

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Autores:

José David Castro Riquetti

C.I: 0104224134

Gabriela Lisseth Ojeda Bravo

C.I: 0107285991

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, PhD

C.I: 0301500576

Cuenca-Ecuador

05 de noviembre de 2019



Resumen

La industria de la construcción se encuentra en constante desarrollo buscando siempre mejorar la calidad de sus productos para así mejorar la calidad de vida de la sociedad en la que vivimos. Ya que las construcciones actuales exigen cada vez más altos estándares de requerimiento el desarrollo de “Hormigones de alto desempeño” juega un papel importante para cubrir las necesidades de la sociedad.

En la presente investigación se pretendió diseñar una mezcla de hormigón capaz de cumplir los requisitos de una resistencia a compresión superior a los 1000 kg/cm², de buena trabajabilidad, durabilidad, absorción y densidad.

Para estos fines, se probaron varias dosificaciones de mezcla, elaborando una mezcla patrón (0% humo de sílice) y varias mezclas variando el porcentaje de humo de sílice. Además de un aditivo reductor de agua de alto rango de última generación (Viscocrete 4100) acorde con ASTM C494.

Para el estado endurecido de los hormigones se realizaron ensayos destructivos (resistencia a compresión, tracción y flexión) y ensayos no destructivos (índice esclerométrico, velocidad de pulso, resistividad eléctrica). La investigación toma además en cuenta consideraciones económicas, como el análisis de optimización del costo total.

Como resultado final se obtuvo una mezcla con trabajabilidad desde autocompactante hasta muy suave, con una resistencia a compresión máxima de 1450 kg/cm² a los 28 días, correspondiente a porcentajes del peso del cemento de 10% de humo de sílice y 0.9% de aditivo, con una relación a/c de 0.24.

Palabras Clave: Hormigón de alto desempeño. Humo de sílice. Aditivo reductor de agua de alto rango. Índice esclerométrico. Velocidad de pulso. Resistividad ética.



Abstract

The construction industry is constantly developing and seeking to improve the quality of its products as well the life quality of our society.

Since the current constructions demand higher requirement the development of "High performance concrete" plays an important role to meet the needs of society.

In the present investigation, it was design a concrete mixture capable of meeting the requirements of a compressive strength exceeding 1000 kg / cm², good workability, excelent durability, absorption reduction and an incress of density.

For the fines was try several mixing doses, making a standard mixture (0% silica fume) and 9 mixtures varying the percentage of silica fume.

In addition to a high range water reducing additive (Viscocrete 4100) conforming to ASTM C494.

Destructive tests (compressive strength, tensile and flexural strength) and non-destructive tests (sclerometric index, pulse velocity, electrical resistivity) are tested for the durability of the concrete. The research also analice the economic issue, such as the analysis of total cost optimization.

As a final result, mixtures from self-compacting to fluid workability, with a maximum compressive strength of 1450 kg / cm² at 28 days, corresponding to cement weight percentages of 10% silica fume and 0.9% additive, with an a / c ratio of 0.24.

Keywords: High-strength concrete. Silica fume. High range water reducer. Sclerometric index. Pulse speed. Electric resistivity.

José David Castro Riquetti
Gabriela Lisseth Ojeda Bravo



ÍNDICE GENERAL

Contenido

| | |
|---|----|
| INDICE DE TABLAS | 11 |
| INDICE DE ILUSTRACIONES | 12 |
| INDICE DE ECUACIONES..... | 14 |
| CAPITULO 1: Generalidades | 18 |
| 1.1. Introducción..... | 18 |
| 1.1.1. Antecedentes..... | 18 |
| 1.1.2. Planteamiento del problema | 21 |
| 1.1.3. Justificación | 21 |
| 1.1.4. Hipótesis de la investigación | 21 |
| 1.1.5. Objetivos..... | 22 |
| 1.1.6. Alcance..... | 22 |
| 1.2. Definiciones de hormigones de alto desempeño..... | 23 |
| 1.2.1. Definición del Instituto Americano del Concreto (ACI) | 23 |
| 1.2.2. Definición del Departamento federal de administración de carreteras de los Estados Unidos | 24 |
| 1.2.3. Definición del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras 24 | |
| 1.2.4. Definición de la Universidad de Tokio..... | 24 |
| 1.2.5. Definición según “Tecnología del Concreto de Alto Desempeño”. 24 | |
| 1.2.6. Definición propuesta por los autores | 24 |
| CAPITULO 2: Materiales y Métodos | 25 |
| 2.1. Componentes básicos del hormigón | 25 |
| 2.1.1. Agua | 25 |
| 2.1.2. Agregados | 26 |
| 2.1.3. Adiciones minerales (humo de sílice) | 35 |
| 2.1.4. Aditivos químicos..... | 36 |
| 2.1.5. Cemento | 39 |
| 2.2. Diseño, dosificación y elaboración de mezclas | 43 |
| 2.2.1. Diseño de Hormigón Método ACI 211.4R..... | 43 |
| 2.2.2. Manual de usuario de humo de sílice o “Silica Fume User’s Manual” 44 | |
| 2.2.3. Procedimiento de mezclado para elaboración de hormigones en laboratorio desarrollado por los autores..... | 46 |
| 2.3. Trabajabilidad del hormigón | 52 |



