

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Desarrollo de tecnologías para el adoquinado en condiciones locales.

Autor: Lázaro Alejandro Sarría Veitía

Tutor: Iván Machado López

Santa Clara, Junio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Academic Department of Civil Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Development of technologies for paving in local conditions.

Autor: Lázaro Alejandro Sarría Veitía

Tutor: Ivan Machado López

Santa Clara, June, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Exergo

“Las cosas buenas se deben hacer sin llamar al universo para que lo vea a uno pasar. Se es bueno porque sí; y porque allá dentro se siente como un gusto cuando se ha hecho un bien, o se ha dicho algo útil a los demás”

José Martí.

Agradecimientos

A mis padres por haberme apoyado en todo momento

Al resto de mi familia por la ayuda y la confianza brindada estos años

A esos buenos amigos que siempre me han apoyado desde mis inicios y a los
nuevos amigos de la carrera

A mis profesores que supieron como brindarme el conocimiento necesario estos
años

A todas las personas que más o menos hicieron posible la realización de mi
persona como ingeniero civil

Resumen

En el presente trabajo de diploma se pretende contribuir al desarrollo y perfeccionamiento de nuevas tecnologías para la fabricación de elementos de hormigón destinados a la pavimentación. Se realiza la comprobación de resistencia a compresión de dichos elementos con diferentes dosificaciones y atendiendo a distintos tipos de vías con diferentes resistencias requeridas, se realiza igualmente la evaluación de las dosificaciones y los resultados obtenidos, con la finalidad de que dichos elementos posean la óptima calidad al menor costo posible, utilizando materiales de producción local.

La producción de adcretos requiere de moldes específicos en cuanto a forma y espesores todo relacionado con el objetivo para el cual es designado, en el trabajo se realiza el diseño de diferentes tipos de moldes que pueden ser fabricados para la obtención local de adcretos.

Abstract

In the present work of diploma aims to contribute to the development and improvement of new technologies for the manufacture of concrete elements for paving. The compression resistance check of said elements is made with different dosages and taking into account different types of pathways with different required resistances, the evaluation of the dosages and the results obtained is also carried out, in order that said elements possess the optimum quality at the lowest possible cost, using local production materials.

The production of concrete pavers requires specific molds in terms of shape and thickness all related to the purpose for which it is designated, in the work is made the design of different types of molds that can be manufactured for the local obtaining of concrete pavers.

Índice

Exergo	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract.	VII
Índice	VIII
Introducción	1
Capítulo 1: Los materiales cementicios suplementarios y el hormigón. Tecnologías de pavimentación a escala local.	5
1.1 Producción actual de cemento Portland	5
1.2 Producción de cemento en Cuba	5
1.3 Mezclas de cemento	6
1.3.1 Materiales cementicios suplementarios como alternativa ambiental	7
1.3.2 Experiencias del empleo de adiciones al cemento en Cuba	8
1.4 Producción de cemento a bajo carbono (LC ³)	9
1.4.1 Importancia de la producción del cemento LC ³	11
1.4.2 Producción local de cemento LC ³	12
1.4.3 Hormigones elaborados con arcilla calcinada	12
1.5 Talleres de ecomateriales de pequeño formato	13
1.5.1 Generalidades	14
1.5.2 Características de elementos prefabricados en talleres de producción local	16
1.5.3 Adocretos	16
1.6 Pavimentos	17
1.6.1 Generalidades	17
1.6.2 Tecnologías de la construcción de carreteras.	18

1.6.3	Ventajas de la pavimentación con adocretos	19
1.6.4	Diseño de pavimentos de adocretos	20
1.7	Conclusiones parciales del capítulo	20
Capítulo 2: Diseño y producción de adocretos con cemento de bajo carbono.		
Adecuación de tecnologías para la producción en talleres locales.		
2.1	Diseño del experimento	22
2.2	Selección de las materias primas	23
2.3	Caracterización de las materias primas empleadas en la investigación	23
2.3.1	Cemento	23
2.3.2	Árido fino	25
2.4	Árido grueso	26
2.3.3	Agua	28
2.4	Determinación de las dosificaciones	28
2.5	Fabricación de adocretos.....	29
2.6	Realización y descripción de los ensayos de laboratorio a los adocretos	33
2.6.2	Resistencia a compresión	35
2.6.3	Ensayo de absorción	36
2.6.4	Resistencia al desgaste por abrasión	37
2.7	Adecuación de tecnologías para pequeños talleres	37
2.7.1	Tecnologías existentes para la fabricación de adocretos	37
2.7.2	Diseño de los moldes.....	38
2.7.2.1	Características de diseño	38
2.8	Conclusiones parciales	40
Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados		
3.1.1	Resultados del ensayo de superficie	41
3.1.2	Resultados del ensayo de resistencia a la compresión	43

3.1.3 Resultados del ensayo de absorción de los adocretos	45
3.2 Análisis de la producción	46
3.3 Moldes diseñados	47
3.4 Conclusiones parciales	50
Conclusiones	51
Recomendaciones	52
Referencia bibliográfica	53

Introducción

La Ingeniería Civil, concretamente la Ingeniería Vial, se ha enfocado en la creación y perfeccionamiento de tecnologías para responder adecuadamente y con eficiencia a los disímiles problemas existentes en las vías de comunicación terrestres, tan necesarias para el desarrollo socioeconómico de los países. El desarrollo alcanzado en tales tecnologías en los últimos años impone la necesidad de su dominio. Esto infiere el uso de nuevos materiales, maquinarias modernas, de novedosas técnicas mecanizadas y métodos organizativos más eficientes. Cuba cuenta con una red vial de gran densidad, superior a la mayoría de los países de Latinoamérica, donde sobresalen las carreteras construidas con pavimentos flexibles, lo cual ubica al país en una situación favorable; en dicho contexto se asegura la comunicación vial necesaria para el desarrollo social y económico de nuestro país tanto en las zonas rurales como en las urbanas.

Los adoquines llevan usándose desde hace siglos. Los primeros que se emplearon fueron de piedra: guijarros de río que, junto con una capa de arena y cal, quedaban sellados formando las primeras carreteras pavimentadas de la historia. Más tarde comenzaron a usarse los de madera, con el objetivo de disminuir el ruido que provocaban las carretas y las herraduras de los animales al pisar el adoquinado. El tercer tipo de adoquín es el de ladrillo cerámico y lleva usándose desde hace 5.000 años. En la antigua Mesopotamia ya se usaban para pavimentar las calles y caminos. Eran colocados sobre una capa de arena que sellaba las juntas, aunque el rápido desgaste de su superficie hizo que quedasen obsoletos. Por último, llegaron los adoquines de hormigón. Estos empezaron a fabricarse a principios del siglo XIX y revolucionaron la industria. Fue en Holanda y Alemania donde se empezaron a usar, aunque en la década de los 70 la demanda se disparó, ya que se usaban (y se usan) prácticamente en todo el mundo.

La presente investigación pretende realizar el diseño de mezclas con diferentes aglomerantes para obtener adocretos con características adecuadas para su uso en la pavimentación de caminos con tránsito desde peatonal hasta pesado. Sin embargo, la tecnología para la fabricación de estos elementos en condiciones locales no ha sido suficientemente estudiada,

por lo que no se cuentan con resultados que permitan generalizar la fabricación de adocretos para implementar aplicaciones disímiles. Lo anteriormente expuesto constituye la **situación problemática** de la presente investigación; a partir de la cual se arriba a la siguiente interrogante científica.

Problema científico:

¿Podrá adecuarse a la producción local con el empleo de la tecnología de vibro compactación existente la obtención de adocretos con adición de cemento de bajo carbono?

Objeto de estudio:

Producción local de adocretos con el empleo de las tecnologías de vibrocompactación.

Campo de acción:

Las tecnologías existentes para la producción de adocretos.

Hipótesis:

A partir del uso de cementos ternarios en condiciones locales de producción y utilizando las tecnologías de vibrocompactación se obtienen adocretos que cumplen con los requisitos técnicos para la pavimentación de vías y caminos. Considerando la hipótesis anterior, el presente trabajo se orienta hacia el cumplimiento del siguiente **objetivo:**

Objetivo general:

Evaluar la tecnología para la producción local de adocretos para distintas adiciones de cemento LC²

Objetivos específicos:

1. Revisar y analizar fuentes bibliográficas que se refieran a la pavimentación con adocretos y resistencia requerida de estos para distintas condiciones de caminos y vías.
2. Analizar las tecnologías utilizadas en talleres de producción local para la fabricación de elementos mediante la vibrocompactación.
3. Realizar ensayos físico-mecánicos establecidos por la NC 998-2014 para comprobar la efectividad de la adición de LC-2 en la producción local de adocretos mediante pruebas de laboratorio.

4. Diseñar los moldes correspondientes destinados para ampliar la producción en los talleres locales

Tareas de investigación:

1. Revisión y análisis de la bibliografía relacionada con viabilidad y el uso de hormigón hidráulico en elementos destinados a la pavimentación.
2. Análisis de las tecnologías existentes en los talleres locales para la producción de adocretos con cemento ternario adecuados a las características y facilidades de los talleres locales.
3. Realización de ensayos físico-mecánicos establecidos por la NC 998-2014 para comprobar la efectividad de la adición de LC-2 en la producción local de adocretos mediante pruebas de laboratorio.
4. Diseño de los moldes destinados a ampliar la producción en los talleres locales.

Novedad Científica

La aplicación de cementos ternarios en la fabricación de adocretos y la adecuación de tecnologías para la producción de estos a escala local.

Aportes de la investigación

Práctico: Demuestra y abre la posibilidad para la obtención de elementos prefabricados de hormigón en condiciones no industriales con adecuadas propiedades físico – mecánicas a partir del uso de la adición mineral de LC².

Social: La validación del empleo de los cementos LC³ a través de la producción de adocretos y hormigones que justifica la implementación de su producción. Ello podría ayudar a cubrir la demanda en materia de construcción de los próximos años con un menor daño ambiental, e inclusive menor costo económico.

Metodológico: Herramientas que sirven para establecer guías de buenas prácticas y procedimientos para el uso de la adición LC² en la producción local de materiales de la construcción.

Métodos utilizados

1) Métodos teóricos:

- a) **Histórico-lógico:** El cual permite contextualizar el problema de investigación, sus antecedentes y desarrollo

- b) **Análisis-síntesis:** Se realiza un análisis del problema en cuestión llegando a la sintetización de los parámetros que servirán de argumento para la confección del Marco Teórico-Methodológico.
- c) **Inducción-deducción:** Tomando como base los estudios realizados sobre el comportamiento de la adición mineral de LC² en materiales de la construcción, se deducen los parámetros a utilizar en la elaboración de hormigones con LC² para la fabricación de elementos prefabricados de hormigón que cumplan con lo establecido según las normas nacionales.

2) **Métodos empíricos:**

a) **El experimento:** La realización de ensayos de laboratorio a elementos de hormigón vibro-compactados destinados a la pavimentación, elaborado con un 50% y un 35% de sustitución de cemento Portland por la adición mineral de LC², para la determinación de sus propiedades físicas-mecánicas. Los resultados obtenidos se comparan con los parámetros que establece la NC-998 2014. Luego se pasa al análisis y divulgación de los resultados de los ensayos. También se propondrán diseños de moldes basados en las categorías y requerimientos de carreteras con el objetivo de que se fabriquen y ampliar las tecnologías existentes en los talleres locales para la producción de adocretos.

3) **Métodos estadísticos-matemáticos:** Se utilizan para el análisis y organización de datos. Se realizarán gráficos y tablas para una mejor comprensión de los resultados.

Organización del informe

- Introducción: Antecedentes y fundamentos metodológicos del trabajo.
- Capítulo 1: Los materiales cementicios suplementarios y el hormigón. Tecnologías de pavimentación a escala local.
- Capítulo 2: Diseño y producción de adocretos con cemento de bajo carbono. Adecuación de tecnologías para la producción en talleres locales.
- Capítulo 3: Análisis y discusión de los resultados.
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía
- Anexos

Capítulo 1: Los materiales cementicios suplementarios y el hormigón. Tecnologías de pavimentación a escala local.

1.1 Producción actual de cemento Portland

La producción actual de cemento a nivel mundial ha ido en aumento debido al constante crecimiento de la urbanización. En 2018, la producción de cemento en los Estados Unidos ascendió a 88,5 millones de toneladas métricas. Así, los Estados Unidos están entre los tres primeros productores de cemento globales. Se espera que la producción de cemento global aumente de 3,27 mil millones de toneladas métricas en 2010 a 4,83 mil millones de toneladas métricas en 2030). China produce la mayor parte de cemento a escala global por un margen grande, en alrededor de 2,4 mil millones de toneladas métricas en 2018, seguido de India en 290 millones de toneladas métricas en el mismo año. China en la actualidad produce más de la mitad del cemento del mundo. China e India, a pesar de ser los productores globales más grandes de cemento no exportaron la mayor parte de su producción ya que en el país se consumió. (Statistic, 2019).

Aproximadamente el 8% de la emisión global de CO₂ es generada durante la producción del cemento. Si se mantienen las mismas emisiones de CO₂ correspondiente a la industria del cemento aumentará de 2297 millones de toneladas registradas en 2005 a 3486 millones de toneladas estimadas para el 2020 (GNCS, 2012). Debido a esto se han tomado medidas para minimizar el impacto ambiental que representa dicha producción. Una de las alternativas más utilizadas el empleo de materiales cementicios suplementarios que reduzcan las emisiones durante el proceso de fabricación del clínquer.

1.2 Producción de cemento en Cuba

La industria del cemento en Cuba comenzó a finales del siglo XIX cuando se inauguró en La Habana la primera fábrica de cemento gris tipo Portland de Iberoamérica, el 7 de julio Cuba se destaca entre los primeros países en vías de desarrollo que asumió un crecimiento de su industria del cemento, el verdadero desarrollo de esta industria en el país comenzó con el proceso revolucionario, a partir de 1959, asociadas al programa de obra sociales impulsado

por la Revolución se produjeron inversiones importantes que condujeron a la apertura de nuevas fábricas y a la modernización de las existentes de 1895. Esta planta tenía una capacidad de 20 t/día o sea 6 mil t/año (por vía seca), lo cual bastaba para abastecer la demanda nacional, se comercializaba con la marca "Cuba". En 1958 se alcanza un récord de producción de 4,27 toneladas.

