



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**INFLUENCIA DE LAS PERLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO
(EPS) EN EL PESO Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL
HORMIGÓN**

Trabajo de Titulación previo a la obtención
del Título de Ingeniero Civil

Director:

Ing. Nelson Navarro Campos PhD.

Autoras:

Mónica Cristina Lituma Vicuña
Brigida Tatiana Zhunio Cárdenas

Cuenca – Ecuador

Octubre 2015



RESUMEN

En los últimos años, la industria de la construcción ha introducido el uso de nuevos materiales como alternativas para la producción de hormigones ligeros. Estos hormigones se caracterizan por ser más livianos comparados con un hormigón de peso normal (arena, cemento, grava y agua), lo cual puede inducir al uso de elementos con secciones más pequeñas y con ello una reducción en los gastos de transporte y montaje, provocando una disminución en los costos y tiempo de ejecución de obra.

Uno de los materiales que ha sido empleado universalmente con este fin es el poliestireno expandido (EPS), el mismo se ha utilizado como sustituto tanto del árido grueso como del fino. Es por esto que, el objetivo de este Trabajo de Titulación es determinar la influencia del reemplazo de distintos porcentajes de arena por perlas de poliestireno expandido, en el peso (densidad) y en la resistencia a compresión del hormigón, para lo cual se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días de edad con un enfoque a los resultados obtenidos a los 28 días de edad ya que a esta edad el hormigón alcanza cerca del 100% de su resistencia.

Dado que la resistencia a compresión y el peso del hormigón fueron determinados mediante el ensayo de probetas cilíndricas tomadas como muestra y con el fin de obtener resultados que puedan interpretarse con un grado de confiabilidad, se realizó un diseño experimental, con el cual se obtuvo como principal resultado el tamaño de la muestra (número de probetas) necesarias para llevar a cabo la fase de experimentación. Los hormigones utilizados para la elaboración de probetas se obtuvieron a partir del diseño del hormigón de peso normal, como referencia, y su modificación, que dio como resultado el diseño de hormigón con perlas de EPS. Además, en el hormigón con EPS se incorporó un aditivo químico, la elección del tipo de aditivo se hizo en base a la bibliografía consultada. La incorporación del aditivo se dio debido a la baja densidad que poseen las perlas de EPS y con el fin de mejorar la homogeneidad de la mezcla.

Una vez ensayadas las probetas se procesaron estadísticamente los resultados, y acerca de la densidad se encontró una disminución provocada por la baja densidad de las perlas de EPS en comparación con la arena. Para los porcentajes de sustitución de 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100% se obtuvieron respectivamente reducciones del 3,43%, 6,68%, 8,60%, 9,81%, 13,97% y 16,90% de la densidad del hormigón de peso normal, llegándose a obtener una densidad promedio de 1800 kg/m^3 para una sustitución total.

Por otro lado, se encontró una disminución en la resistencia a compresión del hormigón a medida que incrementa el porcentaje de sustitución de arena por EPS. Para los porcentajes de sustitución de 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%



se observaron respectivamente disminuciones del 2,84%, 4,28%, 7,52%, 14,73%, 17,58% y 19,08% de la resistencia del hormigón de peso normal (control). Esta disminución sobrepasó el límite definido en el diseño experimental para porcentajes de reemplazo mayores al 60%, por lo que el grado de confianza de los resultados obtenidos con estos porcentajes disminuyó.

Tras el análisis de estos resultados se concluye que el poliestireno expandido se proyecta como una alternativa viable para la producción de hormigones ligeros no estructurales y estructurales.

Palabras Claves: Hormigón con perlas de EPS, Hormigón Ligero, Poliestireno Expandido (EPS), Resistencia a Compresión, Peso, Densidad, Diseño Experimental.



ABSTRACT

In recent years, the construction industry has been using new, alternative materials in lightweight concrete production. Lightweight concrete is lighter than normal weight concrete (sand, cement, coarse aggregate, and water). Lightweight concrete can produce elements with smaller cross sections; which reduce transportation and mounting costs, and consequently, cheaper and faster projects execution.

Expanded polystyrene (EPS) is a material used worldwide to reduce weight in concrete. Specifically, EPS beads are being used to replace both coarse and fine aggregates. The main objective of this graduation paper is to determinate the effects of replacing specific percentages of sand with expanded polystyrene beads on the weight (density) and compressive strength of concrete, tests were carried out at 7, 14, and 28 days of age, with a special focus on the results obtained at 28 days, because at this age the concrete reaches nearly 100% of its strength.

Since concrete compressive strength and weight are measured using cylinders, an experimental design was developed to determine the sample size (number of cylinders) required to carry out the testing phase and to produce reliable and consistent results.

The concretes used for the test cylinders were made from normal weight concrete and a modification, which resulted in an EPS beads concrete design. Due to the low density of EPS beads, a chemical additive was introduced in the EPS beads concrete to improve the mixture's homogeneity. The additive was selected based on a literature review.

After the cylinders were tested, the statistically processed results showed that the concrete's weight (density) decreased due to the low density of EPS beads compared to the density of sand. The levels of replacement 0%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90%, and 100% showed, respectively, reductions of 3,43%, 6,68%, 8,60%, 9,81%, 13,97% and 16,90%, compared to the density of normal weight concrete, averaging a density of 1800 kg/m^3 for a replacement of 100%. Furthermore, the compressive strength of the concrete decreased as the percentage of EPS substituted for sand increased. The levels of replacement 0%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90%, and 100% showed a decrease of 2,84%, 4,28%, 7,52%, 14,73%, 17,58% and 19,08%, respectively, compared to the compressive strength of normal weight concrete (control). For levels of replacement greater than 60%, the reduction exceeded the limit established in the experimental design; therefore, confidence in the results obtained at these percentages is lower.



These results lead me to conclude that expanded polystyrene is a viable alternative for structural and non-structural lightweight concrete production.

Keywords: EPS beads concrete, lightweight concrete, Expanded Polystyrene (EPS), compressive strength, weight, density, experimental design.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
DEDICATORIA	14
AGRADECIMIENTOS.....	15
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	16
1.1. Planteamiento del Problema	16
1.2. Antecedentes	16
1.3. Justificación.....	18
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivo General.....	19
1.4.2. Objetivos Específicos	19
1.5. Alcance y Limitaciones	19
1.6. Metodología de Trabajo.....	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	22
2.1. Hormigón Ligero.....	22
2.1.1. Densidad	22
2.1.2. Resistencia.....	23
2.1.3. Obtención del Hormigón Ligero	24
2.1.4. Ventajas y Desventajas del Hormigón ligero	25
2.1.5. Aplicaciones	29
2.2. Poliestireno Expandido (EPS).....	29
2.2.1. Proceso de Obtención de las Perlas de EPS	29
2.2.2. Propiedades Químicas	31
2.2.3. Propiedades Físicas	31
2.2.4. EPS en el hormigón.....	39
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
3.1. Metodología de Experimentación	42
3.1.1. Diseño Experimental	43
3.1.2. Experimento Uni-factorial	43
3.1.3. Prueba Piloto	44



3.1.4.	Resultados del Diseño Experimental	45
3.2.	Caracterización de los Materiales: Descripción y Ensayos	47
3.2.1.	Árido Fino.....	47
3.2.2.	Árido Grueso.....	49
3.2.3.	Conglomerante	51
3.2.4.	Agua	52
3.2.5.	Aditivo	52
3.3.	Diseño del Hormigón.....	53
3.3.1.	Cantidades de Material.....	58
3.4.	Elaboración y Muestreo del Hormigón.....	60
3.4.1.	Equipo	60
3.4.2.	Procedimiento de Mezclado.....	61
3.4.3.	Determinación del Asentamiento	62
3.4.4.	Muestreo	63
3.4.5.	Curado.....	64
3.5.	Ensayo a Compresión	65
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		67
4.1.	Densidad	67
4.2.	Resistencia.....	68
4.3.	Prueba de Hipótesis	71
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		77
5.1.	Resumen de Resultados	77
5.2.	Comentarios.....	77
5.3.	Conclusiones	78
5.4.	Recomendaciones	79
BIBLIOGRAFÍA		80
ANEXOS		85



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicaciones estructurales y no estructurales del hormigón ligero	29
Figura 2. Obtención del poliestireno expandible	30
Figura 3. Microestructura poliédrica de las perlas de EPS con un bajo grado de fusión	32
Figura 4. Diámetro relativo de expansión de perlas con contenido de 8% de pentano a diferentes temperaturas (°C)	34
Figura 5. Comportamiento esfuerzo - deformación del EPS	36
Figura 6. Curva característica de operación estadística, para seis grados de libertad en el numerador.....	46
Figura 7. Curva granulométrica de la arena.....	47
Figura 8. Perlas de EPS adquiridas en IMSALE	49
Figura 9. Curva Granulométrica de la grava	50
Figura 10. Mezclado del hormigón.....	62
Figura 11. Probetas en reposo antes del curado en agua.....	64
Figura 12. Probetas a ser pesadas y medidas antes del ensayo a compresión	65
Figura 13. Ensayo a compresión	66
Figura 14. Variación de la densidad del hormigón con los porcentajes de sustitución a diferentes edades	68
Figura 15. Variación de la resistencia a compresión del hormigón con los porcentajes de sustitución a diferentes edades	69
Figura 16. Curva resistencia - edad del hormigón, para diferentes porcentajes de sustitución	70
Figura 17. Variación de la resistencia a compresión del hormigón con la densidad, a los 28 días	71
Figura 18. Prueba ANNOVA realizada con el software estadístico R.....	72
Figura 19. Distribución de las perlas de EPS en el hormigón fresco.....	75
Figura 20. Distribución de las perlas de EPS en el hormigón endurecido	75
Figura 21. Porosidad de hormigones de peso normal.....	76
Figura 22. Porosidad de hormigones con 60% de sustitución de arena por EPS.....	76



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estabilidad del EPS frente a sustancias activas	31
Tabla 2. Clasificación del EPS según la norma ASTM C 578.....	33
Tabla 3. Tamaño de las perlas de EPS según el grado de expansión.....	33
Tabla 4. Tamaño de las perlas de EPS según el grado de expansión.....	34
Tabla 5. Propiedades mecánicas del EPS para varias densidades.....	35
Tabla 6. Coeficiente de conductividad térmica para varias densidades.....	37
Tabla 7. Agua absorbida por el EPS a los 7 y 28 días, para diferentes densidades	38
Tabla 8. Resultados de la prueba piloto	45
Tabla 9. Tratamientos del Diseño Experimental	45
Tabla 10. Tanteo para la obtención del tamaño muestral.....	46
Tabla 11. Granulometría de la arena.....	47
Tabla 12. Densidades relativas y absorción de la arena	49
Tabla 13. Grunulometría de la grava.....	50
Tabla 14. Densidades relativas y absorción de la grava.....	51
Tabla 15. Requisitos químicos obligatorios del cemento Portland Tipo I	52
Tabla 16. Requisitos físicos obligatorios del cemento Portland Tipo I	52
Tabla 17. Propiedades físicas de los materiales	53
Tabla 18. Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción.....	54
Tabla 19. Requisitos aproximado de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños máximos nominales de agregado.....	54
Tabla 20. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra	55
Tabla 21. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión del hormigón.....	55
Tabla 22. Volumen de árido grueso por volumen unitario de hormigón.....	56
Tabla 23. Cantidad de material en litros en un metro cúbico de hormigón	57
Tabla 24. Cantidades de material corregidos por granulometría	57
Tabla 25. Humedad de los áridos	58
Tabla 26. Cantidades de material corregidos por humedad y absorción	58
Tabla 27. Cantidades de material para muestra A (0% de sustitución)	59
Tabla 28. Cantidades de material para muestra B (30% de sustitución)	59
Tabla 29. Cantidades de material para muestra C (45% de sustitución)	59
Tabla 30. Cantidades de material para muestra D (60% de sustitución)	59
Tabla 31. Cantidades de material para muestra E (75% de sustitución)	59
Tabla 32. Cantidades de material para muestra F (90% de sustitución).....	60
Tabla 33. Cantidades de material para muestra G (100% de sustitución)	60
Tabla 34. Asentamiento del hormigón.....	63
Tabla 35. Tolerancia del tiempo admisible para el ensayo de especímenes	65
Tabla 36. Densidades del hormigón en kg/m ³ , según la edad, para cada porcentaje de sustitución	67
Tabla 37. Resistencia a compresión del hormigón en kg/cm ² , según la edad, para cada porcentaje de sustitución	69
Tabla 38. Resumen de resultados de la prueba ANNOVA	73
Tabla 39. Resultados de la resistencia a compresión a los 28 días de edad.....	74
Tabla 40. Densidad del hormigón a los 7 días.....	87



Tabla 41. Densidad del hormigón a los 14 días.....	88
Tabla 42. Densidad del hormigón a los 28 días.....	89
Tabla 43. Resistencia del hormigón a los 7 días	90
Tabla 44. Resistencia del hormigón a los 14 días	91
Tabla 45. Resistencia del hormigón a los 28 días	92



Yo, Mónica Cristina Lituma Vicuña, autora de la tesis **“INFLUENCIA DE LAS PERLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) EN EL PESO Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, Octubre de 2015

Mónica Cristina Lituma Vicuña
C.I. 0105104574



Yo, Brigida Tatiana Zhunio Cárdenas, autora de la tesis **“INFLUENCIA DE LAS PERLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) EN EL PESO Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, Octubre de 2015

Brigida Tatiana Zhunio Cárdenas
C.I. 0105687347



Yo, Mónica Cristina Lituma Vicuña, autora de la tesis **“INFLUENCIA DE LAS PERLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) EN EL PESO Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN”**, 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 INGENIERA CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, Octubre de 2015

Mónica Cristina Lituma Vicuña
C.I. 0105104574



Yo, Brigida Tatiana Zhunio Cárdenas, autora de la tesis **“INFLUENCIA DE LAS PERLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) EN EL PESO Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN”**, 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 INGENIERA CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, Octubre de 2015

Brigida Tatiana Zhunio Cárdenas
C.I. 0105687347



DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza para superar los obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida.

Con cariño a mis papis, Víctor y Diana, pilares fundamentales en mi vida, porque todo mi esfuerzo es en reconocimiento al apoyo incondicional que me brindan, por sus palabras de aliento, por animarme siempre a luchar por mis sueños y enseñarme a que no debo rendirme nunca.

A mis hermanos, Andrés, Matías y Camila, porque llenan de alegría cada día de mi vida.

Los amo.

Mónica

La presente tesis, así como el esfuerzo realizado durante toda mi carrera, está dedicada a mis padres. Ellos me han enseñado a lo largo de mi vida que la dedicación, el esfuerzo y el amor que ponemos en nuestros proyectos es lo que nos engrandece como personas. Ellos, día a día, con su ejemplo me han inculcado los valores que debe poseer no solo un buen profesional, sino un buen ser humano. Por esto y por todo lo que han luchado por mí, gracias.

Hermano, a ti espero darte el mismo ejemplo de lucha, perseverancia y amor que nuestros padres me dieron. Como dice nuestro padre, el amor entre hermanos es la prueba del amor en la familia. Te quiero.

Tatiana



AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Ing. Nelson Navarro PhD., director de este Trabajo de Titulación, por sus recomendaciones y sugerencias, y por supuesto por la confianza que depositó en nosotras.

De igual manera, al Ing. Vladimiro Tobar, por su compartir con nosotras su conocimiento en el campo de la estadística, por su tiempo y paciencia.

Nuestro sincero agradecimiento al Laboratorio de Geotecnia y Estructuras de la Universidad de Cuenca, en especial a Stalin, Sandro y William, por su colaboración durante la ejecución de esta investigación.



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

En Ecuador, se ha usado el hormigón convencional (arena, cemento, grava y agua), como principal material para el sector de la construcción, ya sea para elementos estructurales como no estructurales; así lo confirma la “Encuesta de Edificaciones 2013” realizada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el mismo que reporta que en los permisos de construcción el tipo de material predominante es el hormigón armado, cuya presencia en las edificaciones se encuentra distribuida de la siguiente forma: 81,57% en cimientos, 93,00% en estructura y 62,90% en cubierta.

Estructuras capaces de disminuir tanto sus desperdicios como su precio final, se pueden considerar no sólo estructuras más ligeras sino también más accesibles para la población con bajos ingresos económicos (Alexandre et al., 2014). Debido a esto, nace la necesidad de buscar nuevas alternativas que permitan disminuir el costo del hormigón como material, una de estas alternativas es reducir su densidad ya que esta afecta directamente el peso total de la edificación. El peso propio del hormigón representa el mayor porcentaje de la carga total sobre la estructura, por lo cual al reducir su densidad se obtienen múltiples ventajas, entre ellas el uso de secciones más pequeñas y la reducción del peso de los materiales a manipularse, lo que provoca un incremento en la productividad (Hidayat & Siauwantara, 2014) (Sahin & Karaman, 2012) (Neville, 1977). Además, esta disminución en el peso del hormigón reduce costos de montaje, transporte y manipulación, y por lo tanto costos de obra.

Con el objetivo de reducir la densidad del hormigón, el presente Trabajo de Titulación se enfoca en la sustitución parcial y total del árido fino por uno de los materiales más ligeros y disponibles en el mercado, en este caso perlas de poliestireno expandido (EPS).

La factibilidad del uso de este hormigón dependerá de la calidad en cuanto a su resistencia, lo que permitirá evaluar sus posibles aplicaciones en la construcción.

1.2. Antecedentes

El hormigón ligero fue introducido por primera vez en la época del Imperio Romano en el año 273 A.C., cuando los constructores romanos usaron roca volcánica porosa, toba volcánica y arcilla como áridos ligeros para el hormigón



(Subhan, n.d.). Hoy en día, al buscar disminuir el peso volumétrico del hormigón, se han realizado investigaciones con el objetivo de sustituir total o parcialmente los áridos del hormigón por materiales más ligeros, en un rango económicamente aceptable, y disponibles en el mercado. De acuerdo a la bibliografía, en Ecuador, la mayoría de estudios se han enfocado en el uso de materiales reciclables como sustitutos parciales de los áridos en el hormigón. Por ejemplo, en la Universidad de Cuenca se han realizado varios trabajos de titulación en los que se ha empleado cascote de ladrillo, desperdicio de teja y cerámicos, resultando ser una buena alternativa para reducir costos en la construcción de viviendas (Cárdenas, 1993), residuos de madera, en la cual se obtuvieron hormigones alivianados con una densidad de $1,02 \text{ g/cm}^3$ a $1,40 \text{ g/cm}^3$, y con el cual es posible realizar piezas prefabricadas tales como: paneles para interiores y exteriores, baldosas, paneles de revestimiento y bloques (Albán Crespo, Vásquez Z., & Cortés Madero, 1998), y también escoria de acero, en la cual se obtuvieron resistencias entre los 30 y 60 MPa, por lo cual este hormigón puede ser considerado de alta resistencia debido a que se obtuvieron resistencias mayores a 50 MPa; sin embargo se obtuvieron mayores densidades que un hormigón de alta resistencia tradicional (Vélez Guayasamín, 2013).

Aun así, en Ecuador no existe evidencia de investigaciones relacionadas con el empleo de perlas de poliestireno expandido (EPS) como árido ligero total o parcial en el hormigón. Sin embargo, a nivel mundial el hormigón con poliestireno expandido cuenta con una base bibliográfica sólida, resultado de investigaciones científicas, ya que su comportamiento ha creado gran interés.

En 1950, la Corporación BASF a través de sus investigadores Fritz Stastny y Karl Buchhoz, sintetizó un nuevo material conocido como poliestireno expandido (EPS). Esta innovación le permitió a esta Corporación convertirse en el pionero en el desarrollo del hormigón aligerado con poliestireno expandido o también llamado "Styropor-beton" (Hohwiller & Köhling, 1969). A partir de la década de los 70, el desarrollo y aplicación de este hormigón se expandió alrededor del mundo, es así que Cook, D.J. en 1973 publicó su obra denominada "Expanded Polystyrene beads as lightweight expanded aggregate for concrete".

Debido al comportamiento hidrófugo de las perlas de EPS, la obtención de una mezcla homogénea del hormigón con EPS ha sido compleja, por lo cual varias investigaciones se han enfocado en buscar un adecuado tratamiento químico que facilite la adherencia de las perlas de EPS con la masa del hormigón. Se ha usado con este propósito aditivos como: resinas epóxicas, resinas sintéticas, soluciones de propionato de polivinilo, humo de sílice, etc. (Chen & Liu, 2004).



En los últimos años, el uso de las esferas de EPS como sustituto parcial o total del árido ha sido objeto de múltiples investigaciones tanto experimentales como teóricas. Las investigaciones se han enfocado en temas como: el efecto del tamaño de las perlas de EPS en las propiedades mecánicas del hormigón, encontrándose una relación inversamente proporcional (Miled, Le Roy, Sab, & Boulay, 2004) (Miled, Sab, & Le Roy, 2007) (Liu & Chen, 2014) (Le Roy, Parant, & Boulay, 2005); también, debido a la característica reciclable del EPS, se ha comparado el hormigón con EPS reciclado y manufacturado, resultando ser éste último mejor ya que la resistencia a la compresión fue superior en un promedio del 11,5% con respecto al hormigón con EPS reciclado (Trussoni, Hays, & Zollo, 2012); en cuanto a las propiedades mecánicas del hormigón con EPS, (Hidayat & Siauwantara, 2014) (Wu, Chen, & Liu, 2013) y (Bossio, Acierno, Pecce, & Bellucci, 2014), concluyeron en general, que la resistencia tanto a la compresión como a la flexión es proporcional a su densidad, pero es menos susceptible a daños debido a la corrosión.

