



República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa



TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN ELECTROMECAÁNICA

**Título: Influencia de la adición de Aliven en el peso y
la resistencia a la compresión del hormigón
para durmientes del Metro de Caracas, C.A**

Autor: Ing. Miguel Rodríguez Encarnación

Tutor: Dr. Alberto Velázquez del Rosario

Caracas, abril de 2010



INDICE

	<i>Pág.</i>
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. Introducción	5
1.2. Trabajos precedentes	5
1.3. Características del Alivén	12
1.4. Conclusiones del capítulo 1	15
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	16
2.2. Diseño de las mezclas.	16
2.3. Obtención de las muestras	22
2.4. Realización de los ensayos	23
2.5. Procesamiento de los datos y análisis estadístico de los resultados	23
2.5.1. Determinación de la Desviación Standard	24
2.5.2. Determinación del Error Absoluto	24
2.5.3. Determinación del Error Relativo	25
2.5.4. Ploteo de los datos considerando las variables investigadas.	25
2.5.5. Selección de la línea de tendencia obtención de la ecuación de regresión y su correspondiente coeficiente de correlación	26
2.6. Conclusiones del capítulo 2	26
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1. Introducción	27
3.2. Resultados de los ensayos	27
3.2.1. Verificación de la masa	27



RESUMEN

Para el soporte de las vías, el Sistema Ferroviario Metropolitano utiliza durmientes de material compuesto formado por hormigón armado de tipo monoblock y biblock, siendo estos últimos los que más se utilizan a lo largo de todas las líneas en las que se subdivide el metro de Caracas.

Ha sido confirmado científicamente que la adición de Aliven como sustituto parcial de la piedra, al material destinado a la fabricación de durmientes ferroviarios de tipo biblock del Metro de Caracas, C.A, garantiza la disminución de su densidad, mientras la resistencia a la compresión se mantiene en el rango exigido por las normas establecidas para la fabricación de estos elementos. En este sentido, la sustitución de un 75 % de piedra por aliven en el concreto, permite disminuir el peso de la muestra en un 30 % aproximadamente, mientras que la resistencia a la compresión es igual 35,6 MPa, valor que supera el mínimo establecido, que es igual a 35 MPa.

SUMMARY

For the support of the roads, the Metropolitan Rail System uses sleepers of compound material formed by armed concrete of type monoblock and biblock, being these last ones those that more they are used along all the lines in those that the meter of Caracas is subdivided.

It has been confirmed scientifically that the addition of Aliven like partial substitute of the stone, to the material dedicated to the production of rail sleepers of type biblock of the Meter of Caracas, C.A, guarantees the decrease of its density, while the resistance to the compression stays in the range demanded by the established norms for the production of these elements. In this sense, the substitution of 75 stone% for aliven in the concrete, allows to diminish the weight of the sample approximately in 30%, while the resistance to the compression is same 35,6 MPa, value that overcomes the established minimum that is similar to 35 MPa.

Introducción

La Compañía Anónima Metro de Caracas se encarga de transportar ciudadanos y ciudadanas a través de un Sistema Metropolitano de Transporte conformado por el Sistema Ferroviario Metropolitano (Metro), el Sistema de Transporte Superficial (Metrobús) y el Sistema Teleférico (Metrocable), prestando un servicio integrado que contribuye a elevar la calidad de vida de los habitantes de la Gran Caracas.

Para el soporte de las vías, el Sistema Ferroviario Metropolitano utiliza durmientes de material compuesto formado por hormigón armado de tipo monoblock y biblock, siendo estos últimos los que más se utilizan a lo largo de todas las líneas en las que se subdivide el metro de Caracas.

Los durmientes ferroviarios tienen la función de alinear los rieles, soportar la carga del tren desde los rieles y trasmitirla al suelo o cimiento (Shokrieh y Ramat, 2006). En el metro de Caracas se utilizan durmientes mayormente de hormigón de tipo biblock a lo largo de todas las líneas en las cuales se subdivide, con un peso aproximado de 200 kgf, que se colocan y alinean de forma manual, por lo se requieren de 6-8 personas para realizar las labores de montaje y desmontaje durante las operaciones de instalación y mantenimiento, que se hacen aún más complicadas, si se considera la anchura de la vía. Es preciso señalar la manifestación de un excesivo desgaste físico humano. Adicionalmente han sido detectados caso de enfermedades a nivel de la columna, en el personal designado para tal función.

Adicionalmente se destaca que este sistema de transporte se encuentra establecido plenamente en la Ciudad de Caracas y en amplio desarrollo en las Ciudades de Valencia y Maracaibo; se justifica plenamente por la importancia que representa para CAMETRO, la realización de este proyecto

Estas circunstancias permiten plantear la siguiente **situación problemática**:

El elevado peso de los durmientes ferroviarios del Metro de Caracas origina riesgos de desgaste físico, accidentes y enfermedades lumbares en los operarios, por lo que se requiere de una cantidad no económica de personal para las intervenciones que,

en ocasiones, obstaculizan las labores de instalación y mantenimiento de las vías y generan costos considerables.

Una vía para resolver esta situación, consiste en la búsqueda de un material compuesto que brinde las facilidades de fabricación de durmientes ferroviarios más livianos y que al mismo tiempo cumpla con las normas establecidas para tal fin con relación a las propiedades mecánicas, tomando en consideración principalmente la disminución del peso del mismo, así como también la reducción considerable en los costos de fabricación e instalación, y sobre la base de los resultados, aportar nuevos conocimientos a la teoría de materiales compuestos los cuales pueden ser introducidos en el perfeccionamiento de los planes y programas de estudio de las carreras afines como: Mecánica, Metalurgia y Materiales, entre otros, además de la incorporación de la cátedra de Mantenimiento Ferroviario, al pensum de estas casas de Estudio. Esto ocurre en un contexto favorable, dado el hecho de que entre los planes del Gobierno Nacional se encuentra la aplicación del Plan Ferroviario Nacional, así como también.

Otro aspecto favorable, los constituye la disponibilidad de la asesoría científico técnica requerida, así como la existencia de equipamiento, medios y técnicas de análisis en el Instituto Universitario de Tecnología Región Capital “Dr. Federico Rivero Palacio”, y finalmente, la trayectoria del investigador en el área de diseño y en el manejo de prácticas de laboratorio.

Es de destacar, su justificación metodológica, por cuanto que constituye un tema enmarcado en las líneas de investigación desarrolladas por el Departamento de Mecánica del Instituto Universitario de Tecnología Región Capital “Dr. Federico Rivero Palacio” ubicado en el km 8 de la Carretera Panamericana, dirección hacia San Antonio de Los Altos, Caracas – Venezuela.

El hormigón armado garantiza una extraordinaria resistencia a la compresión, por lo que es uno de los materiales de mayor utilización en la fabricación de estructuras, columnas y soportes. Sin embargo, su relativamente elevado peso y fragilidad limitan su utilización en diferentes aplicaciones de ingeniería. Existen variantes de solución

para disminuir la densidad del hormigón armado, la variante más generalizada es la utilización de materiales ligeros como reforzantes de la matriz obteniéndose, en ocasiones, un material compuesto con resistencia incrementada.