| | | |
|------------------------------------|--|-----|
| 2.3.1. | Revenimiento del hormigón (cono de Abrams) | 52 |
| 2.3.2. | Fluidez del hormigón o “Slump-Flow test” | 53 |
| 2.4. | Propiedades del hormigón endurecido | 54 |
| 2.4.1. | Absorción y densidad del hormigón endurecido | 54 |
| 2.4.2. | Resistencia a compresión simple | 56 |
| 2.4.3. | Modo de falla a compresión simple | 58 |
| 2.4.4. | Resistencia a tracción | 61 |
| 2.4.5. | Resistencia a flexión | 62 |
| 2.4.6. | Velocidad de pulso ultrasónico | 64 |
| 2.4.7. | Resistividad eléctrica | 67 |
| 2.4.8. | Resistencia asociada al índice esclerométrico | 69 |
| 2.4.9. | Durabilidad | 71 |
| CAPITULO 3: Resultados y Discusión | | 71 |
| 3.1. | Componentes básicos del hormigón | 71 |
| 3.1.1. | Agua | 71 |
| 3.1.2. | Agregado | 71 |
| 3.1.3. | Adiciones minerales (humo de sílice) | 77 |
| 3.1.4. | Aditivos químicos | 77 |
| 3.1.5. | Cemento | 82 |
| 3.2. | Dosificaciones para metro cubico utilizadas | 83 |
| 3.3. | Trabajabilidad del hormigón | 84 |
| 3.3.1. | Revenimiento del hormigón (cono de Abrams) | 84 |
| 3.3.2. | Fluidez del hormigón o “Slump-Flow Test” | 84 |
| 3.4. | Propiedades del hormigón en estado endurecido | 84 |
| 3.4.1. | Absorción y densidad del hormigón endurecido | 84 |
| 3.4.2. | Resistencia a compresión simple | 90 |
| 3.4.3. | Modo de falla a compresión simple | 93 |
| 3.4.4. | Resistencia a tracción | 94 |
| 3.4.5. | Resistencia a flexión | 95 |
| 3.4.6. | Velocidad de pulso ultrasónico | 98 |
| 3.4.7. | Resistividad eléctrica | 100 |
| 3.4.8. | Resistencia asociada al índice esclerométrico | 103 |
| 3.4.9. | Durabilidad | 107 |
| 3.4.10. | Análisis de costo de producción de hormigones de alto desempeño por metro cubico de mezcla | 108 |



Universidad de Cuenca

| | |
|---|-----|
| CAPITULO V – Conclusión y Recomendaciones | 112 |
| Bibliografía | 116 |
| Anexos | 121 |
| Anexo 1: Resultados de laboratorio de arena natural. | 121 |
| Anexo 2: Resultados de laboratorio de arena fina. | 129 |
| Anexo 3: Resultados de laboratorio de agregado triturado Vipeza | 138 |
| Anexo 4: Hoja técnica cemento Holcim..... | 145 |
| Anexo 5: Hoja técnica SikaFume | 146 |
| Anexo 5: Hoja técnica Sika Viscocrete 4100..... | 149 |



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

José David Castro Riquetti en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de noviembre del 2019

José David Castro Riquetti

C.I: 0104224134



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Gabriela Lisseth Ojeda Bravo en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de noviembre del 2019

Gabriela Lisseth Ojeda Bravo

C.I: 0107285991



Cláusula de Propiedad Intelectual

José David Castro Riquetti autor del trabajo de titulación "Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 05 de noviembre del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José David Castro Riquetti', written over a horizontal line.

José David Castro Riquetti

C.I: 0104224134



Cláusula de Propiedad Intelectual

Gabriela Lisseth Ojeda Bravo autor del trabajo de titulación "Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 05 de noviembre del 2019

A handwritten signature in blue ink, reading 'Gabriela Lisseth Ojeda Bravo', written over a horizontal line.

