

UNIVERSIDAD DE CUENCA

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIONES SEGUNDA EDICIÓN

CONCRETO CELULAR PARA USO ESTRUCTURAL

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGISTER EN CONSTRUCCIONES (MSc)

AUTOR: ING. GERARDO VICENTE ARBITO CONTRERAS

DIRECTOR: ING. ANGEL JULVER PINO VELÁZQUEZ. Msc.

Cuenca, octubre de 2016

RESUMEN

El hormigón celular es un hormigón liviano por su baja densidad, utilizado como material de construcción en elementos no estructurales. Alrededor del mundo se construyen soluciones habitacionales con este material, en el Ecuador su uso es limitado y en la ciudad de Cuenca poco conocido; en el país existen alrededor de 3.8 millones de hogares que habitan en viviendas inadecuadas, bien este material puede ser una alternativa de construcción como parte de la solución habitacional.

Se analizaron tres tipos de áridos de minas cercanas a la ciudad de Cuenca y se estudiaron dos tipos de agentes espumantes.

La presente investigación busca obtener resultados experimentales a través de ensayos de laboratorio, para que los resultados sean confiables se aplicó la metodología de la investigación (Inferencia Estadística), que a partir del diseño experimental se midió el grado de confiabilidad de los experimentos.

Al no dispones de normas específicas para la elaboración de hormigones celulares se realizaron ensayos con diferentes materiales provenientes de la localidad, que conforman parte de la mezcla: agregados, cementante, espumantes para varias relaciones de a/c y espuma, usando como referencia las normas INEN, ASTM y ACI.

En el proceso de ensayos se analizó la materia prima y se empleó las que dieron mejores resultados obtuvieron del análisis físico-mecánico de áridos y agente espumante.

En el proceso de elaboración del hormigón celular se realizó con 16 mezclas, obteniendo resultados de densidades y resistencias que varían de 1.73 a 1.96 gr/cm³ y de 13.05 a 253 kg/cm², respectivamente.

Finalmente, en función de los resultados obtenidos se realizó un análisis del comportamiento y se presenta conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: INEN, ASTM, ACI, agregados, árido, agente espumante, hormigón celular, densidad, resistencia.

ABSTRACT

Aerated concrete is a lightweight concrete due to its low density, this concrete is used as a construction material in nonstructural elements. Housing solutions are built around the world with this material. In Ecuador the use of this concrete is limited and in the city of Cuenca is little known; in the country there are about 3.8 million households living in inadequate conditions, although this material may be an alternative to construct houses as part of the housing solution.

Three types of aggregates were analyzed, these aggregates came from three different mines near the city of Cuenca and two types of foaming agents were studied.

This research was intended to obtain experimental results through laboratory tests, so that the results are reliable methodology of research (Statistical Inference), which from experimental design and experimental planning were able to confirm the reliability of the applied experiments.

In the absence of specific rules for the development of aerated concrete, tests with different materials from the area that are part of the mixture were made: aggregates, cement, foaming agents for various ratios of a/c, using as reference the INEN standards, ASTM and ACI.

In the process of testing the raw material was analyzed and the one with the best results were used in the experimental process. These results were obtained from analysis of physic-mechanical aggregates and foaming agent. In the process of making aerated concrete experiments were performed with 16 mixes to obtain results densities and resistances ranging from 1.73 to 1.96 g / cm³ and 1305 to 253 kg / cm² respectively.

Finally, with the obtained results a behavioral analysis was made to obtain the conclusions and recommendations.

Keywords: HC, INEN, ASTM, ACI, aggregate, foaming agent, foam concrete, density, resistance.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	8
CERTIFICACIÓN	9
AGRADECIMIENTO	10
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CONTENIDO	4
PRESENTACIÓN.....	11
CAPÍTULO I	13
1. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. HIPÓTESIS	14
1.3. HISTORIA Y ANTECEDENTES	14
1.4. ANTECEDENTES.....	16
1.5. JUSTIFICACIÓN	17
1.6. OBJETIVOS	18
1.6.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.6.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	18
1.7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.8. LIMITACIONES Y ALCANCE	19
CAPITULO II	20
2. MARCO TEÓRICO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES 20	20
2.1. HORMIGÓN CELULAR.....	20
2.1.1. DENSIDAD Y RESISTENCIA.....	21
2.2. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DEL HORMGÓN CELULAR	22
2.2.1. HORMIGÓN CELULAR CON INCLUSIÓN DE BURBUJAS ..	22
2.2.2. HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDOS LIVIANOS	24



2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y APLICACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR	24
2.3.1. VENTAJAS	24
2.3.2. DESVENTAJAS	25
2.3.3. APLICACIONES EN FUNCION DE LA DENSIDAD	25
2.4. ADITIVOS Y AGENTE ESPUMANTE	26
2.4.1. AGENTE ESPUMANTE EN EL HORMIGÓN	27
2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	27
2.5.1. ÁRIDO FINO	27
2.5.2. CEMENTO	32
2.5.4. GENERACION DE ESPUMA	34
CAPÍTULO III	36
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	36
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	36
3.2. MÉTODO EXPERIMENTAL	37
3.3. PLANEACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	37
3.4. EXPERIMENTO UNI-FACTORIAL	38
3.5. PRUEBAS PILOTO	40
3.6. TAMAÑO DE LA MUESTRA	44
CAPÍTULO IV	46
4. CARACTERIZACIÓN, PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y DISEÑO DE LOS HORMIGONES CELULARES	46
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	46
4.1.1. ÁRIDOS	46
4.1.2. AGUA.....	48
4.1.3. AGENTE ESPUMANTE	48
4.1.4. CEMENTO	52
4.2. DISEÑO DE LA MEZCLA	52
4.2.1. HORMIGÓN CONVENCIONAL (TESTIGO)	52
4.2.2. HORMIGÓN CELULAR.....	53



4.3.	CANTIDADES DE MATERIAL: FORMULACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR	54
4.4.	ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR	65
4.5.	EQUIPO	66
4.6.	PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO	66
4.7.	TRABAJABILIDAD Y FLUIDEZ	67
4.8.	MUESTREO, ELABORACION DE LAS PROBETAS	68
4.9.	CURADO	69
	CAPÍTULO V.....	70
5.	ENSAYOS MECÁNICOS.....	70
5.1.	CONSIDERACIONES PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	70
5.1.1.	ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE.....	70
5.1.2.	ENSAYO DE FLEXIÓN	71
5.1.3.	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	71
5.2.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	73
5.2.1.	HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDO AVATHAR Y AGENTE ESPUMANTE.....	74
5.2.2.	HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDO AVATHAR, CHASQUI Y AGENTE ESPUMANTE	75
5.3.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	77
5.3.1.	ALTERNATIVA 1.....	77
5.3.2.	ALTERNATIVA 2.....	79
5.4.	PRUEBA DE HIPÓTESIS	82
5.5.	PRUEBA FINAL DE ENSAYOS: COMPRESIÓN, TRACCIÓN, FLEXIÓN Y OBTENCIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO Y COEFICIENTE POISON.....	85
5.5.1.	ENSAYO DE COMPRESIÓN	85
5.5.2.	ENSAYO A FLEXIÓN.....	85
5.5.3.	ENSAYO A TRACCIÓN	86

5.5.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON	86
CAPÍTULO VI.....	87
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
6.1. RESUMEN DE RESULTADOS	87
6.1.1. ADITIVO ESPUMANTE.....	87
6.1.2. AGREGADO LIGERO	89
6.2. COMENTARIOS	91
6.3. CONCLUSIONES	91
6.4. RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA	93
ÍNDICE DE TABLAS.....	97
ÍNDICE DE GRÁFICOS	99
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	101
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	102
ANEXOS	103

DECLARACIÓN

GERARDO VICENTE ARBITO CONTRERAS, autor de la tesis “**CONCRETO CELULAR PARA USO ESTRUCTURAL**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de (Maestría en construcciones Msc.). El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

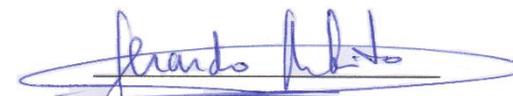
Cuenca, Octubre 12 de 2016



GERARDO VICENTE ARBITO CONTRERAS
C.I: 0101600278

GERARDO VICENTE ARBITO CONTRERAS, autor de la tesis “**CONCRETO CELULAR PARA USO ESTRUCTURAL**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Octubre 12 de 2016



GERARDO VICENTE ARBITO CONTRERAS
C.I: 0101600278

CERTIFICACIÓN

Yo, Ángel Julver Pino Velasquez. certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Ing. Gerardo Vicente Arbito Contreras bajo mi supervisión.

Ing. ANGEL JULVER PINO V. Msc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al personal del Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

A los señores Christian Tapia y Carla Pesantez estudiantes de la Facultad de Ingeniería por su colaboración en la confección de las probetas y ensayos.

Al Ing. Julver Pino Director de Tesis.

A mi familia por su apoyo moral.

A todas aquellas personas que de una u otra forma alentaron y contribuyeron con su granito de arena para seguir adelante en esta investigación.

PRESENTACIÓN

Siendo el hormigón uno de los componentes más usados en la industria de la construcción, y que los materiales empleados están en constante evolución buscando siempre sistemas innovadores en la elaboración con el fin de obtener materiales con las características más provechosas según el tipo de obra a la que se destine: alta resistencia mecánica o baja densidad. El hormigón celular puede ser una alternativa para conseguir disminuir la carga muerta o peso propio de las estructuras, de forma que se pueda alcanzar luces más grandes, elementos estructurales columnas esbeltas, vigas de menor sección, y otras características como material aislante térmico, acústico.

Esta Tesis estudia al Hormigón Celular desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, con agregados pétreos finos (arena), cemento portland, aditivo espumante, para lo que se preparó mezclas en diferentes proporciones incluyendo testigos para comparación, los ensayos mecánicos realizados son a la compresión, tracción y flexión, así como medir las deformaciones, las probetas se han ensayado a los 7, 14 y 28 días. Todos los ensayos se han realizado en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

El estudio contiene seis capítulos y anexos a saber:

- Capítulo 1: Antecedentes, justificación, objetivo, metodología de la investigación, limitaciones y alcance.
- Capítulo 2: Marco teórico, características de los materiales, procesos de fabricación, clasificación, ventajas, aplicación, características de los materiales.
- Capítulo 3: Metodología de la investigación, diseño, método y planeación del experimento, pruebas piloto.
- Capítulo 4: Caracterización y propiedades de los materiales: áridos, cemento, agente espumante.
- Capítulo 5: Ensayos de laboratorio físico-mecánicos, resultados. Recomendaciones.
- Capítulo 6: Conclusiones, Recomendaciones.
- Anexos: Detalle: del análisis de materiales, de mezclas y ensayos.

La investigación es de tipo experimental, fue desarrollada en el laboratorio de Geotecnia y Materiales, incluye el diseño de mezclas de Hormigón Celular y

Hormigón Convencional, utilizando los siguientes materiales: cemento, áridos del sector, árido liviano y aditivos espumantes.

Pasos a seguir en la investigación:

- 1) Determinación de los parámetros de los áridos a emplearse en los diseños de las mezclas:
 - Muestreo, ensayos de los áridos: contenido de materia orgánica, pesos específicos, pesos volumétricos, análisis granulométrico, clasificación.
 - Estimación de los parámetros para diseñar las mezclas.
- 2) Determinación de parámetros del aditivo espumante: dosificación, densidad, volumen, tiempos de batido.
- 3) Diseño, ajustes a las mezclas de prueba: Con los parámetros obtenidos se procederá a diseñar las mezclas.
- 4) Elaboración de mezclas con varias relaciones de a/c y de aditivo espumante:
 - En concreto fresco se determinara la: Densidad, fluidez: cono de Abrams, cono en V (ensayo específico para HC), siguiendo las normas ACI, ASTM, ASHTO, confección de las probetas cilíndricas de 10 x 20 cm.
 - En el hormigón endurecido: con las probetas confeccionadas y curadas, cumplida la edad a los 7, 14 y 28 días, se procederá a los ensayos de resistencia a compresión, determinación de la densidad,
 - Para las pruebas finales se procederá con los ensayos de resistencia a la compresión, flexión, tracción indirecta, determinación del Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson.
- 5) Recopilación y análisis de los resultados de los ensayos, análisis comparativo entre el Hormigón Celular y el Hormigón Convencional: densidades, fluidez, resistencias, Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson.
- 6) Análisis de los resultados, conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Bloques, paneles, placas, losas, columnas, vigas son los elementos de hormigón más utilizados en la construcción como elementos estructurales y no estructurales, en Ecuador se usa el hormigón convencional como material de construcción, compuesto de áridos, cemento, grava y agua.

Según la encuesta anual de edificaciones realizada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) a nivel nacional, pone a disposición los resultados de la investigación para el año 2014 se basa en los permisos de construcción concedidos por los GAD's que corresponde a 27.199 permisos de construcción, de este total, las nuevas construcciones corresponden a 24.337 unidades, es decir que el 88,04% son para uso residencial, el 7,15% destinado al uso no residencial y el 4,81% a construcción mixta. Del total de permisos concedidos el material predominante es el hormigón, con el 80,86% que utiliza en la cimentación, el 93,77% en la estructura y el 56.05% para cubierta o techo. (www.ecuadorencifras.gob.ec)

Según el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), de los 3.8 millones de hogares, el 45% habitan en viviendas inadecuadas. Este número contabiliza el 36% de hogares con déficit cualitativo que residen en viviendas inseguras construidas con materiales inadecuados y el 9% con déficit cuantitativo que comparten su vivienda con uno o más hogares, o viven en viviendas improvisadas.

En el Ecuador y especialmente en la ciudad de Cuenca es poco conocido el uso del hormigón celular; el presente trabajo de investigación busca una alternativa como material de construcción que permita elaborar los mismos elementos de hormigón convencional pero en tamaños y formas moldeables a los requerimientos de los diseñadores. Al ser el hormigón celular liviano, reduce la carga muerta que representa el mayor porcentaje de la carga total sobre la estructura en consecuencia se puede conseguir elementos estructurales de menor sección, menor cantidad de acero de refuerzo y menor volumen de hormigón (NRMCA - National Ready Mixed Concrete Association), además de facilitar la manipulación de los materiales con mayor rapidez de la construcción, menores costos de transportes y acarreos, ahorro

de mano de obra en montaje (Mireya Pérez 2006), haciendo accesible la vivienda para la población con bajos ingresos económicos.

Con el objetivo de reducir la densidad del hormigón se empleará agentes espumantes y áridos livianos en sustitución parcial del árido fino (arena), los materiales a emplearse en el diseño de los hormigones están disponibles en Cuenca.

De los resultados que se obtengan en las pruebas de laboratorio de la resistencia a la compresión, permitirá evaluar sus posibles aplicaciones a la vivienda y construcción en general.

1.2. HIPÓTESIS

Los hormigones celulares tienen baja densidad, por tanto es muy conveniente la disminución de su peso propio, pero correspondientemente reducen la resistencia a compresión $f'c$, y la adherencia se ve afectada con respecto al hormigón armado de peso normal, por lo tanto la mejor aplicación debe ser en:

- Elementos estructurales de baja prestación estructural, por ejemplo en edificaciones unifamiliares de una a dos plantas, estructuras de edificaciones de interés social de pequeño porte, etc.
- Elementos de la edificación no consideradas en el diseño como portantes, en elementos de la estructura utilizado como relleno, en este campo la aplicación es muy amplia, y que generalmente se aplican con hormigones normales en la albañilería simple o incluso armada que constituye una solución constructiva de poca ventaja económica.

1.3. HISTORIA Y ANTECEDENTES

Ya en la antigüedad los romanos utilizaron el concepto de hormigón alivianado hacia el año 120 DC, en el panteón de Agripa – Italia, que en el proceso constructivo del domo el peso del hormigón (a base de cenizas de Pozzuoli) va disminuyendo a medida que se incrementa su altura hasta llegar a la cúpula que está compuesta de cemento, piedra pómez y tufo, otro de los recursos fue el ir disminuyendo el espesor de cúpula a medida que va ascendiendo, esta estructura con algo más de 2000 años de antigüedad resiste a los embates de la naturaleza.

(https://es.wikiarquitectura.com/index.php/Panteón_de_Agripa)



Imagen No. 1.

CASA DUPLI, Ludwigsburg, Alemania, vista frontal.
Fuente: <http://vivoarquitectura.blogspot.com/2011/02/casa-dupli.html>



Imagen No. 2.

CASA DUPLI, Ludwigsburg, Alemania, vista posterior.
Fuente: <http://vivoarquitectura.blogspot.com/2011/02/casa-dupli.html>

Con la aparición del cemento Portland en el año 1824 se llega a definir cualidades y bases teóricas para su aplicación en el campo de la arquitectura y la ingeniería, desde entonces se ha venido mejorando la tecnología y la aplicación de los hormigones, en el año de 1889 se prefabrican las primeras vigas de hormigón armado y dos años más tarde aparece la primera patente de edificio prefabricado en los Estados Unidos. (IECA, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)

Con las mejoras alcanzadas en el uso de materiales pétreos, mejoras en el mezclado, empleo de aditivos químicos se ha logrado obtener una gama de resistencias, densidades y durabilidad en los hormigones aun si se usan en condiciones de ambientes agresivos sujetos al ataque de químicos.

El concreto u hormigón en la actualidad es el material más usado en la industria de la construcción, sin embargo la alta densidad de los concretos convencionales con densidad mayor a los 2350 kg./m³ puede ser un inconveniente donde la carga muerta es un factor importante, es muy pesado para ser práctico, sobre todo en la construcción de losas, ya que estas están diseñadas para soportar las cargas vivas, dichas cargas se transmiten a las trabes, estas a las columnas y finalmente a la cimentación y al terreno, resultando elementos muy pesados que es difícil o imposible alcanzar grandes luces, el hormigón celular (HC) puede ser una alternativa de solución, al ser un material liviano de baja densidad con características de buena aislación térmica, acústica, resistente al fuego; la sustitución de elementos constructivos pesados por elementos más livianos y que son secundarios en la estructura puede ser una alternativa económica aceptable el uso de los hormigones celulares.

El HC como material de construcción se utiliza actualmente en muchos países, a escala europea se estima que se construyen 500.000 casas individuales cada año (Wikipedia), en América como: México, Cuba, Chile, Argentina, Brasil, han adquirido franquicias para la producción de los hormigones celulares (Top_werk Group, Cemex, Siporex). En cambio en el Ecuador el uso es limitado y en nuestra localidad poco conocida.

Los hormigones celulares se producen en situ y prefabricados con variedad de productos químicos: generadores de espuma y generadores de gas, lo que se obtiene es una gama de hormigones celulares para múltiples aplicaciones. (El Hormigón Celular Tecnología del hormigón, Viña del Mar, Chile 2011)

El CIRSOC (Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Argentina, 2012), define a los Concretos Celulares como aquellos elementos de hormigón que contienen agregados livianos, cuya densidad varía de 800 a 1840 kg/m³ y resistencias de 70 a 215 Kg/cm², su composición, elaboración, colocación será tales que el hormigón endurecido tenga una estructura cerrada y masa compacta libre de vacíos macroscópicos.

En las fotos se observa el diseño moderno y minimalista, diseñada por JÜRGEN MAYER H. Architects (Profesor Universidad de las Artes, Berlín, Architectural Assotiation, Londres, Columbia University Nueva York), construida en 1984 sobre un terreno de 6.900m², en tres pisos. Los materiales empleados en la estructura y tabiques son de hormigón celular, mantiene una silueta sinuosa con grandes luces y volados, demostrando como el material puede adaptarse a la concepción arquitectónica.

1.4. ANTECEDENTES

Bloques, paneles, placas, losas, son elementos de hormigón utilizados masivamente en la construcción como elementos estructurales y no estructurales, los hormigones celulares permiten elaborar esos mismos elementos pero en tamaños y formas moldeables a los requerimientos de los diseñadores. De igual manera en lo que se refiere a mano de obra se reduce el tiempo de construcción porque se puede utilizar bloques de mayor tamaño, aumentando la velocidad de construcción (Hormigones Livianos Valdez Luis Fernando, ESPOL). En lo que se refiere a la carga muerta, al contener burbujas de aire, aminora el peso propio, lo que permite construir obras de mayor tamaño, elementos estructurales sistema viga-columna, zapatas y losas más livianas, todo en un ambiente más limpio y amigable al medio ambiente, para ser utilizado en: edificaciones, viviendas, partes de edificios, elementos prefabricados decorativos y monumentos (Hormigones livianos, Valdez Luis Fernando, ESPOL, 2010), el HC tiene múltiples aplicaciones, en el Ecuador y especialmente en la Ciudad de Cuenca es poco conocido este material, el presente trabajo de investigación proporcionara una alternativa como material de construcción.

Tenemos por ejemplo que en la Universidad de Cuenca se han realizado varios trabajos de tesis a nivel de pregrado y de posgrado en los que se han empleado materiales alternativos como desperdicio de ladrillo, teja y cerámico Alternativas de hormigones alivianados con cascote de ladrillo, desperdicio de teja y cerámicos (Rolando Cárdenas 1993), con el empleo de residuos de

madera se han obtenido hormigones livianos de densidades de 1020 a 1040 kg/m³ (Alban Crespo Sandra & otros 1998), empleo de perlas de poliestireno expandido (Mónica Lituma, Tatiana Zhunio, 2015), Diseño de mezclas de hormigón autocompactante utilizando materiales de la zona. (Cañizares Iván, mayo 2012)

Sin embargo, en la Universidad de Cuenca no se han realizado investigaciones de hormigones con agentes espumantes. En otras universidades del país como en la EPN a nivel de pregrado se han realizado estudios del hormigón celular y encontrar aplicaciones dependiendo de su resistencia. (Rengifo Ma. Cristina y Yupangui Ruth Verónica, 2013)

A nivel mundial en cambio existen muchos estudios y empresas dedicadas a la producción de hormigón celular para diversas aplicaciones, en paneles, bloques de diversos tamaños prefabricados o construidos insitu, utilizando varias tecnologías para la obtención y curado. La empresa Top-Werk Group Alemania, es un fabricante y proveedor internacional de productos de hormigón celular. Otros fabricantes como CEMEX México, empresa a nivel nacional e internacional están en más de 50 países, producen cemento, hormigones, agregados, hormigón celular premezclado para lamina colaborante, elementos prefabricados, muros, bloques, paneles. SIPOREX proveedores internacionales de máquinas, equipos y licencias para la producción de hormigón celular curados en autoclave con polvo de aluminio, están Europa, Asia, América, Japón, Corea del Sur, Australia.

1.5. JUSTIFICACIÓN

- Dar a conocer tecnologías alternativas dentro del ámbito de las técnicas constructivas, con un mínimo de desperdicio de los componentes, usando tecnologías en la producción de hormigones de baja densidad, con control de calidad adecuado y que cumplan normas de resistencia y durabilidad.
- Al ser la vivienda una necesidad imperativa de la sociedad, y ante recursos económicos limitados, el uso de hormigones celulares ofrece una opción que permitiría hacer que más familias accedan a una vivienda de calidad y a costos finales asequibles.
- **Demanda de materiales de construcción.-** En la actualidad la búsqueda de vivienda de calidad con costos razonables ha hecho necesario que se busque materiales y tecnologías mediante múltiples

alternativas que permitan obtener a los habitantes los requerimientos en el mercado de la construcción.

- **Costo beneficio al utilizar el concreto celular en las construcciones.-** El uso de hormigones celulares ofrece ventajas como son: rapidez en la construcción acelerando los procesos constructivos, permite mejores diseños al disminuir el peso propio de la estructura, cimentaciones de menor tamaño, alcanzar luces más grandes entre columnas, aislante acústico, térmico
- En estructuras de hormigón, el peso propio representa una proporción importante del peso por carga muerta, lo que reducir el peso resulta beneficioso.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar mezclas de hormigón que pueden clasificar como hormigón ligero y determinar su campo de aplicación más conveniente técnica y económicamente en las edificaciones.

1.6.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estudiar las características físico-mecánicas del agente espumante y su comportamiento ante la pasta de cemento Portland y el árido fino, además determinar el tipo de agente espumante estable para la producción del hormigón celular.
- Diseñar una mezcla de hormigón en condiciones tradicionales para tomarla como punto de referencia y modificarla sustituyendo progresivamente determinadas proporciones del árido fino (arena) con el agente espumante.
- Determinar la influencia de la sustitución del árido fino y árido liviano en la mezcla por el agente espumante en cuanto a: el peso y la resistencia a compresión, e identificar posibilidades de aplicación de estos hormigones.
- Realizar un diseño experimental con el fin de que los resultados obtenidos tenga validez científica.

1.7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Se ha dividido en dos etapas la investigación para la obtención de propiedades físico-mecánicas. En la etapa inicial de la investigación se realizara una revisión bibliográfica, conocer la reseña histórica, el tipo de agentes espumantes para utilización con el hormigón y su comportamiento mecánico, curado, usos, ventajas, desventajas, mezclas del hormigón celular.

En una segunda etapa con los análisis de los materiales a emplearse se diseñara el hormigón testigo, hormigón convencional con una resistencia $f'c$ de 250 kg/cm², en base a la norma establecida por el American Concrete Institute (ACI 211.1.-91), este hormigón servirá como control y referencia el cual se tomara en cuenta para comparaciones y análisis estadístico con el hormigón celular producido por la sustitución de parte del árido fino con el agente espumante.

1.8. LIMITACIONES Y ALCANCE

Se limita el estudio a los áridos provenientes de minas cercanas a la Ciudad de Cuenca, cemento Guapán, y a dos agentes espumantes, el uno a base de proteica y el otro a base de silicona, y al curado que se lo hará por sumersión en agua hasta la edad de rotura.

En esta investigación, se estudiaran dos alternativas de producción de hormigón celular, alternativa 1: con diferentes contenidos de agente espumante y determinar el comportamiento de la propiedad mecánica más relevante del hormigón en lo que se refiere a la resistencia a la compresión a la edad de 28 días y evaluar su peso en función de su densidad. Para la alternativa 2 se reemplazara el árido normal en diferentes proporciones por árido liviano y se estudiaran las mismas propiedades mecánicas de la alternativa 1.

Como continuidad producto de esta investigación a futuro pudiera ser el estudio de otros agentes espumantes y aditivos generadores de gas que producirían más estabilidad de la espuma durante el mezclado. El uso de materiales alternativos livianos como la pómez en sustitución parcial o total del árido.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Se designa convencionalmente a los hormigones livianos a aquellos cuya densidad máxima sea de 1840 kg/m^3 (ACI-318), ya que los normales presentan una densidad de 2400 kg/m^3 . De acuerdo al tipo de producción el hormigón liviano se da por la inclusión de aire en su estructura, la utilización de agregados livianos o de ambos casos (Hormigones Livianos, Valdez Guzmán y otros, ESPOL, 2011), se tiene hormigón de agregado ligero, hormigón aireado, celular, espumoso o gaseoso, hormigón sin finos.

2.1. HORMIGÓN CELULAR

El ACI 523.3R-14 define al hormigón celular (hormigones cuya densidad varía de 320 a 1920 kg/m^3 y resistencia variable según la aplicación) como “un producto liviano que está constituido por cemento Pórtland y/o limo de material fino silicio, como arena, escoria o ceniza volante, mezclados con agua para formar una pasta que tiene una estructura de células vacías homogéneas, las células de aire se consigue esencialmente al incluir vacíos resultantes de reacción química”

El hormigón celular es un material de construcción destinado a la obra gruesa, ligero o liviano, se compone de agua, árido fino, cemento y pequeñas burbujas de aire distribuidas en la masa del hormigón. Se lo conoce además como concreto aireado y en Europa como “concreto gas” y “concreto espuma”. El material resultante de la mezcla es homogéneo, está compuesto por millones de micro células de aire lo que le confiere ciertas propiedades mecánicas, térmicas y acústicas, a más de su baja densidad. (Cervantes Abarca, Nuevas Tecnologías en Concretos, CYAD, México, 2008)

Fue desarrollado por el año 1927 J.A. Erikson arquitecto sueco que buscaba un material para la construcción de baja densidad, aislante térmico y aislante acústico.

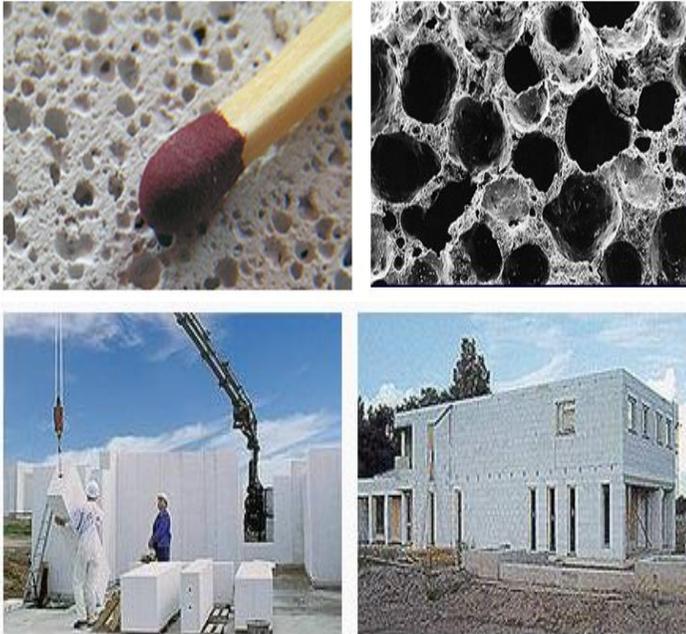


Imagen No. 3.

Ampliación de una sección de Hormigón Celular y uso en la construcción.

Fuente: <http://vivoarquitectura.blogspot.com/2011/02/casa-dupli.html>

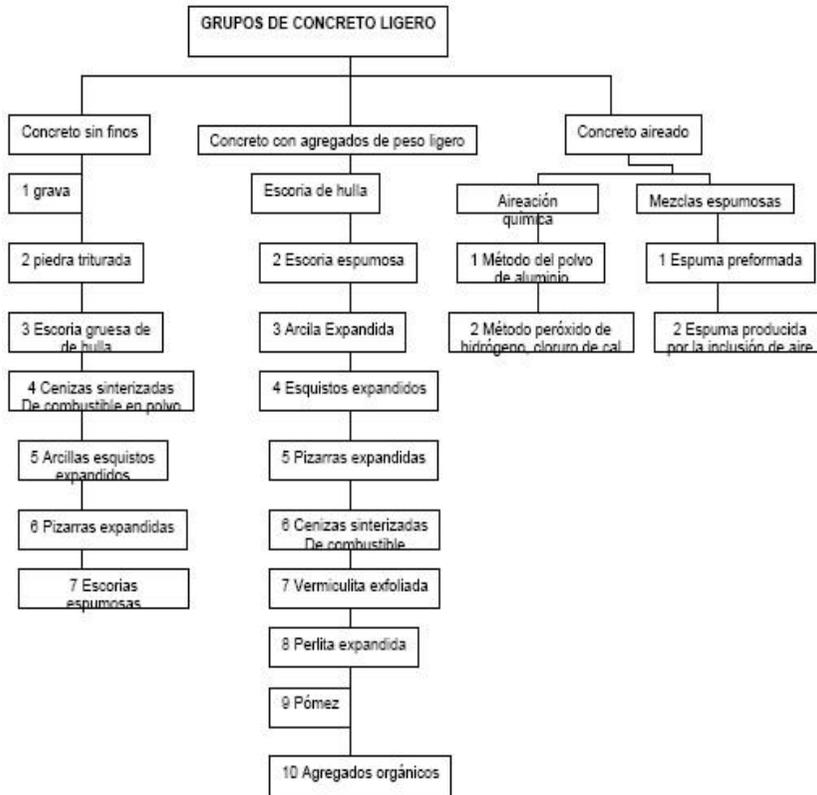


Gráfico No. 1. Clasificación del Hormigón Celular.
Fuente: Bufete de Ingeniería de Yucatán, 2012.

Según CIRSOC¹ 202 y 201, define a los Concretos Celulares como aquellos elementos de hormigón que contiene agregados livianos, cuya densidad varía de 800 a 1840 kg/m³ y resistencias de 70 a 215 Kg/cm², su composición, elaboración, colocación será tales que el hormigón endurecido tenga una estructura cerrada y masa compacta libre de vacíos macroscópicos.

En el Hormigón celular al adicionar espumas que al endurecer con el cemento forman micro burbujas de aire, no interconectadas. Con lo que obtenemos un hormigón de baja densidad y un alto factor de aislamiento térmico, de gran estabilidad dimensional.

Al ser un hormigón liviano, reduce el peso de la estructura (carga muerta o peso propio) y por ende la sección de las columnas, cimentaciones y otros elementos de carga en viviendas, edificios, elementos prefabricados, decorativos y monumentos. De igual manera en la utilización de la mano de obra reduce el tiempo de construcción, se puede utilizar bloques de mayor tamaño.