Los agregados que conforman los materiales compuestos se seleccionan de manera que el nuevo material obtenido posea propiedades superiores a las de los materiales individuales que lo integran. En la mayoría de los materiales compuestos, incluyendo el hormigón armado, la acción del compuesto requiere que las cargas se transfieran de un material a otro a través de las interfaces. El uso de materiales compuestos se ha incrementado significativamente en las tres últimas décadas debido a su gran versatilidad y a las excelentes propiedades mecánicas que suelen poseer.

El concreto por sí solo es considerado un material compuesto, siendo uno de los más extraordinarios y versátiles en el área de la construcción. Diversos autores (Hollaway, 1993; Kessler y White, 2002; Kessler et al, 2003) reportan una gama de materiales compuestos a partir del uso de elementos ligeros de refuerzo, donde la utilización de arcillas expandidas y materiales poliméricos los más difundidos.

En Venezuela, la utilización de la arcilla expandida data del año 1969, cuando el grupo Mendoza crea la empresa ALIVEN, única empresa en nuestro país encargada de fabricar agregados livianos y logra aplicaciones en concretos estructurales, bloques de concreto livianos y otros usos mas. Esta empresa desarrolló el Aliven, un agregado liviano de arcilla expandida, que se presenta en forma de pequeñas esferas o pellas livianas, constituidas por una corteza cerámica vitrificada, rígida y resistente, de color pardo, que encierra una estructura alveolar microporosa de color gris, con una gama de granulometría, que presenta una determinada rigidez y resistencia propia, así como una calidad permanente y uniforme, que origina un material cuya vida útil se mide en miles de años (Prato, C. 2010).

A partir de la situación problemática planteada y al considerar la posibilidad de utilizar el referido agregado liviano nacional para la disminuir el peso de los durmientes ferroviarios del tipo biblock de la Compañía Metro de Caracas, C.A., se identifica como **problema de investigación:**

La falta de conocimiento científico sobre la influencia de la sustitución parcial de piedra por Aliven, sobre el peso y la resistencia a la compresión, del hormigón destinado a la fabricación de los durmientes ferroviarios del Metro de Caracas.

En consonancia, el **objeto de estudio** lo constituye:

El hormigón para la fabricación de los durmientes ferroviarios del Metro de Caracas C.A., aligerado con Aliven.

Y como **objetivo** del trabajo se plantea el siguiente:

Evaluar la influencia de la sustitución parcial de piedra por Aliven, sobre el peso y la resistencia a la compresión, del hormigón destinado a la fabricación de los durmientes ferroviarios del Metro de Caracas, C.A.

Para dar cumplimiento al objetivo planteado, se establece la siguiente **hipótesis científica**:

La adición de Aliven como sustituto parcial de la piedra, al material destinado a la fabricación de durmientes ferroviarios de tipo biblock del Metro de Caracas, C.A, garantizará la disminución de su densidad, mientras la resistencia a la compresión se mantendrá en el rango exigido por las normas establecidas para la fabricación de estos elementos.

Para la verificación de la hipótesis postulada y el cumplimiento del objetivo planteado, deben ser ejecutas las siguientes tareas de trabajo:

1. Establecimiento del estado del arte mediante la recopilación y sistematización del conocimiento teórico-práctico sobre el desarrollo de materiales de concreto ligero para durmientes ferroviarios.
2. Diseño del plan de investigación, preparación de muestras, verificación de la calidad y realización de los ensayos de compresión.
3. Obtención de los resultados experimentales y su correspondiente análisis y discusión.

CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En este capítulo se analiza el estado actual de la temática a escala mundial y las particularidades del mismo en la industria de materiales de la República Bolivariana de Venezuela. Se realiza la descripción de los aspectos teóricos más importante concerniente a la temática tratada, es por ello que el **objetivo** del capítulo es:

Caracterizar el estado actual del uso de materiales para durmientes del Metro de Caracas

1.2. Análisis de los trabajos precedentes

La industria de la construcción ha experimentado considerables avances en las últimas décadas en relación con los materiales, especialmente el hormigón armado a partir de la utilización del cemento Potrland. Los materiales compuestos de construcción avanzados están ganando aceptación día tras día, proliferando su desarrollo en una amplia gama que va desde el Concreto de Elevada Resistencia (CER) hasta el Concreto de Alto Desempeño (CAD).

En tal sentido la literatura reporta la existencia de una amplia gama de concretos a partir del cemento portland, como se observa en la Tabla 1.

Tabla # 1. Tipos especiales de concreto fabricados con cemento Portland (Fuente: Kosmatka et al., 2002)

Architectural concrete	Heavyweight concrete	Recycled concrete
Autoclaved cellular concrete	High-early-strength concrete	Roller-compacted concrete
Centrifugally cast concrete	High-performance concrete	Sawdust concrete
Colloidal concrete	High-strength concrete	Self-compacting concrete
Colored concrete	Insulating concrete	Shielding concrete
Controlled-density fill	Latex-modified concrete	Shotcrete
Cyclopean (rubble) concrete	Low-density concrete	Shrinkage-compensating concrete
Dry-packed concrete	Mass concrete	Silica-fume concrete
Epoxy-modified concrete	Moderate-strength lightweight concrete	Soil-cement
Exposed-aggregate concrete	Nailable concrete	Stamped concrete
Ferrocement	No-slump concrete	Structural lightweight concrete
Fiber concrete	Polymer-modified concrete	Superplasticized concrete
Fill concrete	Pervious (porous) concrete	Terrazzo
Flowable fill	Pozzolan concrete	Tremie concrete
Flowing concrete	Precast concrete	Vacuum-treated concrete
Fly-ash concrete	Prepacked concrete	Vermiculite concrete
Gap-graded concrete	Replaced aggregate concrete	White concrete
Geopolymer concrete	Reactive-powder concrete	Zero-slump concrete

Como se observa en la Tabla 1, la terminología utilizada describe las principales características del tipo de concreto y abarca los más disímiles usos, propiedades o condiciones de fabricación, lo que da una medida del impetuoso desarrollo que están teniendo los materiales cerámicos a base de concreto.

Según U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2010), en el año 2009 la producción mundial del cemento portland fue de alrededor de 2 800 millones de toneladas y de esta, aproximadamente el 70 % (cerca de 1960 millones de toneladas) se destinó para la producción de hormigón armado. Estimando una dosificación de cemento entre 250 y 300 kg de cemento por metro cúbico de hormigón, significa que se produjeron de 490 000 a 580 000 millones de metros cúbicos de hormigón. Ningún material de construcción ha sido usado en tales cantidades y en un futuro no parece existir otro material de construcción que pueda competir con el hormigón (concreto) en magnitud de volumen.

Existe una gran cantidad de investigaciones relacionadas con el desarrollo y caracterización de materiales a base de concreto (hormigón). En esta investigación se tuvieron en cuenta algunos de los principales avances en materia de desarrollo y caracterización de nuevos materiales ligeros a base de hormigón, enfatizándose en aquellos donde se sustituye, esencialmente, la piedra por agregados más ligeros como refuerzos de la matriz.

Nagabhushanam et al. (1989), estudiaron las características y el funcionamiento de concretos frescos reforzados con fibras de polipropileno, evaluando la resistencia a la fatiga bajo tensiones de flexión bajo diferentes condiciones. Los resultados de la prueba indicaron un aumento apreciable en la capacidad post-grieta de absorber energía y la ductilidad debido a la adición de las fibras. En comparación con el concreto sin refuerzos, la resistencia a la flexión y el límite de la resistencia para dos millones de ciclos aumentaron perceptiblemente. La resistencia a la flexión estática aumentó después de ser sujeto a fatiga.

