya sea en aplicaciones de bajo valor tales como rellenos sanitarios y subbases de carreteras, o serán simplemente dispuestos. La velocidad de consumo mundial de cemento se espera que alcance alrededor de 2 billones de toneladas para el año 2010, y hay suministros adecuados de subproductos puzolánicos y cementicios que se pueden emplear como sustitutos del cemento, eliminando así la necesidad de una mayor producción de clínker de cemento portland. En forma interesante, como se ve más adelante, las mezclas de cemento portland que contienen 50% o más de escoria granulada de cemento o cenizas volantes pueden rendir productos de hormigón más durables que los cementos portland puros, y esto contribuiría también a la conservación del recurso natural. Las menores velocidades de fraguado y endurecimiento del hormigón que contiene un alto volumen de un aditivo mineral se pueden compensar por, en cierta forma, la reducción de la relación agua - materiales cementicios con la ayuda de un superplastificante. Sin embargo, para aplicaciones más estructurales, de alguna manera los programas de construcción más lentos deben ser aceptables cuando la maximización del recurso y no la productividad laboral se convierte en el objetivo más importante de la industria.

Conservación de los agregados

En Norte América, Europa, y Japón, alrededor de las dos terceras partes de los residuos de la construcción y demolición consisten de polvo de hormigón antiguo o albañilería. Esto presenta una gran oportunidad para la industria del hormigón de mejorar la productividad de recursos usando agregado grueso obtenido de los residuos de la construcción y demolición. En muchas partes del mundo, se pueden procesar arenas limpias y residuos de minería para usar como agregado fino. Reciclando estos residuos a pesar de que algo del costo de procesamiento se está volviendo económico, particularmente en países donde la tierra es escasa y los costos de disposición de residuos son muy altos: Además los depósitos vírgenes de agregados han sido ya deprimidos en muchas áreas, y los agregados transportados a grandes distancias pueden ser mucho más costosos que el uso de recursos libre o de bajo costo del agregado local reciclado. El hormigón reciclado, en algunos casos, se está usando como relleno de carreteras,

pero está en un ciclo negativo en el sentido que el agregado virgen continúa siendo usado para hacer nuevo hormigón. Se ha estimado que la generación anual mundial de polvo de hormigón y de albañilería es de aproximadamente 1 billón de toneladas. En este momento, se están usando solamente pequeñas cantidades de agregados obtenidas de hormigón reciclado y de albañilería. Debido a consideraciones ambientales y al alto costo de la disposición de los residuos, sin embargo, la mayor parte de los países en Europa han establecido objetivos de corto plazo que apuntan a reciclar entre el 50 y el 90% de los residuos de la construcción y la demolición disponibles. El agregado reciclado, particularmente el de albañilería, tiene una porosidad más alta que el natural. Por eso, con una laborabilidad dada, el requerimiento de agua para hacer hormigón fresco tiende a ser alto y las propiedades mecánicas del hormigón endurecido se ven afectadas adversamente. El problema se puede resolver usando mezclas de agregado natural y reciclado o usando aditivos reductores de agua y cenizas volantes en el hormigón.

Conservación del agua

Por ahora, el agua está disponible en forma abundante en casi todos lados, y se está usando libremente para todos los fines de la industria del hormigón. De hecho, los códigos de práctica de la construcción recomiendan rutinariamente el uso de agua potable para el mezclado y el curado del hormigón. Pero ahora, la situación ha cambiado. Se ha informado que el agua se está volviendo cada vez más escasa cada día. Aunque hay una determinada cantidad de agua sobre la tierra, menos del 3% es limpia y casi la mayor parte de ésta se encuentra en los glaciares de rápida fusión y en capas de hielo, o está demasiado profunda en la tierra para recuperarla. En informes de prensa recientes, el gobierno de la India expresó una profunda preocupación sobre el futuro recorte del agua en el país porque, debido al calentamiento global, los glaciares del Himalaya, que son el recurso principal de agua de los ríos de la India, se han reducido en 30 m durante los últimos dos años solamente. Debido a las necesidades crecientes de la agricultura, urbana e industrial, los niveles de agua en cada continente están cayendo. La contaminación creciente del agua de los ríos, lagos y corrientes compone el problema. Se ha sugerido que con el agua, como con la energía, la única solución práctica a gran escala es usar los recursos que tenemos en la forma más eficiente. Lamentablemente se comete el mismo error con el agua como con la energía. Se consumen los recursos de agua no renovables rápidamente y se busca más agua todavía. Como uno de los más grandes consumidores de agua, es imperativo para la industria del hormigón usarla más eficientemente. Además a los 100 l/m³ aproximadamente se usa como agua de lavado por los camiones hormigoneros, se usa

demasiada agua para el mezclado del hormigón. El requerimiento global de agua de mezclado anual es 1 trillón de litros que se puede reducir a la mitad mediante una buena granulometría de los agregados y expandiendo fundamentalmente el uso de aditivos y superplastificantes. ¿Por qué la industria usa agua municipal de bebida para el mezclado del hormigón? La mayoría de las aguas industriales recicladas o aún las naturales ligeramente saladas son adecuadas para hacer hormigón, siempre que se las pruebe mediante ensayos. Esto es aún más cierto para el agua de lavado y el agua de curado. Se informan reducciones significativas en agua de lavado cuando el hormigón fresco, devuelto es retardado y reusado. Igualmente, se pueden lograr grandes ahorros de agua de curado mediante la aplicación de compuestos textiles que tienen una tela absorbente de agua en el interior y una membrana impermeable en el exterior.

1.1.1 Situación actual de la industria del hormigón en el mundo

La industria del hormigón se ha desarrollado paralelamente a la del cemento. La ciencia del hormigón se ha perfeccionado y sistematizado en el tiempo. Se han logrado significativas economías en el consumo de cemento, con la introducción de los procesos mecanizados de la vibro-compactación en la conformación de los hormigones de consistencia seca, con baja relación agua/cemento, en plantas de prefabricado. (Rosell Lam, 2010)

1.1.2 La industria del hormigón en Cuba

Como bien cita el Lic. Juan de las Cuevas en su valioso libro: 500 años de construcciones en Cuba (pág. 155), (De las Cuevas, 2001) en 1958 ya se contaba en el país con, 4 plantas de prefabricado de hormigón que empleaban a 176 trabajadores y 13 instalaciones para la producción de hormigón premezclado con 316 trabajadores. Estas primeras instalaciones industriales posibilitaron la producción de hormigones de alta resistencia, mayores de 35 MPa (5000 psi) y la construcción de los primeros puentes postensionados de hormigón prefabricados que alcanzaron luces superiores a los 75 ms, así como, el empleo de hormigones premezclado en columnas de edificios altos que alcanzaron resistencia superiores a los 56 MPa (8000 psi) antes del año 59.

Las transformaciones alcanzadas con la tecnología del hormigón en el mundo, antes del año 1959, son introducidas en la fabricación de puentes con la utilización de los hormigones preforzados o postensionados, siendo rutina en la década del 50, hablar de los hormigones de resistencias superiores a los 35.0 MPa y a los 49 MPa, como ejemplo se puede citar la ejecución de los proyectos de puentes postensionados, construidos sobre el río Las Cañas con

76 m de luz, Cuyaguaje con 96 m; el arco triarticulado de 114 m de luz, 50 m de flecha y vigas postensionadas de 22.50 m de luz, del puente Bacunayagua.

Antes del 1959 la producción de elementos prefabricados de hormigón, no superaba los 5,0 Mm³/año y bajo los lineamientos de industrializar la Construcción, trazado por la Revolución, se logran significativos incrementos de la capacidad industrial del prefabricado mediante la ampliación de los polígonos de producción, lográndose producir 797.6 Mm³ en 1975.

En la década del 70 se destaca la introducción de la tecnología de producción altamente mecanizada de losas huecas de hormigón pretensadas de alta resistencia de origen canadiense conocida por Spiroll, y las traviesas de hormigón pretensado Cuba 71 para la rehabilitación del ferrocarril Central, producidas en los años 1974-1976 en moldes de hormigón, donde se utilizó por primera vez, en la escala industrial del prefabricado en Latinoamérica, el aditivo químico superplastificante sobre la base de naftaleno formaldehído sulfonado, Mighty 150, de la firma japonesa Kao Soap Co.

Es de destacar la adopción de la norma NC 120 2007 Hormigón hidráulico. Especificaciones. La cual incorpora en su contenido todos los elementos aplicables de la Norma Europea EN 206-1 2000 Hormigón Parte1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad, desestimando los referidos a los Antecedentes y la Introducción debido a que no se corresponden con las características de esta Norma Cubana. Es una norma única de especificaciones para el hormigón hidráulico de cemento Pórtland, partiendo del concepto básico de que el hormigón tiene que cumplir en la estructura con un determinado desempeño tanto en resistencias mecánicas como en durabilidad.

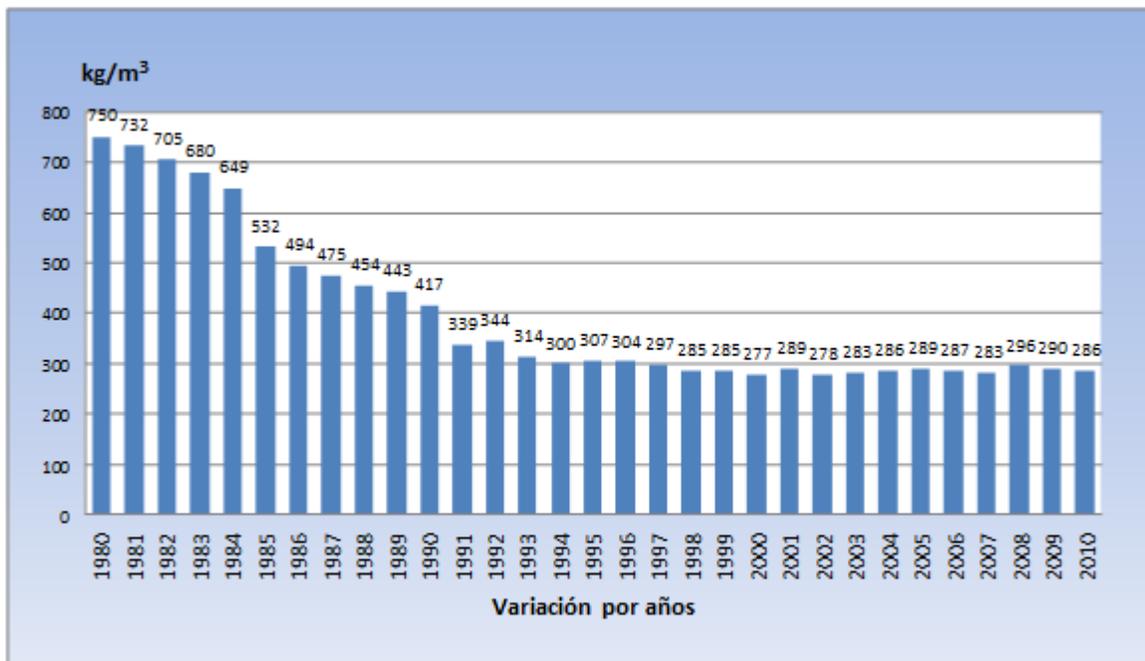
En Cuba la producción de hormigón se caracteriza por ser en un 80% de manera industrializada cuya máxima marca de resistencia es 30 MPa, en la que se utilizan aditivos químicos, aunque no se aprovechan sus potencialidades, dado que los rendimientos de cemento más frecuentes son inferiores a 0,8 y casuísticamente se utilizan materiales cementicios suplementarios de importación.

1.1.3 Retos de la industria del hormigón en Cuba.

Como se conoce, en Cuba, la producción de hormigones ha aumentado hasta llegar cerca de los 200 mil m³ en la actualidad. La provincia de Villa Clara produce la quinta parte del hormigón en el país, debido fundamentalmente a la dinámica inversionista de las obras turísticas ubicadas en la Cayería Norte.

Investigaciones realizadas por el Departamento de Cemento del MICONS Nacional, demuestran el consumo de cemento (kg/m^3) de hormigón producido en el país desde el año 1980- 2010.

Gráfico 1.4 Variación del Índice de Cemento en el Ministerio de la Construcción de Cuba.
Ampliación Método de O'Reilly de Dosificar Hormigón



Fuente: Elaboración propia a partir de entrevista a O'Reilly

No es posible hablar del recientemente concluido siglo XX sin mencionar al hormigón hidráulico de cemento Pórtland, el principal material de construcción en el mundo. Se produce en cada año aproximadamente más de un metro cúbico de hormigón por habitante en el mundo.

No se vislumbra aún ningún otro material de construcción que compita con el hormigón en cuanto a versatilidad para conformar estructuras y economía. El hormigón es además un material amigable con el medio ambiente, admite incorporar en su fabricación subproductos y desechos de otras industrias, puede tener largos plazos de vida útil y es reciclable al finalizar la misma. Las estructuras de hormigón y hormigón armado son competitivas cuando se comparan con otros materiales como las estructuras metálicas, no sólo por sus costos iniciales, sino incluyendo las necesidades de mantenimientos y reparaciones. Incluso en el campo de los pavimentos, los de hormigón (pavimentos rígidos) tienen ventajas competitivas importantes cuando se les compara con los asfálticos y además se puede utilizar el hormigón como alternativa para la reparación de pavimentos de otros materiales, como es el caso de la

tecnología del Whitetopping.

Sin embargo está reconocido a nivel mundial que el hormigón tiene que superar importantes desafíos para mantener su primacía como material de construcción(Howland Albear, 2013):

- Su industria es fragmentada y diversa, muy lenta para investigar nuevas opciones tecnológicas, reacia a invertir en investigación y vacilante para adoptar las nuevas tecnologías.
- Hay que trabajar en la reducción del consumo energético y las emisiones en la producción del cemento: Se emite cerca de una tonelada de CO₂ por cada tonelada de clínker producida.
- Es imprescindible también reducir el consumo energético en el transporte del cemento y el hormigón que consume entre el 20 al 50% del costo final del hormigón.
- No existen fuentes centralizadas de información sobre el desempeño real y la vida útil de los productos y las estructuras de hormigón, lo que dificulta la evaluación de su impacto.
- La industria del hormigón opera sobre la base de prescripciones en lugar del desempeño.