2.1.1. DENSIDAD Y RESISTENCIA

Al variar la densidad en el hormigón también varían sus propiedades físicas y por ende sus aplicaciones, en el acápite 2.4.3 se muestra la aplicación en función de la densidad.

La densidad está en función directa de la resistencia f'_c , a mayor densidad mayor resistencia. Se han producido hormigones celulares desde los 50 kg/m³ hasta los 1900 kg/m³. (Hormigón celular con la utilización de materiales locales, Italia Catalina, Tesis, ESPOL, 2001)

¹ CIRSOC: Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Argentina.

2.2. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR

2.2.1. HORMIGÓN CELULAR CON INCLUSIÓN DE BURBUJAS

Según el procedimiento utilizado para su elaboración, de acuerdo a la forma en que se originan las células en la mezcla se pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Hormigón Celular por desprendimiento gaseoso (Químicos)
- b) Hormigón Celular con base de espuma (Espumógenos)

HORMIGÓN CELULAR POR DESPRENDIMIENTO GASEOSO

Las células o burbujas se obtienen por desprendimiento de gases en la mezcla como consecuencia de las reacciones químicas.

Procedimientos para la generación de burbujas:

- 1) Incorporación a la mezcla de dos productos químicos susceptibles de reaccionar mutuamente y provocar un desprendimiento de gas en presencia del agua de mezclado.
 - Ácido clorhídrico y bicarbonato de sodio, con desprendimiento de gas carbónico.
 - Cloruro de cal y agua oxigenada, con desprendimiento de oxígeno.
 - Carburo de calcio y agua, con desprendimiento de acetileno.
- 2) Incorporación a la mezcla de un solo producto químico susceptible de reaccionar con el cemento en presencia del agua y provocar desprendimiento de gas.
 - Polvos metálicos (aluminio, zinc, magnesio, calcio, bario, litio).
 - Sales (carbonatos, bicarbonatos).
- 3) Incorporación a la mezcla de un producto susceptible de provocar un desprendimiento de gas por fermentación bajo el efecto del calor de hidratación del cemento como:
 - Levaduras orgánicas
 - Fermentaciones lácticas

Al elaborar el hormigón, el gas puede producir:

- Una reacción violenta que las burbujas de gas se reúnen formando otras de mayor tamaño que escapan de la mezcla, cuando se utiliza polvo de aluminio.
- Con silicatos de aluminio y calcio provocan en el fraguado calor de hidratación. Este efecto modifica sustancialmente la temperatura de la mezcla y, consecuentemente, cambia el volumen de las burbujas que se desprendan.

HORMIGÓN CELULAR EN BASE DE ESPUMA

La formación de los alvéolos dentro de la masa de hormigón resulta de incorporar a la mezcla un agente espumante que por agitación genera espuma con burbujas de aire, que al endurecer la mezcla quedan atrapadas las burbujas formando micro células que no están comunicadas entre sí.

En principio todos los productos espumógenos pueden ser utilizados con este fin pero, con la presencia del agua y el proceso de mezclado hace que decrezca la tensión superficial y se rompa las burbujas.

Como agentes espumógenos se puede emplear: detergentes; jabones resinosos y colas animales o vegetales; saponina; sulfo – ácidos de la naftalina; resinas vinílicas; proteínas hidrolizadas, la dificultad de conseguir agentes espumantes es crítica en el mercado nacional, se experimentó con varios productos para asegurar una buena tenacidad de las burbujas hasta que se produzca el endurecimiento de la mezcla. Dio buenos resultados el TEC 247 y Comperlan, en estos dos productos se analizarán el tiempo de producción de la espuma (tiempo de batido) y la estabilidad de la espuma en el tiempo de mezclado y endurecimiento del hormigón.

En la elaboración de los hormigones celulares el mezclado tiene una importancia fundamental sobre la calidad del producto. La duración del mezclado influye directamente sobre la resistencia y la densidad del hormigón, cuanto mayor es el tiempo de mezclado menor es la densidad.

Asimismo, las características de las mezcladoras, en cuanto a su velocidad de rotación y la forma de sus paletas, influye sobre las propiedades del hormigón que se elabora en razón de la calidad de la mezcla que permite obtener.

2.2.2. HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDOS LIVIANOS

Para la producción de hormigones de peso liviano también se puede reemplazar la arena (árido) en parte o en su totalidad por áridos livianos). La mezcla del hormigón se elabora con agregado de peso ligero, que puede ser esquisto expandido, arcilla o pizarra (calcinados que desarrollan una estructura porosa), escoria de altos hornos, piedra volcánica, pómez, (NRMCA, National Ready Mixed Concrete Association), poliestireno expandido.

2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y APLICACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR

2.3.1. VENTAJAS

PRODUCCIÓN

- Prefabricado: paneles, bloques
- Transporte
- Trabajabilidad
- Ligereza manejo del material
- Piezas de mayor tamaño
- Precisión de los elementos fabricados, exactitud dimensional

CONSTRUCCIÓN

- Rapidez de construcción, más liviano permite manipular elementos de mayor tamaño.
- Los elementos pueden ser cortados, aserrados y clavados.
- Reducción de la mano de obra.
- Facilidad de terminación, para elementos preformados, permite revoques muy finos desde 4 mm logrando terminados de calidad.
- Liviano, disminuye las sobrecargas en la estructura y fundaciones, lo que permite obtener elementos más delgados y de luces más grandes.

HABITACIÓN

- Aislamiento térmico, por las burbujas de aire incorporada la conductividad térmica se reduce.
- Aislamiento Acústico, absorción acústica de hasta 4 veces, mejorando el confort habitacional.
- Ventilación natural, traspaso del aire entre los poros
- Impermeabilidad, las micro celdas de aire impiden que las moléculas de agua penetren en su interior impidiendo que la humedad se transmita por capilaridad.
- Aislamiento al fuego, Es estanco al fuego y a los gases.
- Plagas, material inorgánico que no favorece a la formación de plagas, resistente a los hongos, insectos.
(Un repaso al Concreto Celular, Mireya Pérez,
<http://www.imcyc.com/ct2006/junio06/TECNOLOGIA.pdf>, 2006)

2.3.2. DESVENTAJAS

PRODUCCIÓN

- Más costosa.- requiere de maquinaria y equipos.
- Control de calidad riguroso.

CONSTRUCCIÓN

- Dificultad en la remodelación de ambientes.
- Falta de Adherencia con el acero de refuerzo.

HABITACIÓN

- Ante la presencia de humedad, el aire atrapado en las burbujas produce ataque químico.

2.3.3. APLICACIONES EN FUNCION DE LA DENSIDAD

- Hormigón celular con densidad de 250 a 550 kg/m³
Usado en protección contra incendios y aislamiento térmico.
- Hormigón celular con densidad de 600 a 800 kg/m³
Para rellenos, en coberturas ambientales para prevención de derrumbes, cubiertas, impermeabilización, reacondicionamientos de sistemas de alcantarillados, mampostería.
- Hormigón celular con densidad de 800 a 900 kg/m³

- Bloques, rellenos y otros elementos no portantes, molduras.
- Hormigón celular con densidad de 1100 a 1400 kg/m³
Paredes prefabricadas u hormigonados en sitio, portantes o no portantes, nivelado de pisos.
- Hormigón celular con densidad de 1600 a 1800 kg/m³
Paneles de losas, relleno de placas colaborantes, tabiquería interior.
(Estrella, G, 2011)

2.4. ADITIVOS Y AGENTE ESPUMANTE

Los aditivos y agentes espumantes empleados en la producción de HC pueden ser productos de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica (químicos) que se adicionan al hormigón durante el mezclado en pequeños porcentajes que van desde el 0.1% hasta el 5% de la masa o del peso del cemento según el producto seleccionado y el efecto que se desee obtener sobre el hormigón. Los aditivos modifican las propiedades físicas y mecánicas del hormigón en estado fresco o endurecido.

Los aditivos permiten la producción de hormigones diferentes a los tradicionales y han dado un impulso a la construcción, se considera como un nuevo ingrediente conjuntamente con el agua, el cemento, y los agregados. El comité ACI 116R y la Norma ASTM C 125 definen al aditivo como “Un material distinto del cemento, agua y de los áridos que se usa como componente del mortero u hormigón.

Clasificación:

Según Norma ASTM C494.- Reductores de agua, retardantes, acelerantes, reductor de agua retardante, reductor de agua acelerante, súper reductor de agua, súper reductor de agua retardante.

Según Comité 212 del ACI.- Acelerantes, reductores de agua y que controlan el fraguado, inyecciones, incorporadores de aire, extractores de aire, formadores de gas, expansivos, impermeables, reductores de permeabilidad, pegantes o epóxicos, inhibidores de corrosión, fungicidas e insecticidas, floculadores, colorantes.

Aditivos que modifican el contenido aire.- Incorporadores de aire, antiespumantes, formadores de gas, formadores de espuma.

2.4.1. AGENTE ESPUMANTE EN EL HORMIGÓN

En principio todos los productos espumógenos pueden ser utilizados con este fin pero, con la presencia del agua, la generación de la espuma y el proceso de mezclado con los materiales hace que decrezca la tensión superficial y se rompan las burbujas. Los agentes espumantes deberán mantener la estabilidad de las burbujas sin que esta se rompa durante la generación de espuma, durante el proceso de mezclado, durante el vertido del material en el molde y hasta que este haya endurecimiento.

Para esto se investigaran varios productos espumantes que cumplan con estos requisitos, que es la parte crítica de los productos que se analizarán.

De Los aditivos generadores de espuma estudiados el que mejor resultado ha dado en la presente investigación son: el TEC 247 y Comperland. En el anexo A se presentan los analices de los aditivos.

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

2.5.1. ÁRIDO FINO

En lo que se refiere a los agregados, las propiedades de los hormigones celulares variarán con el tamaño de los granos de los áridos. La composición, la forma y tamaño de los agregados influyen en la calidad del hormigón, la calidad deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C33. Los áridos no deben tener arcillas, limos o materia orgánica. Las siguientes especificaciones se aplicarán para determinar el mejor árido a emplearse para la elaboración de los hormigones celulares en la investigación.

Tabla 1.

Crterios de calidad para áridos, normas que deben cumplir.

CRITERIO DE CALIDAD	ESPECIFICACION APLICABLE	Norma ASTM
Abrasión:	Resistencia a la abrasión -agregados finos- Los Ángeles	C-131
Absorción (Po):	Absorción de agregados finos	C-128
Análisis granulométrico:	Análisis granulométrico para agregados finos y gruesos	C-136
Densidad:	Densidad:	D-12
Equivalente de arena:	Análisis de equivalente de arena para agregados finos	D-2419
Finos menos #200 - %:	Materiales más finos que malla No. 200	C-117
Forma de partícula:	Forma de partícula:	D-3398
Gravedad específica:	Gravedad específica para agregados finos	C-126
	Gravedad específica para agregados gruesos	C-127
Impureza de arcilla:	Grumos de arcillas y materiales débiles en agregados	C-142
Impureza orgánica (1-5):	Impureza de materia orgánica en agregados finos	C-87
	Impureza de materia orgánica en agregados finos para H°	C-40
Módulo de finura:	Análisis de módulo de finura	C-125
Muestras:	Reducción de tamaño de muestra	C-702
Partículas planas:	Análisis de partículas planas en agregados gruesos	D-4791
Peso unitario (kg/cm³):	Peso Unitario en agregados	C-28
Propiedades físicas:	Agregados para hormigón	C-33
	Técnicas para análisis de agregados	C E-11



Imagen No. 4.
Equipo para determinar el contenido de materia orgánica.

La siguiente tabla indica los límites máximos admisibles para la calidad de los áridos:

Tabla 2.

Límites máximos para la calidad de los áridos.

SUSTANCIA	NORMA	LÍMITE MÁXIMO (%)
Material que pasa por el tamiz Numero 200	ASTM C 117	3%
Materiales ligeros	ASTM C 123	1%
Grumos de arcilla	ASTM C 142	1%
Total de otras sustancias dañinas (como álcalis, mica, limo).	-	2%
Pérdida por meteorización	ASTM C 88, método Na ₂ SO ₄	10%

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica que contiene los agregados finos impide el proceso de hidratación del cemento, afectando directamente en la resistencia y durabilidad.

Para la determinación del contenido de materia orgánica en áridos finos se empleó la Norma INEN 855 (Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón), equivalente ASTM C40.

Determinación de las impurezas orgánicas con solución de Na(OH)

Los resultados del contenido orgánico se obtienen de la comparación de muestras en la escala de Gardner como se puede observar en la placa orgánica de colores que va de un amarillo claro (1) a un marrón rojo (5).

Si el color de la muestra es más oscuro que el de referencia (3) el material contiene cantidades inapropiadas de materia orgánica.

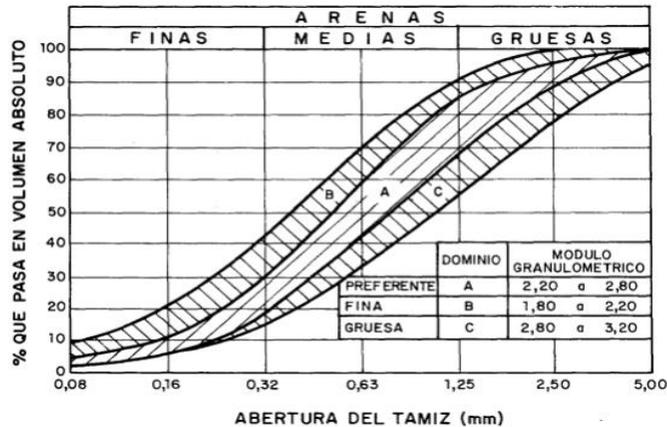


Gráfico No. 2. Dominios de la granulometría de arenas para Hormigones.

Fuente: Universidad de Oviedo, Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo.

GRANULOMETRÍA

La distribución granulométrica y el tamaño de agregado afectan las proporciones relativas de los componentes así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del hormigón. Una granulometría continua proporciona hormigones más trabajables (Métodos de dosificación de Fuller y Bolomey para áridos).

En la siguiente tabla se muestra la granulometría para un agregado fino bien gradado empleado en la elaboración de los hormigones²:

Tabla 3.

Tamaño y porcentaje que pasa para árido bien gradado.

TAMIZ U.S. STANDAR	DIMENSIÓN DE LA MALLA (MM)	% EN PESO QUE PASA
N° 3/8"	9,52	100
N° 4	4,75	95 -100
N° 8	2,36	80 -100
N° 16	1,18	50 - 85
N° 30	0,60	25 - 60
N° 50	0,30	10 - 30
N° 100	0,15	2 - 10

Granulometría óptima.- Es la que, para una misma consistencia y relación agua/cemento, le corresponde un consumo mínimo de cemento, dando además el mínimo de segregación.

Los dominios para arenas, empleadas en hormigones estructurales recomendada por los franceses se presenta en el Gráfico No. 1, en el que se indica además los valores límites del módulo granulométrico que corresponde a cada dominio. En el gráfico se observa que, el módulo granulométrico más conveniente para las arenas es el comprendido entre 2.20 y 2.80.

² Norma ASTM C 33-85, Tamices empleados en los áridos para hormigones.

La curva granulométrica del árido fino que se va a emplear en la elaboración del hormigón deberá estar comprendida dentro de los siguientes límites:

Tabla 4.

Material retenido acumulado de arenas para hormigones.

Límites	Material retenido acumulado, en % en peso, en los tamices						
	4mm	2mm	1mm	0,5mm	0,25mm	0,125mm	0,063mm
Superior	0	4	16	40	70	82	(1)
Inferior	20	38	60	82	94	100	100

Fuente: Universidad de Oviedo, Escuela de Ingeniería de Minas Energía y Materiales de Oviedo.

El módulo de finura MF, índice utilizado para describir si una arena es gruesa o fina, si MF es 2.3 es una arena fina, si MF está entre 2.3 a 3,1 es una arena mediana, si MF es mayor a 3.1 es una arena gruesa. La norma ASTM C 33 establece que las cantidades de agregado fino afectan la trabajabilidad, la textura superficial y finalmente en el sangrado del hormigón.

DENSIDAD (INEN 857 – 2010)

Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupan las partículas del material. El material dentro de un recipiente sufre un acomodo de las partículas dando un menor espacio entre ellas; entonces se obtendrá un mayor peso volumétrico cuando se obtenga una mayor cantidad de material dentro del mismo volumen, lo que depende de la granulometría, tamaño, forma y textura del agregado.

Densidad suelta.- Es la relación entre el peso del agregado suelto y el volumen que ocupa.

Densidad aparente compacta.- Es la relación entre el peso del agregado compactado y el volumen ocupado.

Estos ensayos están bajo la norma INEN 856 y la norma ASTM C128-04a.

PESO ESPECÍFICO (Densidad Relativa)

Relación entre el peso del árido y su volumen, determinación según norma ASTM C-128

Cálculos:

Peso Específico:	$D/A-(B-C)$
Peso específico SSS:	$A/A-(B-C)$
Peso específico Aparente:	$D/D-(B-C)$
% Absorción:	$(A-D)*100/D$

Dónde:

A:	Peso de Arena SSS (gr.)
B:	Peso Picnómetro + agua + arena (gr.)
C:	Peso Picnómetro + agua (gr.)
D:	Peso de la Arena seca en aire (gr.)

HUMEDAD

La humedad aporta con resistencia y maniobrabilidad en la dosificación del hormigón, por la relación agua/cemento. Es necesario cuantificar la humedad en el árido para determinar si estos aportan o absorben agua según el estado higrométrico que estos posean, que debe ser tomado en cuenta en el momento de la fabricación del hormigón, para así realizar correcciones por humedad en la dosificación. La humedad se determina por la siguiente formula:

$$\text{Humedad Total: } (Ph-Ps)/Ps * 100$$

Dónde:

Ph:	Peso de Arena Húmeda
Ps:	Peso de arena Seca al horno

2.5.2. CEMENTO

El cemento Portland es un cemento hidráulico que al mezclarse con el árido y agua tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. Como el cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella forma un material de buenas propiedades aglutinantes.

Para la investigación de los hormigones celulares se utilizará cemento Portland tipo IP Guapán, elaborado bajo norma INEN 490 (ASTM C595).

ANÁLISIS DEL CEMENTO

- **Densidad:**
El valor de la densidad del cemento se utiliza para el cálculo de peso y/o volumen en la mezcla del hormigón. La densidad se obtiene de la relación peso a volumen en gr/cm^3 .
- **Finura:**
La finura del cemento indica las impurezas que posee, a mayor impureza, menor será la resistencia del concreto. El porcentaje de impurezas admitido en el cemento oscila entre 0 y 0,5 %.

CONSISTENCIA Y TIEMPO DE FRAGUADO

Consistencia.- Para determinar los tiempos de fraguado, el tiempo inicial y final de fraguado del cemento, es necesario determinar el contenido de agua que la pasta necesita para producir una pasta de consistencia normal.

El contenido de agua de la pasta estándar se expresa como porcentaje en peso de cemento seco, y el valor normal varía entre 26 y 33%, es decir entre 130 y 165 ml para 500 gramos de cemento.

Tiempo de Fraguado.- El fraguado es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos procedentes de la reacción química del agua de amasado con los óxidos metálicos presentes en el clinker que compone el cemento.

En el proceso general de endurecimiento del hormigón se presenta un estado de fraguado inicial en que la mezcla pierde su plasticidad. Se denomina fraguado final al estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable. El tiempo comprendido entre estos dos estados se llama tiempo de fraguado de la mezcla que se estima en diez horas, aunque varía dependiendo de la humedad relativa, temperatura ambiente, etc. (NTE INEN 158-2009).



Imagen No. 5.
Máquina generadora de espuma.



Imagen No. 6.
Producción de espuma por batido (4 minutos).
Fuente: Laboratorio Universidad de Cuenca.

2.5.3. AGUA

Para la elaboración de los hormigones el agua debe ser limpia y estar libre de cantidades dañinas de aceites, ácidos, sales, álcalis y materias orgánicas, al contener impurezas afectan las propiedades del hormigón: resistencia, tiempo de fraguado, la durabilidad, manchas, corrosión del acero de refuerzo, estabilidad volumétrica. (NTE INEN 1855-1, sección 6.1.1-3, INEN 1108)

En general, la elaboración de mezclas para hormigones celulares requiere una elevada relación agua/cemento, medida en peso su valor oscila generalmente entre 0,7 y 2. La razón más evidente de esta necesidad reside en la fineza de las materias primas utilizadas.

2.5.4. GENERACION DE ESPUMA

Para la generación de espuma se aplicaron dos procedimientos mecánicos, dando buenos resultados el segundo procedimiento, se describe a continuación los procedimientos empleados:

- 1) Con máquina generadora de espuma que básicamente consiste en un tubo de pitot, controlado por una electroválvula, una entrada de aire a presión con su respectiva llave de control, en esta máquina se realizó varias pruebas pero no se obtuvo buenos resultados y fue ineficaz en la producción de la espuma puesto que al pasar el líquido por el pitot, el tiempo que está el agente espumante en contacto con el líquido - aire a presión inyectado por medio de un compresor no produjo espuma estable, y no presentó estabilidad en el mezclado y la colocación del hormigón en los moldes, existe una disminución considerable de volumen.
- 2) Por batido mecánico del agente espumante.- Por este método se produjo espuma mediante la agitación de una hélice unida al mandril de un taladro, que al revolucionar (girar las aspas) alrededor de 4 minutos en un recipiente con el agente espumante y agua produce espuma estable hasta la colocación del mortero en los moldes.

MEZCLA.- Con este procedimiento de producción de espuma, se obtiene la mezcla en la elaboración de los hormigones celulares; con los morteros se han realizado ensayos con varios tiempos de batido analizando la consistencia y estabilidad para diferentes proporciones de agua, agente espumante.

- 1) Constante la relación agua/cemento, y la cantidad de árido, variando la relación de espuma.
- 2) Constante la cantidad de árido, variando la cantidad de agente espumante.
- 3) Agregando árido liviano de peso específico bajo (Chasqui) que es un producto volcánico de baja densidad, cuya densidad suelta esta alrededor de 0.53 gr/cm^3 y con un peso específico relativo $SS = G_s$.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es considerado como el método más preciso de la investigación experimental, en el que se trata de comprobar o refutar una hipótesis en forma matemática junto con el análisis estadístico. (Martyn Shuttleworth)

El diseño de experimentos se emplea para averiguar si unos determinados factores influyen en la variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificarla. La metodología se basa en la experimentación; si se repite un experimento en condiciones indistinguibles, los resultados presentarán variabilidad que puede ser grande o pequeña, en cambio si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento (Montgomery Douglas. Diseño de Experimentos. Ed. Iberoamericana. México 1991). Para extraer un juicio o conclusión de la información proporcionada de los ensayos a compresión realizadas en el laboratorio para los Hormigones Celulares con un riesgo de error medible en términos de probabilidad se usará la técnica de inferencia estadística.

El primer aspecto es plantear el diseño experimental mediante una prueba piloto, necesaria para establecer parámetros estadísticos que permitan determinar el tamaño de la muestra es decir el número de probetas (Cálculo del tamaño muestral para la investigación, Carlos Valdiviezo Universidad Privada Boliviana pág. 169), requerido para llevar a cabo la prueba de hipótesis y que permitan identificar diferencias significativas entre el hormigón de control, que es el hormigón convencional o de peso normal y los hormigones celulares con un adecuado nivel de confianza.

Otro aspecto importante es el de determinar las propiedades de los materiales cemento, árido, agua, agente espumante, que formarán parte de la mezcla del hormigón, previa a la confección de las probetas y los ensayos. Una parte de las propiedades vienen definidas por el origen de los materiales y la otra parte viene determinada por los ensayos y pruebas de laboratorio, para la presente investigación los ensayos se han realizado en el Laboratorio de

Geotécnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

Determinado las propiedades por el origen de los materiales y de las pruebas de laboratorio, el diseño del hormigón de peso normal se lo hará en base al método dado por el American Concrete Institute (ACI 211.1-91 Reapproved 2002 cap. 6) y a partir de modificaciones se obtendrá el diseño del hormigón celular.

3.2. MÉTODO EXPERIMENTAL

La inferencia Estadística es el método estadístico ampliamente utilizado en las ciencias experimentales que van de lo particular a lo general, permite obtener conclusiones de una población en estudio a partir de la información que proporciona una muestra representativa de la misma para generar un conocimiento científico. (José Luis Vicente Villardon. Introducción a la inferencia. Estadística. Universidad de Salamanca)

En la investigación uno de los objetivos es determinar a través de los ensayos (experimentos) la variación de la resistencia a la compresión y el peso entre el hormigón convencional y el hormigón celular; con el uso del método de la estadística inferencial los datos no son simplemente reportados sino que a más de ser analizados son interpretados, y en base al análisis extraer conclusiones con cierto grado de confianza; y que a través de la muestra los datos obtenidos de la experimentación son extendidos a la población.

Para que un experimento tenga validez científica se debe considerar el diseño experimental y el análisis estadístico de los datos.

3.3. PLANEACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Para obtener resultados de calidad con conclusiones que se obtienen a través de la experimentación es necesario planificar, que es de amplia aplicación científica en la industria y en el desarrollo de materiales alternativos. Como primer paso del diseño experimental es establecer y describir las variables de la investigación.

Se realizaran varias mezclas con variaciones (en porcentajes) del agente espumante en volumen reemplazando parte del árido, que es una variable que se puede controlar, y mediante técnicas de estadística inferencial analizar los resultados en vez de reportarlos, estimando con un grado de

confianza la experimentación y determinando la influencia en la resistencia a la compresión y en el peso, que tuvo el aditivo dentro de la mezcla del hormigón.

Consideraciones en el uso de métodos estadísticos (Análisis y diseño de experimentos, Humberto Gutiérrez Pulido)

- Replicar un experimento da una idea de la variabilidad de las respuestas y, por lo tanto, permite evaluar la precisión de los estimados.
- Cuando mayor es el número de réplicas, mayor será la precisión de los estimadores y, por lo tanto, es más probable detectar diferencias significativas entre tratamientos.
- Cuando el número de réplicas es el mismo para todos los tratamientos se dice que el diseño es equilibrado.

3.4. EXPERIMENTO UNI-FACTORIAL

Existen muchos estimadores como la distribución binomial, normal, usado para muestras o poblaciones mayores a 30, para muestras o poblaciones menores a 30 se emplean estimadores como t de student, chi cuadrado, fisher, uni-factorial (Estadística, MacGraw-Hill, Murray Spiegel, Serie Shaum, 2nd Edición, 1995). Como parte de la estadística inferencial el método unifactorial equilibrado es aplicado para el análisis de resultados.

Cuando a una variable importante se le aplican múltiples tratamientos en un diseño experimental que es el caso presente, es necesario realizar un experimento factorial con el fin de identificar las interacciones entre esta variable y los resultados. La idea es descubrir cómo se reparte la variabilidad total de la muestra a través del análisis de varianza (ANOVA).

Se analizarán dos alternativas (dos experimentos):

Alternativa 1.- En este caso se establece que la única variable que puede manipularse libremente en el diseño experimental y que además tiene influencia en la resistencia a la compresión y la densidad del hormigón es la variación en porcentaje del agente espumante.

Alternativa 2.- En esta alternativa se considera la sustitución de árido normal (arena) por árido liviano (chasqui) que es la variable que se puede manipular

que también tiene influencia en la resistencia a la compresión del hormigón y la densidad.

Uno de los objetivos de este trabajo es determinar la influencia de dichas sustituciones en las dos alternativas, para lo cual se realiza un experimento comparativo entre los resultados dados por el hormigón de peso normal al que llamaremos testigo y los hormigones con distintos porcentajes de sustitución (tratamientos) para las dos alternativas consideradas. Los tratamientos serán comparados con una muestra control que es el testigo.

A partir de dosificaciones previas (pruebas piloto, realizadas previamente por no disponer de información estadística) se obtiene parámetros: la media, desviación estándar y rango de confianza para cada tratamiento.

Definido el método se establece el tamaño de la muestra requerida para un cierto grado de confianza, que para un experimento uni-factorial se tiene:

$$\phi^2 = \frac{nD^2}{2a\sigma^2} \text{ Ecuación 3.1}$$

Dónde:

- ϕ^2 = Parámetro relacionado con el factor de descentralización de la distribución F no centrada.
- n = Tamaño de la muestra; número de probetas.
- a = Número de tratamientos incluyendo el control.
- D = Diferencia máxima admitida entre cualquier par de medias de tratamiento.
- σ^2 = Varianza entre muestras de un mismo tratamiento.

3.5. PRUEBAS PILOTO

A continuación se presenta la tabla con los resultados de la prueba piloto para los cinco tratamientos de la alternativa 1.

Alternativa 1:

Tabla 5.
Porcentaje (%) de sustituciones del agente espumante y resistencia a la compresión a los 28 días.

No. Tratamiento	No. de probetas	Porcentaje (%) sustitución	Resistencia (kg/cm ²)	Medias (kg/cm ²)	Desviación Estandar (kg/cm ²)	Rango de Confianza (0.95)	Coefficiente de Variación
1 control	1	0	446.82	458.41	15.67	440.68	3.42
	2	0	476.24				
	3	0	452.17				
2	1	15.6	339.43	333.58	6.40	326.34	1.92
	2	15.6	334.57				
	3	15.6	326.75				
3	1	28.4	251.56	253.06	7.88	244.14	3.12
	2	28.4	261.59				
	3	28.4	246.04				
4	1	34.9	20.02	19.34	0.61	18.64	3.16
	2	34.9	19.15				
	3	34.9	18.84				
5	1	41.3	13.26	13.05	0.27	12.74	2.11
	2	41.3	12.74				
	3	41.3	13.16				

En la tabla anterior se presenta 5 tratamientos, 0%, 15.6%, 28.4%, 34.9%, 41.3% de sustitución de agente espumante. Con esos valores se cubre el rango de sustitución desde el 0% al 41.3%.

Se han ensayado tres probetas por tratamiento, a la edad de 28 días, el hormigón alcanza aproximadamente el 65% de la resistencia a compresión los 7 días del valor que tendría a los 28 días. (Universidad Politécnica de Valencia, Evolución de la resistencia del hormigón, Valcuende Paya Manuel)

Se trabaja con el número de probetas (tres) establecido en la norma del Instituto Ecuatoriano de Normalización NTE INEN 1 573:2010, que establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. No se utilizó directamente estos valores, pues en el presente trabajo de investigación el objetivo no es el control de calidad sino el desarrollo de materiales alternativos.

Del procesamiento de los datos se tiene:

- La resistencia media entre el tratamiento 5 y el de control tratamiento 1, existe una variación en la resistencia de 445 kg/cm^2 (arena lavada sin finos y sin contenido orgánico).
- Para valores mayores al 28.4% de reemplazo de agente espumante, la resistencia decae muy rápidamente hasta un mínimo de media 13.05 kg/cm^2 .
- La desviación σ = mínima está dada por el tratamiento 5, cuyo valor es de 0.27 kg/cm^2 .
- La desviación σ = máxima está dada por tratamiento 1, cuyo valor es de 15.67 kg/cm^2 (Por el control).
- En los tratamientos 2 y 5 los valores del coeficiente de variación están por debajo de 2.44%, no así para el tratamiento 1, 3 y 4 en donde el valor supera al 2.44%.
- La diferencia máxima admitida (D) está dada por la diferencia de medias de los tratamientos (2) con el 15.6% y (3) con el 28.4%, que permite apreciar la influencia del agente espumante en la mezcla, luego de lo cual el comportamiento de la resistencia decae en forma no lineal.

A continuación se presenta la tabla con los resultados de la prueba piloto para los seis tratamientos de la alternativa 2.

Alternativa 2:

Tabla 6.
Porcentaje (%) de sustituciones del agente espumante y resistencia a la compresión a los 28 días.

No. Tratamientos	No. de probetas	Sustitución (%)	Resistencia (kg/cm ²)	Medias (kg/cm ²)	Desviación Estandar (kg/cm ²)	Rango de Confianza (0.95)	Coefficiente de Variación
1	1	0	251.56	253.063	7.883	244.143	3.12
	2	0	261.59				
	3	0	246.04				
2	1	3	39.24	39.833	0.904	38.811	2.27
	2	3	40.51				
	3	3	39.75				
3	1	5	82.83	80.950	2.474	78.150	3.06
	2	5	79.37				
	3	5	80.65				
4	1	10	114.75	117.519	3.846	113.167	3.27
	2	10	120.186				
	3	10	117.62				
5	1	15	58.46	59.335	1.343	57.815	2.26
	2	15	60.345				
	3	15	59.2				
6	1	60	44.96	44.093	1.203	42.732	2.73
	2	60	43.26				
	3	60	44.06				

En la tabla anterior se presenta 6 tratamientos, 0%, 3%, 5%, 10%, 15% y 60% de sustitución del árido fino por chasqui. Con esos valores se cubre el rango de sustitución desde el 0% al 60%.

Se han ensayado tres probetas por tratamiento, a la edad de 28 días, se utilizan los mismos criterios de ensayo y prueba que el utilizado en la alternativa 1.