Soroushian et al. (1992), realizaron un estudio comparativo de la eficacia del uso de fibras de polipropileno y fibras de poliestireno en las propiedades mecánicas del concreto, concluyéndose que fracciones más bajas en volumen de fibras de polietileno pueden producir mejora en la resistencia a la flexión y resistencia al impacto, comparables con las producidas cuando se usa un porcentaje mayor de fibras de polipropileno.

Al-Khaja, (1995), investigó los efectos del uso de fibras de polipropileno como refuerzo para mezclas de concreto, y así obtener datos sobre la resistencia y la deformación en función del tiempo para un posible uso de estas fibras en la construcción.

Huynh et al., (1996), estudiaron la adición de partículas de neumático de camiones y fibras de polipropileno al concreto, con el fin de comparar el comportamiento de ambas mezclas en ensayos de resistencia a la compresión, flexión y agrietamiento por contracción plástica frente al concreto normal. Los resultados obtenidos mostraron una reducción de la resistencia a la compresión y a la flexión a medida

que se incrementaba el contenido de caucho en el concreto, mientras que en los ensayos de agrietamiento por contracción plástica se observó un detenimiento en la propagación de las fracturas en los ejemplares con contenido de caucho. Igualmente, observaron que las mezclas de concreto con fibras de caucho tienen una maniobrabilidad comparable a la del concreto normal, mientras que en las mezclas con fibras de polipropileno esta es menos efectiva.

Pindado y Aguado (1999), realizaron una serie de pruebas en concretos para asfalto tratado con polímeros, con el fin de aumentar su porosidad y permeabilidad. El concreto poroso se logra con una graduación de tamaño del agregado grueso y poca adición de fino. Debido a su aplicación, el concreto poroso debe cumplir con ciertas características adicionales como son: la parte superior debe ser capaz de absorber y atenuar el ruido además de tener una resistencia mecánica apropiada. Sin embargo cuando la porosidad aumenta la resistencia mecánica disminuye. Por esta razón, experimentaron con polímeros para aumentar la cantidad de poros sin detrimento de perder resistencia mecánica.

Del Río et al. (2005) determinaron la influencia de la adición de fibras de vidrio AR resistentes a los álcalis del cemento, en el análisis de las variables: longitud de la fibra, porcentaje e influencia de la dispersabilidad y la granulometría de la arcilla, sobre el comportamiento mecánico de los morteros de cemento aligerados con arcilla expandida, lográndose disminuir la densidad del concreto en un 50 % en relación con la muestra patrón y mejoras en la resistencia a flexión y a la compresión al añadir fibras de vidrio.

Bastos y Pinheiro (2007), Realizaron una serie de ensayos a durmientes de tipo monoblock de concreto pretensado reforzados con fibras de acero aproximadamente en un 75 % en volumen, con la finalidad de establecer el beneficio de las fibras de acero a la resistencia estructural del durmiente. El durmiente presentó comportamiento y resistencia semejantes a los durmientes de concreto, comúnmente fabricados en varios países. Las fibras aumentaron el momento flector de primera fisura y el momento último, aumentaron significativamente la fuerza de inicio de

estiramiento de los hilos de pretensión y redujeron el inicio de las fisuras, pero no se consiguió disminuir la densidad apreciablemente.

Otros autores (Canning et al., 1999; Alsayed et al., 2000; Kachlakev y McCurry, 2000; Ramana et al., 2000; Arockiasamy et al., 2000; Shahawy et al., 2000; Sherwood y Soudki, 2000; Gong y Shahrooz, 2001 y Shokrieh y Ramat, 2006) investigaron el incremento de la capacidad de carga de durmientes al reforzarlos con láminas de vidrio, resinas epoxídicas o carbón, logrando incrementar la resistencia a la flexión, pero sin reportar la influencia de estos agregados en la disminución del peso de los durmientes.

Como ha quedado establecido, las vías férreas son el elemento esencial de la infraestructura ferroviaria y constan, básicamente, de rieles apoyados sobre durmientes que se disponen dentro de una capa de balasto o concreto (León, 2005). De acuerdo con la Norma ALAF 5-023 para durmientes de hormigón (ALAF, 2003), el durmiente es el componente transversal de la vía que transmite al balasto la carga aplicada a los rieles y junto con la fijación riel-durmiente controla la trocha. Existen durmientes de madera, metal, hormigón y una nueva generación de materiales compuestos.

Los materiales compuestos son aquellos donde se combinan materiales, metálicos, cerámicos y/o poliméricos. Las propiedades que se obtiene de estas combinaciones son características de ellos. Un material compuesto presenta dos elementos principales: matriz y refuerzo. La combinación adecuada de estos componentes origina un material con mejores propiedades que las partes que lo componen por separado. Además del refuerzo y la matriz existen otros tipos de componentes como los adictivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación (Askeland y Phulé, 2004).

El Hormigón es un material compuesto formado por un agregado de partículas unidas entre sí por un cemento, donde la matriz y el refuerzo son de tipo cerámico. Los dos tipos de hormigón más comunes son los constituidos por partículas de piedra y arena unidas mediante cemento portland o un asfáltico. El hormigón

asfáltico se suele utilizar para pavimentos, mientras que el hormigón con cemento portland se usa ampliamente como material para la construcción (Callister, 2004).

Los componentes del hormigón de cemento portland son el Cemento Portland, un agregado fino (arena), un agregado grueso (piedra) y agua. Estos deben ser combinados en las proporciones correctas para conseguir la resistencia óptima. La intención de combinar agregados finos y gruesos es que la arena debe ocupar los espacios vacíos entre partículas de piedra, mientras que la pasta de cemento-agua debe cubrir y garantizar la interface entre las partículas de arena y piedra. La deficiencia de agua se traduce en una unión incompleta y el exceso favorece la porosidad. En ambos casos la resistencia final es menor que la óptima (Callister, 2004).

Las materias primas del cemento portland (Smith 2004) son: caliza (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3), se les adiciona una cierta cantidad de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para controlar el tiempo de fraguado del hormigón, al combinar apropiadamente estos componentes resultan varios tipos de cemento portland como son:

- a. *El Tipo I*, es el cemento usado cuando el hormigón no será expuesto a ataques fuertes de sulfatos procedentes del agua o del suelo, o cuando no se producirá un incremento considerable de temperatura por el calor generado por el proceso de hidratación del cemento. Algunas aplicaciones para este tipo de cemento son: aceras, edificios, puentes y tanques.
- b. *El Tipo II*, es el cemento usado cuando el hormigón será expuesto a ataque moderado por sulfatos como en las estructuras de los desagües donde las concentraciones de este anión en las aguas residuales son mayores de lo normal. El cemento de este tipo cuenta con un moderado calor de hidratación.
- c. *El Tipo III*, es un tipo de cemento que adquiere altos niveles de resistencia en cortos periodos de tiempo. Se usa cuando las piezas de hormigón o las estructuras requieren ponerse en uso rápidamente.

- d. *El tipo IV*, es un cemento de bajo calor de hidratación que se utiliza cuando la velocidad y la cantidad de calor tienen que ser minimizadas, generalmente son utilizados en grandes estructuras como presas, donde el calor generado por el endurecimiento del cemento es un factor crítico.
- e. *El tipo V*, es un cemento muy resistente a los sulfatos que se utiliza cuando el hormigón será expuesto a severos ataques de sulfatos procedentes de suelos y aguas residuales.