Gabriela Lisseth Ojeda Bravo

C.I: 0107285991



INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Ensayos a realizar en el agregado grueso y su norma correspondiente. | 27 |
| Tabla 2. Ensayos a realizar en el agregado fino y su norma correspondiente. | 27 |
| Tabla 3. Valores de referencia de peso específico para agregados naturales. | 31 |
| Tabla 4. Selección de límites de gradación para agregado grueso, en función del tamaño máximo del agregado. Fuente: ASTM C33..... | 33 |
| Tabla 5. Requisitos de gradación para agregado fino. Fuente: ASTM C 33 | 33 |
| Tabla 6. Requisitos de gradación para arena de sílice. Fuente: H0213 del manual de carreteras vol. 4. | 34 |
| Tabla 7. Grados de ensayo en función de los rangos de tamaño de partícula. | 34 |
| Tabla 8. Clasificación de aditivos químicos. Fuente: ASTM C 494 | 36 |
| Tabla 9. Mezclas previas recomendadas como datos de partida..... | 43 |
| Tabla 10. Medidas de comparación de consistencia para revenimiento. Fuente: (Arnold et al., 2009). | 52 |
| Tabla 11. Clases de consistencia para hormigones autocompactantes. Fuente: (BSI, 2009). | 54 |
| Tabla 12. Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda, según Leslie y Cheesman Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo..... | 66 |
| Tabla 13. Evaluación de la calidad del hormigón mediante su velocidad de pulso, según Agraval. Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo..... | 66 |
| Tabla 14. Velocidad de onda mínima en diferentes estructuras. Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo..... | 66 |
| Tabla 15. Penetración del ion cloruro en función de la resistividad eléctrica para dos tipos de cilindros según la AASHTO T358..... | 69 |
| Tabla 16. Peso volumétrico suelto roca triturada. | 71 |
| Tabla 17. Peso volumétrico suelto arena. | 71 |
| Tabla 18. Peso volumétrico compacto roca triturada. | 72 |
| Tabla 19. Peso volumétrico compacto arena. | 72 |
| Tabla 20. Granulometría utilizada para material triturado. | 73 |
| Tabla 21. Granulometría propuesta para arena. | 74 |
| Tabla 22. Granulometría propuesta para arena de sílice según la ASTM C109 | 75 |
| Tabla 23. Resumen ensayos en agregados..... | 76 |
| Tabla 24. Características de Sika Fume. Fuente: Manual de usuario de humo de sílice. | 77 |
| Tabla 25. Características del aditivo Viscocrete 4100, de la hoja técnica de Sika. | 77 |
| Tabla 26. Resultados de compacidad de ensayo demanda agua. | 78 |
| Tabla 27. Resultados de relación a/c de ensayo demanda agua. | 80 |
| Tabla 28. Características del cemento Holcim HE. Fuente: Hoja técnica del producto. | 82 |
| Tabla 29. Resultados de resistencia a compresión de morteros. | 82 |
| Tabla 30. Dosificaciones utilizadas para metro cubico..... | 83 |
| Tabla 31. Resultados del ensayo del cono de Abrams. | 84 |
| Tabla 32. Resultados del ensayo de fluidez o “Slump-Flow Test”..... | 84 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 33. Valores de densidad original y corregida..... | 87 |
| Tabla 34. Comportamiento de vigas a flexión. | 96 |
| Tabla 35. Resultados del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico | 98 |
| Tabla 36. Resultados de ensayo de resistencia eléctrica y clasificación de durabilidad ante cloruros | 100 |
| Tabla 37. Análisis de correlación de resistencia a compresión para el índice esclerométrico..... | 103 |
| Tabla 38. Análisis de durabilidad del hormigón..... | 107 |
| Tabla 39. Precios unitarios de los componentes de un hormigón. Fuente: Índice de precios de materiales de construcción de la ACI..... | 108 |
| Tabla 40. Precio por metro cubico de hormigón de los diferentes porcentajes de humo de sílice..... | 108 |
| Tabla 41. Análisis de capacidad de columnas por fuerza axial y cortante. | 110 |
| Tabla 42. Número mínimo de columnas requeridas..... | 110 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Evolución del hormigón y su utilización en las construcciones. Fuente: (Bacuilima & Guillen, 2019)..... | 19 |
| Ilustración 2. Importantes edificaciones construidas gracias al desarrollo de Hormigones de alto desempeño. Fuente: (Martínez, 2003). | 20 |
| Ilustración 3. Separación en tamices del agregado..... | 32 |
| Ilustración 4. Humo de sílice. | 35 |
| Ilustración 5. Pasta homogénea para determinar la compacidad del cemento. | 39 |
| Ilustración 6. Orden de apisonamiento en los moldes ASTM C109. | 42 |
| Ilustración 7. Moldes para elaboración de morteros..... | 42 |
| Ilustración 8. Ensayo de resistencia para morteros..... | 42 |
| Ilustración 9. Mortero fallado. | 43 |
| Ilustración 10. Paso 0 del procedimiento de mezclado. | 46 |
| Ilustración 11. Paso 1 del procedimiento de mezclado. | 47 |
| Ilustración 12. Paso 2 del procedimiento de mezclado. | 47 |
| Ilustración 13. Paso 3 del procedimiento de mezclado. | 48 |
| Ilustración 14. Paso 4 del procedimiento de mezclado. | 48 |
| Ilustración 15. Paso 5 del procedimiento de mezclado. | 49 |
| Ilustración 16. Paso 6 del procedimiento de mezclado. | 49 |
| Ilustración 17. Paso 7 del procedimiento de mezclado. | 50 |
| Ilustración 18. Paso 8 del procedimiento de mezclado. | 50 |
| Ilustración 19. Paso 9 del procedimiento de mezclado. | 51 |
| Ilustración 20. Paso 13a del procedimiento de mezclado. | 51 |
| Ilustración 21. Paso 13b del procedimiento de mezclado | 52 |
| Ilustración 22. Revenimiento del hormigón. | 53 |
| Ilustración 23. Revenimiento del hormigón. | 53 |
| Ilustración 24. Slump-flow test..... | 54 |
| Ilustración 25. Sectorización de probetas de hormigón de 7%, 10% y 30% respectivamente..... | 55 |
| Ilustración 26. Medida del neopreno desgastado..... | 56 |
| Ilustración 27. Área de aplicación de carga por neopreno. | 57 |