Del procesamiento de los datos se tiene:

- La resistencia media entre el tratamiento 6 y el de control tratamiento 1, existe una variación en la resistencia de 208.97 kg/cm².
- Para valores mayores al 28.4% de reemplazo de agente espumante, la resistencia decae muy rápidamente hasta un mínimo de media 13.05 kg/cm².
- La desviación σ = mínima está dada por el tratamiento 2, cuyo valor es de 0.90 kg/cm².
- La desviación σ = máxima está dada por tratamiento 1, cuyo valor es de 7.88 kg/cm².
- En los tratamientos 2 y 5 los valores del coeficiente de variación están por debajo de 2.44%, no así para el tratamiento 3, 4 y 6 en donde el valor supera al 2.44%.
- La diferencia máxima admitida (D) está dada por la diferencia de medias de los tratamientos 3 (5%) y 4 (10%) cuyo valor es de 36.569, que permite apreciar la influencia de la resistencia en la mezcla.

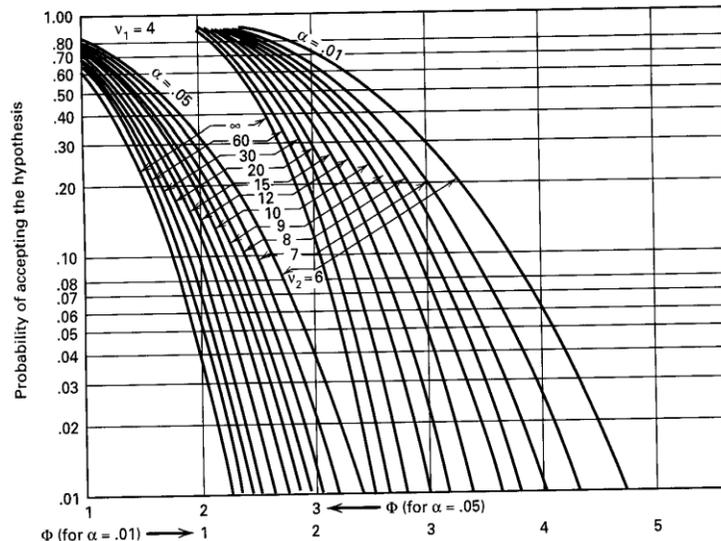


Gráfico No. 3. Curva Característica de la Operación para el Análisis de Varianza de Efectos Fijos. Para $v_1 = 4$.

3.6. TAMAÑO DE LA MUESTRA

Una vez que se han establecido los parámetros estadísticos de las pruebas piloto, la media y la desviación estándar, con lo cual se puede establecer o verificar el tamaño de la muestra a partir de la ecuación 3.1, y con la ayuda grafica de las curvas características para Análisis de Varianza de Efectos Fijos.

Prueba de hipótesis, H_0 y H_1

La prueba de hipótesis es fundamental en toda investigación científica, en donde interviene la hipótesis nula H_0 , y la hipótesis alternativa H_1 .

Por hipótesis nula H_0 se define que el factor no influye (agente espumante) en la variación de las resistencias en la experimentación para los tratamientos dados.

Ocurre un error Tipo I si se rechaza la hipótesis nula H_0 cuando en realidad es verdadera y no debe rechazarse. La probabilidad de que ocurra este error es (α) , que es el nivel de significancia y es la probabilidad en la región de rechazo, se optó el valor de $\alpha = 0,05$.

Ocurre un error Tipo II si se acepta la hipótesis nula H_0 , cuando en realidad es falsa y debe rechazarse. La probabilidad de que ocurra este error es (β) , y el poder de la potencia de la prueba $(1-\beta)$ que es la probabilidad de rechazar H_0 cuando es falsa, se consideró el valor de 0.9.

Para la alternativa 1 se tiene:

$$v_1 = a - 1 = 4 \quad \text{número de la tabla}$$

$$v_2 = N - a = 12 \quad \text{número de la curva}$$

β es el valor de la probabilidad, se lee en el eje vertical del gráfico.

ϕ valor calculado en el gráfico 3, se lee en el eje horizontal.

Entonces aplicando la curva de operación se puede comprobar el tamaño de la muestra.

Tabla 7.

N	D (kg/cm ²)	a	σ (kg/cm ²)	ϕ	β	1- β
3	80.516	5	15.671	2.814	0.014	0.986

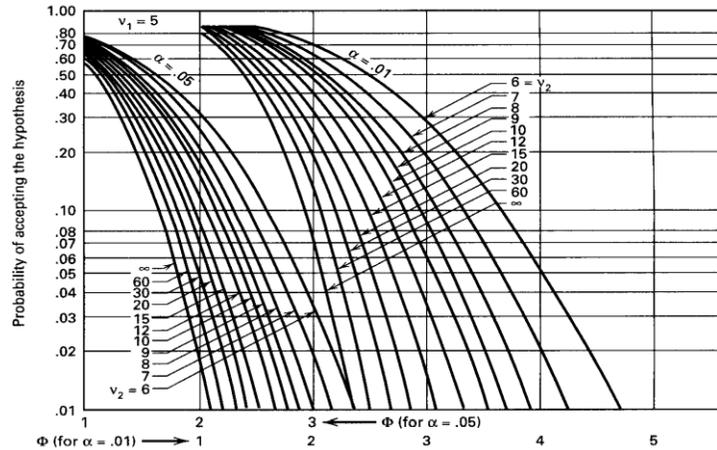


Gráfico No. 4. Curva Característica de la Operación para el Análisis de la Varianza de Efectos Fijos. Para $v_1 = 5$.

Se obtiene que la probabilidad de cometer error tipo II (incapacidad de encontrar una diferencia existente) es de 0.014 por lo que el poder de la experimentación o confianza de rechazar la hipótesis nula del método unifactorial equilibrado es de 0.986; lo cual garantiza la confiabilidad de los resultados; el factor influye con un valor de significación $\alpha = 0.05$.

Para la alternativa 2 se tiene:

$v_1 = a - 1 = 5$ número de la tabla

$v_2 = N - a = 10$ número de la curva

β es el valor de la probabilidad se lee en el eje vertical del gráfico.

ϕ valor calculado en el gráfico 4, se lee en el eje horizontal.

Entonces aplicando la curva de operación se puede comprobar el tamaño de la muestra.

Tabla 8.

N	D (kg/cm ²)	A	σ (kg/cm ²)	ϕ	β	1- β
3	36.569	6	7.883	2.32	0.04	0.96

De igual manera se obtiene que la probabilidad de cometer error tipo II (incapacidad de encontrar una diferencia existente) es de 0.04 por lo que el poder de la experimentación o confianza de rechazar la hipótesis nula del método uni-factorial equilibrado es de 0.96, lo cual garantiza la confiabilidad de los resultados; el factor influye con un valor de significación $\alpha=0.05$.



Imagen No. 7.

Tres áridos: 1. Marathón, 2. Avatar, 3. Escorpión.

CAPÍTULO IV

4. CARACTERIZACIÓN, PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y DISEÑO DE LOS HORMIGONES CELULARES

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

4.1.1. ÁRIDOS

Los áridos empleados para confeccionar hormigón celular son los mismos utilizados para elaborar el hormigón convencional y las propiedades físicas y químicas depende del tamaño y forma de las partículas, para la determinación de las propiedades es necesario establecer procedimientos normalizados, se empiezan con la toma de muestras, procedimiento de cuarteo. (NTE INEN 2566:2010)

Para la elaboración de los hormigones celulares se estudian tres minas de canteras que proveen áridos: gravas y arenas a la ciudad de Cuenca:

1. Árido de la Josefina Marathón, río Cuenca, ubicado a dos kilómetros antes del puente de la Josefina.
2. Árido del río Jubones en Yunguilla, mina Avathar.
3. Árido del río Jubones en Santa Isabel, mina Escorpión.

ÁRIDO AVATHAR

Del Anexo B Tabla B1 y gráfico B1 se observa que el árido analizado posee una densidad aparente de 2.52 gr/cc , se encuentra dentro del uso granulométrico permitido por lo que es apta para uso en mezclas de hormigones. El contenido de materia orgánica está dentro de lo permitido, color de referencia 3 escala de Gradner.

ÁRIDO ESCORPIÓN

En el Anexo B, tabla B2 y gráfico B2, se observa que el árido analizado posee una densidad aparente de 2.56 gr/cc , se encuentra dentro del uso granulométrico establecido; se puede utilizar para las mezclas de hormigón celular. El contenido de materia orgánica está dentro de lo permitido, color de referencia 3 escala de Gradner.

ÁRIDO MARATHÓN

En el Anexo B Tabla B3 y gráfico B3 se observa que el árido analizado posee una densidad aparente de 2.78 gr/cc , y se encuentra por encima del límite superior del uso granulométrico establecido; la distribución granulométrica de los granos no cumple, para aplicación en hormigones livianos podrá ser utilizada mezclando con otros áridos por ejemplo con áridos de origen volcánico, en porcentajes a determinarse para reducir la densidad y que la nueva composición de este material este dentro del rango establecido para uso en Hormigón Celular. El contenido de materia orgánica está dentro de lo permitido, color de referencia 3 escala de Gradner.

SELECCIÓN DEL ÁRIDO A UTILIZAR EN LAS MEZCLAS

En el cuadro resumen se muestra las características de los áridos analizados, la granulometría y el análisis de la cantidad de materia orgánica de cada árido se presentan en el Anexo B, Tablas B1, B2, B3.

Tabla 9.

Características de los áridos.

	AVATHAR	ESCORPIÓN	MARATHÓN
D 10 (mm)	0.211	0.217	0.424
D 30 (mm)	0.410	0.442	0.894
D 60 (mm)	0.893	0.943	2.000
% Árido Grueso	0.61	1.44	8.11
% Árido Fino	98.6	97.18	91.76
% Finos	0.79	1.38	0.13
M. Finura	26.375	27.213	3.737
D. Efectivo	0.211	0.217	0.424
D. Máximo	3/8	3/8	3/8
Coefficiente de Uniformidad	4.235	4.345	4.720
Coefficiente de Curvatura	0.892	0.957	0.943

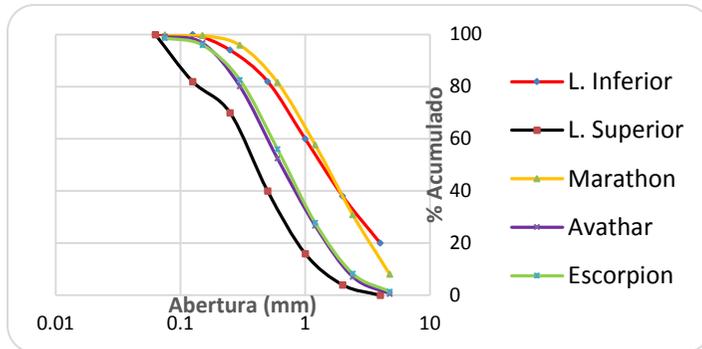


Gráfico No. 5. Granulometría de los tres áridos.



Imagen No. 8.
Agua, Agente espumante TEC 247.

De las curvas granulométricas de los tres áridos estudiados, el de la mina Marathón es la que no cumple con lo especificado contenido de partículas gruesas 8.11%, en cuanto a los otros dos áridos Avathar y Escorpión, cumplen con las granulometrías, se utiliza el valor del porcentaje de finos contenido en el árido para tomar la decisión, siendo así Avathar es el mejor árido para realizar las mezclas, % de finos 0.79%.

Tabla 10.
Porcentajes de árido grueso, árido fino y finos.

ARIDO	Escorpión	Avathar
% Árido Grueso	1.44	0.61
% Árido Fino	97.18	98.60
% Finos	1.38	0.79

4.1.2. AGUA

Para la confección de las probetas se ha utilizado agua potable que se consume en la Ciudad de Cuenca (norma INEN 1108), se considera que el agua para consumo humano es apta la confección de hormigones, y cumple con los parámetros de calidad de acuerdo a la norma INEN 2617:2012 sección 5.1.1.2.

Para el diseño de la mezcla el peso específico del agua se consideró el valor de 1000 kg/m³.

4.1.3. AGENTE ESPUMANTE

Fue necesario experimentar con diversos productos que se pudo conseguir en la localidad; para asegurar una buena tenacidad de las burbujas desde la formación de la espuma hasta que se produzca el correspondiente endurecimiento de la mezcla, en principio se analiza el tiempo de producción del agente espumante y el tiempo de permanencia de las burbujas sin que estas se rompan, dando resultados dos productos el TEC 247 y Comperlan.

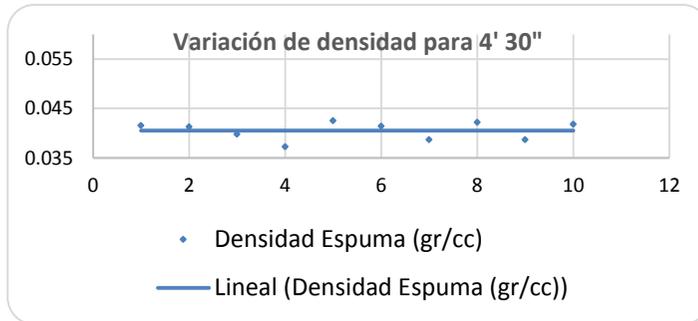


Gráfico No. 6. Número de intentos vs. Densidad a los 4'30" de batido.

Determinación del Aditivo:

Para determinar el mejor aditivo a emplear se utiliza dos procedimientos; el primero mediante la generación de espuma para diferentes tiempos de mezclado y analizar la variación de la densidad y así determinar el tiempo efectivo de mezclado; el segundo procedimiento será a partir de las mezclas de hormigón probar con diferentes porcentajes de espuma para cada tipo de aditivo y comparar los resultados de fluidez, consistencia y resistencia a la compresión para las posteriores aproximaciones y objetivos de la investigación.

Comportamiento de la Espuma en función del tiempo de batido:

Se probó experimentalmente varios tiempos de batido, varios intentos con el fin de analizar el comportamiento del agente espumante, se empieza con un tiempo de batido de 3 minutos, aumentando 30 segundos a cada prueba hasta los 7 minutos.

Aditivo 1: Agente Espumante (Proporcionado por la compañía TECNOLOGÍA EN CONSTRUCCIÓN S.A. TEC 247).

Agente soluble en agua de alta tensión superficial y base proteica. Utilizando la recomendación del fabricante se tiene la siguiente dosificación:

13cc de Aditivo por cada 250 cc de Agua

Se optó por utilizar un tiempo de batido de 4 minutos 30 segundos tiempo en el cual se forma la espuma, y luego una adición de 2 minutos para afirmar la espuma. Se puede observar que para los ensayos realizados en un tiempo de batido de 4 minutos con 30 segundos los valores obtenidos de densidad tienen una menor variación a comparación de la dispersión generada por el tiempo de 6 minutos con 30 segundos, ver gráficos 4 y 5. Esto se debe a la rotura de burbujas generando un menor volumen de espuma y un mayor peso de espuma transformada en líquido.

Menor variación de la espuma conseguida para un tiempo de batido de 4 minutos 30 segundos en 10 intentos.

Conversión de Espuma-Líquido: Conforme transcurre el tiempo luego de generada la espuma se observa la destrucción de las mismas provocando una reducción del volumen, lo que será un factor que afecte el posterior mezclado de hormigón. Se realizó un análisis de la reducción de volumen de



Imagen No. 9.
Tiempo de generación de espuma de 15'30".

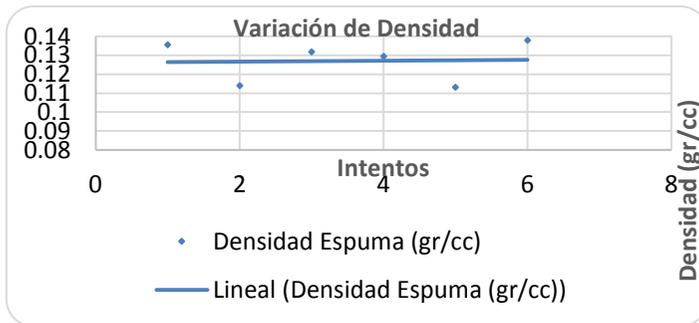


Gráfico No. 7. Número de intentos Vs. Densidad a los 15 minutos 30 segundos.

espuma en un transcurso de 10 minutos y así tener una tasa de cambio, para un tiempo batido de 4 minutos 30 segundos.

Tabla 11.
Volumen de espuma, densidad y tasa de cambio, al cabo de 10 minutos.

Vol. Espuma (cc)	Densidad Espuma (gr/cc)	Tasa de Cambio (cc/min)
7998.126	0.032	28.962
7708.501		
6788.014	0.038	27.689
6511.127		
6305.402	0.040	27.173
6033.676		
8217.338	0.032	43.671
7780.623		

Aditivo 2: Agente Espumante Comperlan proporcionado por la compañía Freire Mejía S.A., es un emulsionante a base de Silicona.

Utilizando la misma dosificación con tiempos de batido igual al Aditivo anterior (TEC 247) no se obtuvo una generación de espuma consistente, razón por la cual se optó por realizar varios intentos hasta obtener la siguiente dosificación:

Dosificación: 21 cc de Aditivo por cada 189 cc de Agua, con un Tiempo de batido de 15 minutos 30 segundos.

Un tiempo mayor a este no sería efectivo a la hora de realizar una mezcla de concreto y uno menor a este no genera la espuma necesaria para utilizarla en una mezcla, se puede observar que las dispersiones son realmente mínimas y un valor promedio puede ser utilizado como valor de densidad de espuma.

Conversión Espuma-Líquido: De la misma manera se realizó un análisis del cambio de espuma a líquido luego de transcurrido un tiempo de 45 minutos y 30 segundos, el aditivo demostró gran superioridad sobre el anterior ante la destrucción de burbujas, ya que en los ensayos la disminución en volumen de espuma fue de 5cc aproximadamente.

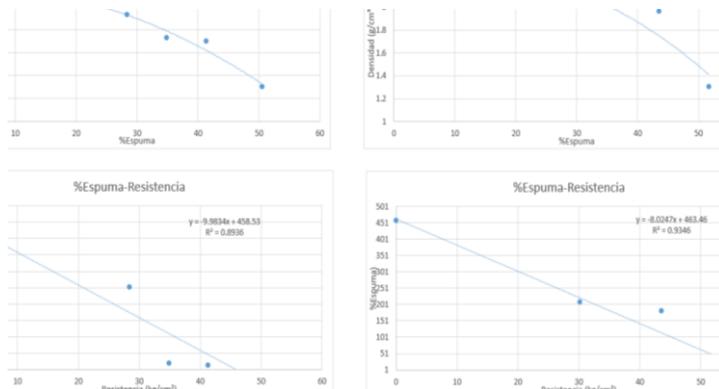


Gráfico No. 8. Comportamiento de los aditivos TEC27 y Comperlan en los HC.

Tabla 12.

Tasa de cambio de la espuma para 5 cc luego de transcurrido 45 min.

Densidad Espuma (gr/cc)	Tiempo Transcurrido	Transformación de espuma -> Líquido	Tasa de Cambio (cc/min)
0.1356	>= 45 min	<= 5cc	0.1025
0.1140	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
0.1318	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
0.1295	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
0.1132	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
0.1380	>= 45 min	<= 5cc	0.1107

Hasta aquí el análisis del comportamiento del agente espumante, sin mezclar con los demás componentes. A continuación se analiza el comportamiento de los dos aditivos espumantes frente a la mezcla con cemento, agua y áridos para la producción del hormigón celular.

Comportamiento de la Espuma en Mezclas de Hormigón Celular – HC

Como se observa en los siguientes cuadros, como resultado se tiene el comportamiento de la densidad y la resistencia a la compresión para diferentes porcentajes de espuma con cada uno de los tipos de aditivo generador; en la parte izquierda se tiene los correspondientes al Aditivo 1 TEC 247 y en la parte derecha los correspondientes al Aditivo 2 Comperlan. Se puede concluir de estos resultados que una mejor opción para las aproximaciones posteriores a los objetivos planteados para hormigón celular sería los correspondientes al Aditivo 1 TEC 247, presentando beneficios en resistencia y densidad sobre el Aditivo 2. Las mezclas realizadas con el Aditivo 2 presentan una pérdida mayor en resistencia a la compresión a la edad de 7 días en comparación de aquellas realizadas con el Aditivo 1 con pruebas realizadas a la misma edad, también se puede observar que los resultados de las mezclas obtenidas con el Aditivo 2 tienen una mayor inestabilidad presentando cambios extremadamente bruscos en densidad y resistencia a la compresión.

4.1.4. CEMENTO

Para la elaboración de los hormigones se utilizó el cemento Puzolánico Guapán, tipo IP, que cumple con la norma NTE INEN 490.

Relación agua/cemento a/c.- Este parámetro tiene importancia en la composición del hormigón ya que influencia sobre la resistencia, la durabilidad y la retracción del hormigón. Cuanto más baja es la relación a/c tanto más favorables serán las propiedades de la pasta endurecida. La hidratación completa de la pasta de cemento requiere de una relación agua/cemento de 0.2 aproximadamente que es la mínima para que se den las reacciones químicas en el cemento y endurezca.

Al agregar más agua se producen los siguientes efectos:

Disminución de la resistencia del hormigón que se explica por la disminución de la compacidad de la pasta de cemento.

Al aumentar la cantidad de agua en la mezcla mejora la trabajabilidad, una disminución de la relación a/c en 0.10 provoca un aumento de la resistencia en aproximadamente en 10 N/mm^2 (100 kg/cm^2) (Instituto del Cemento Portland ICPA, Mimeógrafo No. 148).

Todas estas consideraciones se toman en cuenta al momento de diseñar la mezcla de hormigón celular.

4.2. DISEÑO DE LA MEZCLA

En este apartado se describe el protocolo utilizado para el mezclado tanto para el hormigón convencional como el hormigón celular y su posterior muestreo. El procedimiento del mezclado es de importancia cuando se adicionan nuevos materiales o elementos a la mezcla. Al hormigón en estado fresco se realizan ensayos para determinar propiedades físicas como la trabajabilidad y densidad, luego se procede con el curado por sumersión de las probetas.

4.2.1. HORMIGÓN CONVENCIONAL (TESTIGO)

Para el diseño de la mezcla se lo utilizo lo recomendado por el ACI, que básicamente consiste en definir la relación agua/cemento en función de la resistencia del diseño del hormigón a los 28 días de edad de una probeta cilíndrica de relación altura diámetro 2:1, para el presente caso se

confeccionaron 9 probetas cilíndricas para ensayarlas a compresión a los 7, 14 y 28 días.

Mezclado.- Para el mezclado del hormigón convencional se realizó en forma mecánica utilizando para el efecto una concretera basculante, para el mezclado se procede de la siguiente manera:

- Se coloca el árido en la olla, previamente pesada y determinada la humedad.
- Se agrega un poco de agua y se da unas pocas vueltas en la mezcladora.
- Se detiene y se agrega el cemento y el resto de agua.
- Con todos los ingredientes colocados en la olla se mezcla durante 3 minutos.
- Se deja en reposo por otros 3 minutos.
- Se termina el mezclado luego de 2 minutos.

Curado.- Para el llenado y curado del hormigón en el cilindro se han observado las normas ASTM C-192.

Ensayos.- Resistencia a la compresión a los 28 días, resistencia 300.412 Kg/cm².

Densidad.- La densidad del hormigón a los 28 días es de 2.14 gr/cm³, la mezcla se la realizó con relación agua/cemento de 0.47.

4.2.2. HORMIGÓN CELULAR

Los materiales con los que se elabora el hormigón celular para la presente investigación se compone de cemento Guapán, arena de la mina Avathar de la mina de Santa Isabel, Agente espumante TEC 247, agua potable del consumo de la ciudad de Cuenca. El proceso de elaboración se lo realiza mediante la aplicación de las normas ASTM e INEN.

Para la obtención de las propiedades físico-mecánicas se los realiza observando las normas ASTM, INEN. Se confeccionan varias mezclas con diferentes dosificaciones con el propósito de estudiar las variaciones de la resistencia y densidad.

4.3. CANTIDADES DE MATERIAL: FORMULACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR

Dosificación por Volúmenes Aparentes

El principio de dosificación por volúmenes aparentes se tomó del ACI para mezclas de Hormigón convencional (No Celular), en donde para una resistencia deseada se utiliza una cantidad específica de material cementante, y a su vez con una relación agua/cemento, para un asentamiento deseado se obtiene los valores que al establecerlos en volúmenes aparentes su suma debe ser igual a 1000 lts.

A partir de este principio se estableció cantidades altas de material cementante para 1m^3 de hormigón que proporcionan resistencias altas. Se estableció una relación cemento-arena de 1:2 así la arena será dependiente de la cantidad de cemento. De la misma manera como relaciones bajas de agua/cemento producen resistencias altas, así se puede establecer una relación agua cemento baja ya que posteriormente la adición de espuma en la mezcla añadirá agua a la misma. De esta manera las variables como arena y agua están en función de la cantidad de cemento.

Como la suma de los volúmenes de los materiales incluida la espuma es de 1000 lts. se establece una función entre Volumen de espuma y Cantidad de cemento, y para diferentes cantidades de cemento se obtiene valores de volúmenes de espuma. Así se puede aplicar el principio de conservación de masa para estimar una densidad referencial esperada. La suma de las masas de los diferentes materiales divididos entre 1000 lts. de volumen dará la densidad teórica de la mezcla.

Expresando lo anterior se tiene que:

$$\begin{aligned}m &= \textit{masa} \\v &= \textit{volumen} \\d &= \textit{densidad} \\c &= \textit{cemento} \\s &= \textit{arena} \\w &= \textit{agua} \\e &= \textit{espuma}\end{aligned}$$

Dónde:

$vc + vs + vw + ve = 1000\text{lbs}$ y volumen = masa / densidad

$$\frac{mc}{dc} + \frac{ms}{ds} + \frac{mw}{dw} + \frac{me}{de} = 1000\text{lbs}$$

$$ms = 2mcy \frac{mw}{mc} = w/c$$

Entonces:

$$\frac{mc}{dc} + \frac{2mc}{ds} + \frac{\left(\frac{w}{c}\right) * mc}{dw} + ve = 1000\text{lbs}$$

Ahora se establece la función del Volumen de Espuma “ve” dependiente de la cantidad de cemento:

$$ve = 1000 - mc * \left(\frac{1}{dc} + \frac{2}{ds} + \frac{w}{c * dw} \right)$$

Dando valores a la cantidad de cemento se obtiene una función lineal Cemento-Espuma y al dividir la suma de las masas para los 1000 lbs se tiene una densidad teórica:

Con los datos obtenidos de los análisis, con una relación agua/cemento muy baja, con el uso del primer Agente Espumante estudiado (AE1 TEC 247) y el objetivo de una densidad de hormigón de 1.6 g/cm³ se obtiene:

$$dc = 3.15 \text{ g/cc}$$

$$ds = 2.52 \text{ g/cc}$$

$$dw = 1.00 \text{ g/cc}$$

$$w/c = 0.353$$

$$des = 0.0383 \text{ g/cc}$$

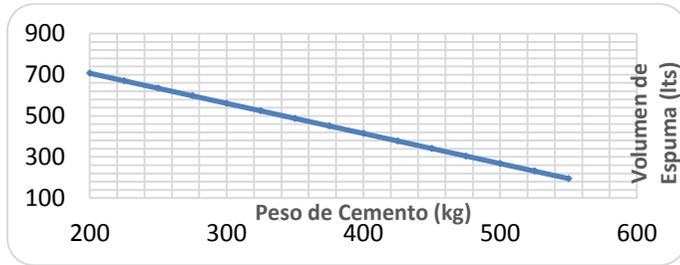


Gráfico No. 9. Relación de espuma vs. Cemento para 1m³ de Hormigón Celular.

Tabla 13.

Cálculos Varios, obtención mezcla de densidad 1.6 gr/cm³.

<i>mc (kg)</i>	<i>Ve (lts)</i>	<i>*Dhc (g/cc)</i>
200	707.178	0.698
225	670.575	0.780
250	633.972	0.863
275	597.369	0.945
300	560.767	1.027
325	524.164	1.110
350	487.561	1.192
375	450.958	1.275
400	414.356	1.357
425	377.753	1.439
450	341.150	1.522
475	304.547	1.604
500	267.944	1.687
525	231.342	1.769
550	194.739	1.852

*Dhc = Densidad de Hormigón Celular.

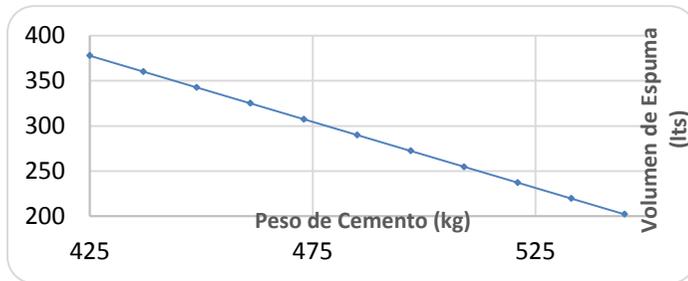


Gráfico No. 10. Relación de espuma vs. Cemento para 1m³ de Hormigón Celular.

Así se puede referenciar a aquellos datos que se asemejen a una densidad de 1.6 gr/cc, ampliando el estudio alrededor de este rango se tiene:

Tabla 14.
Masa de cemento para diferentes Volúmenes de espuma y densidades de Hormigón Celular.

Mc	Ves	Dhc
425	377.753	1.439
437	360.183	1.479
449	342.614	1.519
461	325.045	1.558
473	307.475	1.598
485	289.906	1.637
497	272.337	1.677
509	254.767	1.716
521	237.198	1.756
533	219.629	1.796
545	202.059	1.835

Ajustes por humedad de los áridos.- El método del ACI para el diseño del hormigón considera a los áridos en su condición ideal (no da ni toma agua de la mezcla), es decir Saturada Superficialmente Seca (SSS), pero los áridos pueden estar en cualquier condición de humedad, afectando directamente la cantidad de agua que debe emplearse para la mezcla, por lo que es necesario hacer la corrección por humedad y absorción. Las mezclas se realizaron en varios días y aleatoriamente, por lo tanto la humedad de los áridos no es igual, en consecuencia las cantidades de agua y áridos para las mezclas no es la misma y hay que tomarlos en cuenta.

DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDO AVATHAR

Tabla 15.

Dosificación del Hormigón Celular con Árido Avathar.

	Cemento	Arena	Agua	Espuma	Total	Unidad
Mezcla 1	485.000	970.000	171.205	11.107	1637.312	kg/m ³
	153.968	384.921	171.205	290.000	1000.094	lts
	2.829	7.074	3.146	5.329	18.378	lts
	8.913	17.825	3.146	0.204	30.085	kg
Mezcla 2	485.000	970.000	192.964	11.107	1659.071	kg/m ³
	153.968	384.921	192.964	290.000	1021.853	lts
	2.829	7.074	3.546	5.329	18.378	lts
	8.913	17.825	3.546	0.204	30.488	kg
Mezcla 3	485.000	970.000	171.222	27.768		kg/m ³
	153.968	384.921	171.222	725.010	1435.122	lts
Mezcla 4	Cemento	Arena	Agua	Espuma	Total	Unidad
	485.000	970.000	181.530	19.437	1655.967	kg/m ³
	153.968	384.921	181.530	507.493	1227.912	lts
	0.690	0.172	0.813	2.273	5.500	lts
	2.172	4.345	0.813	0.087	7.417	gr
Mezcla 5	485.000	970.000	192.782	15.029	1662.811	kg/m ³
	153.968	384.921	192.782	392.412	1124.083	lts
	1.917	4.794	2.401	4.887	14.000	lts
	6.039	12.081	2.401	0.187	20.701	kg

Cuadro resumen de proporciones de materiales, para diferentes mezclas realizadas con el árido Avathar, las cantidades se representan en peso y volumen para 1m³, y en volumen y peso para 9 cilindros de hormigón celular.

Mezcla 1: Proporciones de material para una densidad de 1.637 gr/cm³. Esta dosificación sin la adición de espuma posee una relación $\frac{a}{c} = 0.353$, al añadir espuma a la mezcla esta relación cambia a $\frac{a}{c} = 0.38$.

Esta dosificación condujo a un hormigón seco cuyo asentamiento fue de 1cm. medido en el cono de Abrams. Se optó por aumentar una cantidad de agua a la dosificación anterior obteniendo así una segunda dosificación.

Mezcla 2: Relación $\frac{a}{c} = 0.421$ y densidad: 1.96 g/cm³ y resistencia 253.06 kg/cm².

Mezcla 4: Con el objetivo de reducir la densidad se aumentó la cantidad de espuma, manteniendo constante la cantidad de cemento y árido, la cual con una relación $\frac{a}{c} = 0.421$ y resultado: densidad 1.73 g/cm³ y resistencia 13.05 kg/cm².