O sea la producción industrial de hormigón tiene un importantísimo impacto energético en la economía de un país y muy especialmente en la construcción.

Una de las principales direcciones de la política energética en Cuba, que ya constituye un paradigma en este hemisferio, es la elevación de la eficiencia energética industrial. Nuestra “Revolución Energética” se fundamenta en la utilización racional de los portadores energéticos, el ahorro de energía eléctrica y la utilización de los grupos electrógenos como alternativa al trabajo de grandes centrales termoeléctricas.

La elevación de la eficiencia energética en la producción industrial de hormigón, requiere en primer lugar el lograr la caracterización de este sistema de forma integral y se han ido dando pasos importantes en el Ministerio de la Construcción para lograr esta integralidad, que depende de factores no sólo tecnológicos, sino también aprovecha las reservas que nos aporta la actividad de investigación-desarrollo, la innovación tecnológica, la capacitación de la fuerza laboral y el control administrativo.

Según reportes actuales, la producción de cemento con petróleo crudo cubano arroja índices de consumo medio de 149.2 kg de crudo por tonelada de clínker producido. El consumo eléctrico está en el orden de 124.8 kW por tonelada de cemento o clínker producido.(Rosell Lam, 2010)

En ambos casos los valores están ligeramente por encima de los promedios mundiales de consumo, lo que aparentemente se debe al envejecimiento de la tecnología, que es básicamente de los años 1970s, aunque muchas plantas han sido parcialmente renovadas, en especial adaptadas para consumir crudo cubano y uso de intensificadores de molienda (62).

Las emisiones totales de GEI alcanzan en el país las 1.179 Gt, donde el CO₂ tiene el mayor aporte. En este año se produjeron en Cuba 22,9 kt de clínker blanco y 1 622,3 kt de clínker gris. Se reporta para estos valores de producción, emisiones de CO₂ en el orden de 1 400 kt, lo que representa aproximadamente 0,85 t de CO₂ por cada t de clínker, correspondiendo con la media mundial. Hoy la producción de cementos mezclados está deprimida, sólo el 15 % de la producción nacional de cemento corresponde a PP-350, PP-250 y CA-160, conllevando a altos consumos de clínker por tonelada de cemento.

A consideración de la autora ésta es una de las fundamentales líneas a retomar para rescatar los niveles de producción, incluso aumentarlas, de manera que el contenido de clínker por tonelada de cemento sea menor, sin aumentar el nivel de las emisiones de GEI y disminuyendo los índices de consumo de energía, RNR, incluyendo portadores energéticos.

La producción de hormigón total en el año 2009 fue de 545.873 m³. En la figura 1.1 se observa la distribución de esta producción, donde sobresale que el 80% es industrializada: hormigón premezclado, prefabricado general, prefabricado destinado a vivienda.

De manera general se puede afirmar que para el Hormigón Premezclado el 80% de la producción corresponde a hormigones de menos de 30 MPa y sólo el 20% igual o más de 30 MPa, mientras que el 70% del prefabricado producido tiene menos de 30 MPa y el 30% igual o más de 30 MPa. De ello se infiere que la producción de hormigón del país es en general menos de 30 MPa donde lo más usual es 25 MPa.

La producción de hormigones de resistencias mayores de 30 MPa existe pero en volúmenes pequeños que se pierden en la estadística, y se limitan a obras casuísticas que generalmente tienen un tratamiento diferenciado por su especificidad desde el diseño, la colocación y el control de la calidad.

Esta característica de producción industrializada, a criterio de la autora propicia la introducción generalizada de cualquier cambio de concepto y de composición del hormigón con garantía de correcta aplicación.

Los rendimientos del cemento tanto en hormigón premezclado como prefabricado en su generalidad son inferiores a 0,8 y la producción más frecuente, está estandarizada a marcas de

resistencias características sin tener en cuenta las especificidades de las prestaciones o las tecnologías de colocación.

Ejemplo de ello son las producciones de paneles Gran Panel VI, para las cuales se producen hormigones de 25 MPa de resistencia característica, con áridos de tamaño máximo 19 mm, asentamientos de 140 mm, con aditivos superplastificante NC 200, de producción nacional, sin embargo el requisito tecnológico es la resistencia de 8 MPa a las 24 horas para levantar la producción, un recubrimiento de los aceros de 20 mm y buen acabado superficial. Aunque el requisito de 8 MPa a las 24 horas se cumple, el rendimiento del cemento es de 0,7 como máximo debido a que la capacidad del aditivo no es utilizada al máximo y las relaciones agua-cemento son generalmente 0,55 a 0,65, por otro lado es obvio que el recubrimiento de los aceros en gran porcentaje es defectuoso por el tamaño máximo de los áridos y generalmente el acabado superficial, sobre todo las aristas, son imperfectas.

Se ha puesto de manifiesto el daño de muchas estructuras de hormigón armado y pretensado, sometidos al ambiente tropical marino que caracteriza al archipiélago cubano, donde aproximadamente 6000 km de costas en un área de 110 922 km² con temperaturas medias anuales que oscilan entre los 24°C y 31°C y de humedades relativas entre 82 y 95%. Se han presentado afectaciones debidas a la corrosión del refuerzo y el deterioro del hormigón que requieren intervenciones para mantenerlas en explotación y prolongar su vida útil.

Con respecto a la durabilidad la NC 120 Hormigón hidráulico. Especificaciones, regula la relación agua/cemento y la resistencia característica mínima que deben tener los hormigones en correspondencia con la agresividad al medio a que estará expuesto, pero remarca la necesidad del porcentaje de finos en la mezcla que garantiza la compacidad y con ello la durabilidad, para lo cual establece un contenido de cemento mínimo, cuestión que incide desfavorablemente en el rendimiento de cemento.

A consideración de la autora, el incremento de la durabilidad de las estructuras bajo nuestras condiciones ambientales se puede lograr con la introducción de los aditivos químicos y los MCS como práctica habitual acompañados de los diseños específicos a las prestaciones y tecnologías de colocación, lo que resultaría un aumento sustancial de los rendimientos de cemento, aumento de la calidad del hormigón en términos de compacidad, impermeabilidad y resistencia mecánica.

1.2 Eco-eficiencia en el sector de la construcción

1.2.1 Surgimiento del concepto eco-eficiencia

Una preocupación creciente ante el declive medioambiental dio lugar a la cumbre de Río de Janeiro de 1992. Aquí los líderes políticos se reunieron para buscar una solución que ayudara a prevenir una catástrofe ambiental que se veía venir a medio plazo. Esta cumbre fue el precursor de otras como la Copenhague de 2009. Como todas las que le han seguido, la cumbre de 1992 de Río fue un desastre. Dio como resultado un protocolo de Kioto poco efectivo y la actitud de los líderes políticos dejó a los líderes empresariales frustrados ante la falta de acciones efectivas.

A través del Consejo Empresarial Mundial por el Desarrollo Sostenible los empresarios decidieron impulsar sus propias medidas para luchar contra la degradación ambiental. En ese momento la estrategia que se decidió impulsar fue la de Eco-Eficiencia. El concepto de eco-eficiencia se veía como una solución integral que permitía a las empresas aumentar sus beneficios a la vez que reducían su impacto ambiental. Por lo tanto ganaban todos: las empresas y el medio ambiente.

Ha tenido tanto éxito que para muchos se ha convertido en la estrategia principal de sostenibilidad. De alguna forma el concepto se ha convertido casi en sinónimo de sostenibilidad o ecológico. (Rohrssen, 2012)

El problema de la eco-eficiencia

A pesar de su gran éxito, hoy dos décadas después podemos ver la eco-eficiencia no garantiza que un producto o servicio sea ecológico, de hecho ni siquiera garantiza reducir el impacto medioambiental.

Para empezar hay que diferenciar entre eficiencia y eficacia:

La eficiencia es hacer un mejor empleo de los recursos. La eficacia es conseguir el efecto deseado.

El problema de los productos eco-eficientes es que suelen hacer un uso más eficiente de los recursos, pero su resultado neto sigue sin ser sostenible. Como dicen los autores del Cradle to Cradle: "menos malo no es bueno." Como contraste un producto eficaz conseguirá el resultado deseado, utilice más o menos recursos. Si entre las especificaciones está el ser un producto sostenible, el producto eficaz será sostenible aunque utilice más recursos.

Según la norma (ISO14045, 2012), *la evaluación de eco-eficiencia es una **herramienta de gestión** cuantitativa que permite el estudio de los impactos medioambientales del ciclo de vida de un producto o servicio conjuntamente con el sistema de valor creado.*

EL Consejo Empresarial Mundial por el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) plantea que *“La eco-eficiencia se obtiene por medio del suministro de bienes y servicios a precios competitivos, que satisfagan las necesidades humanas y proporcionen calidad de vida, mientras progresivamente reducen los impactos ecológicos y el consumo de recursos a lo largo de su ciclo de vida, por lo menos hasta un nivel acorde con la capacidad de carga estimada de la Tierra.”*(WBCSD)

Objetivos generales de la eco-eficiencia

Un estudio de eco-eficiencia se realiza para cumplir los siguientes objetivos:

- 1- Reducir el consumo de recursos: esto incluye minimizar el consumo de energía, materiales, agua y terreno, aumentar la reciclabilidad y la durabilidad del producto, y cerrar el ciclo de los materiales.
- 2- Reducir el impacto en la naturaleza: incluye minimizar las emisiones, vertimientos, disposición de residuos y la dispersión de sustancias tóxicas, también incluye el apoyo al uso sostenible de los recursos naturales.
- 3- Suministrar más valor con el producto o servicio: Significa dar más beneficios a los usuarios, por medio de la funcionalidad, la flexibilidad y la modularidad del producto, entregando servicios adicionales y enfocándose en vender la solución a las necesidades de los clientes. Esto abre la posibilidad para que el usuario dé satisfacción a sus necesidades, con un menor consumo de materiales y recursos.

1.2.2 Indicadores de eco-eficiencia propuestos

El Consejo Empresarial Mundial por el Desarrollo Sostenible (WBCSD) ha desarrollado una estructura común de indicadores para la eco-eficiencia, basado en la norma ISO 14045. Se definen tres niveles de organización de la información de eco-eficiencia: categorías, aspectos e indicadores.

- **Categorías:** son áreas más generales de influencia ambiental y valor empresarial. Cada una tiene un número de aspectos, que son generalmente tipos de información relacionadas a una categoría específica.
- **Aspectos:** describen que es lo que debe ser medido.

- Indicadores: son mediciones específicas de un aspecto individual que puede ser usado para reportar o demostrar un comportamiento. Un aspecto dado puede tener varios indicadores.

La tabla 1.3, muestra las tres categorías identificadas y sus principales aspectos relacionados.

Tabla 1.3: categorías de la eco-eficiencia y sus aspectos principales

Valor de producto o servicio	Influencia medioambiental en la creación de un producto o servicio	Influencia medioambiental en el uso de un producto o servicio
Volumen/masa	Consumo de energía	Características del producto o servicio
Monetario	Consumo de materiales	Desechos de empaque
Función	Consumo de recursos naturales	Consumo de energía
	Eventos no intencionados	Emisiones durante la deposición
	Salidas no productivas	

Fuente:(WBCSD, 2006)

De lo anteriormente expuesto se deriva que los adelantos en la eco-eficiencia puede ser alcanzado produciendo más valor por unidad de influencia medioambiental (valor agregado) o por unidad de recurso consumido.

Varios indicadores son propuestos por(CANCIO, 2014) siguiendo este principio. A continuación se muestran algunos de los indicadores.

$$\text{Indicador de Eco - eficiencia} = \frac{\text{Valor agregado}}{\text{Carga ambiental generada}}$$

$$\text{Indicador de Eco - eficiencia} = \frac{\$ \text{ de valor agregado}}{\text{CO}_2\text{e generado}} / \text{m}^3 \text{ hormigón}$$

Otros indicadores son propuestos por diferentes autores dentro de los que destacan Vanderley (Brasil) y Purnell (Reino Unido). A continuación se presenta un resumen de los indicadores propuestos por estos dos investigadores que abarcan todo el ciclo de vida del hormigón. El

profesor Vanderley evalúa la eco-eficiencia de hormigones y Purnell evalúa la eco-eficiencia en estructuras ya elaboradas.