Sin embargo, nuevos diseños de mezcla para hormigones están siendo continuamente desarrollados, por lo tanto, la idea del EPS como árido para obtener hormigón ligero, modificando los componentes y sus cantidades en la mezcla de hormigón se siguen investigando con el objetivo de dominar sus características y propiedades, y con ello incrementar los posibles campos de aplicación.

1.3. Justificación

Como ya se mencionó anteriormente, el hormigón representa el principal material en el sector de la construcción ecuatoriana, es por esto que surge la necesidad de innovarlo, mediante múltiples alternativas, con el fin de ampliar las opciones de este elemento en el mercado. Es por ello, que esta investigación plantea el uso del poliestireno expandido, como sustituto parcial y total, del árido fino en la mezcla del hormigón.

Actualmente el EPS está disponible a nivel mundial (Sahin & Karaman, 2012) (Ranjbar & Mousavi, 2013) (Short & Kinniburgh, 1963), incluyendo el mercado ecuatoriano, a diferencia de otros materiales utilizados como sustitutos de áridos en el hormigón como son la vermiculita, arcilla expandida, esquistos y pizarras, cuya accesibilidad es limitada (Short & Kinniburgh, 1963); además según (Miled et al., 2004) (Short & Kinniburgh, 1963) (V Sussman & Baumann, 1972), la resistencia a la compresión del hormigón con EPS fue más alta que la obtenida con vermiculita o perlita. Es por esto que el hormigón con poliestireno expandido se convertiría en una alternativa viable para el sector de la construcción.



Además, la sobreexplotación de materiales pétreos en el sector de la construcción ecuatoriana, justifica la búsqueda de nuevos materiales a ser utilizados como áridos en el hormigón y que disminuyan el impacto ambiental ocasionado por la explotación minera en el Ecuador. Un ejemplo de esta sobreexplotación es el desastre ocurrido en el sector de La Josefina en la provincia del Azuay en el año 1993, en donde la explotación minera desestabilizó la base del talud y provocó el deslizamiento del cerro Tamuga afectando a la población colindante.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la influencia de la sustitución total y parcial del árido fino por perlas de poliestireno expandido (EPS) en la masa del hormigón para reducir su peso y evaluar el comportamiento de la resistencia a compresión.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Estudiar las características físico-mecánicas del EPS y su comportamiento ante la pasta de cemento Portland y el árido, además determinar el tipo de aditivo a utilizar para lograr una adecuada homogeneidad en la mezcla de hormigón.
2. 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 perlas de EPS hasta una sustitución total.
3. Determinar la influencia de la sustitución del árido fino en la mezcla del hormigón por perlas de EPS en cuanto a: el peso y la resistencia a compresión, e identificar posibilidades de aplicación de estos hormigones con adición del EPS.
4. Realizar un diseño experimental con el fin de que los resultados obtenidos tenga validez científica.

1.5. Alcance y Limitaciones

La investigación tiene como alcance determinar el comportamiento del hormigón endurecido (a la edad normalizada de 28 días) con diferentes contenidos de EPS, en lo que se refiere a su resistencia a la compresión, por ser ésta la propiedad mecánica más relevante en el hormigón; además, de evaluar su peso en función de su densidad. A partir de los resultados obtenidos, se pueden



determinar las aplicaciones en el sector de la construcción ecuatoriana para las posibles prestaciones de los hormigones con EPS.

Estos hormigones con EPS serán los obtenidos por la sustitución total y parcial del árido fino por perlas manufacturadas de EPS (perla virgen) de un mismo diámetro. Futuras líneas de investigación pudieran estar dirigidas al uso del EPS en su forma reciclada, con una granulometría escalonada y en reemplazo del árido fino e incluso el grueso. Otra línea de investigación en el futuro pudiera ser el estudio sobre la incorporación a la mezcla de los aditivos disponibles comercialmente que evitan la segregación ocasionada por la baja densidad que poseen las perlas de EPS.

1.6. Metodología de Trabajo

La primera etapa comprende una revisión bibliográfica con el fin de conocer las características físico-mecánicas del EPS y su comportamiento ante el hormigón. Esta revisión bibliográfica permitirá, también, identificar el aditivo que mejor se adapte a las características del EPS. Caracterizados tanto el EPS como el aditivo se estará en la capacidad de introducirlos en el hormigón para obtener así un hormigón ligero y suficientemente resistente para determinadas prestaciones.

Se diseñará un hormigón de peso normal con una resistencia $f'c$ de 250 kg/cm^2 . en base al diseño establecido por el American Concrete Institute (ACI 211.1-91 "*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*"), el cual será establecido como la muestra control y tomado como referencia para las comparaciones con los hormigones obtenidos de la sustitución de árido por EPS, a realizarse en el posterior análisis estadístico.

Los materiales a usar, tanto en la mezcla de control como en las mezclas con sustituciones serán:

- Árido Grueso: Grava triturada de tamaño máximo nominal 3/8", procedente de Santa Isabel, provincia del Azuay.
- Árido Fino: Arena fina procedente de Santa Isabel, provincia del Azuay, y perlas de EPS con un diámetro nominal de 3 mm adquiridas en la empresa IMSALE, localizada en la zona industrial de la ciudad de Cuenca.
- Conglomerante: Cemento Portland Tipo I, marca Guapán, según la norma ASTM C 150 "*Standard Specifications and Tests for Portland Cement*".
- Agua: Agua de uso doméstico de la ciudad de Cuenca.
- Aditivo: Súper-plastificante SIKAMENT N-100, marca Sika, proporcionado por el Ing. Fernando Salgado, asesor técnico de la empresa SIKA.



La investigación se llevará a cabo mediante la elaboración de probetas con hormigón de peso normal y hormigón aligerado con perlas de EPS, en correspondencia con el diseño de la investigación. Se confeccionarán las probetas requeridas tanto para el hormigón de peso normal como para cada sustitución del árido fino por EPS, según resulten del diseño experimental, para lo cual se realizarán pruebas piloto con el fin de determinar los parámetros requeridos por el diseño experimental.

Las probetas de la prueba piloto, serán cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, y serán ensayadas a los siete días de edad. Se confeccionarán un total de tres probetas, según la norma INEN 1 573, tanto para la muestra control como para cada sustitución de árido fino por EPS (20%, 40% y 60% en volumen), las mismas que serán secadas, pesadas y ensayadas a compresión en la prensa marca MATEST del Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, la misma que tiene una capacidad a compresión de 2000 KN.

De los resultados obtenidos en las pruebas piloto, se definirán el número de probetas necesarias para la investigación, a través del diseño experimental. Las probetas serán cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, se ensayarán a los 28 días de edad, y serán sometidas al mismo protocolo de ensayo que las pruebas piloto; con el fin de caracterizar los hormigones y compararlos mediante un análisis estadístico.



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

A pesar que dentro de los objetivos del presente Trabajo de Titulación no se plantea explícitamente la obtención de un hormigón ligero, es importante conocer las características y aplicaciones del mismo en la industria de la construcción, en caso de que los hormigones obtenidos mediante la sustitución del árido fino por EPS, cumplan los requerimientos para ser considerados hormigones ligeros.

De ser este el caso, el marco teórico del hormigón ligero será de gran utilidad para cumplir con uno de los objetivos de la investigación, el cual es identificar los posibles campos de aplicación del hormigón aligerado con EPS en la construcción.

Por otro lado, al ser el poliestireno expandido (EPS) un nuevo material a ser introducido en la masa del hormigón, es necesario conocer sus características físicas, químicas, así como su proceso de fabricación. Esta información ya ha sido documentada previamente y la recopilación de la misma se presenta también en este capítulo.

2.1. Hormigón Ligero

Desde su aparición, el hormigón ligero ha sido obtenido mediante diversas metodologías, entre las cuales se puede mencionar el uso de espumas ligeras o el remplazo total y parcial de los áridos convencionales por áridos de baja densidad (Liu & Chen, 2014). Es por la diversidad de materiales utilizados, que la mayoría de autores no concuerdan con una definición única de hormigón ligero. Sin embargo, se acepta en forma general, un hormigón ligero como aquel hormigón que por cualquier método se ha vuelto más ligero que el hormigón convencional de cemento, arena y grava (Short & Kinniburgh, 1963).

Las propiedades que definen al hormigón ligero endurecido como la densidad y la resistencia, así como su obtención, ventajas y desventajas de su uso en la construcción, se presentan a continuación:

2.1.1. Densidad

Cuando se habla de un hormigón ligero es necesario hablar también de su densidad, la cual está directamente relacionada con su peso. La densidad es el parámetro que más define a un hormigón ligero pues controla varias de sus propiedades físicas (Sahin & Karaman, 2012), siendo también el parámetro de mayor variabilidad. Esta variabilidad, provocada por la diversidad de densidades



de los materiales utilizados para aligerar el hormigón, da como resultado hormigones con un rango amplio de densidades.

Durante varios años el hormigón fue considerado ligero solo si su densidad no excedía el valor límite de 1600 kg/m^3 , sin embargo con el objetivo de ampliar las aplicaciones del hormigón ligero hacia su uso en elementos estructurales, se llegaron a producir hormigones con densidades de hasta 1850 kg/m^3 , los cuales se consideraron también hormigones ligeros. Pese a esto, de acuerdo a (Neville, 1977) (Pecce, Ceroni, Bibbò, & Acierno, 2013) un hormigón se puede considerar ligero si su densidad es menor a la densidad convencional aceptada para un hormigón de peso normal, la cual varía de 2200 a 2600 kg/m^3 (Hidayat & Siauwantara, 2014) (Neville, 1977) (Pecce et al., 2013). Por este motivo, en esta investigación se considerará hormigón ligero aquel que posea una densidad inferior a la establecida para el hormigón convencional.

2.1.2. Resistencia

La resistencia a compresión de un hormigón ligero permite identificar las posibles aplicaciones del mismo. Al identificar sus aplicaciones se podrá diferenciar entre un hormigón con capacidad estructural y un hormigón no estructural, destinado a elementos que no soportan una carga adicional a su peso propio (Neville, 1977) (Short & Kinniburgh, 1963).

Es así que el *American Concrete Institute* en su norma ACI-318-08 (ACI Committee 318, 2008), define al hormigón ligero estructural aquel cuya resistencia es mayor a 172 kg/cm^2 y su densidad menor a 1842 kg/m^3 . Definición que concuerda con el valor dado por (Ranjbar & Mousavi, 2013).

Por otro lado, la norma italiana UNI 7548 da una definición más amplia de hormigón ligero, la cual incluye al hormigón ligero no estructural. Es así, que se clasifica al hormigón ligero de la siguiente forma:

- Hormigón ligero no estructural: densidad menor a 1200 kg/m^3 y resistencia a la compresión menor a 150 kg/cm^2 .
- Hormigón ligero estructural: densidad en un rango de $1200 - 2000 \text{ kg/m}^3$ y resistencia a la compresión en un rango de $150 - 250 \text{ kg/cm}^2$.
- Hormigón ligero estructural: densidad en un rango de $1200 - 2000 \text{ kg/m}^3$ y resistencia a la compresión mayor a 250 kg/cm^2 .

Es importante mencionar que no existe una correlación simple entre la resistencia del árido utilizado en el hormigón ligero y su resistencia a la compresión, distintos áridos pueden producir hormigones que varíen ampliamente en su comportamiento estructural (Neville, 1977). Esta variación hace necesario



evaluar con cuidado la gama de áridos utilizados en el hormigón ligero y su influencia en el hormigón.

2.1.3. Obtención del Hormigón Ligero

De acuerdo a (Neville, 1977) (Subhan, n.d.), existen tres métodos tradicionales para obtener hormigón ligero, reduciendo su densidad; el primero es mediante el uso de áridos ligeros, el segundo consiste en la inclusión de grandes cantidades de aire y el último de ellos consiste en la eliminación total del árido fino en el hormigón (Neville, 1977) (Subhan, n.d.) (Short & Kinniburgh, 1963). Estos métodos dan como resultado diferentes denominaciones para el hormigón ligero.

- **Hormigón con Áridos Ligeros**

El hormigón en el cual se introducen áridos ligeros, como sustitutos parciales o totales del árido ordinario (grava, arena), se denomina hormigón de árido ligero. Los áridos ligeros que se incorporan al hormigón pueden ser de dos naturalezas, áridos ligeros naturales o áridos ligeros artificiales.

Los áridos ligeros naturales son en su mayoría áridos porosos de origen volcánico. Entre estos podemos mencionar la piedra pómez, las tufas, las cenizas volcánicas, la vermiculita o la perlita (Neville, 1977) (Subhan, n.d.). Este tipo de áridos, con gran disponibilidad en países como Alemania, Italia y Japón, son capaces de producir hormigones con una resistencia mecánica media, pero de alta capacidad aislante y buena resistencia al fuego (Subhan, n.d.).

También se pueden utilizar otros áridos de origen natural, como los esquistos, pizarras, la diatomita y la arcilla; las cuales también se pueden definir como áridos ligeros, pues poseen una densidad muy por debajo de la densidad de los áridos tradicionales como la grava y la arena. Sin embargo, el uso de estos áridos no es amplia, pues la disponibilidad para su aplicación como árido en el hormigón en grandes cantidades es limitada. Debido a su origen natural se encuentran solamente en zonas específicas, por lo que su uso no es posible en muchos países. Además, dada su naturaleza porosa, los áridos ligeros naturales poseen una gran capacidad de absorción de agua, lo que provoca la adición de cantidades extra de agua en la mezcla con el fin de mantener la trabajabilidad (Ranjbar & Mousavi, 2013). Por lo tanto, la producción de un hormigón con áridos ligeros naturales es complicada, pues no solo depende de la variabilidad en la disponibilidad de los depósitos naturales, sino también de la variabilidad de su calidad. Es por esta razón que en el siglo XIX se inició la investigación para fabricar áridos artificiales (Newman & Choo, 2003).



Al principio los áridos ligeros artificiales pueden ser difíciles de clasificar, pues estos se conocen principalmente por los nombres que las distintas marcas comerciales les han dado a su producto, sin embargo es posible llegar a una clasificación si esta se hace en base a la materia prima o al proceso de fabricación utilizado. Así, se puede mencionar a los áridos ligeros artificiales obtenidos a través del enfriamiento, el cual provoca una expansión de los mismos, como el caso de las escorias de alto horno. También se puede mencionar los áridos formados por las cenizas industriales (Neville, 1977). Estos dos tipos de áridos son los más comúnmente utilizados, sin embargo la gama de áridos artificiales es, hoy en día, mucho más amplia, pudiéndose mencionar la ceniza de combustible pulverizado, áridos ligeros de arcilla expandida, denominado "Leca" (Neville, 1977) (Subhan, n.d.), y las perlas de poliestireno expandido (EPS), árido artificial a ser utilizado en este estudio.

- **Hormigón Aireado**

Un hormigón aireado se obtiene mediante la inclusión de grandes cantidades de aire o vacíos dentro de la estructura del hormigón. Los vacíos producidos deben diferenciarse de los vacíos producidos por la inclusión tradicional de aire, los cuales son muchos menores.

Existen diferentes metodologías químicas para lograr la introducción de aire en el hormigón, pero el objetivo de todas ellas es producir burbujas de aire en la lechada de cemento, que al endurecerse tendrá una estructura esponjosa (Short & Kinniburgh, 1963). Se obtiene así una disminución en la densidad del hormigón, pero también una disminución en su resistencia debido a la presencia de vacíos.

- **Hormigón sin finos**

Finalmente, el hormigón sin finos se obtiene de manera sencilla al eliminar el árido fino de la mezcla del hormigón. Esta omisión provoca, al igual que con el hormigón aireado, una gran cantidad de vacíos. El árido grueso que se utiliza en este tipo de hormigones es el árido grueso tradicional usado en el hormigón de peso normal, como grava o piedra triturada (Short & Kinniburgh, 1963).

2.1.4. Ventajas y Desventajas del Hormigón ligero

A pesar que la completa caracterización de un hormigón depende de los materiales utilizados en su elaboración, existen características comunes entre los hormigones ligeros que no varían en gran medida y que permiten identificar ventajas y desventajas en ellos.



1. Ventajas

Según expresa (Neville, 1977), *"Las ventajas del hormigón ligero compensan y sobrepasan sus desventajas, y existe una tendencia a nivel mundial a emplear más el hormigón ligero"*.

Las ventajas de un hormigón ligero son múltiples, pero las más comunes entre los mismos, independientemente del árido ligero utilizado se las menciona a continuación.

- **Baja Densidad**

Sin duda la baja densidad de un hormigón ligero es su ventaja más significativa, de ahí su denominación como ligero. La consecuente reducción del peso del hormigón que viene asociado con una baja densidad, permitirá producir elementos con menor masa y menores dimensiones (Pecce et al., 2013), lo cual es una ventaja directa en elementos sometidos a cargas sísmicas. Esto permitiría crear construcciones de mayores dimensiones, como edificios más altos o puentes más largos, teniendo en cuenta la resistencia requerida del hormigón para estas aplicaciones.

Elementos prefabricados con hormigón ligero poseen ventajas significativas frente a prefabricados producidos con hormigón de peso normal. Entre estas se puede mencionar el ahorro en el valor de transporte y manipulación, pues elementos de hormigón de peso normal resultan difíciles de transportar en grandes cantidades, debido a las restricciones de peso establecidas en las carreteras, lo cual restringe la cantidad de elementos que pueden ser transportados por viaje, aun cuando exista espacio disponible en los vehículos (Subhan, n.d.). Esta limitación se vuelve más importante conforme las construcciones se vuelven más grandes.

En cuanto al hormigón colocado en sitio, el hormigón ligero provoca una reducción en la cantidad de elementos de apoyo (encofrados), necesarios para su soporte en la etapa de endurecimiento. Esta ventaja se vuelve de mayor importancia en elementos hormigonados a grandes profundidades, donde la colocación de soportes es de gran dificultad (Subhan, n.d.). Se puede decir, que es a partir de la baja densidad del hormigón ligero de donde se derivan, en mayor o menor grado, la mayor cantidad de ventajas del mismo frente al hormigón de peso normal.



- **Aislamiento Térmico y Acústico**

El hormigón ligero con estructura celular es apto para producir elementos aislantes, con capacidad de absorción de energía (Jones & McCarthy, 2005). Esta capacidad de absorción de energía permite obtener una alta capacidad de aislamiento, tanto térmico como acústico (Al-Jabri, Hago, Al-Nuaimi, & Al-Saidy, 2005) (Laukaitis & Fiks, 2006) La absorción térmica y acústica depende principalmente de la densidad, a menor densidad del hormigón mayor será su capacidad de aislamiento y menor su resistencia (Neville, 1977) (Cervantes Abarca, 2008) (Manobanda & Iván, 2009).

En este aspecto interviene también la porosidad del hormigón (Lakatos & Kalmár, 2013), entonces al ser los hormigones ligeros más porosos que los hormigones de peso normal, introducen al material cantidades considerables de aire, el cual es un mal conductor de calor, lo que aumenta el aislamiento térmico.

La baja conductividad que presenta el hormigón ligero provoca que la energía, tanto sonora como acústica, se convierta en calor disipado en los canales del hormigón, lo que reduce el paso del calor y el sonido de un lado a otro.

- **Reducción de cargas**

De la densidad de un hormigón ligero se deriva otra ventaja, que es la reducción de cargas por peso propio aportada por los elementos a la estructura. Esta reducción trae consigo varios beneficios en cuanto a costos.

El hormigón ligero ha permitido hacer posible proyectos en donde el peso era el factor limitante en el diseño. En estructuras reticulares, por ejemplo, los marcos deben llevar las cargas de pisos y muros; en ellos se pueden lograr considerables ahorros en su costo si se utilizan losas de entrepiso, muros divisorios y acabados exteriores a base de hormigón ligero (Short & Kinniburgh, 1963).

La reducción en las cargas muertas de una estructura reduce cantidades de obra dirigida a cimentaciones, acero de refuerzo estructural y todo elemento que sirva como apoyo en la estructura (Subhan, n.d.), esta disminución en cantidad trae consigo una reducción directa en costos. Además, se pueden lograr reducciones significativas en el tamaño de elementos como columnas, lo cual aumenta el área disponible para la circulación en edificios.



- **Prestaciones especiales**

Existen proyectos donde la resistencia mecánica no es el factor predominante al elegir el material a utilizarse, es aquí donde el hormigón ligero puede convertirse en la opción preferencial.

Por ejemplo, edificaciones donde se desee un alto grado de resistencia al fuego. El hormigón ligero no tiende a descascararse frente al fuego, eso unido al hecho de que su resistencia original disminuye en una baja proporción, en comparación al hormigón de peso normal, al ser sometido al calor, lo convierten en una buena protección ante el fuego (Neville, 1977).