Mezcla 5: A causa de que la mezcla anterior resulto muy fluida se modificó la cantidad de espuma para una tercera mezcla y así observar el comportamiento, se puede notar que, aunque una mezcla luzca seca la adición de espuma puede cambiar esto notablemente, la cual posee ahora una relación $\frac{a}{c} = 0.43$ y resultado: densidad 1.76 g/cm³ y resistencia 19.34 kg/cm².

Si bien en las primeras mezclas la cantidad de espuma añadida logró alivianar al hormigón entre un 15% y un 20%, se busca establecer esta relación densidad-espuma para obtener un hormigón de densidad aún menor.

Mezcla 3: Observando las dosificaciones primeras, se ha optado por aumentar la cantidad de espuma en 2.5 veces su volumen de la mezcla 2, así podremos analizar los resultados “extremos” de un volumen grande de espuma; se reducirá la cantidad de agua excedida por el aumento de espuma, de la dosificación original, **ver cuadro mezcla 3**. El volumen de espuma es el 50.5% de la mezcla.

Los resultados que se obtienen dan un hormigón acuoso con una densidad fresca de 1.33 g/cc. En esta mezcla también se pudo observar que al diseñar para un volumen de 4 probetas la cantidad de hormigón que se obtuvo fue de algo más de una probeta, lo que permite concluir que durante la mezcla un porcentaje de burbujas en la espuma se rompe.

En mezclas posteriores con las mediciones realizadas se determina que alrededor del 60% de la espuma se rompe durante el mezclado.

Esta mezcla al día siguiente del mezclado para desencofrar la probeta se observa que el hormigón no ha fraguado, es decir estaba en un estado líquido-espumosa. En este punto se analizó el comportamiento del aditivo espumante frente a la reacción química con los áridos, el resultado es que el

aditivo no reacciona químicamente con los áridos, este procedimiento se realizó en forma visual y física (mezclando arena agente espumante y luego lavado y pesado), llegando a la conclusión de que el aditivo espumante es inerte frente a los áridos; luego se analizó el comportamiento del agente espumante frente al cemento; añadiendo más cantidad de espuma a la mezcla, llega a un punto en que el cemento no fragua, por lo que se tiene un límite de 41.3% de volumen de espuma, ver **mezcla 4**, es decir que a cantidades mayores de agente espumante este ya no permite reaccionar con el cemento y la mezcla no fragua.

El proceso de “ensayo, prueba, análisis del resultado” continúa, variando otros parámetros hasta ir agotando las posibilidades, como reemplazar parte de la cantidad de arena por árido liviano (Chasqui) con el fin de bajar la densidad de la mezcla.

DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDO AVATHAR Y CHASQUI

Se optó por reemplazar un porcentaje del árido (arena Avathar) por árido liviano (Chasqui) para alivianar el hormigón con aumento de espuma para obtener un hormigón de densidad menor, claro está que con esta combinación de áridos repercutirá en la resistencia.

El árido liviano utilizado es aquel que es retenido por el tamiz No. 8 y pasante el No. 4.

En el siguiente cuadro se presenta la proporción de materiales utilizados para las mezclas: cemento, arena, árido liviano (Chasqui), agua, espuma.

Tabla 16.
Dosificación del Hormigón Celular con Árido Avathar y Chasqui.

	Cemento	Arena	Chasqui	Agua	Espuma	Total	Unidad
Mezcla 1	440.818	528.518	352.345	175.554	10.088	1507.325	(Kg)
	139.942	209.729	211.365	175.554	263.408	1000.000	(L)
	1.809	2.711	2.733	2.270	3.406	12.930	(L)
	5.700	6.834	4.556	2.270	0.130	19.490	(Kg)
Mezcla 2	433.109	778.913	86.545	235.550	10.185	1544.305	(Kg)
	137.495	309.092	51.917	235.550	265.944	1000,00	(L)
	1.809	4.067	0.683	3.100	3.500	13.160	(L)
	5.700	10.251	1.139	3.100	0.134	20.324	(Kg)
Mezcla 3	442.542	840.055	44.254	227.870	10.407	1565.130	(Kg)
	140.489	333.355	26.547	227.870	271.736	1000,00	(L)
	1.809	4.293	0.341	2.935	3.500	12.880	(L)
	5.700	10.820	0.570	2.935	0.134	20.159	(Kg)
Mezcla 4	434.827	782.003	86.889	232.518	10.226	1546.464	(Kg)
	138.040	310.318	52.123	232.518	266.999	1000,00	(L)
	1.809	4.067	0.683	3.048	3.500	13.108	(L)
	5.700	10.251	1.139	3.048	0.134	20.272	(Kg)
Mezcla 5	437.430	786.684	87.409	227.924	10.287	1549.735	(Kg)
	138.866	312.176	52.435	227.924	268.597	1000.000	(L)
	1.809	4.067	0.683	2.970	3.500	13.030	(L)
	5.700	10.251	1.139	2.970	0.134	20.194	(Kg)
Mezcla 6	419.284	712.048	125.785	251.423	9.860	1518.401	(Kg)
	133.106	282.558	75.456	251.423	257.455	1000.000	(L)
	1.809	3.841	1.025	3.418	3.500	13.594	(L)
	5.700	9.680	1.710	3.418	0.134	20.642	(Kg)
Mezcla 7	465.351	901.965	27.921	191.855	10.943	1598.036	(Kg)
	147.730	357.922	16.749	191.855	285.742	1000.000	(L)
	1.809	4.384	0,205	2.350	3.500	12.248	(L)
	5.700	1.048	0,342	2.350	0.134	19.574	(Kg)
Mezcla 8	463.787	880.382	46.378	190.803	10.907	1592.260	(Kg)
	147.234	349.358	27.821	190.803	284.781	1000,00	(L)
	1.809	4.293	0.341	2.345	3.500	12.290	(L)
	5.700	10.820	0.570	2.345	0,134	19.569	(Kg)
Mezcla 9	461.318	874.922	46.035	199.009	10.713	1.592	(Kg)
	146.450	347.191	27.616	199.009	279.732	1000.000	(L)

	1.832	4.344	0.345	2.490	3.500	12.511	(L)
	5.772	10.947	0.576	2.490	0.134	19.919	(Kg)
	436.846	786.197	87.380	296.107	7.691	1614.223	(Kg)
Mezcla	138.681	311.983	52.417	296.107	200.809	1000.000	(L)
10	2.417	5.437	0.913	5.161	3.500	17.429	(L)
	7.614	13.703	1.523	5.161	0.134	28.135	(Kg)
	460.206	874.296	45.996	267.819	8.102	1656.421	(Kg)
Mezcla	146.097	346.943	27.592	267.819	211.547	1000.000	(L)
11	2.417	5.740	0.456	4.431	3.500	16.544	(L)
	7.614	14.465	0.761	4.431	0.134	27.405	(Kg)

Todas las mezclas se realizan con una dosificación al 28% de espuma en volumen total de la mezcla.

Mezcla 1: Con una relación $\frac{a}{c} = 0.43$ y resultado a los 28 días densidad 1.57 g/cm³ y resistencia 54.63 kg/cm².

Dosificación con el 60% de reemplazo con respecto a la arena, se espera una densidad teórica de alrededor 1.72 (g/cm³), considerando un 60% de burbujas que se rompe durante la mezcla; como se puede ver en los resultados la densidad es aún menor que la teórica.

Mezcla 2: Dosificación con el 10% de reemplazo con respecto a la arena, con una relación $\frac{a}{c} = 0.58$ a los 7 días da una densidad de 1.75 g/cm³ y resistencia de 74.64 kg/cm². A los 28 días se tiene una densidad de 1.73 g/cm³ y resistencia de 165.78 Kg/cm².

Reduciendo el porcentaje de reemplazo de Chasqui se aumenta la densidad con resistencia mayor.

Mezcla 3: Reemplazo del 5% con respecto a la arena, con una relación $\frac{a}{c} = 0.55$, a los 28 días densidad 1.70g/cm³ y resistencia de 116.83 kg/cm².

Con respecto a la mezcla 2, las densidades se mantienen prácticamente iguales, notándose una disminución en la resistencia.

Mezcla 4: Reemplazo del 10% con respecto a la arena, relación $\frac{a}{c} = 0.57$ y una fluidez de 87.9 cm, a los 28 días, la densidad es de 1.73g/cm³ y resistencia de 117.53kg/cm².

A comparación de la mezcla 3, pero con mayor cantidad de agua, se puede observar un pequeño decremento en la resistencia y densidad.

Mezcla 5: Reemplazo del 10% con respecto a la arena, $\frac{a}{c} = 0.55$ y una fluidez de 82.9cm: a los 28 días la densidad es de 1.69g/cm³ y 104.40 kg/cm².

Mezcla 6: La siguiente mezcla con reemplazo del 15%, se la realizó para ver la variación de porcentaje reemplazado en árido y su comportamiento o afección sobre la mezcla. Con una relación $\frac{a}{c} = 0.63$ y una fluidez de 87.5cm: a los 28 días la densidad es de 1.57 g/cm³ y resistencia de 59.33kg/cm².

Mezcla 7: Con porcentaje de reemplazo Chasqui en 3% con respecto a la arena se tiene, relación $\frac{a}{c} = 0.412$ y una fluidez de 74cm: a los 28 días densidad de 1.65g/cm³ y resistencia de 38.93kg/cm².

La relación a/c está dentro de los rangos normales, la resistencia es muy baja. Se tiene una fluidez que muestra una mezcla seca. En cuanto a la densidad se observa que en un principio tiene una densidad de 1.64 gr/cm³, disminuyendo a 1.56 y subiendo al final a 1.65 gr/cm³.

Mezcla 8: Con estos resultados se procede a realizar la mezcla con el 5% de reemplazo de arena para analizar el comportamiento:

Para una relación $\frac{a}{c} = 0.411$ y una fluidez de 74.5cm: a los 28 días se tiene una densidad de 1.7 g/cm³ y resistencia de 28.96 kg/cm².

Es la mezcla con menor resistencia que se ha obtenido, la relación agua cemento es la misma que la mezcla 7.

Mezcla 9: Con el objeto de aumentar la resistencia se procede a reducir en 1.4% el volumen de espuma utilizado para la mezcla en un mismo porcentaje de 5% de la masa de arena teniendo:

Para una relación $\frac{a}{c} = 0.431$ y una fluidez de 76cm: a los 28 días, densidad 1.66g/cm³ y resistencia de 80.95 kg/cm².

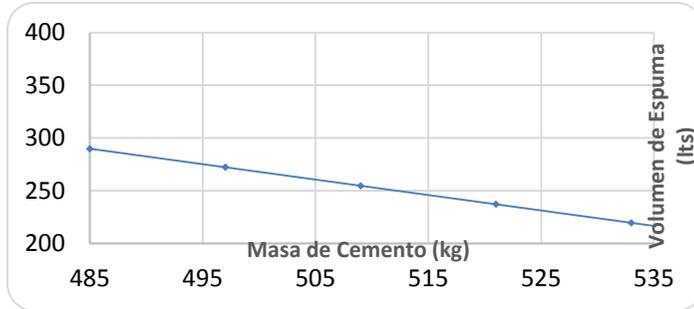


Gráfico No. 11. Relación masa de cemento vs. Volumen de espuma para 1 m³ de Hormigón Celular.

Mezcla 10: Con porcentaje de reemplazo del 10% y relación $\frac{a}{c} = 0.678$ con una fluidez de 100 cm: a los 28 días, densidad de 1.56g/cm³ y resistencia de 67.01 kg/cm².

Mezcla 11: Con 5% de reemplazo de arena, para una relación $\frac{a}{c} = 0.582$ y una fluidez de 96 cm: a los 28 días, densidad de 1.51 g/cm³ y resistencia de 49.14 kg/cm².

A partir de todos estos resultados con diferentes cantidades de materiales se puede plantear una dosificación para utilizarla en el estudio del comportamiento de la resistencia a la compresión, flexión, tracción, determinación módulo de elasticidad y coeficiente de poisson. Para esto se planteará los siguientes datos:

$$\frac{a}{c} = 0.57$$

$$\%Chasqui = 0.2Mc = 0.1Ms$$

$$\frac{Ms}{Mc} = 2.2$$

$$d = 1.7 \text{ g/cm}^3$$

A partir del primer análisis se tiene los siguientes valores:

Tabla 17.

Masa de cemento para el Volumen de espuma y densidad de Hormigón Celular.

Mc	Ves	dhc
509	254.767	1.716

Tabla 18.

Cantidades de material para elaborar 1 m³ de Hormigón Celular.

Cemento	Arena	Chasqui	Agua	Espuma	Total	Unidad
434.57	869.16	86.92	247.71			kg
137.96	344.90	52.14	247.71	217.29	1000.00	lts

Tabla 19.

Para un volumen de 28 lts se tiene (mediante regla de tres).

Cemento	Arena	Chasqui	Agua	Espuma	Total	Unidad
3.863	9.657	1.460	6.936	6.084	28.000	lts
12.168	24.336	2.434	6.936			kg

Una vez obtenidas las cantidades de material para realizar la mezcla se procede a determinar el porcentaje de humedad de los áridos para así corregir su peso y la cantidad de agua que se agregará a la mezcla.

El Volumen de Espuma (6.084 lts) se obtendrá mediante dosificación de 13 cc de aditivo generador en 250 cc de agua para cada 5 lts de espuma, en un tiempo de batido de 4 minutos 30 segundos. Las humedades determinadas corresponden a: 61.25% para el Agregado Liviano (Chasqui) y 26.23% para el árido fino. Con esto se determina la cantidad de agua.

4.4. ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR

Se elabora el hormigón en base al agente espumante TEC 247, la espuma se incluye en el periodo de mezclado de la siguiente manera, primero se coloca en la mezcladora los áridos, el cemento, el agua, mezclado por tres minutos, reposo por tres minutos y por último se añade el agente espumante como u agregado más, se bate por dos minutos. Concluido el período de mezclado, se obtiene una mezcla homogénea y de consistencia cremosa.

De la experiencia obtenida en la elaboración de las probetas se observa que la cantidad requerida de agente espumante para obtener un hormigón celular de una densidad específica depende de los siguientes factores:

- a) Tipo de mezcladora utilizada.
- b) Cantidad de materiales componentes mezclados.
- c) Relación agua/cemento.

- d) Proporciones de la mezcla.
- e) Tipo y calidad del agente espumante utilizado.
- f) Instante en que se adiciona el agente espumante.
- g) Duración del período de mezclado.
- h) Velocidad de mezclado.

4.5. EQUIPO

Para el mezclado se realizó por método mecánico, empleando una concretera, provista de un tambor giratorio de eje inclinado con una capacidad de 350 litros y que rota a una velocidad de 25 rpm. Este procedimiento de mezclado es el que brinda buenas condiciones de homogeneidad y resistencia al hormigón.

4.6. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

Al igual que para el mezclado del hormigón convencional, para el hormigón celular se realizó en forma mecánica, utilizando para el efecto una concretera basculante. La Norma ASTM C 192 especifica la técnica a seguir para la obtención del hormigón:

- Se coloca el árido en la olla, previamente pesada y determinada la humedad.
- Se agrega un poco de agua y se da unas pocas vueltas en la mezcladora.
- Se detiene y se agrega el cemento y el resto de agua.
- Con todos los ingredientes colocados en la olla se mezcla durante 3 minutos.
- Se deja en reposo por otros 3 minutos.
- Se agrega el agente espumante.
- Se termina el mezclado luego de 2 minutos.

Finalmente, y para evitar segregaciones, se deposita la mezcla en una bandeja de metal previamente humedecida, se mezcla con una pala hasta que presente un aspecto uniforme. Con la mezcla obtenida se hace la prueba de asentamiento y posteriormente se elaboran las probetas, se pesan y se procede con el curado.



Imagen No. 10.
Medición del asentamiento en el cono de Abrams.



Imagen No. 11.
Ensayo de Fluidez en el mortero, mesa de flujo.

4.7. TRABAJABILIDAD Y FLUIDEZ

Trabajabilidad.- Una mezcla bien diseñada debe ser capaz de ser mezclada, transportada, colocada y compactada con el equipo disponible. La consistencia del hormigón es una medida de su resistencia a fluir o ser deformado.

Para la determinación del asentamiento se utilizó el Cono de Abrams que debe cumplir con la Norma INEN 1578.

Cono de Abrams: cono truncado de metal, diámetro en la base 200 mm y diámetro superior 100 mm, altura de 300 mm.

Varilla de compactación: de acero, recta, lisa y con puntas redondeadas, diámetro de 16 mm y longitud de 600 mm.

Instrumento de medida: regla o cinta de metal marcado con incrementos de 5 mm o menos, con una longitud de 300 mm.

Cucharón: lo suficientemente grande para evitar que el material se derrame por el cono.

A mayor asentamiento, mayor fluidez (menor consistencia), el hormigón celular se confecciona sin gravas y posee una excelente trabajabilidad (Legastski 1978, Rakhimbaev et al 2005; Fouad 2006) y muestra también propiedades autonivelantes ya que puede ser colocado en obra sin el uso de vibradores.

Fluidez.- Para la determinación de la fluidez se utilizó la mesa de flujo, Norma ASTM C-230, AASHTO M-152, el ensayo se realiza llenando el molde y enrazando, se limpia y seca la plataforma de la mesa. Después de un minuto de terminado la operación de mezclado, se retira el molde, levantando y dejando caer la mesa de flujo desde una altura de 12.7 mm 25 veces en 15 segundos. Luego se mide el diámetro de la base de la muestra, en cuatro puntos equidistantes y se calcula el diámetro promedio.

4.8. MUESTREO, ELABORACION DE LAS PROBETAS

Una vez realizada la mezcla se procede a la elaboración de las probetas que servirán para los ensayos físico-mecánicos del hormigón.

Para la elaboración de las probetas se coloca la mezcla en moldes metálicos cilíndricos de relación alto/diámetro 2:1. Estos moldes deben ser previamente pesados, lubricados con aceite para evitar adherencia de material y posteriores deformaciones por desmolde, es importante también asegurarlos con el fin de evitar el escape de material o posible segregación de agua que puede afectar al hormigón.

El llenado de la mezcla dentro de los cilindros se realizó tomando en cuanto a los parámetros establecidos por la norma INEN 576 en su numeral 5.6, que se pueden resumir mediante el siguiente procedimiento:

Colocar el hormigón moviendo el cucharón alrededor de la abertura del molde para lograr una distribución del hormigón con la mínima segregación.

La colocación del hormigón en el molde se realiza en 3 capas distribuidas uniformemente.

La compactación del hormigón se realizó mediante varillado, con el equipo detallado anteriormente. Cada capa de hormigón debe ser varillada con un número total de 25 golpes por capa; el número de golpes depende de las dimensiones del molde.

Terminado de colocar la mezcla en los moldes se debe evitar en lo posible su transporte, pues el movimiento excesivo del hormigón en estado fresco puede provocar segregación. Se coloca las probetas en un lugar seco y protegido del medio ambiente dentro del laboratorio.

Las probetas permanecen dentro de los moldes un mínimo de 24 horas, de acuerdo con lo establecido en la norma INEN 576, después de este tiempo se retira de los moldes y se precederá con el curado.

4.9. CURADO

Para el curado de las probetas se realizó por inmersión en agua, de acuerdo a la norma INEN 576.

Para que el cemento continúe con el proceso de hidratación se mantuvo sumergido las probetas hasta el respectivo día de la rotura y así evitar la evaporación que pueden provocar fisuras y finalmente afectar la resistencia del hormigón.

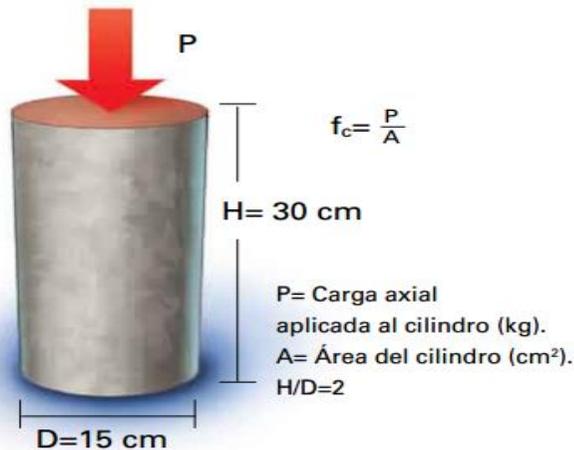


Ilustración No. 1.
Configuración de la carga y dimensiones probeta.

CAPÍTULO V

5. ENSAYOS MECÁNICOS

5.1. CONSIDERACIONES PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Se emplean moldes cilíndricos con relación de alto a diámetro H/D de 2. Los ensayos se realizan para los 7, 14 y 28 días, mínimo tres pruebas por tipo de ensayo se trabaja con el valor promedio de estos probados al mismo tiempo; los ensayos son de compresión, tracción y flexión.

5.1.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

Las caras de las probetas (cilindros) se comprueban que sean planas, en caso que no sea planas se refrentan con mortero de azufre Norma ASTM C617.

Los cilindros se ensayan en estado húmedo; se llevan a la máquina de ensayo y se aplica carga a una velocidad constante (1.4 a 3.5 kg/cm²/seg. 0.14 a 0.35 MPa/seg) hasta que el cilindro falle.

Previo a realizar el ensayo, se pesa y se toma las medidas de cada probeta para calcular la densidad del concreto endurecido.

Cada probeta se coloca entre las mordazas de la máquina “prensa universal”, se procede a dar carga hasta la rotura, se lee la carga en la carátula de la prensa. Dividiendo la carga para el área de la cara de la probeta obtenemos la resistencia del concreto. Ensayo de resistencia a la compresión Norma ASTM C39.

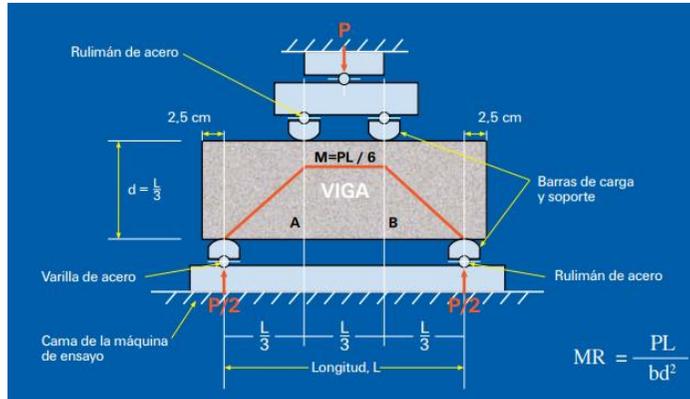


Ilustración No. 2.

Configuración de la carga de la prueba de resistencia a la flexión.

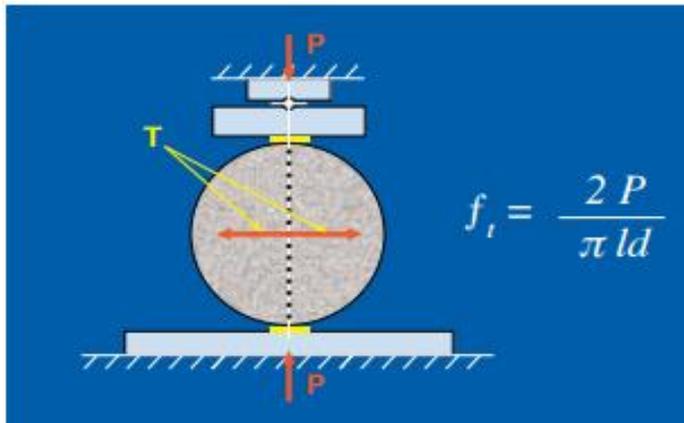


Ilustración No. 3.

Configuración de la carga y rotura del ensayo a tracción.

5.1.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto por flexión. Para la determinación del Módulo de Ruptura (MR) se confeccionó vigas de 150x150 mm de sección transversal con una longitud de 500 mm. se aplica la carga en los tercios de la viga hasta la rotura, la separación entre apoyos es de 450 mm, determinada mediante la Norma ASTM C-78. Las probetas se ensayan cuando se retiran del ambiente húmedo, velocidad de aplicación de la carga de 0.86 a 1.21 MPa/minuto, (8.6 a 12.1 kg/cm2/minuto).

Para determinar el módulo de rotura (MR) se empleó la fórmula:

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Dónde:

P: Carga de la prensa aplicada en kg.

L: Distancia entre apoyos de la viga en mm.

b: Ancho de la viga en mm.

d: Alto de la viga en mm.

El Módulo de Ruptura (MR) está entre el 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, tamaño y volumen del agregado grueso utilizado. (CIP 16 – Resistencia a la Flexión del Concreto, National Ready Mixed Concrete Association, www.nmca.org)

5.1.3. ENSAYO DE TRACCIÓN

La resistencia a la tracción tiene importancia en el agrietamiento del hormigón debido a la contracción inducida por el secado o por disminución de la temperatura. Los hormigones preparados con agregados livianos, se contraen considerablemente más que los normales. (Corral Ramón PHD, Tecnología del concreto y sustentabilidad en la industria de la construcción)

Para el ensayo de tracción se aplicó el método indirecto, según Norma ASTM C496.

La resistencia a la tracción se determina cargando a compresión el cilindro estándar de 15 cm de diámetro por 30 cm de longitud a lo largo de dos líneas axiales diametralmente opuestas; la elaboración y curado de los cilindros se realiza en forma similar al ensayo de resistencia a la compresión; la velocidad de aplicación de la carga de 0.7 a 1.5 Mpa/min (7 a 15 en kg/cm²/min). La resistencia a la tensión indirecta se calcula con la siguiente ecuación:

$$RT = \frac{2 * P}{\pi * L * D}$$

Dónde:

RT: Resistencia a la tracción o tensión indirecta de un cilindro en kg/cm²

P: Carga máxima aplicada (kg)

L: Longitud del cilindro (cm)

D: Diámetro del cilindro (cm)

5.1.4. OBTENSIÓN DE MÓDULO ELÁSTICO Y RELACIÓN DE POISSON Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (E) del concreto es la medida de la deformación que sufriría el material bajo condiciones de carga de corta duración en el rango elástico. El módulo de elasticidad del Hormigón Celular está en relación con su densidad y resistencia a la compresión; es bajo con relación al concreto convencional. (Nuevas tecnologías en Concretos, Memorias 2008, Mtro, Alejandro Cervantes Abarca)

Norma ASTM C469 Método de prueba estándar para la determinación del módulo de elasticidad estático y el coeficiente de Poisson del hormigón en compresión. Al no existir un tramo recto en la curva esfuerzo – deformación el módulo de Elasticidad se calcula como módulo secante por la siguiente relación:

$$Ec = \frac{(S2 - S1)}{(E1 - 0.000050)}$$



Ilustración No. 4.
Ensayo para la determinación del módulo de Elasticidad.

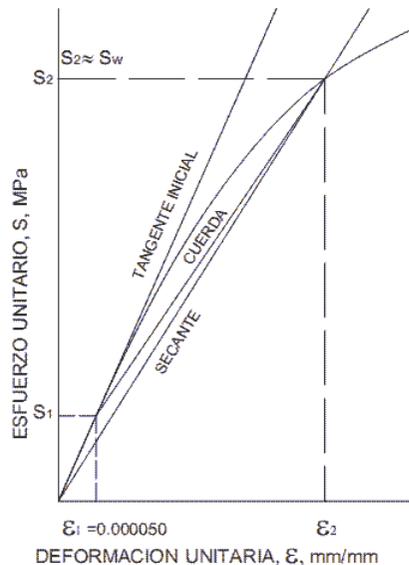


Gráfico No. 12. Curva Esfuerzo Deformación del Hormigón y determinación del Módulo Secante.

Donde:

- S2: Esfuerzo correspondiente al 40% de la resistencia.
- S1: Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria de 50 millonésimas.
- E1: Deformación unitaria longitudinal, producida por el esfuerzo S2.

Coefficiente de poisson

Representa la relación entre la medida de la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria longitudinal o axial del espécimen a probar, determinado por la Norma ASTM C-469, durante la prueba de compresión de un cilindro estándar.

$$U = \frac{Et2 - Et1}{E1 - 0.000050}$$

Donde:

- Et2: Deformación transversal unitaria, a mitad de altura del espécimen, producida por el esfuerzo S2.
- Et1: Deformación transversal unitaria, a mitad de altura del espécimen, producida por el esfuerzo S1.
- E1: Deformación unitaria longitudinal, producida por el esfuerzo S2.

Conociendo este valor, se podrá determinar las deformaciones de los elementos en los demás ejes y por tanto calcular los esfuerzos en esos ejes.

5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Tratamiento 1.- Se presenta a continuación el cuadro resumen de resistencia a la compresión y densidades de 7 mezclas, ensayados sobre cilindros a los 7, 14 y 28 días, empleando árido Avathar y con varios porcentajes de agente espumante AE1 TEC 247, mezclas 1, 2, 3, 4, 5; para el detalle de las mezclas ver Anexo C.

5.2.1. HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDO AVATHAR Y AGENTE ESPUMANTE

(TRATAMIENTO 1)

Tabla 20.

Resistencia a la compresión y densidad del HC a los 7, 14 y 28 días, para varios porcentajes de agente espumante.

N° Mezcla	Volumen Cemento (Litros)	Volumen Arena (Litros)	Volumen Agua (Litros)	Volumen Espuma (Litros)	Vol. Total (lts)	% Espuma en la Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²) y densidad						
							7 días	d7	14 días	d14	28 días	d28	w/c
1 Testigo	153.968	384.921	225.639	0	764.528	0	163.42	2.18	212.10	2.16	300.412	2.14	0.47
2	153.968	384.921	192.964	290.000	1021.853	28.4	147.05	1.93	176.93	1.96	253.06	1.96	0.41
5	153.968	384.921	192.782	392.412	1124.083	34.9	10.52	1.73	13.65	1.76	19.34	1.76	0.43
4	153.968	384.921	181.53	507.493	1227.912	41.3	7.10	1.70	*9.22	*1.73	*13.05	*1.73	0.41
3	153.968	384.921	171.222	725.010	1435.121	50.5	0.00	1.30	*0.00	*0.00	*0.00	*1.33	0.61
2	150.159	375.397	185.842	308.000	1019.398	30.2	127.62	2.01	185.02	2.03	207.79	2.05	0.48
4	150.159	375.4	161.676	530.000	1217.235	43.5	123.94	1.96	160.86	1.98	180.66	*2.00	0.49
3	150.159	375.397	192.972	770.000	1488.528	51.7	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00	*0.00	0.62

* Valores en negrita porcentaje de espuma mayor al 30% y resistencias muy bajas.

5.2.2. HORMIGÓN CELULAR CON ÁRIDO AVATHAR, CHASQUI Y AGENTE ESPUMANTE

Tratamiento 2.- se presenta cuadro resumen de resistencia a la compresión y densidades de 11 mezclas, ensayados sobre cilindros a los 7, 14 y 28 días, empleando árido Avathar, árido Chasqui y agente espumante AE1 TEC 247, para el detalle de las mezclas ver Anexo D.

(TRATAMIENTO 2)

Tabla 21.

Resistencia y densidad del HC a los 7, 14 y 28 días, para varios porcentajes de agente espumante y agregado ligero.

Mezclas	Cuadro Resumen															Promedio										
	C (kg)	S (kg)	Ch (kg)	a (kg)	Esp (cc)	% Ref	Global Ch (Peso)	% Teórico Esp	% Esp Efectiva	w/c	d7	R7	d28	R28	w/c	d7	R7	d28	R28	w/c	d7	R7	d28	R28		
12	5.7	10.251	1.139	3.5	0	0	0.200	0.000	0.000	0.614	2.04	118.25	2.09	278.2												
Testigo						0		28.478		0.41	1.9	147.05	2	253.06												
7	5.70	11.05	0.34	2.35	3500	3.00	0.06	28.57	13.65	0.41	1.63	17.70	1.65	38.93												
8	5.70	10.82	0.57	2.35	3500	5.00	0.10	28.48	13.59	0.41	1.67	18.75	1.70	28.96	0.42	1.66	26.00	1.68	54.96							
9	5.77	10.95	0.58	2.49	3500	5*27	0.10	27.97	13.30	0.43	1.65	33.24	1.66	80.95						0.49	1.66	37.06	1.64	68.97		
3	5.70	10.82	0.57	2.94	3500	5.00	0.10	27.17	12.86	0.55	1.73	58.62	1.70	116.83	0.57	1.65	48.13	1.61	82.99							
11	7.61	14.47	0.76	4.43	3500	5.00	0.10	21.15	9.62	0.58	1.57	37.64	1.51	49.14												
5	5.70	10.25	1.14	2.97	3500	10.00	0.20	26.86	12.68	0.55	1.68	59.56	1.69	104.40	0.56	1.70	61.10	1.71	110.97							
4	5.70	10.25	1.14	3.05	3500	10.00	0.20	26.70	12.59	0.57	1.72	62.64	1.73	117.53						0.59	1.70	60.72	1.68	113.68		
2	5.70	10.25	1.14	3.10	3500	10.00	0.20	26.59	12.53	0.58	1.75	74.64	1.73	165.78	0.63	1.70	60.34	1.65	116.40							
10	7.61	13.70	1.52	5.16	3500	10.00	0.20	20.08	9.07	0.68	1.65	46.04	1.56	67.01												
6	5.70	9.68	1.71	3.42	3500	15.00	0.30	25.75	12.06	0.63	1.55	37.19	1.57	59.33												
1	5.70	6.83	4.56	2.27	3406	60.00	0.80	26.34	12.39	0.43	1.55	30.05	1.57	54.63												

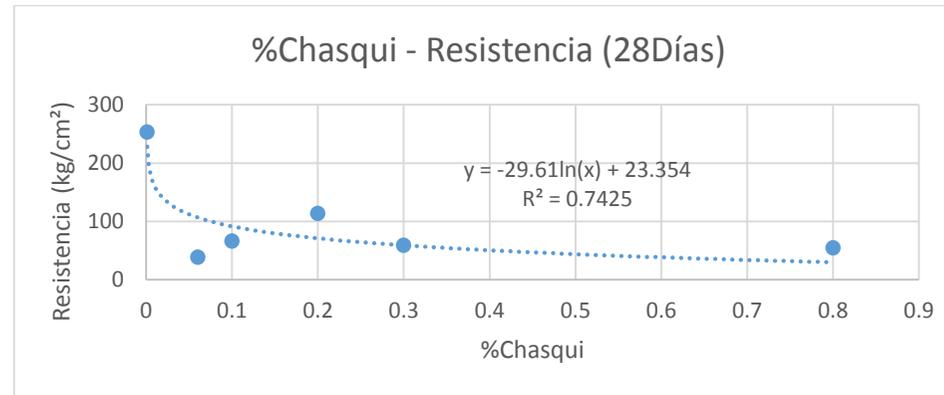


Gráfico No. 13. Porcentaje de Chasqui reemplazado vs. Resistencia de HC a los 28 días.