Los indicadores propuestos por Vanderley son:

Fórmula 1. Intensidad de Aglomerantes (Bi, por sus siglas en ingles)

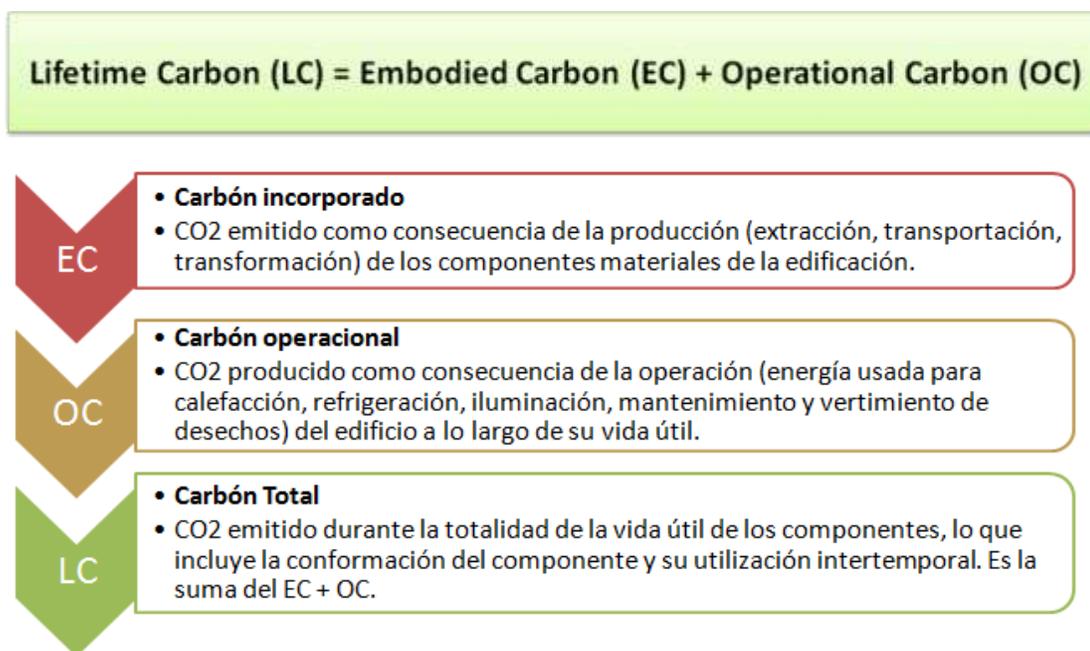
$$b_i = \frac{b}{p} \quad \begin{array}{l} \text{(kg de aglomerante/ m}^3\text{)} \\ \text{(MPa de resistencia a 28 días)} \end{array}$$

Fórmula 2. Intensidad de Carbón (Ci, por sus siglas en ingles)

$$C_i = \frac{c}{p} \quad \begin{array}{l} \text{(total de CO}_2\text{ (kg m}^3\text{) emitido para producir y transportar todas las materias primas)} \\ \text{(resistencia a compresión a 28 días (Mpa))} \end{array}$$

Los indicadores propuestos por el profesor Purnell se muestran en el gráfico 1.5

Gráfico 1.5 Indicadores propuestos por Phillip Purnell para medir la eco-eficiencia de estructuras



Fuente: (Sanchez, 2013)

Existen otros indicadores para medir eco-eficiencia, pero en este trabajo solo se utilizan los aplicables a la producción de hormigón. Este análisis se combina con técnicas econométricas, las cuales se explican en el próximo epígrafe.

1.3 Conceptualización de modelos. Modelos econométricos

Se define un modelo como la representación de algún aspecto de la realidad, una visión particular y formalizada del sistema que se estudia. El modelo no representa toda la realidad, sino solo los aspectos que influyen en los objetivos que desean conseguirse.

También un modelo puede constituir una representación de aspectos ya sean generales o más específicos. Puede tener un papel normativo o descriptivo.

En ciencias aplicadas, un *modelo matemático* es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulación matemática para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Por su parte se puede entender un *modelo económico* como una representación o propuesta, más ampliamente, como un concepto ya sea proposicional o metodológico acerca de algún proceso o fenómeno económico.

Adicionalmente los modelos económicos pueden generalmente dividirse entre modelos conceptuales, que usualmente poseen un carácter crítico o analítico que buscan ser una representación teórica — utilizando variables y sus relaciones matemáticas — del funcionamiento de los diversos procesos económicos y modelos diagramáticos o gráficos que son la representación de datos, generalmente numéricos, mediante recursos gráficos (tales como líneas, vectores, superficies o símbolos), para que las relaciones que los diferentes elementos o factores guardan entre sí se manifiesten visualmente.

Como en otras disciplinas, los modelos son, en general, representaciones ideales o simplificadas, que ayudan a la comprensión de sistemas reales más complejos.

La modelización económica formal constituye en ocasiones el primer paso del análisis empírico, pero normalmente el uso que se hace de la teoría económica es menos formal, basándose incluso únicamente en la intuición.

Un elemento esencial del modelo lineal de regresión es la variable explicada o dependiente que representa el fenómeno objeto de estudio y las variables explicativas, también llamadas independientes o regresores que expresan elementos conocidos que, supuestamente influyen en el comportamiento de la variable objetivo.

La teoría económica nos sugiere que existe una relación funcional entre esta variable explicada (Y) y las variables explicativas (X_j). Es decir, se puede escribir:

$Y = f(x)$ donde $x = (x_2, x_3, \dots, x_k)$ es un vector que agrupa las variables explicativas.

A menudo podemos suponer que una forma lineal representa, o es adecuada para representar esta relación; entonces escribimos:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_K X_K$$

Este sería el *modelo teórico*. Sin embargo, en general no se observa toda la realidad sino que solo una muestra de ella. Por ejemplo, un cierto número de individuos o agentes económicos seleccionados aleatoriamente de la población; entonces escribimos: $Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \dots + \beta_K X_{iK}$ para $i = 1, \dots, n$

Ya que los valores Y_i son extraídos de una muestra que suponemos aleatoria, es inevitable considerar que tienen un carácter estocástico. Es decir, se trata de variables aleatorias. Con el objeto de considerar explícitamente este carácter aleatorio, el mismo se representa por un término aditivo aleatorio U_i , entonces se puede escribir

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \dots + \beta_K X_{iK} + U_i$$

Este es el *modelo econométrico*, donde distinguimos una parte aleatoria, U_i y una parte determinística o sistemática $Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \dots + \beta_K X_{iK}$

Al carácter estocástico de Y_i contribuyen también otros factores, entre ellos: variables que realmente afectan el comportamiento de Y_i y no se están incluyendo, por escaso desarrollo de la teoría económica (por desconocimiento), errores de medida en las

variables del modelo, que pueden estar presentes; ciertos factores que escapan al control de los agentes económicos y que así mismo pueden influir en el comportamiento de determinadas variables económicas. Todos estos elementos están incluidos en la parte aleatoria del modelo econométrico U_i que es una variable aleatoria no observable, que también denominamos parte no sistemática de Y_i , perturbación aleatoria, término de error o error estocástico.

Este modelo contiene además los coeficientes β_j que expresan la contribución marginal que realiza cada variable X_j a la explicación de la variable Y . El coeficiente β_1 es una constante que expresa el nivel de la variable Y común a todas las observaciones, aún sin contribución de sus fundamentos explicativos.

Al especificar un modelo hay que tomar decisiones respecto de la forma funcional, por ejemplo si las variables deben aparecer en forma logarítmica, si se deben incluir algunas variables en nivel o al cuadrado para captar posibles efectos decrecientes, cómo deberían intervenir los factores cualitativos o cómo combinar estos para formar efectos de interacción.

Distintos aspectos del análisis econométrico son:

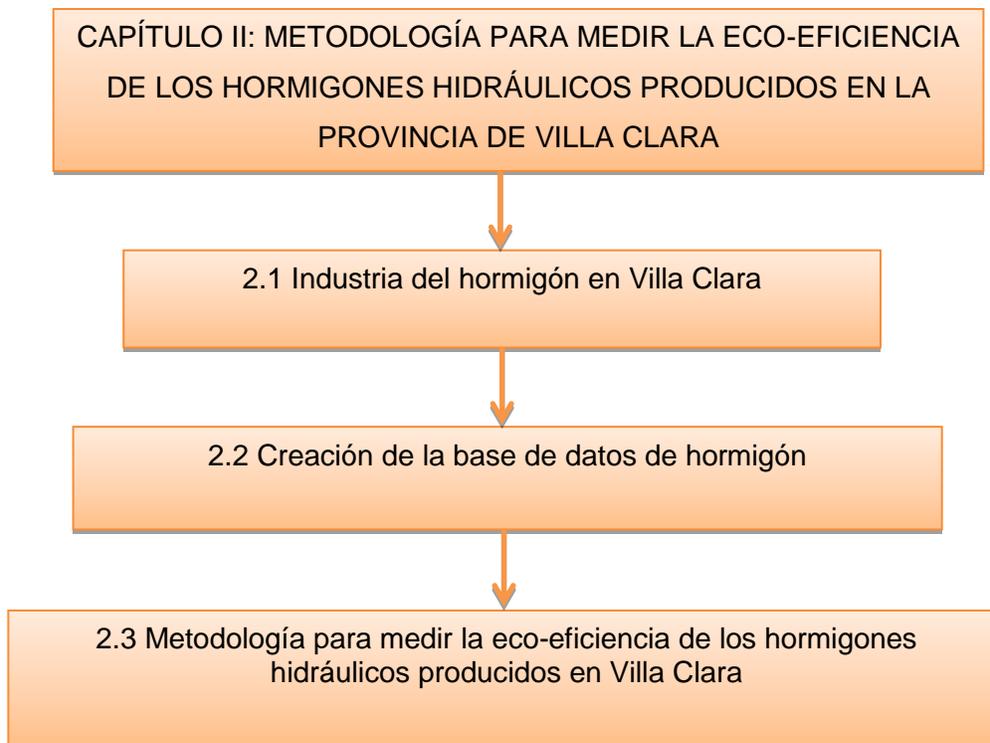
- a) La especificación de la estructura a utilizar, llamada modelo econométrico
- b) El análisis de las propiedades estadísticas de dicho modelo
- c) Su estimación
- d) La utilización de dicho modelo con fines predictivos
- e) La capacidad de dicho modelo para el análisis de determinadas cuestiones de política económica.

Concluyendo la lógica de todo lo anteriormente expuesto, se puede resumir que para el análisis de una determinada cuestión técnica tenemos que primero especificar qué tipo de modelo vamos a utilizar y ver con qué datos contamos para en base a ello aplicar una determinada técnica econométrica y obtener valores numéricos para los

parámetros a través de la estimación con fines predictivos o simplemente un análisis descriptivo del problema.

Capítulo II: Metodología para medir la Eco-Eficiencia de los Hormigones Hidráulicos producidos en la provincia de Villa Clara

Grafico 2.1 Hilo conductor del Capítulo II

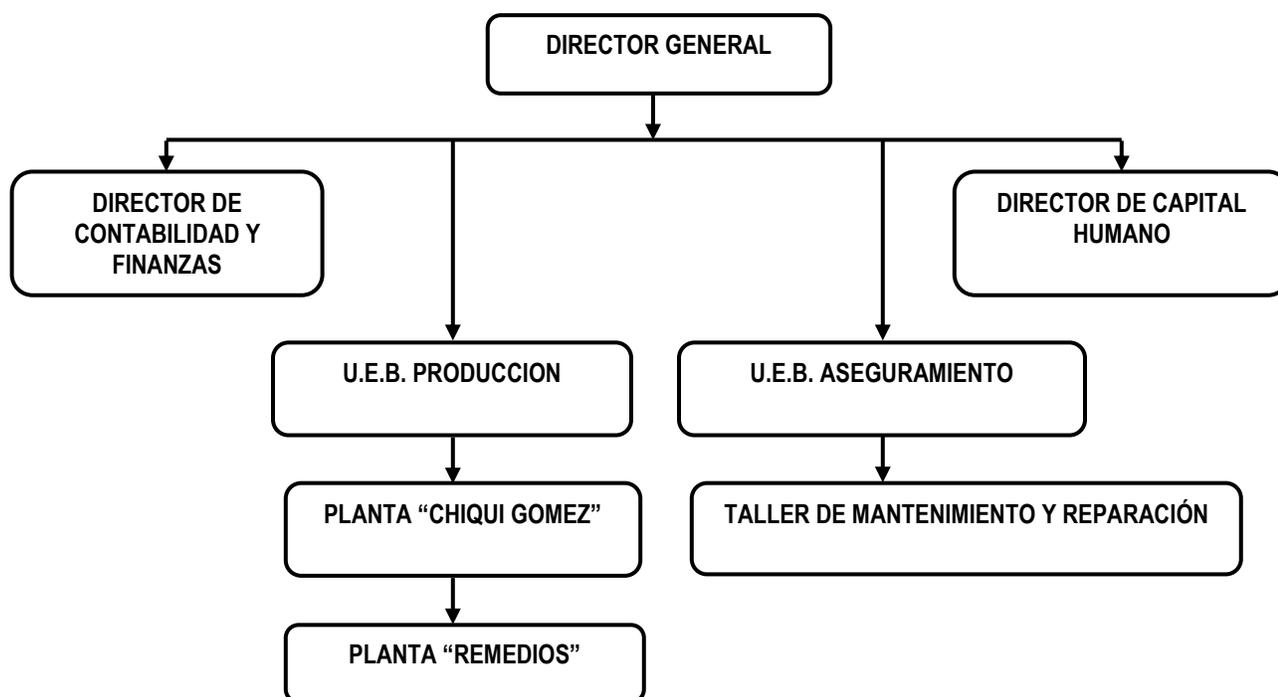


Fuente: Elaboración propia

2.1 Industria del hormigón en Villa Clara

La Empresa de Hormigón de Villa Clara, radicada en la Calle C No. 1 e/c Carretera Central y Final está dedicada a la Producción y Comercialización de Hormigones y Morteros de diferentes resistencias, los Servicios de Transportación Especializados y Servicios de Laboratorio. La estructura de la empresa se muestra en la gráfica 2.2.

Gráfico 2.2: Organigrama General de la Empresa de Hormigón VC



Fuente: (MICONs, 2013)

Posee una fuerza de trabajo total de 63 trabajadores, según las siguientes categorías ocupacionales: 8 cuadros, 13 Técnicos, 2 Servicios, 40 Obreros.

Entre los principales clientes de la empresa se encuentran: la Empresa Constructora de Obras de Ingeniería No 25, la Empresa Constructora de Obras de Arquitectura No. 44, la Empresa Constructora de Obras de Arquitectura e Industriales No 1, la Empresa Mantenimiento Constructivo del Poder Popular, CAP, OBE, Vialidad.

La empresa productora de hormigones hidráulicos y morteros de Villa Clara se distingue por la calidad de sus producciones y cuenta con dos fuertes competidores que son, la Empresa Constructora de Obras del Turismo y la Constructora Militar. Dicha empresa cuenta con valiosos suministradores que abastecen las materias primas, diseños de mezclas, transporte y accesorios necesarios para mantener sus producciones de acuerdo a las necesidades de los clientes. Entre ellos se encuentran: la Comercializadora Escambray, Fábrica de Cemento Karl Marx, Fábrica de Cemento Siguaney, Fábrica de Cemento Guabairo, DIVEP, Empresa

Nacional de Investigaciones Aplicadas, Empresa de Materiales de la Construcción de Villa Clara, Empresa de Transporte de la Construcción (Servicio de Transporte), entre otros.