Para ciertas aplicaciones, las propiedades como: alta rigidez específica, estabilidad dimensional, tolerancia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, ligereza o mayor resistencia a la fatiga, son propiedades que no poseen algunos materiales convencionales por separado.

La resistencia mecánica del concreto se refiere básicamente a su capacidad de soportar toda clase de esfuerzos; esta capacidad depende de la resistencia individual de los agregados y la pasta de cemento hidratado, así como de la integración que se genera entre estos componentes (Arioz et al. 2008).

El concreto resiste tanto sollicitaciones a compresión como a tracción y flexión, pero la resistencia a compresión es la que determina el uso este material en la construcción de durmientes ferroviarios. Por este motivo, y sin quitar importancia al resto de los ensayos a realizar, se considera que éste es el ensayo, del que se obtendrá la información más relevante, siendo también el factor que se emplea frecuentemente para definir la calidad del concreto (Rodríguez et al. 2003).

La utilización de agregados livianos data desde la época de los romanos, incluso, la cúpula del Panteón de Roma construido en el siglo II tiene en su composición agregado a partir de Piedra Pómez como árido, sin embargo, no fue sino hasta comienzos del siglo pasado hacia el año de 1917, cuando se desarrollaron en América, procesos industriales para masificar la fabricación de agregados livianos y su utilización en concretos estructurales (Prato, 2010).

1.3. Características del Alivén

El Aliven es una arcilla expandida utilizada como agregado liviano, que se presenta en forma de pequeñas esferas o pellas livianas, constituidas por una corteza cerámica vitrificada, rígida y resistente de color pardo, que encierra una estructura alveolar microporosa de color gris. La utilización de Aliven en Venezuela data del año 1969 cuando el grupo Mendoza crea la empresa ALIVEN, encargada de fabricar agregados livianos y aplicaciones en concretos estructurales, bloques de concreto livianos y otros usos mas. Se suministra en varios tipos de granulometrías (ver Tabla # 2) que presentan una determinada rigidez y resistencia propia, así como una calidad permanente y uniforme, proporcionando un material cuya vida útil se mide en miles de años.

Tabla # 2. Productos de Aliven producidos por ALIVEN AGREGADOS LIVIANOS C.A., Venezuela (Fuente: Arnal, 1985)

Producto	Granulometría (mm)	Densidad (kg/m³)	Aplicaciones
Aliven molido	0-3	700±50	Frisos cortafuegos y elementos prefabricados
Aliven arena	0-4	600±50	Concretos superlivianos, morteros refractarios, unidades de mampostería y cultivos intensivos (hidroponía)
Aliven fino Estructural	5-10	450±50	Bloques livianos aislantes y concreto liviano estructural
Aliven medio	10-15	350±50	Sobrepisos, sobretechos, concreto liviano de relleno y/o aislante.
Aliven grueso	15-25	300±50	Aplicaciones geotécnicas, aislamiento de techos, concreto de relleno, rellenos livianos, jardinería y cultivos intensivos (horticultura), Camada para asiento losa de fundación.

Obras de envergadura como las Pantallas del Teatro Teresa Carreño, entrepisos de las Torres del Parque Central y diferentes edificios de altura media, entre otros, han sido fabricadas utilizando Aliven como relleno (Prato, 2010). Los productos de Aliven se utilizan sueltos, mezclados y/o rociados con cemento y como agregado para la elaboración de concreto liviano, aplicándose tanto como sustituto de la base granular o piedra picada previa a la losa de fundación, como para elaboración de concretos de alta, media y baja resistencia, fabricación de elementos de mampostería, prefabricados y otros (Arnal y Epelboim, 1985).

Las características generales de los agregados livianos de Aliven se pueden consultar en las normas ASTM C 330-00 "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete" y COVENIN 1753:06 "Estructuras de concreto".

Prato (2010) ofrece una panorámica sobre las características del agregado Aliven entre la que se puede resumir lo siguiente:

El concreto liviano estructural es aquel que tiene una densidad por debajo de 1.850 kg/m^3 (al menos 30 % más liviano que los concretos convencionales), con una resistencia a la compresión (R_c) superior a los 180 kgf/cm^2 . El concreto liviano aliven es aquel que se elabora a partir de una mezcla de aliven, cemento, arena natural y agua. Debido que esta arcilla expandida tiene baja densidad y alta resistencia superficial, al ser utilizada como agregado en el concreto, tiene como consecuencia una considerable disminución en el peso propio del concreto y por consiguiente ahorros en los proyectos estructurales. El concreto liviano estructural puede utilizarse para fabricar cualquier elemento de concreto pretensado o postensado, tanto hecho en sitio como prefabricado, y en general para cualquier estructura que pueda realizarse con los concretos convencionales. El concreto liviano estructural está recomendado especialmente en los casos en que el peso propio de la estructura (carga muerta) supere la carga.

Aliven es un material indicado en la elaboración de unidades de mampostería y paneles prefabricados (estructurales y/o arquitectónicos) debido a su bajo peso, sus propiedades aislantes y su resistencia. Los prefabricados a base de esta arcilla

expandida están especialmente diseñados para conseguir el máximo aislamiento acústico y térmico, sin sobrecargar excesivamente la estructura, permitiendo una rápida puesta en obra y manteniendo una buena adherencia al mortero o acabado. Los elementos prefabricados se elaboran a partir de concreto liviano vibrocompactado el cual, a través de un proceso industrial, es introducido en un molde que le da forma y tamaño específico.

Algunos autores han investigado las propiedades y características de hormigones reforzados con Aliven. Arce (1997) hace una caracterización de los hormigones armados, estableciendo los fundamentos del refuerzo de los mismos utilizando materiales convencionales y materiales avanzados, como los agregados ligeros, sin llegar a profundizar en sus propiedades mecánicas. Alduaij et al. (1999) realizan un estudio sobre el comportamiento de concretos ligeros pero en áreas costeras, remitiéndose al comportamiento de los mismos como materiales de retención.

Por su parte, Chen et al. (1999) estudiaron la resistencia a la separación de agregados ligeros y su relación con la resistencia del concreto, sin especificar el rango ni posibilidades de utilización de los mismos. Rossignolo et al. (2003), estudiaron las propiedades de concretos de elevado desempeño, pero reforzados con materiales ligeros brasileños.

Pioro et al. (2004) describen la producción de agregados de arcillas expandibles a partir de las arcillas no auto expandibles, pero no las relacionan con las propiedades de un concreto en específico. Otros autores como De'Gennaro et al. (2005), Moravia et al. (2006) y Arioiz et al. (2008) se limitan a caracterizar agregados ligeros y sus posibles aplicaciones como materiales de refuerzo, sin llegar a caracterizar el concreto como tal.

1.4. Conclusiones del capítulo 1

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se puede concluir lo siguiente:

1. La información constatada sobre la mejora de las propiedades mecánicas de los durmientes, se refiere a penas a los de tipo monoblock;
2. No fue posible encontrar alguna información relacionada con la disminución del peso de ningún tipo de durmientes.
3. La literatura consultada reporta abundante información relacionada con el desarrollo y utilización de materiales de concreto ligero reforzados con fibras de vidrio, carbón y materiales poliméricos. Otros autores se remiten a publicar las características de otros refuerzos como el Aliven, pero sin llegar a establecer el comportamiento de concretos ligeros reforzados con Aliven ante cargas de compresión.
4. No se reportan trabajos relacionados con el uso del Aliven como material de refuerzo en la obtención de concretos ligeros con fines ferroviarios.

CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Como se planteó en el capítulo anterior, los durmientes ferroviarios, aparte de garantizar una adecuada alineación de los rieles, tienen la función primordial de soportar y transmitir la carga del tren desde los rieles hasta el suelo o cimiento. En el caso de los durmientes objetos de estudio, que son del tipo biblock, poseen una longitud que se considera relativamente pequeña. Es por ello que se desestima la aparición de cargas de flexión y se enfatiza en la resistencia a la compresión, por ser este tipo de sollicitación la predominante en el presente caso.

Por este motivo, sin restar importancia al resto de las propiedades que se pueden investigar, se considera que el ensayo de compresión proporciona la información suficiente para caracterizar el objeto investigado.

En el presente capítulo se exponen los fundamentos, métodos experimentales, materiales y equipamiento para la caracterización del concreto reforzado con piedra y Aliven añadido, en presencia de cargas de compresión.

2.2. Diseño de las mezclas

El problema que plantea la necesidad de disminuir el peso de los durmientes ferroviarios del Metro de Caracas, a la vez que se garantiza la resistencia mecánica exigida por las condiciones de diseño y explotación a partir de la hipótesis propuesta, se puede resolver mediante la sustitución de cantidades de piedra (agregado pesado) por Aliven (arcilla expandida o agregado ligero) en el volumen a analizar, lo que permitirá crear las bases para el desarrollo de un nuevo material compuesto de menor densidad, con la suficiente resistencia mecánica según las condiciones de diseño establecidas para los durmientes ferroviarios de tipo biblock del Metro de Caracas, C.A.

La parte experimental incluyó el diseño de las mezclas de concreto, la elaboración de las muestras a ensayar, la verificación del peso y el desarrollo de los ensayos de compresión.

Para obtener cuatro puntos experimentales, fue preparado el mismo número de muestras, con los siguientes porcentajes de piedra sustituida por Aliven: 0, 25, 50 y 75 %. En este diseño experimental fue planeada, la sustitución de piedra por Aliven en cantidades que alcanzan el 75 %, debido al elevado peso de los durmientes (200 kgf) y a la necesidad de reducirlo en la mayor medida posible.

Las muestras a ensayar se eligieron de acuerdo con la norma Venezolana COVENIN 338:2002 "Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto". Esta norma establece la selección de probetas cilíndricas con dimensiones $d \times h = 150 \times 300$ mm, como se muestra en la Figura # 1.

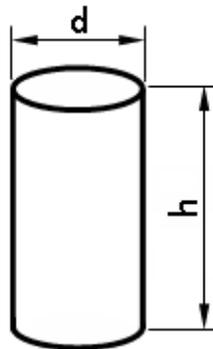


Figura No. 1. Dimensiones de las muestras a ensayar (según COVENIN 338:2002)

Según lo establecido por la Compañía Anónima Metro de Caracas, las masas necesarias de cemento, piedra, arena y agua para obtener 1 m^3 de hormigón se muestran en la Tabla 3.

Donde:

M_{Cem} 1m³, M_{Piedra} 1m³, M_{Arena} 1m³, M_{Agua} 1m³ = Masa del cemento (kg), masa de la piedra (kg), masa de la arena (kg) y masa del agua (L) establecidas para 1 m³ de hormigón (Tabla # 3)

$$V_{Hormigón} = 1 \text{ m}^3$$

Los valores calculados de las masas de cemento, piedra, arena y agua según las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se muestran en la Tabla # 4.

Tabla # 4. Cantidad de materiales requeridos para una probeta patrón de hormigón

MATERIAL	UNIDAD	MASA REQUERIDA PARA 0,0053014 m ³ DE HORMIGÓN
Cemento	kg	2,22
Piedra	kg	5,83
Arena	kg	4,45
Agua	L	0,7
Total	kg	12,51

Como se planteó anteriormente, la disminución del peso de los durmientes a la vez que se garantiza la resistencia mecánica exigida por las condiciones de diseño y explotación, se puede solucionar mediante la sustitución de cantidades de piedra (agregado pesado) por Aliven (arcilla expandida o agregado ligero) en el volumen a analizar, por lo que se deben mantener como parámetros fijos las cantidades de cemento, arena y agua y se añadirá solamente cantidades de Aliven como sustituto de las respectivas cantidades de piedra. El balance final debe estar en correspondencia con el volumen de la probeta (V_{Prob}).

Para ello, se calculan los volúmenes equivalentes de cemento (V_{Cem}), piedra (V_{Piedra}) y arena (V_{Arena}), según las expresiones (5), (6) y (7):

2.3. Obtención de las muestras

Una vez diseñadas cada una de las mezclas, se procedió a la obtención de las muestras.

Se utilizaron Moldes para muestras cilíndricas según la Fig. # 1, se parables en dos partes y fabricados de fundición de hierro con superficies planas en el interior de las caras ajustados a las tolerancias siguientes:

Parámetros	Valores
Superficie de los lados	< 0,025 mm
Distancia entre lados opuestos	150 ± 0,13 mm
Altura de los compartimientos	300 $\begin{matrix} +0,25 \text{ mm} \\ -0,13 \text{ mm} \end{matrix}$
Angulo entre caras adyacentes	90 ± 0,5°

Se utilizó un mezclador mecánico acoplado a un motor de corriente alterna de 110 V y 2 Kw, equipado con paleta y un tazón para el mezclado de los materiales de la muestra. La paleta consistió en una hoja de acero de aproximadamente 100 mm de longitud con filos rectos. Se utilizó un apisonador de goma no absorbente ni abrasiva con una sección transversal de aproximadamente (13 x 25) mm y una longitud de 120 mm.

Se elaboraron tres réplicas de cada muestra de acuerdo con la Tabla # 7, utilizando cemento portland tipo III, piedra picada de 25,4 mm (1pulg) (agregado grueso), arena lavada (agregado fino), como refuerzo o carga arcilla expandida (Aliven), con granulometría 20 ± 5 mm y agua potable con pH = 6 procedente de la red local de suministro para uso doméstico y no se le apreció olor, color ni sabor. El desencofrado se realizó aproximadamente a las 24 horas, extremando las medidas de sujeción, agarre y desmontaje de los dispositivos para evitar que el material fundido se sometiera a la acción de golpes, sacudidas u otro tipo de esfuerzo que pudieran provocar agrietamiento.

El vaciado de las mezclas de concreto se realizó sobre una plataforma vibratoria para garantizar un correcto llenado del molde y la adecuada compactación de la mezcla. Estas operaciones proporcionan la necesaria homogeneidad en el material y minimizan la presencia de poros y discontinuidades.

A las muestras se les aplicó el secado natural y se sometieron a ensayos de compresión a edad temprana (7 días) según lo establecido por la Norma 338:2002 “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”.

2.4. Realización de los ensayos

Después de desencofrados los especímenes, se les realizó la correspondiente clasificación para facilitar la posterior identificación durante la realización de los ensayos.