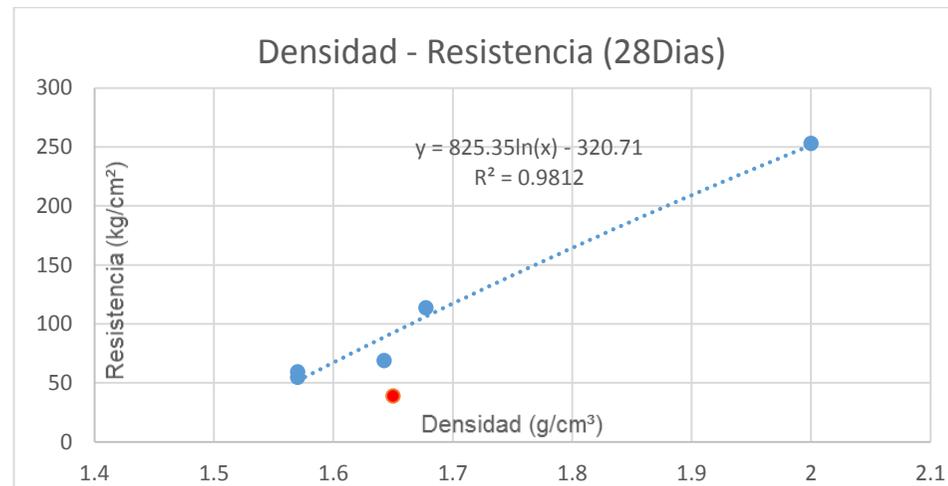


Gráfico No. 14. Densidad vs. Resistencia del HC a los 28 días.

5.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos en los ensayos realizados del hormigón endurecido convencional (testigo) y los hormigones con distintas mezclas (variación en porcentaje del agente espumante) tanto para el tratamiento 1 con árido Avathar, y para el tratamiento 2 con árido Avathar y Chasqui se muestra en las Tablas 19 y 20 respectivamente, los valores son las medias de las densidades y resistencias a compresión para las edades de 7, 14 y 28 días; en la presente investigación se enfoca en los resultados obtenidos a los 28 días de edad de los hormigones.

5.3.1. ALTERNATIVA 1

La tabla 19 muestra el resumen de las densidades y resistencias promedio obtenidas, para el hormigón testigo (0% de sustitución) y para cada mezcla el porcentaje en volumen utilizado de agente espumante. Cada valor de la densidad y resistencia corresponde al promedio de las probetas ensayadas para cada mezcla, la información con los valores individuales para cada mezcla se muestran en el Anexo C.

Análisis de la densidad: A la edad de 28 días para el testigo (0%) se tiene una densidad de 2.14 gr/cm³ referencia del 100%, para los diferentes porcentajes de agente espumante 28.4%, 34.9%, 41.3%, 50.5% se obtuvieron densidades de 1.96, 1.76, 1.73 y 1.33 gr/cm³, los porcentajes con respecto al testigo varían desde el 90%, 82%, 80%, 62%, lo que indica que a mayor volumen de agente espumante presente en la mezcla disminuye la densidad.

En el siguiente gráfico se aprecia la variación de la cantidad de espuma contenida en la mezclas con respecto a la densidad de los hormigones a los 28 días lo cual concuerda con los datos obtenidos por estudios semejantes (Liu & Chen, 2014), existe variación de densidad de los 7 a los 14 días se observa que conforme aumenta la edad de los hormigones aumenta la densidad, manteniéndose constante de los 14 días en adelante lo cual se puede atribuir al proceso de hidratación.

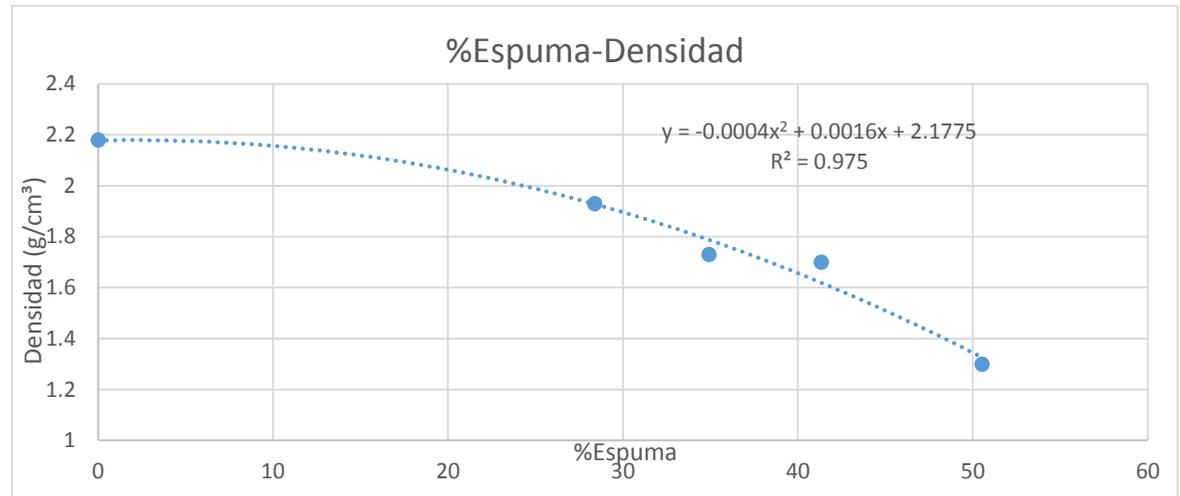


Gráfico No. 15. Porcentaje espuma vs. Densidad a los 28 días, mezclas 1, 2, 5, 4, 3.

Se realizó un ajuste polinómico con los datos obtenidos de las mezclas a los 28 días de edad, obteniéndose la correlación de 0.975, lo cual indica que existe relación entre el volumen de agente utilizado en las mezclas y la densidad.

Análisis de la resistencia.- A la edad de 28 días en el testigo se tiene una resistencia de 300.412 kg/cm² valor alto frente a los hormigones normales de 210 kg/cm² este se referencia con el 100% de la resistencia, para los diferentes porcentajes de agente espumante 28.4%, 34.9%, 41.3%, 50.5% se obtuvo una resistencia promedio de 253.06, 19.35, 13.05, 0.00 kg/cm² que en porcentaje corresponde al 84.24%, 6.45%, 4.35%, 0.00%, respectivamente. Cada valor corresponde al promedio de las probetas ensayadas, observándose una considerable disminución de la resistencia conforme aumenta el volumen de agente espumante presente en la mezcla, esto concuerda con los datos obtenidos por estudios semejantes. (Liu & Chen, 2014)

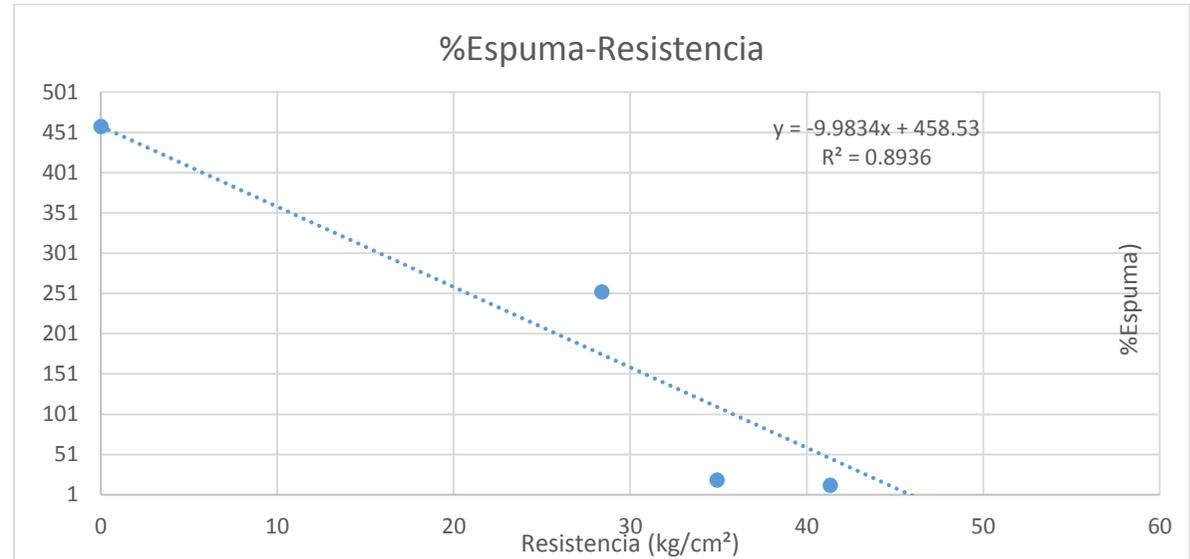


Gráfico No. 16. Porcentaje de espuma vs. Resistencia kg/cm², 28 días, mezclas 1, 2, 5, 4.

De manera similar se realizó un ajuste polinómico con los datos de las mezclas a los 28 días, y se obtuvo la correlación dando un valor de 0.8936, lo cual indica una relación entre el volumen de agente utilizado en las mezclas y la resistencia. Con el porcentaje de sustitución de la espuma en 50.5% se observa que la resistencia es 0.00, y el hormigón no ha fraguado, llegándose a determinar un límite superior (máximo) de sustitución del agente espumante en 41.3%.

También se puede observar que conforme aumenta la edad del hormigón, también aumenta la resistencia, la mezcla a los 7 días alcanza aproximadamente el 55% de la resistencia de la resistencia a los 28 días.

5.3.2. ALTERNATIVA 2

La tabla 20 muestra un resumen de las densidades y resistencias promedio obtenidas, para el hormigón testigo (0% de sustitución) y para cada mezcla porcentaje utilizado. Cada valor de la densidad y resistencia corresponde al promedio de las probetas ensayadas para cada mezcla, la información con los valores individuales para cada mezcla se muestran en el Anexo D.

Análisis de la densidad.- A la edad de 28 días para el testigo (0%) se tiene una densidad de 2.00 gr/cm³ referencia del 100%, para el porcentaje de sustitución de Chasqui en 5% y disminuyendo el volumen de agente espumante se tiene que para el 28.48% y 27.17% la densidad es respectivamente del 85% y 91%; con el 10% de sustitución de chasqui y disminuyendo la cantidad de agente espumante del 26.86%, 26.59% la densidad es del 88.42% y 92.11% respectivamente. Lo que se puede concluir que a mayor volumen de agente espumante disminuye la densidad.

En el siguiente gráfico se puede apreciar la variación de la cantidad de espuma contenida en la mezclas versus la densidad de los hormigones a los 28 días de edad lo cual concuerdan con los datos obtenidos por estudios semejantes (Liu & Chen, 2014), existe una variación ligera de densidad de los 7 a los 28 días en aumento, se puede atribuir al proceso de hidratación.

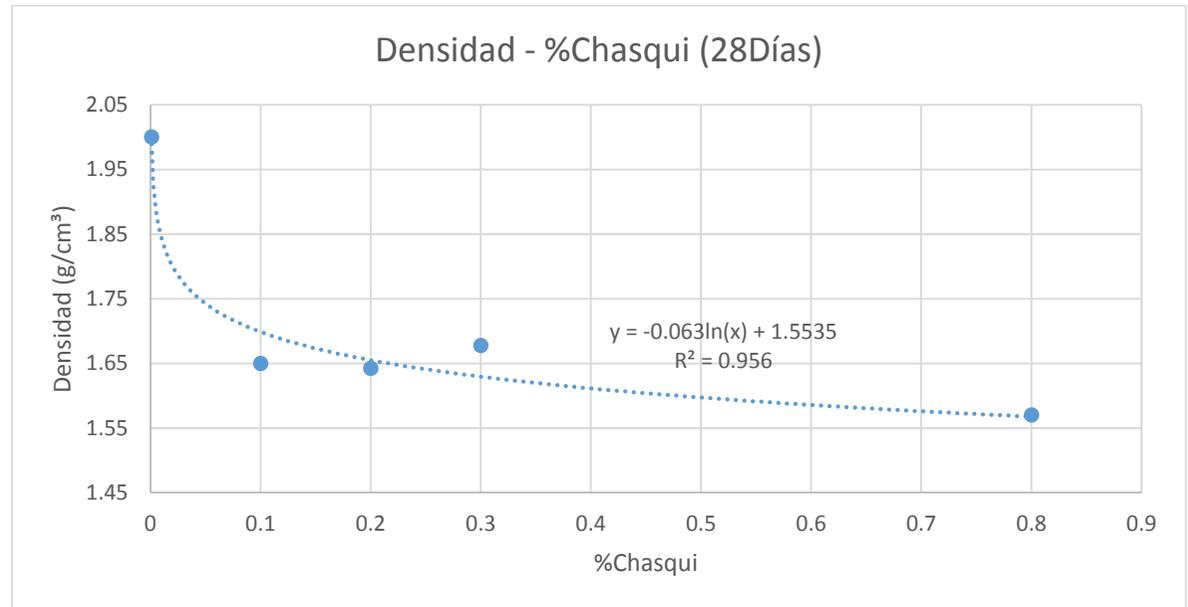


Gráfico No. 17. Porcentaje agregado ligero vs. Densidad a los 28 días.

Se realizó un ajuste polinómico con los datos obtenidos de las mezclas a los 28 días de edad, y se obtuvo la correlación dando un valor de 0.96, correlación buena para los diferentes mezclas.

Análisis de la resistencia.- A la edad de 28 días en el testigo se tiene una resistencia de 253.06 Kgr/cm² esto es para el hormigón de control referenciándose con el 100% de la resistencia, para los diferentes porcentajes de sustitución se tiene:

Sustitución de Chasqui del 5% y disminuyendo el volumen de agente espumante de 28.48%, 27.17% la resistencia respectiva es del 11.44% y 46.17%; con el 10% de sustitución de chasqui y disminuyendo la cantidad de agente espumante de 26.86%, 26.59% la resistencia es del 41.26% y 65.51%. Lo que se puede concluir que a mayor volumen de agente espumante disminuye la resistencia.

Cada valor corresponde al promedio de las probetas ensayadas, observándose una considerable disminución de la resistencia conforme aumenta el volumen de agente espumante presente en la mezcla, esto concuerda con los datos obtenidos por estudios semejantes. (Liu & Chen, 2014)

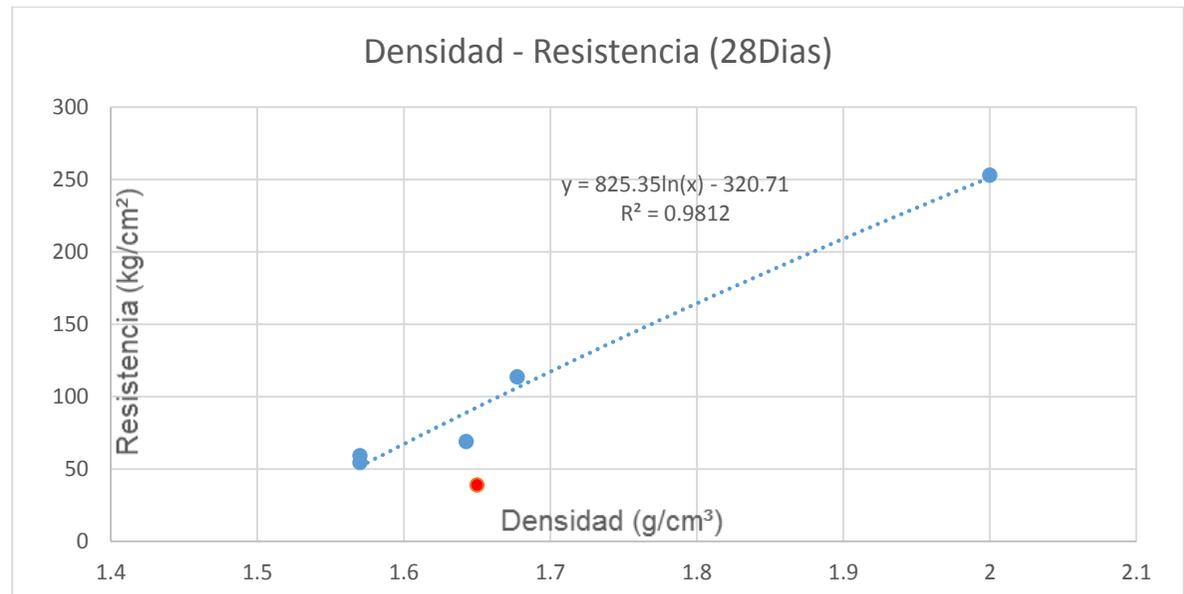


Gráfico No. 18. Porcentaje agregado ligero vs. Resistencia a los 28 días.

En este gráfico se presenta la relación entre densidad y resistencia, el ajuste polinomio con los datos obtenidos de las mezclas a los 28 días de edad, y se obtuvo la correlación dando un valor de 0.9812, lo cual indica una relación muy buena entre densidad y resistencia con la variación del volumen de agente utilizado en las mezclas.

También se puede observar que conforme aumenta la edad de las probetas, aumenta la resistencia, las mezclas a los 7 días alcanza aproximadamente el 50% de la resistencia de la resistencia a los 28 días.

5.4. PRUEBA DE HIPÓTESIS

La variable de la resistencia a compresión en los ensayos realizados sobre las probetas de hormigón, pueden estar sujetas a alteraciones y que no reflejen el resultado en forma directa del cambio de la variable de interés, en este caso, la investigación se realiza sobre la variación en volumen del agente espumante. Esto puede producirse por varios factores que se puede introducir al momento de elaboración de las probetas como: la forma de colocación de la mezcla en el cilindro, la compactación, el transporte, la manipulación al momento de limpiar, medir y pesar en estado fresco, en el proceso de curado, el tipo de moldes empleados para la toma de muestras (nuevo, usado, estado de conservación, etc.), la toma de muestras y llenado de la mezcla en los moldes, el operador al momento de realizar el ensayo, son los posibles factores que pueden introducir ruido al momento de determinar el ensayo y medir su resistencia, al error que puede provocar en el resultado de medir la variable en análisis se le conoce como **error experimental**.

Para determinar que en la investigación, si las variaciones de la Resistencia a compresión para el tratamiento 1 y el tratamiento 2 en los ensayos realizados se debe a la variación del volumen de **Agente Espumante** en la mezcla y no a errores experimentales es importante y necesario llevar a cabo la **prueba de hipótesis**.

El planteamiento de la prueba de hipótesis depende del diseño experimental, el cual se estudió y se definió en el capítulo III, como experimento de comparación. El análisis de la variabilidad de la variable en estudio se la realiza con el software estadístico RSTUDIO (lenguaje de programación más utilizado en investigación por la comunidad estadística).

Metodología de Experimentación:

Como parte de la estadística inferencial el método uni-factorial equilibrado es aplicado en el análisis de resultados puesto que solo existe una variable (porcentaje de espuma) en la experimentación. La idea es descubrir cómo se reparte la variabilidad total de la muestra (ANOVA).

La prueba Dunnett, que busca diferencias significativas entre la media de cada tratamiento y la media de control, el análisis de la varianza de resistencias (ANOVA) se expresa mediante la siguiente Tabla:

FV	SC	GL	F
Tratamiento	$SCTra = \sum_{i=1}^a n_i (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$	$a - 1$	$F_0 = \frac{SCTra/(a-1)}{SCE/(N-a)}$
Error	$SCE = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$N - a$	
Total	$SCT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$N - 1$	

FV = Fuente de variación, SC = Suma de Cuadrados, GL = Grados de libertad.

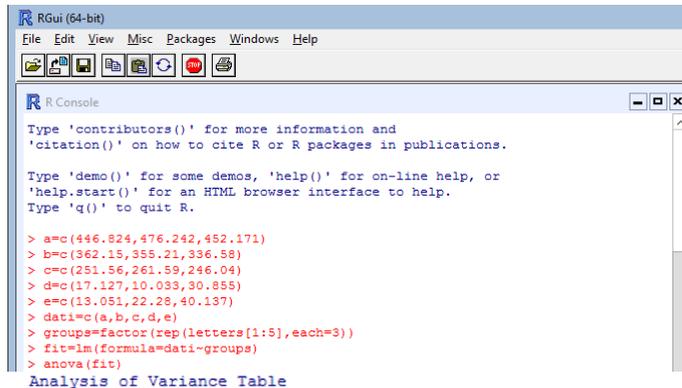
Donde:

SCT: Suma total de cuadrados corregida
 Tratamiento: Diferencias entre los Tratamientos
 Error: Error Aleatorio

Riesgos en las Pruebas de Hipótesis:

Tabla 22.
Pruebas estadísticas.

Decisión Estadística	Situación Real	
	Ho es cierta	Ho es falsa
Se acepta Ho	Decisión correcta	Error Tipo II
	P confianza = $1 - \alpha$	P error tipo II = β
Se rechaza Ho	Error Tipo I	Decisión Correcta
	P error tipo I = $1 - \alpha$	P confianza = $1 - \beta$



```

RGui (64-bit)
File Edit View Misc Packages Windows Help

R Console
Type 'contributors()' for more information and
'citation()' on how to cite R or R packages in publications.

Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

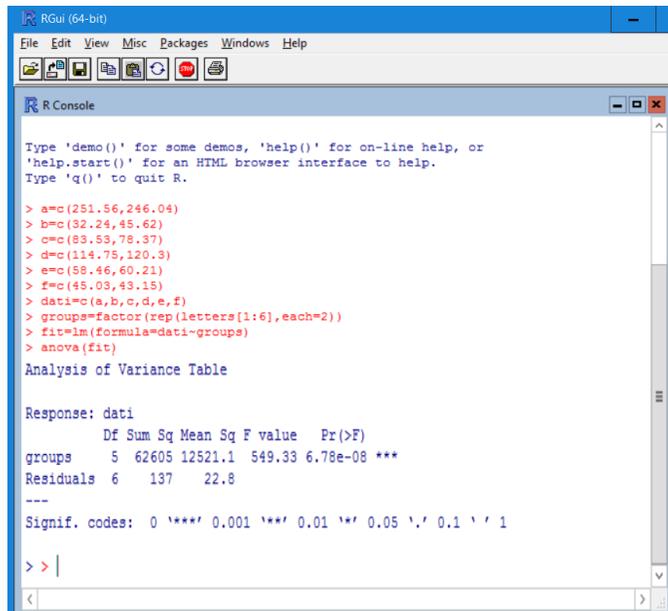
> a=c(446.824,476.242,452.171)
> b=c(362.15,355.21,336.58)
> c=c(251.56,261.59,246.04)
> d=c(17.127,10.033,30.855)
> e=c(13.051,22.28,40.137)
> dati=c(a,b,c,d,e)
> groups=factor(rep(letters[1:5],each=3))
> fit=lm(formula=dati~groups)
> anova(fit)

Analysis of Variance Table

Response: dati
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
groups  4 460186 115047   733.5 2.705e-12
Residuals 10  1568    157
  
```

Imagen No. 12.

Resultados del procesamiento tratamiento 1.



```

RGui (64-bit)
File Edit View Misc Packages Windows Help

R Console
Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

> a=c(251.56,246.04)
> b=c(32.24,45.62)
> c=c(83.53,78.37)
> d=c(114.75,120.3)
> e=c(58.46,60.21)
> f=c(45.03,43.15)
> dati=c(a,b,c,d,e,f)
> groups=factor(rep(letters[1:6],each=2))
> fit=lm(formula=dati~groups)
> anova(fit)

Analysis of Variance Table

Response: dati
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
groups  5 62605 12521.1  549.33 6.78e-08 ***
Residuals 6  137    22.8
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> >
  
```

Imagen No. 13.

Resultados del procesamiento tratamiento 2.

Para el tratamiento 1

Del análisis de variancia presentado en la siguiente tabla obtenida del SOFTWARE RSTUDIO en los resultados se observa que existe diferencia entre los tratamientos aplicados puesto que la probabilidad es menor al nivel de significancia establecido, por lo que también se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 23.
Tabla ANNOVA.

F. Variación	S. Cuadrados	GL	Valor F	Pr(>F)
Tratamiento	460186	4	733.5	2.705x10-12
Error	1568	10		
Total		14		

Para el tratamiento 2

Del análisis de variancia (ANOVA) presentado en la siguiente Tabla obtenida del SOFTWARE RSTUDIO en los resultados se observa que existe diferencia entre los tratamientos aplicados puesto que la probabilidad (Pr) es menor al nivel de significancia establecido previamente, por lo que también se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 24.
Tabla ANNOVA.

F. Variación	S. Cuadrados	GL	Valor F	Pr(>F)
Tratamiento	62605	5	549.33	6.78x10-08
Error	13	6		
Total		11		

Por hipótesis nula definimos que el factor no influye en la variación de resistencias en la experimentación para los tratamientos dados.

Conclusiones:

- De los resultados anteriores se puede establecer que la espuma como tratamiento incluido en la mezcla de hormigón influye en el resultado de la resistencia.
- Se tiene que el porcentaje de confiabilidad de la experimentación en la adición de espuma es de 94.5%.
- Se observa que la resistencia en la mezcla de hormigón con un porcentaje de espuma mayor a 28.4% decae de manera no lineal.
- Los tratamientos de chasqui en una mezcla de hormigón con un porcentaje de espuma de 28.4% influyen de igual manera en la



Imagen No. 14.
Ensayo de compresión simple, laboratorio de Geotecnia.



Imagen No. 15.
Ensayo de flexión realizado en el laboratorio de Geotecnia.

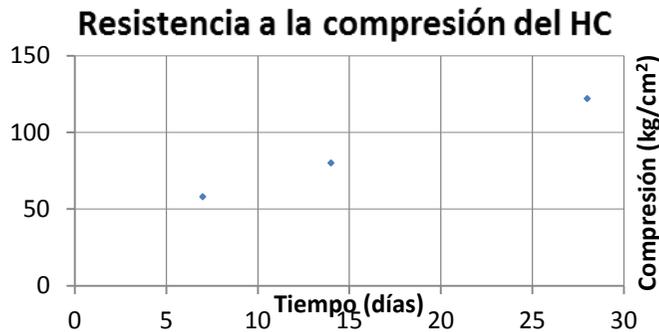


Gráfico No. 19. Resultados del Ensayo a Compresión.

resistencia final de las probetas, y cuyo poder de prueba es de 87.3%.

5.5. PRUEBA FINAL DE ENSAYOS: COMPRESIÓN, TRACCIÓN, FLEXIÓN Y OBTENCIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO Y COEFICIENTE POISON

Tabla 25.

Cantidades de material para un volumen de 28 lts. de Hormigón Celular.

Cemento	Arena	Chasqui	Agua	Espuma	Total	Unidad
3.863	9.657	1.460	6.936	6.084	28.000	lts
12.168	24.336	2.434	6.936			kg

Con estas cantidades de material se elabora las probetas y se ensayan, el detalle de las mezclas se presentan en el Anexo E, a continuación se presentan los resultados de los ensayos.

5.5.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN

Ensayos realizados a los 7, 14 y 28 días. Se observa que la resistencia aumenta de 58 kg/cm² a 122 kg/cm² de los 7 a los 28 días incremento del 48% de la resistencia a los 28 días. La resistencia del HC de los 7 a los 14 días, paso de 58 kg/cm² a 80 kg/cm², incremento del 40%, y de los 14 a los 28 días paso de 80 kg/cm² a 122 kg/cm², incremento en la resistencia del 52%.

5.5.2. ENSAYO A FLEXIÓN

Los resultados del ensayo a flexión realizados a los 7, 14 y 28 días de la mezcla final:

Se observa que el Módulo de Ruptura aumenta de 12.64 kg/cm² a 19.56 kg/cm² de los 7 a los 28 días. De 7 a 14 días hubo un mayor incremento en el Módulo de Ruptura que de 14 a 28 días, siendo los incrementos de 12.64 kg/cm² a 16.69 kg/cm².

Se puede observar que el comportamiento conforme a flexión no es muy diferente que el de un hormigón tradicional, puesto que el valor obtenido de MR equivale a un 19.76% de la resistencia a la compresión; en hormigones tradicionales esto es de 10%-20% de la resistencia a la compresión.



Imagen No. 16.
Ensayo para registrar las deformaciones, longitudinales y axiales.

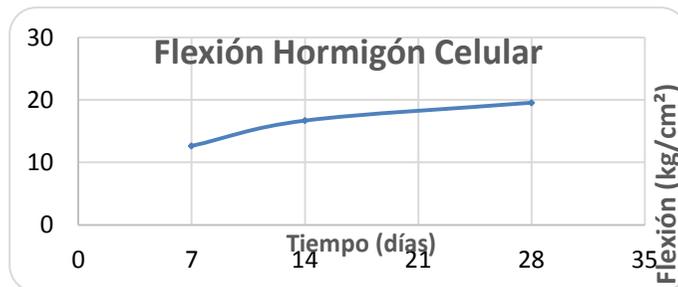


Gráfico No. 20. Resultados del Ensayo a Flexión, 7, 14 y 28 días.

5.5.3. ENSAYO A TRACCIÓN

Se realiza ensayo de tracción indirecta en la mezcla final, para determinar la capacidad a tensión del Hormigón Celular se observa que este representa el 12.03% de la resistencia a la compresión.

5.5.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y COEFICIENTE DE POISSON

De acuerdo con la normativa se toman los puntos A y B correspondientes a 50 unidades de deformación y 40% de la máxima resistencia a compresión respectivamente, Gráfico 8 y Norma ASTM C469.

El hormigón presenta una estructura heterogénea, exhibe diferentes comportamientos durante el proceso de carga debido a: tamaño de los agregados, la matriz de la pasta, y el aditivo espumante, un cambio de cualquiera de los componentes representa un cambio en la respuesta a la deformación a cambios en el Módulo de Elasticidad, y por ende en el comportamiento.

Para la mezcla final, de los ensayos realizados a los 28 días se tiene:

Tabla 26.

Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson.

Día	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Coef. Poisson
28	34081.34	0.17

Para el detalle del ensayo y resultados ver el Anexo E.d. El Módulo de Elasticidad obtenido es de alrededor 50% menor al del Hormigón convencional.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. RESUMEN DE RESULTADOS

Se han analizado 16 mezclas con varias proporciones de aditivo espumante, 5 mezclas con el árido de la mina Avathar y 11 mezclas con la adición de árido liviano Chasqui reemplazo el 5%, 10%, 15% y 60% en peso del árido. Tanto para la mezcla solo con árido Avathar como con árido más chasqui se realizaron varias pruebas (16) variando el porcentaje de espuma notándose que con valores mayores al 41.3% del aditivo espumante se llega al colapso, con el 41.3% de agente espumante se tiene una resistencia muy baja de 13.05 kg/cm² y densidad de 1.73gr/cm³, con el 50.5% de espuma la resistencia es de 0 kg/cm² debido a que no fragua el hormigón obteniéndose una mezcla que se desmenuza con facilidad, con lo cual se pudo limitar el porcentaje de aditivo, llegándose a determinar un valor máximo del 28.4% en volumen.

Según el ACI 523.3R-14 limita el uso para elementos no estructurales, limitando su uso para material de relleno, enrasado de pisos, albañilería estructural, mampostería arquitectónica.

6.1.1. ADITIVO ESPUMANTE

Dosificaciones Sin Árido Liviano: Al incrementar el porcentaje de espuma en la mezcla del hormigón se puede notar la reducción en densidad como al mismo tiempo de su resistencia, en donde para porcentajes mayores de espuma produce considerables reducciones en la densidad y resistencia.