De manera similar, hormigones aligerados con poliestireno expandido (EPS) poseen una resistencia a la congelación muy alta, pues el EPS al no ser capaz de absorber agua no corre el riesgo de provocar ciclos de contracción y retracción en el hormigón, lo que puede provocar fisuras. Hormigones ligeros de alta resistencia son incluso capaces de soportar valores similares de esfuerzos internos, e incluso en algunos casos, mayores que el hormigón de peso normal, esto reduce el riesgo de micro-fisuras a niveles bajos de esfuerzo (Subhan, n.d.).

Los hormigones ligeros muestran una igual o incluso mejor durabilidad en comparación con los hormigones de peso normal, incluso cuando son sometidos a condiciones severas (Zhang & Gjorv, 1991).

2. Desventajas

Aunque ya se mencionó que las ventajas de un hormigón ligero superan sus desventajas, es necesario conocer los inconvenientes más importantes que puedan provocar pérdida de interés en el uso del hormigón ligero.

En cuanto a materias primas, en general, el hormigón ligero es más costoso que el hormigón de peso normal (30 a 50%), esto se debe principalmente a los áridos utilizados para aligerar el hormigón. En el caso de los áridos ligeros naturales, debido a su poca disponibilidad y en el caso de los áridos ligeros artificiales debido al proceso de producción requerido para su obtención.

Es claro que debido a su baja densidad la mayor parte de hormigones ligeros poseen menores resistencias mecánicas que el hormigón de peso normal, a excepción de aquellos hormigones que por un incremento en la cantidad de conglomerante o por cualquier otro método han logrado incrementar su resistencia. Otros aspectos a considerar son su porosidad (hormigones aireados) y su baja resistencia a la abrasión.

2.1.5. Aplicaciones

Las aplicaciones de un hormigón se pueden identificar generalmente en base a sus resistencias mecánicas y otras propiedades específicas. Sin embargo, en el caso de hormigones ligeros, la resistencia es el factor que permite identificar las aplicaciones estructurales y no estructurales del hormigón. Una clasificación generalizada de estas aplicaciones se presenta en la siguiente figura; en base al cual se podrán identificar aplicaciones más específicas para el hormigón aligerado con EPS, el cual es uno de los objetivos de este trabajo.

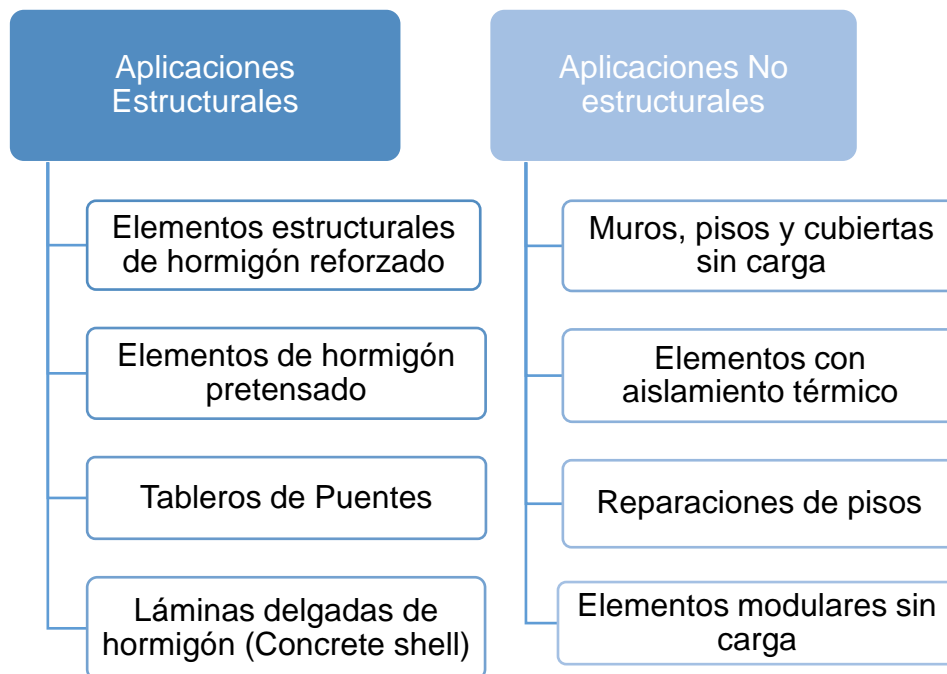


Figura 1. Aplicaciones estructurales y no estructurales del hormigón ligero

2.2. Poliestireno Expandido (EPS)

2.2.1. Proceso de Obtención de las Perlas de EPS

El poliestireno expandible es la materia prima que da lugar a la obtención del poliestireno expandido (EPS). Esta materia prima, al igual que todos los materiales plásticos, es un derivado del petróleo. Sin embargo, el 94% del petróleo está destinado a combustibles para transporte y calefacción y tan solo el 6% restante a la petroquímica (fabricación de productos plásticos y químicos). Debido a que el poliestireno expandible es un polímero del estireno, al procesar el gas natural y el petróleo, se obtiene principalmente el etileno y varios compuestos aromáticos; y de ellos el hidrocarburo aromático denominado estireno (ANAPE, 2015).

El poliestireno expandible se consigue entonces mediante el proceso de polimerización del monómero de estireno con adición de un agente expansor denominado pentano, a través de un reactor con agua (Poliones S.A de C.V, 2013). El pentano no contiene compuestos con cloro o flúor, es decir gases de la familia de los CFCs, HCFCs y HFCs, que son conocidos por sus efectos dañinos sobre la capa de ozono (Procopor LTDA, 2015).

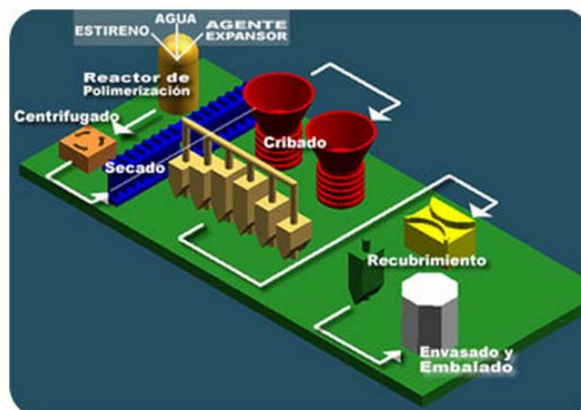


Figura 2. Obtención del poliestireno expandible
Fuente: (ANAPE, 2015)

La materia prima es colocada en máquinas especiales denominadas pre-expansores, estas máquinas son generalmente cilíndricas de 1m de diámetro y 2m de altura, en donde es sometida a altas temperaturas generadas por el vapor de agua, estas temperaturas oscilan entre los 80°C a 100°C (Bartnetson, 2004).

Debido a la influencia del calor, el poliestireno expandible se ablanda y es capaz de aumentar su volumen hasta 50 veces, dando lugar a la generación de las perlas de poliestireno expandido (Hohwiller & Köhling, 1969) (Ranjbar & Mousavi, 2013) (Poliones S.A de C.V, 2013). En esta etapa, denominada pre-expansión, las perlas alcanzan aproximadamente el 95% de su tamaño final (Ossa López, 2009).

Dependiendo del tiempo de exposición de la materia prima y de la temperatura, la densidad aparente puede disminuir desde los 630 kg/m³ a valores entre los 10 a 35 kg/m³ (Bartnetson, 2004). Luego de culminado el proceso de pre-expansión, las perlas de poliestireno expandido son transportadas a grandes silos para ser secadas y almacenadas, y así alcanzar un nivel de expansión superior debido a que el vacío interior generado en la pre-expansión se compensa con la difusión de aire (Procopor LTDA, 2015), dando como resultado una masa continua parecida a un panal de abejas, la cual se encuentra compuesta de varios polígonos combinados entre sí sin dejar ningún espacio (Kaya & Kar, 2014). Estas partículas se componen de alrededor del 98% de aire y 2% de poliestireno (Cook, 1972) (Thomas Tamut, Rajendra Prabhu, Katta Venkataramana, 2014) (Kekanović, Kukaras, Čeh, & Karaman, 2014) (Alexandre



et al., 2014) (Bartnetson, 2004), lo que le proporciona valiosas propiedades físicas y mecánicas.

2.2.2. Propiedades Químicas

Al igual que varios de los productos a base de polímeros, el EPS es susceptible a daños frente a la radiación UV, es decir que cuando se encuentra expuesto durante un periodo largo de tiempo se torna amarillo, lo cual es un indicativo de la degradación del polímero. Sin embargo, en esta investigación el EPS va a ser introducido en el hormigón, por lo que es poco probable que este efecto ocurra ya que el EPS no se encuentra expuesto directamente a los efectos de la radiación UV (Cook, 1972).

De acuerdo a la naturaleza de los diferentes productos químicos, el comportamiento del EPS puede variar. Es así como (ANAPE, 2015), proporciona una tabla en la cual analiza la estabilidad del EPS frente a varias sustancias activas.

SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD
Solución salina (agua de mar)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Jabones y soluciones de tensioactivos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Lejías	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácido clorhídrico (al 35%), ácido nítrico (al 50%)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Soluciones alcalinas	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Aceites de parafina, vaselina	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Alcoholes (metanol, etanol)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos concentrados (sin agua) al 100%	No estable: el EPS se contrae o disuelve
Disolventes organicos (acetona, esterres...)	No estable: el EPS se contrae o disuelve
Hidrocarburos alifáticos saturados	No estable: el EPS se contrae o disuelve
Aceite de diesel	No estable: el EPS se contrae o disuelve
Carburantes	No estable: el EPS se contrae o disuelve
Aceites de silicona	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie

Tabla 1. Estabilidad del EPS frente a sustancias activas

Fuente: (ANAPE, 2015)

En la industria de la construcción, el EPS es compatible con materiales tales como el cemento, yeso, agua dulce o salada, etc., pero no es compatible con solventes (Bartnetson, 2004).

2.2.3. Propiedades Físicas

- **Estructura**

El EPS es un material artificial, el cual a simple vista consiste de partículas esféricas que pueden obtenerse de tamaños menores a 1 mm hasta mayores a

los 6 mm. Poseen una textura suave y un bajo peso debido a su composición de 98% de aire y 2% de poliestireno (Cook, 1972) (Chen & Liu, 2013) (Miled et al., 2004).

Pero la anterior estructura descrita es solamente la que se aprecia a simple vista, la estructura microscópica del EPS es mucho más compleja.

En el proceso de producción las perlas esféricas de EPS al ser expandidas adquieren una microestructura poliédrica, es decir, la perla expandida está formada a su vez por numerosas microestructuras poliédricas cuya unión se asemeja a un panal de abejas. Entre estas estructuras poliédricas pueden existir canales que permitan la transmisión de aire al interior de la microestructura. La dimensión de estos canales dependerá del grado de fusión alcanzado en el proceso de expansión a los que han sido sometidas las perlas. Estos canales crean un sistema de interconexión al interior de la estructura de la perla, lo que favorece el proceso de moldeo si las perlas van a ser convertidas en productos para el embalaje, productos para el aislamiento o para cualquier otro fin.

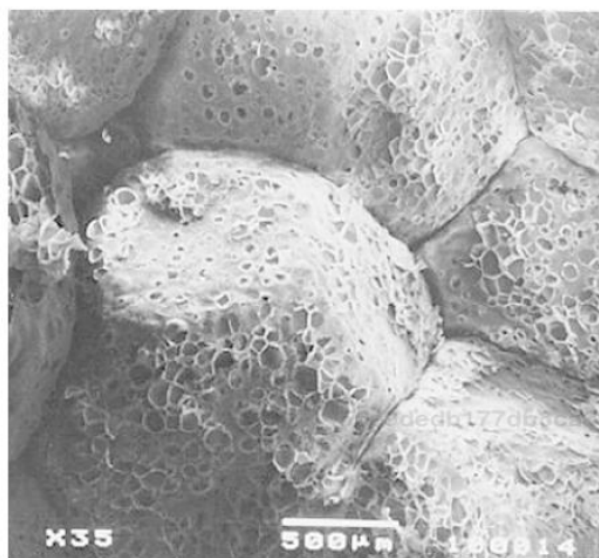


Figura 3. Microestructura poliédrica de las perlas de EPS con un bajo grado de fusión
Fuente: (Mills, 2007)

- **Densidad y Tamaño**

La densidad de las perlas de EPS es una característica que depende de varios factores presentes durante el proceso de producción, específicamente durante el proceso de pre-expansión. En esta etapa, la cantidad de agente expansivo (pentano), el tiempo de exposición y la temperatura, a las que han sido sometidas las perlas determinan su densidad. Así, una pérdida mínima de agente expansivo (Lynwood, 2014), y los mayores valores de temperatura y tiempo de exposición (Ossa López, 2009), dan como resultado las densidades más bajas.



Este proceso de expansión crea un material con gran cantidad de burbujas de aire o vacíos (Engelsmann, Spalding, & Peters, 2012), lo que da como resultado una estructura en volumen de 98% aire y 2% estireno en las perlas de EPS, y consecuentemente densidades entre los 10-35 kg/m³. Perlas con valores inferiores a este rango no son recomendadas pues provocan dificultades en su manipulación y transporte (Ossa López, 2009). Es esta baja densidad característica de las perlas de EPS lo que las convierte en una opción de árido ultra-ligero para hormigones.

Finalmente, con el fin de estandarizar los rangos de densidad del EPS, la norma ASTM C 578-92 ha clasificado al EPS de acuerdo a su densidad nominal de la siguiente manera.

Tipo	Densidad Nominal (kg/m³)	Densidad Mínima (kg/m³)
XI	12	12
I	16	15
VIII	20	18
II	24	22
IX	32	29

Tabla 2. Clasificación del EPS según la norma ASTM C 578

Al igual que la densidad, el tamaño de las esferas de EPS depende básicamente de la etapa de expansión en su proceso de producción. Un mayor grado de expansión da como resultado perlas de mayor tamaño, tal y como se muestra a continuación.

Tamaño (mm)	Grado de expansión
0,8 - 2,5	95%
0,8 - 1,6	94%
0,4 - 1,0	92%
0,4 - 0,8	91%

Tabla 3. Tamaño de las perlas de EPS según el grado de expansión
Fuente: (Baculima Bernal, 1985)

De la misma manera, un mayor tiempo de exposición y temperatura, se relacionan con diámetros mayores, tal y como muestra la siguiente figura.

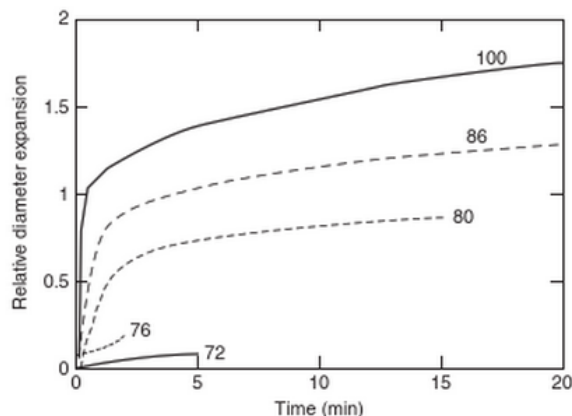


Figura 4. Diámetro relativo de expansión de perlas con contenido de 8% de pentano a diferentes temperaturas (°C)

Fuente: (Mills, 2007)

Dado que tanto la densidad, como el tamaño de las perlas, son propiedades dependientes del proceso de expansión, se puede relacionar bajos valores de densidad a tamaños mayores, tal y como muestra el siguiente cuadro.

Tamaño (mm)	Densidad (g/l)
0,8 - 2,5	15
0,8 - 1,6	16
0,4 - 1,0	18
0,4 - 0,8	20

Tabla 4. Tamaño de las perlas de EPS según el grado de expansión

Fuente: (Baculima Bernal, 1985)

Tanto la densidad, como el tamaño de las perlas de EPS son características que se deben tomar en cuenta al incorporar el EPS como árido ligero en el hormigón, pues ambas influyen en la calidad del mismo, como se verá más adelante.

• Comportamiento Mecánico

Debido a la cantidad de productos que se obtienen a partir del moldeo del poliestireno expandido, se ha vuelto de interés conocer su resistencia y comportamiento mecánico ante los distintos esfuerzos a los que pueden estar sometidos los productos fabricados con EPS.

Las resistencias a esfuerzos mecánicos más comúnmente evaluadas en el EPS, son:

- Resistencia a la compresión, para una deformación del 10%.
- Resistencia a la flexión.
- Resistencia a la tracción.
- Resistencia a la cizalladura o esfuerzo cortante.



Sin embargo, dado que el objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento del hormigón con EPS sometido a la compresión, este apartado se enfoca en el comportamiento y la resistencia del EPS a compresión.

Como se verá más adelante, varias de las propiedades físicas del EPS dependen de su densidad, y el comportamiento mecánico no es la excepción. En la siguiente tabla se muestran los valores de resistencia a diferentes esfuerzos, incluyendo la compresión, para cuatro valores diferentes de densidad de las perlas de EPS.

Densidad d (g/cm ³)	15	25	40	50
Resistencia a la tracción (kPa)	200	350	600	750
Resistencia a la flexión (kPa)	200	400	700	900
Resistencia a la compresión con una deformación al 10% (kPa)	90	180	320	400

Tabla 5. Propiedades mecánicas del EPS para varias densidades
Fuente: BASF

Enfocado en el comportamiento a compresión, (Ossa López, 2009) al realizar su investigación sobre el comportamiento mecánico del EPS encontró que la curva esfuerzo-deformación en compresión varía significativamente, tendiendo a aumentar sus valores cuando el valor de la densidad lo hace. Esto lo confirman otros autores como (Cofre Alvarado, 2003) (Bartnetson, 2004) y (ANAPE, 2015). Además, (Ossa López, 2009) explica como la mayor resistencia observada, al incrementar la densidad, se produce debido al aumento en el espesor de las paredes de las celdas de la estructura de EPS, la cual se produce con el incremento en su densidad. Otras características que contribuyen con la resistencia a la compresión del EPS son su forma esférica, estructura celular y especialmente su capacidad de absorción de energía (Bartnetson, 2004) (Ossa López, 2009).

De acuerdo con (Andrews, Gibson, & Ashby, 1999) ante la aplicación de una fuerza externa el EPS es capaz de absorber cantidades significativas de energía, proveniente de la fuerza aplicada, y disiparla por medio de la flexión, pandeo y posterior rompimiento de las paredes de su estructura celular, y a través de la expulsión de aire al interior de la estructura de celdillas. Este comportamiento en el EPS se da cuando el material se encuentra en el rango elástico-lineal de la curva de esfuerzo deformación, donde satisface la ley de Hooke y donde los esfuerzos no sobrepasan el 2% de la deformación axial máxima (Ossa López, 2009). Debido a este tipo de comportamiento, las deformaciones resultantes en esta etapa volverán a su estado inicial una vez se produzca la descarga en el material. La curva esfuerzo-deformación en el EPS

presenta dos etapas posteriores, con diferente comportamiento, como muestra la siguiente figura.

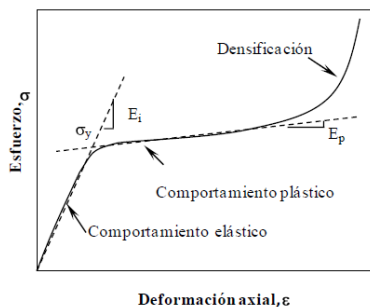


Figura 5. Comportamiento esfuerzo - deformación del EPS
Fuente: (Ossa López, 2009)

Como se observa, la curva presenta tres etapas, de las cuales la primera corresponde a la etapa elástico-lineal ya descrita. En la segunda etapa, se produce un comportamiento plástico, presente a partir del esfuerzo de fluencia (σ_y), donde las deformaciones alcanzan valores de hasta el 70% de la deformación axial máxima, las paredes de la estructura celular se flexionan hasta el pandeo, el aire incluido se comprime y atraviesa las paredes celulares y por último las paredes se rompen por el esfuerzo y la estructura colapsa, produciendo deformaciones irreversibles y una pérdida de volumen en el material.

En la tercera etapa, conocida como zona de densificación, debido a la pérdida de volumen, el material sigue disipando energía a través de la expulsión de aire y la deformación de la estructura colapsada, estas deformaciones sobrepasan el 70% de la deformación axial máxima.

Además de la resistencia a compresión, otras características importantes, como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, dentro de la etapa elástica, fueron estudiados por (Cofre Alvarado, 2003), que para diferentes densidades obtuvo valores entre 3,75 – 10,50 MPa para el módulo elástico y entre 0,08 – 0,17 para el coeficiente de Poisson.

- **Aislamiento Térmico y Acústico**

En lo que se refiere al aislamiento térmico (Rougeron, 1977) afirma que, *“No existen aislantes perfectos, sino cuerpos malos conductores del calor y capaces de frenar la intensidad de un flujo térmico”*.

Es conocido que el aire en reposo es un excelente aislante térmico, por lo que debido a la estructura celular cerrada del EPS, conformada por 98% de aire y 2% de poliestireno, el empleo del poliestireno expandido en la construcción principalmente ha sido como material aislante en paredes, techos y pisos. Por



ejemplo, al usar el EPS en paredes, este permite que el ambiente tenga una temperatura confortable dentro de los edificios.