| | |
|--|----|
| Ilustración 28. Ensayo de compresión para cilindros. | 58 |
| Ilustración 29. Patrones típicos de falla de las probetas de hormigón..... | 58 |
| Ilustración 30. Tipo de falla 2-1. | 59 |
| Ilustración 31. Tipo de falla 2-2. | 59 |
| Ilustración 32. Tipo de falla 3..... | 60 |
| Ilustración 33. Tipo de falla 5..... | 60 |
| Ilustración 34. Tipo de falla 6..... | 61 |
| Ilustración 35. Ensayo de tracción para cilindros. | 62 |
| Ilustración 36. Esquema de ensayo a flexión para vigas..... | 63 |
| Ilustración 37. Ensayo a flexión de vigas. | 63 |
| Ilustración 38. Probetas ensayadas a flexión. | 64 |
| Ilustración 39. Verificación de la calibración del equipo. | 67 |
| Ilustración 40. Esquema de la medida de la resistividad eléctrica del hormigón. | 67 |
| Ilustración 41. Resistímetro utilizado. | 68 |
| Ilustración 42. Equipo utilizado para el ensayo. | 69 |
| Ilustración 43. Correlación del numero de rebotes para resistencia a compresion. Fuente: (Proceq, s. f.). | 70 |
| Ilustración 44. Curva granulométrica utilizada material triturado..... | 74 |
| Ilustración 45. Curva granulométrica fina utilizada. | 75 |
| Ilustración 46. Curva granulométrica de arena de sílice propuesta..... | 76 |
| Ilustración 47. Compacidad en función del porcentaje de aditivo de los diferentes porcentajes de humo de sílice. | 78 |
| Ilustración 48. Compacidad en función del porcentaje de humo de sílice de los diferentes porcentajes de aditivo..... | 79 |
| Ilustración 49. Relación a/c en función del porcentaje de aditivo de los diferentes porcentajes de humo de sílice. | 80 |
| Ilustración 50. Relación a/c en función del porcentaje de humo de sílice de los diferentes porcentajes de aditivo..... | 81 |
| Ilustración 51. Resultados de resistencia a compresión de morteros..... | 83 |
| Ilustración 52. Absorción del hormigón de 28 días..... | 85 |
| Ilustración 53. Sectorización del hormigón de 7% humo de sílice..... | 85 |
| Ilustración 54. Sectorización del hormigón de 10% humo de sílice..... | 86 |
| Ilustración 55. Sectorización del hormigón de 30% humo de sílice..... | 86 |
| Ilustración 56. Tendencia de la densidad original del hormigón. | 88 |
| Ilustración 57. Tendencia de la densidad corregida del hormigón..... | 88 |
| Ilustración 58. Comparación entre la densidad original y corregida. | 89 |
| Ilustración 59. Crecimiento de resistencia a compresión en función del tiempo. | 90 |
| Ilustración 60. Aumento de resistencia a compresión de diferentes porcentajes de humo de sílice. | 90 |
| Ilustración 61. Resultados de resistencia a compresión de 7 días. | 91 |
| Ilustración 62. Resultados de resistencia a compresión de 14 días. | 91 |
| Ilustración 63. Resultados de resistencia a compresión de 28 días. | 92 |
| Ilustración 64. Deformación longitudinal del hormigón a 28 días. | 92 |
| Ilustración 65. Tipo de falla 2-1 dominante en las probetas de hormigón según ASTM C39..... | 93 |



Ilustración 66. Tipo de falla 2-1 en probetas de hormigón..... 93
Ilustración 67. Resistencia a tracción indirecta de 7 días..... 94
Ilustración 68. Resistencia a tracción indirecta de 14 días..... 94
Ilustración 69. Comportamiento de la resistencia a tracción del hormigón..... 95
Ilustración 70. Resistencia a compresión de probetas de hormigón correspondiente a las vigas de 14 días..... 96
Ilustración 71. Resistencia a flexión de vigas a 14 días..... 97
Ilustración 72. Deflexión de vigas a 14 días tras el ensayo a flexión..... 97
Ilustración 73. Representación gráfica de la velocidad de onda vs la resistencia a compresión..... 99
Ilustración 74. Representación gráfica de la velocidad de onda vs la densidad corregida del hormigón..... 99
Ilustración 75. Crecimiento de resistividad eléctrica..... 101
Ilustración 76. Resistencia a compresión en función de la resistividad eléctrica 101
Ilustración 77. Densidad del hormigón en función de la resistividad eléctrica. 102
Ilustración 78. Representación gráfica del índice esclerométrico de 28 días. 104
Ilustración 79. Resistencia a compresión simple real..... 104
Ilustración 80. Resistencia a compresión corregida de correlación del índice esclerometrico..... 105
Ilustración 81. Comparación de la resistencia a compresión real y de correlación corregida..... 106
Ilustración 82. Durabilidad del hormigón a diferentes porcentajes de humo de sílice..... 108
Ilustración 83. Precio por metro cubico de hormigón de los diferentes porcentajes de humo de sílice..... 109
Ilustración 84. Reducción de volumen conforme aumenta la resistencia a compresión del hormigón..... 111
Ilustración 85. Reducción de costo conforme aumenta la resistencia a compresión..... 111

INDICE DE ECUACIONES

Ec. 1 Peso volumétrico suelto 28
Ec. 2 Peso volumétrico compactado 28
Ec. 3 Densidad real sss, agregado grueso..... 29
Ec. 4 Densidad real seca, agregado grueso..... 29
Ec. 5 Densidad neta, agregado grueso 29
Ec. 6 Absorción, agregado grueso 30
Ec. 7 Densidad real sss, agregado fino 30
Ec. 8 Densidad real seca, agregado fino..... 31
Ec. 9 Densidad neta, agregado fino 31
Ec. 10 Absorción, agregado fino 31
Ec. 11 Módulo de finura 33
Ec. 12 Porcentaje de perdida 35
Ec. 13 Compacidad 38
Ec. 14 Factor de aumento 55
Ec. 15 Densidad corregida 55



Universidad de Cuenca

| | |
|---|----|
| Ec. 16 Resistencia a compresión | 57 |
| Ec. 17 Resistencia a tracción | 61 |
| Ec. 18 Tensión de rotura | 64 |
| Ec. 19 Modulo elástico dinámico | 65 |
| Ec. 20 Resistividad..... | 68 |
| Ec. 21 Resistencia a compresión por esclerómetro | 70 |
| Ec. 22 Factor de corrección esclerométrico | 70 |
| Ec. 23 Resistencia corregida asociada al esclerómetro | 70 |



Agradecimiento

Agradecemos a nuestro director de tesis Ing. Daniel Mogrovejo, PhD, por su siempre buena disposición para ayudarnos con ideas, despejar dudas y demás aspectos que nos han permitido finalizar satisfactoriamente nuestro trabajo de titulación

A las empresas Holcim y Sika, de manera especial a los ingenieros Marcelo Cañizares (jefe de planta de la empresa Holcim-Cuenca), Pablo Orbe (jefe de laboratorio de la empresa Holcim-Cuenca) y al ingeniero Fernando Salgado (asesor de productos técnicos de la empresa Sika), por proporcionarnos de manera gratuita todo el material empleado para desarrollar el presente trabajo de titulación.