Actualmente Cuba cuenta con 6 fábricas de cemento (Rodríguez, 2018). Estas son: la fábrica de cemento de Cienfuegos S.A. la cuál es una sociedad mixta, esta fábrica fue inaugurada en 1980 con el nombre de Carlos Marx. Esta la fábrica del Mariel la cual fue inaugurada en el año 1918 con el nombre de René Arcay. Las otras fábricas existentes en el país son Siguaney inaugurada en 1971 en la provincia de Sancti Spíritus, 26 de Julio inaugurada en 1968 en la provincia de Camagüey, Mártires de Artemisa inaugurada en 1921 en Artemisa y la fábrica de cemento José Merceron de Santiago de Cuba que fue construida en 1955 (Sánchez, 2015).

1.3 Mezclas de cemento

Los problemas económicos y ecológicos, unidos al avance de la Ciencia de los Materiales en los últimos 50 años, han inducido el empleo de extensores de clínquer de cemento Portland, hecho que ha posibilitado el surgimiento de un grupo genérico de cementos conocido como "cementos compuestos" o "cementos mezclados", que son una mezcla del Portland ordinario con uno o más materiales inorgánicos que participan en la hidratación, y por tanto contribuyen a los productos de hidratación (V.M and P.K, 1996). Los materiales inorgánicos añadidos son denominados "adiciones minerales". Estas adiciones pueden ser mezcladas y molidas íntimamente con el clínquer en fábrica, o mezcladas en obras a la hora de producir el hormigón o mortero. Las adiciones minerales activas más comúnmente empleadas son las cenizas volantes, las escorias granuladas, la microsílíce y las puzolanas naturales y artificiales (Taylor, 2006). En su origen, los cementos mezclados conformaban sistemas binarios al combinar el cemento Portland con un material cementicio suplementario. En la actualidad, el estudio e incorporación de nuevas adiciones ha devenido en el surgimiento de formulaciones más complejas como son los sistemas ternarios y los cuaternarios, para cualquiera de las combinaciones, las adiciones más empleadas son las antes mencionadas.

Dentro de las ventajas que ofrecen los cementos mezclados respecto al Portland ordinario se encuentran la transformación de la portlandita, la cual se forma mediante la hidratación del CPO, en hidrosilicato de calcio mediante la reacción puzolánica, una reducción del desprendimiento de calor durante la hidratación y un refinamiento de la porosidad en la pasta

de cemento. Esto permite la obtención de materiales con aplicaciones específicas como son los hormigones de altas resistencias, los de bajo calor de hidratación, los resistentes a las expansiones causadas por la reacción álcalis – sílice y el ataque de sulfatos (Day, 1992).

1.3.1 Materiales cementicios suplementarios como alternativa ambiental

1.3.1.1 Arcillas calcinadas

Las puzolanas naturales en forma de arcillas calcinadas mezcladas con cal han sido utilizadas como material cementante desde hace miles de años. Su empleo se remonta hasta las civilizaciones romana y griega, cuyo testimonio material es prueba de sus reconocidas propiedades de resistencia y durabilidad (Mielenz, 1983).

Las arcillas son el producto de la disgregación parcial o total de las rocas ígneas por acción del agua, los agentes atmosféricos, la temperatura y la presión, durante muy largos períodos de tiempo. Son mezclas de diversas especies minerales, según la composición de la roca matriz y el proceso de meteorización sufrido (Kingery W.D. et al., 1976), (Mari E.A., 1998).

Las arcillas son un grupo de minerales cuyos elementos predominantes son el Si, Al y O, y cuyas propiedades físico-químicas derivan de su composición química, su particular estructura interna en forma de capas (filosilicatos) y su tamaño de grano muy fino (Alujas, 2010).

Los minerales alúmino-silíceos, fuente primaria de los minerales arcillosos, constituyen el 75 % de la corteza terrestre y se encuentran ampliamente diseminados por ella (Tsvilis 1999). Debido a su alta dispersión y abundancia en todo el planeta, el uso de las arcillas como material puzolánico puede convertirse en una solución económica y ambientalista al problema de la emisión de CO₂

1.3.1.2 Metacaolín

La caolinita es el material arcilloso que requiere de la menor temperatura para la deshidroxilación de su estructura, 600 °C (Fernández et al., 2011, lo cual trae asociado un menor costo energético. Además tiene la ventana térmica más amplia entre el comienzo del estado metaestable y la recristalización, lo que constituye una ventaja tecnológica. Es por ello que el estudio y empleo de arcillas calcinadas como MCS ha estado centrado en los últimos años en arcillas ricas en caolinita.

El Metacaolín (MK) se define como una puzolana artificial. Es un derivado de la calcinación de arcillas caoliníticas y está constituida básicamente por compuestos a base de sílica (SiO₂)

y alúmina (Al_2O_3) en fase amorfa, proporcionando alta reactividad con el hidróxido de calcio o portlandita - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -, resultante de la hidratación del cemento (Scandiuzzi, 1986)

El uso de MK como puzolana ha aportado mejoras a los hormigones como el aumento de la resistencia a edades tempranas debido al efecto filler y la acelerada hidratación del cemento, lo cual refina la estructura de poros (Agarwal, 2006), y la reducción de los efectos de las reacciones álcali-sílice, debido a la reacción que produce con el hidróxido de calcio, formando fases cementicias de hidrosilicatos de calcio.

El uso del MK tiene también sus desventajas en cuanto a la baja disponibilidad de arcillas puras en caolín, así como los altos costos de la calcinación. Una buena forma de reducir estos inconvenientes, es la utilización de arcillas menos puras. (Agarwal, 2006)

1.3.1.3 Arcillas multicomponentes

Estudios realizados por el CIDEM (Centro de Desarrollo de Estructuras y Materiales) en nuestro país, demostraron la reactividad puzolánica de los productos de calcinación de una arcilla cubana con bajo contenido de Caolinita y su potencial empleo como sustituto parcial del CPO.

En general los productos de calcinación de arcillas con bajo contenido de Caolinita han demostrado buena reactividad puzolánica en sistemas con un 30% de reemplazo del CPO, actuando como un filler que incrementa la hidratación del CPO y como un material puzolánico (Alujas, 2010).

1.3.2 Experiencias del empleo de adiciones al cemento en Cuba

La utilización de puzolanas como extensores del clínquer de cemento Portland en Cuba data desde principios de los años 1980-1990. En el país existe un gran potencial de puzolanas naturales con numerosos yacimientos de rocas zeolitizadas y de vidrio volcánico diseminado prácticamente por todo el territorio nacional, las cuales generalmente muestran una elevada actividad puzolánica. Estas fueron utilizadas como adiciones en fábrica para producir otras variedades de cemento Portland, conocidas como PP-350, PP-250 y CA-160 (de la Cueva, 1993). La crisis que comenzó con el colapso del Socialismo en el este de Europa trajo, a partir de 1989, una seria reducción de la capacidad de producción de cemento en Cuba, la cual llegó a tener valores similares a los de los años 1970-80. La falta de portadores energéticos, y la escasez de divisas convertibles, unido a la necesidad de mantener intocables los programas sociales de la Revolución, hicieron que el país se orientara hacia alternativas más económicas que la producción de cemento en grandes plantas (Martirena,

2003). De esta forma surge el llamado popularmente “Cemento Romano”, con la puesta en marcha de la primera planta en “El Brujo”, Santiago de Cuba, a mediados de 1987; la misma contaba con instalaciones de trituración, remolienda y clasificación, que culminaban con la molienda fina conjunta de la cal y la puzolana denominada "toba Manganeso", proveniente del yacimiento de Palmarito de Cauto, que había sido ya explotada para la fábrica de cemento “José Merceron Allen” de Santiago de Cuba. A este desarrollo siguieron otros en las provincias orientales, algunos continúan hoy en explotación. Aunque no se desarrolló con todo el éxito que se esperaba y requería; por lo que su producción ha sido abandonada casi de forma completa desde finales de los 1990 (Rabilero, 1993). Más cercano a la actualidad, en agosto de 2013, cerca de 130 toneladas de cemento de bajo carbono fueron producidas en la fábrica de cementos Siguaney, de Sancti Spíritus. El cemento de bajo carbono (CBC) es una formulación novedosa desarrollada por un equipo técnico del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDem) de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV) y del Instituto Federal de Tecnología de Lausana, en Suiza, y permite sustituir una buena parte del clínquer –componente más costoso del cemento- por una combinación de arcilla caolinítica calcinada y carbonato de calcio en forma de piedra caliza. Dicha formulación permite triplicar los niveles actuales de sustitución de clínquer que logra la industria de cemento cubana (alrededor del 15-18 % en el cemento PP-250), para producir otro de similar resistencia y evita de forma muy superior al CPO, la penetración de agentes agresivos como los cloruros, que pueden producir daños en la matriz de hormigones expuestos a ambientes marinos.

1.4 Producción de cemento a bajo carbono (LC ³)

En el presente el sector del cemento tiene una capacidad productiva montada para la producción anual de 2.8 MMt de clínquer, de la que se reporta una utilización de cerca de un 40%. A pesar de los altos niveles de consumo, la mayoría del clínquer (se estima un 75% de la producción) se produce por vía seca. La producción reportada en el 2014 fue de 1.8 MMt. La demanda actual excede la producción, lo que indica la necesidad de inversiones en el sector para incrementar la capacidad productiva y su uso. La tecnología vieja no permite incrementar la utilización de la capacidad actual debido al estado de deterioro y los altos costos de mantenimientos de equipos y facilidades. Por lo tanto, las inversiones se presentan como la alternativa para poner al día la tecnología, pero la rentabilidad de la inversión debe ser demostrada.

Cifras oficiales presentan una demanda de 3.5 MM tpa en el 2019. La proyección de esta demanda en la fase pico (2016-2020) implicará crecimientos de 18% anual. Esto se vincula con un incremento de la actividad constructiva, característico de la nueva etapa en la que entra el país. En el corto plazo la demanda de cemento crece, y sería poco probable poner en explotación nuevas inversiones, ya que la construcción de una nueva planta puede llevar hasta cinco años.

Las opciones para dar solución a este problema son: (i) importar grandes cantidades de cemento cuando la demanda sobrepase la producción (estimados de 0.5-1 MM tpa en el período 2018-2020) a costos en el orden de los \$US 120/ton; (ii) maximizar la producción de cementos puzolánicos del tipo PP25 y PP35 usando puzolanas naturales, y (iii) Incrementar la producción de cementos puzolánicos hasta los niveles históricos máximos y complementar con la producción de cemento de bajo carbono, LC³. Este trabajo se concentra en la tercera opción, a partir de hacer propuestas concretas para la producción industrial del cemento de bajo carbono LC³, a partir de un programa coherente de evaluación de su introducción.

En La Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, se desarrolla a través del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), un Proyecto titulado “Utilización de arcillas calcinadas en la formulación de cementos de bajo contenido de clínquer”, este forma parte de los resultados de un trabajo de investigación colaborativo, realizado desde el 2005, entre la Universidad Politécnica Federal de Lausana, en Suiza; la UCLV, el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría y la fábrica de cemento Siguaney, de Sancti Spíritus. Dicho proyecto tiene como objetivo general, potenciar la implementación de la producción de un cemento de muy bajo contenido de clínquer, como una medida para la mejora de la eficiencia de la producción de cemento en Cuba (CIDEM, 2013).

El proyecto antes mencionado permitió producir de manera industrial, por primera vez en Cuba y el mundo, un cemento ecológico más económico y con una menor carga contaminante. En abril del 2013 en la fábrica espirituana Siguaney se llevó a cabo la producción de 120 toneladas de cemento de bajo carbono, denominado “SIG B45” y con este se montó un programa completo de utilización, que incluyó la producción de una variada gama de productos, para comprobar su uso eficiente en aplicaciones sin acero de refuerzo, como la producción de bloques de hormigón, tejas de techo, y en general en todos los trabajos de terminación (Zerquera, 2013).

El cemento “SIG B45” producido industrialmente o como también se le conoce Cemento de Bajo Carbono, es un cemento ternario de base clínquer – arcilla calcinada – caliza. Esta nueva alternativa hace frente a la creciente demanda de los recursos y al mismo tiempo, reduce el consumo de combustible, las emisiones de CO₂ y hace más eficiente y viable la producción del cemento en el país, utilizando la infraestructura existente disponible (Aguilar, 2015).

Durante el segundo semestre del 2018 se realizó una nueva prueba industrial, en la fábrica de cemento de Siguaney, donde se llevó a cabo aproximadamente una producción de 600 toneladas de la adición mineral compuesta por arcilla calcinada y caliza, denominada LC² (Cidem, 2019) El proceso de molienda de esta adición de forma independiente garantiza una homogeneidad en la granulometría que al ser mezclada con el clínquer estarían en igualdad de condiciones granulométricas, lo cual no pondría en riesgo las propiedades del material (Suárez, 2017). Está adición en combinación con el clínquer forma los cementos ternarios. La realización de esta nueva prueba permitió la producción de cementos ternarios por segunda vez a escala industrial en el país.

1.4.1 Importancia de la producción del cemento LC³

La ventaja evidente de los cementos ternarios sobre la base del sistema clínquer, arcilla calcinada y caliza con respecto a los cementos mezclados tradicionales radica en la posibilidad de elevar el nivel de sustitución del clínquer sin comprometer las propiedades finales del cemento. Los cementos ternarios formulados a escala de laboratorio con la adición combinada arcilla calcinada más caliza en sustitución de los contenidos de clínquer hasta en un 60 % alcanzan resistencias mecánicas superiores a los 35 MPa a los 28 días. En ello influye la alta finura propiciada por la naturaleza de la adición y la alta reactividad del sistema (Vizcaíno, 2014).

La implementación de este cemento tiene numerosos aportes, en lo económico la introducción del cemento LC³ en la producción nacional de cemento permite aumentar la producción de cemento entre un 17-45% en dependencia de la tecnología, para la disponibilidad actual de clínquer. Esto permite abastecer la creciente demanda de cemento en el corto plazo (2016-2020), y evitar la realización de importaciones para cubrir el déficit. También presenta aportes en lo social pues el incremento de producción de cemento podrá consolidar el programa de producción y venta local de materiales del MICONS, a partir de incrementar las existencias de cemento en los mercados de venta de materiales de construcción del MINCIN. Este cemento bajo carbono también traerá numerosos aportes

ambientales con la introducción de la producción del cemento LC³ unida a la maximización de la producción de cementos puzolánicos, pues permitirá a la industria de cemento cubana ampliar la reducción de emisiones de CO₂ de la industria a niveles superiores al 20-30% sin necesidad de realizar grandes inversiones (Martirena, 2016).