El Plan de Producción realizado al cierre del 2013 ascendió a 3991.0 MP, para un 111.6% de cumplimiento del mismo. La empresa ha estado inmersa en Obras vitales para la realización de los Programas que desarrolla la Revolución como son: Programa de Viviendas de la provincia, Tarea de Refuerzo (Defensa), Ampliación del Aeropuerto, Vialidad, además del desarrollo constructivo del país en todas las ramas. Todos los trabajadores están acogidos a los diferentes Sistemas de Pago por los Resultados Finales del Trabajo, debidamente capacitados y adiestrados.

Principales Obras en las que se ha participado

- Programa de Viviendas
- Rehabilitación del Acueducto de Santiago de Cuba
- Programa de Grupos Electrógenos de la provincia
- Tareas de la Defensa
- Rehabilitación de Obras Sociales
- Aeropuerto Provincial
- Reparación de los puentes del Pedraplén Caibarién – Santa María
- Apoyo a las Inversiones del MINAZ
- Apoyo a las viviendas del Plan EJE
- Seminternado “José Martí”

La empresa de hormigón en la provincia mensualmente cumple un plan de producción aproximado de 2000-2500 m³ de hormigón y morteros, lo que equivale a cerca de los \$345,000.00 pesos. Sus niveles de producción anual sobrepasan a los 28 mil metros cúbicos.

Atendiendo uno de los indicadores de eficiencia más utilizados en esta industria que relaciona el consumo de cemento por m³ de hormigón podemos observar, en la tabla 2.1, que la industria de Villa Clara tiene uno de los índices de consumo de cemento más altos del país. En el año 2013, se reduce este consumo a 337 kgs de cemento por m³ de hormigón. Los altos registros de la provincia deben estar asociados directamente al tipo de producciones que se realizan (principalmente en el sector turístico), que requieren de hormigones de altas prestaciones para resistir condiciones agresivas en ambientes de alta salinidad, etc.

Tabla 2.1: Índice de consumo de cemento por m³ de hormigón por provincias de Cuba en 2013

No.	PROVINCIA	IC PLAN	IC-REAL	IC-DOSIF	REAL/PLAN	REAL/DOSIF	DOSIF/PLAN
1	PINAR DEL RIO	305	301	299	99%	101%	98%
2	ARTEMISA	305	313	314	103%	100%	103%
3	LA HABANA	335	399	384	119%	104%	115%
4	ISLA DE LA JUVENTUD	300	298	323	99%	92%	108%
5	MAYABEQUE	305	360	369	118%	98%	121%
6	MATANZAS	310	338	342	109%	99%	110%
7	VARADERO	330	353	357	107%	99%	108%
8	VILLA CLARA	340	337	340	99%	99%	100%
9	CIENFUEGOS	300	324	330	108%	98%	110%
10	SANCTI SPIRITUS	295	339	347	115%	98%	117%
11	CIEGO DE AVILA	305	398	375	130%	106%	123%
12	CAMAGUEY	300	358	406	119%	88%	135%
13	LAS TUNAS	310	422	416	136%	101%	134%
14	HOLGUIN	315	342	351	109%	97%	111%
15	GRANMA	300	308	352	103%	87%	117%
16	SANTIAGO DE CUBA	320	448	476	140%	94%	149%
17	GUANTANAMO	290	333	347	115%	96%	120%
18	AEI-MARIEL	460	460	449	100%	102%	98%
Total general		318	357	364	112%	98%	114%

Fuente: Elaborado a partir de información MICONS 2013. ([VC, 2013](#))

Haciendo una valoración en el año 2011, se muestra que aunque las producciones de hormigones hidráulicos en Villa Clara no llegaron al rendimiento esperado (propuesto por O'Reilly para los hormigones eficientes) de 1kg cemento x kg de resistencia, se tuvieron resultados aceptables en algunas provincias del país, guiadas por Villa Clara que ha logrado diseños de mezclas cercanos para la eficiencia de las producciones. Dichas provincias son:

- Villa Clara ----- 0.91
- Ciego de Ávila ----- 0.79
- Grupo Turismo ----- 0.74
- Camaguey ----- 0.73
- Cienfuegos ----- 0.73
- Granma ----- 0.72
- Matanzas ----- 0.71

2.2 Creación de la base de datos de hormigón

Partiendo de la necesidad de evaluar la eco-eficiencia de los hormigones hidráulicos producidos en la provincia de Villa Clara, se decide confeccionar una base de datos que permita organizar por años y por características significativas las producciones tanto en hormigones premezclados en planta como producidos en obras (In situ) y en plantas de prefabricados. Para la creación de la base de datos fueron analizados valores comprendidos entre los años 2005 – 2014. Se procesaron un total aproximado de 332 registros, los que comprende 301 informes del laboratorio de materiales de la ENIA y 31 informes por trimestres pertenecientes al MICONS en la provincia. (Ver Tabla No. 2.2 y 2.3)

El Informe Técnico de Hormigón Hidráulico, realizado por la ENIA muestra la resistencia de diseño, el asentamiento y la resistencia del hormigón a diferentes edades, como datos más significativos para la posterior evaluación, tomando para nuestro trabajo el valor de resistencia a los 28 días.

Imagen 2.2. R-4-15-04.E Informe Técnico de Hormigón Hidráulico

MUEST N°		FECHA HORMI		ELEMENTO		As (cm)		RE-SIST ESPEC (MPa)		RESISTENCIA OBTENIDA EN MPa															CONFORMIDAD.	
										7 Días					14 DÍAS					28 DÍAS						
										1	2	3	M	INC	1	2	3	M	INC	1	2	3	M	Inc.	S _m	f _{es}
68	13/08/09	VZB 27(2u), CD 02 (2u).	19	30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	41.0	40.7	41.2	41.0	± 0.58							
68	13/08/09	VZB 27(2u), CD 02 (2u).	19	30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	40.8	41.5	40.7	41.0	± 0.96							
69	13/08/10	PC04 (2u)PC03 (2u).	19	30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	43.1	42.9	43.3	43.1	± 0.58							
69	13/08/10	PC04 (2u)PC03 (2u).	19	30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	43.1	42.9	43.3	43.1	± 0.58							
70	13/08/14	Vale 383 LB 08(2u) VZ 04(4u).	18	30	--	--	--	--	--	36.6	36.3	36.9	36.6	±0.40	36.6	36.3	36.9	36.6	± 0.73	--	--					
71	13/08/16	Vale - 430 VZ02 (2u) VS02 - 40.	18	30	--	--	--	--	--	42.9	43.4	43.1	43.1	±0.74	47.4	46.9	47.1	47.1	± 0.74							
72	13/08/16	Vale 494 PC34.1, PC 33-1, PC24.1	17	30	27.3	28.4	27.9	27.9	±1.43	--	--	--	--	--	38.2	38.1	38.3	38.2	± 0.40							
<p>Referencia: Asentamiento: As. Resistencia Especificada en MPa: RESIST. ESPEC. Observaciones: Se usan las NC 120.2007. Hormigón Hidráulico. Especificaciones y NC 192:2012 Hormigón Hidráulico. Determinación de la resistencia característica real a la compresión en la evaluación de la conformidad. El laboratorio está disponible para cooperar con el cliente en la interpretación de los resultados que se emiten en este informe y en cualquier exégesis técnica en la que estén involucrados los mismos. La incertidumbre está expandida con un factor de cobertura k=2 Obra: Prefabricado Central. AEI-SM</p>																										
Elaborado por: Ing. Ricardo Reyes Santana								Firma:								Aprobado por: Ing. María A. Cabrera.								Firma: J ^o Técnico de Calidad.		

Fuente: (ENIA, 2005-2014)

La base de datos conformada cuenta con más de 900 datos procesados. Se tomaron los datos de resistencia a compresión a los 28 días (MPa), el consumo de cemento (kg), Resistencia de diseño (MPa), Consistencia (asentamiento) y procedencia del cemento, como los más significativos para el estudio. La tabla No. 2.4 muestra el formato final de la base de datos estadística de hormigones hidráulicos en Villa Clara.

Tabla 2.4. Base de Datos de Hormigones Hidráulicos en Villa Clara (2005-2014).

Resistencia Espec. (Mpa)	Contenido de cemento (kg)	Procedencia del cemento	Resistencia 28 días (MPa)	Resistencia 28 días (kg)	Observaciones	Eficiencia	ton CO2/m ³	CI (kgs CO2/MPa)
20	280	Cfg	23.40	234	Cuarteria Pablo. Pichs	1.20	271	1.16
20	280	Cfg	24.00	240	Encomed-Las Palmeras	1.17	271	1.13
20	280	Cfg	25.00	250	Encomed	1.12	271	1.08
20	280	Cfg	25.40	254	CLVC	1.10	271	1.07
20	280	Cfg	25.85	259	Brisas del Oeste	1.08	271	1.05
30	385	cfg	37.91	379	IMS	1.02	372	0.98
30	365	cfg	38.35	383	IMS	0.95	353	0.92
25	300	cfg	30.98	310	REMEDIOS	0.97	290	0.94
30	360	cfg	37.48	375	REMEDIOS	0.96	348	0.93
30	360	cfg	38.85	388	REMEDIOS	0.93	348	0.90
35	450	cfg	56.08	561	REMEDIOS	0.80	435	0.78
20	270	cfg	25.65	256	SAGUA	1.05	261	1.02
20	280	cfg	26.11	261	SAGUA	1.07	271	1.04
20	280	cfg	25.83	258	SAGUA	1.08	271	1.05
25	300	cfg	30.96	310	SAGUA	0.97	290	0.94
25	305	cfg	31.80	318	SAGUA	0.96	295	0.93
25	310	cfg	31.46	315	SAGUA	0.99	300	0.95
20	280	cfg	28.96	290	Luis Ramirez Lopez	0.97	271	0.94
25	305	cfg	34.05	340	Luis Ramirez Lopez	0.90	295	0.87

Fuente: Elaboración Propia.

Además, se seleccionaron 101 datos de esta población para hacer un análisis de regresión lineal teniendo en cuenta otros aspectos cruciales del hormigón como el contenido de: arena, gravilla, cemento, aditivo, agua y otros datos importantes como la relación a/c asociada a cada uno de los diseños de mezcla. Para la base de datos total no se tuvieron en cuenta todos estos datos por la magnitud del trabajo y el tiempo disponible para su procesamiento. No obstante estos valores pudieran considerarse en estudios futuros para el perfeccionamiento de dicha base estadística. En la tabla 2.5 se muestra un fragmento de los datos utilizados para la regresión lineal.

Tabla 2.5: Base de datos para análisis de regresión lineal

	Tipo de hormigón	Cemento P-350	Arena	Gravilla	Agua	Aditivo	R, a/c Amasada	Resistencia 28 días Mpa
1	Hidraulico	300.00	882.00	994.00	170.00	1.93	0.57	20.00
2	Hidraulico	390.00	839.00	946.00	175.00	2.50	0.45	30.00
3	Hidraulico	390.00	893.00	893.00	175.00	2.50	0.45	30.00
4	Hidraulico	410.00	817.00	921.00	188.00	4.17	0.46	30.00
5	Hidraulico	460.00	770.00	868.00	205.00	4.68	0.45	35.00
6	Hidraulico	440.00	790.00	891.00	200.00	0.00	0.45	30.00
7	Hidraulico	480.00	756.00	852.00	215.00	0.00	0.45	35.00
8	Hidraulico	420.00	776.00	948.00	190.00	4.27	0.45	30.00
9	Hidraulico	470.00	733.00	896.00	210.00	4.78	0.45	35.00
10	Hidraulico	450.00	753.00	920.00	200.00	0.00	0.44	30.00
11	Hidraulico	490.00	713.00	872.00	220.00	0.00	0.45	35.00
12	Hidraulico	300.00	845.00	952.00	185.00	1.93	0.62	20.00
13	Hidraulico	390.00	810.00	913.00	184.00	2.50	0.47	30.00
14	Hidraulico	390.00	856.00	856.00	188.00	2.50	0.48	35.00
15	Inf,Tec,Horm,Hid	300.00	845.00	952.00	185.00	1.93	0.62	20.00
16	Inf,Tec,Horm,Hid	390.00	810.00	913.00	184.00	2.50	0.47	30.00
17	Inf,Tec,Horm,Hid	390.00	856.00	856.00	188.00	2.50	0.48	30.00
18	Hidraulico	240.00	956.00	956.00	170.00	2.39	0.71	15.00
19	Hidraulico	300.00	870.00	980.00	177.00	3.05	0.59	20.00
20	Hidraulico	345.00	835.00	942.00	188.00	3.51	0.54	25.00
21	Hidraulico	305.00	871.00	871.00	215.00	0.00	0.70	15.00
22	Hidraulico	385.00	795.00	896.00	215.00	0.00	0.59	20.00

Fuente: Elaboración propia

Esta base de datos permite la correlación directa de los datos independientes (cemento, arena, gravilla, agua, aditivo y relación a/c) y su relación directa con la variable dependiente resistencia del hormigón.

En el próximo epígrafe se describe la metodología usada para el procesamiento de los datos con el objetivo de calcular su eco-eficiencia y realizar análisis estadísticos específicos.

2.3 Metodología para medir la eco-eficiencia de los hormigones hidráulicos producidos en Villa Clara

Para evaluar la eco-eficiencia de hormigones hidráulicos producidos en Villa Clara durante los últimos 10 años, se elige la combinación de los métodos propuestos por O'Reilly y Vanderley², incidiendo en gran proporción el diseño de mezclas para su producción.