A nuestros lectores de tesis Ing. Alfredo Vásquez y Ing. Fabian Carrasco, por las observaciones y recomendaciones realizadas que permitieron mejorar los resultados obtenidos de nuestro trabajo

A nuestros profesores, por todos los conocimientos impartidos a lo largo de nuestra carrera, ya que gracias a sus experiencias y sabios conocimientos nos permitieron conocer y amar la carrera que elegimos.

José y Gabriela



Universidad de Cuenca

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a mis padres Edgar y Margarita por el apoyo y dedicación demostrado durante toda mi vida para cumplir mis metas, sin ellos no estaría donde estoy ahora.

José Castro.

El presente trabajo de titulación lo dedico a mis padres Carlos Ojeda y Julia Bravo, por ser un apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y un ejemplo de personas, que saben superar los obstáculos que la vida presente sin rendirse jamás, fundamentando en mi la responsabilidad, honestidad y deseos de superación que me ha permitido actualmente obtener mi título profesional; a mi esposo Andrés Gutiérrez por el apoyo, cariño y motivación que siempre me ha brindado, ya nunca faltó una palabra de aliento que me hiciera creer que las cosas mejorarían.

Gabriela Ojeda.



CAPITULO 1: Generalidades

1.1. Introducción

1.1.1. Antecedentes

Aunque, no se conozca con exactitud la fecha de su descubrimiento sé cree que el hombre descubrió el hormigón al mismo tiempo que descubrió el fuego, ya que, al estar en contacto el fuego con piedras calcáreas, yeso y arcilla, se carboniza la piedra volviéndose polvo, que al mezclarse con agua se convierte en un material sólido, considerado como el primer cemento de la historia, (Garrido, 2007).

La industria de la construcción se encuentra en constante desarrollo buscando siempre mejorar la calidad de los productos, para así mejorar la calidad de vida de la sociedad. El hormigón es uno de los principales productos utilizados en esta industria, ya que constituye la base de todo tipo de obra civil, este importante producto es utilizado de inicio a fin de la obra.

Cada vez son más exigentes los estándares de calidad para construcciones de una sociedad que crece a pasos agigantados. Se ha considerado el uso de Hormigones de Alto Desempeño como una de las principales soluciones, para ello es necesario reducir la relación a/c del hormigón e incorporar determinados agentes químicos y minerales, que se han logrado obtener gracias al desarrollo de la industria química.

A medida que la industria de construcción va progresando con el desarrollo de hormigones de cada vez más resistentes, los edificios que se construyen son cada vez de mayor altura, así en la siguiente ilustración se puede apreciar la evolución del hormigón y su utilización en las construcciones:

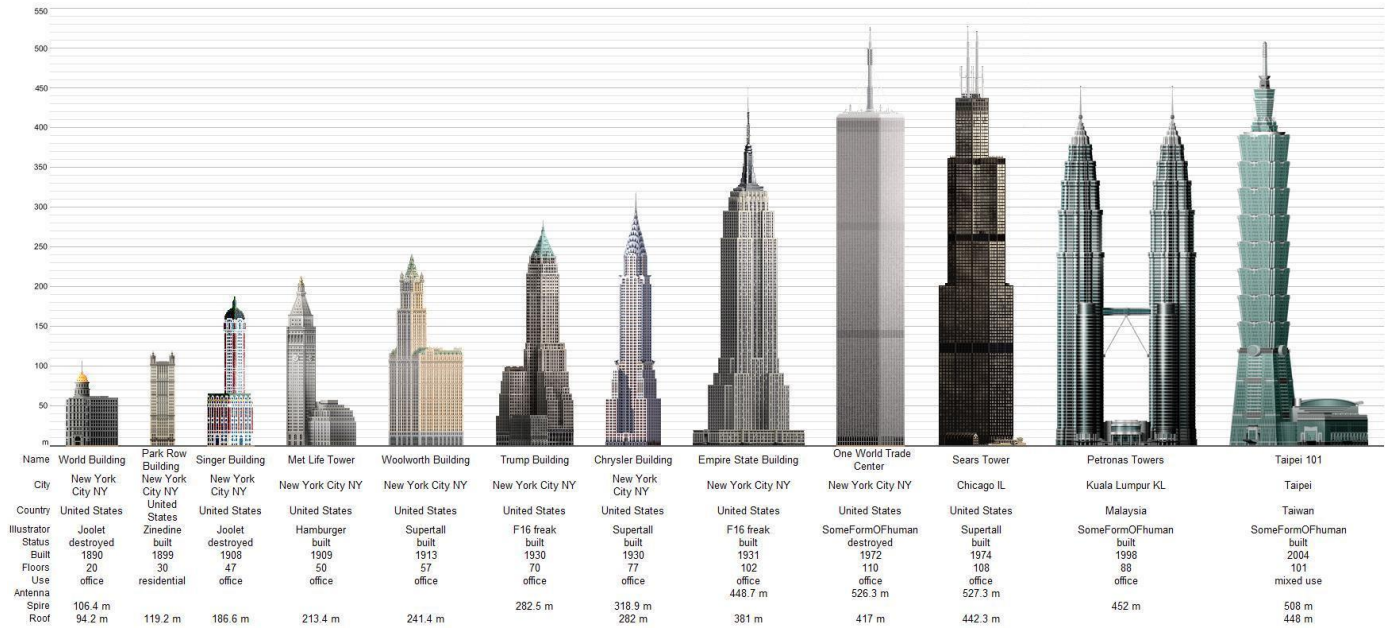


Ilustración 1. Evolución del hormigón y su utilización en las construcciones. Fuente: (HAROTECNO, 2010). A continuación, se nombran algunas de las grandes edificaciones que se han construido gracias al desarrollo de los Hormigones de Alto Desempeño:

En el año 1970 en Chicago construye el Lake Point Tower, el cual tiene una altura de 180m con un $f'c$ de 55Mpa. En 1990 se utiliza un hormigón de 84Mpa para construir los edificios South Wacker Drive y Two Prudential Plaza con alturas de 290m y 275m, respectivamente. En el 2003 se pueden citar los ejemplos más destacados del uso de Hormigones especiales, los edificios Two Union Square en Seattle, Washington que presenta una altura de 220m con un $f'c$ de 133Mpa, destacando aquí la resistencia del Hormigón y las Torres Petroleras De Kuala Lumpur en Malasia en las cuales destaca la altura que estas presentan, pues con un $f'c$ de 89Mpa estas presentan 450m de altura, (Martínez, 2003). Actualmente el Burj Khalifa es el edificio más grande del mundo con 828 m y 163 pisos, su construcción termino en el 2010, desde cuando ostenta este título, se diseñó con un hormigón de $f'c=800 \text{ kg/cm}^2$ (Aldred, 2012).



Figura 1. Lake Point Tower, Chicago.



Figura 2. South Wacker Drive, Chicago.



Figura 3. Two Prudential Plaza, Chicago.



Figura 4. Two Union Square, Seattle.



Figura 5. Torres Petronas, Kuala Lumpur.

Ilustración 2. Importantes edificaciones construidas gracias al desarrollo de Hormigones de alto desempeño. Fuente: (Martínez, 2003).

En Ecuador los Hormigones especiales de alta resistencia han sido utilizado principalmente en obras hidroeléctricas como el Coca Codo Sinclair y Toachi Pilatón, con menor frecuencia en obras de gas/ petróleo, sin embargo, en sectores de educación, salud y vivienda no se ha podido apreciar ningún avance ni construcción significativa, que use este tipo de hormigones, surge entonces la necesidad de potenciar este importante aspecto en el país con investigaciones y pruebas que garanticen su utilización, (Martínez, 2003).

A nivel de pregrado se ha podido constatar dos importantes investigaciones que se han desarrollado en este entorno:

El artículo llamado: “Diseño de hormigones de alto desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión - abrasión para obras hidráulicas”, desarrollado por Fabricio Yépez y Francisco X. Calderón estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad San Francisco de Quito, quienes alcanzaron una resistencia a compresión máxima de 1400 kg/cm^2 , su mezcla contempla la incorporación de un aditivo reductor de agua de alto rango y humo de sílice. Su investigación se enfocó únicamente en el análisis de resistencia a compresión simple, asentamiento y abrasión del hormigón.

La tesis llamada “Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión”, desarrollada por: Álvaro Bacuilima y Wilson Guillen, estudiantes la carrera de



Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, quienes alcanzaron una resistencia a compresión máxima de 1000kg/cm^2 , incorporando a su mezcla únicamente un aditivo reductor de agua de alto rango. En sus análisis se encuentran resultados de resistencia a compresión simple en probetas de hormigón y comportamiento de flexión en vigas de hormigón armado.

1.1.2. Planteamiento del problema

Los hormigones de alta resistencia no son un producto nuevo, sin embargo, el proceso de producción de estos hormigones es aún incierto en varios aspectos de composición, dosificación y elaboración, (Portugal, 2007). Para las construcciones más comunes los hormigones con los que se trabaja suelen presentar una resistencia a compresión simple de alrededor de 21Mpa , pero, cuando se trata de construcciones más relevantes y de alta trascendencia estos hormigones suelen no ser prácticos, ya que presentan problemas en cuanto a peso, sección, durabilidad, resistencia, que limitan su uso, (Cabrera, 2015).

Siendo necesario el desarrollo de un producto más eficiente que permita satisfacer las demandas de la sociedad, el cual deberá ser fabricado con componentes que sean asequibles y rentables para dicha sociedad, así también se debe dar a conocer una clara explicación del proceso de producción, para alcanzar un producto final de calidad.

En el Ecuador este tipo de tecnología no pasan de unos pocos estudios y aplicaciones, (Yépez & Calderón, 2014). Siendo esto un limitante para industria constructiva del Ecuador, debido a ello, surge la motivación de presentar una metodología coherente y segura que lleve al desarrollo consciente de mezclas de Hormigones de alto desempeño, con materiales propios de la región y que permita conocer su comportamiento en diferentes aspectos de importancia

1.1.3. Justificación

Se planea conseguir hormigones con una alta resistencia a compresión simple superior a 1300kg/cm^2 , mediante la utilización de materiales propios de la región. Ya que para los hormigones de alto desempeño es necesario tener una relación a/c baja se incorporará a la mezcla un aditivo reductor de agua de alto rango, y para rellenar los espacios vacíos de la mezcla se adicionará humo de sílice que junto con el cemento tipo HE utilizado, conforman el material cementante. Verificando siempre que las características de los componentes de la mezcla cumplan con las normas establecidas para ellos.