1.4.2 Producción local de cemento LC³

Las producciones locales de materiales de construcción en los últimos cinco años en Cuba, a raíz de la implantación de la estrategia de perfeccionamiento del modelo económico social cubano, han experimentado un alza sostenido de los volúmenes de estas producciones. Sin embargo la producción de CPO aunque ha crecido no satisface totalmente la demanda actual, de ahí que se perfila como una solución que permite multiplicar los volúmenes de producción la generalización de la producción industrial de LC³ a partir de inversiones modestas en la adaptación de los hornos existentes como calcinadores de arcilla (Machado.L. I 2016).

Para la industria local la producción de LC³ es una importante solución que permite multiplicar las disponibilidades de aglomerante, a nivel nacional en Cuba se desarrolla el programa para la producción y ventas de materiales locales. En este sentido los emprendimientos de producción local de materiales de construcción mantienen un sostenido crecimiento que se expresa por un valor de \$ 800 M de pesos en el año 2011 a \$ 2,300 M en el año 2013 alcanzando cifras superiores a los \$3000 M de pesos en el año 2015 (GNPVMCL 2015).

La obtención descentralizada de LC³ se realiza en talleres que tengan las condiciones necesarias, elaborando la siguiente formulación: 50% de cemento P-35, 30% de arcilla calcinada obtenida a partir de la trituración de desechos de piezas de cerámica roja y 20% de piedra caliza finamente molida. Con esta innovadora solución se pueden duplicar las existencias iniciales de CPO.

1.4.3 Hormigones elaborados con arcilla calcinada

Los hormigones elaborados con cementos mezclados presentan algunas ventajas tecnológicas con respecto a los tradicionales, sobre todo en referencia a resistencias mayores a largo plazo y mayor durabilidad gracias a la impermeabilidad y a las adiciones en sí mismas (Biondi, 2017). Los hormigones con adiciones puzolánicas reducen las consecuencias que trae consigo la reacción álcalis-agregado, como el agrietamiento y disminución de la resistencia (Jiménez, 2017).

Las arcillas calcinadas proporcionan al hormigón un aumento en la impermeabilidad, en la resistencia al ataque de sulfatos, así como aumento de la resistencia mecánica a edades

avanzadas (Jiménez, 2017). Dentro de las arcillas calcinadas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentra el metacaolín. Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento Portland ordinario. Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del Cemento Portland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de iones cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos (León, 2018). Además, las mezclas fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Talero, 2008).

La alta actividad puzolánica del metacaolín permite la obtención de hormigones más densos que conllevan al decrecimiento de la permeabilidad de la matriz y al aumento de la protección de la corrosión del refuerzo; donde a su vez el riesgo a la corrosión se ve disminuido por la disminución de las concentraciones de álcali en la solución de poros. Una de las deficiencias que muestra el producto es la necesidad de emplear superplastificantes o relaciones agua/aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo CPO, con el objetivo de mantener una laborabilidad constante de la mezcla (Navias, 2014).

1.5 Talleres de ecomateriales de pequeño formato

Los talleres de producción de prefabricado de pequeño formato son talleres donde se elaboran elementos de hormigón de forma descentralizada como: bloques, tejas de microconcreto, adocretos, celosías, baldosas hidráulicas, etc. Estas instalaciones deben contar con un conjunto de máquinas, las que unidas a otros equipos y accesorios de la producción de materiales, llegan a conformar un conjunto productivo a modo de una pequeña industria; ejemplo de estas máquinas son la vibrocompactadora para producir bloques huecos de hormigón con sus juegos de moldes para diferentes productos; molinos de bolas para la elaboración de cemento, mesas vibratorias y hormigoneras. Dentro de estas instalaciones debe existir un orden de las áreas y del equipo de trabajo que garantice un trabajo fluido, adecuado y de forma eficiente de modo que se puedan elaborar los diferentes productos a un costo reducido y con la mayor calidad posible (Aguilar, 2015).

- La puesta en funcionamiento de estos talleres artesanales trae innumerables ventajas como son (Cidem, 2011), (Salas, 2007):
- Aprovechamiento de fuentes locales de materias primas.

- Oportunidades para el empleo de fuerza de trabajo de poca calificación.
- Producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales o de grandes ciudades.
- Bajos costos en la inversión inicial, y recuperación rápida de esta.
- Comercio local de productos prefabricados de pequeño formato, con el objetivo de disminuir el costo de transportación.
- Utilización de tecnologías sencillas, con equipos producidos en el país, de bajo consumo energético y fáciles de reparar.
- Propicia el trabajo colectivo.
- Conseguir más con menos.
- Se consolidan líderes comunales.
- Aprender oficios desde la acción.
- Practicar la solidaridad.

La realización de estos talleres también puede traer sus inconvenientes. El primero de ellos es que la producción de estos materiales puede no llegar a ser eficiente, ya sea porque requiera una formación o una especialización demasiado exigente para obtener un producto de calidad, ya sea porque su coste de producción sea demasiado elevado en relación al precio de mercado local, lo que obligaría al proyecto a aceptar productos mediocres o pagar un importante sobrecoste por los mismos materiales. En segundo lugar e íntimamente relacionado con lo anterior, está la viabilidad de estos talleres a medio plazo, porque incluso aunque alcancen un cierto grado de autonomía, su actividad económica se sostendrá, una demanda a fin de cuentas transitorias. La caída de esta demanda ligada al fin de la construcción no tendrá repercusiones serias si los equipos profesionales son capaces de reestructurarse o reubicarse en otras zonas, pero puede poner en peligro todo el proyecto si la actividad de los talleres se hubiera constituido con el tiempo en la única fuente de ingresos de la población local (Salas, 2007).

1.5.1 Generalidades

Los talleres de producción de prefabricado de pequeño formato son talleres donde se elaboran elementos de hormigón de forma descentralizada como: bloques, tejas de microconcreto, adocretos, celosías, baldosas hidráulicas, etc. Estas instalaciones deben

contar con un conjunto de máquinas, las que unidas a otros equipos y accesorios de la producción de materiales, llegan a conformar un conjunto productivo a modo de una pequeña industria; ejemplo de estas máquinas son la vibrocompactadora para producir bloques huecos de hormigón con sus juegos de moldes para diferentes productos; molinos de bolas para la elaboración de cemento, mesas vibratorias y hormigoneras. Dentro de estas instalaciones debe existir un orden de las áreas y del equipo de trabajo que garantice un trabajo fluido, adecuado y de forma eficiente de modo que se puedan elaborar los diferentes productos a un costo reducido y con la mayor calidad posible (Aguilar, 2015).

La puesta en funcionamiento de estos talleres artesanales trae innumerables ventajas como son (Cidem, 2011), (Salas, 2007):

- Aprovechamiento de fuentes locales de materias primas.
- Oportunidades para el empleo de fuerza de trabajo de poca calificación.
- Producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales o de grandes ciudades.
- Bajos costos en la inversión inicial, y recuperación rápida de esta.
- Comercio local de productos prefabricados de pequeño formato, con el objetivo de disminuir el costo de transportación.
- Utilización de tecnologías sencillas, con equipos producidos en el país, de bajo consumo energético y fáciles de reparar.
- Propicia el trabajo colectivo.
- Conseguir más con menos.
- Se consolidan líderes comunales.
- Aprender oficios desde la acción.
- Practicar la solidaridad.

La realización de estos talleres también puede traer sus inconvenientes. El primero de ellos es que la producción de estos materiales puede no llegar a ser eficiente, ya sea porque requiera una formación o una especialización demasiado exigente para obtener un producto de calidad, ya sea porque su coste de producción sea demasiado elevado en relación al precio de mercado local, lo que obligaría al proyecto a aceptar productos mediocres o pagar un importante sobrecoste por los mismos materiales. En segundo lugar e íntimamente relacionado con lo anterior, está la viabilidad de estos talleres a medio plazo, porque incluso aunque alcancen un cierto grado de autonomía, su actividad económica se sostendrá, una demanda a fin de cuentas transitorias. La caída de esta demanda ligada al fin de la

construcción no tendrá repercusiones serias si los equipos profesionales son capaces de reestructurarse o reubicarse en otras zonas, pero puede poner en peligro todo el proyecto si la actividad de los talleres se hubiera constituido con el tiempo en la única fuente de ingresos de la población local (Salas, 2007).

1.5.2 Características de elementos prefabricados en talleres de producción local

En la actualidad el país está inmerso en la producción local de elementos prefabricados, pues así se puede reducir considerablemente los costos en la construcción y abastecer la alta demanda del país, además de utilizar las materias primas propias de la localidad. Para ello se han hecho diversos elementos prefabricados en talleres locales de materiales de la construcción como: vigas, viguetas, plaquetas, elementos de piso, bloques huecos de hormigón de ancho de 10 y 15 cm respectivamente, losa canal, losa hexagonal, lavadero, panel Sandino, tanque, entre otros elementos que poseen diferentes funciones.

1.5.3 Adocretos

1.5.3.1 Generalidades

Su origen se remonta a hace 25 siglos. Los cartagineses y romanos los utilizaban en sus grandes vías para dotarlas de rapidez y duración. El adoquinado se utilizó de modo funcional hasta finales del siglo XIX. En tiempos de Napoleón se construyeron grandes avenidas en las ciudades, entre otras cosas para posibilitar que las grandes piezas de artillería circularan por las calles. Más adelante los franceses construyeron las carreteras de pavés. La aparición del automóvil hizo crecer el ritmo de pavimentación y el adoquinado dejó de ser rentable. Hoy se utilizan los adoquinados con motivos estéticos y todavía muchos de los antiguos se encuentran en servicio y en buen estado, prueba de la gran robustez de este sistema. Asimismo, se han desarrollado adoquines de hormigón, los cuales se utilizan de manera similar a los antiguos adoquines de piedra y dan origen a lo que se denomina pavimentos articulados. A veces, a los adoquinados modernos se les añaden colorantes buscando un mejor resultado estético (Orta, P 2019)

1.5.3.2 Materiales, forma y calidad

La forma del adoquín no influye mucho en el funcionamiento del pavimento; pero por facilidad para su producción, transporte y colocación, se prefieren adoquines pequeños, que se pueden tomar con una sola mano, que no tengan más de 25 cm de longitud, para manejarlos con facilidad y para que no se partan bajo las cargas del tránsito.

Los adoquines de hormigón forman la superficie del pavimento, por lo cual serán de buena calidad para que soporten el tránsito de las personas, animales y vehículos, al menos durante 40 años; y tendrán una buena apariencia por ser la parte visible del pavimento.

Aunque los adoquines se hacen a máquina, en una planta, no todos salen con el mismo tamaño, apariencia o resistencia. Esto se debe a las variaciones de los materiales (arena, agregado grueso, cemento, agua), en los moldes de las máquinas, en el manejo de éstas y en el curado y transporte de los adoquines terminados.

La resistencia de los adoquines necesita ser mayor para aguantar la abrasión debido al tránsito, que para no partirse bajo las cargas de los tractores y camiones. Además, el desgaste ocasionado en los adoquines por el paso de personas o animales es igual o peor que el de los vehículos. Por esto no se pueden usar adoquines de segunda calidad para áreas peatonales. Si estos no cumplen con los requisitos de medidas o resistencia, se utilizarán sólo en lugares donde no sea importe su calidad. (Manual para adoquinado 2012)

1.6 Pavimentos

1.6.1 Generalidades

Los pavimentos de las carreteras constituyen uno de los elementos fundamentales de las vías de comunicación terrestres, siendo la parte más costosa, pues en condiciones normales su costo de construcción puede alcanzar entre el 40 y el 60 % del costo total de la vía; estas estructuras pueden ser de tres tipos fundamentales: flexibles, rígidas y semirrígidas, en dependencia de su comportamiento estructural. Los flexibles tienen la capacidad de adaptarse a pequeños asentamientos diferenciales que pueden experimentarse en la explanación sin que se agrieten las diferentes capas que lo componen, manteniendo su integridad estructural y capacidad de transmisión de las cargas. Los rígidos son aquellos donde su capacidad estructural depende de la elevada rigidez de una losa construida con hormigón hidráulico, la cual es capaz de resistir y distribuir las cargas del tráfico en una superficie o área en que las tensiones verticales transmitidas hacia la subbase del pavimento posean valores muy pequeños, inferiores a su capacidad soportante. El modelo teórico de los semirrígidos no se corresponde a los antes descritos, ya que en los mismos se manifiestan características de los flexibles y de los rígidos, en estos no existe un modelo teórico que dé cabal respuesta a los estados tensionales que se manifiestan, entre estos se encuentran los pavimentos de adocreto o adoquines de concreto hidráulico (Torres Vila, 1989); (Caraballo, 2000); (Orta Amaro, 2007).

En el caso de los flexibles están compuestos por tres capas: subbase, base y superficie. Los pavimentos rígidos están compuestos por una losa de hormigón hidráulico que apoya sobre una capa de suelo granular si el suelo de cimentación es fino (limo o arcilla) o solamente la losa de hormigón si el terreno de la base de apoyo es granular según clasificación de la AASHTO.

Estas estructuras deben proporcionar seguridad, economía y comodidad, así como resistir el interperismo y soportar las cargas del tránsito en toda época del año. Además deben poseer adecuada regularidad superficial (longitudinal y transversal), buena pendiente que garantice la rápida eliminación del agua superficial, generar bajos niveles de ruido de rodadura, adecuada resistencia al desgaste de los neumáticos de los vehículos, aceptable nivel de reflexión luminosa y apariencia agradable (Torres Vila, 1989); (Montejo Fonseca, 2008); (334, 2004).

1.6.2 Tecnologías de la construcción de carreteras.

La tecnología es el conjunto de conocimientos técnicos, ordenados científicamente, que permiten diseñar y crear bienes y servicios que facilitan la adaptación al medio ambiente y satisfacer tanto las necesidades esenciales como los deseos de las personas. Es el conjunto de saberes, habilidades, destrezas y medios necesarios para llegar a un fin predeterminado mediante el uso de objetos artificiales (equipos) y/o la organización de tareas (Wikipedia, 2013).