2.3.1 Indicadores a evaluar

Método O Reilly

El procedimiento propuesto por Vitervo O'Reilly (1993) se utiliza en Cuba y en otros países de África y América. Una de las principales ventajas de este método es el ahorro de cemento que proporciona. En efecto, comparado con otros métodos (europeo, ACI), el método O'Reilly puede

² Vanderley, Jhon. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil de Escuela Politécnica adscrita a la Universidad de Sao Paulo, Brasil

llegar a reducir en un 15% o más el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón. Esto tiene una repercusión económica muy importante en la industria de la construcción.

Con el objetivo de lograr el máximo ahorro de cemento con las condiciones tecnológicas existentes, sin requerir nuevas inversiones o eventuales importaciones de aditivos químicos para las mezclas de hormigón, O'Reilly propone un método de dosificación a partir de la determinación de las características de los áridos a emplear, y en función de ellas se diseña la mezcla, pues según demuestra existe una influencia cuantitativa de la forma de los áridos en el consumo de cemento.

El método consiste en determinar experimentalmente la combinación porcentual de áridos gruesos y arena que ofrezca el máximo peso volumétrico (mínimo contenido de vacíos), obteniendo el volumen de la pasta a través del cálculo de los vacíos, y finalmente el contenido de cemento y de agua se determina mediante factores que dependen de la relación agua/cemento y de la consistencia deseada de la mezcla.

La composición del hormigón y los materiales constituyentes se elige para satisfacer los requisitos especificados para el hormigón fresco y endurecido, que incluyen la consistencia, densidad, resistencias mecánicas, durabilidad en general, teniendo en cuenta los procesos de fabricación y el método elegido para la ejecución.(NC120, 2007)

Para la evaluación de la eco-eficiencia se utiliza como principal indicador propuesto por O'Reilly el siguiente:

$$Eficiencia_{O'Reilly} = \frac{kg_{cemento} / m^3_{hormigon}}{resistencia(MPa)}$$

Este indicador y la metodología propuesta por el profesor O'Reilly guarda estrecha relación y es complementada por el método propuesto por el profesor Vanderley, de Brasil.

Método Vanderley

El método propuesto por el profesor Vanderley, permite medir el impacto ambiental y la eficiencia global de cualquier construcción de hormigón en relación a la principal unidad funcional de comportamiento, que en la mayoría de los casos es la resistencia a compresión a los 28 días.

Destaca que la unidad funcional en este caso no es una unidad de masa o volumen de hormigón, ya que usando este indicador de comportamiento (que responde a la principal característica del hormigón) permite evitando distorsiones que pueden ocurrir cuando se evalúan el volumen o masa de cada uno de los materiales. Este enfoque permite comparar la

eficiencia de hormigones con diferentes calidades lo que se favorece la búsqueda del diseño de mezcla ideal.

Como el calentamiento global es una preocupación para la industria del hormigón es importante desarrollar un indicador que permita comparar las formulaciones del hormigón con sus impactos asociados en términos de emisiones de CO₂.

Propone dos indicadores simples:

- Intensidad de aglomerante (Binder intensity (bi)), que mide la cantidad total de aglomerante necesaria para obtener 1Mpa de resistencia.

$$Bi = b / p$$

Donde (b) es el consumo total de materiales aglomerantes (kg /m³) y (p) es la resistencia a compresión (MPa), pero el indicador y la edad pueden variar dependiendo del uso del hormigón.

- Intensidad de CO₂ (CO₂ intensity (ci)), indicador definido como la cantidad de CO₂ emitida para obtener 1 Mpa de resistencia.

$$Ci = c / p$$

Donde (c) es el CO₂ total (kg/m³) emitido para producir y transportar todas las materias primas del hormigón y (p) es la resistencia a compresión (MPa). En la mayoría de los casos la (p) usada para calcular el Ci es la resistencia a compresión.

Combinados, ambos indicadores permiten la evaluación acertada de la eco-eficiencia del uso del cemento. La intensidad de aglomerantes proporciona la eficiencia del uso del clínker y otros sustitutos del clínker difíciles de encontrar. La intensidad de CO₂ permite estimar el Potencial de Calentamiento Global de cada diseño de mezcla.

Si se combina con técnicas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) pueden evaluarse indicadores similares con las emisiones de otros gases como (SO_x, NO_x, etc) que están presentes en bases de datos internacionales.

Los indicadores Bi y Ci incorporan varios factores de: (1) la eficiencia de la producción de cemento; (2) el diseño de mezcla del hormigón; y (3) la selección de los materiales del hormigón, que incluye la naturaleza y calidad de las materias primas como el uso de bioplastificantes, la reactividad del clínker, y las adiciones minerales usadas.

Estos indicadores permiten evaluar la eficiencia de todo el proceso productivo desde la producción de cemento hasta el hormigón. Otros indicadores usados como el % de reemplazo del clínker y la intensidad de energía en la producción de clínker no permiten obtener un resultado tan global.

2.3.2 Modelo de regresión múltiple

Usando el modelo de regresión simple no es fácil deducir conclusiones *ceteris paribus* sobre el efecto de x en y . Implícito está el supuesto de que los otros factores que influyen en y no se relacionan con x , lo cual no será en general realista.

El análisis de regresión múltiple se presta mejor al examen *ceteris paribus* porque permite controlar explícitamente otros factores que influyen de manera simultánea en la variable dependiente. La incorporación de muchas variables explicativas que podrían estar correlacionadas, permite inferir causalidad en los casos en que el análisis de regresión simple sería equívoco. Una vez especificados estos modelos, pueden formularse varias hipótesis de interés en término de los parámetros desconocidos y pueden tomarse medidas de bondad de ajuste que verifiquen la validez del modelo formulado.

Para obtener estimadores fiables de los parámetros descritos en el modelo se debe revisar el cumplimiento de un conjunto de supuestos que se resumen a continuación:

1. Linealidad en los parámetros: el modelo poblacional puede establecerse como

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_K x_{iK} + u$$
 donde $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_K$ son los parámetros de interés desconocidos (constantes) y u es un error aleatorio no observado.

2. Muestreo aleatorio: se tiene un muestreo aleatorio de n observaciones $\{(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iK}, y_i) : i = 1, 2, \dots, n\}$ partiendo del modelo poblacional descrito en 1.
3. Valor esperado condicionado nulo: el error u tiene un valor esperado nulo, dado cualquier valor de las variables independientes. En otras palabras, $E(u / x_1, x_2, \dots, x_K) = 0$
4. No colinealidad perfecta: en la muestra (y, por tanto, en la población), ninguna de las variables independientes es constante, y no existen relaciones *lineales exactas* entre las variables independientes.

Bajo los supuestos anteriores, $E(\hat{\beta}_j) = \beta_j$ para $j = 0, 1, 2, \dots, k$. En otras palabras, los estimadores de MCO son estimadores insesgados de los parámetros poblacionales. Cuando decimos que los estimadores de MCO son insesgados, nos referimos al procedimiento por el que los obtuvimos cuando consideramos su aplicación a todas las muestras aleatorias posibles.

Con respecto a una muestra particular, esperamos que esta nos dé una estimación cercana al valor poblacional, pero no podemos estar seguros de que así ocurra. Y finalmente:

5. Homoscedasticidad: $Var(u / x_1, \dots, x_K) = \sigma^2$. Lo que significa que la varianza en el término de error, u condicionada a las variables explicativas, es la misma para todas las combinaciones de valores de las variables explicativas.

Bajo los cinco supuestos enunciados el estimador de MCO $\hat{\beta}_j$ es el mejor estimador lineal insesgado para β_j (MELI) (teorema de Gauss-Markov).

En los modelos de regresión múltiple pueden darse problemas estructurales en su especificación entre otras causas por la *inclusión de variables irrelevantes*. Esto es que en el modelo pueden incluirse una o más variables independientes aunque no tengan un efecto parcial en la población (es decir que su coeficiente poblacional sea cero).

En términos del insesgamiento de los restantes β_j , no hay ningún efecto sin embargo puede afectar las varianzas de los estimadores MCO.

Otra causa puede ser el sesgo de variable omitida. En este caso se omite una variable que sí pertenece al modelo verdadero (o poblacional) y este problema hace que los estimadores de los MCO sean sesgados

Los modelos de regresión lineal múltiples pueden adoptar varias formas funcionales comúnmente empleadas en economía aunque en muchas ocasiones la teoría económica deja generalmente indeterminada las mismas cuando se trata de la relaciones entre variables económicas, por lo que en ocasiones estas pueden ser, no lineales. En la Economía se presentan infinidad de situaciones en que la forma de los modelos a utilizar no es lineal; adoptando formas muy diversas y complejas.

Capítulo III: Evaluación de la Eco-Eficiencia de los Hormigones producidos en la provincia de Villa Clara en los últimos 10 años

Grafico 3.1 Hilo conductor del Capítulo III



Fuente: Elaboración propia

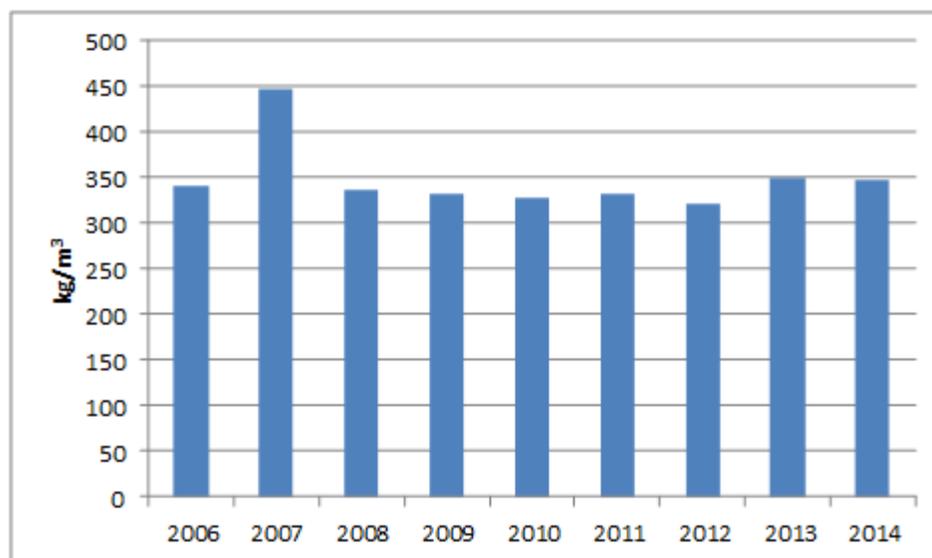
3.1 Estudio de la eco-eficiencia de hormigones producidos en Villa Clara.

Método O'reilly

Luego de conformada la base de datos, se –evalúan los indicadores de eco-eficiencia. Utilizando el método O'reilly se hace un análisis del consumo de cemento en kg/ m³ de hormigón, tanto in situ como premezclado en la provincia, para el periodo de tiempo analizado. En el gráfico 3.2 se puede observar el comportamiento favorable respecto al consumo de

aglomerante en la provincia, con tendencia al ahorro, considerando los diseños de mezclas hacia lograr la eficiencia en los hormigones producido.

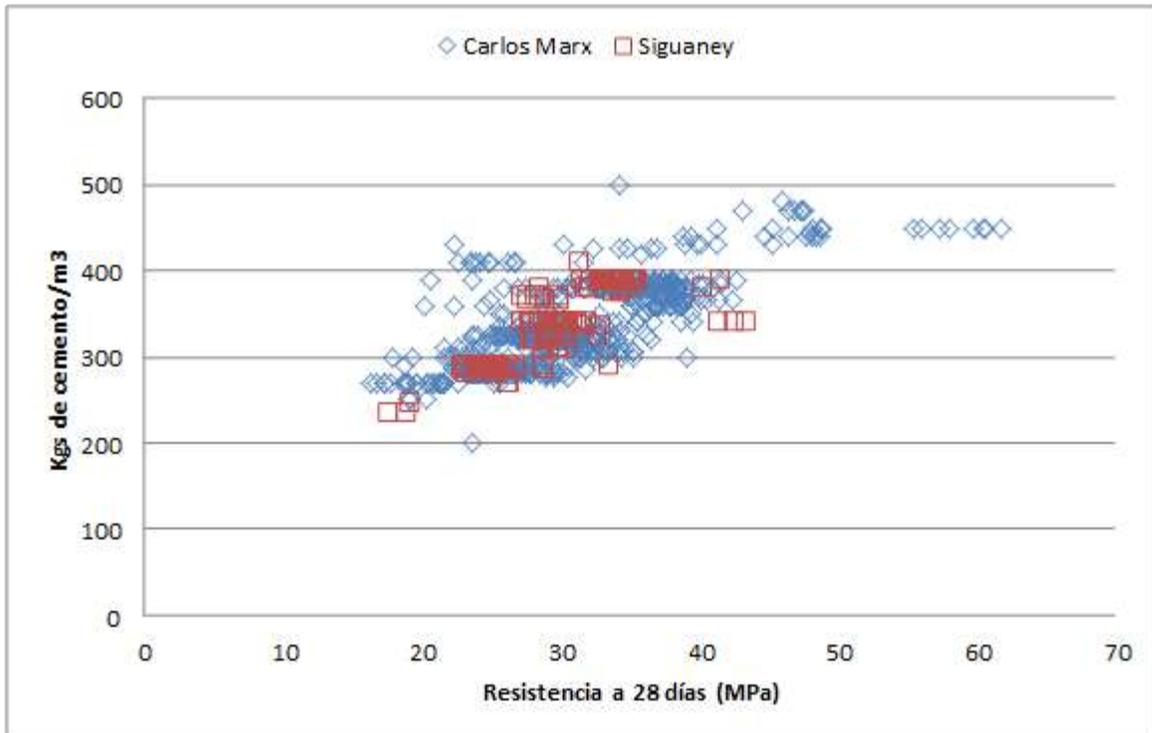
Gráfico 3.2 Consumo de cemento en la provincia de Villa Clara (años 2005-2014).