1.1.4. Hipótesis de la investigación

Los aditivos reductores de agua de alto rango logran una alta compacidad del cemento, fundamental para la completa hidratación del mismo, y reducción de agua de mezclado, aumentando la resistencia del producto final (Portugal, 2007).



El humo de sílice al ser un material extremadamente fino ocupa los espacios vacíos de la mezcla, aumentando la densidad y disminuyendo la porosidad y absorción de las probetas de hormigón, dándole mayor durabilidad y resistencia a la acción de agentes externos (Ghafari, Arezoumandi, Costa, & Júlio, 2015).

Al incorporar estos dos elementos en las mezclas de hormigón, las propiedades antes mencionadas, serán aprovechadas por producto final, el cual presentará excelentes características de resistencia, durabilidad y calidad.

1.1.5. Objetivos

1.1.5.1. Objetivo general

- Desarrollar Hormigones de alto desempeño, como solución técnica especializada para mejorar características, tanto estructurales como de durabilidad, para la construcción.

1.1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterización y selección de los materiales más adecuados a utilizar para el hormigón patrón, así como también para el desarrollo del hormigón alto desempeño, siguiendo las normas correspondientes.
- Determinar el porcentaje óptimo de aditivo.
- Desarrollar el hormigón patrón y hormigón de alto desempeño (variando el porcentaje de humo de sílice) siguiendo las recomendaciones de mezcla de acuerdo con la ACI 211.4R y el manual de usuario del humo de sílice.
- Determinar la trabajabilidad del hormigón en estado fresco mediante los ensayos de cono de Abrams y Fluidéz.
- Realizar pruebas de ensayos destructivos como: resistencia a compresión simple, tracción indirecta y flexión en los hormigones endurecidos
- Realizar pruebas de ensayos no destructivos como: absorción, densidad, índice esclerométrico, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica, sobre los hormigones en estado endurecido.
- Evaluar la durabilidad del hormigón en función de la resistividad eléctrica.
- Realizar un análisis de costo de optimización del costo total de elementos estructurales.

1.1.6. Alcance

El presente trabajo se compone de las siguientes etapas:

Como etapa de preparación se determinan las propiedades de los materiales pétreos, facilitados por la hormigonera Holcim-Cuenca, se realiza una separación del material por los distintos tamices, para el material fino (arena de natural de río en Santa Isabel) se utiliza los tamices (#4, #8, #16, #30, #50, #100, #200 y fondo), mientras que para el material grueso (roca triturada Vipeza) los tamices (3/4, 1/2, 3/8, #4), esto se lo realizó con el fin de tener una granulometría



controlada, que cumpliera con los rangos permitidos en la norma, cuyo objetivo es eliminar variables que pudieran alterar las características del hormigón.

Se realizó el ensayo de demanda agua, para poder determinar el porcentaje óptimo de aditivo que produzca la máxima compacidad y mínima relación a/c.

En la etapa de fabricación del hormigón, para los ensayos de compresión y tracción, se elaboraron probetas de hormigón, con 0% humo de sílice (hormigón patrón) y hormigones con diferentes porcentajes de humo de sílice (3%, 5%, 7%, 10%, 13%, 15%, 20%, 25% y 30%), para cada uno de estos porcentajes se elaboraron 6 especímenes, para el caso particular de los porcentajes de 5%, 7% y 10% el número total de especímenes fabricados ascendió a 12 debido malos resultados obtenidos en las primeras 6 probetas. Para el ensayo a flexión se elaboraron vigas de hormigón simple con porcentajes de humo de sílice de: 0%, 5%, 7%, 10%, 13% y 15% y debido a malos resultados obtenidos, las vigas de 5%, 7% se volvieron a repetir. Cabe mencionar que cada viga se encuentra acompañada de dos probetas de hormigón, necesarias para poder comparar la capacidad de resistencia a flexión, en función de la resistencia a compresión de las probetas y el módulo de rotura obtenido en el ensayo de flexión.

En el estado fresco del hormigón se mide la trabajabilidad y revenimiento con los ensayos de fluidez o “Slump-Flow Test” y el cono de Abrams respectivamente.

En la etapa de ensayos para el hormigón en estado endurecido, se determinó la densidad, absorción, compresión, tracción, flexión, modos de falla, velocidad de pulso ultrasónico, índice esclerométrico y resistividad eléctrica, siguiendo los lineamientos de las normas del American Concrete Institute (ACI), American Society for Testing and Materials (ASTM) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Finalmente, al analizar los resultados obtenidos de los ensayos descritos, se llega a determinar el porcentaje óptimo de humo de sílice del 10% del peso del cemento, que brinda las mejores características tanto de resistencia, durabilidad y trabajabilidad para un hormigón de alto desempeño.

De igual manera se realiza un análisis de costo-beneficio aplicado al análisis de una estructura con el hormigón de alto desempeño propuesto.

1.2. Definiciones de hormigones de alto desempeño

1.2.1. Definición del Instituto Americano del Concreto (ACI)

“Un concreto de alto desempeño es el que reúne una combinación especial de requerimientos de desempeño y uniformidad que no siempre puede ser logrado usando materiales tradicionales, mezclado normal, criterios de colocación normales y prácticos de curado ordinarios. Un concreto de alto desempeño es un concreto en el cual ciertas características son desarrolladas para una aplicación y medioambiente particular” (Russell, 1999).



1.2.2. Definición del Departamento federal de administración de carreteras de los Estados Unidos

Un concreto de alto desempeño es diseñado para ser más durable y si es necesario más resistente que un concreto convencional. Los concretos de alto desempeño están compuestos de esencialmente los mismos materiales que un concreto convencional. Pero las proporciones son diseñadas para proveer la resistencia y durabilidad necesaria para los requerimientos estructurales y medio ambientales del proyecto (Russell, Ozyildirim, Tadros, & Miller, 2006).