A su vez la concepción de la tecnología se ha enmarcado en sus épocas. En la era de la Revolución Industrial se asociaba tecnología a toda la maquinaria, y su avance, para ayudar a tener mejor producción. En la actualidad se reconoce la existencia de tecnologías llamadas “duras”, relacionadas con todo lo que pueda existir físicamente, como los equipos y las maquinarias, y tecnologías llamadas “blandas”, donde el conocimiento sea fundamental, por ejemplo las relacionadas con los procesos de dirección de las entidades. De manera general, tecnología es un conjunto ordenado de instrumentos, conocimientos, procedimientos y métodos aplicados en las distintas ramas del saber humano (Macías Mesa, 2012).

La tecnología de la construcción de los pavimentos de las carreteras consiste en la especificación de las características generales, las funciones y propiedades de estas estructuras; las propiedades y caracterización físico-mecánica de los materiales que los componen, de las maquinarias utilizadas actualmente, de los procedimientos o técnicas a cumplimentar y finalmente de los aspectos que aseguren la requerida calidad de ejecución.

1.6.3 Ventajas de la pavimentación con adocretos

Los adocretos son piezas prefabricadas que se producen con un equipo sencillo (una máquina bloqueadora-adoquinera) que tiene un precio asequible, que no se precisa un gran capital para producirlos, si se compara con las Plantas de Hormigón o Plantas de Asfalto usadas en la producción de hormigón hidráulico y asfáltico respectivamente, necesarios para construir pavimento rígidos y flexibles. (Orta, Amaro 2007)

Los adocretos se llevan o se producen en la obra ya terminados, por lo que se puede abrir al servicio del tránsito al momento que concluya su colocación.

No requiere de grandes gastos para su colocación en obra, solamente es necesario una cuadrilla de hombres prácticos en la tarea, usando con utensilios de trabajo sencillos.

Otras ventajas:

- El ensamble y las juntas a corta distancia, evitan que el pavimento se deteriore, fisurándose o quebrándose, por la acción de cargas accidentales y de temperaturas extremas, así como por asentamientos en capas inferiores.
- Por estar compuesto de piezas de dimensiones relativamente reducidas, la colocación resulta cómoda, práctica y sencilla.
- Es posible la remoción parcial o total del pavimento, rápidamente y sin rotura de los elementos, para permitir el paso de redes soterradas o reparaciones de estas.
- Su colocación no requiere de grandes gastos ya que puede ser realizada por una cuadrilla haciendo uso de utensilios de trabajo sencillos.
- Los adocretos se fabrican en una planta, lo que hace posible un desarrollo controlado de su producción, mediante la aplicación de técnicas depuradas en la preparación de las mezclas y procesos de elaboración, además, se asegura una producción continua al margen de problemas climáticos, especialmente en el periodo lluvioso.
- Reducción de los impactos ambientales en comparación con las tecnologías de pavimentación más usualmente empleadas en la construcción de pavimentos.
- La máquina conformadora de adocretos es muy sencilla y tiene un precio asequible y muy inferior a las maquinarias tradicionales, por lo que no se precisa de una gran inversión.
- Esta técnica reduce notablemente el consumo de combustibles.

- Los adocretos se pueden elaborar de forma manual cerca de la obra reduciéndose así notablemente los costos de elaboración, de transporte, así como el impacto ambiental.
- Como los adocretos son piezas prefabricadas, el pavimento puede ser abierto al tránsito inmediatamente después de colocados.(Alvarez.R,L. 2016)

1.6.4 Diseño de pavimentos de adocretos

El pavimento de adoquines de hormigón está compuesto, casi siempre, por dos capas: la capa de rodadura (los adoquines) y la base. Ambas capas son importantes porque los adoquines sin base se terminan por hundirse en el suelo; y la base sin los adoquines se deteriora muy rápido y no tiene la resistencia suficiente.

La determinación de los espesores de estas capas y de sus materiales se conoce como Diseño del Pavimento de Adoquines, y es el único proceso que permite construir un pavimento adecuado para las necesidades y condiciones que se tenga. Un diseño “a ojo” dará un pavimento que se deteriorará rápidamente, perdiéndose toda o parte de la inversión; o un pavimento por encima de lo que se necesita, con unos costos muy altos e innecesarios.

Los espesores de las capas dependen del tránsito que va a soportar el pavimento, de la dureza del suelo y de los materiales con que se van a construir estas capas; y deben tener la suficiente calidad para que el pavimento soporte el peso del tránsito, durante un tiempo determinado, sin deformarse ni deteriorarse. El tránsito, que va a circular por la vía durante el período de diseño, la dureza del suelo y la calidad de los materiales disponibles, definen el espesor de la capa del pavimento. Estas capas son, de arriba hacia abajo: .(Alvarez.R,L. 2016)

- Capa de adoquines: Los adoquines tiene un espesor de 8 cm para todo tráfico peatonal, animal o vehicular corriente.
- Capa de arena: Esta capa se construye de 4 cm de espesor, con arena suelta, gruesa y limpia, la cual no se compacta antes de colocar los adoquines sobre ellas.
- La base: El espesor de la base depende del material con que se construya, del tránsito y de la calidad del suelo.

1.7 Conclusiones parciales del capítulo

La producción de cementos mezclados con alto por ciento de sustitución de cemento Portland por materiales cementicios suplementarios constituye una alternativa viable para el aumento

de los volúmenes de producción de cemento necesarios para suplir la creciente demanda nacional y la mitigación del impacto ambiental de la industria de cemento cubana.

Las arcillas calcinadas con bajo contenido de caolín constituyen la mejor alternativa en la producción de puzolanas en nuestro país, ya que las reservas de caolinitas de alta pureza son limitadas.

El cemento LC³ satisface los requisitos establecidos para cementos mezclados según la NC 96:2011, con su producción se reducen las emisiones de CO₂ y resulta más económico con respecto a los cementos Portland fabricados en nuestro país. .(Alvarez.R,L. 2016)

La pavimentación con adocretos presenta disímiles ventajas en cuanto a estética y producción. Esta variante de pavimentación es muy económica en cuanto a la fabricación, más aun si se incluye en su producción el cemento de bajo carbono.

Capítulo 2: Diseño y producción de adocretos con cemento de bajo carbono. Adecuación de tecnologías para la producción en talleres locales.

Para el monitoreo y evaluación, en el taller de materiales de la construcción de la Provincia de Cienfuegos, Numancia, de la producción de elementos prefabricados de hormigón con cementos ternarios, se evalúan en el presente capítulo diversas dosificaciones de hormigón de calidad 25Mpa. Estas fueron diseñadas originalmente para cemento Portland ordinario y reajustadas para ser usadas en combinación de LC², con el objetivo de satisfacer el diseño estructural requerido para pavimentar calles con el tipo de tráfico que más se demanda en el taller y que cumpla con las normativas. Las dosificaciones a experimentar se obtienen al remplazar el 50% y el 35% de cemento P35 ordinario por la adición de cemento de bajo carbono LC-2, elaborado en la fábrica de cementos perteneciente al municipio de Siguaney. Se describen los ensayos realizados para evaluar la calidad de los elementos realizados con cemento ternario en el taller de Numancia y se presenta una caracterización de las materias primas usadas en la investigación. Además de proponer unas variantes tecnológicas con el objetivo de ampliar la gama de producción de elementos de este tipo en el taller.

2.1 Diseño del experimento

Para certificar las dosificaciones y validar la producción de los adocretos fabricados con LC-50 y LC³-35 en los talleres de materiales de la construcción se empleó el siguiente plan experimental:

- 1) Selección de las materias primas.
- 2) Caracterización de las materias primas.
- 3) Comprobación de las dosificaciones en el laboratorio para hormigones de 25MPa elaborados con P-35.
- 4) Empleo de las dosificaciones en los talleres para la producción de elementos con LC
- 5) Fabricación de elementos de hormigón masivo de 25MPa con LC³-50 y LC³-35 en los talleres.

- 6) Realización de los ensayos a los elementos de hormigón según lo establece la NC 998-2014.
 - Ensayo de resistencia a compresión a los 7 y 28 días
 - Ensayo de absorción
 - Ensayo de abrasión
 - Ensayo de superficie
- 7) Adecuación de tecnologías para pequeños talleres.
- 8) Conclusiones parciales

2.2 Selección de las materias primas

Las materias primas utilizadas para la dosificación y posterior producción de los adocretos se seleccionaron atendiendo a los previamente caracterizados en la ENIA de Cienfuegos y existentes en el taller de Numancia en el cual se preparó el experimento. En el taller se contaba con un solo árido fino: arena lavada de la cantera de Arimá y con dos tipos de áridos gruesos: granito de los 500 (10-5) mm y granito de Santiago Ramirez (10-5) mm de los cuales se escogió el primero por presentar mejores propiedades físico-mecánicas. Como cementos tenían solamente en el taller los posteriormente mencionados y utilizados, y como agua se utilizó la que abastece el taller usualmente.

2.3 Caracterización de las materias primas empleadas en la investigación

Las materias primas que se utilizaron en el diseño y producción de hormigones de calidad de 25 MPa para la fabricación de adocretos en los talleres locales fueron caracterizadas en el laboratorio de ensayo de materiales de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) UIC de Cienfuegos, a partir de los requisitos establecidos en las normas cubanas.

2.3.1 Cemento

Los tipos de cemento utilizados en la investigación fueron: cemento LC-50 y LC³-35. El cemento LC³ es como se le denomina a la mezcla en distintas proporciones de cemento Portland ordinario con la adición mineral de LC². La adición mineral LC² utilizada en esta investigación para la fabricación de los cementos ternarios fue obtenida de los resultados de la segunda prueba industrial de calcinación realizada durante el segundo semestre del 2018 por el equipo de trabajo del CIDEM y del Instituto Federal de Tecnología de Lausana en la fábrica de cemento Siguaney.

En la caracterización de los cementos, LC³-50 y LC³-35 se empleó el siguiente soporte normativo:

- NC 506: 2013 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica.
- NC 524: 2015 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la consistencia normal y tiempos de fraguado por aguja Vicat.
- NC 523: 2007 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la densidad.
- NC -196-6, 2007 Cemento Hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la finura y la superficie específica.

Los resultados realizados al cemento LC³-50 (50% de P35 + 50% de LC²) LC³-35 (65% de P35 + 35% de LC²) y a la muestra patrón con cemento P35 se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Propiedades físicas – mecánicas de los cementos P35, LC³-50 y LC³-35.

Tipo de cemento	Finura (%)	Consistencia Normal (%)	Tiempo de fraguado		Resistencia mecánica (MPa)	
			Inicial(min)	Final(horas)	7 días	28 días
P 35	2.9	24.6	105	2.8	37.3	55.4
LC ³ -50	5.2	29.2	60	3	23.6	35.1
LC ³ -35	4.5	27	90	3	29.6	45.8

Fuente: Autor

Se puede comprobar al ver los resultados que los cementos LC³ poseen una mayor demanda de agua que el cemento portland ordinario. Con respecto al tiempo de fraguado se obtuvo que los cementos LC³ cumple con las especificaciones descritas en la NC96: 2011. Atendiendo a la resistencia a compresión se puede observar que el P35 posee un mejor comportamiento que el LC³ a los 7 y 28 días; sin embargo la resistencia alcanzada por los cementos LC³ a los 28 días cumple con la resistencia mínima de 35Mpa, como se estipula en la NC96: 2011. En el ensayo de finura se puede observar que el cemento P35 tiene un menor porcentaje de retenido en el tamiz de 90µm con respecto a los cementos LC³.

2.3.2 Árido fino

Lo árido fino es procedente de la cantera de Arimao ubicada en la carretera Santa Martina, Arimao, esta cantera pertenece a la provincia de Cienfuegos. Para la caracterización del árido fino y verificación de los requisitos a cumplir para su utilización en la producción de hormigón se empleó el siguiente soporte normativo:

- NC 178: 2002. Áridos. Análisis Granulométrico.
- NC 179:2002. Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla.
- NC 181:2002. Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo.
- NC 182:2002. Áridos. Determinación del Material más fino que el Tamiz de 0.074mm.
- NC 186:2002. Arena. Peso Específico y Absorción de Agua. Método de Ensayo.
- NC 187:2002. Árido Grueso. Peso Específico y Absorción de Agua. Método de Ensayo.
- NC251:2013. Áridos para Hormigones Hidráulicos. Requisitos.

A continuación, se presentan las tablas de los resultados de ensayos realizados en la caracterización de los áridos finos:

Tabla 2.2 Composición química de los áridos finos

Análisis químico	Arimao
Dióxido de silicio (SiO ₂)	66,89
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃)	10,09
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	13,23
Oxido de calcio (CaO)	4,96
Oxido magnesio (MgO)	1,39
Trióxido de azufre (SO ₃)	0,04
Perdida por Ignición (PPI)	2,31
Residuo Insoluble (RI)	92,16
Carbonatos totales (CT)	11,91

Fuente: Catálogo de áridos para Hormigón de la región central (N.A, 2008)

Tabla 2.3 Característica de los áridos finos

Ensayos	Arimao	Requisitos
Material más Fino que 0.074 mm (%)	2.3*	≤ 5%
Partículas de Arcillas (%)	0*	≤ 1%
Pesos Específicos Corriente (g/cm ³)	2.51*	≥2.5
Pesos Específicos Saturado (g/cm ³)	2.54	-
Pesos Específicos Aparente (g/cm ³)	2.58	-
Absorción (%)	1*	≤3%
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1312	-
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1468	-
Módulo de finura	2.29*	2.2 a 3.58

Fuente: Laboratorios de la ENIA, nov 2018

Tabla 2.4 Granulometría árido fino

Análisis Granulométrico										
Tamiz N ^o	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 µm	300 µm	150 Mm
% Pasado				100*	99*	92*	80*	60*	30*	10*
NC251:2013				100	90- 100	70- 100	45- 80	25- 60	10- 30	2-10
Leyenda Conforme* No Conforme**										

Fuente: Laboratorios de la ENIA, nov 2018

2.4 Árido grueso

El árido grueso procede de la cantera de los 500 ubicada en el municipio de Cumanayagua perteneciente a la provincia de Cienfuegos. Para su caracterización y verificación de los

requisitos a cumplir para su utilización en la producción de hormigones, se emplearon las siguientes normas:

- NC 178: 2002. Áridos. Análisis Granulométrico.
- NC 181:2002. Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo.
- NC 187:2002. Árido Grueso. Peso Específico y Absorción de Agua. Método de Ensayo.
- NC251:2013. Áridos para Hormigones Hidráulicos. Requisitos.