Fuente: Elaboración Propia

Además se realiza un análisis de la eficiencia de hormigones hidráulicos producidos en Villa Clara según procedencia del cemento, que puede proceder de Karl Marx, Cienfuegos y Siguaney. La eficiencia se calcula comparando el comportamiento del aglomerante respecto a la resistencia a compresión a los 28 días, mostrando entre los mismos una capacidad de resistencia similar, a pesar de prevalecer en la provincia, durante estos últimos 10 años, el consumo de cemento de la fábrica Carlos Marx en un 83%. También se nota en el gráfico 3.3 que los hormigones más resistentes se elaboran con P-35 de Cienfuegos, pero esto puede estar causado por la superioridad en el consumo de este producto.

Grafico 3.3 Eficiencia de hormigones producidos en Villa Clara según procedencia de cemento
(2006- 2014)



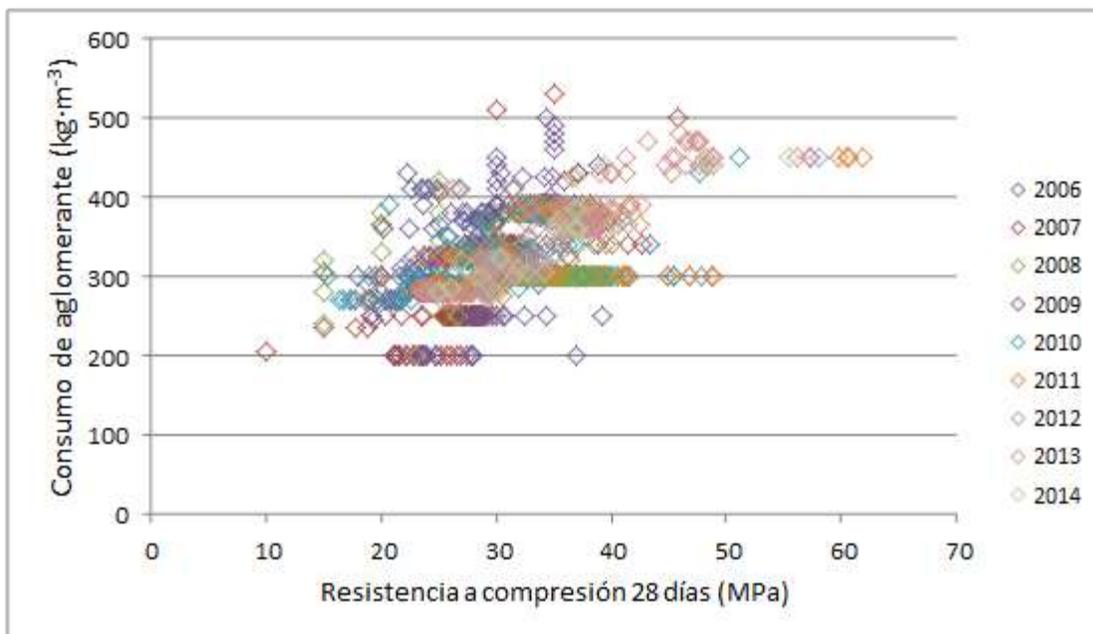
Fuente: Elaboración Propia.

Método Vanderley

Aplicando el método Vanderley, se evalúan dos indicadores propuestos –intensidad de aglomerantes y intensidad de carbón- cuya diferencia con el método O’Reilly es que permite la relación directa con la resistencia a 28 días (u otro indicador de comportamiento) de los hormigones. El gráfico 3.4 muestra en un diagrama de dispersión relacionados el consumo de cemento por m³ asociado a la resistencia. Como se observa, existe relativa dispersión entre los datos, que oscilan mayormente entre 200 y 400 kg de cemento para obtener entre 20 y 40 MPa de resistencia. Utilizando la nomenclatura propuesta de O’Reilly obtendríamos

aproximadamente entre 200 y 400 kg de resistencia para una eficiencia del hormigón aproximada de 1.

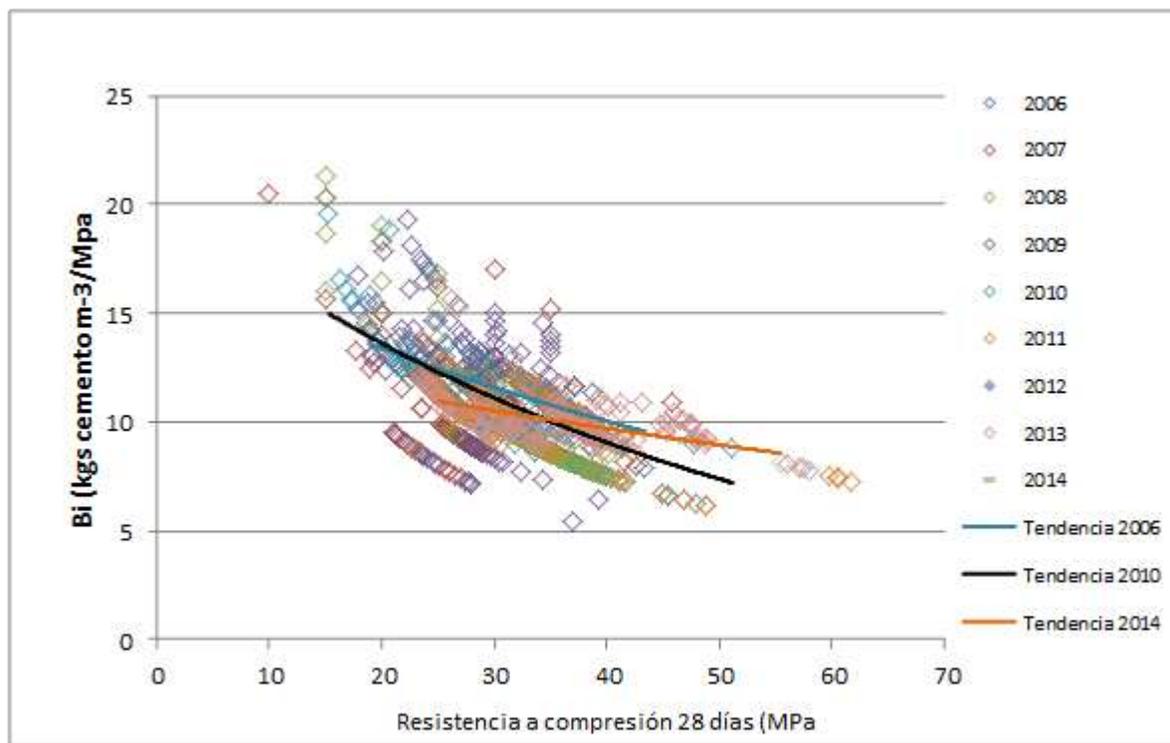
Grafico 3.4 Eficiencia de hormigones producidos en Villa Clara (2006-2014)



Fuente: Elaboración Propia.

Analizando desde otra perspectiva, en la gráfica 3.5 se relaciona el b_i con la resistencia asociada. Las curvas de tendencia muestran: 1) una relación inversa entre la resistencia y la intensidad de aglomerante -explicada por una sencilla relación matemática- y 2) una reducción tendencial en el consumo de aglomerantes para lograr un MPa de resistencia entre 2006 y 2010; en el 2014 se observa un aumento del consumo de aglomerantes que esta directamente asociado a un aumento en la resistencia obtenida de los hormigones.

Gráfico 3.5: Resistencia a compresión y consumo de aglomerantes de los hormigones producidos en Villa Clara.



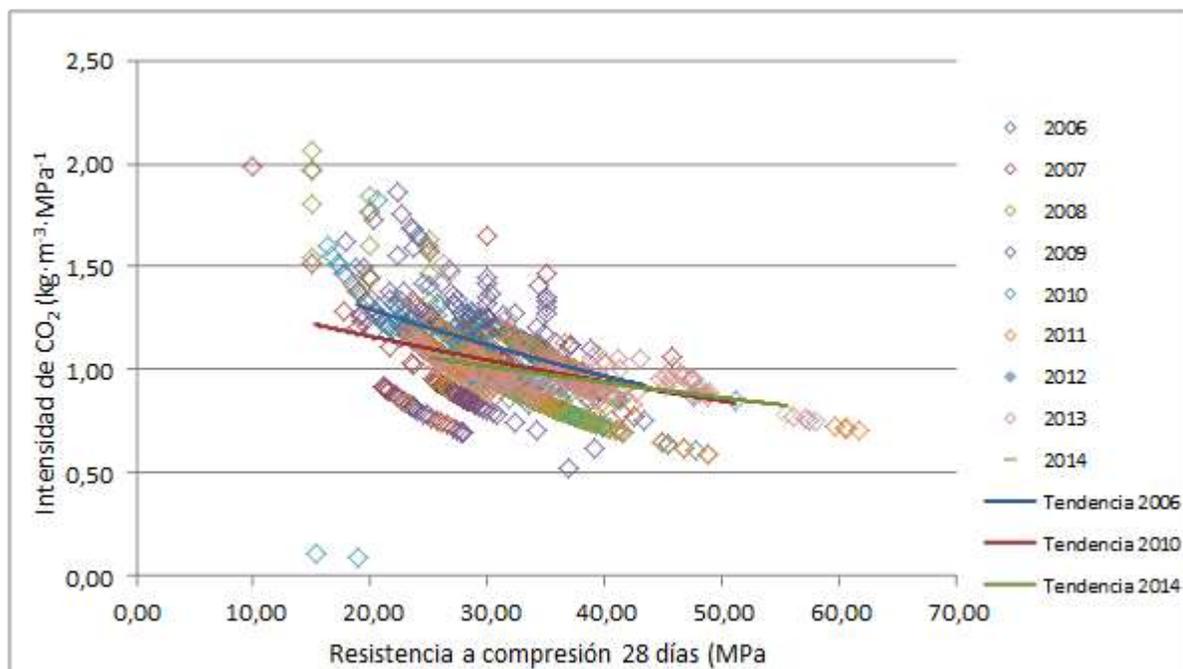
Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la intensidad de CO₂, es necesario primero estimar las emisiones de CO₂ por m³ de hormigón. Para ello se asume como principal fuente de emisiones la producción de cemento. Un estudio más completo requeriría incorporar las emisiones relacionadas con la producción de los áridos, aditivos y transportación, pero se considera que con las emisiones asociadas al cemento se obtienen resultados significativos y confiables.

Según (Sánchez, 2014) las emisiones de CO₂ registradas en las fábricas Siguaney y Cienfuegos para producir 1 tonelada de P-35 son de 1062.52 kg y 872.38 kg de CO₂ respectivamente. Para la estimación realizada se calcula la media de estos valores obteniendo 967.45 kg de CO₂ como emisión promedio para producir 1 tonelada de P-35. En base a esta estimación se relacionan en

el grafico 3.6 las emisiones (determinadas por la cantidad de cemento en el hormigón) con la resistencia asociada.

Grafico 3.6 Emisiones de CO₂ estimadas en relación con la resistencia a compresión 28 días.



Fuente: Elaboración Propia.

Analizando la gráfica las líneas de tendencia muestran una traslación de la curva que representa un menor impacto ambiental en los hormigones producidos en 2014. Esto está directamente asociado a la mejor eficiencia alcanzada en el consumo de cemento.

Atendiendo a los resultados obtenidos podemos afirmar que en Villa Clara ha aumentado la eco-eficiencia de los hormigones producidos, teniendo en cuenta: a) mejor uso de los aglomerantes y b) menor impacto ambiental asociado.

3.2 Evaluación de la eco-eficiencia de hormigones producidos con CBC y hormigones producidos tradicionalmente en Villa Clara

La prueba industrial para la producción de CBC en Cuba, arrojó resultados favorables en el desempeño del cemento(Vizcaino, 2013). Pero resulta necesario evaluar su utilización en

hormigones y compararlo con los hormigones tradicionalmente producidos. Por lo que se evalúan los mismos indicadores a todos los hormigones producidos con CBC en Villa Clara, como parte del proceso de autenticación del producto.

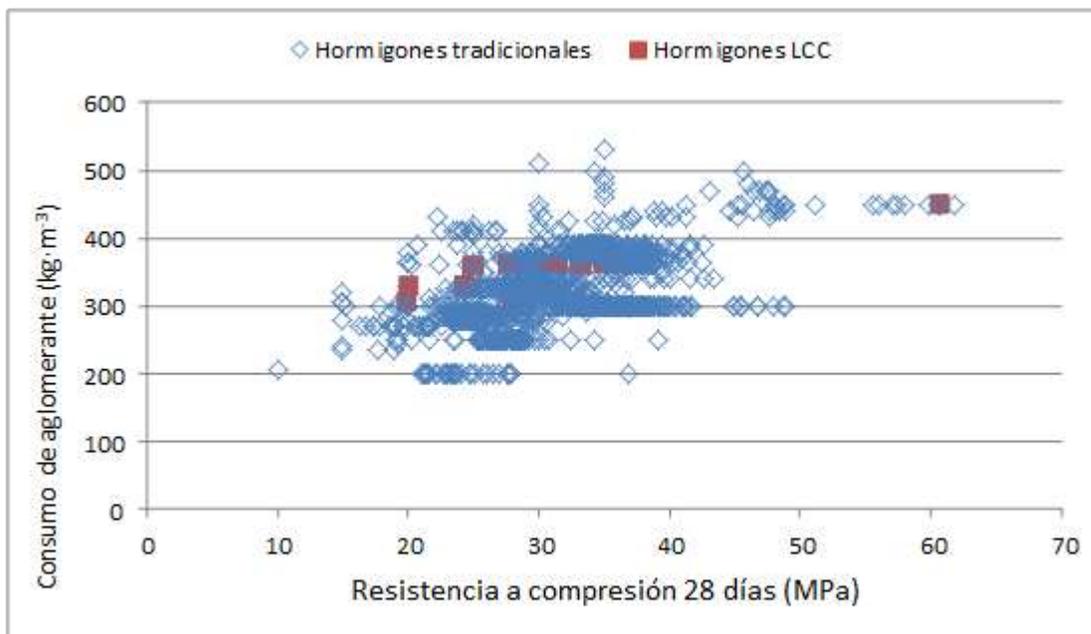
Método O´reilly

Atendiendo a la muestra de datos de hormigón se calcula la eficiencia de los elementos de hormigón producidos con CBC, que oscila entre 300 y 350 kgs de cemento por m³ de hormigón. El gráfico se muestra en el Anexo 1.