Las muestras se identificaron adecuadamente y antes de ensayar, se sometieron control de la calidad e inspección visual. Se verificó, además, el peso de las mismas en una balanza de laboratorio analógica de la serie OHAUS, capacidad 22 kg y una resolución de 0,1 g. Posteriormente se procedió a la realización de los ensayos por partida de muestras.

La resistencia a la compresión se determinó siguiendo las recomendaciones de la Norma Venezolana COVENIN 338:2002 “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto” en una instalación de ensayos de compresión de materiales cerámicos del tipo CONTROLS C46N3 con capacidad de 2000 kN, area del pistón 314,159 cm².

2.5. Procesamiento de los datos y análisis estadístico de los resultados

El análisis y procesamiento de los datos se realizó aplicando la siguiente metodología:

1. Determinación de la Desviación Standard
2. Determinación del Error Absoluto

2.5.5. Selección de la línea de tendencia obtención de la ecuación de regresión y su correspondiente coeficiente de correlación

Una vez ploteados los datos, se seleccionó la línea de tendencia, se seleccionó la ecuación de regresión y su correspondiente coeficiente de correlación. Para ello, se asumió que las n observaciones son independientes y normalmente distribuidas con medias μ_1 , μ_2 , μ_3 , μ_4 , y varianza común S^2 a través de la siguiente hipótesis estadística:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : Al menos una de las medias no son iguales

Con este supuesto, se analizará si hay o no diferencia significativa entre las medias de los experimentos a través de la comparación de sus respectivos errores relativos.

2.6. Conclusiones del capítulo 2

Ha sido realizado el diseño experimental que debe garantizar la obtención de los resultados experimentales con la calidad requerida.

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

En el presente capítulo se entrelazan los datos y resultados obtenidos en la investigación con la información de la base teórica y los antecedentes, de modo que a partir de la interpretación y análisis de los mismos, se puedan explicar los resultados obtenidos y a la vez verificar el cumplimiento del objetivo y la hipótesis científica planteada. Así mismo, se obtienen los elementos necesarios para plantear las conclusiones del trabajo y sugerir las recomendaciones pertinentes.

3.2. Resultados de los ensayos

3.2.1. Verificación de la masa

Los valores de masa determinados para cada una de las muestras, con sus respectivos porcentajes de disminución, se presentan en la Tabla # 8.

Tabla # 8. Resultados experimentales de las masas de las probetas (kg)

Probeta	Factor de sustitución	Nº de réplicas	Masa (kg)	Promedio (kg)	Porcentaje de disminución
Patrón	0%	1	12,7	12,5	0
		2	12,6		
		3	12,3		
1	25%	1	11,2	11,3	9,6
		2	11,3		
		3	11,2		
2	50%	1	9,3	9,4	24,8
		2	9,5		
		3	9,4		
3	75%	1	8,7	8,7	30,4
		2	8,7		
		3	8,7		

En la Tabla # 9, se presentan los resultados del análisis de errores de los datos de la tabla # 8. Como se observa, los errores relativos no superan el valor límite

establecido de 3 %, lo que demuestra que las mediciones han sido realizadas con suficiente precisión, permite continuar el análisis de los resultados y establecer una dependencia funcional entre las variables.

Tabla # 9. Resultados experimentales para la verificación de la masa (kg)

Probeta	Factor de sustitución	Desviación Standard (kg)	Error Absoluto (kg)	Error Relativo
Patrón	0%	0,2	0,2	1,9
1	25%	0,1	0,08	0,7
2	50%	0,1	0,1	1,3
3	75%	0,02	0,02	0,3

Ahora se puede afirmar que en la Tabla # 8 se observa una disminución del peso del concreto a medida que se sustituye la piedra por el Aliven. El peso mínimo del concreto se verifica cuando se sustituye el 75 % de piedra por Aliven, lo que equivale a la disminución del peso del concreto en un 30 %, aproximadamente.

3.2.1.1. Análisis de tendencia

La Figura # 3 refleja la dependencia de la masa del concreto con la cantidad de piedra sustituida por Aliven.

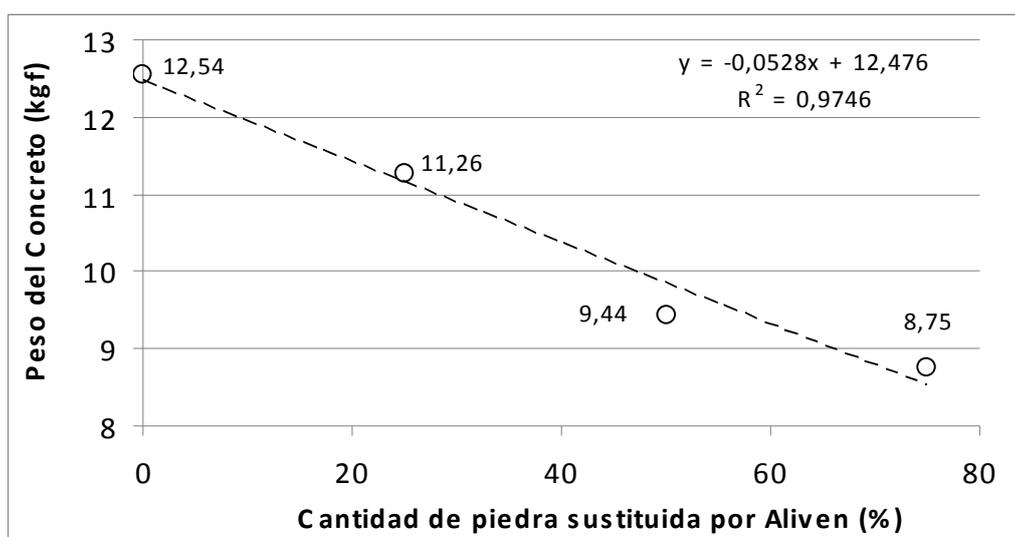


Figura # 3. Dependencia de masa del concreto con la cantidad de piedra sustituida por Aliven

La disminución del peso del concreto con el incremento de la cantidad de piedra sustituida por Aliven tiene una dependencia lineal, según los resultados de los análisis de los mínimos cuadrados de la curva ajustada representados en la ecuación (15) con su correspondiente coeficiente de determinación

$$y = -0,0528x + 12,476 \quad (r^2 = 0,9746) \quad (15)$$

Los resultados de los correspondientes análisis estadísticos de la Figura # 3 se muestran en la Tabla # 9.

De esta manera, se puede concluir que las varianzas de la variable $y =$ Peso del concreto, se debe única y exclusivamente a las variaciones de la variable $x =$ Cantidad de piedra sustituida por Aliven, lo que valida la dependencia funcional entre ellas establecida en la Figura # 3 y representada matemáticamente por la ecuación (15).

Haciendo una interpretación matemática del valor del coeficiente de determinación del modelo de la ecuación (15), se puede plantear que la cantidad de piedra sustituida por Aliven determina el 97, 46 % del peso del concreto. Este valor elevado significa que el modelo estimado es fiable para hacer predicciones.

3.2.2. Ensayos de compresión

La inspección visual y control de la calidad de las muestras arrojó la no presencia de rajaduras o grietas en todo el volumen, por lo que las muestras desencofradas se consideraron aptas para los ensayos de compresión. Los ensayos de compresión se realizaron de acuerdo con el plan experimental trazado, y sus resultados se presentan en la Tabla # 10.