En las tablas 2.5 y 2.6 se especifican la caracterización de los áridos utilizados

Tabla 2.5 Característica de los áridos gruesos

Ensayos	Los 500(10-5mm)	Requisitos
Material más Fino que 0.074 mm (%)	0.92*	≤ 1%
Pesos Específicos Corriente (g/cm ³)	2.68*	≥2.5
Pesos Específicos Saturado (g/cm ³)	2.7	-
Pesos Específicos Aparente (g/cm ³)	2.73	-
Absorción (%)	0.76*	≤3%
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1422	-
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1526	-

Fuente: Laboratorios de la ENIA, nov 2018

Tabla 2.6 Granulometría árido grueso

Análisis Granulométrico										
Tamiz N°	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 µm	300 µm	150 Mm
% Pasado Los 500	100*	92*	34*	8*	1*					
Fracción 5-10 mm										
NC251:2013 Fracción 5-10 mm	100	85- 100	15- 35	0-10	0-5					
Legenda: Conforme* No Conforme**										

Fuente: Laboratorios de la ENIA, nov 2018

El árido a utilizar en esta investigación se pueden considerar conforme según la NC251:2013 Áridos para Hormigones Hidráulicos. Requisitos.

2.3.3 Agua

El agua utilizada proviene de la red de acueductos local y por otras fuentes, esta es idónea para el mezclado amasado y curado del hormigo fabricado en el taller. El agua no estará contaminada por basura ni partículas de gran tamaño, no presentara químicos como las sales y los sulfuros. En este caso se utilizó agua potable como lo especifica la norma NC 353: 2004

2.4 Determinación de las dosificaciones

En tabla siguiente se muestra la dosificación propuesta por la ENIA de Cienfuegos para la fabricación de adocretos con una resistencia característica de 25Mpa. Esta se diseñó con el objetivo de cumplir las especificaciones físico-mecánicas de los elementos para un tráfico ligero. La mezcla de hormigón fue probada previamente a escala de laboratorio cumpliendo con la resistencia requerida y con las demás propiedades estipuladas en la NC998-2014. Esta dosificación además necesitaba cumplir con otras características necesarias como son la consistencia seca, la cual es necesaria para una correcta fabricación en la vibrocompactadora ya que esta tiene un periodo corto de vibrado y producción por lo que se necesita que el elemento ya fabricado se mantenga firme tras su retirada del molde y la

utilización de in árido grueso menor a 10mm de diámetro. Esto último por cuestiones de estética y de las dimensiones del elemento.

Tabla 2.7 Dosificación usada en el taller para los materiales previamente caracterizados.

Cemento	Tipo	Cemento(kg)	Arena (kg)	Granito (kg)	Agua (L)	Consistencia.	Rel. a/c	R' _c (Mpa)
P-35	Gravimétrica	384	789	975	172	No	0.45	25
	Volumétrica	1	1.7	2.1	0.52			

Fuente: Fuente: Laboratorios de la ENIA, nov 2018

La empresa no proporcionó datos de consistencia. Esto se debe a que como el hormigón es seco y debería ensayarse con un Consitrómetro VeBe y solo cuentan con el Cono de Abrams para este tipo de ensayos. Por lo que no se puede confirmar que la dosificación presenta una consistencia idónea para este tipo de elementos.

La dosificación existente para 25 MPa con cementos ordinario P35 y los áridos caracterizados puede ser utilizada para la fabricación de hormigones con LC³-50 y LC³-35 en los talleres. Esta dosificación está evaluada a escala de laboratorio y normada por la ENIA de Cienfuegos. La dosificación usada necesita reajustarse de las materias primas dependiendo de las densidades de las nuevas de mezclas cementos obtenidos. Luego de recalculadas pueden ser usadas y esperar un comportamiento similar a la dosificación base.

2.5 Fabricación de adcretos

La fabricación de los adcretos se realizó en el taller de Numancia, ubicado en la provincia de Cienfuegos, en un área del taller apartada de la zona administrativa, la única destinada a la fabricación de los elementos de hormigón a experimentar, esta zona se encuentra sin supervisar la mayor parte le ciclo laboral y solo está controlada y explotada por obreros. En el taller se realizaron tres series de elementos con P-35, LC³-50 y con LC³-35 con el objetivo de comprobar su efectividad y funcionamiento. Las razones por las que se ensaya también la dosificación con cemento P-35 ordinario, a pesar de que esta ya está normada y abalada por la ENIA de Cienfuegos, se exponen más adelante. Este proceso se realizó por personal cuya experiencia no excede a los 5 años de trabajo en la elaboración de elementos con este tipo de tecnologías y apenas conocen su correcta preparación y manipulación, la mayoría de

los operarios de forma general representa un personal no calificado los cuales no tienen una formación técnica para la realización de dicho trabajo. En el proceso de producción se llevó a cabo diferentes etapas.

- Selección y almacenamiento de materiales

Los materiales a utilizar estaban almacenados en el taller en cuestión, son los únicos con que se contaba al momento y se seleccionaron para el experimento. Los materiales que se usan en el taller para la producción desde hace unos años no cuentan con un certificado de conformidad lo que crea cierta desconfianza en cuanto a la calidad del producto final que se fabrica en los talleres lo que llevo también a hacer una comprobación de la dosificación utilizando cemento P-35.

Los áridos se almacenan de forma incorrecta en este taller, estos se almacenan apilados por sus tamaños de áridos y sus distintos yacimientos, estos también se encuentran bajo la acción del interperismo además están colocadas unas al lado de otras expuestas a mezclarse y a ser contaminados por cualquier agente externo, incumpliendo así la separación mínima que debe existir entre las pilas cuando no existen partidores, paredes que separen los materiales. La forma en la que se almacenan los áridos puede cambiar las propiedades de estos por acciones climáticas o por el mezclado entre estos, lo pueden afectar la resistencia del hormigón y su permeabilidad y durabilidad. Otros de los problemas que existen en el taller es que los materiales no están identificados, esto puede provocar errores por parte de los obreros a la hora de utilizarlos en las mezclas. El cemento se encuentra almacenado en silos, estos tienen compartimentos separados para diferenciar un cemento del otro. La estructura de los silos es lisa e impermeable al agua. La mayoría de estos silos se encuentran cubiertos de cemento esto sucede debido a que los silos de almacenamientos no son limpiados periódicamente. El LC ² se encontraba almacenado de la misma forma en la que se almacenaban el cemento Portland.

- Dosificación de las mezclas

El diseño de las mezclas de hormigón con cemento Portland P-35 utilizada para fabricar una de las series es que la se utiliza normalmente en el taller, la cual se encuentra certificada por la ENIA UIC: Cienfuegos. Para las otras series de elementos se sustituyó un 50% y un 35% de cemento Portland P-35 por adición de LC ², como consecuencia de esto se les hizo un reajuste de las proporciones de los demás materiales debido al cambio de densidad y de la interacción con el agua de las nuevas mezclas de cementos. A continuación, se muestran la

dosificación volumétrica utilizada para la producción de los adocretos. Se usó la proporción volumétrica para la fabricación de estos elementos porque en los talleres no se cuenta con el equipamiento necesario para medir las materias primas gravimétricamente. Del reajuste obtenido se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 2.8 Proporciones volumétricas a usar para la producción

Tipo	Densidad (kg/m ³)	Cemento (kg)	Arena (kg)	Granito (5-10) (kg)	Agua (l)
P-35	1.102	1	1.7	2.1	0.52
LC ³ -35	0.978	1	1.5	1.8	0.52
LC-50	0.955	1	1.6	1.8	0.52

Fuente: autor

- Medición de los materiales

La medición de los materiales componentes de la mezcla se hizo volumétricamente efectuando el procedimiento como suele hacerse en el taller, en las plantas de pequeña producción y en obras de poca magnitud, se utilizó un cubo normado el cual fue otorgado por la ENIA para efectuar el experimento. A pesar de no ser esta la manera correcta para su medición, en el taller se supervisó y comprobó la correcta distribución de las materias primas, logrando así, no una óptima, pero sí una muy buena versión de la dosificación propuesta.

- Elaboración del mortero

Se utilizó para la preparación del mortero una hormigonera de paletas de eje horizontal, las cuales son diseñadas para mover el hormigón de un extremo al otro de la misma mientras lo mezcla, estas son adecuadas para trabajar con hormigones secos de baja consistencia. La hormigonera que se utilizó tiene entre 20 y 25 años de vida útil lo que la ha llevado al deterioro de la misma, sus cuchillas están desgastadas por el uso cotidiano y necesitan ser sustituidas, provocando así que se fabrique un mortero con una calidad inferior al concebido previamente y ensayados en los laboratorios de la ENIA, para lograr que la mezcla se homogenice y sea lo más eficiente posible el operario tiene que retirar el mortero y terminar de concebirlo de forma manual. Con respecto al procedimiento utilizado para lograr dicho hormigón, primero se agrega el árido grueso (Gravilla de la cantera de los 500) en la hormigonera, después la

arena (Arena lavada de Arimao), luego el cemento y por último se echa el agua poco a poco hasta lograr un hormigón de consistencia seca correspondiente a la relación agua-cemento del diseño.

- Confección de los Adocretos

En Numancia actualmente solo se cuenta con un molde correspondiente a la elaboración de dichos elementos el cual es relativamente nuevo y no presenta deformaciones ni defectos por lo tanto es el que se utilizó a la hora de la confeccionarlos, posteriormente a la selección del molde se procedió a la colocación del molde en la maquina ya que la misma es utilizada también para la fabricación de bloques huecos de distintas dimensiones, luego se vertió en el suelo cerca de la vibrocompactadora el contenido de la hormigonera, se accionó el breaker de la misma para poder comprobar que la máquina se encontraba en buen funcionamiento, esto un poco después de asegurarse que la maquina estaba limpia y sin restos de mortero, esta comprobación se hace para evitar que los elementos salgan con una forma inconforme. Tras la comprobación los obreros empezaron a producir las series de adocretos. A la producción se le dio inicio sobrellenando pero no excediendo la el tope de la cajuela, para evitar el derrame y pérdida de la mezcla, luego de dejar reposar el operario empujó la misma en dirección del sistema de vibrocompactación que tiene la máquina. Terminado el tiempo establecido de vibración se bajó la palanca se levantó la cajuela para que se pudieran retirar así los elementos, quedando después de un breve intervalo de tiempo 6 adocretos conformados, apoyados en una base de madera la cual se situaba previamente bajo el molde de los elementos en la máquina. El proceso se repitió de nuevo para obtener 12 piezas de la primera serie. El mismo procedimiento se llevó a cabo con las otras dos series obteniendo en total 48 adocretos conformados y en espera a ser ensayados.

La máquina vibrocompactadora que se utiliza para la fabricación de bloques en el taller es de procedencia nacional, esta es fabricada y ensamblada en Holguín, es comercializada nacional e internacionalmente bajo el nombre de “Vibracom” VIB-002. La Vibracom está diseñada para la producción de elementos ligeros de hormigón, generalmente tienen 9 moldes: bloques huecos de distintas dimensiones, adocretos con distintos espesores y formas, bloques de celosías, entre otros. La máquina tiene un peso total de 900kg y vibra accionada con un motor de 220 voltios, cuenta con un muy bajo consumo energético y de recursos. Además esta, con el molde de adocretos existente instalado, alcanza una productividad de 3000 unidades por día las cuales cubren unos 70m² de pavimento con lo cual demuestra ser una alternativa muy eficiente y barata para plantas y talleres locales. En

general todas las vibrocompactadoras bloqueras-adoquineras son manuales, que, por medio de un sistema de vibración y compresión, compactan la mezcla hasta formar el bloque con los estándares establecidos. El tiempo de vibrocompactación depende de las características del material y del equipo, la experiencia del operador también es un factor muy importante en el tiempo.

- Manejo de los adocretos

El manejo de los elementos se realizó con cuidado, de manera que no se afectara su forma final. Estos fueron colocados cerca de la máquina en sus respectivas bases de madera hasta que se terminó la producción. Para transportarlos de manera segura, con mayor facilidad y de forma que se redujeran los viajes se usaron carretillas especiales las cuales son manipuladas por un solo operario. Los adocretos fueron transportados a un local bajo techo y fueron colocados de manera organizada y para diferenciar las series entre sí, se colocó cada serie una separada de la otra a una distancia mayor de un metro para su posterior traslado al área de curado.

- Fraguado de los adocretos

Los elementos fabricados permanecieron estáticos y sin manipulación en un lugar que los sacaba del alcance del interperismo y les proporcionaba la temperatura correcta para proporcionar la dureza necesaria para su posterior traslado; todo esto con la finalidad de que pudieran fraguar sin secarse. Las tablas se colocaron en el piso y los adocretos fraguaron por un tiempo entre 12 y 24 horas hasta que los mismos alcanzarán una resistencia suficiente para ser manipulados y transportados a su lugar de almacenamiento fuera del taller.

- Almacenado de los adocretos y curado de los elementos

El taller de no cuenta con un lugar de almacenamiento para los productos terminados, estos solo son colocados bajo techo y con muros relativamente altos durante las primeras 24 horas después de su fabricación. Después de esperar este tiempo, los adocretos fueron transportados a la ENIA y sumergidos durante 7 y 28 días para lograr el mejor curado posible para luego efectuar los ensayos establecidos por la norma NC998-2014.

2.6 Realización y descripción de los ensayos de laboratorio a los adocretos

Los ensayos que se realizan a los elementos según la norma NC998:2014. Previamente se seleccionan muestras al azar para realizarles las mediciones superficiales a cada tipo. En

total se obtuvieron 12 adocretos para conformar cada una de las tres series. A continuación, se muestra como quedó la distribución de los ensayos.

Tabla 2.9 Cantidad de elementos a ensayar de cada serie

Serie	Tamaño de la muestra		
	Res. a compresión	Absorción	Abrasión
P-35	6	3	3
LC ³ -50	6	3	3
LC ³ -35	6	3	3

Fuente: Autor

Esta tabla se conforma basada en lo estipulado por la norma NC998-2014 con respecto a los requerimientos de los ensayos.