Método Vanderley

En el gráfico 3.7 se puede observar (a pesar que la muestra evaluada es mucho menor) que los hormigones producidos con CBC presentan aproximadamente el mismo consumo de cemento que los hormigones tradicionalmente producidos con P-35 en Villa Clara, con una pequeña tendencia al aumento.

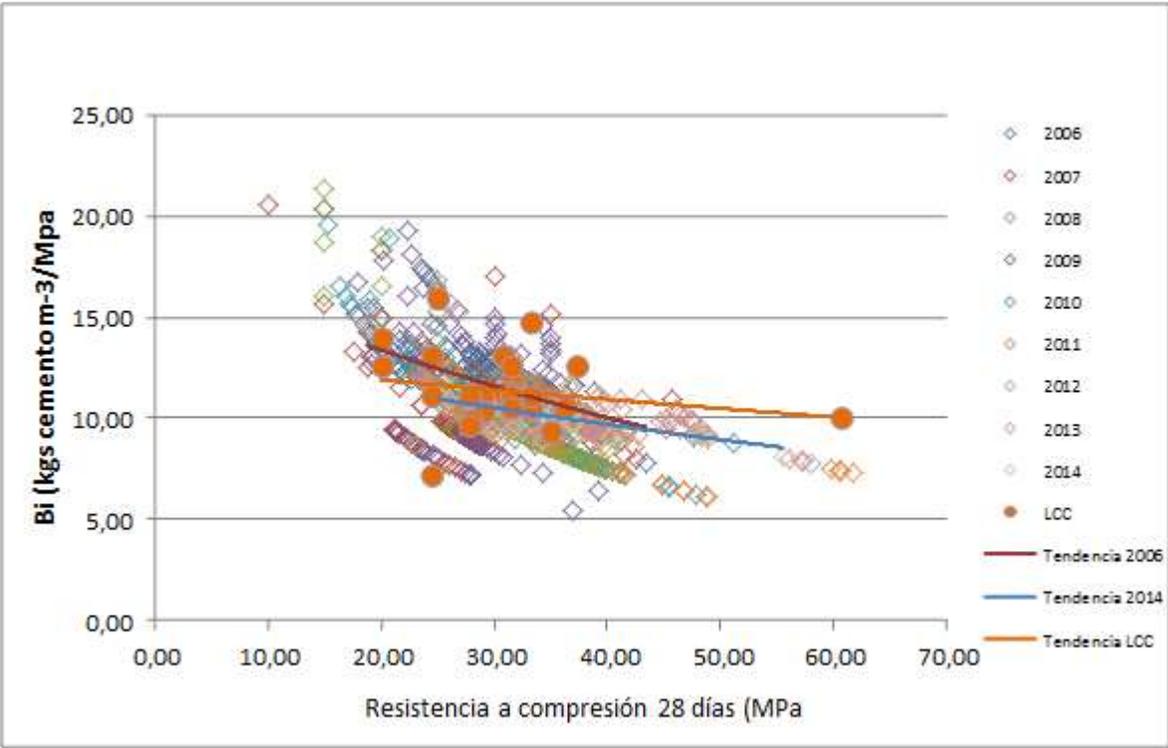
Grafico 3.7 Eficiencia de hormigones producidos en Villa Clara comparados con hormigones fabricados con CBC



Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados del gráfico 3.7 se verifican en el análisis de la intensidad de aglomerantes que se presenta a continuación, donde se evidencia que el consumo de cemento es mayor. Aunque para lograr expresar mejor la tendencia sería necesaria mayor cantidad de datos.

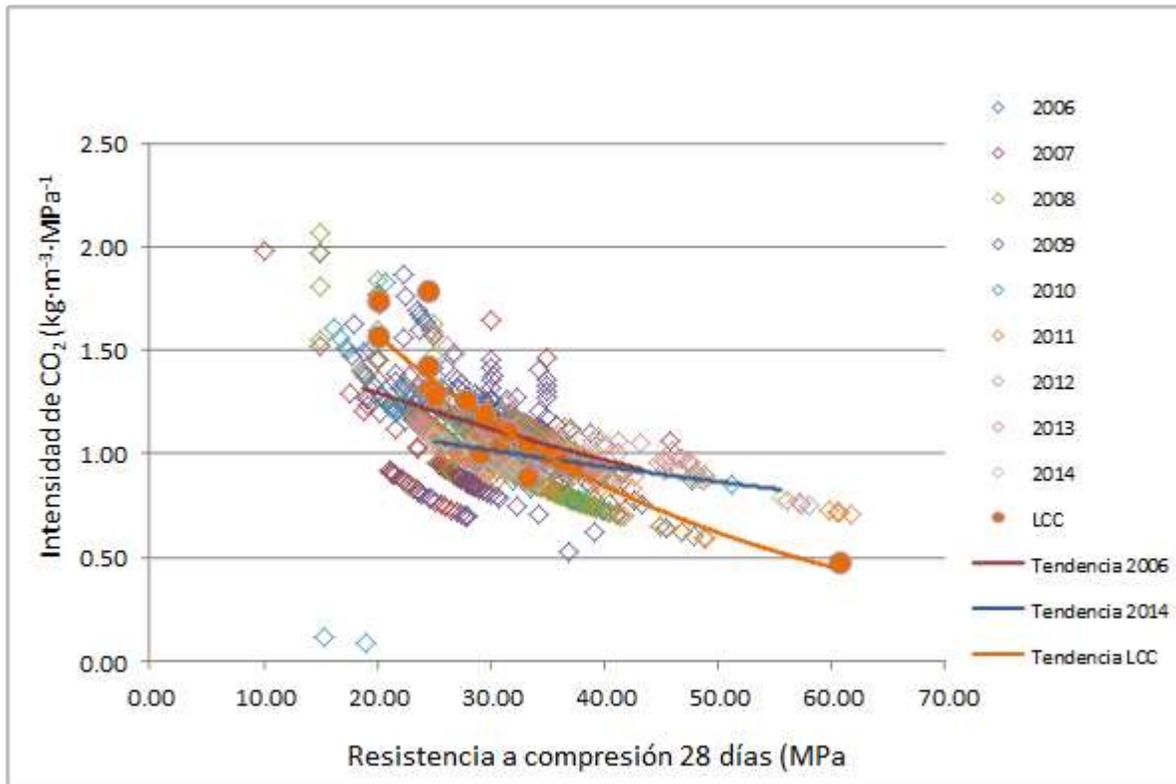
Gráfico 3.8 Resistencia a compresión y consumo de aglomerantes de los hormigones producidos en Villa Clara comparados con hormigones de LCC.



Fuente: Elaboración Propia.

Sin embargo, en el gráfico 3.9 se evidencia una tendencia a la disminución del impacto ambiental de los hormigones diseñados con CBC, a pesar del aumento registrado en los consumos de cemento.

Gráfico 3.9 Emisiones de CO₂ estimadas en relación con la resistencia a compresión 28 días comparados con hormigones de LCC.



Fuente: Elaboración Propia.

En general, se consideran los resultados de este estudio comparativo como preliminares ya que un fuerte análisis estadístico requiere de mayor cantidad de datos. No obstante, se corrobora la correlación entre los métodos de O'Reilly y Vanderley y se tienen resultados previos que permiten mejorar los diseños de mezcla y predecir el rendimiento e impacto de estos hormigones.

La estructura de una porción de la base de datos permite además modelar el comportamiento de los hormigones y descubrir la relación directa de cada componente con la resistencia obtenida. Los detalles se muestran en el epígrafe 3.3.

3.3 Diseño y aplicación de un modelo de regresión lineal para evaluar base de datos de hormigón en Villa Clara.

En este epígrafe se diseña y aplica un modelo de regresión lineal para evaluar la relación directa de los componentes de hormigones producidos en Villa Clara y su resistencia asociada.

EL diseño y aplicación de modelos de regresión lineal tiene los siguientes pasos:

1. Determinación de las variables y especificación del modelo
2. Determinación de la muestra y sus características
3. Estimación y aplicación del modelo. Análisis de los resultados

3.3.1 Determinación de las variables y especificación del modelo

Para definir el modelo preciso y acorde a la variable de interés (Resistencia), a partir de la teoría recogida en el capítulo II, se deben definir primeramente las variables tanto dependientes como independientes.

Como ha sido declarado anteriormente la variable de interés es la Resistencia del hormigón (expresada en MPa), por tanto esta constituye la variable o término dependiente (también puede llamarse regresando) que en lo adelante denotaremos como *resist*.

A partir de la literatura consultada, la experiencia de especialistas en el tema y la estructura de la base de datos (conformada con 101 datos de diseños de mezcla) se ha considerado un conjunto de variables que de una forma u otra deben contribuir o incidir en este proceso, es decir, que determinan en su conjunto la magnitud de la variable dependiente (resistencia del hormigón). En este caso se encuentran:

- ✓ Cemento (*cemento*)
- ✓ Gravilla (*gravilla*)
- ✓ Aditivo (*aditivo*)
- ✓ Relación agua cemento (*relac*)
- ✓ Arena (*arena*)

Estas constituirán entonces las llamadas variables o términos independientes (también se conocen como regresores).

Analizando detalladamente las variables relacionadas tendríamos que precisar lo siguiente:

- ✓ *cemento* : Es una variable cuantitativa que expresa la cantidad de cemento en kgs por m³ de hormigón.

- ✓ *gravilla* : Es una variable cuantitativa que expresa la cantidad de gravilla en kgs por m3 de hormigón.
- ✓ *aditivo* : Es una variable cuantitativa que expresa la cantidad de aditivo en litros por m3 de hormigón.
- ✓ *relac* : Variable cuantitativa que expresa la relación agua/cemento amasada por m3 de hormigón.
- ✓ *arena*: Es una variable cuantitativa que expresa la cantidad de arena en kgs por m3 de hormigón.

Por la naturaleza de los datos obtenidos se propone la construcción de un modelo de regresión lineal múltiple que considere la relación de dependencia de la resistencia en función del conjunto de variables independientes declaradas anteriormente. El modelo teórico general que se propone es el siguiente:

$$resist = \beta_0 + \beta_1 cemento + \beta_2 gravilla + \beta_3 aditivo + \beta_4 relac + \beta_5 arena + u$$

donde:

β_0 : es la ordenada al origen

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: son los parámetros asociados a las variables *cemento, gravilla, aditivo, relac* y *arena* respectivamente.

u : es el término de perturbación estocástica (error o residual) donde se contemplará el efecto de todas aquellas variables que también puedan incidir en la resistencia y no se han concebido en el estudio.

3.3.2 Características de la muestra

Para estimar los parámetros del modelo se tomó una muestra de 101 observaciones provenientes de los Informes de Resistencia del Hormigón de la ENIA. Se toman datos desde el año 2009 hasta 2013 con el objetivo de caracterizar los hormigones en este periodo. Se conoce que el tamaño de la muestra es pequeño, no obstante se considera oportuno realizar este análisis que puede profundizarse en otros estudios.

3.3.3. Estimación y aplicación del modelo. Análisis de los resultados

El método de estimación empleado es el de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). Para ello se emplea el software estadístico Eview versión 5.0. El gráfico 3.10 muestra los resultados del procesamiento de los datos:

Gráfico 3.10: Resultado del procesamiento estadístico de los datos

Dependent Variable: RESIST
 Method: Least Squares
 Date: 06/14/14 Time: 04:05
 Sample (adjusted): 1 101
 Included observations: 101 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-11.32503	11.47277	-0.987122	0.3261
CEMENTO	0.067702	0.009994	6.774416	0.0000
GRAVILLA	0.010529	0.005498	1.915182	0.0585
ADITIVO	1.721416	0.238610	7.214352	0.0000
RELAC	-8.048866	5.446763	-1.477734	0.1428
ARENA	0.002800	0.003310	0.845711	0.3998
R-squared	0.877360	Mean dependent var	23.46535	
Adjusted R-squared	0.870905	S.D. dependent var	6.990800	
S.E. of regression	2.511781	Akaike info criterion	4.737429	
Sum squared resid	599.3590	Schwarz criterion	4.892783	
Log likelihood	-233.2402	F-statistic	135.9246	
Durbin-Watson stat	1.509842	Prob(F-statistic)	0.000000	

Fuente: Eview 5.0

De esta salida se puede interpretar que el estadístico F de significación global, cuyo resultado es 135.9246 con un valor de probabilidad asociado de 0.0000, resulta válido al 5% de significación, lo que también puede considerarse como una buena especificación del modelo.

El valor del *R-cuadrado*, como medida de bondad de ajuste, es de 0.8773 siendo considerado un alto valor para este coeficiente. El mismo indica que las variables independientes (cemento, gravilla, aditivo, relación agua cemento y arena) explican, en su conjunto, el 87% de la variación total de la resistencia.

En la tabla se muestran los valores estimados de los coeficientes asociados a cada término independiente (*CEMENTO, GRAVILLA, ADITIVO, RELAC, ARENA*),, el valor del estadístico bajo la distribución t-student y su probabilidad asociada, así como el error estándar. Los signos que acompañan cada coeficiente indican el efecto negativo o positivo que tiene la variable sobre el regresor y el valor del coeficiente la magnitud del efecto marginal. Hay que destacar que en

este tipo de modelo esta salida solo resulta útil para considerar la significación y el signo de cada coeficiente. Estos muestran el signo de los efectos parciales de cada variable independiente sobre la probabilidad de respuesta.