Los resultados expresan que un porcentaje mayor 41.3% la mezcla no fragua, al 30% describe un punto de quiebre del agente espumante, con se puede observar una adición de 28.4% en volumen a la mezcla de hormigón reduce en un 20% la resistencia Tabla 19.



Imagen No. 17.

Hormigón no fraguado con 41.3% en volumen de espuma.



Imagen No. 18.

Aspecto del HC recién colocado en molde con árido AVATHAR.

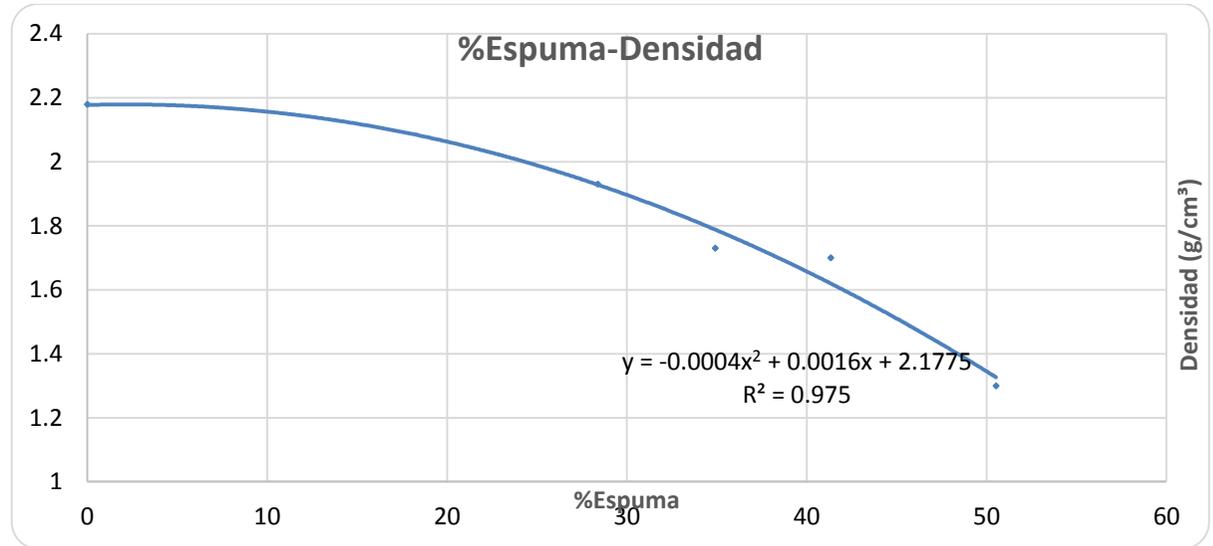


Gráfico No. 21. Porcentaje de Espuma vs. Densidad.

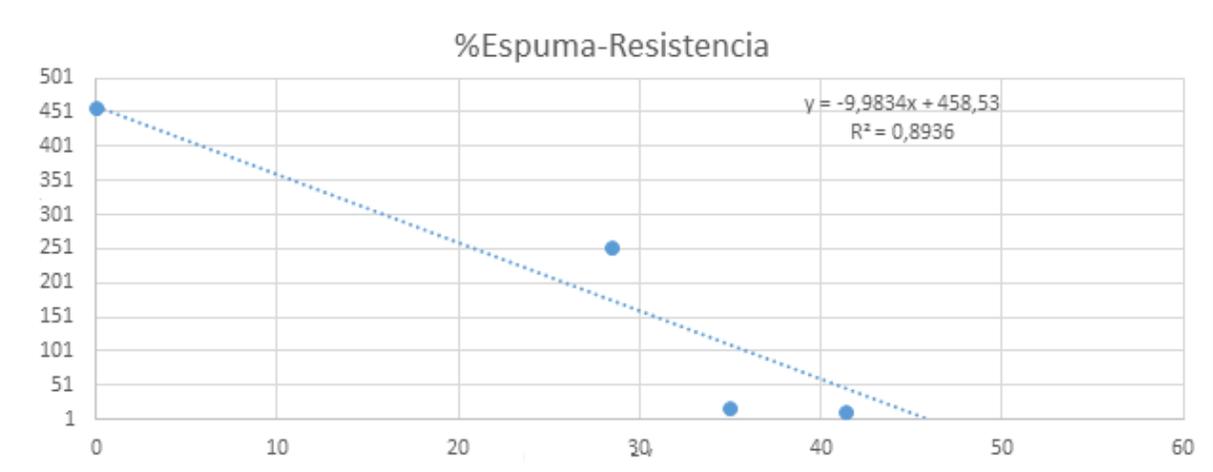


Gráfico No. 22. Porcentaje de Espuma vs. Resistencia.



Imagen No. 19.

Aspecto del HC después del ensayo a compresión con árido AVATHAR v CHASQUI.

6.1.2. AGREGADO LIGERO

Al sustituir el árido por árido liviano en pequeño porcentaje y manteniendo la espuma al 28.4% en volumen, la densidad correspondiente es de 2 gr/cm³ similar a la alternativa 1.

Se puede observar que la adición de árido liviano reducen la densidad del hormigón produciéndose también una reducción en su resistencia, un porcentaje del 0.2% del peso de cemento produce una reducción en la densidad del 19.73% pero a su vez produce una reducción en la resistencia del 59.14% tabla 20.

La espuma efectiva es de tan solo 40% del volumen teórico, puesto que el 60% de este se destruye en la mezcla.

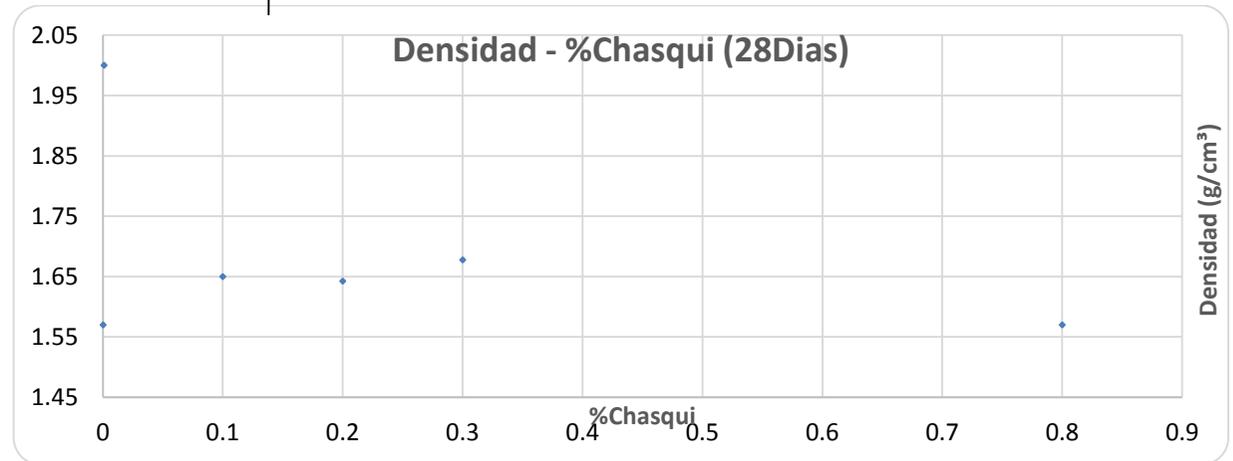


Gráfico No. 23. Sustitución de árido en % por Chasqui vs. Densidad.

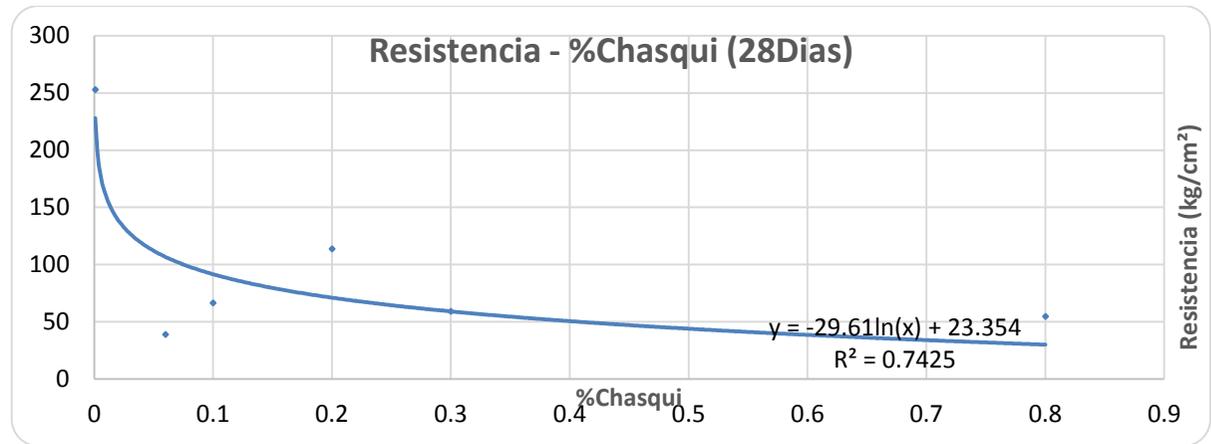


Gráfico No. 24. Sustitución de árido en % por Chasqui vs. Resistencia.

Para un mismo porcentaje de sustitución de árido por Chasqui y variando el volumen de espuma, a la edad de 28 días existe una disminución de la resistencia (ver tabla 20).

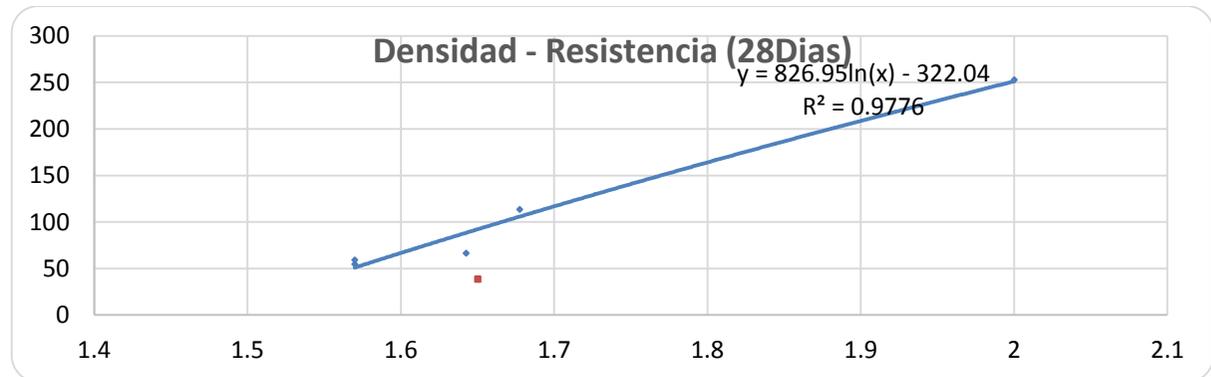


Gráfico No. 25. Densidad vs. Resistencia a los 28 días.

6.2. COMENTARIOS

- a) De acuerdo con (ACI Committee 318, 2008), no cumple las condiciones para que el hormigón celular sea considerado como un hormigón estructural.
- b) Por otro lado, según la UNI 7548, un hormigón ligero estructural es aquel que posee una densidad entre 1200 y 2000 kg/m³ y una resistencia entre los 150 y 250 kg/cm², por lo que bajo estos criterios el hormigón resultante no se puede considerar como hormigón estructural.
- c) Además, según (Neville, 1977) (Pecce et al., 2013), si un hormigón presenta una densidad menor que la densidad del hormigón convencional, es razón suficiente para ser considerado como hormigón ligero, por lo que el hormigón con el 28.4% de reemplazo al tener una disminución del 18% en la densidad, con respecto a la densidad del hormigón de peso normal, este puede ser considerado como hormigón ligero.

6.3. CONCLUSIONES

- a) La inclusión del agente espumante en la masa del hormigón reduce de manera directa su densidad a cualquier edad, lo que confirma los resultados esperados, por la inclusión de burbujas microscópicas en el hormigón.
- b) Se confirma el hecho de que mientras a mayor porcentaje de inclusión del agente espumante, la resistencia a compresión disminuye con respecto al hormigón convencional.
- c) Los hormigones celulares con agente espumante es una alternativa que puede ser usada en elementos no estructurales, como paneles divisorios u otros elementos que no soportan carga y también como material de relleno, pero además son una alternativa en construcciones a pequeña escala como viviendas de hasta dos niveles, o proyectos de vivienda social.

6.4. RECOMENDACIONES

Ensayar con agentes espumantes que sean más estables e identificar las variaciones en la densidad y resistencia.

Probar la generación de espuma utilizando maquinas generadoras a presión por aire comprimido, para identificar la estabilidad de la espuma durante el proceso de mezclado y el endurecimiento.

Ensayar hormigones con otros agentes espumantes, para identificar la variabilidad de la resistencia y peso mismo

Estudiar el comportamiento del curado en cámara húmeda frente a la resistencia

Identificar los cambios físico-mecánicos al sustituir otros porcentajes de árido liviano, granulometrías y otros agentes espumantes.

Llevar a cabo un análisis económico, para identificar el uso de hormigones celulares en la industria de la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI 211.1-91. (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009). Retrieved October 23, 2015, from <https://www.concrete.org>
- ACI Committee 318. (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and Commentary*. American Concrete Institute. Retrieved from <https://www.concrete.org>
- ACI 523.3R-14 Guide for Cellular Concretes above 50 lb/ft³ (800 kg/m³), Reported by ACI Committee 523.
- Albán Crespo, S., Vásquez Z., P., & Cortés Madero, C. (1998). *Hormigon alivianado: con residuos de madera y aplicaciones de elementos no estructurales*. Universidad de Cuenca.
- Cárdenas, R. (1993). *Alternativas de hormigones alivianados con cascote de ladrillo, desperdicio de teja y cerámicos*. Universidad de Cuenca.
- Cellular Lighthweight Concrete BCCSystems Technology of Germany
www.salzgitter-aktuell.de
- Cervantes Abarca, A. (2008). Nuevas Tecnologías en Concretos: Concreto Celular - Concreto Reforzado con Fibra - Concreto Ligero Estructural. In *Congreso Nacional de Administración y Tecnología para la Arquitectura, Ingeniería y Diseño* (pp. 141 – 162). México.
- Chen, B., & Liu, N. (2013). A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, *44*, 691–698.
- CIRSOC 201 Reglamento, Ministerio de Planificación Federal Argentina,
www.inti.gob.ar
- Flying Concrete, Manual para construcción con concreto, Séptima Edición, Departamento de los Estados Unidos
www.geocities.com/flyingconcrete
- Hohwiller, F., & Köhling, K. (1969). Hormigón ligero de Styropor. *Materiales de construcción*. Instituto Eduardo Torroja.

- JÜRGEN MAYER H. Architects (Profesor Universidad de las Artes, Berlín, Architectural Association, Londres, Columbia University Nueva York)
- Kaya, B. A., & Kar, F. (2014). Thermal and Mechanical Properties of Concretes with Styropor. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 02(06), 310–315. Retrieved from <http://www.scirp.org>
- Laukaitis, A., & Fiks, B. (2006). Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Applied Acoustics*, 67(3), 284–296.
- Le Roy, R., Parant, E., & Boulay, C. (2005). Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 770–775. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com>
- Mc Cornik 1967, Composition and properties of Celular Concrete
- Manobanda, I., & Iván, D. (2009). Hormigón liviano con agregado de origen volcánico y aditivo incorporador de aire. *Escuela Superior Politécnica Del Litoral (ESPOL)*.
- Estadística, MacGraw-Hill, Murray Spiegel, Serie Shaum, 2nd Edición, 1995
- Montgomery, D. C. (1991). *Diseño y Análisis de Experimentos*. (N. Grepe, Ed.). México: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Neville, A. M. (1977). *Tecnología del concreto* (Primera Ed). México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- NORMAS INEN, Servicio Ecuatoriano de Normalización,
NORMAS ASTM (C09 Committee on Concrete and Concrete Aggregates)
Procopor LTDA. (2015). Proicopor. Retrieved September 30, 2015, from <http://www.proicopor.com/>
- Rengifo María Cristina, Yupanqui Ruth Verónica, octubre 2013, www.bibdigital.epn.edu.ec
- Rougeron, C. (1977). *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Barcelona, España: Reverte.
- Short, A., & Kinniburgh, W. (1963). *Lightweight concrete*. CR books.

- Sussman, V. (1975). Lightweight plastic aggregate concrete. *ACI Journal*, 72, 321–323.
- Perez Miyera, Un Repaso al Concreto Celular, Centro Impulsor de la Construcción y la Habitación, www.imcyc.com
- Valdiviezo Carlos, Cálculo del tamaño muestral para la investigación, Universidad Privada Boliviana pág. 169.
- Valdez Guzmán, L. F., Suárez Alcívar, G. E., & Proaño Cadena, G. (2010). Hormigones livianos, SPOL.
- Vélez Guayasamín, A. S. (2013). *Hormigones con escoria de acero de horno eléctrico: prestaciones mecánicas, físicas y químicas*.
- Vilanova Ángel Fernández, Universidad de Madrid – 2009, Tesis Doctoral “Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del Hormigón Celular.
- Villardón José Luis Vicente. Introducción a la inferencia. Estadística. Universidad de Salamanca.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* ('Novena). México: Pearson Educación.
- Zhang, M.-H., & Gjør, O. E. (1991). Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, 88(5), 463–469

ARTÍCULOS CONSULTADOS EN INTERNET

- Generadores de espuma para concreto celular, www.quiminet.com/productos/generadores-de-espuma-para-concreto-celular-16244438543
- Mezcladora para fabricar hormigón celular, www.atmosfera.com/equipo
- La arena volcánica. QuimiNet. 02/02/2010. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Ingeniería Industrial.

Luca Industries International, true technology, Foam Concrete, www.dr-luca.com/index

Concretos Celulares de Colombia, www.concretoscelulares.co

Historia del Hormigón es www.wikipedia.org/wiki/Hormigón
www6.uniovi.es/usr/fblanco/LECCION3.MaterialesPetreosNATURALES.5-ARIDOS.HORMIGONES.Granulometria.pdf

Generador de espuma para hormigón celular,
<http://www.youtube.com/watch?v=LvrFG49B8WI>

Determinación de la densidad,
www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/dapT3

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de calidad en áridos, Normas que se deben cumplir	28
Tabla 2. Límites máximos para la calidad de los áridos	29
Tabla 3. Tamaño y porcentaje para árido bien grabado	30
Tabla 4. Material retenido acumulado de arenas para hormigones	31
Tabla 5. Resistencia a la compresión, 28 días, Alternativa 1	40
Tabla 6. Resistencia a la compresión, 28 días, Alternativa 2	42
Tabla 7.	44
Tabla 8.	45
Tabla 9. Características de los áridos	47
Tabla 10. Porcentajes de áridos gruesos y finos	48
Tabla 11. Volumen de espuma, 10 minutos	50
Tabla 12. Tasa de cambio de la espuma, 45 minutos	51
Tabla 13. Cálculos varios	56
Tabla 14. Mesa de cemento para diferentes volúmenes	57
Tabla 15. Dosificación del HC con árido Avathar	58
Tabla 16. Dosificación del HC con árido Avathar y Chasqui	61
Tabla 17. Mesa de cemento para el volumen de espuma	64
Tabla 18. Cantidades de material para elaborar 1m ³ de HC	65
Tabla 19. Cantidades de material para elaborar 28lts de HC	65

Tabla 20. Resistencia a la compresión, 7, 14 y 28 días	74
Tabla 21. Resistencia y densidad del HC, 7, 14, y 28 días	75
Tabla 22. Pruebas estadísticas	83
Tabla 23. Tabla ANNOVA Tratamiento 1	84
Tabla 24. Tabla ANNOVA Tratamiento 2	84
Tabla 25. Cantidades de material para elaborar 28lts de HC	85
Tabla 26. Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico No. 1. Clasificación del Hormigón Celular	21
Gráfico No. 2. Dominios de la granulometría de arenas	30
Gráfico No. 3. Análisis de Varianza de Efectos Fijos, $v_1 = 4$	44
Gráfico No. 4. Análisis de Varianza de Efectos Fijos, $v_1 = 5$	45
Gráfico No. 5. Granulometría de los tres áridos	48
Gráfico No. 6. Variación de Densidad a los 4 minutos	49
Gráfico No. 7. Variación de Densidad a los 15 minutos	50
Gráfico No. 8. Comportamiento de los Aditivos	51
Gráfico No. 9. Espuma vs. Cemento	56
Gráfico No. 10. Espuma vs. Cemento	57
Gráfico No. 11. Mesa de cemento vs. Volumen de espuma	64
Gráfico No. 12. Esfuerzo, deformación y módulo secante	73
Gráfico No. 13. Porcentaje de Chasqui, 28 días	76
Gráfico No. 14. Densidad vs. Resistencia, 28 días	76
Gráfico No. 15. Porcentaje espuma vs. Densidad, 28 días	78
Gráfico No. 16. Porcentaje espuma vs. Resistencia, 28 días	79
Gráfico No. 17. Porcentaje agregado ligero vs. Densidad, 28 días	80
Gráfico No. 18. Porcentaje agregado ligero vs. Resistencia, 28 días	81
Gráfico No. 19. Resultados del ensayo a Compresión	85
Gráfico No. 20. Resultados del ensayo a Flexión	86

Gráfico No. 21. Porcentaje espuma vs. Densidad	88
Gráfico No. 22. Porcentaje espuma vs. Resistencia	88
Gráfico No. 23. Sustitución de árido por Chasqui vs. Densidad	89
Gráfico No. 24. Sustitución de árido por Chasqui vs. Resistencia	90
Gráfico No. 25. Densidad vs. Resistencia, 28 días	90

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Imagen No. 1. Casa DUPLI vista frontal	15
Imagen No. 2. Casa DUPLI vista posterior	15
Imagen No. 3. Aplicación de Hormigón Celular	20
Imagen No. 4. Equipo detector de materia orgánica	29
Imagen No. 5. Generadora de espuma	34
Imagen No. 6. Producción de espuma por batido	34
Imagen No. 7. Tres áridos	46
Imagen No. 8. Agua, Agente espumante TEC 247	48
Imagen No. 9. Tiempo de generación de espuma	50
Imagen No. 10. Cono de Abrams	67
Imagen No. 11. Mesa de Flujo	67
Imagen No. 12. Resultados Tratamiento 1	84
Imagen No. 13. Resultados Tratamiento 2	84
Imagen No. 14. Compresión simple	85
Imagen No. 15. Ensayo de Flexión	85
Imagen No. 16. Ensayo de Registro de deformaciones	86
Imagen No. 17. Hormigón no fraguado	87
Imagen No. 18. Hormigón con árido Avathar	87
Imagen No. 19. HC después de la compresión con Avathar	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración No. 1. Configuración de la carga y dimensiones probeta	70
Ilustración No. 2. Config. de la carga de la prueba de Flexión	71
Ilustración No. 3. Config. de la carga y rotura del ensayo a tracción	71
Ilustración No. 4. Ensayo determinación del módulo de Elasticidad	73

ANEXOS

A. Sobre los Aditivos Generadores de Espuma	104
B.- Sobre los Áridos	110
C.- Sobre el Árido Avathar y Agente Espumante	117
D.- Sobre el Agregado Ligero Chasqui	122
E.- Sobre la Mezcla final	136
F.- Sobre Normas consultadas	143
G.- Sobre el Registro Fotográfico	145

ANEXO A

SOBRE LOS ADITIVOS GENERADORES DE ESPUMA

Aditivo 1: TEC 247.....	105-108
Mezcla 1	
Mezcla 2	
Mezcla 3	
Aditivo 2: Comperlan.....	109
Mezcla 1	

A.- SOBRE LOS ADITIVOS GENERADORES DE ESPUMA

Dimensiones del Contenedor (cm):

Diámetro Mayor	28.6
Diámetro Menor	12.75
Generatriz	39.5
Vol. Recipiente	13.628
Δr	7.925

Relación		Aditivo (cc)	Agua (cc)	Aditivo 1: TEC 247, mezcla 1				
		13	250					
N°	Peso Recipiente (gr)	Peso Recipiente+Espuma (gr)	Generatriz de Espuma (cm)	Tiempo de Mezclado	r1'	h'	Vol. Espuma (cc)	Densidad Espuma (gr/cc)
1	778	1026	29.3	0:04:33	14.796	9.993	5966.203	0.0416
2	777	1029	29.1	0:04:33	14.837	10.189	6101.332	0.0413
3	780	1031	28.8	0:04:30	14.897	10.482	6305.402	0.0398
4	780	1028	28.3	0:04:30	14.997	10.972	6649.200	0.0373
5	778	1029	29.4	0:04:30	14.776	9.895	5898.912	0.0426
6	777	1027	29.2	0:04:30	14.817	10.091	6033.676	0.0414
7	777	1029	28.5	0:04:30	14.957	10.776	6511.127	0.0387
8	780	1029	29.4	0:04:30	14.776	9.895	5898.912	0.0422
9	778	1030	28.5	0:04:30	14.957	10.776	6511.127	0.0387
10	777	1024	29.4	0:04:30	14.776	9.895	5898.912	0.0419
11	777	1024	30.2	0:10:00	14.616	9.111	5367.136	

Tabla A.1 Cantidad y Densidad de espuma para 4'30" de batido

N°	Peso Recipiente (gr)	Peso Recipiente+Espuma (gr)	Generatriz de Espuma (cm)	Tiempo de Mezclado	r1'	h'	Vol. Espuma (cc)	Densidad Espuma (gr/cc)
	Relación		Aditivo (cc)	Agua (cc)	Aditivo 1: TEC 247, mezcla 2			
		13	250					
1	780	1025	30.1	0:06:30	14.636	9.209	5432.974	0.0451
2	777	1027	28.1	0:06:30	15.037	11.168	6788.014	0.0368
3	777	1020	30.0	0:06:30	14.656	9.307	5498.992	0.0442
4	777	1028	30.6	0:06:30	14.536	8.719	5105.588	0.0492
5	778	1023	30.2	0:06:30	14.616	9.111	5367.136	0.0456
6	777	1031	30.6	0:06:30	14.536	8.719	5105.588	0.0497
7	776	979	31.2	0:06:30	14.415	8.131	4718.646	0.0430
8	777	1025	31.7	0:06:30	14.315	7.641	4401.093	0.0563

Tabla A.2 Cantidad y Densidad de espuma para 6'30" de batido

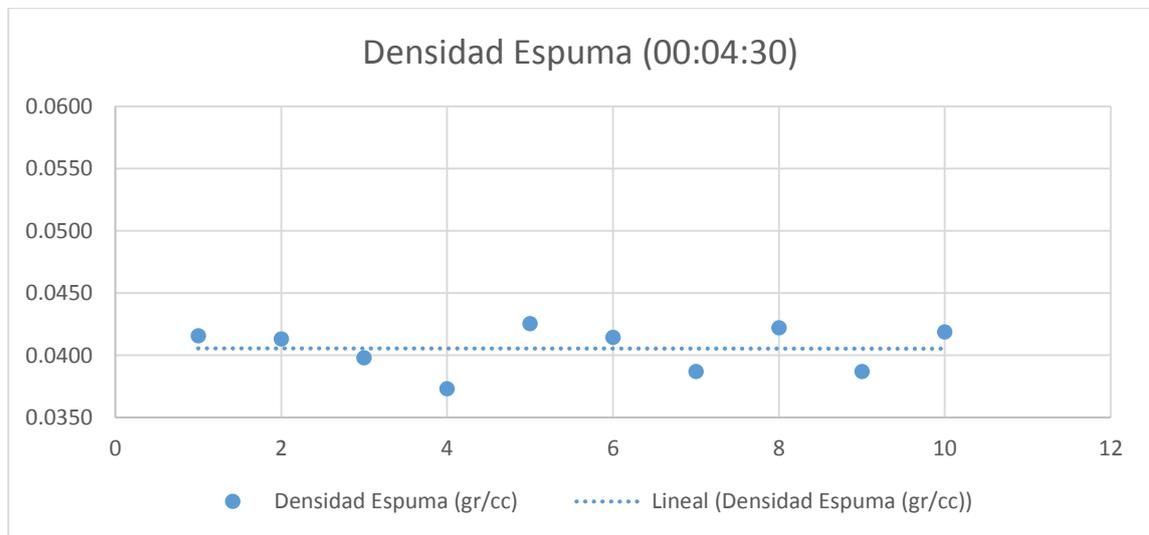


Gráfico A.1. Comportamiento del aditivo para un tiempo de batido de 4min , 30 seg

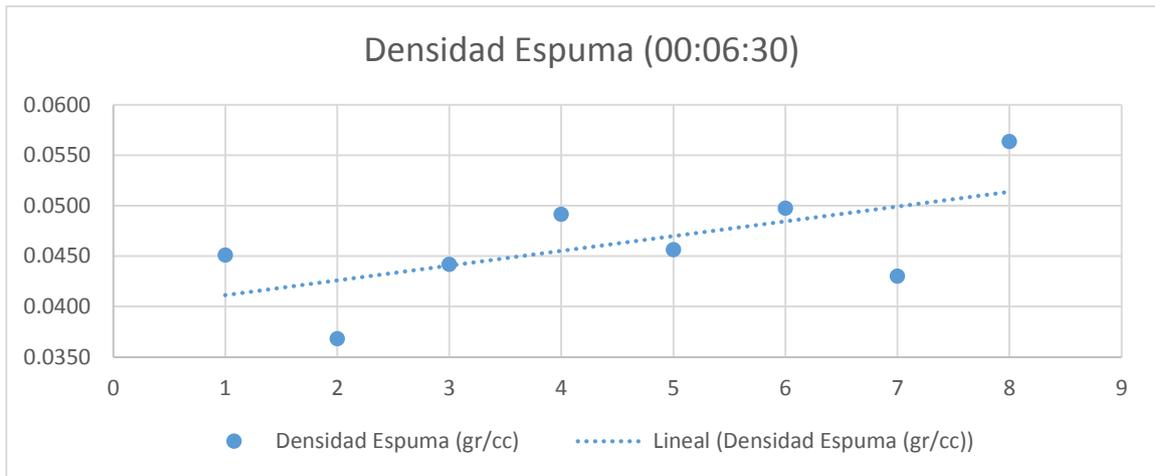


Gráfico A.2. Comportamiento del aditivo para un tiempo de batido de 6min, 30seg.