2.6.1 Ensayos de superficie

Primero se les realizó una inspección visual buscando que se cumplieran los siguientes requisitos:

- No presentarán piezas rotas
- No presentarán piezas con fisuras abiertas en cualquiera de sus caras
- No presentarán roturas en las esquinas
- No presentarán roturas o descorchados en sus bordes
- No presentarán rebabas pronunciadas

Todos estos requisitos se comprobaron mediante la inspección y no se detectó ninguna anomalía de las antes expuestas. Por lo que dio paso a las mediciones.

La NC998:2014 estipula que los adocretos deben tener en las caras expuestas un acabado liso, sin fisuras ni oquedades. En las otras caras solo admitirán fisuras con diámetro y profundidad de 2mm. Para el criterio de conformidad de las disminuciones se promedian los resultados de las mediciones obtenidas y se evalúan con los valores que establece la NC998-2014. Parea este ensayo se utilizó una cinta métrica con valor mínimo de separación de 1mm.

Se les realizó las mediciones de las secciones efectivas a 1 un adocreto de cada serie siguiendo las exigencias de la norma antes expuesta. De dichas mediciones se deriva la siguiente tabla.

Tabla 2.10

Puntos	Longitud (Cm)	Ancho 1 (Cm)	Ancho 2 (Cm)	Alto (Cm)
1	18,01	12,98	13,02	11,01
2		12,99	13,01	11,00
3		13,01	13,01	11,01

Fuente: Autor

Ancho 2 equivale la cara inferior del elemento.

Las dimensiones de fabricación según la norma tienen un grado de tolerancia de $\pm 2\text{mm}$, tanto como para su longitud como para su ancho y espesor. Como las mediciones dieron conformes se pasó a ensayar a los adocretos en las variantes restantes.

2.6.2 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión en los adocretos se realiza a los 7 y 28 días. Este ensayo se llevó a cabo en la ENIA de Cienfuegos. Para esto se empleó una prensa de hormigón rusa de marca Zil con una resolución de 2.5 kN y un límite superior de medición de 1250 kN. El procedimiento a seguir para la realización de este ensayo se describe en la NC998-2014.

Aparatos a utilizar

- Máquina para ensayo a la compresión con capacidad mínima de 2 000 kN
- Hacha de albañil o lima de grano grueso
- Meseta nivelada con superficie pulida (terrazo, mármol, madera o metálica)
- Nivel de burbuja
- Espátula
- Cuchara de albañil

- Bandeja metálica

La prensa no cumple con los requisitos mínimos establecidos por la norma. Pero como los ensayos que se hacen en el experimento son para una resistencia a la compresión de 25 Mpa se admite su uso. Para realizarle los ensayos a adocretos diseñados para tráfico pesado, sería necesario el uso de otro equipamiento.

Los ensayos a compresión se realizaron de una manera correcta en gran parte de los requerimientos. Primeramente se colocó suavemente un adocreto sobre el plato inferior de la máquina y sobre un área previamente determinada con un centro geométrico conocido que coincidía con el eje de carga de la máquina, luego se puso en contacto la superficie de la cara superior de la prensa con la cara superior del elemento y se comenzó a aplicar la carga a velocidad constante de 50kN/s hasta determinar el esfuerzo máximo hasta la rotura. El lote se considera conforme cuando el valor medio de la resistencia a la compresión sea mayor o igual al que se establece en la tabla 2 de la NC998-2014. No se pudo aplicar la capa de nivelación debido a que en el laboratorio no se contaba con arena sílice para fabricar la mezcla. Esto puede que haya falseado para mal los resultados obtenidos.

2.6.3 Ensayo de absorción

El ensayo de absorción se realiza con el objetivo de establecer la capacidad de los elementos para absorber una determinada cantidad de agua. Los resultados de este ensayo representan el grado de compacidad y porosidad que presentan los adocretos. El ensayo sólo se le realizó a los 7 días de su fabricación.

Para la realización de este ensayo se aplica el siguiente procedimiento. Primeramente, se colocaron los bloques en la estufa a una temperatura de aproximadamente 110°C para secarlos hasta que tuvieran una masa constante para obtener la masa seca. Una vez concluido este proceso se colocaron los bloques dentro de un estanque lleno de agua por un período de 24 horas. Después de cumplido el tiempo se extrajeron los bloques, se eliminó el agua superficial secándolos con un paño húmedo hasta que perdiera el brillo cuidándolos de que no estuvieran al sol durante este proceso, luego se cubrieron y se llevaron hasta la balanza donde se pesaron para así determinar su masa húmeda.

Para la conformidad de la producción es necesario que el promedio de las unidades de la muestra cumpla con la absorción establecida en el apartado 4.4 de la NC998:2014.

2.6.4 Resistencia al desgaste por abrasión

- Método de ensayo “Disco ancho”

La resistencia a la abrasión se determina midiendo el desgaste producido en la cara vista de una probeta que se somete a rozamiento mediante un disco de acero y material abrasivo bajo condiciones normalizadas.

Aparatos a utilizar

- Disco de acero
- Lupa de al menos dos aumentos, preferentemente equipada con luz
- Regla graduada de acero
- Pie de rey
- Máquina de desgaste

Este ensayo no se pudo realizar ya que la ENIA de Cienfuegos no cuenta con el equipamiento necesario en los laboratorios para dicha labor. El ensayo tiene como procedimiento:

Apartado 6.3.4 NC998:2014

2.7 Adecuación de tecnologías para pequeños talleres

El taller de Numancia consta con variados equipamientos como lo son Hormigoneras, carretillas, entre otros. La investigación de este capítulo es sobre como condicionar la vibrocompactadora existente en el taller para la producción de adocretos y lograr aumentar su gama de producción.

La máquina Vibracom VIB-002 es un equipo especialmente diseñado para la fabricación de elementos ligeros de hormigón de diferentes dimensiones y formas. Los moldes intercambiables pueden ser removidos de forma sencilla, por lo que la máquina VIB -002 resulta un equipo versátil de amplias posibilidades. Las especificaciones y propiedades del equipo se exponen en epígrafes anteriores.

2.7.1 Tecnologías existentes para la fabricación de adocretos

La producción de este tipo de material de la construcción en la provincia Cienfuegos solo se le atribuye al taller de Numancia situado en la carretera de Junco Sur en el municipio de Cienfuegos. Este taller cuenta con una gran gama de producción que incluye desde elementos ligeros de hormigón hasta piezas prefabricadas de mayor complejidad como fregaderos de hormigón. Este taller para la producción de adocretos cuenta con una maquina

Vibracom, con una hormigonera de paletas y con el único molde existente en la provincia diseñado para producir este tipo de elementos. El molde en cuestión corresponde, atendiendo a su espesor de 11mm al diseño de pavimentos para tráfico pesados (C1, C0, AL-1, AL-2), sin embargo, se fabrican los elementos con una resistencia requerida de 25Mpa la cual corresponde a la fabricación de elementos destinados a pasos peatonales y carreteras con tránsito ligero (C4). Para condicionar y ampliar la tipología de producción se decide diseñar y tipificar otras series de moldes, atendiendo a lo normado y a un diseño crítico de pavimento; para su posterior fabricación y uso tanto en este taller como en los demás talleres de pequeña escala.

2.7.2 Diseño de los moldes

Para ampliar y condicionar la producción de adocretos en el taller de Numancia y en los demás talleres de pequeño formato existentes a lo largo de todo el país. Se decide diseñar una serie de moldes que cumplan con las especificidades de la NC998:2014 con respecto al espesor de los elementos, según las características de diseños de pavimentos. Se buscó también que los moldes diseñados fueran compatibles con la “Vibracom”, vibrocompactadora de fabricación nacional y distribuida nacionalmente. Con esto se busca que se tipifique la producción no solo para tráfico ligero y peatonal si no que se amplíe para más requerimientos de carreteras. Además se diseñan para producir adocretos de distintas soluciones estéticas, ambas normadas y dimensionadas previamente en el país. Como los son:

- Tipo moño o I
- Tipo rectangular o clásico (sin bisel)

2.7.2.1 Características de diseño

Para el diseño se toma en cuenta los espesores establecidos por la NC998:2014.

Esta especifica los espesores según la intensidad de los vehículos pesados en la carretera (v.p.d).

Tabla 2.11 Espesores admisibles

Categoría de tráfico	Descripción	Espesor (mm)
C4	Áreas peatonales, calles residenciales, vehículo ligero y v.p.d. ≤ 4	50 y 60
C3	Calles comerciales de escasa actividad sin servicio rígido de ómnibus y v.p.d. entre 5 y 14	> 60 y ≤ 80 > 80 y ≤ 100
C1	Calles principales con tráfico entre 15 y 24 v.p.d.	> 100 y ≤ 150
C0	Calzadas principales con tráfico entre 50 y 149 v.p.d	
AL-1	Arterias principales con tráfico entre 150 y 499 v.p.d	
AL-2	Áreas industriales con tráfico pesado entre 500 y 1 000 v.p.d	

Fuente: Tabla 1 NC998:2014

Otras consideraciones a la hora del diseño:

- Dimensiones necesarias para que los moldes encajen con el diseño de la vibrocompactadora
- Espesor mínimo de 0.5 entre los orificios de los adocretos. Con el objetivo de que resista las vibraciones sin deformarse.

2.8 Conclusiones parciales

Los cementos ternarios pueden alcanzar resistencias similares a los cementos ordinarios, de igual modo poseen una demanda de agua para lograr una laborabilidad similar a las mezclas con P-35. Para fabricar los adocretos se usa una vibrocompactadora por lo que es necesaria una consistencia seca. Debido a esto no se aumenta la cantidad de agua en las mezclas recalculadas porque al tener la consistencia más seca es más factible para esta tecnología de fabricación.

En el taller se observaron varios factores: la dosificación se hace de forma volumétrica, el mezclado se hace con una hormigonera defectuosa, hay problemas con el almacenamiento de los áridos, los obreros no poseen conocimiento técnico, entre otros. Estos factores afectan la calidad del producto objeto de estudio del presente trabajo.

Los ensayos se realizaron siguiendo los procedimientos normados por lo que se puede afirmar que los resultados a obtener serán de confianza.

Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados

Los talleres a pequeña escala son productores de diferentes tipos de elementos como bloques de distintas dimensiones, plaquetas, viguetas, losa hexagonal entre otros elementos. Estos pueden llegar desde elementos ligeros de hormigón hasta piezas más complejas como productos sanitarios. En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en la producción de adocretos a 25 MPa con y sin la adición del cemento de bajo carbono. Se analiza el diseño propuesto de los moldes realizados para aumentar la gama de producción de los talleres. Además, se analizan estadísticamente y se evalúan atendiendo a lo normado.

3.1 Análisis de la producción

Según el ensayo de control visual se detecta lo siguiente:

- No presentan grietas ni fisuras
- No presentan roturas en sus aristas
- No presentan roturas en las esquinas
- Presentan una coloración grisácea moviéndose a carmelita entre las series con más contenido de LC²

3.1.1 Resultados del ensayo de superficie

El ensayo se realizó a 4 adocretos de cada serie. A estos se le inspeccionó longitud, altura y ancho. En las siguientes tablas se muestran los resultados de las medias de cada serie producida en el taller.

Tabla 3.1 Media de las mediciones por serie

P-35				
Puntos	Longitud (Cm)	Ancho 1 (Cm)	Ancho 2 (Cm)	Alto (Cm)
1	18,01	12,98	13,02	11,01
2		12,99	13,01	10,09
3		13,01	13,00	11,01
LC ³ -50				
Puntos	Longitud (Cm)	Ancho 1 (Cm)	Ancho 2 (Cm)	Alto (Cm)
1	18,01	12,97	13,02	11,01
2		13,00	13,01	11,00
3		13,01	13,01	11,01
LC ³ -35				
Puntos	Longitud (Cm)	Ancho 1 (Cm)	Ancho 2 (Cm)	Alto (Cm)
1	18,00	12,98	13,02	11,01
2		12,99	13,00	11,00
3		13,01	13,01	11,00
Tolerancia máxima según NC998 2014 ±0.02Cm				

Fuente: Autor

Los resultados demuestran que todas las mediciones realizadas a los adocretos cumplen con la norma NC 998:2014. El molde utilizado en el taller era relativamente nuevo por lo que no presentaba deformaciones. Esto propició que se fabricaran correctamente las tres series de elementos. Además, otro factor que pudo haber favorecido es que el obrero a cargo de la vibrocompactadora estuvo pendiente de no sobrepasar el molde y de darle el tiempo de vibración y compactación que necesitaba.