La capacidad de aislamiento térmico está caracterizada por el coeficiente de conductividad térmica (λ), el mismo que varía con la densidad aparente del material (incluido el EPS). Mientras más bajo sea el valor de la densidad más bajo será el valor de la conductividad térmica, por lo tanto las propiedades aislantes del EPS serán mejores (Valdez Guzmán, Suárez Alcívar, & Proaño Cadena, 2010). Sin embargo, el coeficiente de conductividad térmica óptimo ocurre en el rango de 30-50 g/cm³, ya que para densidades superiores a los 50 g/cm³ el coeficiente de conductividad térmica empieza a subir otra vez (Bartnetson, 2004).

d (g/cm ³)	λ (W/mK)
10	0,043
20	0,035
40	0,033
50	0,033
60	0,034

Tabla 6. Coeficiente de conductividad térmica para varias densidades
Fuente: BASF

Al hablar sobre la propiedad aislante de un material, se podría hablar también sobre su oposición a la propagación del ruido, pero en el caso del EPS específicamente a la barrera para la transmisión de las vibraciones provocadas por las máquinas y los impactos (Rougeron, 1977); característica a la que se le denomina aislamiento acústico.

Las planchas de EPS, por su capacidad de amortiguamiento, pueden controlar vibraciones de alta frecuencia y baja amplitud de deformación. Por ejemplo, en vías, las vibraciones provocadas por el paso de los vehículos, pueden ser reducidas al colocar bloques de EPS al costado de las vías o debajo de la estructura de pavimento (Ossa López, 2009).

Por lo tanto, la aplicación del EPS en la construcción puede aportar diferentes prestaciones, además del aligeramiento, todos de carácter favorables para objetivos específicos.

- **Comportamiento ante el agua**

El comportamiento del EPS frente al agua, en cualquiera de sus estados, es de vital importancia, especialmente si se pretende utilizarlo como árido ligero en el hormigón, donde la cantidad de agua en la mezcla influye directamente en la resistencia de la misma. Así, a pesar de que varios estudios (Hohwiller &



Köhling, 1969) (Chen & Liu, 2013) (Vincent Sussman, 1975) denominan a las perlas de EPS como un árido no absorbente, hay que considerar que estos se refieren a la absorción de agua en estado líquido, es decir el EPS no es higroscópico. Por otro lado, el vapor de agua si puede llegar a atravesar la estructura del EPS bajo ciertas condiciones. Se debe analizar entonces tanto su capacidad de absorción de agua como la capacidad de difusión de vapor.

De acuerdo con datos proporcionados por el (ANAPE, 2015) las perlas de poliestireno expandido bajo inmersión de agua durante 28 días alcanza una absorción entre el 1-3% en volumen, lo que se considera niveles mínimos de absorción. En sus investigaciones (Baculima Bernal, 1985) obtuvo valores de absorción en peso, para una inmersión de 7 y 28 días, más bajos que se muestran a continuación

Densidad (kg/m ³)	Agua absorbida	
	(7 días)	(28 días)
30	0,358	0,388
25	0,434	0,513
20	0,624	0,699
13	0,917	1,003

Tabla 7. Agua absorbida por el EPS a los 7 y 28 días, para diferentes densidades
Fuente: (Baculima Bernal, 1985)

Estos valores mínimos de absorción se dan debido a los canales ubicados entre las paredes de la estructura de las perlas de EPS.

Por otro lado, la difusión de vapor a través de la estructura de EPS si puede ser posible cuando se presenta un gradiente de temperatura entre ambos lados de la estructura (ANAPE, 2015) (Ossa López, 2009) (Cofre Alvarado, 2003). La capacidad de difusión de vapor se establece mediante el coeficiente de resistencia a la difusión de vapor (μ), el cual representa la relación entre la permeabilidad del aire ($\mu = 1$) y la del material investigado. Materiales más permeables poseen un coeficiente más bajo y viceversa. En el caso del EPS este coeficiente varía entre $\mu = 20$ y $\mu = 100$ (ANAPE, 2015).

- **Comportamiento ante el fuego**

Debido al gran uso que recientemente se le ha dado al EPS en la construcción es importante conocer la respuesta de este material ante elementos como el fuego, que pueden llegar a afectar a una edificación.

De acuerdo a (ANAPE, 2015) (Cofre Alvarado, 2003), el EPS empieza a ablandarse y posteriormente contraerse por efecto de la temperatura a partir de los 100°C para temperaturas de corta duración, si la temperatura continua



subiendo el material se funde, colapsando así su estructura. Alrededor de los 80°C el calor en cualquiera de sus formas no afecta al EPS, incluso si la temperatura se mantiene por varios días y bajo acción de carga. Es por esta razón que la mayoría de investigaciones considera al EPS como un elemento con buena respuesta al fuego.

Las dudas del comportamiento del EPS frente al fuego surgen debido a la composición química de su materia prima, la cual está compuesta de polímeros de poliestireno, los cuales contienen hidrocarburos, productos inflamables, al igual que su agente expansivo. Pero debido a que al final del proceso de fabricación (reposo) la mayor parte del agente expansivo se ha evaporado dejando una estructura de 98% de aire y 2% de polímero, la influencia de estos agentes inflamables en el EPS es mínima (Ossa López, 2009). Además, la respuesta del EPS ante el fuego depende de otros factores físicos como la disponibilidad de oxígeno, la exposición del material, su cohesión con otros materiales y la aplicación o no de elementos ignífugos. Si se toma en cuenta todos estos aspectos la probabilidad de un incendio descontrolado disminuye.

Cuando una edificación se enfrenta ante un incendio, muchas veces lo importante no es controlar el fuego en sí, sino la cantidad de humo producido por el mismo, el cual puede llegar a ser mucho más peligroso debido a la asfixia que provoca. Es así que en la implementación del EPS en la construcción se debe proporcionar el recubrimiento adecuado con el fin de evitar la generación de humo y su propagación, aunque en una edificación la mayor parte del humo proviene de materiales como la madera o los muebles (Barnetson, 2004).

2.2.4. EPS en el hormigón

- **Ventajas**

En general, al usar el hormigón aligerado con perlas de EPS en la construcción, las ventajas que presenta con respecto a un hormigón de peso normal, según (Lai, Ravindrarajah, Pasalich, & Hall, 1996) son las siguientes:

- Al trabajar con elementos prefabricados de hormigón aligerado con EPS, estos son más fáciles de manipular debido a su ligereza.
- Los encofrados soportarán menos peso.
- Edificios que se encuentran sujetos a impactos o carga dinámica, generalmente levantados en zonas sísmicas, resultan beneficiados por la capacidad de absorción de energía del hormigón con EPS.
- Reducción del tamaño de las cimentaciones.
- Debido a la baja conductividad térmica de un hormigón con EPS, un edificio mejora su resistencia al fuego.



- **Desventajas**

Los edificios sujetos a impacto en zonas sísmicas se benefician por la capacidad de absorción de energía de las perlas de EPS, sin embargo, esta propiedad puede considerarse una desventaja ya que el hormigón con EPS presenta menor resistencia a la compresión y mayor capacidad de deformación (Pecce et al., 2013), respecto a los hormigones de peso normal.

La obtención de una mezcla homogénea es difícil de conseguir debido a que las perlas de EPS son extremadamente livianas con una baja densidad, por lo que pueden causar segregación en la mezcla (Haghi, Arabani, & Ahmadi, 2006), por lo tanto es necesario el uso de un aditivo que controle este fenómeno.

(Hohwiller & Köhling, 1969) recomienda envolver las perlas de EPS en una capa de conglomerante (cemento), para lo cual se han de utilizar aditivos con dispersiones de materias sintéticas y los adhesivos de resinas sintéticas, para que así las perlas se adhieran al material y no puedan flotar cuando se somete a compactación. Por lo tanto, gracias a la capa de conglomerante es posible que la resistencia a la compresión de las perlas de EPS se incremente.

Por otro lado, (Miled et al., 2007) (Liu & Chen, 2014) (Wu et al., 2013) entre otros, sugieren el uso de un aditivo superplastificante que mejore las propiedades de la mezcla, con el fin de obtener un hormigón más trabajable y que impida que las perlas floten y suban a la superficie del hormigón creando una capa débil. Oportunamente se expondrá cómo se procedió en este trabajo en el aspecto del aditivo utilizado y sus resultados.

- **Aplicaciones hormigón con EPS**

Dado que el poliestireno expandido es usado universalmente para embalaje, se podría pensar que su producción mayoritariamente estaría destinada a este uso. Sin embargo, en Europa el EPS se usa principalmente para la construcción, European Manufacturers of Expanded Polystyrene (EUMEPS) en el año 2001 aseguró que la producción de EPS destinada a la construcción fue de 600.000 toneladas, mientras que para embalaje fue tan solo de 200.000 toneladas.

Asia presenta un panorama diferente, ya que la producción de EPS destinado a la construcción es muy baja, siendo su principal uso el embalaje llegando a una producción de 1.302.000 toneladas en el año 2001, según Asian Manufacturers of Expanded Polystyrene (AMEP).



En Estados Unidos de Norteamérica, Molders Association EPS (EPSMA), manifestó que la producción de EPS en el año 2001 para embalaje y construcción fue similar; es así que la cantidad de EPS producido para la construcción fue de 180.000 toneladas, mientras que para embalaje 214.000 toneladas.

En el trabajo (Sosa Mena, 2012) se estudia y presenta las aplicaciones del EPS en la construcción en Cuba, proceso que muestra un desarrollo progresivo, relativamente significativo en América Latina.

De lo anterior, se puede concluir que existe una tendencia creciente del uso del EPS en la construcción, por lo que el campo de aplicaciones cada vez es más amplio; localizado en las siguientes aplicaciones:

- Paneles de revestimiento
- Bloques portantes
- Estructuras marinas flotantes
- Material de sub-base para pavimentos
- Capa protectora para elementos sujetos a impacto
- Aislamiento térmico de techos
- Líneas ferroviarias



CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo tiene como objetivo, en primera instancia, planear el diseño experimental que contempla una prueba piloto, necesaria para establecer parámetros estadísticos que permitan determinar el tamaño de la muestra (número de probetas), requerido para llevar a cabo la prueba de hipótesis que permita identificar diferencias significativas entre el hormigón de control (hormigón de peso normal) y los hormigones ligeros con EPS con un adecuado nivel de confianza.

El segundo aspecto importante es dar a conocer las propiedades de los materiales que formarán parte de la mezcla del hormigón. Parte de estas propiedades vienen definidas por el origen de los materiales y el resto corresponden a las determinadas mediante ensayos en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. Este conjunto de propiedades son las requeridas para realizar el diseño del hormigón, en base al método dado por el American Concrete Institute (ACI 211.1-91, 2009), del mismo se obtendrá el diseño del hormigón de peso normal, y a partir de la modificación de este obtener el diseño del hormigón con EPS.

3.1. Metodología de Experimentación

Uno de los objetivos de la presente investigación es determinar, a través de la experimentación, la variación de la resistencia a la compresión y el peso, entre el hormigón aligerado con EPS y el hormigón convencional de peso normal, por tal motivo se hará uso de la estadística inferencial. A través del uso de este método los datos no son simplemente reportados, sino son analizados e interpretados, y en base a este análisis se pueden obtener conclusiones, con cierto grado de confianza, que se pueden extender a una población y no simplemente a los datos obtenidos en la experimentación.

La obtención de datos en la estadística inferencial se puede realizar por dos métodos: el primero, a través de la simple *observación* de los fenómenos a estudiar, sin ningún control sobre las variables, y el segundo, a través de la *experimentación*, donde se ejerce control sobre las variables, que es la usada en esta investigación.

Un experimento de validez científica debe poseer dos aspectos fundamentales: el diseño experimental y el análisis estadístico de datos. En este capítulo se explicará la planeación del diseño experimental realizado para este trabajo, y el capítulo de análisis e interpretación de resultados y conclusiones detallará el análisis estadístico de resultados.



3.1.1. Diseño Experimental

La calidad de los resultados y las conclusiones obtenida a partir de la experimentación dependerá de la planificación de la misma, dicha planificación se conoce como diseño experimental.

El diseño experimental es de amplia aplicación en el desarrollo de materiales alternativos, como es el caso de la presente investigación. Se adoptó esta metodología pues se realizarán sustituciones en porcentajes de volumen de arena por EPS y un experimento diseñado permite tener control sobre las variables, con el fin de realizar cambios intencionales en las mismas. Así se puede seleccionar previamente los niveles (porcentajes) que tendrá esta variable, además de establecer el tamaño de la muestra (número de probetas) necesarias para obtener resultados confiables que puedan ser interpretados y no solo reportados. Si se logra un control riguroso al obtener los resultados, se podrá confiar en que las diferencias encontradas entre porcentajes se deben a los distintos porcentajes de sustitución de arena por EPS y no a errores experimentales.

Debido a esto, como primer paso del diseño experimental, se debe establecer y describir las variables de la investigación.

- **Porcentaje de sustitución de arena por EPS:** el porcentaje de sustitución de arena por EPS es una variable que se puede controlar en esta investigación, es decir se puede asignar distintos tratamientos (porcentajes) a este variable para posteriormente determinar la influencia que cada porcentaje tuvo en la resistencia a compresión del hormigón y en el peso. La asignación de los distintos tratamientos se mostrará más adelante, pues para su determinación se debe realizar un paso previo. Sin embargo se establece que el número de tratamientos será superior a dos.

3.1.2. Experimento Uni-factorial

De la descripción de variables se establece que la única variable que puede manipularse libremente en el diseño experimental, y que además tiene influencia en la resistencia a compresión y la densidad del hormigón, es el porcentaje a sustituir de arena por EPS. Por otro lado, uno de los objetivos de este trabajo es determinar la influencia de dicha sustitución, por este motivo es necesario realizar un experimento comparativo entre los resultados dados por el hormigón de peso normal y los dados por los hormigones con distintos porcentajes de sustitución (tratamientos). Cuando a una variable importante se le aplican múltiples tratamientos en un diseño experimental, es necesario un



experimento factorial para poder identificar las interacciones entre esta variable y los resultados.

Por estas razones se puede establecer que el tipo de diseño experimental a utilizar es un diseño uni-factorial, pues se posee una sola variable controlable (factor), a la cual se le aplicarán diferentes tratamientos (porcentajes), en este caso más de uno, y estos tratamientos serán comparados con una muestra control que es el hormigón de peso normal.

Definida la metodología experimental a usar como un experimento uni-factorial, se puede establecer la expresión necesaria para obtener el tamaño de la muestra requerido para que los resultados posean suficiente grado de confianza. El tamaño de la muestra en un experimento uni-factorial se obtiene a partir de:

$$\Phi^2 = \frac{nD^2}{2a\sigma^2} \quad (3.1.1)$$

Dónde:

Φ^2 : *Parámetro relacionado con el factor de descentralización δ 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 las muestras de un mismo tratamiento*

Los parámetros de esta expresión pueden ser establecidos mediante el criterio del experimentador, cuando este conoce a profundidad su campo de aplicación. Caso contrario, cuando se está iniciando en la investigación, como es el presente caso, se puede realizar pruebas de tanteo, conocidas como *pruebas piloto* que faciliten la definición de estos parámetros.

3.1.3. Prueba Piloto

La prueba piloto se ha diseñado de la siguiente forma:

Número de tratamientos incluyendo el control: se ha escogido 4 tratamientos, 0%, 20%, 40% y 60% de sustitución de arena por EPS, cubriendo un rango significativo del 0 a 100% de sustitución.

Número de probetas: Se ensayaron un total de 3 probetas por tratamiento, pues este es el número mínimo fijado por la INEN 1 573 para control de calidad del hormigón. No se utilizó directamente este valor dado por la INEN para la experimentación pues en la presente investigación no se realiza un control de calidad sino el desarrollo de un material alternativo, el cual necesita establecer un



grado de confiabilidad, que puede ser más alto que el dado por estas tres probetas.

Las probetas se probaron a los 7 días edad, pues se sabe que el hormigón alcanza aproximadamente el 65% de la resistencia que tendría a los 28 días.

Se realizó así la prueba piloto con los materiales y procedimientos establecidos en la sección 3.2, 3.3 y 3.4, obteniéndose los siguientes resultados.

Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Sustitución de arena por EPS			
	0%	20%	40%	60%
Probeta 1	167,34	160,95	158,14	157,08
Probeta 2	161,37	164,82	160,72	158,51
Probeta 3	162,8	162,88	163,47	157,79
Resistencia Promedio	163,84	162,88	160,78	157,79

Tabla 8. Resultados de la prueba piloto

De esta tabla se puede observar que la máxima diferencia entre un tratamiento, en este caso 60% y el control es de aproximadamente 7 kg/cm². Además, se obtuvo el valor de la varianza entre probetas de un mismo tratamiento (σ^2), la cual resulto ser de 5,27 kg²/cm⁴, que da un valor para la desviación estándar de 2,30 kg/cm². Este valor de desviación se compara con el dado por la norma INEN 1 573, la cual establece que se puede obtener una desviación estándar de hasta el 2,4% de la resistencia esperada a los 28 días, entre probetas de una misma mezcla. Debido que la resistencia máxima (250 kg/cm²), dada por el control, dará el valor máximo de desviación estándar admitida entre probetas, se adopta este como la máxima desviación, la cual tiene un valor de 6 kg/cm².

3.1.4. Resultados del Diseño Experimental

Número de Tratamientos:

Dado que entre los resultados de los tratamientos establecidos en la prueba piloto no se observó una gran variación, se decidió establecer un mayor número de tratamientos con el fin de cubrir un rango mayor de sustitución y obtener mayores diferencias. Así, los tratamientos quedan definidos y nombrados de la siguiente manera:

% de Sustitución	0%	30%	45%	60%	75%	90%	100%
Nomenclatura del Tratamiento	A	B	C	D	E	F	G

Tabla 9. Tratamientos del Diseño Experimental

Diferencia a identificar entre tratamientos

En la prueba piloto se obtuvo una diferencia máxima de 7 kg/cm² entre el control y el máximo porcentaje de sustitución, pero se decidió incrementar este valor a 20 kg/cm² pues el rango del porcentaje de sustitución se incrementó, con lo cual se esperan mayores diferencias.

Tamaño de la muestra

Establecidos los anteriores parámetros se puede obtener finalmente el tamaño de la muestra apropiado para la experimentación a través de la expresión (3.1.1) y mediante el uso de curvas características de operación estadística destinadas a la obtención de tamaños de muestra, como la mostrada en la Figura 6. Para el uso de las curvas características de operación es necesario establecer el poder de prueba (1 - β), y el nivel de significación de prueba (α), ambos relacionados con la prueba de hipótesis. Para la presente investigación se optó por trabajar con los valores de 1 - β = 0,90 y α = 0,05.

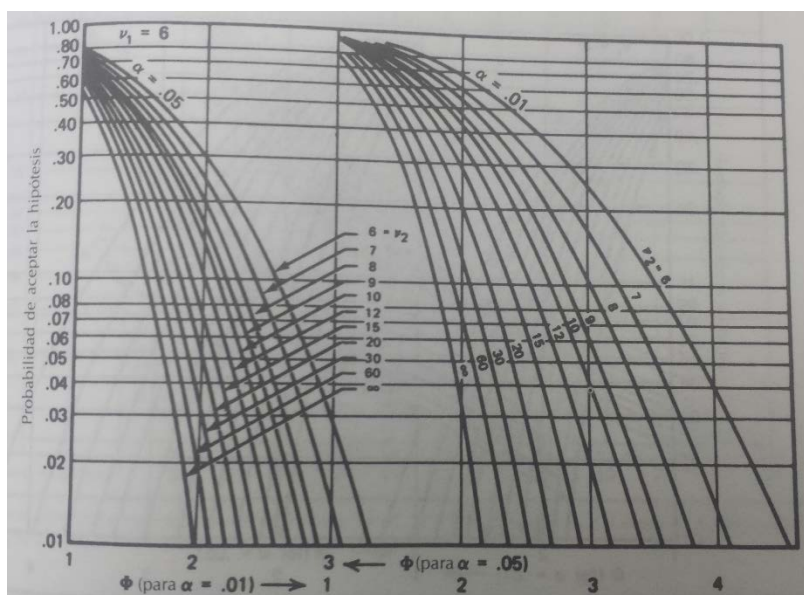


Figura 6. Curva característica de operación estadística, para seis grados de libertad en el numerador
Fuente: (Montgomery, 1991)

Entonces, aplicando la curva de operación se puede obtener mediante tanteo el tamaño de muestra requerido, los diferentes tanteos realizados se resumen en la siguiente tabla.

n	φ ²	φ	a(n-1)	β	Potencia (1-β)
3	2,38	1,54	14	0,300	0,700
4	3,17	1,78	21	0,100	0,900
5	3,97	1,99	28	0,028	0,972
6	4,76	2,18	35	0,022	0,978

Tabla 10. Tanteo para la obtención del tamaño muestral



De la tabla se observa que un número de cuatro probetas da una suficiente potencia en la prueba de hipótesis ($1 - \beta = 0,90$), lo cual garantizará confiabilidad de resultados. Este tamaño de muestra corresponde únicamente a las probetas a ser ensayadas a los 28 días de edad, pues la resistencia de interés para este estudio se alcanza a esta edad.

3.2. Caracterización de los Materiales: Descripción y Ensayos

3.2.1. Árido Fino

Los áridos finos a emplearse dentro de este ensayo son la arena y las perlas de EPS. Los ensayos en la arena se describen a continuación y en el caso del EPS se caracterizará en base a la bibliografía estudiada.