En este sentido se puede ver que todas, excepto (*RELAC*) tienen signo positivo. Por su parte la significatividad estadística de estas variables queda establecida si podemos rechazar $H_0 : \beta_j = 0$ a un nivel lo suficientemente pequeño. En este análisis resultan significativas (*CEMENTO, ADITIVO*) que representan la cantidad de cemento y de aditivo, respectivamente con valores de probabilidad igual a 0.000; y no significativas (*ARENA, RELAC, GRAVILLA*) que resultan cantidad de arena (40% de significación), relación a/c (14% de significación) y cantidad de gravilla (6% de significación).

En la aplicación de este modelo el principal objetivo es analizar los efectos que tienen estas variables definidas sobre la probabilidad de respuesta, es decir el aumento o disminución de la resistencia del hormigón.

El modelo econométrico para la regresión de los hormigones producidos en Villa Clara que se obtiene responde a la siguiente ecuación:

$$RESIST = -11.32503 + 0.067702CEMENTO + 0.010529GRAVILLA + 1.721416ADITIVO \\ - 8.048866RELAC + 0.028800ARENA$$

A partir de este análisis se puede llegar a las siguientes interpretaciones individuales alrededor del efecto causal sobre la resistencia por cada una de las variables:

cemento: Por cada kg adicional de cemento que se añada al hormigón, la resistencia va a aumentar en 0.07 MPa, cuando el resto de los factores se mantienen constante.

gravilla: Por cada kg de gravilla que se añada al hormigón, la resistencia va a aumentar en 0.011 MPa, cuando el resto de los factores se mantienen constante.

aditivo: Por cada litro de aditivo que se añada al hormigón, la resistencia va a aumentar en 1.72 MPa, cuando el resto de los factores se mantienen constante.

relac: Por un aumento unitario en la relación a/c del hormigón, la resistencia va a disminuir en 8.05 MPa, cuando el resto de los factores se mantienen constante.

arena: Por cada kg adicional de arena que se añada al hormigón, la resistencia va a aumentar en 0.002 MPa cuando el resto de los factores se mantienen constante.

Atendiendo a la significación individual de cada variable, solo el cemento y el aditivo resultan significativas en la explicación de la resistencia. No obstante, esta interpretación no es completa pues todos los componentes del hormigón interactúan entre ellos y determinan diversos comportamientos en la resistencia de la estructura que no son considerados cuando se hacen análisis univariados.

En anexo se presentan la validación y cumplimiento de algunos supuestos requeridos para la conformación y confiabilidad del modelo.

CONCLUSIONES

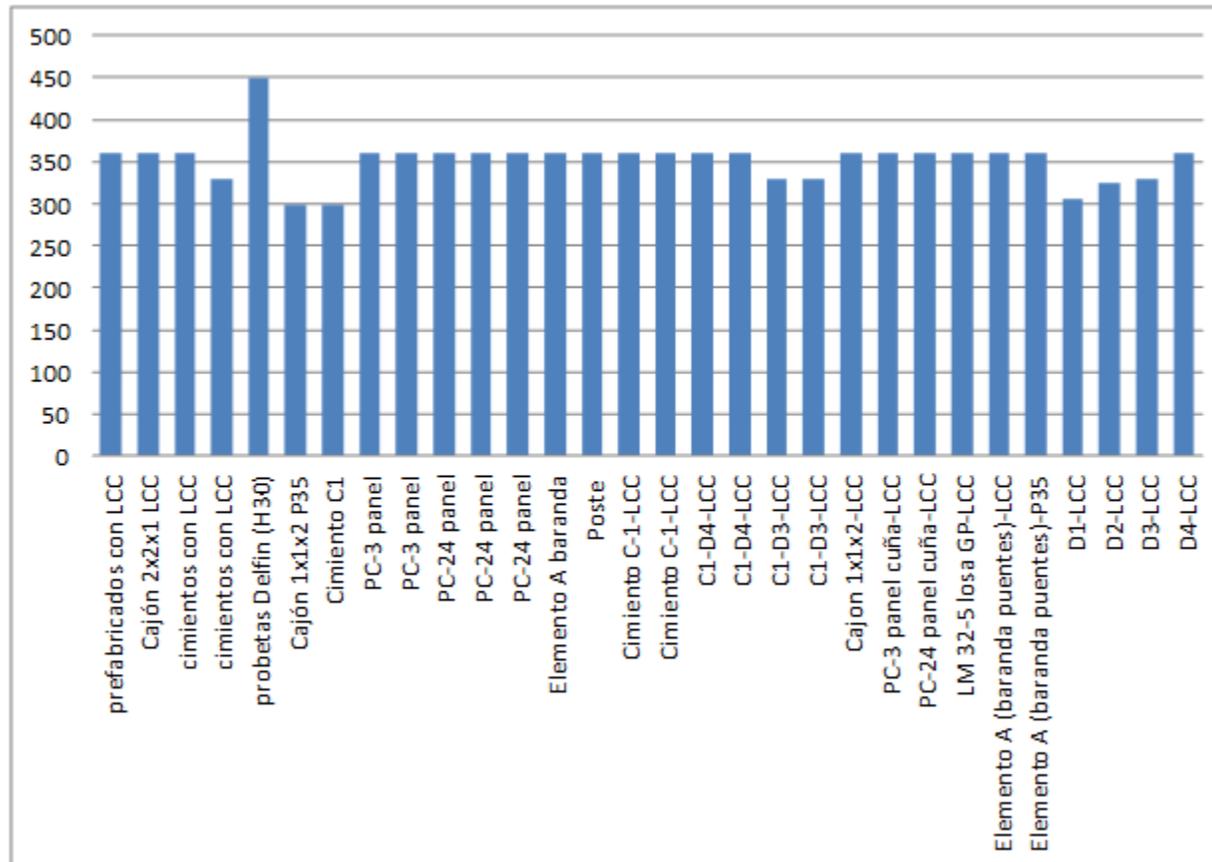
1. La industria del hormigón necesita ser cada día más eficiente, ya que sus altos niveles de producción e impacto ambiental demandan de su perfeccionamiento constante en busca de la sostenibilidad.
2. El uso de técnicas estadísticas y econométricas para el estudio de la eco-eficiencia permite la optimización de los procesos productivos del hormigón y su comparación con nuevas producciones que puedan surgir.
3. La combinación de los métodos de O'Reilly y Vanderley permiten un mejor estudio de la eco-eficiencia adaptado a la producción de hormigones en Cuba, añadiendo el impacto ambiental a estas investigaciones.
4. La eco-eficiencia de los hormigones producidos en Villa Clara ha aumentado en relación al año 2006, disminuyendo el consumo de cemento por m³ y las emisiones generadas por m³ de hormigón.
5. Los hormigones producidos con cemento de bajo carbono, muestran comportamiento similar a los hormigones producidos en Villa Clara, con leve aumento del consumo de cemento y disminución en las emisiones asociadas.

RECOMENDACIONES

- 1- Actualizar a partir del año en curso los valores de la base de datos para dar continuidad a la misma.
- 2- Enriquecer la base de datos con otros indicadores como la durabilidad de los hormigones con cementos tradicionales, así como para los hormigones con cemento B-45.
- 3- Incorporar a la base de datos actual datos relevantes como contenido de arena, agua, gravilla, aditivo, relación a/c de cada uno de los hormigones, incluyendo los diseñados con CBC.
- 4- Hacer otros análisis que permitan seguir mejorando el proceso productivo para las construcciones en la provincia.

ANEXOS

ANEXO 1: Consumo de cemento en hormigones elaborados con LCC (kgs/m³)



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2: validación y cumplimiento de Supuestos requeridos para la conformación y confiabilidad del modelo estadístico

a) Test de White para la heteroscedasticidad

White Heteroskedasticity Test:

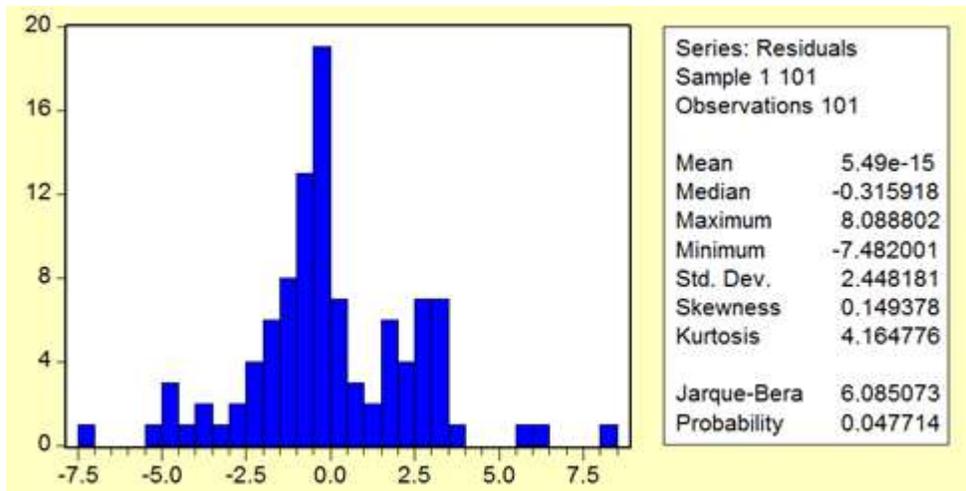
F-statistic	3.685456	Probability	0.000369
Obs*R-squared	29.34313	Probability	0.001096

Test Equation:
 Dependent Variable: RESID*2
 Method: Least Squares
 Date: 05/14/14 Time: 04:30
 Sample: 1 101
 Included observations: 101

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-54.72095	221.1105	-0.247482	0.8051
CEMENTO	0.071263	0.249330	0.285819	0.7757
CEMENTO*2	7.84E-05	0.000229	0.342120	0.7331
GRAVILLA	0.032058	0.358894	0.089326	0.9290
GRAVILLA*2	-3.54E-05	0.000187	-0.189572	0.8501
ADITIVO	11.98197	4.497174	2.664333	0.0091
ADITIVO*2	-2.805140	0.949683	-2.953766	0.0040
RELAC	-7.383033	101.9396	-0.072426	0.9424
RELAC*2	46.58967	51.51007	0.904477	0.3682
ARENA	0.037276	0.075247	0.495379	0.6215
ARENA*2	-3.14E-05	5.68E-05	-0.552218	0.5822

R-squared	0.290526	Mean dependent var	5.934247
Adjusted R-squared	0.211696	S.D. dependent var	10.60957

b) Test de JarqueBera para la normalidad



BIBLIOGRAFÍA

- 14045, I. 2012. Environmental management — Ecoefficiency assessment of product systems — Principles, requirements and guidelines.
- (2), V. M. J. N. M. N. S. V. A. C. S. 2013. Durabilidade e Sustentabilidade: Desafios para a Construção Civil Brasileira.
- ABO-EL-ENEIN, S. 2009. “Propiedades y durabilidad de los cementos adicionados con Metacaolín”. *Materiales de la Construcción*.
- ALUJAS, A. 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. Tesis doctoral, Universidad “Marta Abreu” de Las Villas.
- BID, B. I. D. D. 2011. La Infraestructura en el Desarrollo Integral de América Latina. Banco de desarrollo de América Latina (CAF).
- CANCIO, D. Y. 2014. Propuesta de procedimiento para la evaluación de eco-eficiencia en aplicaciones a sistemas constructivos cubanos. Conferencia Internacional de Ciencias Empresariales (CICE-2014). .
- CSI 2009. Cement Industry Energy and CO2 Performance “Getting the Numbers Right”.
- DE LAS CUEVAS, J. 2001. *500 años de construcciones en Cuba*.
- ENIA, V. 2005-2014. R-4-15-04.E Informe Técnico de Hormigón Hidráulico.
- FICEM 2013. Cemento.
- GAYOSO, R. 2011. Evolución y Práctica en el Diseño de Hormigones en Cuba.
- HOWLAND ALBEAR, J. J. D. L. F., S 2013. La eficiencia energética en la producción industrial del hormigón. 207.
- JOHN, V. M. 2012. Measuring the eco-efficiency of cement use.
- MARTÍNEZ CASTILLO, I. 2012. *Estudio de factibilidad económico-financiera de la producción de metakaolín y su utilización en la producción de cemento en la fábrica de cemento de Siguaney, Sancti Spíritus.*, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- MARTIRENA, F. 2010. Potencialidades de mejoramiento de la eficiencia en la producción de Cemento Pórtland en Cuba. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- MEHTA, P. P. K. 2001. La reducción del impacto ambiental del hormigón. El hormigón puede ser durable y ambientalmente amistoso
- MICONS, V. 2005-2014. Modelo No. 126529. Comportamiento de la calidad del Hormigón Hidráulico.
- MICONS, V. 2013. Planeación estratégica en la Empresa de Hormigón de Villa Clara para el periodo 2013 – 2015.
- NC120 2007. Hormigón Hidráulico-Especificaciones.
- PISCAER, B. 2010. Sustainability and Concrete: A big step towards a change in the traditional concrete philosophy.
- ROHRSEN, P. 2012. La ecoeficiencia. Available: <http://xn--diseosostenibilidad-66b.com/2012/02/ecoeficiencia/>.
- ROSELL LAM, M. 2010. *Zeolita Natural Cubana del Tipo Clinoptilolita-Heulandita como Material Cementicio Suplementario en Hormigones*. Doctorado, UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS.
- SANCHEZ, S. 2013. Primer reporte de revisión bibliográfica sobre ACV y eco-eficiencia.

- VC, M. 2013. Resultados y análisis de la información nacional en el 2013.
- WBCSD. 2006. Eco-efficiency. Available: www.wbcSD.org.
- WBCSD, W. B. C. F. D. Eco-efficiency.
- Gayoso, R. A., 2010. Historia y futuro de los hormigones de altas prestaciones en Cuba. *II Jornada De Ingeniería Civil en Cuba. Versión digital.*
- Habert, G. & Roussel, N., 2009. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, Issue 31, pp. 397-402.
- Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete composites*, Issue 31, pp. 601-605.