3.1.2 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión

Se ensayaron 6 adocreto de cada serie cumpliendo así el mínimo a inspeccionar normado. Estos se sometieron al ensayo 2 de la serie a los 7 días y 4 a los 28 días de su fabricación en el taller. Para los cálculos de resistencia se utilizó la expresión expuesta en el apartado 6.2.5 de la NC998:2014. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 3.2 Resultados del ensayo a compresión

Serie	Adocreto	R'c a los 7 días	R'c a los 28 días
P-35	1	23,25	-
	2	23,13	-
	3	-	27,96
	4	-	27,68
	5	-	26,78
	6	-	27,92
R'c(Media)		23,19	27,58
LC ³ -35	1	20,34	-
	2	20,11	-
	3	-	25,12
	4	-	25,06
	5	-	25,08
	6	-	25,60
R'c(Media)		20,22	25,21
LC ³ -50	1	16,17	-
	2	15,81	-
	3	-	20,06
	4	-	21,63
	5	-	20,70
	6	-	21,64
R'c(Media)		15,99	21,00
R'c mínima		20Mpa(7 días)	25Mpa(28 días)

Fuente: Autor

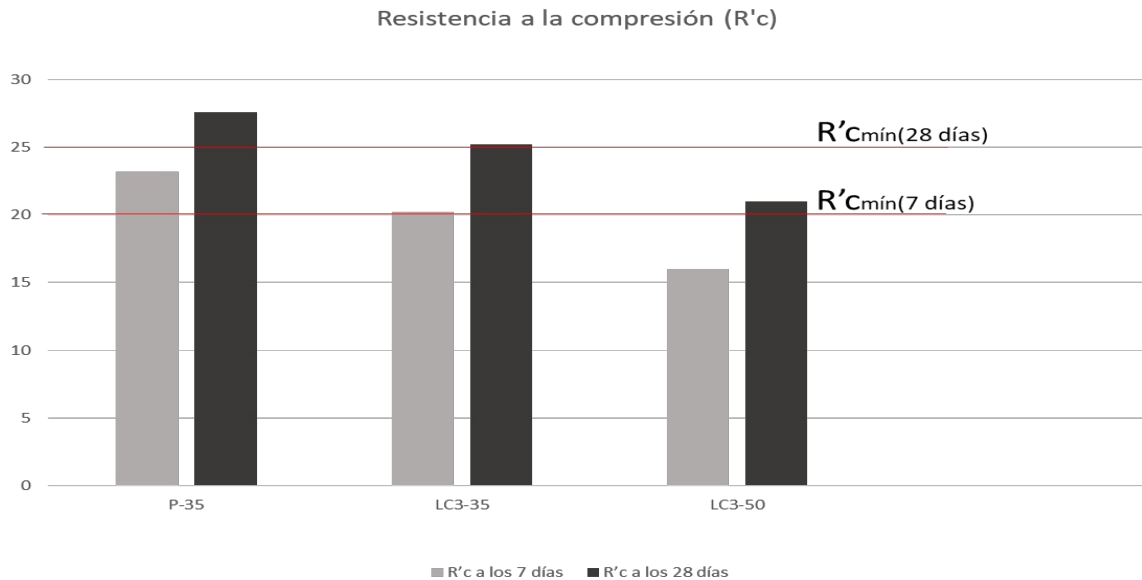


Figura 3.1 Resistencia a compresión

Al analizar los resultados obtenidos en el gráfico 3.1, se puede apreciar que los adocretos fabricados con adición de LC² se comportan menos favorables que los fabricados con cemento tradicional P-35. Los adocretos fabricados con una proporción de 50% de adición de LC-2 presentan una resistencia a los 7 y a los 28 días inferiores a lo establecido por la NC247:2010, Al realizar una comparación entre las dos series producidas con cemento ternario y la serie producida con P-35 ordinario se obtiene que las resistencias a los 28 días de estos representan:

- Los fabricados con LC³-35 cumplen con los requerimientos normados en cuanto a resistencia, no obstante sus resultados representan un 91,14% de las resistencias de los adocretos fabricados con P-35
- De igual modo los fabricados con LC³-50 representan un 76,15% de las resistencias de los adocretos fabricados con P-35

En la figura 3,1 se aprecia también que los adocretos con P35 rebasan las resistencias mínimas establecidas por la NC998:2014 a los 28 días en un 10,32%, En el caso de los elaborados con adición al 35% se obtuvo que sobrecumplen las R'_c mínimas por un 0,8% y para los fabricados con adición al 50% se observa que la resistencia media se queda un 19% por debajo de las condiciones mínimas de resistencia establecidas en la norma en cuestión, Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión son favorables, Dos de las series sobrepasaron la resistencia mínima establecida por la NC998:2014, La serie fabricada

con cemento Portland ordinario sobrepasó el mínimo, demostrando que el taller cumple los requerimientos para seguir en su actual producción además, demuestra que los materiales que se almacenan en el taller presentan buena calidad, La serie fabricada con adición al 35% rebasa este límite pero se mantiene con valores muy cercanos, Mientras que la serie con adición al 50% presenta valores muy por debajo de del mínimo, En el taller de Numancia se cometieron varios errores tanto en fabricación como en el almacenamiento de los materiales, entre otros; como se explica en capítulos anteriores, si se corrigen estas fallas y se contrata un personal capacitado para trabajar la vibrocompactadora y la hormigonera pueden llegar a alcanzar mayores resistencias e incluso la producción con LC³-50 pudiera llegar a ser conforme.

3.1.3 Resultados del ensayo de absorción de los adocretos

Este ensayo se le realizo a 3 muestras de cada serie de elementos fabricados. Este tiene como objetivo saber cuánto de agua absorben los elementos producidos. El mismo se realiza a los 7 días de la fabricación de los adocretos, se utilizó las expresiones establecidas en la NC247: 2010, Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la tabla a continuación,

Tabla 3.3 Valores de absorción de los adocretos

Serie	Elemento	Peso seco(Kg)	Peso húmedo(Kg)	Abs.(%)	Abs.Media(%)
P-35	1	4,82	5,05	4,77	4,72
	2	4,76	4,98	4,62	
	3	4,80	5,03	4,79	
LC ³ -35	1	5,12	5,43	6,05	6,39
	2	5,11	5,44	6,45	
	3	5,08	5,42	6,69	
LC ³ -50	1	5,39	5,82	7,97	7,81
	2	5,44	5,84	7,35	
	3	5,42	5,86	8,11	
Mínimo de absorción 8%					

Fuente: Autor

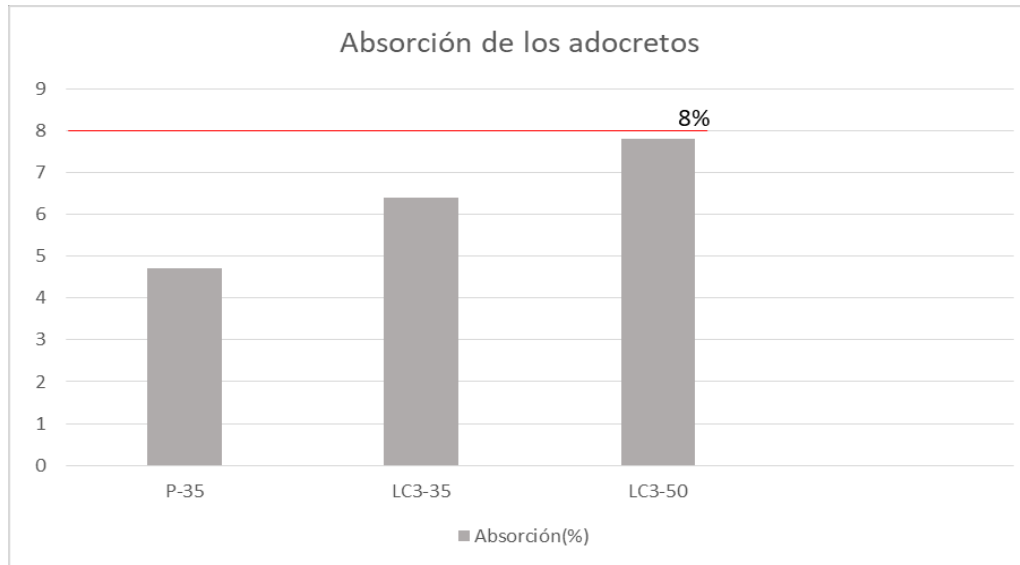


Figura 3.2 Por ciento de absorción de los adocretos

La Figura 3.2 evidencia que los elementos fabricados con P-35, LC³-35 y LC³-50 cumplen con los requisitos mínimos de absorción (8% del peso de los elementos en estado seco) descritos en el apartado 4.4 de la NC 998:2014.

Por otra parte, se aprecia como los elementos fabricados con cemento ternario presentan una mayor absorción con respecto a su peso y a los elaborados con P-35, esto se debe al contenido de arcilla que posee la adición mineral LC².

En el taller de Numancia no existe experiencia previa en la producción de elementos como los adocretos lo cual puede influir en la absorción ya que pueden no cumplirse adecuadamente los tiempos de vibración y compactación. Probablemente con una mayor experiencia al asumir regularmente estas producciones se pueden alcanzar valores de absorción más favorables y estaría la producción de elementos con LC³-50 más del lado de la seguridad.

3.2 Análisis de la producción

La producción en sentido global se comportó favorable. Solo hubo fallos en la resistencia a la compresión de una de las series, problema que se debe corregir al mitigar ciertos errores cometidos en el taller de Numancia. Pero por lo general se puede implementar a la tecnología de vibrocompactación para la fabricación de adocretos el uso de cementos ternarios.

A escala local el uso de los cementos ternarios propicia que se produzcan elementos a más bajos costos. Esto se debe a la reducción de P-35 en la mezclas de hormigón el cual es mucho más caro y difícil de producir. Al usar un cemento con adición de 35% de LC²

proporción favorable en el experimento se podría reducir en un año una cantidad significativa de cemento Portland.

3.3 Moldes diseñados

Los moldes se diseñan para cumplir varias especificaciones. Su diseño se fundamenta principalmente en los requerimientos de espesor planteados por la NC 998:2014 y en las dimensiones necesarias para lograr la compatibilidad con la Vibracom, maquina vibrocompactadora existente en el taller.

La figura 3.3, 3.4 y 3.5 muestran los diseños de los moldes

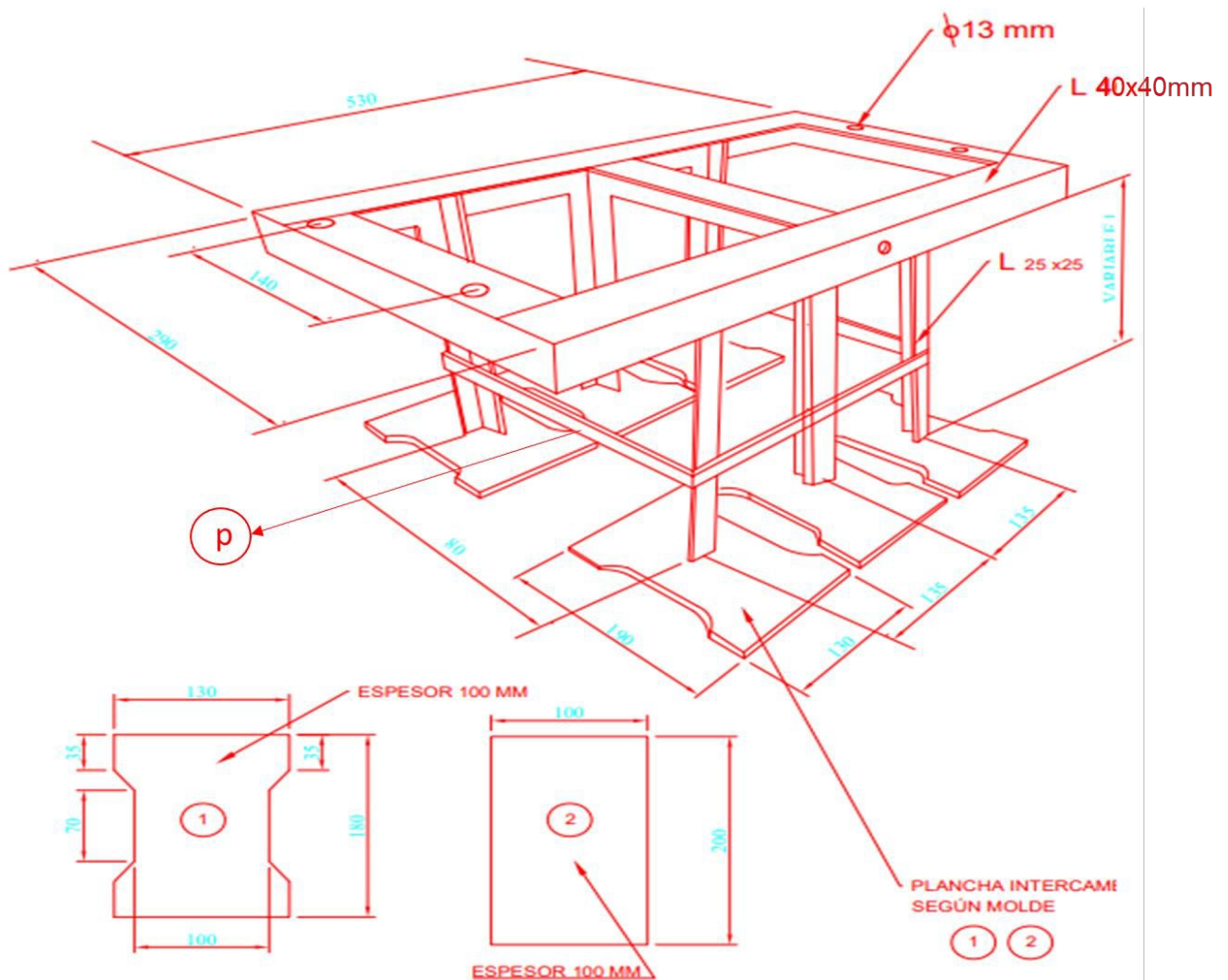


Figura 3.3 Parte superior de los moldes. Elaborado por el autor

En la figura 3.3 se muestra la parte superior de los moldes diseñados para ampliar la gama de producción de adocretos en los talleres de pequeña escala. Esta presenta las siguientes características:

- El molde mostrado en la figura es la versión diseñada para ser la parte superior del molde destinado a producir adocretos tipo I (Moño) con espesores distintos.
- Usa vigas L 40x40 para conformar las patas donde se soporta las planchas con la forma de los adocretos.
- La viga denominada “P” es soldada a las patas del molde y sus dimensiones no necesitan especificación.
- El molde superior, si se va a fabricar para otro tipo de molde “2” entonces llevaría 4 patas. Las dos exteriores estarían a una distinta distancia de 210mm del borde exterior de la viga que soporta las patas y estarían espaciadas entre ellas a una distancia de 105mm.
- Las patas “variable 1” tendrán valores variables. Estos dependerán del espesor del adocreto a diseñar. Medirán 420mm, 400mm, 370mm atendiendo al tipo de tráfico peatonal o ligero, medio y pesado respectivamente.
- Los orificios con diámetro 13mm están separados del borde a 75mm para encajar con la estructura de la vibrocompactadora.