- **Arena**

La arena que se utilizó en esta investigación es procedente de la mina de Santa Isabel, provincia del Azuay. Los ensayos necesarios para el diseño del hormigón se describen a continuación:

Granulometría.- El ensayo de granulometría se realizó según la norma INEN 696, los resultados son los siguientes:

Tamiz	Abertura (mm)	Peso material retenido (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Pasa
#4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,36	18,30	1,86	1,86	98,14
#16	1,18	95,60	9,72	11,58	88,42
#30	0,59	295,90	30,07	41,65	58,35
#50	0,297	367,70	37,37	79,01	20,99
#100	0,149	166,50	16,92	95,93	4,07
Fondo		35,70	3,63	99,56	0,44

Tabla 11. Granulometría de la arena

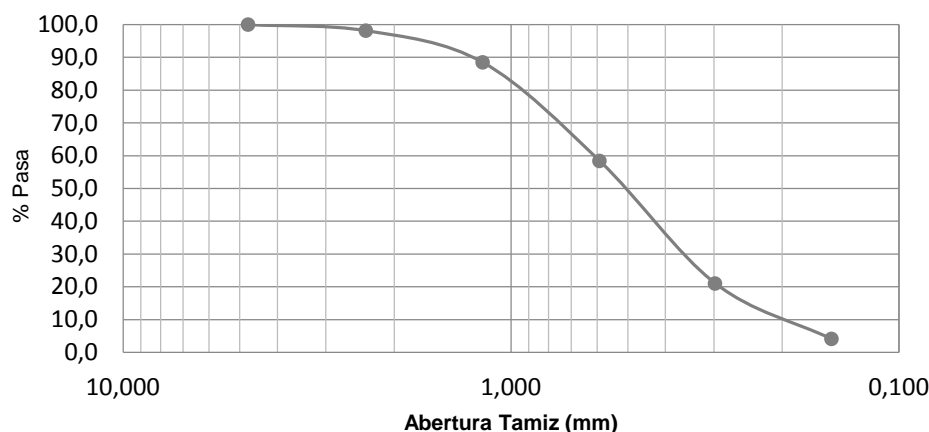


Figura 7. Curva granulométrica de la arena



El módulo de finura es el resultado de la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados de los tamices de la serie estándar (#4, #8, #16, #30, #50, #100), en este caso es igual a 2,30.

Peso Volumétrico.- El peso volumétrico fue obtenido mediante el procedimiento por varillado, de acuerdo a la norma INEN 858, la cual proporciona la siguiente expresión para su cálculo.

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (3.2.1)$$

Dónde:

M = masa unitaria (peso volumétrico), kg/m^3

G = masa de la arena más el molde, kg

T = masa del molde, kg

V = volumen del molde, m^3

Según lo anterior, el peso volumétrico de la arena utilizada para esta investigación es de $1308 kg/m^3$.

Densidades Relativas y Absorción.- Para obtener las densidades relativas y el porcentaje de absorción de la arena se siguió la norma INEN 856; para las densidades se usó el procedimiento gravimétrico, y para su cálculo se emplearon las siguientes expresiones:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{B + S - C} \quad (3.2.2)$$

$$\text{Densidad relativa} = \frac{S}{B + S - C} \quad (3.2.3)$$

$$\text{Densidad absoluta o real} = \frac{A}{B + A - C} \quad (3.2.4)$$

$$\text{Absorción \%} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad (3.2.5)$$

Dónde:

A = masa de la muestra seca al horno, g

B = masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración, g

C = masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración, g

S = masa de la muestra saturada superficialmente, g

Dando como resultado lo siguiente:

Densidad aparente	Densidad relativa	Densidad absoluta	Absorción (%)
2,44	2,50	2,60	2,55

Tabla 12. Densidades relativas y absorción de la arena

- Perlas de Poliestireno Expandido (EPS)

Las perlas de EPS se usaron como reemplazo progresivo de la arena, las mismas fueron adquiridas en la empresa IMSALE, localizada en la zona industrial de la ciudad de Cuenca. Estas perlas poseen un diámetro nominal igual a 3mm con una densidad de 12 kg/m^3 .

IMSALE fabrica perlas de 12, 15 y 21 kg/m^3 , sin embargo se utilizaron perlas con una densidad igual a 12 kg/m^3 ya que al momento de la adquisición no disponían de perlas con las otras densidades, a pesar de que en la bibliografía se recomienda el uso de perlas con densidades más altas para que las propiedades del hormigón mejoren.



Figura 8. Perlas de EPS adquiridas en IMSALE

3.2.2. Árido Grueso

El árido grueso utilizado tiene un tamaño máximo igual a $3/8''$, procedente de Santa Isabel, provincia del Azuay. Los ensayos del árido grueso se muestran a continuación:

Granulometría.- Se llevó a cabo mediante la norma INEN 696, dando como resultado lo siguiente:



Tamiz	Abertura (mm)	Peso material retenido (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Pasa
3"	75	0	0	0	100
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37,5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12,5	0	0	0	100
3/8"	9,5	10	0,17	0,17	99,83
#4	4,75	4264	72,05	72,22	27,78
Fondo		1644	27,78	100	0

Tabla 13. Grunulometría de la grava

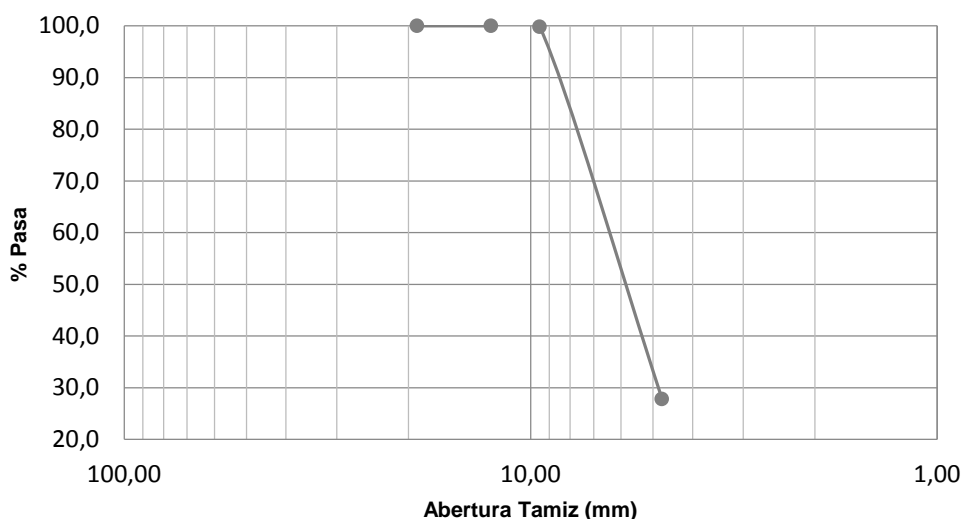


Figura 9. Curva Granulométrica de la grava

Peso Volumétrico.- Se obtuvo el peso volumétrico de la grava varillada y de la grava suelta según la norma IENE 858, a través de la expresión:

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (3.2.6)$$

Dónde:

M = masa unitaria (peso volumétrico), kg/m^3

G = masa de la arena más el molde, kg

T = masa del molde, kg

V = volumen del molde, m^3

Dando como resultado que el peso volumétrico varillado fue igual a 1319 kg/m^3 y el peso volumétrico de la grava suelta igual a 1230 kg/m^3 .



Densidades Relativas y Absorción.- Las densidades relativas y el porcentaje de absorción de la grava se obtuvieron de acuerdo a la norma INEN 857, la cual facilita las siguientes expresiones para el cálculo:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{B - C} \quad (3.2.7)$$

$$\text{Densidad relativa} = \frac{B}{B - C} \quad (3.2.8)$$

$$\text{Densidad absoluta o real} = \frac{A}{A - C} \quad (3.2.9)$$

$$\text{Absorción \%} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (3.2.10)$$

Dónde:

A = masa en aire de la muestra seca al horno, g

B = masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca, g

C = masa aparente en agua de la muestra saturada, g

Los resultados tanto de las densidades relativas como del porcentaje de absorción se muestran en la siguiente tabla:

Densidad aparente	Densidad relativa	Densidad absoluta	Absorción (%)
2,37	2,45	2,58	3,52

Tabla 14. Densidades relativas y absorción de la grava

3.2.3. Conglomerante

El conglomerante utilizado para la elaboración de los hormigones es cemento hidráulico Portland tipo I, producido por la industria Unión Cementera Nacional. Se ha utilizado este cemento pues de acuerdo a la norma INEN 152 es el tipo usado para construcción en general, cuando no se especifica ningún otro requerimiento especial. La norma INEN 152 también especifica los requisitos químicos y físicos que debe poseer el cemento Portland Tipo I para considerarlo adecuado al incorporarlo a la mezcla de hormigón.

En la siguiente tabla se realiza una comparación entre los valores establecidos por la norma INEN 152 y los proporcionados por el departamento de Control de Calidad de Unión Cementera Nacional, para los principales requisitos químicos y físicos.



Requisito	Valor Admitido por Norma	Resultado Control de calidad
Óxido de Aluminio (Al_2O_3), % máximo	N/A	6,43
Óxido Férrico (Fe_2O_3), % máximo	N/A	32,56
Óxido de Magnesio (MgO), % máximo	6	1,38
Trióxido de azufre (SO_3), % máximo	3,5	2
Pérdida por calcinación, % máximo	3	1,65
Residuo Insoluble (SO_3), % máximo	0,75	--

*El control de calidad citado en la tabla se refiere al reporte de calidad correspondiente al período 01-31 de julio de 2015.

N/A: Valores no establecidos por la norma

Tabla 15. Requisitos químicos obligatorios del cemento Portland Tipo I

Requisito	Valor Admitido por Norma	Resultado Control de calidad
Contenido de aire en mortero, % máximo en volumen	12	2,82
Finura (m^2/kg) Método de Blaine	--	396,4
Expansión en Autoclave, % máximo	0,8	--
Resistencia a la Compresión, Mpa:		
3 días	12	17,47
7 días	19	22,16
28 días	28	35,27
Tiempo de Fraguado Inicial, ensayo de Vicat	45 – 375 seg	264,80 seg

*El control de calidad citado en la tabla se refiere al reporte de calidad correspondiente al período 01-31 de julio del 2015.

Tabla 16. Requisitos físicos obligatorios del cemento Portland Tipo I

3.2.4. Agua

El agua utilizada en la mezcla es agua potable de uso doméstico de la ciudad de Cuenca, Ecuador. La norma INEN 2617 establece los requisitos que debe cumplir el agua para mezcla de hormigón de cemento hidráulico. La norma establece en su numeral 5.1.1.2 que se permite el uso de agua potable como agua de mezcla del hormigón, sin la realización de ensayos para verificar el cumplimiento de los requisitos expuestos en la norma. Es por este motivo que en el presente trabajo no se vio la necesidad de realizar un análisis físico-químico del agua utilizada.

3.2.5. Aditivo

Como se mencionó en el capítulo dos, debido a la segregación que suele presentar el hormigón aligerado con poliestireno expandido, es necesario añadir a la mezcla un aditivo que evite este comportamiento. De la revisión de la literatura



se decidió que el aditivo a utilizar será un súper-plastificante, pues es el más usado y recomendado por estudios previos sobre el hormigón con EPS.

Para seleccionar el aditivo súper-plastificante más adecuado de entre los existentes en el mercado, se solicitó una asesoría técnica a la empresa de productos químicos para la construcción y la industria SIKA S.A. la cual en su catálogo de productos cuenta con varias alternativas, de entre estos se seleccionó el aditivo súper-plastificante Sikament N-100, por ser fácil de incorporar a la mezcla y ofrecer la mayor cantidad de presentaciones comerciales, lo que permite su uso a pequeña y gran escala.

El aditivo Sikament-N 100 es color café, líquido y posee una densidad aproximada de 1,22 kg/l y está compuesto por resinas sintéticas. Su producción se ha realizado para cumplir los requisitos establecidos por las normas ASTM C 494, ASTM C 1017 y NTC 1299 como aditivo tipo A y F.

3.3. Diseño del Hormigón

El diseño del hormigón se realizó conforme lo especifica el American Concrete Institute en su publicación (ACI 211.1-91, 2009).

Para aplicar el método recomendado por el ACI, son necesarios los datos de las propiedades físicas de los materiales, algunas de estas obtenidas a través de los ensayos en el laboratorio y otras proporcionadas por la empresa productora.

Cemento		Arena		Grava	
Peso específico	3100 kg/m ³	Módulo de finura	2,30	Peso volumétrico varillado	1319 kg/m ³
		Densidad aparente	2,44	Densidad absoluta	2,58
		% Grava en arena	0	% Arena en grava	38,47%

Tabla 17. Propiedades físicas de los materiales

Los pasos a seguir son:

1. Elección del asentamiento

El asentamiento del hormigón fresco para esta investigación varía entre los 25 mm y 75 mm, es decir, es el valor más bajo recomendado por el ACI. Se escogieron estos valores ya que con la incorporación del aditivo súper-plastificante en la masa del hormigón se incrementará el asentamiento, debido a las características que presenta el mismo.



Tipos de Construcción	Asentamiento (mm)	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	75	25
Cajones de cimentación y muros de sub-estructura	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas para edificios	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Concreto masivo	75	25

*Cuando los métodos de consolidación no sean mediante vibrado, se incrementarán 25 mm

Tabla 18. Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción

Fuente: ACI 211.1-91

2. Elección del tamaño máximo del agregado

Áridos de mayor tamaño nominal requieren menos mortero por unidad de volumen del hormigón, a causa de que poseen menos huecos que los áridos de menor tamaño, Sin embargo, en esta investigación se limitó el tamaño máximo nominal del árido grueso a 3/8" (9,50 mm).

3. Estimación de la cantidad de agua en la mezcla y contenido de aire

Con los datos del asentamiento y el tamaño máximo nominal, la cantidad de agua y el contenido de aire quedan determinados mediante la siguiente tabla:

Agua, kg/m ³ de hormigón para tamaños máximos de agregado								
Asentamiento, mm	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
Hormigón sin aire incluido								
De 25 a 50	208	199	187	178	163	154	131	113
De 75 a 100	228	217	202	193	178	169	145	125
De 150 a 175	243	228	214	202	187	178	160	---
Cantidad aprox de aire atrapado, porcentaje	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2
Hormigón con aire incluido								
De 25 a 50	181	175	166	160	148	142	122	107
De 75 a 100	202	193	181	175	163	157	133	119
De 150 a 175	217	205	193	184	172	166	154	---
Promedios recomendados de aire por incluir, porcentaje de nivel de exposición								
Exposición ligera	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
Exposición moderada	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0
Exposición severa	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0

Tabla 19. Requisitos aproximado de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños máximos nominales de agregado

Fuente: ACI 211.1-91

Según lo anterior, para un tamaño máximo nominal de la grava igual a 9,5 mm y un asentamiento de 25 mm a 50 mm, la cantidad de agua necesaria para la mezcla es de 208 kg/m³ (litros) y la cantidad de aire atrapado es 3%. Aunque por



la experiencia adquirida en la elaboración de hormigones durante la carrera universitaria, se tienen datos de hormigones diseñados para una resistencia igual a 250 kg/cm^2 , que mostraron buenos resultados y en las cuales se usaron 190 litros de agua y el 1% de aire atrapado en el diseño, cantidades utilizadas también para este Trabajo de Titulación.

4. Selección de la relación agua/cemento (w/c)

La relación agua/cemento depende de la resistencia promedio requerida a compresión, para lo cual el “*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-08)*” facilita la siguiente tabla, en la cual se puede calcular la resistencia requerida cuando no se tienen datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, kg/cm^2	Resistencia promedio requerida a la compresión, kg/cm^2
$f'c < 210$	$f'cr = f'c + 70$
$210 \leq f'c \leq 350$	$f'cr = f'c + 83$
$f'c > 350$	$f'cr = 1,10f'c + 50$

Tabla 20. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra
Fuente: ACI 318-08

En este caso:

$$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore f'cr = 250 + 83 = 333 \text{ kg/cm}^2$$

Con la resistencia promedio requerida, la relación agua/cemento por peso proporcionada en el ACI 211.1-91 queda determinada:

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm^2	Relación agua/cemento, por peso	
	Hormigón sin aire incluido	Hormigón con aire incluido
420	0,41	---
350	0,48	0,40
280	0,57	0,48
210	0,68	0,59
140	0,82	0,74

Tabla 21. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión del hormigón
Fuente: ACI 211.1-91



Luego de realizar una interpolación, se deduce que la relación agua/cemento por peso para un hormigón sin aire incluido es de 0,50.

5. Cálculo del contenido de cemento

Con la cantidad de agua y la relación w/c, el contenido de cemento es el siguiente:

$$\text{Cemento} = \frac{190 \text{ kg/m}^3}{0,50} = 380 \text{ kg/m}^3$$

6. Estimación del contenido de árido grueso

El volumen de la grava por volumen unitario de hormigón depende únicamente del módulo de finura de la arena y del tamaño máximo de la grava, así lo afirma el ACI en la siguiente tabla:

Tamaño máximo de la grava	Volumen de árido grueso varillado seco, por volumen unitario de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Tabla 22. Volumen de árido grueso por volumen unitario de hormigón
Fuente: ACI 211.1-91

En esta investigación se trabajó con un tamaño máximo de la grava de 9,50 mm y módulo de finura de arena de 2,30; por lo que luego de realizar una extrapolación, el volumen de la grava es de 0,51. Entonces, el peso de la grava es de:

$$P_{grava} = 1319 \text{ kg/m}^3 * 0,51 = 672 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Ver página 49})$$

7. Estimación del contenido de árido fino

La cantidad de árido fino es el único dato desconocido, y su determinación es por diferencia ya que todos los materiales que componen la mezcla del hormigón deben sumar un metro cúbico (1000 l). Existen dos métodos a seguir, el primero por peso y el segundo por volumen absoluto.



Sin embargo el más exacto y usado en esta investigación es el método por volumen absoluto, pero como se tienen las cantidades de material en peso, es necesario pasar a volumen empleando sus respectivas densidades.

Materiales	Peso (kg)	Densidad (kg/m³)	Volumen (l)
Cemento	380	3100	123
Grava	672	2580	261
Agua	190	1000	190
Aire	---	---	10
Total	1242	---	583

Tabla 23. Cantidad de material en litros en un metro cúbico de hormigón

$$V_{arena} = 1000 - 583 = 417 \text{ l}$$

$$\therefore \text{Peso requerido arena} = 417 * 2,44 = 1016 \text{ kg/m}^3$$

En el siguiente paso indicado en el ACI se corrigen las cantidades de material por humedad y absorción, sin embargo el suministro de los áridos puede contener ciertas proporciones de arena en grava y/o viceversa, lo cual conlleva a una corrección debido a la granulometría que presentan, ya que si no se corrigiera se estaría agregando mayores cantidades de arena y menores de grava y/o mayores cantidades de grava y menores de arena, los resultados de la corrección por granulometría en kg para 1 m³ de hormigón se presentan a continuación:

Material	Peso (kg)
Cemento	380
Arena	596
Grava	1093
Agua	190

Tabla 24. Cantidades de material corregidos por granulometría

8. 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 de los áridos. 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 con las que se elaborarán las probetas a los 7, 14 y 28 días no es la misma.



Un ejemplo de la corrección por humedad y absorción, para el hormigón de peso normal que será ensayado a los 7 días de edad se presenta a continuación:

	Arena	Grava
Peso húmedo (g)	500	500
Peso seco (g)	484	494
Humedad (%)	3,31	1,21

Tabla 25. Humedad de los áridos

Material	Sin corregir (kg)	Humedad (%)	(kg)	Absorción (%)	(kg)	Corregido (kg)
Cemento	380					380
Arena	596	3,31	+ 20	2,55	- 15	600
Grava	1093	1,21	+ 13	3,52	- 38	1068
Agua	190		- 33		+ 54	211
Total:	1879					1879

Tabla 26. Cantidades de material corregidos por humedad y absorción

Las cantidades de material corregidos para los diferentes hormigones se presentan en la sección destinada a cantidades de material.

Este diseño se utilizó para los dos tipos de hormigones realizados en este trabajo, con la diferencia de que para el hormigón con EPS se sustituyó progresivamente la cantidad arena necesaria (en volumen) por las perlas de EPS.

3.3.1. Cantidades de Material

Antes de indicar las cantidades de material, es necesario establecer la notación que tendrán los hormigones. Como se estableció en el diseño experimental, los porcentajes de sustitución de la arena por el EPS serán del 0% (hormigón de peso normal), 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%, por lo que cada porcentaje le corresponderá una letra A, B, C, D, E, F y G, respectivamente. A la letra se le añadirá la edad a la que se ensayarán las probetas (7, 14 o 28), finalmente la notación quedará determinada al colocar el número de cilindro a ensayarse.