En la Tabla # 11, se presentan los resultados del análisis de errores de los datos de la Tabla # 10. Al igual que en el caso de la dependencia de la masa de concreto con

el incremento de la cantidad de piedra sustituida por Aliven, los errores relativos de la Tabla # 11 no superan el valor límite establecido de 3 %, lo que demuestra que las mediciones han sido realizadas con suficiente precisión y permite continuar el análisis de los resultados para establecer una dependencia funcional entre las variables.

Tabla # 10. Resultados experimentales para resistencia a la compresión (MPa)

Probeta	Factor de sustitución	Nº de réplicas	Resistencia a la compresión (MPa)	Promedio (MPa)
Patrón	0%	1	42,7	42,1
		2	42,3	
		3	41,4	
1	25%	1	37,4	38,4
		2	39,3	
		3	38,4	
2	50%	1	36,9	36,7
		2	36,5	
		3	36,8	
3	75%	1	35,4	35,6
		2	36,3	
		3	35,1	

Tabla # 11. Resultados experimentales para la verificación de resistencia a la compresión (MPa)

Probeta	Factor de sustitución	Desviación Standard (MPa)	Error Absoluto (MPa)	Error Relativo
Patrón	0%	0,7	0,6	1,8
1	25%	0,9	1,1	2,8
2	50%	0,2	0,2	0,6
3	75%	0,06	0,7	2

De la interpretación de los datos de la Tabla # 10 se desprende que la resistencia a la compresión disminuyó con el aumento de la masa de piedra sustituida por Aliven,

verificándose valores de resistencia a la compresión entre 35 y 39 MPa. Estos valores concuerdan con lo especificado por la normas ALAF 5-023 (Diciembre 03) y el Contrato N° MC 3220, las que establecen valores de resistencia a la compresión a edad temprana válidos en los rangos de 35-45 MPa.

Además, se debe destacar una disminución significativa del peso de la probeta patrón en aproximadamente un 30 %, valor efectivo para el 75 % de piedra sustituida por Aliven.

El hecho de que la resistencia a la compresión de las muestras donde se sustituyó masas de piedra por Aliven esté comprendida dentro de los rangos establecidos por ambas normas, permite dar cumplimiento parcial al objetivo propuesto y verificar parcialmente la hipótesis científica planteada.

3.2.2.1. Análisis estadístico del ensayo de compresión

La Figura # 3 refleja la dependencia de la resistencia a la compresión del concreto con la cantidad de piedra sustituida por Aliven.

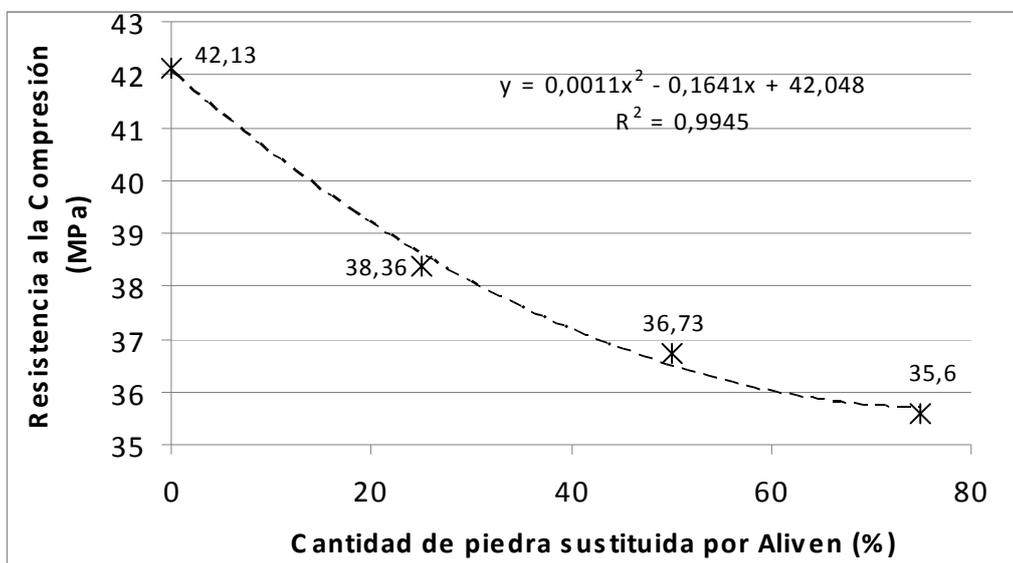


Figura # 4. Dependencia de la resistencia a la compresión del concreto con la cantidad de piedra sustituida por Aliven

3.3. Valoración Social

El desarrollo del material compuesto de menor peso para la fabricación de durmientes ferroviarios a partir de la sustitución de la piedra por aliven, representa una disminución aproximada del 30 %, por lo cual estaría pesando aproximadamente 140 kgf, garantizando la resistencia mecánica por las condiciones de diseño establecidas para los durmientes ferroviarios de tipo biblock del Metro de Caracas. La disminución significativa del peso del durmiente que antes de esta disminución, originaba riesgos de desgaste físico, accidentes y enfermedades lumbares en los operarios, por lo que se requería de una cantidad no económica de personal para las intervenciones que, en ocasiones, obstaculizan las labores de instalación y mantenimiento de las vías y generan costos considerables de mantenimiento por concepto de salario, lo cual se considera conveniente verificar en la práctica, el efecto que podría generar en las personas destinadas para las labores de instalación y mantenimiento, la disminución del peso del durmiente en las proporciones propuestas.

3.4. Conclusiones del capítulo 3

1. El análisis estadístico de los errores de experimentación, muestra que los errores relativos no superan el valor límite establecido de 3 %, lo que valida la confiabilidad del método experimental.
2. La sustitución de un 75 % de piedra por aliven en el concreto, permite disminuir el peso de la muestra en un 30 % aproximadamente, mientras que la resistencia a la compresión es igual 35,6 MPa, valor que supera el mínimo establecido, que es igual a 35 MPa.

CONCLUSIONES GENERALES

- El análisis estadístico de los errores de experimentación, muestra que los errores relativos no superan el valor límite establecido de 3 %, lo que valida la confiabilidad del método experimental.
- Ha sido confirmado científicamente que la adición de Aliven como sustituto parcial de la piedra, al material destinado a la fabricación de durmientes ferroviarios de tipo biblock del Metro de Caracas, C.A, garantiza la disminución de su densidad, mientras la resistencia a la compresión se mantiene en el rango exigido por las normas establecidas para la fabricación de estos elementos. En este sentido, la sustitución de un 75 % de piedra por aliven en el concreto, permite disminuir el peso de la muestra en un 30 % aproximadamente, mientras que la resistencia a la compresión es igual 35,6 MPa, valor que supera el mínimo establecido, que es igual a 35 MPa.