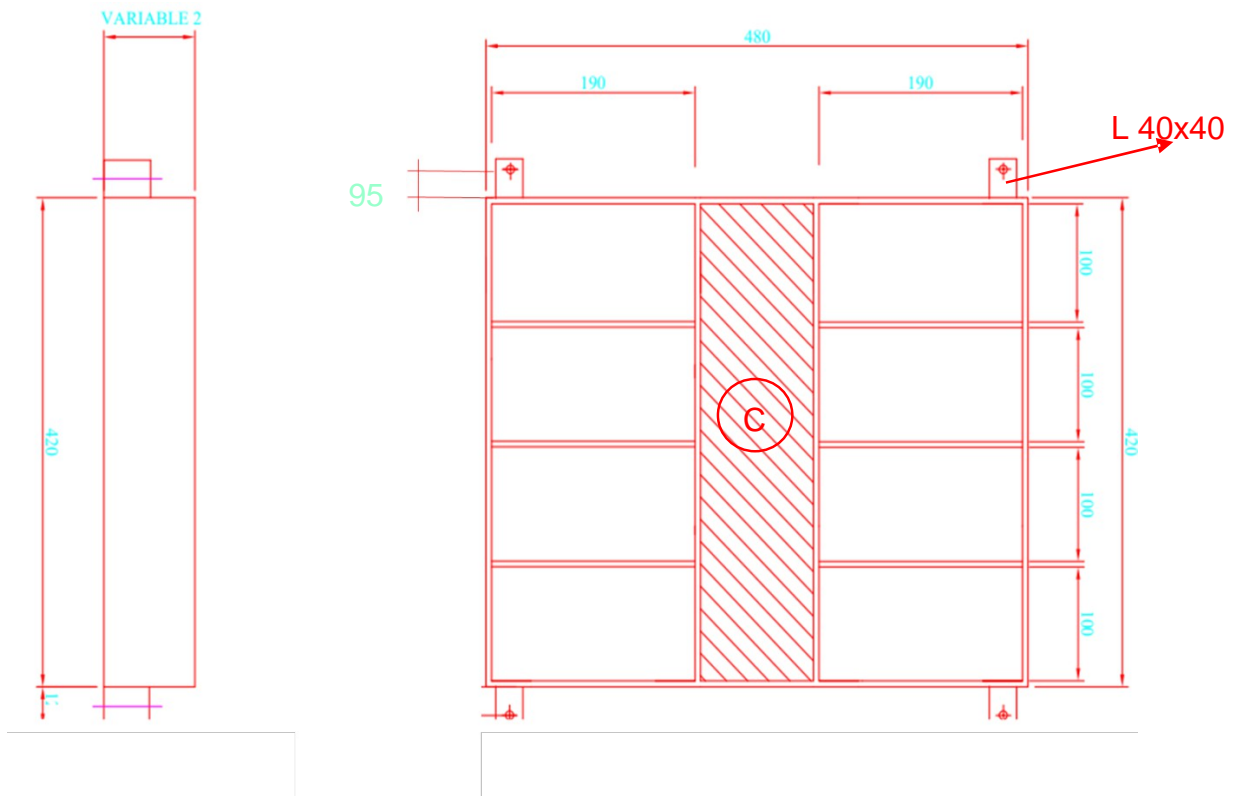


Figura 3.3 Parte inferior de los moldes “2”. Elaborado por el autor

En la figura 3.3 se muestra una de las partes inferiores (Tipo rectangular o clásico “Sin Bisel”) de los moldes diseñados para ampliar la gama de producción de adocretos en los talleres de pequeña escala. Esta presenta las siguientes características:

- El espesor denominado como “variable 2” cambia de acuerdo el tipo de tráfico de la carretera a pavimentar. Este toma valores de 50mm, 80mm y 111mm atendiendo a peatonal o ligero, medio y pesado respectivamente.
- Las paredes intermedias del molde poseen un espesor de 5mm
- Las orejas usadas para encajar el molde a la mesa vibratoria y al mecanismo de rodamiento son vigas L 40x40mm con una largo de 120mm. El eje por donde pasa el tornillo está a 95mm del borde del molde
- Cada fila de huecos del molde esta soldada a una plancha metálica “C” de 10mm de espesor con unas dimensiones de 100mm x 420mm

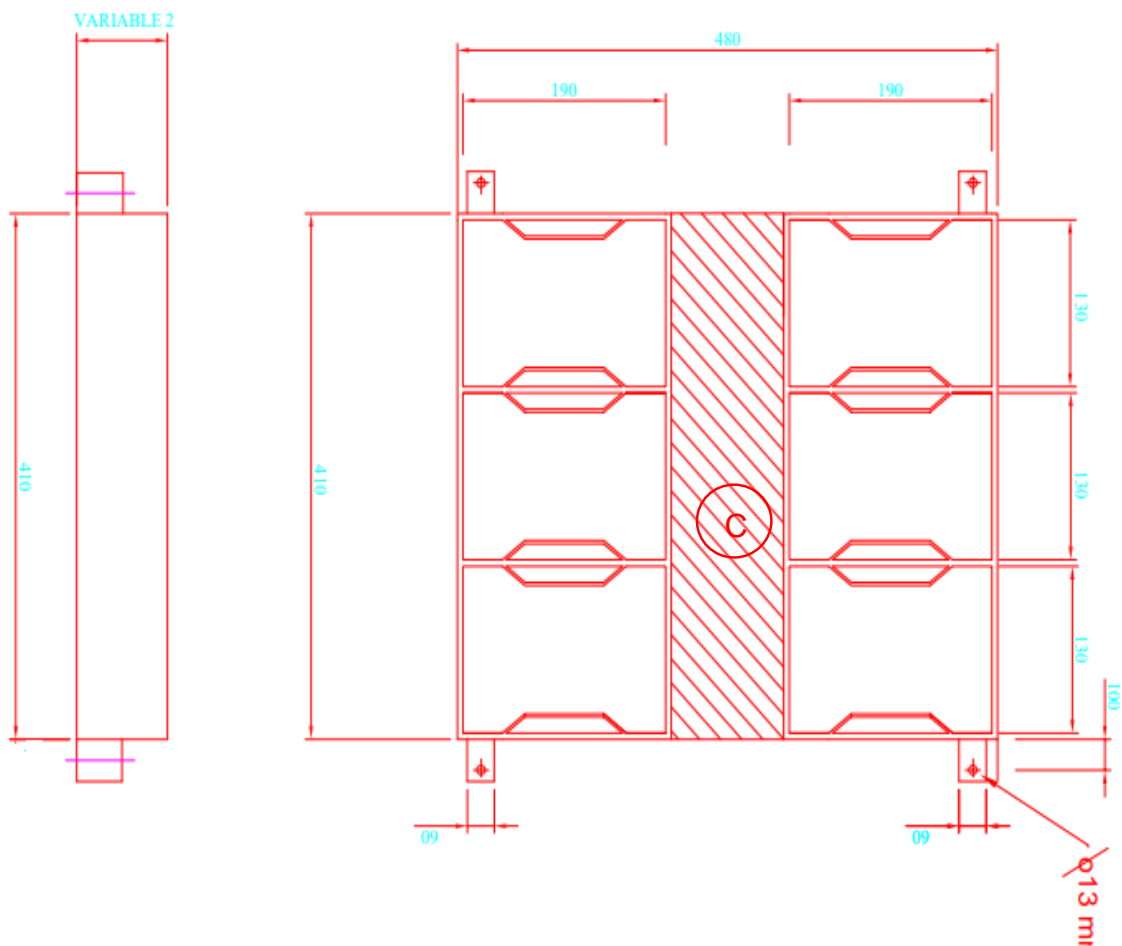


Figura 3.3 Parte inferior de los moldes “1”. Elaborado por el autor

En la figura 3.4 se muestra una de las partes inferiores (Tipo I o Moño) de los moldes diseñados para ampliar la gama de producción de adocretos en los talleres de pequeña escala. Esta presenta las siguientes características:

- El espesor denominado como “variable 2” cambia de acuerdo el tipo de tráfico de la carretera a pavimentar. Este toma valores de 50mm, 80mm y 111mm atendiendo a peatonal o ligero, medio y pesado respectivamente.
- Las paredes intermedias del molde poseen un espesor de 5mm.
- Las orejas usadas para encajar el molde a la mesa vibratoria y al mecanismo de rodamiento son vigas L 40x40mm con una largo de 120mm. El eje por donde pasa el tornillo está a 100mm del borde del molde.
- Cada fila de huecos del molde esta soldada a una plancha metálica “C” de 10mm de espesor con unas dimensiones de 100mm x 420mm.

3.4 Conclusiones parciales

Los hormigones fabricados con cementos ternarios presentan características físico-mecánicas similares a los producidos con cemento Portland ordinario. Estos son más económicos por lo que conviene la sustitución por este en los talleres de pequeña escala.

Los elementos fabricados a escala local con cemento ternario muestran buenos resultados en sus propiedades mecánicas. Aunque el cemento con adición al 50% no cumplió los ensayos de resistencia cumplió absorción. Con una mejor producción y corrigiendo varios errores cometidos en los talleres se puede lograr que los adocretos fabricados con este cemento alcance mayores resistencias a la compresión y rebase el mínimo requerido para su fabricación.

Con la fabricación de los moldes diseñados se puede ampliar la producción de los talleres de ecomateriales con 5 más nuevos productos para sus catálogos.

Conclusiones

El uso de adocretos es una buena alternativa para la pavimentación, ya que presenta disímiles ventajas en cuanto a estética y producción, además de ser muy económica en cuanto a la fabricación, más aun si se incluye en su producción el cemento de bajo carbono.

En el taller se observaron varios factores: la dosificación se hace de forma volumétrica, el mezclado se hace con una hormigonera defectuosa, hay problemas con el almacenamiento de los áridos, los obreros no poseen conocimiento técnico, entre otros. Estos factores afectan la calidad del producto objeto de estudio del presente trabajo.

Los ensayos de resistencia a la compresión, superficie y absorción tuvieron resultados satisfactorios en su mayoría, cumpliendo así con las normas vigentes. Los adocretos fabricados con LC³-50 fueron los que obtuvieron resultados más desfavorables en cuanto a la resistencia requerida, probablemente debido a la mala producción en el taller de Numancia.

La fabricación de los moldes diseñados puede ampliar la producción de los talleres de ecomateriales con 5 más nuevos productos para sus catálogos. Estos están diseñados para ser compatibles con la vibrocompactadora de fabricación nacional "Vibracon", que es la máquina destinada a la producción de elementos ligeros de hormigón más usada en los talleres de producción local.

La Vibracon con los moldes diseñados instalados serán capaces de producir 3 mil unidades por día. Estas unidades pueden ser de tipo I (moño) de distintos espesores o adocretos rectangulares (sin bisel) tradicionales también con distintos espesores.

Recomendaciones

Mejorar las condiciones de los talleres locales para logra mejores resultados en ensayos y poder ser utilizados en condiciones más desfavorables.

Continuar con el estudio de la pavimentación con adocretos como una alternativa ecológica y económica

Implementar el uso de adiciones de LC² en otros campos de la construcción de nuestro país.

Fabricar los moldes diseñados en el presente trabajo de diploma para implementar la gama de producción de los talleres de producción local.

Referencia bibliográfica

- Agarwal, S. (2006). Pozzolanic activity of various siliceous materials.
- Aguilar, Y. (2015). Cementos de bajo carbono LC3 producidos en condiciones de pequeña escala, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- Alujas, A., Fernández, R., Martirena, J. F., & Quintana, R. . (2010). CENIC. Ciencias Químicas. 1-10.
- Biondi, A. (2017). Los cementos adicionados. 50-54.
- Cidem. (2011). Manual Instructivo para la producción de bloques huecos de hormigón con la maquina Vibracom.
- CIDEM. (2013). Instructivo Técnico para el uso del Cemento de Bajo Carbono SIG B45.
- Cidem. (2019). Prueba Industrial de Producción de Cemento de Bajo Carbono LC3.
- Martirena, J. F. (2016). Desarrollo y producción industrial de un cemento de bajo carbono en Cuba.
- N.A. (2007). Tema 4: Morteros de Construcción y Ornamentación. NC169 2002. Mortero fresco. Determinación de la capacidad de retención de agua. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Navias, J. E. (2014). Diseño y producción industrial de elementos con cemento de bajo carbono producido en prueba industrial. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- NC-178. (2002). Áridos. Análisis Granulométrico. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-181. (2002). Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-182. (2002). Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074mm. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-186. (2002). Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-247. (2010). Bloques huecos de hormigón. Especificaciones. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-251. (2013). Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-353. (2014). Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.

- NC-506. (2013). Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-523. (2007). Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la densidad. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-524. (2015). Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la consistencia normal y tiempos de fraguado por aguja de Vicat. (s. f.). Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-998. (2014). Adoquines de hormigón(adocretos). Especificaciones.
- NC-EN1015-10. (2008). Morteros de albañilería. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.
- NC 170. (2002). Mortero fresco. Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 171. (2002). Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 172. (2002). Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 173. (2002). Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 175. (2002). Morteros de albañilería. Especificaciones. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 247. (2010). Bloques huecos de homigón. Especificaciones. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 567. (2007). Mortero seco en polvo. Determinación de la densidad aparente. . Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 601. (2008). Morteros de albañilería. Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 657. (2008). Áridos para morteros. Especificaciones. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Salas, J. (2007). *Habitáfrica*. Madrid, España: Edición a cargo de Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.
- Scanduzzi, L., & Rodríguez, A. . (1986). *Concreto e seus materiais – Propiedades e ensaios*.
- Statistic, G. c. p. t. c. (2019). *world-cement-production-by-country*.
- Talero, R. (2008). Diferenciación cinética y morfológica de Ettringitas mediante Metakaolín, cementos Portland y el ensayo ASTM C 452-68.
- Vizcaíno, L. M. (2014). Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer – arcilla calcinada – caliza. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- Zerquera, I. (2013). *En la forja del cemento ecológico*.
- ALUJAS, A. 2010. RE: Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente.
- ALUJAS, A. Rapid methods to assess pozzolanic reactivity. 2012 UCLV: Marta Abreu de Las Villas.

ÁLVAREZ, G. 2011. Morteros de albanilería, Antecedentes, clasificación, materiales, métodos de ensayos y tablas de resultados., La Habana, Cuba.

ALVAREZ IBARRA, C. 2014. "Evaluación de las propiedades de los morteros de albañilería con CBC". Tesis de Diploma, UCLV.

RODRÍGUEZ, O. 2003. Morteros Guía General. In: MORTERO, A. N. D. F. D. (ed.). Madrid. España S.A.

TAYLOR, M. 2006. Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry in Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry. Energy Technology Policy Division International Energy Agency: IEA, 77.

WORRELL, E. & GALITSKY, C. 2008. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers.

Alvarez.R,L. 2016. Tesis de posgrado curso 2018-2019. Título: Adocretos, generalidades y pavimentación Tutor :Pedro Andrez Orta Amaro

(N.A, 2007; NC-EN1015-10, 2008; NC 170, 2002; NC 171, 2002; NC 172, 2002; NC 173, 2002; NC 175, 2002; NC 247, 2010; NC 567, 2007; NC 601, 2008; NC 657, 2008)