La dosificación de aditivo Sikament N-100, tal como lo especifica la hoja técnica, es del 0,5 al 1,0% del peso del cemento, en este trabajo se utilizó el 0,8%, es decir $3,04 \text{ kg/m}^3$ para todas las mezclas. Entonces, las cantidades de áridos, cemento, agua y perlas EPS por m^3 serán:



	A7		A14		A28	
	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)
Cemento	380		380		380	
Arena	600	3,31	599	3,09	600	3,31
Grava	1068	1,21	1068	1,21	1063	0,81
Agua	211		212		215	

Tabla 27. Cantidades de material para muestra A (0% de sustitución)

	B7		B14		B28	
	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)
Cemento	380		380		380	
Arena	420	3,31	419	3,09	420	3,31
Grava	1063	0,81	1068	1,21	1068	1,21
Agua	217		213		212	
EPS	0,89		0,88		0,89	

Tabla 28. Cantidades de material para muestra B (30% de sustitución)

	C7		C14		C28	
	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)
Cemento	380		380		380	
Arena	330	3,31	329	3,09	332	3,95
Grava	1063	0,81	1068	1,21	1059	0,40
Agua	217		213		220	
EPS	1,33		1,33		1,34	

Tabla 29. Cantidades de material para muestra C (45% de sustitución)

	D7		D14		D28	
	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)
Cemento	380		380		380	
Arena	242	4,17	240	3,09	242	3,95
Grava	1068	1,21	1068	1,21	1059	0,40
Agua	211		214		221	
EPS	1,79		1,77		1,78	

Tabla 30. Cantidades de material para muestra D (60% de sustitución)

	E7		E14		E28	
	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)
Cemento	380		380		380	
Arena	151	4,17	150	3,31	151	3,95
Grava	1068	1,21	1063	0,81	1059	0,40
Agua	213		219		222	
EPS	2,23		2,22		2,23	

Tabla 31. Cantidades de material para muestra E (75% de sustitución)



	F7		F14		F28	
	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)
Cemento	380		380		380	
Arena	61	4,17	60	3,31	60	3,31
Grava	1068	1,21	1063	0,81	1063	0,81
Agua	214		219		219	
EPS	2,68		2,66		2,66	

Tabla 32. Cantidades de material para muestra F (90% de sustitución)

	G7		G14		G28	
	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)	(kg)	Humedad (%)
Cemento	380		380		380	
Arena	0	4,17	0	3,31	0	3,31
Grava	1068	1,21	1063	0,81	1063	0,81
Agua	215		220		220	
EPS	2,98		2,95		2,95	

Tabla 33. Cantidades de material para muestra G (100% de sustitución)

3.4. Elaboración y Muestreo del Hormigón

Este apartado describe los materiales y el protocolo utilizados para el mezclado del hormigón y su posterior muestreo. El procedimiento de mezclado del hormigón es de importancia especialmente cuando se adicionan nuevos materiales a la mezcla, como es el caso de la presente investigación. Al hormigón fresco, obtenido del mezclado, se le muestrea y se le somete a ensayos para determinar algunas de sus propiedades físicas como por ejemplo la trabajabilidad, luego se toman muestras y se coloca en moldes para proceder con el curado de los especímenes. Este apartado explica brevemente el procedimiento a seguir, citando, en el caso de existir, la norma usada, caso contrario se detallará de forma más amplia el proceso seguido.

3.4.1. Equipo

A continuación se describen los materiales necesarios para llevar a cabo el mezclado, la elaboración de probetas y la prueba de la trabajabilidad.

Mezclado: el mezclado del hormigón puede hacerse de manera mecánica o manual, de la técnica que se utilice depende la homogeneidad y resistencia del hormigón. Sin embargo, el procedimiento mecánico ha resultado ser el que brinda mejores características a la mezcla, es por eso que el mezclado mecánico es el que se realizó en esta investigación. El equipo necesario es el siguiente:

- Concretera: marca Marshalltown, provista de un tambor giratorio, de eje inclinado, con una capacidad máxima de 350 litros y rota a 25 rpm.



Elaboración de Probetas: los materiales necesarios deben cumplir las especificaciones de la norma INEN 1 576.

- Moldes: cilindros de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro, deben cumplir los requisitos de la norma ASTM C 470.
- Varilla de compactación: debe ser varilla de acero con borde redondeado, recta, lisa y de sección circular con un diámetro igual a $16 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$; la longitud mínima de la varilla es de 100 mm pero no debe superar los 600 mm.
- Mazo: con cabeza de caucho o cuero no tratado, con una masa de $0,6 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$.
- Cucharón: herramienta de colocación del hormigón en los moldes.
- Bailejo: herramienta necesaria para el terminado del hormigón.
- Bandeja de metal: para la toma de la muestra, debe ser no absorbente y de lámina gruesa.

Asentamiento: el equipo para la determinación del asentamiento debe cumplir los requisitos de la norma INEN 1 578.

- Cono de Abrams: cono truncado de metal con un espesor no menor a 1,5 mm, los diámetros de la base y la parte superior deberán ser igual a 200 mm y 100 mm respectivamente, altura de 300 mm (la tolerancia aceptable para la altura y los diámetros es de $\pm 3 \text{ mm}$). Debe tener manijas y estribos para apoyar los pies.
- Varilla de compactación: de acero, recta, lisa y con puntas redondeadas, con un diámetro de 16 mm y longitud de 600 mm.
- Instrumento de medida: regla, 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.

3.4.2. Procedimiento de Mezclado

La norma ASTM C 192 especifica la técnica a seguir para la obtención del hormigón.

Antes de iniciar la rotación de la concreteira ésta debe ser humedecida, luego agregar el árido grueso con una parte del agua e iniciar el mezclado. Luego adicionar el árido fino (arena), cemento y agua con la concreteira en movimiento. En caso de que no sea posible adicionar los materiales mientras la concreteira está en movimiento, se detiene el giro de la concreteira y se incorporan a la mezcla los materiales antes mencionados.



Se mezclan los materiales por tres minutos, se deja en reposo tres minutos más y el mezclado final por 2 minutos, La norma recomienda cubrir la abertura de la concretera con el fin de evitar evaporación en el periodo de reposo de la mezcla.

Finalmente y con el afán de evitar segregaciones, depositar la mezcla en una bandeja de metal previamente humedecida y re-mezclar con una pala o bailejo hasta que presente un aspecto uniforme. Con la mezcla obtenida se procede a hacer la prueba de asentamiento y posteriormente elaborar las probetas y proceder al curado de las mismas.

El procedimiento antes mencionado fue utilizado para obtener el hormigón de peso normal, sin embargo para el hormigón aligerado con perlas de EPS, el proceso de mezclado fue modificado debido a que este hormigón contiene las perlas de EPS y el aditivo súper-plastificante (anti-segregante).

En la elaboración del hormigón con EPS, durante los 3 minutos de reposo se adicionaron las perlas de EPS y luego se mezcló los materiales durante 2 minutos más. Posteriormente y según lo especificado en la hoja técnica del producto Sikament N-100 proporcionada por la empresa SIKA, el aditivo fue adicionado a la mezcla ya preparada y mezclado con los otros materiales ya introducidos en la olla de la concretera durante los 4 minutos siguientes.



Figura 10. Mezclado del hormigón

3.4.3. Determinación del Asentamiento

El ensayo para determinar la consistencia del hormigón se realizó según la norma INEN 1 578. La norma INEN 1 763 establece que el asentamiento deberá hacerse dentro de los 5 minutos posteriores a la obtención del hormigón. El asentamiento en esta investigación fue medido únicamente en el hormigón de



peso normal y el hormigón con el 30 y 100% de reemplazo de la arena por EPS. Los resultados fueron los siguientes:

% de reemplazo	0	30	100
Asentamiento (mm)	20	50	70

Tabla 34. Asentamiento del hormigón

3.4.4. Muestreo

Una vez realizada la mezcla se procedió a la elaboración de las probetas que servirán como muestras para los ensayos de peso y compresión del hormigón.

Para la prueba de hipótesis se elaboraron 4 probetas para cada porcentaje de sustitución (incluyendo el control), tal y como lo determinó el diseño experimental. Entonces las probetas destinadas a la prueba de hipótesis fueron en total 28. Además se fabricaron tres probetas para cada porcentaje de sustitución (incluyendo el control) para ser probadas a los 7 y 14 días de edad según la norma INEN 1 573, dando un total de 42 probetas. Dichas probetas se fabricaron con el fin de obtener la curva resistencia-edad de los hormigones, la cual permitirá describir el proceso de endurecimiento del hormigón.

Para la elaboración de probetas se coloca la mezcla de hormigón en moldes metálicos cilíndricos. 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.

La colocación de la mezcla dentro de las probetas se realizó tomando en cuenta 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 por capas, el número de capas requeridas depende de las dimensiones del molde, así para los moldes usados en esta investigación se requiere un número de 3 capas distribuidas uniformemente.
- La compactación del hormigón se realizó mediante varillado, con el equipo ya detallado en el apartado de materiales. 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.



- Se compactó cada capa uniformemente sobre la sección transversal con la punta redondeada de la varilla, con el número de golpes requerido. La capa del fondo se compactó penetrando la varilla en toda su profundidad, se debe evitar dañar el fondo del molde con los golpes. Para cada capa superior, permitir que la varilla penetre toda la capa que está siendo compactada e ingrese a la capa inferior aproximadamente 25 mm. Luego de que cada capa ha sido compactada, golpear en el exterior del molde de 10 a 15 veces con el mazo.
- Al colocar la última capa, adicionar una cantidad de hormigón para asegurar que después de la compactación, el molde quede lleno.

Una vez terminada 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. Sin embargo es indispensable transportar las probetas a un lugar, seco y protegido del medio ambiente, se llevó al lugar más cercano que cumpla con estas condiciones.

Las probetas deben permanecer dentro de los moldes un mínimo de 24 horas, de acuerdo con lo establecido en la norma INEN 576, después de este tiempo serán retiradas de los moldes y se precederá con su curado.



Figura 11. Probetas en reposo antes del curado en agua

3.4.5. Curado

Debido a facilidad del método y a la disponibilidad de instalaciones en el laboratorio, se optó por realizar el curado de especímenes mediante el método de inmersión en agua, cuyo detalle se encuentra en la norma INEN 576.

Los especímenes permanecieron en estas condiciones hasta su respectivo día de rotura, lo que ayudará al hormigón a continuar el proceso de hidratación del cemento, para evitar los procesos de evaporación excesiva que pueden provocar fisuras y que finalmente pueden afectar la resistencia del hormigón.

3.5. Ensayo a Compresión

Antes de los ensayos las probetas deben ser extraídas del agua y secadas con un tiempo de antelación máximo establecido por la norma INEN 1 573, resumido en el siguiente cuadro.

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	±0,5 h o 2,1%
3 días	2 horas o 2,8%
7 días	6 horas o 3,6%
28 días	20 horas o 3,0%
90 días	2 días o 2,2%

Tabla 35. Tolerancia del tiempo admisible para el ensayo de especímenes

El ensayo de probetas se realiza en dos etapas: en primer lugar se realiza el peso y la medición de las mismas con el fin de obtener su densidad y por último se realiza la prueba a compresión. Estas etapas tienen las siguientes consideraciones.

Peso y Medición

- Se realiza un mínimo de dos mediciones del diámetro y la altura de cada espécimen, con el objetivo de obtener un valor promedio.
- El peso de cada espécimen se realiza cuando el mismo no posea exceso de agua, la cual puede alterar la medición.



Figura 12. Probetas a ser pesadas y medidas antes del ensayo a compresión

Resistencia a la compresión

- La máquina de prueba a la compresión, así como el protocolo de ensayo, deben cumplir con los requisitos establecidos por la norma INEN 1 573.



- Los especímenes serán probados aleatoriamente, con el fin de evitar errores por medición.
- Si la máquina no posee las facilidades necesarias para evitar el capeo, se debe realizarlo según lo establecido en la norma ASTM C 617.
- La medición del diámetro de los cilindros obtenida en la etapa de peso y medición, se utilizó también para obtener la superficie de aplicación de carga en el ensayo a compresión.

La resistencia a compresión se calculó a través de la siguiente expresión:

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Carga (kgf)}}{\text{Superficie de aplicación de carga (cm}^2\text{)}} \quad (3.5.1)$$



Figura 13. Ensayo a compresión



CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de los ensayos realizados en el hormigón endurecido de peso normal (control) y los hormigones con distintos porcentajes de perlas de EPS. Se obtuvieron así las densidades y resistencias a compresión de dichos hormigones para las edades de 7, 14 y 28 días. Pero se debe reiterar que el presente estudio se enfoca con mayor interés en los resultados obtenidos a los 28 días de edad.

4.1. Densidad

La Tabla 36 muestra un resumen de las densidades promedio obtenidas para el hormigón control (0%) y para cada porcentaje de sustitución de arena por EPS. Cada valor de la tabla corresponde al promedio de los valores individuales de cada probeta ensayada, la información con los valores individuales se encuentran en la Tabla 40, 41 y 42, Anexo 2.

A la edad de 28 días, para los porcentajes de sustitución de 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100% se observaron respectivamente disminuciones del 3,43%, 6,68%, 8,60%, 9,81%, 13,97% y 16,90% del valor de la densidad del hormigón de peso normal (control). Llegándose a obtener a los 28 días una densidad promedio mínima de 1836 kg/m³ para el 100% de sustitución.

Con estos resultados se puede determinar que el mayor gradiente de reducción en la densidad se da entre el porcentaje de sustitución del 75 y el 90%, lo cual puede atribuirse a que superado el 60% de sustitución el volumen de arena es menor al volumen de EPS, por lo que la influencia de su peso en la densidad del hormigón en comparación con la influencia del peso del EPS, es menor. La densidad promedio a los 28 días en este punto es de aproximadamente 2000 kg/m³.

Días	Porcentaje de Sustitución						
	0	30	45	60	75	90	100
7	2151	2070	1975	1948	1873	1850	1790
14	2175	2100	2047	1982	1907	1878	1806
28	2209	2134	2062	2019	1993	1901	1836

Tabla 36. Densidades del hormigón en kg/m³, según la edad, para cada porcentaje de sustitución

En la Figura 14 se puede apreciar en forma más clara la relación entre el porcentaje de sustitución de arena por EPS y la densidad del hormigón endurecido, a diferentes edades. Se observa que la densidad disminuye conforme el porcentaje de sustitución aumenta para cada una de las edades, lo cual concuerda con los datos obtenidos por estudios semejantes (Liu & Chen, 2014) (Hidayat & Siauwantara, 2014). Además, se observa que conforme la edad del hormigón aumenta lo hace también su densidad, lo cual puede atribuirse a

que a un mayor contacto del cemento con el agua, el proceso de su hidratación aumenta, generando una mayor cantidad de pasta dentro del hormigón.

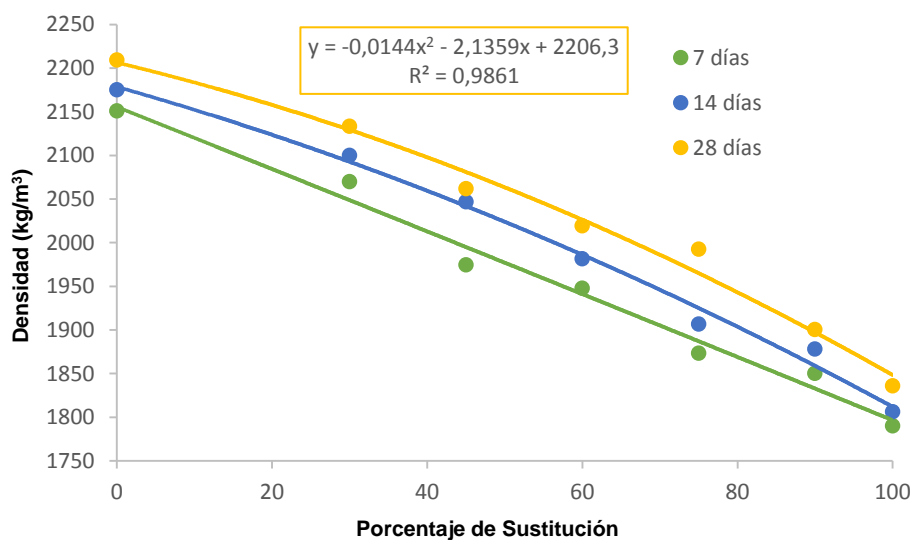


Figura 14. Variación de la densidad del hormigón con los porcentajes de sustitución a diferentes edades

Se puede observar también que las curvas para las tres edades muestran una cierta tendencia, por lo que se realizó un ajuste a una curva polinómica con los datos obtenidos a los 28 días de edad, con el fin de conocer el grado de correlación entre la densidad y el porcentaje de sustitución. El grado de correlación (R) fue de 0,9930, lo cual sugiere una alta relación directa entre el porcentaje de sustitución y la densidad alcanzada.

4.2. Resistencia

La Tabla 37 muestra un resumen de las resistencias a compresión promedio obtenidas tanto para el hormigón control (0%) como para los hormigones obtenidos con cada porcentaje de sustitución de arena por EPS. Cada valor de la tabla corresponde al promedio de los valores individuales de cada probeta ensayada, la información con los valores individuales se encuentran en la Tablas 43, 44 y 45, Anexo 2. A la edad de 28 días, para los porcentajes de sustitución de 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100% se observaron, respectivamente, disminuciones del 2,84%, 4,28%, 7,52%, 14,73%, 17,58% y 19,08% del valor de la resistencia a compresión del hormigón de peso normal (control). Llegándose a obtener a los 28 días una resistencia promedio mínima de 205 kg/cm² para el 100% de sustitución.

De manera similar que lo ocurrido con la densidad, se puede apreciar que el mayor gradiente de reducción en la resistencia se da a partir del 60% de sustitución, punto a partir del cual la fracción de EPS en el hormigón supera la



fracción de arena. La resistencia a compresión promedio a los 28 días en este punto es de aproximadamente 234 kg/cm².

Días	Porcentaje de Sustitución						
	0	30	45	60	75	90	100
7	161	153	148	142	121	114	107
14	229	220	213	208	193	185	179
28	253	246	243	234	216	209	205

Tabla 37. Resistencia a compresión del hormigón en kg/cm², según la edad, para cada porcentaje de sustitución

En la Figura 15 se aprecia la diferencia de la resistencia a compresión del hormigón endurecido con diferentes porcentajes de sustitución de arena por EPS, a las edades de 7, 14 y 28 días. Se observa que la resistencia a compresión disminuye conforme el porcentaje de sustitución aumenta para cada una de las edades, lo cual concuerda con los datos obtenidos por estudios semejantes (Liu & Chen, 2014) (Hidayat & Siauwantara, 2014) (Thomas Tamut, Rajendra Prabhu, Katta Venkataramana, 2014). Sin embargo, no se pudieron realizar comparaciones más directas pues los porcentajes de sustitución utilizados en esas investigaciones difieren de los usados en el presente trabajo, además de utilizar materiales con características diferentes y no realizar de manera idéntica el método de elaboración del hormigón, lo cual puede provocar diferencias en los resultados encontrados.

De la figura se observa también que conforme la edad del hormigón aumenta lo hace también su resistencia a la compresión, este es un comportamiento característico del hormigón ya conocido, por cual no se tratará de justificar.

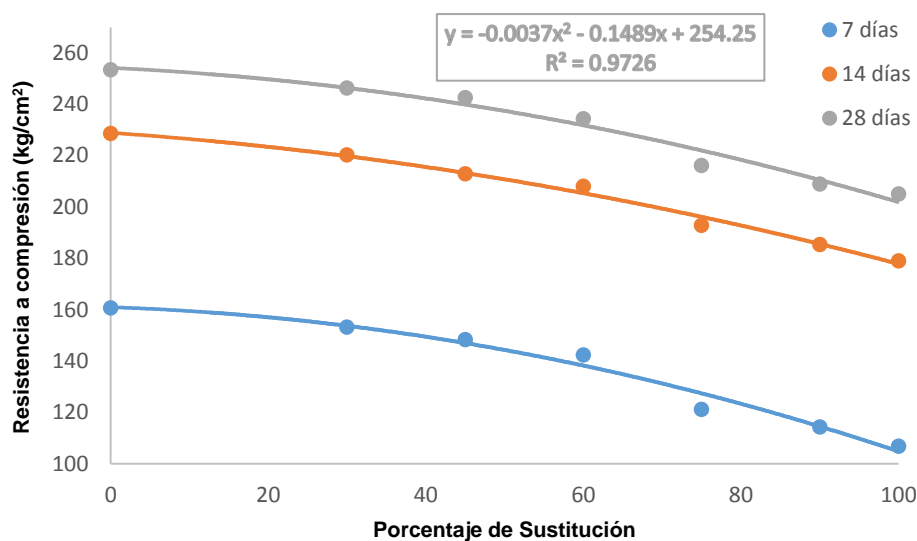


Figura 15. Variación de la resistencia a compresión del hormigón con los porcentajes de sustitución a diferentes edades

Las curvas para las tres edades muestran una cierta tendencia, por lo que de manera similar a lo realizado con la densidad, se ajustaron los puntos mediante una curva polinómica con los datos obtenidos a los 28 días de edad, con el fin de conocer el grado de correlación entre la resistencia a compresión y el porcentaje de sustitución. El grado de correlación (R) fue de 0,9862, lo cual sugiere una alta relación directa entre el porcentaje de sustitución y la resistencia a compresión alcanzada.

En la Figura 16 se observan las curvas resistencia a compresión-edad del hormigón para los diferentes porcentajes de sustitución. En la figura se observa que las curvas tienden a formar dos grupos: el primero muestra los valores más altos de resistencia y llega a un porcentaje de sustitución del 60%, a partir de este punto se produce una caída significativa en la resistencia, creándose a partir de este punto el grupo con las resistencias más bajas.