RECOMENDACIONES

1. Continuar profundizando en la posibilidad de disminuir el peso del material y mejorar la resistencia mecánica.
2. Se recomienda para investigaciones futuras el uso de materiales poliméricos de desecho, como los PET y el ripio de caucho, o en su defecto el polipropileno en fibras, para de esta manera mejorar la resistencia a la compresión del material.
3. Realizar los ensayos de compresión a edades correspondientes a los 28 días.
4. Realizar un análisis estadístico más profundo para el diseño de experimentos, para de esta manera lograr un mejor aprovechamiento de la materia prima y obtener valores de desviación Standard y errores relativos más ajustados.
5. Verificar en la práctica, el efecto que podría generar en las personas destinadas para las labores de instalación y mantenimiento, la disminución del peso del durmiente en las proporciones propuestas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAF 5-023 Grupo: B. Diciembre 2003. Norma para durmiente de hormigón. Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles. Comisión de Normalización.
- Alduaij J, Alshaleh Kh, Haque M, Ellaithy Kh. Lightweight concrete in hot coastal areas. *Cement Concrete Compos* 1999;21:453–8.
- Al-Khaja, W.A., (1995). Mechanical properties and time-dependent deformations of polypropylene fiber concrete. Dep. Physical Engineering Sci., Arabian Gula Univ., Saudi Arabia. *Journal of King Saud University, Engineering Science*.
- Alsayed, S.H., Y.A. Al-Salloum y T.H. Almusallam (2000): Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures. *Composites Part B, Vol. 31. pp: 555–567*.
- Arce, X. P.: *Hormigones livianos* (1997): Tesis de grado. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior del Litoral, 1997. Pág. 1-3, 5-7, 10-13.
- Arioz, O., K. Kilinci, B. Karasu, G. Kaya, G. Arslan, M. Tuncan, A. Tuncan, M. Korkut y S. Kivrak (2008): A Preliminary Research on The Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate . *Journal Aust. Ceram. Soc.*, No. 44 Vol. pp: 23-30.
- Arnal, H. y S. Epelboim (1985): *Manual para el Proyecto de Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones*. MINDUR, Fundación “Juan José Aguerrevere”, Fondo Editorial Colegio de Ingenieros de Venezuela, Caracas.
- Arockiasamy M, S. Chidambaram, A. Amer y M. Shahawy (2000): Time-dependent deformations of concrete beams reinforced with CFRP bars. *Composites Part B. Vol. 31. pp: 577–592*.
- Askeland, D. y Phulé, P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Thomson

- Bastos, P. & Pinheiro M., (2007). Dormentes de concreto protendido Reforçados com fibras de aço. [Documento en línea]. Disponible: www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee36_117.pdf [Consulta: 2008, Mayo 25]
- Callister, W., (2004). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Barcelona. Editorial Reverté, S.A.
- Canning L, L. Hollaway y A.M. Thorne (1999). An investigation of the composite action of an FRP/concrete prismatic beam. Construct Buildg Mater. Vol. 13. pp: 417–426.
- Chen HJ, Yen T, Lia TP, Huang YL. Determination of the dividing strength and its relation to the concrete strength in lightweight aggregate concrete. Cement Concrete Compos 1999;21:29–37.
- Contrato N° MC 3220. Documento LL. VIAS FERREAS. ESPECIFICACIONES TECNICAS. C.A. METRO DE CARACAS, LINEA 3 SEGUNDA ETAPA, TRAMO EL VALLE – LA RINCONADA.
- De’Gennaro, R., Cappelletti, P., Cerri, G., de’Gennaro, M., Dondi, M. and Langella, A. (2005): Neapolitan Yellow Tuff as Raw Material for Lightweight Aggregates in Lightweight Structural Concrete Production. Applied Clay, Science, Vol. 28, pp: 309-319.
- Del Río, M., J. Santa Cruz, y M. González (2005): Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría y la adición de Fibras de vidrio AR en el comportamiento Mecánico. Informes de la Construcción, Vol. 57, No. 497, mayo-junio 2005.
- Gong, B. y B.M. Shahrooz (2001): Steel-concrete composite coupling beams-behavior and design. Eng Struct. Vol. 23. pp:1480–1490.
- Hollaway, L. (1993): Polymer composites for civil and structural engineering. Editorial Chapman & Hall. Londres.

- Huynh, H., Raghavan, D., and Ferraris, C. (1996). Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials. [Documento en línea]. Disponible: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build96/art129.html> [Consulta: 2008, Mayo 25]
- Kachlakev, D. y D.D. McCurry (2000):. Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates. *Composites Part B*, Vol. 31. pp: 445–452.
- Kessler, M.R y S. R. White (2002): Cure kinetics of ring-opening metathesis polymerization of dicyclopentadiene. *J Polym Sci, Part A*, Vol. 40: pp: 2373–2383.
- Kessler, M.R.; N.R. Sottos y S.R. White (2003): Self-healing structural composite materials. *Composites: Part A*. Vol. 34. pp: 743–753
- Kosmatka, S., B. Kerkhoff y W. Panarese (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th Ed. Editorial Portland Cement Association. Chicago.
- León, G. (2005). Vías férreas. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/26/1.htm> [Consulta: 2008, Mayo 25].
- Metro de Caracas, (2010). Reseña histórica del metro de caracas. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.metrodecaracas.com.ve/institucion/rese.htm>. [Consulta: 2010, Abril 15].
- Moravia, W. A. S. Oliveira, A. G. Gumieri, W. L. Vasconcelos (2006): Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve, *Cerâmica* Vol. 52, pp: 193-199
- Nagabhushanam, M, Ramkrishnan, V., and Vondran, G., (1989). Fatigue strength of fibrillated polypropylene fiber reinforced concretes. *Transportation Research Record*.

- Nemes, R. (2006): Lightweight Concrete Made with Expanded Glass Aggregate. PhD. Thesis in Civil engineering. Budapest University of Technology and Economics.
- Norma ASTM C 330-00: Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.
- Norma COVENIN 338:2002: Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto.
- Norma COVENIN 1753:06: Estructuras de concreto.
- Pindado, M y A. Aguado (1999). Fatigue behavior of polymer of modified porous concretes. Cement and concrete research, vol. 29.
- Piolo, L.S. y I.L. Piolo (2004): Production of expanded-clay aggregate for lightweight concrete from non-selfbloating clays. Journal of Cement & Concrete Composites. pp: 639-643.
- Prato, C (2010): Utilización del agregado liviano en sistemas de entrepisos mixtos y losa liviana. Informe Técnico. ALIVEN Agregados Livianos C.A., Venezuela.
- Ramana, V.P.V, T. Kant, S.E. Morton, .PK. Dutta, A. Mukherjee y Y.M. Desai (2000): Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening. Composites Part B, Vol. 31. pp:461–470.
- Rodríguez R, (2003). Modelación de materiales compuestos y sus aplicaciones. [Revista en línea]. Disponible: http://www.dict.uh.cu/Revistas/CM2002_2003/CM03211f.doc [Consulta: 2008, Mayo 25]
- Rossignolo, J. A., Agnesini, M. V. C. and Morais, J. A. (2003): Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates, Cement and Concrete Composites. pp: 77-82.

- Shahawy M, A. Mirmiran y T. Beitelman (2000): Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns. *Composites Part B*, Vol. 31. pp: 471–480.
- Sherwood EG y K.A. Soudki (2000): Rehabilitation of corrosion damaged concrete beams with CFRP laminates—a pilot study. *Composites Part B*, Vol. 31. pp: 453–459.
- Shokrieh, M. y M. Ramat (2006): On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials. *Composite Structures*, Vol. 76. pp: 326–337.
- Smith, W. (2004). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. (3era ed). Colombia. Editorial McGraw-Hill
- Soroushian, P., Khan, A., and Hsu, J., (1992). Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers. Civ. Eng. Dep., Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA. *ACI Materials Journal*.
- U.S. Geological Survey, *Mineral commodity summaries* (2010): U.S. Geological Survey, 193 p.