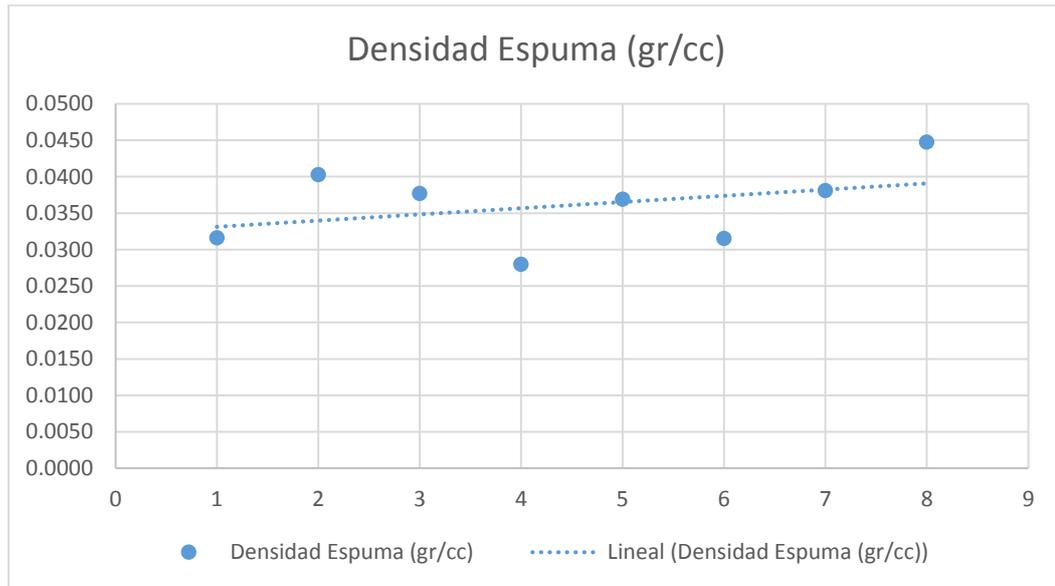


Gráfico A.3. Número de intentos vs. Variación de la densidad

		Aditivo (cc)	Agua (cc)	Aditivo 1: TEC 247, mezcla 3					Tasa de Cambio (cc/min)	
Relación		13	250							
N°	Peso Recipiente (gr)	Peso Recipiente+Espuma (gr)	Generatriz de Espuma (cm)	Tiempo de Mezclado	r1'	h'	Vol. Espuma (cc)	Densidad Espuma (gr/cc)		
1	780	1033	26.4	0:04:30	15.378	12.834	7998.126	0.0316	28.96249	
	780	1032	26.8		15.298	12.442	7708.501	0.0327		
2	781	1035	28.8	0:04:30	14.897	10.482	6305.402	0.0403		27.17257
	781	1034	29.2		14.817	10.091	6033.676	0.0419		
3	780	1036	28.1	0:04:30	15.037	11.168	6788.014	0.0377		27.68873
	780	1035	28.5		14.957	10.776	6511.127	0.0392		
4	780	1035	24.9	0:04:30	15.679	14.303	9111.412	0.0280		125.8478
	780	1034	26.6		15.338	12.638	7852.934	0.0323		
5	779	1032	28	0:04:30	15.057	11.266	6857.700	0.0369	82.40236	
	779	1031	29.2		14.817	10.091	6033.676	0.0418		
6	779	1038	26.1	0:04:30	15.438	13.128	8217.338	0.0315	43.67146	
	779	1038	26.7		15.318	12.540	7780.623	0.0333		
7	781	1037	28.2	0:04:30	15.017	11.070	6718.514	0.0381	75.23117	
	781	1036	29.3		14.796	9.993	5966.203	0.0427		
8	780	1035	29.7	0:04:30	14.716	9.601	5698.134	0.0448	129.7042	
	780	1034	31.7		14.315	7.641	4401.093	0.0577		

Tabla A.3 Volúmen y Densidad de espuma para 4'30" de batido

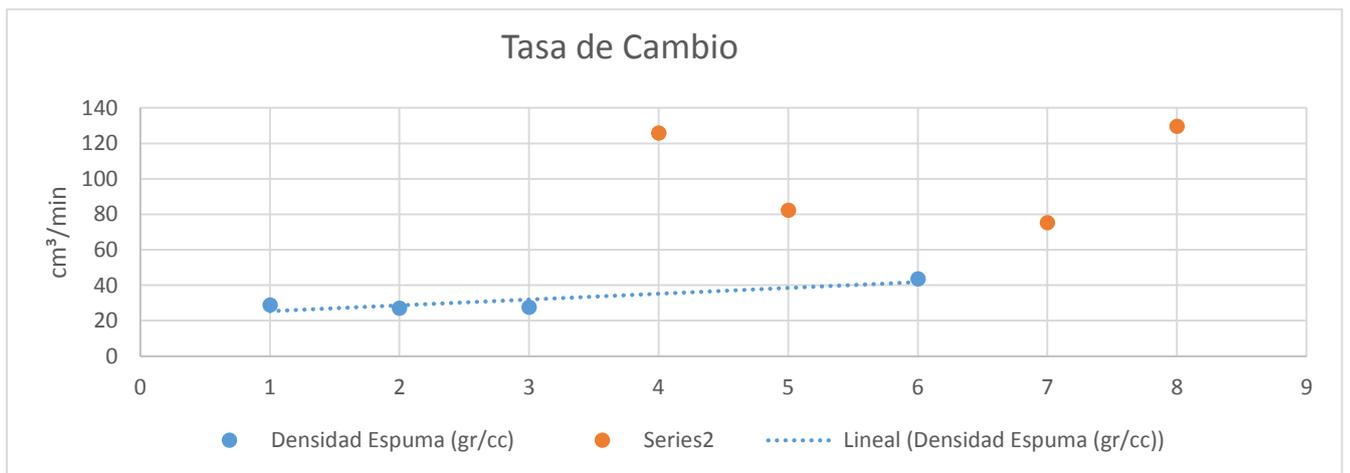


Gráfico A.4 Número de intentos y tasa de cambio, mezcla 1, 2 y 3

Aditivo 2: Comperlan, mezcla 1

N	Peso Probeta (gr)	Peso Probeta + Espuma (gr)	Vol Espuma (cc)	Tiempo de Mezclado	Densidad Espuma (gr/cc)	Tiempo Transcurrido	Espuma -> Liquido	Tasa de Cambio (cc/min)
1	746	908	1195	0:15:30	0.1356	>= 45 min	<= 5cc	0.1025
2	761	908	1290	0:15:30	0.1140	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
3	785	955	1290	0:15:30	0.1318	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
4	760	927	1290	0:15:30	0.1295	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
5	790	936	1290	0:15:30	0.1132	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
6	824	1002	1290	0:15:30	0.1380	>= 45 min	<= 5cc	0.1107
			1274.167			0.1270	0.1093	

Tabla A.4 Volúmen y Densidad de espuma para 15'30" de batido

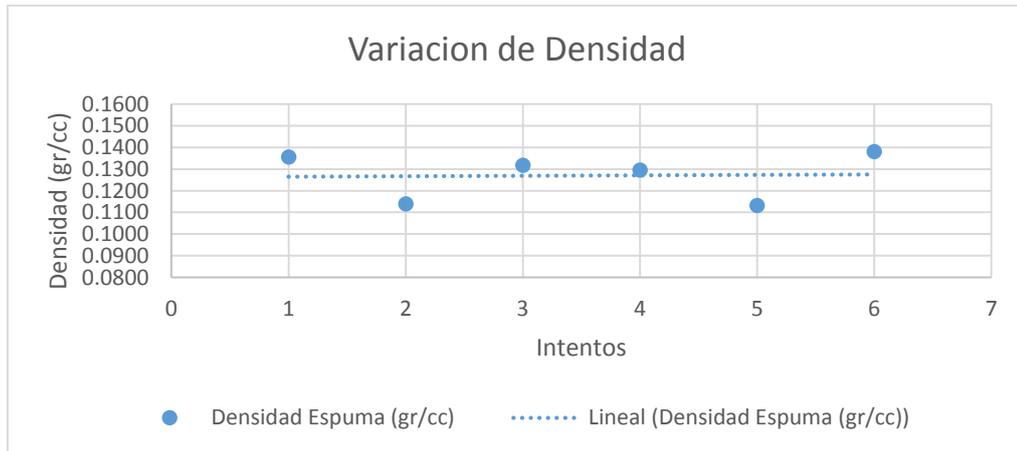


Gráfico A.5 Comportamiento del aditivo para un tiempo de batido de 15min, 30 seg

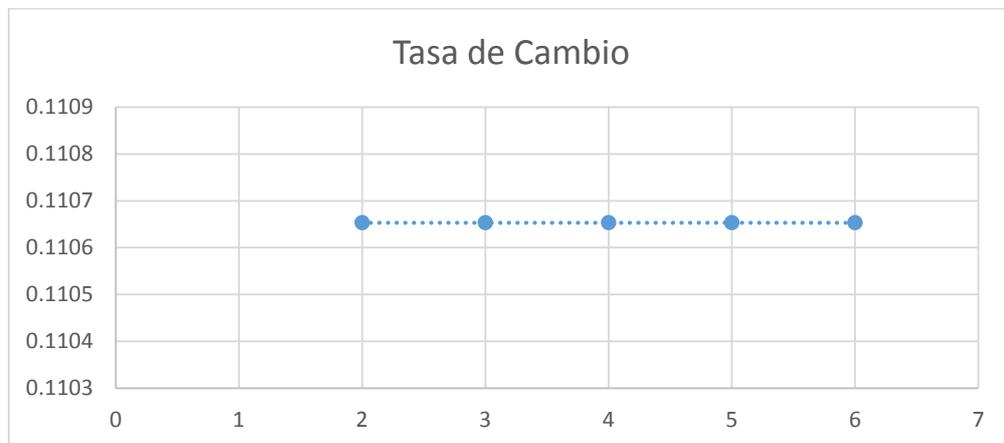


Gráfico A.6 Número de intentos y tasa de cambio

ANEXO B SOBRE LOS ÁRIDOS.

B.1 ÁRIDO AVATHAR	111
B.2 ÁRIDO ESCORPION.....	113
B.3 ÁRIDO MARATHÓN.....	114

B.- SOBRE LOS ARIDOS.

B.1 ARIDO AVATHAR.- Especificaciones y Características del Árido

Lugar: Yunguilla Río Jubones

Granulometría:

GRANULOMETRIA			% Pasa	
Tamaño (mm)	Retenido	% Retenido	Avathar	% Acumulado
4.76	6.1	0.61	99.39	0.61
2.411	64.9	6.49	92.9	7.1
1.204	196.1	19.61	73.29	26.71
0.6	257.8	25.78	47.51	52.49
0.3	276.1	27.61	19.9	80.1
0.15	166.4	16.64	3.26	96.74
0.075	24.7	2.47	0.79	99.21
Fondo	7.9	0.79		100
	1000	100		

D 10 (mm)	0.211
D 30 (mm)	0.410
D 60 (mm)	0.893
% Árido Grueso	0.61
% Árido Fino	98.6
% Finos	0.79
M. Finura	2.6375
D. Efectivo	0.2108
D. Máximo	3/8
Coefficiente Uniformidad	4.2353
Coefficiente Curvatura	0.8924

Tabla B.1 Análisis granulométrico Árido Avathar

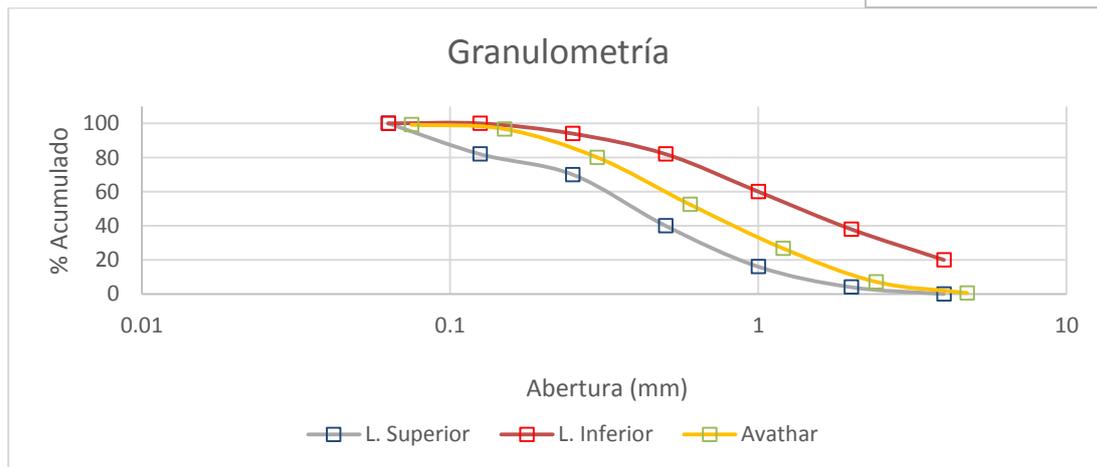


Gráfico B.1- Granulometría del árido Avathar

Características:
Permitido)

<u>Densidad</u>	<u>Valor</u>
Conjunto	1.487 gr/cc
Aparente	2.52 gr/cc
<u>Peso</u>	<u>Valor</u>
Específico	2.36 gr/cc
SSS	2.48 gr/cc
Aparente	2.68 gr/cc
% Absorción	5.02%
% Espacios	35.75%
% Finos	1.25%

Materia Orgánica: 1 (Dentro de lo



Foto B.1 Contenido materia orgánica árido Avathar

B.2 ÁRIDO ESCORPION.- Especificaciones y Características del Árido

Lugar: Santa Isabel Rio Jubones

Granulometría:

GRANULOMETRIA			% Pasa	
Tamaño (mm)	Retenido	% Retenido	Escorpión	% Acumulado
4.760	14.4	1.44	98.56	1.44
2.411	68.6	6.86	91.70	8.30
1.204	194.7	19.47	72.23	27.77
0.600	282.8	28.28	43.95	56.05
0.300	265.7	26.57	17.38	82.62
0.150	133.3	13.33	4.05	95.95
0.075	26.7	2.67	1.38	98.62
Fondo	13.8	1.38		100
	1000	100		

D 10 (mm)	0.217
D 30 (mm)	0.442
D 60 (mm)	0.943
% Árido Grueso	1.44
% Árido Fino	97.18
% Finos	1.38
M. Finura	2.7213
D. Efectivo	0.2170
D. Máximo	3/8
Coefficiente Uniformidad	4.3456
Coefficiente Curvatura	0.9572

Tabla B.2 Análisis granulométrico Árido Escorpión

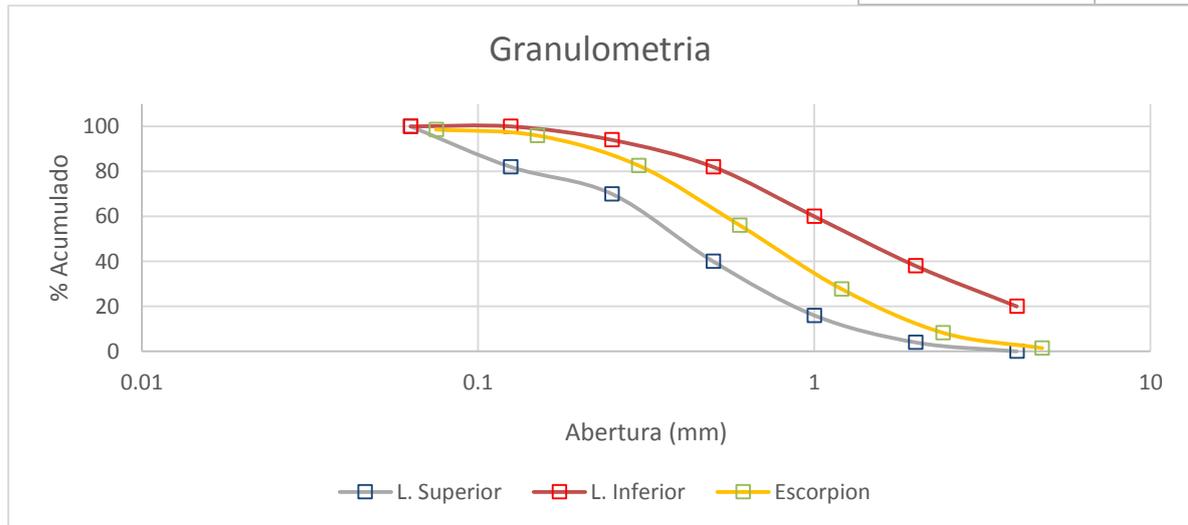


Gráfico B.2.- Granulometría del árido Escorpión

Características:

Materia Orgánica: 1
(Dentro de lo Permitido)

<u>Densidad</u>	<u>Valor</u>
Conjunto	1.257 gr/cc
Aparente	2.56 gr/cc
<u>Peso</u>	<u>Valor</u>
Específico	2.296 gr/cc
SSS	2.38 gr/cc
Aparente	2.51 gr/cc
% Absorción	3.69%
% Espacios	38.46%
% Finos	1.79%

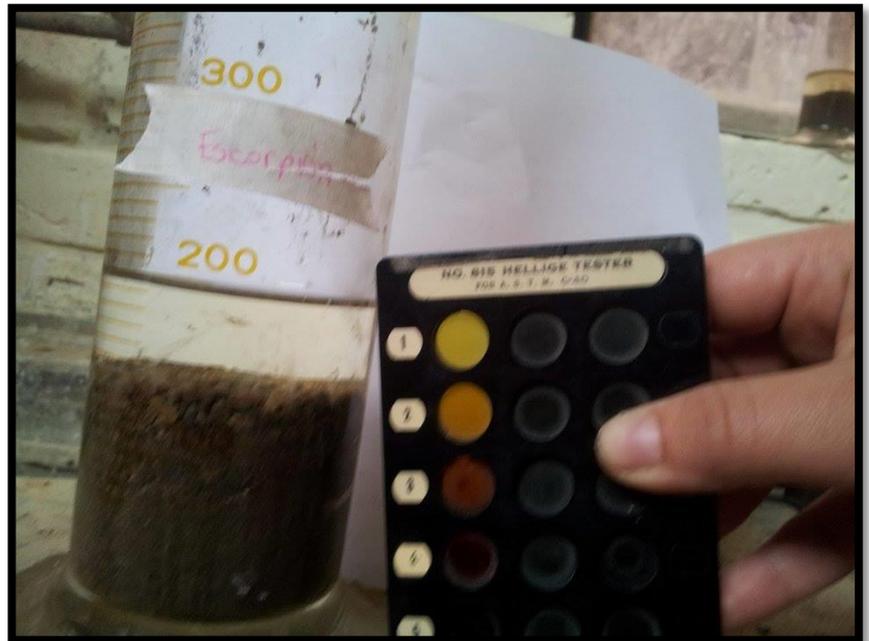


Foto B.2 Contenido materia orgánica árido Escorpión

B.3 ÁRIDO MARATHÓN.- - Especificaciones y Características del Árido
Lugar: La Josefina, río Cuenca

D 10 (mm)	0.424
D 30 (mm)	0.894
D 60 (mm)	2.000
% Árido Grueso	8.11
% Árido Fino	91.76

Granulometría:

GRANULOMETRIA			% Pasa	
Tamaño (mm)	Retenido	% Retenido	Marathón	% Acumulado
4.760	81.1	8.11	91.89	8.11
2.411	227.4	22.74	69.15	30.85
1.204	268.4	26.84	42.31	57.69
0.600	239.5	23.95	18.36	81.64
0.300	142.2	14.22	4.14	95.86
0.150	37.1	3.71	0.43	99.57
0.075	3	0.3	0.13	99.87
Fondo	1.3	0.13		100
	1000	100		

% Finos	0.13
M. Finura	3.737
D. Efectivo	0.424
D. Máximo	3/8
Coefficiente Uniformidad	4.720
Coefficiente Curvatura	0.943

Tabla B.3.- Análisis granulométrico del árido Marathón

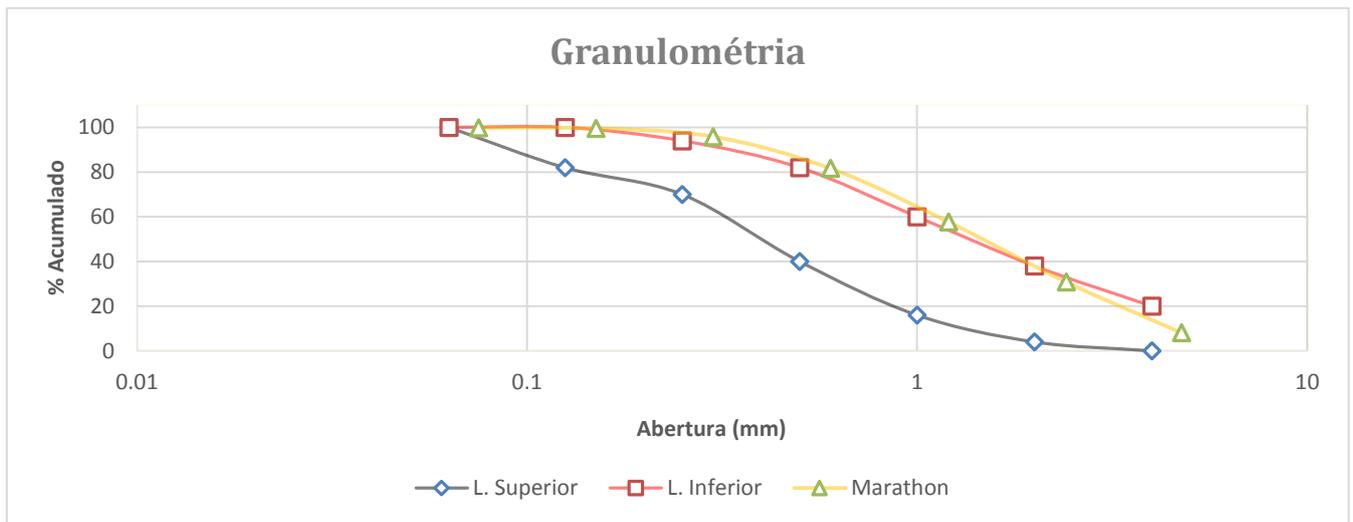
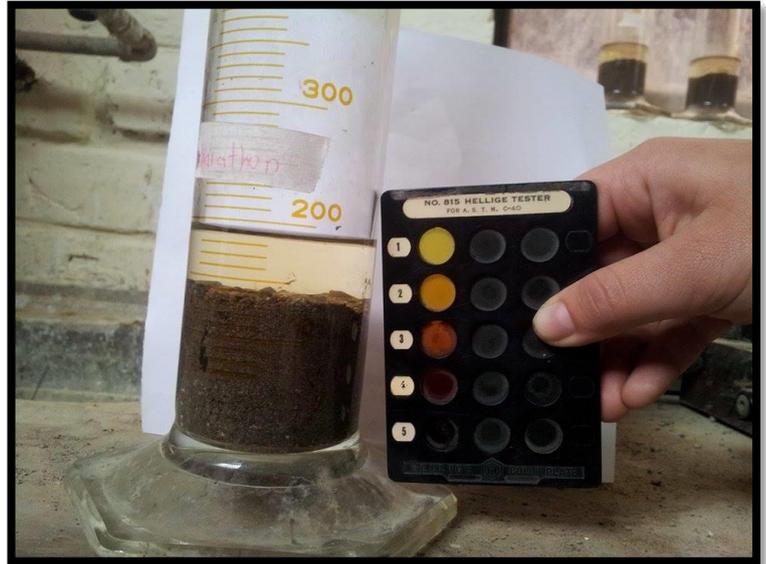


Gráfico B.3.- Granulometría del árido Marathón

Características:

<u>Densidad</u>	<u>Valor</u>
Conjunto	1.327 gr/cc
Aparente	2.78 gr/cc
<u>Peso</u>	<u>Valor</u>
Específico	2.39 gr/cc
SSS	2.46 gr/cc
Aparente	2.56 gr/cc
% Absorción	2.74%
% Espacios	35.56%
% Finos	0.67%

Materia Orgánica: 1 (Dentro de lo Permitido)



ANEXO C
SOBRE EL ARIDO AVATHAR Y AGENTE ESPUMANTE.

Resistencia a la compresión y densidades.....118-121
A los 7, 14 y 28 días

C.- SOBRE EL ÁRIDO AVATHAR Y AGENTE ESPUMANTE

Resistencia a la compresión y densidades de 5 muestras, ensayados a los 7, 14 y 28 días con varios porcentajes de agente espumante.

MEZCLA 1: relación a/c = 0.375, primera dosificación realizada, condujo a una hormigón seco cuyo asentamiento fue de 1 cm. no se ensaya.

MEZCLA 2: Resultado para la mezcla 2, con relación $\frac{a}{c} = 0.421$

DENSIDAD FRESCO en g/cm³				
Cilindro	Peso molde (gr)	Molde + Material (gr)	Volumen (cm³)	Densidad Fresco (g/cm³)
HC1	5009	8204	1570.8	2.03
HC2	4999	8211	1570.8	2.04
HC3	5111	8310	1570.8	2.04
HC4	5026	8153	1570.8	1.99
HC5	5006	8186	1570.8	2.02
HC6	5011	8191	1570.8	2.02
HC8	5008	8206	1570.8	2.04
HC9	4981	8166	1570.8	2.03
PROMEDIO				2.03

Resistencia a la compresión los 7 días:

Cilindro	Resistencia kg/cm²	Densidad
HC1	136.39	1.87
HC2	155.18	1.96
HC3	149.59	1.94
PROMEDIOS	147.05	1.93

Resistencia a la compresión los 14 días:

Cilindro	Resistencia kg/cm²	Densidad
HC4	169.93	1.97
HC5	183.93	1.96
PROMEDIOS	176.93	1.96

Resistencia a la compresión a los 28 días:

Cilindro	Resistencia kg/cm ²	Densidad
HC6	251.56	1.96
HC8	261.59	1.98
HC9	246.04	1.95
PROMEDIOS	253.06	1.96

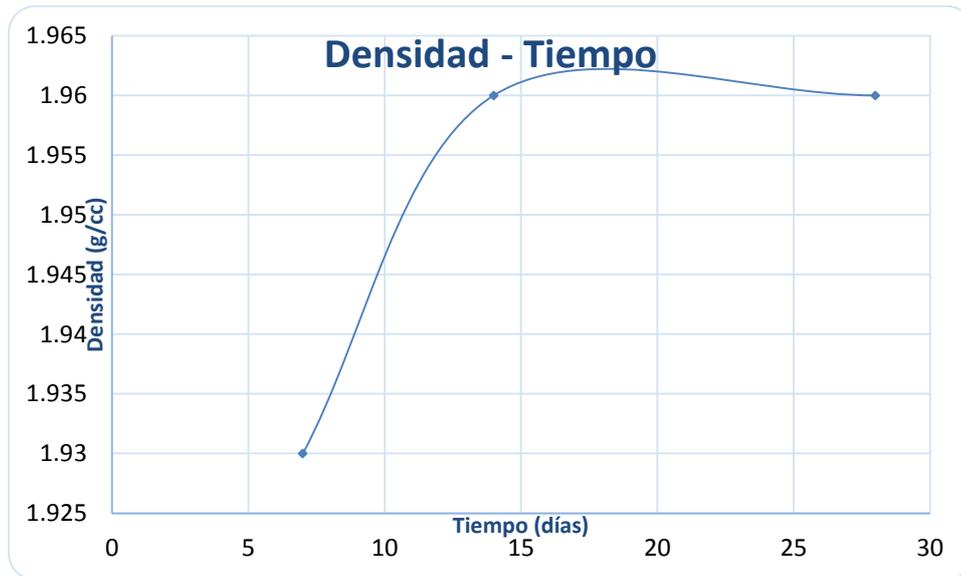


Gráfico C.1. Pruebas a los 7, 14 y 28 días vs. Resistencia a compresión $\frac{a}{c} = 0.421$

Durante el fraguado no se observó retracción, el curado se realizó por inmersión. A los 28 días, resistencia a la compresión alta 251.6 **kg/cm²** con una densidad de 1.96 g/cc que equivale a una reducción aproximada del 20% en comparación con un hormigón convencional. Con un asentamiento de 8 cm mediante el cono de Abrams.

MEZCLA 3: No se considera no fragua.

MEZCLA 4: Dosificación para una relación a/c de 0.43, dando un asentamiento de 20 cm.

DENSIDAD FRESCO

Cilindro	Peso molde (gr)	Molde + Material (gr)	Volumen (cm ³)	Densidad Fresco (g/cm ³)
HC1	5045	7719	1570.8	1.702
PROMEDIO				1.702

Resistencia a la compresión los 7 días:

Cilindro	Resistencia kg/cm ²	Densidad gr/cc
HC1	7.10	1.70
PROMEDIOS	7.10	1.70

Resistencia a la compresión los 14 días:

Cilindro	Resistencia kg/cm ²	Densidad gr/cc
HC2	9.22	1.73
PROMEDIOS	9.22	1.73

Resistencia a la compresión los 28 días:

Cilindro	Resistencia kg/cm ²	Densidad gr/cc
HC3	13.05	1.73
PROMEDIOS	13.05	1.73

Durante el fraguado no se observó retracción, el curado se realizó por inmersión, esta mezcla posee un asentamiento mayor a 20 cm mediante el cono de Abrams, del ensayo se observa que la resistencia a la compresión a los 7 días es baja que proyectado a los 28 días suponiendo una ganancia en resistencia del 60% da un valor de 12 kg/cm².

MEZCLA 5: Para una dosificación con relación a/c de 0.43 da un asentamiento en el cono de Abrams de 20 cm.

DENSIDAD FRESCO

Cilindro	Peso molde (gr)	Molde + Material (gr)	Volumen (cm ³)	Densidad Fresco (g/cm ³)
HC1	5009	8204	1570.8	2.03
HC2	4999	8211	1570.8	2.04
HC3	5111	8310	1570.8	2.04
HC4	5026	8153	1570.8	1.99
PROMEDIO				2.03

Resistencia a la compresión a los 7 días:

Cilindro	Resistencia kg/cm²	Densidad gr/cc
HC1	9.317	1.682
HC2	5.458	1.722
HC3	16.785	1.687
PROMEDIOS	10.52	1.697

El curado se realizó por inmersión a las 24 horas de colocado en el cilindro, con esta dosificación la resistencia a los 7 días es muy baja que proyectado a los 28 días y suponiendo una ganancia de la resistencia del 60% nos da una resistencia proyectada de 17 kg/cm². No se realizan ensayos a los 14 ni a los 28 días.

ANEXO D
SOBRE EL AGREGADO LIGERO CHASQUI

Granulometría, resistencia a la compresión y densidades.....123-135
A los 7, 14 y 28 días

D. SOBRE EL AGREGADO LIGERO CHASQUI

Especificaciones y Características

Nombre: Chasqui

Lugar: Vía a Tarqui

Granulometría:

CHASQUI				
GRANULOMETRIA			% Pasa	
Tamaño (mm)	Retenido	% Retenido	Marathón	% Acumulado
4.76	311	62.194	37.806	62.194
2.411	105	20.998	16.808	83.192
1.204	52	10.399	6.409	93.591
0.6	25	5.000	1.410	98.590
0.3	4	0.800	0.610	99.390
0.15	2	0.400	0.210	99.790
0.075	1	0.200	0.010	99.990
Fondo	0.05	0.010		100.000
	500.05	100.000		

D 10	1.621
D 30	3.887
D 60	0.000
% Árido Grueso	62.194
% Árido Fino	37.796
% Finos	0.010
M. Finura	5.367
D. Efectivo	1.621
D. Máximo	3/8

Tabla D.1 Análisis granulométrico Árido Chasqui

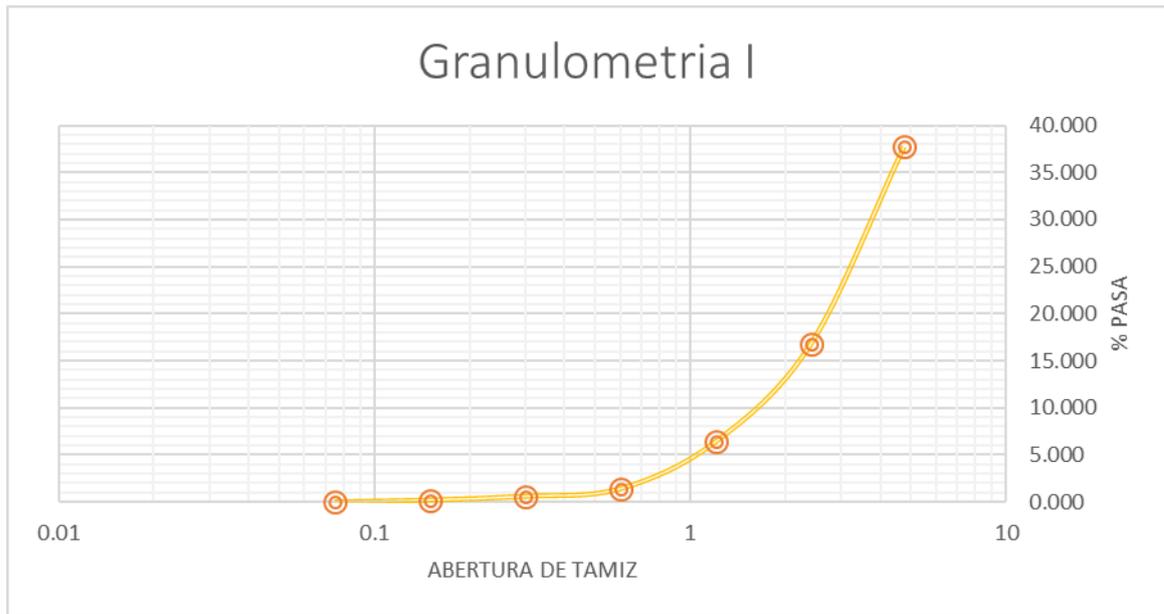


Gráfico D.1. Curva granulométrica del árido Chasqui

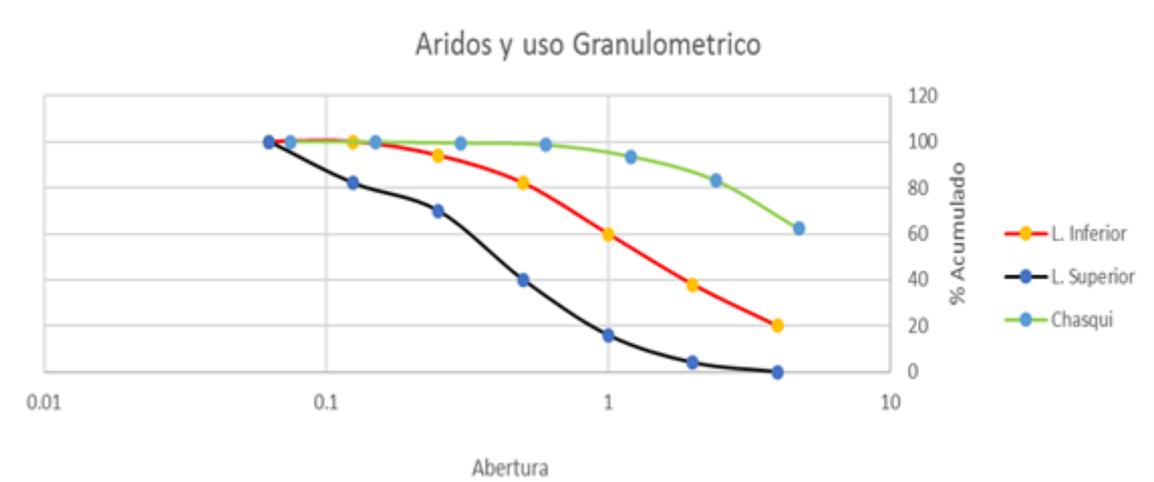


Gráfico D.2.- Granulometría del árido Chasqui

RESULTADO DE LAS MEZCLAS: densidad y Resistencia a la Compresión con árido Avathar, Chasqui y Agente Espumante.