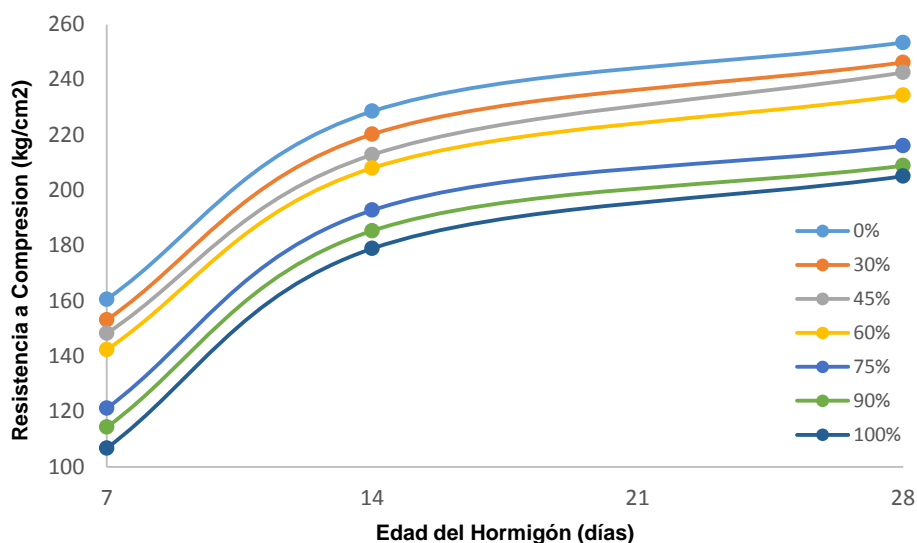


Figura 16. Curva resistencia - edad del hormigón, para diferentes porcentajes de sustitución

Con el fin de relacionar los resultados de densidad y resistencia del hormigón endurecido, se ilustra en la Figura 17 la variación de la resistencia a compresión en función de la densidad, este gráfico confirma lo descrito ya en los resultados de densidad y resistencia, pues muestra que alrededor del 60% de sustitución se da una reducción significativa en los valores de densidad y resistencia. De hecho la parte superior de la curva, la cual ilustra el cambio de resistencia en un rango de densidades de 2200 a 2050 kg/m³, muestra un comportamiento bastante similar al obtenido por (Hidayat & Siauwantara, 2014) en el mismo rango de densidades.

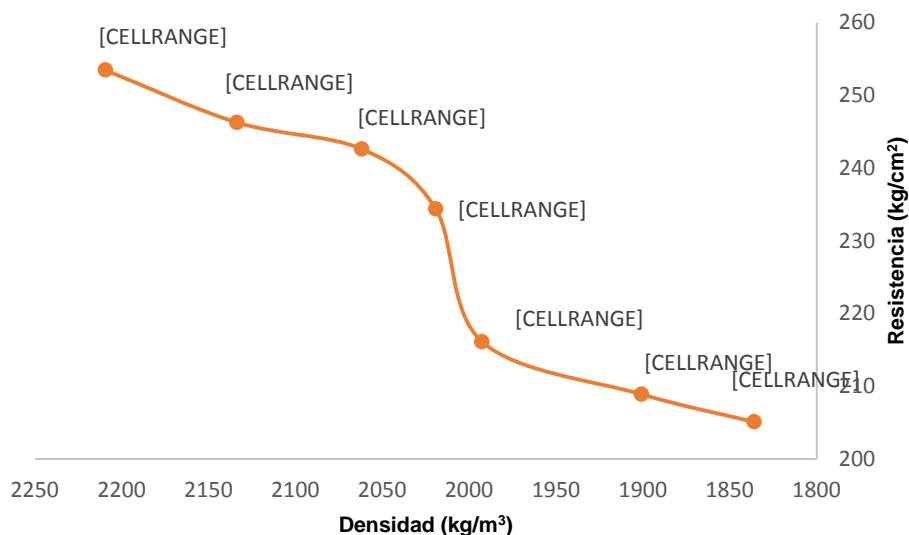


Figura 17. Variación de la resistencia a compresión del hormigón con la densidad, a los 28 días

4.3. Prueba de Hipótesis

La resistencia a compresión en probetas de hormigón es una variable que puede estar sujeta a alteraciones que no son resultado directo del cambio de la variable de interés en la investigación, en este caso el porcentaje de sustitución de arena por EPS. En el caso de la resistencia a compresión en el hormigón, estas alteraciones pueden ser producto de factores como: la compactación, el transporte y manipulación de probetas, calidad de moldes para la toma de muestras e incluso la habilidad del operador para llevar a cabo el ensayo a compresión. Al error que puede provocar en los resultados este conjunto de factores se le conoce como error experimental.

Para determinar si las variaciones observadas en la resistencia a compresión para los distintos tratamientos se deben a la variación en los porcentajes de sustitución de arena por EPS y no a errores experimentales es necesario llevar a cabo una prueba de hipótesis. El planteamiento de la prueba de hipótesis depende del diseño experimental, ya que en el mismo se definió el tipo de experimentación a llevar a cabo, en este caso se estableció un experimento de comparación. Dicho experimento de comparación posee dos etapas: la primera busca probar que al menos dos de las medias (resistencias promedio) de cualquier par de tratamientos no son iguales, mediante la prueba ANNOVA; comprobado que existe diferencias entre los tratamientos, se realiza la comparación de cada uno con el control, con el fin de establecer que tratamientos presentan diferencias significativas, en el valor promedio de la resistencia, para lo cual se utiliza la prueba Dunnett.



Para los resultados de peso (densidad) no se consideró necesario este análisis pues a diferencia de la resistencia a la compresión, la obtención del peso (densidad) no está sujeto a factores que produzcan errores aleatorios altos.

ANNOVA: Se plantea las siguientes hipótesis nula y alternativa para la prueba.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

H_1 : Al menos dos de las medias no son iguales

Dónde:

a = número de tratamientos, incluyendo el control

La prueba se realiza con un nivel de significación de prueba $\alpha = 0,05$. Entonces se rechaza la hipótesis nula si se obtiene un valor P menor a α . Para llevar a cabo la prueba se utilizó el software R, el cual permite cargar los resultados y así evitar el cálculo manual.

```
1
2 a = c(253.72, 253.82, 252.05, 254.31)
3 b = c(246.32, 245.25, 244.49, 249.09)
4 c = c(245.81, 239.88, 244.75, 240.09)
5 d = c(236.52, 234.03, 233.70, 233.40)
6 e = c(216.65, 217.75, 212.23, 217.96)
7 f = c(209.47, 208.53, 207.64, 210.02)
8 g = c(208.78, 205.21, 203.53, 202.95)
9
10 dati = c(a, b, c, d, e, f, g)
11
12 groups = factor(rep(letters[1:7], each = 4))
13 fit = lm(formula = dati ~ groups)
14 anova (fit)
```

```
> f = c(209.47, 208.53, 207.64, 210.02)
> g = c(208.78, 205.21, 203.53, 202.95)
> dati = c(a, b, c, d, e, f, g)
> groups = factor(rep(letters[1:7], each = 4))
> fit = lm(formula = dati ~ groups)
> anova (fit)
Analysis of Variance Table

Response: dati
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
groups  6 8998.9 1499.81   330.82 < 2.2e-16 ***
Residuals 21    95.2     4.53
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
```

Figura 18. Prueba ANNOVA realizada con el software estadístico R



La Figura 18 muestra los datos de la prueba en el cuadro superior, donde se ingresaron los resultados de la resistencia a compresión a la edad de 28 días para cada uno de los siete tratamientos, incluyendo el control. El cuadro inferior muestra el resultado de la prueba ANNOVA, incluyendo el valor P, denominado por el software como Pr. Un resumen de estos resultados se presenta en la Tabla 38.

Origen de las Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de los Cuadrados	F	Probabilidad (P)	Valor Crítico para F
Entre grupos	8998,9	6	1499,81	330,82	2,2E-16	2,57
Dentro de los grupos	95,2	21	4,53			
Total	9094,1	27				

Tabla 38. Resumen de resultados de la prueba ANNOVA

Decisión: Se decide rechazar la hipótesis nula (H_0) puesto que la probabilidad (P) obtenida es 2,2E-16, que es menor que el valor establecido de 0,05. Se concluye entonces que al menos dos de los siete hormigones obtenidos si presentan diferencias en su resistencia a la compresión, y que esta diferencia es causada por los porcentajes de sustitución de arena por EPS.

DUNNETT: Dunnett busca diferencias significativas entre la media de cada tratamiento y la media del control. Para esto se prueban $a - 1$ (número de tratamientos sin incluir el control) hipótesis.

$$H_0: \mu_0 = \mu_i$$

$$H_1: \mu_0 \neq \mu_i \quad i = 1, 2, \dots, a - 1$$

Dónde:

a = número de tratamientos, incluyendo el control

Para probar la hipótesis nula (H_0) en un experimento con a ($a=7$) tratamientos y n ($n=4$) observaciones se calculan los valores:

$$d_i = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_0}{\sqrt{2S^2/n}} \quad i = 1, 2, \dots, a - 1 \quad (4.3.1)$$

Dónde:

\bar{y}_i = media de cada tratamiento

\bar{y}_0 = media del control

S^2 = varianza muestral, se obtiene a partir del cuadrado medio del error

$$s^2 = \frac{SCE}{a(n - 1)} \quad (4.3.2)$$



Dónde:

$a(n - 1) = \text{grados de libertad}$

$SCE = \text{suma de los cuadrados del error}$

$$SCE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (4.3.3)$$

Dónde:

$y_{ij} = \text{resultado de una probeta}$

$\bar{y}_i = \text{media de cada tratamiento (porcentaje de sustitución)}$

Entonces la hipótesis nula se rechaza si:

$$|d_i| > d_\alpha(a - 1, v)$$

Dónde:

$v = \text{número de grados de libertad para el cuadrado medio del error } a(n - 1)$

El valor de $d_\alpha(a - 1, v)$ para una prueba Dunnett de una cola para $\alpha = 0,05$, con $a - 1 = 6$ y $v = 21$ grados es 2,45 (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012).

	0%	30%	45%	60%	75%	90%	100%
Resistencia a compresión (kg/cm²)	253,72	246,32	245,81	236,52	216,65	209,47	208,78
	253,82	245,25	239,88	234,03	217,75	208,53	205,21
	252,05	244,49	244,75	233,70	212,23	207,64	203,53
	254,31	249,09	240,09	233,40	217,96	210,02	202,95
Σ (kg/cm ²):	1013,90	985,15	970,54	937,64	864,59	835,66	820,47
Media (kg/cm ²):	253,47	246,29	242,63	234,41	216,15	208,92	205,12

Tabla 39. Resultados de la resistencia a compresión a los 28 días de edad

La Tabla 39 muestra los resultados individuales, y la media, de la resistencia a compresión a los 28 días de los hormigones obtenidos con los diferentes tratamientos. Con estos resultados se ha obtenido el valor $|d_i|$ para cada tratamiento.

$$\begin{aligned} |d_{30\%}| &= 4,77 & |d_{75\%}| &= 24,79 \\ |d_{45\%}| &= 7,20 & |d_{90\%}| &= 29,60 \\ |d_{60\%}| &= 12,66 & |d_{100\%}| &= 32,11 \end{aligned}$$

Todos los valores obtenidos son mayores a $d_{0,05}(6,21) = 2,45$, lo que permite rechazar la hipótesis nula y concluir que, en efecto, todas las resistencias medias de los 6 porcentajes de sustitución son significativamente diferentes de la resistencia media del control debido a los porcentajes de sustitución y no a errores aleatorios.

Sin embargo hay un aspecto que se debe tomar en cuenta, el tamaño de la muestra obtenido en el diseño experimental permite la identificación de diferencias entre medias de máximo 20 kg/cm^2 , con una confiabilidad $\alpha = 0,05$. Para diferencias mayores el grado de confiabilidad disminuye, lo que sucedería a partir del 75% de sustitución, donde se observan diferencias entre medias mayores a los 20 kg/cm^2 .

Al incorporar el aditivo en la masa del hormigón, este demostró cumplir la función para la cual fue elaborado, es decir evitó la segregación de la mezcla y la masa resultó homogénea, tal como se muestra a continuación:



Figura 19. Distribución de las perlas de EPS en el hormigón fresco



Figura 20. Distribución de las perlas de EPS en el hormigón endurecido

Según (Lakatos & Kalmár, 2013) los hormigones ligeros son más porosos que los hormigones de peso normal, sin embargo de las figuras 21 y 22, por simple observación, no se puede encontrar una diferencia significativa en la porosidad de estos hormigones, esto es debido a que el aligeramiento del hormigón con EPS no es considerable. La densidad del hormigón normal a los 28 días de edad



fue de 2209 kg/m^3 y la del hormigón con EPS 2019 kg/m^3 , lo cual implica una reducción de tan solo 190 kg/m^3 .



Figura 21. Porosidad de hormigones de peso normal



Figura 22. Porosidad de hormigones con 60% de sustitución de arena por EPS



CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Resumen de Resultados

- a) En cuanto a la densidad, la máxima reducción obtenida se da al 100% de sustitución, lográndose así una disminución a los 28 días de edad de aproximadamente el 17% de la densidad del hormigón de peso normal. Este resultado concuerda con lo esperado, pues la arena representa cerca del 25% de la densidad del hormigón de peso normal, obteniéndose así una densidad promedio de 1840 kg/m^3 . Se observó un rango crítico alrededor del 75% al 90% de sustitución, donde la caída en el valor de la densidad se incrementó significativamente, lo cual puede ser deberse a que superado el 60% de sustitución, el volumen de EPS se vuelve mayor al volumen de arena en el hormigón.
- b) En lo que se refiere a la resistencia, con un 100% de sustitución se obtuvo una resistencia a los 28 días de 205 kg/cm^2 , lo que significa una reducción de aproximadamente el 19% con respecto al hormigón de peso normal. El punto crítico de la resistencia se dio entre el 60% al 75% de sustitución, donde la caída en el valor de la resistencia se incrementó significativamente, lo cual puede ser deberse a que superado el 60% de sustitución, el volumen de EPS se vuelve mayor al volumen de arena en el hormigón.

5.2. Comentarios

- a) De acuerdo con (ACI Committee 318, 2008), un hormigón ligero estructural es aquel que posee una densidad menor a 1842 kg/m^3 y una resistencia mayor a 172 kg/cm^2 , sin embargo el hormigón con un reemplazo del 60% tiene una densidad de 2019 kg/m^3 y 253 kg/cm^2 , por lo que no sería considerado según el ACI como un hormigón ligero estructural, ya que cumple con la condición de la resistencia pero no con la de la densidad. Sin embargo, el hormigón con el 100% de sustitución tuvo una densidad de 1840 kg/m^3 y una resistencia a compresión de 205 kg/cm^2 , por lo que de acuerdo con (ACI Committee 318, 2008) cumple los requerimientos para ser considerado hormigón ligero estructural, ya que la resistencia es mayor a 172 kg/cm^2 y la densidad es menor a 1842 kg/cm^3 , sin embargo el grado de confiabilidad es menor comparado con los resultados obtenidos hasta el 60% de reemplazo de arena por EPS.
- b) Por otro lado, según la UNI 7548, un hormigón ligero estructural es aquel que posee una densidad entre 1200 y 2000 kg/m^3 y una resistencia entre los 150 y 250 kg/cm^2 , por lo que bajo estos criterios el hormigón resultante se puede considerar como hormigón ligero estructural.



- c) Además, según (Neville, 1977) (Pecce et al., 2013), si un hormigón presenta una densidad menor que la densidad del hormigón de peso normal, es razón suficiente para ser considerado como hormigón ligero, por lo que el hormigón con el 60% de reemplazo al tener una disminución del 8,60% en la densidad, con respecto a la densidad del hormigón de peso normal, este puede ser considerado como hormigón ligero.
- d) Estudios similares (Hidayat & Siauwantara, 2014) (Chen & Liu, 2004) (Thomas Tamut, Rajendra Prabhu, Katta Venkataramana, 2014) (Bossio et al., 2014), en donde se realizaron sustituciones de árido fino y/o grueso, obtuvieron valores menores de densidad ($700 - 1600 \text{ kg/m}^3$), que los alcanzados en este estudio, sin embargo se debe considerar que las resistencias a compresión fueron significativamente menores ($70 - 150 \text{ kg/cm}^2$) a las obtenidas en el presente trabajo, lo cual puede atribuirse a que la sustitución no solo se realizó del árido fino sino también del grueso, y a problemas de segregación mencionados.

5.3. Conclusiones

- a) La sustitución de árido fino (arena) por perlas de EPS en la masa del hormigón reduce de manera directa su densidad a cualquier edad, lo que confirma los resultados esperados, por ser la densidad de la arena significativamente mayor a la densidad del EPS.
- b) Se confirma el hecho de que mientras aumenta el porcentaje de sustitución de arena por EPS en el hormigón, la resistencia a compresión disminuye con respecto al hormigón de peso normal.
- c) Todos los hormigones obtenidos en esta investigación presentan valores de resistencia a compresión aptos para su uso como hormigón estructural, ya que el mínimo valor obtenido en la resistencia es de 205 kg/cm^2 , sin embargo los hormigones que superan el 60% de sustitución de arena por EPS presentan un grado de confiabilidad menor al 95% establecido en el diseño experimental.
- d) Los hormigones aligerados con EPS son 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 de hormigón estructural en construcciones a pequeña escala como viviendas de hasta dos niveles sin grandes luces, o proyectos de vivienda social.



5.4. Recomendaciones

- a) Se recomienda identificar los cambios que experimentaría el hormigón no solo al sustituir la arena por el EPS sino también la grava, incluso se pueden utilizar perlas con otras densidades y granulometrías.
- b) Se pueden ensayar hormigones con tamaños mayores de árido grueso para identificar la posible variabilidad en la resistencia y el peso de los mismos.
- c) Con el fin de identificar la factibilidad del uso de estos hormigones en la industria de la construcción, se puede llevar a cabo un análisis económico.



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>
- 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.
- Alexandre, J., de Azevedo, A. R. G., de Assis Paula e Silva, C. L., Vieira, C. M. F., Candido, V. S., & Monteiro, S. N. (2014). Technical Feasibility of Using Lightweight Concrete with Expanded Polystyrene in Civil Construction. *Materials Science Forum*, 798-799, 347–352.
- Al-Jabri, K. S., Hago, A. W., Al-Nuaimi, A. S., & Al-Saidy, A. H. (2005). Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1472–1479.
- ANAPE. (2015). Asociación Nacional de Poliestireno Expandido. Retrieved September 30, 2015, from <http://www.anape.es/>
- Andrews, E. W., Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). The creep of cellular solids. *Acta Materialia*, 47(10), 2853–2863.
- Baculima Bernal, R. (1985). *Tecnología de la espuma de poliestireno expandido y aplicaciones*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec>
- Barnetson, A. (2004). Handbook of Polymer Foams. In S. Rapra (Ed.), *Handbook of Polymer Foams* (Primera Ed, pp. 37–54). Shrewsbury, GBR: Smithers Rapra. Retrieved from <http://www.ebrary.com>
- Bossio, A., Acierno, S., Pecce, M., & Bellucci, F. (2014). Durability of lightweight concretes containing expanded polystyrene.
- Cárdenas, R. (1993). *Alternativas de hormigones alivianados con cascote de ladrillo, desperdicio de teja y cerámicos*. Universidad de Cuenca.
- 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, J. (2004). Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1259–1263. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com>
- Chen, B., & Liu, N. (2013). A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 44, 691–698.
- Cofre Alvarado, A. E. (2003). *Bovedillas de EPS (Poliestireno Expandido): Una Alternativa para la Construcción de Losas Prefabricadas*. Universidad Austral de Chile.
- Cook, D. J. (1972). *Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete*. School of Civil Engineering, University of New South Wales.
- Engelsmann, S., Spalding, V., & Peters, S. (2012). *Plastics: In Architecture and Construction*. Basel, CHE: Birkhaeuser.
- Haghi, A. K., Arabani, M., & Ahmadi, H. (2006). Applications of expanded polystyrene (EPS) beads and polyamide-66 in civil engineering, Part One: Lightweight polymeric concrete. *Composite Interfaces*, 13(4-6), 441–450. Retrieved from <http://www.tandfonline.com>
- Hidayat, I., & Siauwantara, A. (2014). The Value Compressive Strength and Split Tensile Strength on Concrete Mixture With Expanded Polystyrene Coated by Surfactant Span 80 as a Partial Substitution of Fine Aggregate. *EPJ Web of Conferences*, 68, 00031.
- Hohwiller, F., & Köhling, K. (1969). Hormigón ligero de Styropor. *Materiales de construcción*. Instituto Eduardo Torroja.
- Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005). Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*, 57(1), 21–31.
- 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>
- Kekanović, M., Kukaras, D., Čeh, A., & Karaman, G. (2014). Lightweight concrete with recycled ground expanded polystyrene aggregate. *Tehnički vjesnik*, 21(2), 309–309–315–315.
- Lai, K. L., Ravindrarajah, R. S., Pasalich, W., & Hall, B. (1996). Deformation Behaviour of Reinforced Polystyrene Concrete Beam. In *Proceedings of second international conference on advances in composites, Bangalore, India* (pp. 18–20).
- Lakatos, Á., & Kalmár, F. (2013). Investigation of thickness and density dependence of thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials. *Materials and Structures*, 46(7), 1101–1105.