Mezcla 1: Esta mezcla se la realizó con una relación $\frac{a}{c} = 0.43$ se sustituye parte del árido por agregado fino de densidad baja en un 60%, con esta dosificación se obtuvo:

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso Molde (gr)	Molde + Material (g)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
2CH1	5016	7404	1570.8	1.52
2CH2	5009	7238	1570.8	1.42
2CH3	5244	7565	1570.8	1.48
PROMEDIO				1.47

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 14 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm²)	Densidad (g/cc)
2HC1	2504	10.1	10.1	20.09	10.14	1621.951	4.54	35.67	45.03	1.54
2HC2	2437	10.1	10.1	18.97	10.125	1527.381	4.43	34.08	43.15	1.60
PROMEDIOS							4.49	34.88	44.09	1.57

Mezcla 2: Dosificación realizada con una relación $\frac{a}{c} = 0.58$ y fluidez de 73 cm:

DENSIDAD FRESCO						
Cilindro	Peso molde	Molde + Material	Volumen	Densidad Fresco		
2CH1	5016	7869	1570.8	1.82		
2CH2	5022	7901	1570.8	1.83		
2CH3	5106	7944	1570.8	1.81		
2CH4	4993	7894	1570.8	1.85		
PROMEDIO						1.83
Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	D (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm³)	Densidad Fraguado
2795	9.96	10.24	10.1	20.28	1624.803	1.72
2817	10.22	10.24	10.23	20.28	1666.898	1.69
2782	10.07	10.08	10.075	20.13	1604.811	1.73
2821	9.98	10.18	10.08	20.39	1627.152	1.73
PROMEDIO						1.72

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm).	D2 (cm).	Altura (cm)	D (cm)	Volúmen (cm³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm²)	Densidad (g/cc)
2HC1	2863	10.1	10.2	20.330	10.148	1644.165	7.37	57.84	72.91	1.74
2HC2	2890	10.2	10.1	20.445	10.143	1651.837	7.71	60.53	76.37	1.75
PROMEDIO.							7.54	59.19	74.64	1.75

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm³)	Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm²	Densidad (g/cc)
2HC3	2875	10.1	10.1	20.17	10.1	1615.99	16.57	130.17	165.62	1.78
2HC4	2853	10.2	10.2	20.27	10.2	1653.073	15.41	121.02	151.27	1.73
PROMEDIO							15.99	125.60	158.44	1.75

Mezcla 3: Reemplazo del 5% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.55 y se tiene una fluidez de 80.4 cm.

DENSIDAD EN FRESCO				
Cilindro	Peso molde (g)	Molde + Material (g)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
CH51	5022	7783	1570.8	1.76
CH52	5097	7853	1570.8	1.75
CH53	4992	7753	1570.8	1.76
CH54	5054	7810	1570.8	1.75
PROMEDIO				1.76

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde (g)	D1 (cm)	D2 (cm)	D (cm)	Altura (cm)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
CH51	2717	10.07	10.01	10.04	20.01	1584.180	1.72
CH52	2708	10.10	10.05	10.075	19.98	1592.852	1.70
CH53	2716	10.15	10.05	10.098	20.15	1613.588	1.68
CH54	2714	10.01	9.96	9.985	20.12	1575.484	1.72
PROMEDIO							1.71

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
CH51	2761	10.01	10.1	20.13	10.06	1600.036	5.32	41.08	52.69	1.73
CH52	2750	10.01	10.2	19.98	10.08	1594.434	6.43	50.53	64.55	1.72
PROMEDIOS							5.88	45.81	58.62	1.73
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
CH53	2782	10.14	10.2	20.04	10.17	1626.307	12.29	96.53	121.25	1.71
CH54	2780	10.14	10.3	20.11	10.2	1641.634	11.46	90.02	112.41	1.69
PROMEDIOS							11.88	93.28	116.83	1.70

Mezcla 4: Reemplazo del 10% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.57 y se tiene una fluidez de 87.9 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde (g)	Molde + Material (g)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
CH101	4946	7727	1570.8	1.77
CH102	5009	7791	1570.8	1.77
CH103	5026	7809	1570.8	1.77
CH104	5242	8055	1570.8	1.79
PROMEDIO				1.78

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde (g)	D1 (cm)	D2 (cm)	D (cm)	Altura (cm)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
CH101	2730	10.1	9.91	9.98	20.06	1569.213	1.74
CH102	2727	9.94	10.15	10.045	20.24	1603.985	1.70
CH103	2730	9.99	10.04	10.015	20.26	1595.994	1.71
CH104	2740	10	9.89	9.965	20.24	1578.538	1.74
PROMEDIO							1.72

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
CH101	2791	10.0	10.11	20.11	10.065	1600.035	6.16	48.41	62.02	1.74
CH102	2782	10.1	10.14	20.33	10.125	1636.882	6.36	49.97	63.26	1.70
PROMEDIOS							6.26	49.19	62.64	1.72
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
CH103	2806	10.1	10.17	20.22	10.13	1629.634	11.55	90.73	114.75	1.72
CH104	2818	10.1	10.16	20.19	10.14	1630.430	12.14	95.31	120.30	1.73
PROMEDIOS							11.84	93.02	117.53	1.73

Mezcla 5: Reemplazo del 10% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.55 y se tiene una fluidez de 82.9 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde (g)	Molde + Material (g)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
2CH101	5020	7713	1570.8	1.71
2CH102	5004	7701	1570.8	1.72
2CH103	5097	7791	1570.8	1.72
2CH104	5004	7706	1570.8	1.72
PROMEDIO				1.72

DESINDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde (g)	D1 (cm)	D2 (cm)	D (cm)	Altura (cm)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
2CH101	2654	10.15	10.1	10.12	20.04	1611.939	1.65
2CH102	2651	9.98	10.2	10.065	20.14	1602.422	1.65
2CH103	2628	10.1	9.91	10.005	20.04	1575.512	1.67
2CH104	2656	10.18	10	10.11	20.04	1608.755	1.65
PROMEDIO							1.65

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
2CH101	2707	10.1	10.1	20.04	10.099	1605.256	6.04	47.46	60.40	1.69
2CH102	2704	10.13	10.1	20.08	10.115	1613.561	5.89	46.29	58.72	1.68
PROMEDIOS							5.97	46.87	59.56	1.68
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
2CH103	2703	10.095	10.1	20.06	10.0875	1603.201	10.82	84.97	108.38	1.69
2CH104	2734	10.14	10.2	19.9	10.155	1611.769	10.16	79.78	100.41	1.70
PROMEDIOS							10.49	82.38	104.40	1.69

Mezcla 6: Reemplazo del 15% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.63 y se tiene una fluidez de 87.5 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde (g)	Molde + Material (g)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
CH151	4981	7506	1570.8	1.61
CH152	4994	7551	1570.8	1.63
CH153	5101	7624	1570.8	1.61
CH154	5006	7507	1570.8	1.59
PROMEDIO				1.61

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde (g)	D1 (cm)	D2 (cm)	D (cm)	Altura (cm)	Volumen (cc)	Densidad Fresco (g/cc)
CH151	2478	9.82	10.14	9.9775	20.095	1571.163	1.58
CH152	2499	10.11	10.16	10.135	20.2	1629.629	1.53
CH153	2478	10.04	10.03	10.035	20.22	1599.211	1.55
CH154	2466	10.14	10.12	10.128	20.06	1615.940	1.53
PROMEDIO							1.55

RESISTENCIA A LA COMPRESION, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
1HC1	2544	10.17	10.17	20.27	10.17	1646.590	3.80	29.87	37.48	1.55
1HC2	2566	10.18	10.18	20.4	10.18	1658.781	3.75	29.44	36.91	1.55
PROMEDIOS							3.78	29.65	37.19	1.55
RESISTENCIA A LA COMPRESION, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D (cm)	Volumen (cm ³)	Resistencia (Mpa)	Fuerza (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Densidad (g/cc)
CH153	2572	10.14	10.15	20.3	10.14	1640.121	5.90	46.33	58.46	1.57
CH154	2559	10.16	10.1	20.13	10.13	1622.380	6.06	47.61	60.21	1.58
PROMEDIOS							5.98	46.97	59.33	1.57

Mezcla 7: Reemplazo del 3% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.412 y se tiene una fluidez de 74 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde	Molde + Material	Volumen	Densidad Fresco
1CH3	4983	7584	1570,8	1,66
2CH3	5009	7558	1570,8	1,62
3CH3	5056	7626	1570,8	1,64
4CH3	5101	7688	1570,8	1,65
PROMEDIO				1,64

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde	D1 (cm)	D2 (cm)	D promedio (cm)	Altura (cm)	Volumen	Densidad
1CH3	2569	10,13	10,13	10,13	20,145	1623,588	1,58
2CH3	2513	10,19	10,19	10,19	20,16	1644,102	1,53
3CH3	2533	10,165	10,165	10,165	20,19	1638,479	1,55
4CH3	2550	10,05	10,05	10,05	20,19	1601,615	1,59
PROMEDIO							1,56

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D		Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)	Volumen (cm ³)				
1CH3	2676	10,135	10,16	20,1	10,1475	1625,564	2,21	17,32	21,82	1,65
2CH3	2632	10,135	10,14	20,185	10,1375	1629,222	1,37	10,76	13,59	1,62
PROMEDIOS							1,79	14,04	17,70	1,63

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D		Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)	Volumen (cm ³)				
3CH3	2666	10,09	10,09	20,22	10,09	1616,789	3,22	25,29	32,24	1,65
4CH3	2684	10,1	10,1	20,2	10,1	1618,393	4,57	35,86	45,62	1,66
PROMEDIOS							3,89	30,57	38,93	1,65

Mezcla 8: Reemplazo del 5% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.411 y se tiene una fluidez de 74.5 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde	Molde + Material	Volumen	Densidad Fresco
1CH5	4995	7696	1570,8	1,72
2CH5	4992	7638	1570,8	1,68
3CH5	5096	7697	1570,8	1,66
4CH5	5030	7753	1570,8	1,73
PROMEDIO				1,70

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde	D1 (cm)	D2 (cm)	D promedio	Altura (cm)	Volumen	Densidad
1CH5	2654	10,16	10,16	10,16	20,185	1636,462	1,62
2CH5	2603	10,14	10,14	10,14	20,2	1631,237	1,60
3CH5	2509	10,15	10,15	10,15	20,18	1632,838	1,54
4CH5	2680	10,22	10,22	10,22	20,3	1665,281	1,61
PROMEDIO							1,59

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D		Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)	Volumen (cm ³)				
1CH5	2775	10,19	10,06	20,37	10,125	1640,102	2,78	21,80	27,60	1,69
2CH5	2736	10,19	10,19	20,29	10,19	1654,704	1,01	7,93	9,91	1,65
PROMEDIOS							1,89	14,86	18,75	1,67

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D		Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)	Volumen (cm ³)				
3CH5	2709	10,11	10,11	20,19	10,11	1620,796	3,18	15,01	19,05	1,67
4CH5	2807	10,12	10,12	20,16	10,12	1621,591	3,91	30,67	38,87	1,73
PROMEDIOS							3,54	22,84	28,96	1,70

Mezcla 9: Reemplazo del 5% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.431 y se tiene una fluidez de 76 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde	Molde + Material	Volumen	Densidad Fresco
1CH52	5023	7668	1570,8	1,68
2CH52	5012	7669	1570,8	1,69
3CH52	4993	7670	1570,8	1,70
4CH52	5245	7906	1570,8	1,69
PROMEDIO				1,69

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde	D1 (cm)	D2 (cm)	D		Volumen	Densidad
				promedio	Altura (cm)		
1CH52	2621	10,21	10,21	10,21	20,26	1658,749	1,58
2CH52	2608	10,09	10,09	10,09	20,32	1624,785	1,61
3CH52	2631	10,14	10,14	10,14	20,09	1622,354	1,62
4CH52	2618	10,12	10,12	10,12	20,36	1637,678	1,60
PROMEDIO							1,60

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS											
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D		Volumen (cm ³)	Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)						
1CH52	2694	10,17	10,14	20,17	10,155		1633,637	3,82	30,01	37,77	1,65
2CH52	2687	10,18	10,1	20,18	10,14		1629,622	2,90	22,74	28,71	1,65
PROMEDIOS								3,36	26,37	33,24	1,65
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS											
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D		Volumen (cm ³)	Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)						
3CH52	2719	10,12	10,12	20,12	10,12		1618,374	8,30	65,91	83,53	1,68
4CH52	2702	10,16	10,16	20,21	10,16		1638,489	7,94	62,33	78,37	1,65
PROMEDIOS								8,12	64,12	80,95	1,66

Mezcla 10: Reemplazo del 10% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.678 y se tiene una fluidez de 100 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde	Molde + Material	Volumen	Densidad Fresco
1CH1	5029	7684	1570,8	1,69
1CH2	5006	7664	1570,8	1,69
1CH3	4991	7674	1570,8	1,71
1CH4	4978	7629	1570,8	1,69
PROMEDIO				1,69

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde	D1 (cm)	D2 (cm)	D		Volumen	Densidad
				promedio	Altura (cm)		
1CH1	2369	10,15	10,15	10,15	20,05	1622,31933	1,46
1CH2	2633	10,11	10,11	10,11	20,18	1619,993808	1,63
1CH3	2616	10,12	10,12	10,12	20,17	1622,395767	1,61
1CH4	2594	10,14	10,14	10,14	20,19	1630,429822	1,59
PROMEDIO							1,57

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D	Volumen (cm ³)	Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)					
1CH1	2654	10,12	10,12	20,22	10,12	1626,417	4,55	35,72	45,26	1,63
1CH3	2697	10,12	10,12	20,2	10,12	1624,809	4,70	36,94	46,82	1,66
PROMEDIOS							4,63	36,33	46,04	1,65

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D	Volumen (cm ³)	Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad
					promedio (cm)					
1CH2	2660	10,16	10,15	20,175	10,155	1634,042	8,46	66,48	83,67	1,63
1CH4	2415	10,14	10,11	20	10,125	1610,311	5,06	39,77	50,36	1,50
PROMEDIOS							6,76	53,13	67,01	1,56

Mezcla 11: Reemplazo del 5% de la arena por árido ligero Chasqui para una relación de a/c de 0.582 y se tiene una fluidez de 96 cm.

DENSIDAD FRESCO				
Cilindro	Peso molde	Molde + Material	Volumen	Densidad Fresco
2CH1	5093	7471	1570,8	1,51
2CH2	5243	7678	1570,8	1,55
2CH3	4989	7419	1570,8	1,55
2CH4	4984	7390	1570,8	1,53
PROMEDIO				1,54

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso molde	D1 (cm)	D2 (cm)	D	Altura (cm)	Volumen	Densidad
				promedio (cm)			
2CH1	2345	10,14	10,14	10,14	20,01	1615,894	1,45
2CH2	2390	10,06	10,06	10,06	20,2	1605,599	1,49
2CH3	2389	10,17	10,17	10,17	20,01	1625,469	1,47
2CH4	2609	9,98	9,98	9,98	20,27	1585,640	1,65
PROMEDIO							1,51

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 7 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D promedio (cm)	Volumen (cm³)	Resistencia MPa	Fuerza a KN	Resistencia kg/cm²	Densidad
2CH4	2670	10,1	10,1	20,25	10,11	1625,6133	4,25	33,36	42,36	1,64
2CH3	2440	10,1	10,1	20,05	10,15	1622,3195	3,33	26,14	32,93	1,50
PROMEDIOS							3,79	29,75	37,64	1,57
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, 28 DÍAS										
Cilindro	Peso (gr)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	D promedio	Volumen (cm³)	Resistencia MPa	Fuerza KN	Resistencia kg/cm²	Densidad
2CH1	2409	10,0	10,14	20,01	10,115	1607,9361	4,18	32,79	41,60	1,50
2CH2	2448	10,1	10,14	20	10,1475	1617,4767	5,73	44,96	56,67	1,51
PROMEDIOS							4,95	38,88	49,14	1,51

ANEXO E

DETALLE DE MEZCLA FINAL Y RESULTADOS

a.- Ensayo a Compresión.....	137-142
b.- Ensayo a tracción	
c.- Ensayo a Flexión	
d.- Módulo de elasticidad	

DETALLE DE LA MEZCLA FINAL Y RESULTADOS

Tablas con datos y Resultados de la mezcla final del HC

Estos ensayos se realizaron a los 7, 14 y 28 días para obtener la resistencia a compresión, tracción y flexión, así como para la determinación del Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson.

a.- Ensayo a Compresión:

DENSIDAD FRESCO					
Cilindro	Peso Gr	Cilindro + Mat gr	Peso Material Gr	Volumen cm³	Densidad gr/cm³
D1C1	5106	7931	2825	1570.796	1.798
D1C2	5051	7903	2852	1570.796	1.816
D1C3	5038	7861	2823	1570.796	1.797
D1C4	5022	7819	2797	1570.796	1.781
D1C5	5013	7784	2771	1570.796	1.764
D1C6	5233	8037	2804	1570.796	1.785
D1C7	4992	7876	2884	1570.796	1.836
D1C8	5026	7903	2877	1570.796	1.832
D1C9	4993	7863	2870	1570.796	1.827

Promedio	1.804
-----------------	-------

ASENTAMIENTO (cm)	
M1	18.0
M2	17.5
M3	17.0
M4	18.0
Promedio	17.6

DENSIDAD FRAGUADO							
Cilindro	Peso gr	D1 cm	D2 Cm	D Promedio cm	Altura cm	Volumen cm³	Densidad gr/cm³
D1C1	2789	10.15	10.15	10.150	20.04	1621.510	1.720
D1C2	2812	10.05	10.05	10.050	20.25	1606.375	1.751
D1C3	2792	10.01	10.05	10.030	20.17	1593.667	1.752
D1C4	2750	10.055	10.05	10.052	20.01	1588.127	1.732
D1C5	2734	10.085	10.13	10.107	20.11	1613.576	1.694
D1C6	2768	10.16	10.09	10.127	20.19	1626.413	1.702
D1C7	2844	10.1	10.17	10.135	20.00	1613.494	1.763
D1C8	2835	10.09	10.2	10.145	20.27	1638.505	1.730
D1C9	2822	10.16	10.15	10.155	20.19	1635.257	1.726
Promedio							1.730

RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS									
Cilindro	Peso <i>gr</i>	D			Altura <i>cm</i>	Volumen <i>cm³</i>	Fuerza <i>KN</i>	Resistencia <i>kg/cm²</i>	Densidad <i>gr/cm³</i>
		D1 <i>cm</i>	D2 <i>Cm</i>	Promedio <i>cm</i>					
D1C1	2806	10.13	10.13	10.13	20.11	1620.768	38.736	48.993	1.731
D1C2	2827	10.12	10.12	10.12	20.15	1620.787	49.021	62.124	1.744
D1C3	2810	10.11	10.11	10.11	20.14	1616.783	42.793	54.339	1.738
Promedio							43.517	55.152	1.738

RESISTENCIA A COMPRESION A LOS 14 DÍAS									
Cilindro	Peso <i>gr</i>	D			Altura <i>cm</i>	Volumen <i>cm³</i>	Fuerza <i>KN</i>	Resistencia <i>kg/cm²</i>	Densidad <i>gr/cm³</i>
		D1 <i>cm</i>	D2 <i>Cm</i>	Promedio <i>cm</i>					
D1C4	2798	10.1	10.1	10.1	20.2	1618.393	51.427	65.432	1.729
D1C6	2783	10.2	10.2	10.2	20.1	1642.428	58.882	73.455	1.694
D1C9	2861	10.14	10.14	10.14	20.2	1631.237	78.792	99.460	1.754
Promedio							63.034	79.449	1.726

RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS									
Cilindro	Peso <i>gr</i>	D			Altura <i>cm</i>	Volumen <i>cm³</i>	Fuerza <i>KN</i>	Resistencia <i>kg/cm²</i>	Densidad <i>gr/cm³</i>
		D1 <i>cm</i>	D2 <i>Cm</i>	Promedio <i>cm</i>					
D1C5	2810	10.08	10.12	10.1	20.24	1621.598	93.120	118.509	1.733
D1C7	2926	10.15	10.16	10.155	20.2	1636.067	97.135	122.397	1.788
D1C8	2923	10.11	10.16	10.135	20.4	1645.764	100.200	126.650	1.776
Promedio							96.818	122.518	1.766

Tabla E.1. Mezcla final resistencia compresión 7, 14, 28 días

b.- Ensayo de Flexión:

$$MR = \frac{P * L}{b * d^2}$$

Siendo:

MR = Módulo de rotura de la viga (kg/cm²).

P = Carga máxima aplicada en (kg.).

L = Distancia entre apoyos (cm).

b = Ancho de la viga en la posición de ensayo, en la sección de falla (cm).

d = Altura de la viga en la posición de ensayo, en la sección de falla (cm).

Viga	b cm	H cm	I cm	Peso gr	Fuerza KN	Longitud apoyos cm	Densidad gr/cm ³	Módulo de Ruptura kg/cm ²
1	15.3	13.3	53.4	20051	15.145	48	1.845	27.872
6	15.2	15.3	53.5	20593	8.917	48	1.655	12.636
Promedio								20.254

Viga	b cm	h cm	I cm	Peso gr	Fuerza KN	Longitud apoyos cm	Densidad gr/cm ³	Módulo de Ruptura kg/cm ²
4	15.5	15.3	53.5	20374	11.89	48	1.606	16.400
2	15.5	15.3	53.5	20619	12.314	48	1.625	16.972
Promedio								16.686

Viga	b cm	h cm	I cm	Peso gr	Fuerza KN	Longitud apoyos cm	Densidad gr/cm ³	Módulo de Ruptura kg/cm ²
3	15.5	15.2	53.5	20488	15.145	48	1.625	21.064
5	15.9	15.4	53.7	20558	13.635	48	1.563	18.045
Promedio								19.555

c.- Ensayo de Tracción:

$$RT = \frac{2P}{\pi LD}$$

Donde:

RT = Resistencia a la tracción o tensión indirecta de un cilindro en (kg/cm²), con aproximación a 1 kg/cm²
P = Carga máxima aplicada (kg.).
L = Longitud del cilindro (cm).
D = Diámetro del cilindro (cm).

RESISTENCIA A TRACCIÓN A LOS 7 DÍAS									
Cilindro	Peso gr	D1 cm	D2 cm	d cm	L cm	Volumen cm ³	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad gr/cm ³
D2C6	2737	10.11	10.15	10.13	20.07	1617.544	21.043	6.717	1.692
D2C9	2747	10.13	10.1	10.115	20.095	1614.766	24.676	7.878	1.701
D2C3	2747	10.05	10.13	10.09	20.11	1607.993	25.383	8.118	1.708
Promedio							23.701	7.571	1.701

RESISTENCIA A TRACCIÓN A LOS 14 DÍAS									
Cilindro	Peso gr	D1 cm	D2 cm	d cm	L cm	Volumen cm ³	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad gr/cm ³
D2C1	2720	10.12	10.07	10.095	20.07	1606.386	27.176	8.704	1.693
D2C2	2697	10.17	10.2	10.185	20	1629.453	23.496	7.485	1.655
D2C4	2737	10.11	10.25	10.18	20.07	1633.551	29.394	9.336	1.675
Promedio							26.689	8.509	1.675

RESISTENCIA A TRACCIÓN A LOS 28 DÍAS									
Cilindro	Peso gr	D1 cm	D2 cm	d cm	L cm	Volumen cm ³	Fuerza KN	Resistencia kg/cm ²	Densidad gr/cm ³
D2C7	2749	10.2	10.2	10.2	20.19	1649.782	46.615	14.689	1.666
D2C9	2711	10.13	10.14	10.135	20.05	1617.528	36.377	11.617	1.676
D2C8	2722	10.11	10.13	10.12	20.2	1624.809	29.724	9.436	1.675
Promedio							37.572	11.914	1.673

d.- Módulo de Elasticidad

ENSAYO ELASTICIDAD A LOS 28 DIAS								
Cilindro	Peso gr	D1 cm	D2 cm	D Promedio cm	Altura cm	Volumen cm ³	Densidad gr/cm ³	Área cm ²
D3C6	9705	15.38	15.23	15.305	30.61	5631.445	1.723	183.9740416
D3C5	9744	15.64	15.57	15.605	30.22	5779.788	1.686	191.2570388
Promedio							1.705	187.616

Deformaciones longitudinales y transversales

CILINDRO D3C5							
CARGA	DEFORMACIÓN TRANSVERSAL	DEFORMACIÓN LONGITUDINAL	Lo	σ	ΔL (Long)	ϵ (Long)	ϵ (Trans)
KN	mm	mm	mm	kg/cm ²	mm		
5.24	2	10	203	2.847	0.010	0.000	0.000
7.41	2	20	203	4.026	0.020	0.000	0.000
10.47	3	30	203	5.689	0.030	0.000	0.000
14.06	4	40	203	7.639	0.040	0.000	0.000
18.54	8	50	203	10.073	0.050	0.000	0.000
21.09	9	60	203	11.459	0.060	0.000	0.000
23.17	10	70	203	12.589	0.070	0.000	0.000
25.62	12	80	203	13.920	0.080	0.000	0.000
28.69	14	90	203	15.588	0.090	0.000	0.000
31.71	30	100	203	17.229	0.100	0.000	0.000
34.54	49	110	203	18.767	0.110	0.001	0.000
CARGA MAX	20.34	KN		11.051			

CILINDRO D3C6							
CARGA	DEFORMACIÓN TRANSVERSAL	DEFORMACIÓN LONGITUDINAL	Lo	σ	ΔL (Long)	ϵ (Long)	ϵ (Trans)
KN	mm	mm	mm	kg/cm ²	mm		
4.15	0	10	203	2.2548	0.01	5E-05	0
7.45	2	20	203	4.0478	0.02	1E-04	1E-05
11.98	4	30	203	6.5091	0.03	1E-04	2E-05
14.71	5	40	203	7.9924	0.04	2E-04	2E-05
18.64	7	50	203	10.128	0.05	2E-04	3E-05
22.93	9	60	203	12.459	0.06	3E-04	4E-05
26.23	10.5	70	203	14.251	0.07	3E-04	5E-05
29.63	13	80	203	16.099	0.08	4E-04	6E-05
31.66	14	90	203	17.202	0.09	4E-04	7E-05
34.35	15	100	203	18.663	0.1	5E-04	7E-05

37.18	17	110	203	20.201	0.11	5E-04	8E-05
40.01	17.5	120	203	21.739	0.12	6E-04	9E-05
42.98	20	130	203	23.352	0.13	6E-04	1E-04
45.86	21	140	203	24.917	0.14	7E-04	0.0001
47.75	22.5	150	203	25.944	0.15	7E-04	0.0001
50.25	24	160	203	27.302	0.16	8E-04	0.0001
52.51	25	170	203	28.53	0.17	8E-04	0.0001
54.59	26	180	203	29.66	0.18	9E-04	0.0001
57.47	29	190	203	31.225	0.19	9E-04	0.0001
60.06	29	200	203	32.632	0.2	1E-03	0.0001
62.18	30	210	203	33.784	0.21	0.001	0.0001
64.54	30	220	203	35.066	0.22	0.001	0.0001
66.86	32.5	230	203	36.327	0.23	0.001	0.0002
69.21	35	240	203	37.604	0.24	0.001	0.0002
71.15	37	250	203	38.658	0.25	0.001	0.0002
73.93	40	260	203	40.168	0.26	0.001	0.0002
76.39	41.5	270	203	41.505	0.27	0.001	0.0002
80.25	44	280	203	43.602	0.28	0.001	0.0002
81.39	45.5	290	203	44.221	0.29	0.001	0.0002
83.18	47	300	203	45.194	0.3	0.001	0.0002
85.17	49	310	203	46.275	0.31	0.002	0.0002
87.93	49	320	203	47.775	0.32	0.002	0.0002
89.74	53	330	203	48.758	0.33	0.002	0.0003
91.44	55	340	203	49.682	0.34	0.002	0.0003
92.99	56	350	203	50.524	0.35	0.002	0.0003
94.55	58	360	203	51.372	0.36	0.002	0.0003
95.82	59	370	203	52.062	0.37	0.002	0.0003
97.05	60	380	203	52.73	0.38	0.002	0.0003
98.14	61	390	203	53.322	0.39	0.002	0.0003

ANEXO F

SOBRE NORMAS CONSULTADAS

NORMA INEN	144
NORMA ASTM	144

F.- SOBRE NORMAS CONSULTADAS

Normas que han sido consultadas u utilizadas en la investigación

NORMA INEN³

INEN 152:2010 Cemento Portland Requisitos.

INEN 156:2009 Determinación de la densidad.

INEN 855 Áridos para hormigón. Determinación del contenido orgánico en los agregados finos.

INEN 573: Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.

INEN 2528: Requisitos para curado, cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento de agua, cuartos para elaborar mezclas.

INEN 2554: Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón, para una viga simple con carga en los tercios.

INEN 856:2010 Áridos, determinación de la densidad, densidad relativa, (gravedad específica) y absorción del agregado fino.

INEN 857: Determinación del peso específico y absorción.

NORMA ASTM⁴

ASTM C-29 Método estándar para determinar la densidad aparente de los agregados.

ASTM C-31/C-31M-03a Preparación y curado en obra de las probetas para ensayo del hormigón en cilindros y vigas.

ASTM C-33 Especificaciones de áridos para elaboración del hormigón.

ASTM c-39 Prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto.

ASTM C-40 Prueba estándar para determinar el contenido orgánico en los agregados finos para elaboración del hormigón.

ASTM C-78 Prueba a la flexión.

ASTM C87 Prueba estándar para determinación de las impurezas orgánicas en el agregado fino del hormigón.

ASTM C 127 Determinación del peso específico y absorción.

ASTM C-138 Determinación de la densidad (peso unitario) y contenido del aire (gravimétrico) del hormigón.

ASTM C-143 Determinación del asentamiento en hormigones.

ASTM C-192 Preparación y curado de especímenes de ensayo de hormigón en laboratorio.

ASTM 187: Consistencia de la pasta en el cemento.

ASTM C-219-07a Terminología empleada con cemento hidráulico.

ASTM C-469 Prueba estándar para la determinación del Módulo elástico y Coeficiente poisson del hormigón en compresión.

ASTM C-511 Especificaciones para el curado con tanques de almacenamiento de agua.

ASTM C-642 Prueba estándar para determinar la densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido.

ASTM C496 Método de ensayo Normalizado para Resistencia a la Tracción indirecta de especímenes cilíndricos de hormigón.

ACI⁵ 523-3R-14: Guía para elaboración de concretos celulares sobre los 800kg/m³

³ INEN – Instituto Ecuatoriano de Normalización

⁴ ASTM, American Society for Testing Materials

⁵ ACI American Concrete Institute.

ANEXO G
SOBRE REGISTRO FOTOGRÁFICO

FOTOS 1 – 12.....146 -149

G.- SOBRE EL REGISTRO FOTOGRÁFICO

Registro fotográfico del proceso de elaboración del Hormigón Celular y ensayos mecánicos realizados en el Laboratorio de Geotécnica y Materiales



Foto.G.1 Elaboración de la espuma mediante batido mecánico



Foto G.2 Preparación de los moldes



Foto G.3 Llenado en el cono de Abrams



Foto G.4 Mesa de fluidez



Foto G.5 Mesa de fluidez realizando la prueba



Foto G.6 Cilindros con el Hormigón Celular



Foto G.7 Preparación para el curado, a las 24 horas de elaborado



Foto G.8 Aspecto del Hormigón Celular antes de la prueba de carga



Foto G.9 Cilindro con Hormigón Celular realizando la prueba de compresión



Foto G.10 Sección de viga fallada por carga a flexión



Foto G.11 Sección de cilindro fallada por tracción (compresión indirecta)

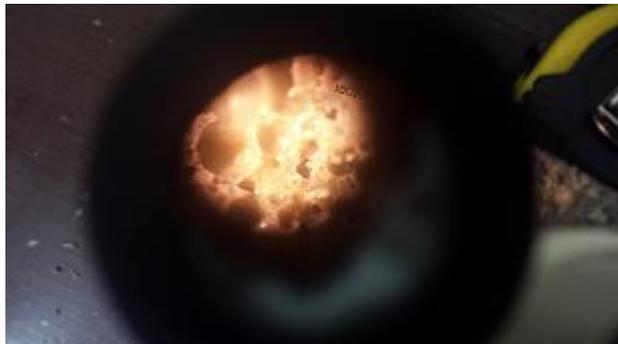


Foto G.12. Fotografía del HC 10 aumentos, se observa los poros