- 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>
- Liu, N., & Chen, B. (2014). Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 227–232. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com>
- Lynwood, C. (2014). *Polystyrene: Synthesis, Characteristics and Applications*. Nova Science Publishers, Inc.
- Manobanda, I., & Iván, D. (2009). Hormigón liviano con agregado de origen volcánico y aditivo incorporador de aire. *Escuela Superior Politécnica Del Litoral (ESPOL)*.
- Miled, K., Le Roy, R., Sab, K., & Boulay, C. (2004). Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode. *Mechanics of Materials*, 36(11), 1031–1046. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com>
- Miled, K., Sab, K., & Le Roy, R. (2007). Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. *Mechanics of Materials*, 39(3), 222–240. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com>
- Mills, N. (2007). *Polymer Foams Handbook : Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*. Burlington, MA, USA: Butterworth-Heinemann.
- 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.
- Newman, J., & Choo, B. S. (2003). *Advanced concrete technology*. Butterworth-Heinemann.
- Ossa López, A. (2009). *Comportamiento Mecánico del Poliestireno Expandido (EPS) bajo carga de Compresión*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Pecce, M., Ceroni, F., Bibbò, F. A., & Acierno, S. (2013). Steel–concrete bond behaviour of lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS). *Materials and Structures*, 48(1-2), 139–152. Retrieved from <http://link.springer.com>



- Poliones S.A de C.V. (2013). Polioles. Retrieved September 30, 2015, from <http://www.polioles.com.mx>
- Procopor LTDA. (2015). Proicopor. Retrieved September 30, 2015, from <http://www.proicopor.com/>
- Ranjbar, M. M., & Mousavi, S. Y. (2013). Strength and durability assessment of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Materials and Structures*, 48(4), 1001–1011. Retrieved from <http://link.springer.com>
- Rougeron, C. (1977). *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Barcelona, España: Reverte.
- Sahin, S., & Karaman, S. (2012). The Properties of Expanded Polystyrene-Pumice-Gypsum Blocks as a Building Material. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 9(1), 51–56.
- Short, A., & Kinniburgh, W. (1963). *Lightweight concrete*. CR books.
- Sosa Mena, I. B. (2012). *Estudio de diferentes aplicaciones del Poliéstireno Expandido en la construcción en Cuba*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE).
- Subhan, T. F. L. (n.d.). Lightweight High Strength Concrete with Expanded Polystyrene Beads. *MEKTEK*. Retrieved from <http://jurnal.untad.ac.id>
- Sussman, V. (1975). Lightweight plastic aggregate concrete. *ACI Journal*, 72, 321–323.
- Sussman, V., & Baumann, G. H. (1972). Expanded Polystyrene Beads Lighten Load. *SPE Journal*, 28(3), 18.
- Thomas Tamut, Rajendra Prabhu, Katta Venkataramana, S. C. Y. (2014). Partial Replacement of Coarse Aggregates by Expanded Polystyrene Beads in Concrete. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 03(02), 238–241. Retrieved from <http://esatjournals.org>
- Trussoni, M., Hays, C. D., & Zollo, R. F. (2012). Comparing Lightweight Polystyrene Concrete Using Engineered or Waste Materials. *Materials Journal*, 109(1), 101–108. Retrieved from <https://www.concrete.org>
- Valdez Guzmán, L. F., Suárez Alcívar, G. E., & Proaño Cadena, G. (2010). Hormigones livianos.
- Vélez Guayasamín, A. S. (2013). *Hormigones con escoria de acero de horno eléctrico: prestaciones mecánicas, físicas y químicas*. Universidad de Cuenca.



Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (11^{va} edición). México: Pearson Educación.

Wu, Z., Chen, B., & Liu, N. (2013). Fabrication and compressive properties of expanded polystyrene foamed concrete: Experimental research and modeling. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18(1), 61–69. Retrieved from <http://www.springer.com>

Zhang, M.-H., & Gjorv, O. E. (1991). Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, 88(5), 463–469.



ANEXOS

Anexo 1: Hoja Técnica Sikament N-100

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Sikament-N 100 es un aditivo líquido, color café, compuesto por resinas sintéticas. Superplastificante, reductor de agua de alto poder y economizador de cemento. No contiene cloruros. Sikament-N 100 está diseñado para cumplir la norma ASTM C-494, ASTM C-1017 y NTC 1299 como aditivo tipo A y F. Densidad: 1,22 kg/l aprox.

USOS

Sikament-N 100 tiene tres usos básicos

Como superplastificante: Adicionándolo a una mezcla de consistencia normal se consigue fluidificar el concreto o mortero facilitando su colocación y su bombeabilidad en elementos esbeltos densamente armados y en la construcción de estructuras civiles prefabricadas. Permite recuperar el asentamiento del concreto premezclado sin alterar sus tiempos de fraguado ante demoras en la colocación del mismo.

Como reductor de agua de alto poder: Adicionándolo disuelto en la última porción del agua de amasado permite reducir, de acuerdo con la dosis usada, hasta un 30% del agua de la mezcla, consiguiéndose la misma manejabilidad inicial y obteniéndose un incremento considerable de las resistencias a todas las edades. Sikament-N 100 es ideal para la elaboración de prefabricados y concretos de altas resistencias finales. Mediante su uso la impermeabilidad y durabilidad del concreto o mortero se ven incrementadas notablemente.

Como economizador de cemento: Se puede aprovechar la reducción del agua lograda, para disminuir el contenido de cemento y hacer más económico el diseño de las mezclas especialmente aquellas de consistencia fluida como bombeables, tremie y contech. El Sikament-N 100 puede ser usado como superplastificante en concretos elaborados con adiciones de microsilica.

VENTAJAS

Beneficios de Sikament-N 100 en el concreto fresco como en endurecido.

Como superplastificante:

- Mejora considerablemente la trabajabilidad de la mezcla.
- Facilita el bombeo y colocación del concreto a mayores alturas y a distancias más largas.
- Disminuye el riesgo de hormigueros en el concreto de estructuras densamente armadas y esbeltas.
- Mejora considerablemente el acabado del concreto y reproduce la textura de la formaleta.
- Se puede emplear para recuperar el asentamiento premezclado ya que no retarda el fraguado del mismo en climas medios y fríos
- Evita la segregación y disminuye la exudación del concreto fluido.
- Disminuye los tiempos de vibrado del concreto.
- Puede redosificarse hasta completar una dosis del 2% del peso del cemento sin alterar la calidad.

Como reductor de agua de alto poder:

- Aumenta la resistencia inicial del concreto.
- Incrementa la resistencia final del concreto en un 40% aprox. a los 28 días.
- Reduce considerablemente la permeabilidad del concreto, aumentando su durabilidad.
- Densifica el concreto y mejora su adherencia al acero de refuerzo.
- Reduce en alto grado la exudación y la retracción plástica.
- Gran economía en los diseños por la reducción de cemento alcanzable.

MODO DE EMPLEO

APLICACIÓN

Como superplastificante:

Adicionar Sikament-N 100 a la mezcla ya preparada, inmediatamente antes de la colocación o bombeo del concreto. Mezclar el concreto con Sikament N-100 durante 4 minutos. La elaboración de concreto bombeable demanda una granulometría continua y un adecuado contenido de finos en la mezcla. La mezcla debe tener entre 5 y 7 cm de asentamiento antes de aplicar Sikament-N 100 para lograr el mejor efecto fluidificante y minimizar la dosis

**Como reductor de agua de alto poder:**

Adicionar la dosis escogida de Sikament-N 100 en la última porción del agua de amasado de la mezcla. Reducir agua y trabajar justo con la manejabilidad requerida. Al reducir agua la mezcla pierde manejabilidad muy rápido. Colóquela y víbrela inmediatamente. Puede usarse combinándolo con la dosis adecuada de un plastificante retardante del tipo Plastiment con el fin de atenuar este fenómeno.

DOSIFICACIÓN

Como superplastificante: 0,5 al 1,0% del peso del cemento.

Como reductor de agua de alto poder: 1,0 al 2,0% del peso del cemento.

La dosis óptima debe determinarse mediante ensayos preliminares.

PRECAUCIONES

La elaboración de concreto o mortero fluido exige una buena distribución granulométrica. Se debe garantizar un suficiente contenido de finos para evitar la segregación del material fluido. En caso de deficiencia de finos, dosificar Sika-Aer D para incorporar del 3% al 4% de aire en la mezcla.

El uso de concreto fluido demanda un especial cuidado en el sellado de las formaletas para evitar la pérdida de pasta.

La dosis óptima se debe determinar mediante ensayos con los materiales y en las condiciones de la obra. Al adicionar Sikament-N 100 para superfluidificar una mezcla con asentamiento menor de 5 cm. Se incrementan los requerimientos del aditivo.

Cuando se emplea para recuperar la bombeabilidad de una mezcla perdida por demoras en la colocación y se desea plasticidad por más de 1 hora adicional, agregue un plastificante retardante y luego Sikament-N 100 o Sikament-R 100. Los mejores resultados se obtienen cuando los componentes que intervienen en la preparación del concreto cumplen con las normas vigentes. Dosificar por separado cuando se usen otros aditivos en la misma mezcla; si se emplea un plastificante retardante adicionarlo previamente al Sikament- N 100. El curado del concreto con agua y/o Antisol antes y después del fraguado es indispensable.

MEDIDAS DE SEGURIDAD

Manténgase fuera del alcance de los niños. Usar guantes de caucho y gafas de protección en su manipulación. Consultar Hoja de Seguridad del producto.

PRESENTACIÓN

Plástico: 10 kg.

Tambor: 230 kg.

IBC y al granel.

ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

24 meses en sitio fresco y bajo techo, en su envase original, bien cerrado.

Para su transporte deben tomarse las precauciones normales de productos químicos.

CÓDIGOS R/S

R: 22/25

S: 26

NOTA LEGAL

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y uso final de los productos Sika son proporcionados de buena fe, basados en el conocimiento y experiencia actuales de Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados y manipulados, así como aplicados en condiciones normales de acuerdo a las recomendaciones Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra son tan particulares que de esta información, cualquier recomendación escrita o cualquier otro consejo no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad en particular, así como ninguna responsabilidad que surja de cualquier relación legal. El usuario del producto debe probar la conveniencia del mismo para un determinado propósito. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Se debe respetar los derechos de propiedad de terceros. Todas las órdenes de compra son aceptadas de acuerdo con nuestras actuales condiciones de venta y despacho. Los usuarios deben referirse siempre a la edición más reciente de la Hoja Técnica local, cuyas copias serán facilitadas a solicitud del cliente.

CONSTRUYENDO CONFIANZA

**Anexo 2: Densidades y Resistencias Obtenidas**

Código	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
A7-1	15,15	30,50	11771	2134	
	15,20	30,50			
A7-2	15,20	30,30	11798	2164	2151
	15,10	30,20			
A7-3	15,20	30,40	11905	2155	
	15,22	30,40			
B7-1	15,20	30,70	11528	2080	
	15,20	30,40			
B7-2	15,10	30,40	11034	2054	2070
	15,00	30,00			
B7-3	15,20	30,50	11529	2076	
	15,25	30,50			
C7-1	15,10	30,00	10973	1989	
	15,50	30,00			
C7-2	15,40	30,50	10949	1959	1975
	15,20	30,30			
C7-3	15,10	30,20	10631	1976	
	15,00	30,30			
D7-1	15,10	30,40	10514	1906	
	15,30	30,40			
D7-2	15,00	30,30	10558	1959	1948
	15,20	29,90			
D7-3	15,00	30,30	10437	1979	
	14,80	30,20			
E7-1	15,20	30,80	10313	1845	
	15,20	30,80			
E7-2	14,90	30,30	10233	1921	1873
	15,00	30,40			
E7-3	15,20	30,50	10345	1854	
	15,30	30,60			
F7-1	15,10	30,50	10265	1852	
	15,30	30,60			
F7-2	15,00	30,60	10200	1849	1850
	15,25	30,80			
F7-3	15,20	30,70	10185	1850	
	15,00	30,80			
G7-1	15,30	30,60	10003	1775	
	15,30	30,70			
G7-2	15,00	30,20	9614	1811	1790
	14,90	30,30			
G7-3	15,10	30,60	9844	1785	
	15,20	30,60			

Tabla 40. Densidad del hormigón a los 7 días



Código	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
A14-1	15,10	30,30	11811	2159	2175
	15,20	30,40			
A14-2	15,10	30,30	11895	2189	
	15,10	30,40			
A14-3	15,10	30,20	11838	2178	
	15,20	30,10			
B14-1	14,95	30,60	11412	2114	2100
	15,05	30,50			
B14-2	14,95	30,50	11402	2112	
	15,05	30,60			
B14-3	15,10	30,50	11384	2074	
	15,15	30,60			
C14-1	15,15	31,00	11481	2041	2047
	15,25	31,00			
C14-2	15,50	30,80	11436	2043	
	15,00	30,50			
C14-3	15,20	30,70	11442	2057	
	15,20	30,60			
D14-1	15,20	30,50	10870	1958	1982
	15,25	30,50			
D14-2	15,00	30,50	10823	2028	
	14,90	30,30			
D14-3	15,20	30,80	10912	1959	
	15,20	30,60			
E14-1	15,05	30,30	10364	1897	1907
	15,25	30,30			
E14-2	15,00	30,20	10312	1904	
	15,20	30,30			
E14-3	15,10	30,40	10469	1920	
	15,15	30,30			
F14-1	14,90	30,60	10177	1907	1878
	14,90	30,60			
F14-2	14,90	30,50	10036	1887	
	14,90	30,50			
F14-3	15,20	30,50	10184	1840	
	15,20	30,50			
G14-1	15,20	30,50	9984	1804	1806
	15,20	30,50			
G14-2	15,05	30,00	9941	1817	
	15,40	30,10			
G14-3	15,20	30,50	9904	1798	
	15,20	30,20			

Tabla 41. Densidad del hormigón a los 14 días



Código	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	
A28-1	15,20	30,60	12295	2211	2209	
	15,20	30,70				
A28-2	15,20	30,50	12249	2199		
	15,30	30,50				
A28-3	15,20	30,40	12226	2216		
	15,15	30,60				
A28-4	15,20	30,60	12321	2212		
	15,20	30,80				
B28-1	14,90	30,50	11403	2137		2134
	14,95	30,50				
B28-2	15,10	30,60	11662	2118		
	15,20	30,50				
B28-3	15,10	30,00	11589	2150		
	15,10	30,20				
B28-4	14,80	30,50	11251	2130		
	14,90	30,50				
C28-1	15,20	30,50	11464	2065	2062	
	15,20	30,70				
C28-2	15,40	30,50	11336	2065		
	14,90	30,40				
C28-3	15,20	30,50	11418	2070		
	15,10	30,70				
C28-4	15,20	30,50	11350	2047		
	15,20	30,60				
D28-1	15,00	30,60	11031	2023	2019	
	15,10	30,70				
D28-2	15,10	30,70	11098	2009		
	15,20	30,60				
D28-3	15,10	30,60	11050	2020		
	15,10	30,50				
D28-4	15,15	30,40	11156	2026		
	15,20	30,50				
E28-1	15,05	31,00	10812	1987	1993	
	14,90	30,80				
E28-2	14,80	30,40	10611	1999		
	15,00	30,50				
E28-3	15,20	30,80	11077	1995		
	15,15	30,60				
E28-4	14,90	30,60	10603	1990		
	14,90	30,50				
F28-1	15,20	30,40	10430	1903	1901	
	15,10	30,40				
F28-2	15,20	30,70	10467	1891		
	15,10	30,70				
F28-3	15,20	30,90	10633	1899		
	15,20	30,80				
F28-4	15,20	30,50	10564	1909		
	15,20	30,50				
G28-1	14,90	30,50	10108	1898	1836	
	14,90	30,60				
G28-2	15,20	30,40	9904	1822		
	15,00	30,30				
G28-3	15,20	30,80	9732	1753		
	15,15	30,60				
G28-4	14,90	30,30	9971	1872		
	15,00	30,40				

Tabla 42. Densidad del hormigón a los 28 días



Código	Diámetro (cm)	Carga (kN)	Carga (kgf)	Resistencia (kgf/cm ²)	Resistencia promedio (kgf/cm ²)
A7-1	15,15 15,20	286,40	29195	161,42	
A7-2	15,20 15,10	279,14	28455	157,85	161
A7-3	15,20 15,22	289,78	29540	162,58	
B7-1	15,20 15,20	269,56	27478	151,43	
B7-2	15,10 15,00	268,14	27333	153,65	153
B7-3	15,20 15,25	275,71	28105	154,37	
C7-1	15,10 15,50	267,64	27282	148,39	
C7-2	15,40 15,20	266,47	27163	147,74	148
C7-3	15,10 15,00	259,43	26445	148,66	
D7-1	15,10 15,30	258,31	26331	145,11	
D7-2	15,00 15,20	244,86	24960	139,38	142
D7-3	15,00 14,80	244,03	24876	142,66	
E7-1	15,20 15,20	215,33	21950	120,96	
E7-2	14,90 15,00	205,28	20926	119,21	121
E7-3	15,20 15,30	221,03	22531	123,35	
F7-1	15,10 15,30	205,76	20974	115,59	
F7-2	15,00 15,25	193,22	19697	109,63	114
F7-3	15,20 15,00	206,94	21094	117,79	
G7-1	15,30 15,30	190,65	19434	105,70	
G7-2	15,00 14,90	184,42	18799	107,10	107
G7-3	15,10 15,20	190,13	19382	107,52	

Tabla 43. Resistencia del hormigón a los 7 días



Código	Diámetro (cm)	Carga (kN)	Carga (kgf)	Resistencia (kgf/cm ²)	Resistencia promedio (kgf/cm ²)
A14-1	15,10 15,20	400,29	40805	226,36	
A14-2	15,10 15,10	406,73	41461	231,53	229
A14-3	15,10 15,20	403,07	41088	227,93	
B14-1	14,95 15,05	380,65	38802	219,57	
B14-2	14,95 15,05	386,02	39349	222,67	220
B14-3	15,10 15,15	385,29	39275	218,59	
C14-1	15,15 15,25	381,64	38903	214,39	
C14-2	15,50 15,00	385,35	39281	215,06	213
C14-3	15,20 15,20	372,34	37955	209,17	
D14-1	15,20 15,25	369,58	37674	206,94	
D14-2	15,00 14,90	359,83	36680	208,96	208
D14-3	15,20 15,20	370,96	37815	208,39	
E14-1	15,05 15,25	340,28	34687	192,42	
E14-2	15,00 15,20	336,92	34345	191,79	193
E14-3	15,10 15,15	342,39	34902	194,25	
F14-1	14,90 14,90	316,69	32283	185,14	
F14-2	14,90 14,90	319,81	32601	186,97	185
F14-3	15,20 15,20	327,72	33406	184,10	
G14-1	15,20 15,20	317,71	32386	178,48	
G14-2	15,05 15,40	321,36	32759	179,94	179
G14-3	15,20 15,20	317,71	32386	178,48	

Tabla 44. Resistencia del hormigón a los 14 días



Código	Diámetro (cm)	Carga (kN)	Carga (kgf)	Resistencia (kgf/cm ²)	Resistencia promedio (kgf/cm ²)
A28-1	15,20 15,20	451,64	46039	253,72	
A28-2	15,20 15,30	454,81	46362	253,82	
A28-3	15,20 15,15	447,20	45586	252,05	253
A28-4	15,20 15,20	452,69	46146	254,31	
B28-1	14,90 14,95	422,76	43095	246,32	
B28-2	15,10 15,20	433,70	44210	245,25	
B28-3	15,10 15,10	429,51	43783	244,49	246
B28-4	14,80 14,90	423,22	43141	249,09	
C28-1	15,20 15,20	437,57	44604	245,81	
C28-2	15,40 14,90	424,21	43243	239,88	
C28-3	15,20 15,10	432,83	44121	244,75	243
C28-4	15,20 15,20	427,38	43566	240,09	
D28-1	15,00 15,10	412,76	42075	236,52	
D28-2	15,10 15,20	413,86	42188	234,03	
D28-3	15,10 15,10	410,55	41851	233,70	234
D28-4	15,15 15,20	414,10	42212	233,40	
E28-1	15,05 14,90	374,33	38158	216,65	
E28-2	14,80 15,00	372,46	37968	217,75	
E28-3	15,20 15,15	376,56	38385	212,23	216
E28-4	14,90 14,90	372,83	38005	217,96	
F28-1	15,20 15,10	370,43	37760	209,47	
F28-2	15,20 15,10	368,77	37591	208,53	
F28-3	15,20 15,20	369,62	37678	207,64	209
F28-4	15,20 15,20	373,86	38110	210,02	
G28-1	14,90 14,90	357,13	36405	208,78	
G28-2	15,20 15,00	360,50	36748	205,21	
G28-3	15,20 15,15	361,11	36810	203,53	205
G28-4	14,90 15,00	349,49	35626	202,95	

Tabla 45. Resistencia del hormigón a los 28 días