1.2.3. Definición del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras

Dicha definición abarca las siguientes características (Zia, Leming, & Ahmad, 1993):

- a. Se debe cumplir al menos una de las siguientes características:
 1. $f'c$ a los 28 días ≥ 70 MPa.
 2. $f'c$ a las 4 horas ≥ 20 MPa.
 3. $f'c$ a las 24 horas ≥ 35 MPa.
- b. Su factor de durabilidad al aplicarle 300 ciclos de congelación y deshielo debe ser superior al 80%.
- c. Las relaciones a/c deben ser ≤ 0.35 .

1.2.4. Definición de la Universidad de Tokio

Un concreto de alto desempeño debe cumplir con las siguientes características (Carino & Clifton, 1990):

1. El esfuerzo de compactación debe ser poco o nulo.
2. La mezcla debe cohesiva con baja segregación.
3. Fisuración mínima a edades tempranas causadas por la contracción o las deformaciones térmicas.
4. Alta resistencia a largo plazo y poca permeabilidad.

1.2.5. Definición según “Tecnología del Concreto de Alto Desempeño”

“Un concreto de alto desempeño es aquel que alcanza la mayor efectividad y eficiencia ante solicitaciones particulares; estos concretos son eficientes por que poseen una dosificación optimizada según las consideraciones de trabajabilidad y economía; y son efectivos por que cumplen las características solicitadas, pudiendo ser estas de tipo estructural o medioambiental.” (Portugal, 2007)

1.2.6. Definición propuesta por los autores

Hormigón de alto desempeño es aquel que cubre de manera óptima las solicitaciones particulares en cuanto a calidad, resistencia, durabilidad y otras características reológicas del hormigón, para la construcción de grandes edificaciones, así como también para estructuras que van a estar sometidas a intemperies ambientales agresivos.



Para este tipo de hormigones se considera que la resistencia a compresión simple supera los 1500kg/cm^2 a los 28 días, la trabajabilidad varía de suave hasta autocompactante y tiene una durabilidad ante agentes agresivos de media a alta.

Manteniendo la economía de la obra como uno de los principales factores a considerar, ya que, a pesar del aumento del costo unitario, el costo final de la obra optimizada es beneficioso porque gracias a la incorporación de esta nueva gama de hormigones se logra una reducción en el número y dimensiones de los elementos estructurales.

CAPITULO 2: Materiales y Métodos

2.1. Componentes básicos del hormigón

Son 5 los principales componentes de una mezcla de hormigón: agua, cemento, agregados, aditivos y minerales. Todos los hormigones de alto desempeño presentan variaciones en comportamiento, ya que, depende fundamentalmente de las variaciones que presenten cada uno de sus componentes, tanto en cantidad como en calidad, (Portugal, 2007).

A continuación, se detallan los conceptos básicos de cada uno de los materiales necesarios para la producción de hormigones de alto desempeño, así como las normas que estos deben cumplir y los ensayos a realizar sobre dichos elementos.

2.1.1. Agua

El agua se utiliza para dos principales funciones en el hormigón, la primera es como agua de amasado y la segunda es como agua para curado.

Agua de amasado: interviene en dos procesos importantes como lo son la reacción de hidratación del cemento y la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco. Existe un estrecho límite, ya que, si bien es cierto a mayor cantidad de agua, mayor trabajabilidad, pero, a mayor cantidad de agua menor resistencia del hormigón. Es decir, el agua debe ser la mínima requerida para que garantice una adecuada trabajabilidad y también de una buena resistencia del hormigón en estado endurecido, (Quiroz & Salamanca, 2006).

Agua de curado: es la que mayor tiempo de contacto tiene con el hormigón, por lo cual presenta la mayor probabilidad de contaminarse y transmitirle sustancias perjudiciales a los hormigones. El agua de curado tiene como misión evitar las contracciones diferenciales que presenta el cemento, ya que mejora las condiciones de hidratación y evita la desecación, (Quiroz & Salamanca, 2006).

Para cumplir con todos los requisitos establecidos en la norma el agua que se utilizó para las mezclas de hormigón es el agua potable, es decir agua que puede ser consumida sin ningún problema por los humanos. Así el agua debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma INEN 1108.



2.1.2. Agregados

Los agregados constituyen aproximadamente el 75% del volumen total del hormigón, estos se encuentran en la naturaleza y son el resultado de un largo proceso geológico que sufre la Tierra con el paso del tiempo, se compone por uno o más minerales. Las rocas no son necesariamente estructuras duras, ya que, la arcilla y arena provienen de rocas en diferentes estados, (Imbaquingo, 2012).

La clasificación de los agregados resulta ambigua, es por ello que se ha establecido diferentes categorías para poder clasificarlos, se los puede clasificar entonces por: su procedencia, por su gravedad específica y por su tamaño.

Por su procedencia: los agregados pueden ser de origen natural, formado en procesos geológicos y de origen artificial, en los cuales la intervención del hombre marca la diferencia, ya que a los agregados naturales se los puede convertir en agregados triturados (resultado de una trituración) y en escoria siderúrgica (residuo mineral).

Por su gravedad específica los agregados pueden clasificarse como: rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Por su tamaño: los áridos pueden clasificarse en áridos finos (arena) y en áridos gruesos (grava). Se conoce como árido fino a todo material que, al ser tamizado, éste atraviesa todo el tamiz #4, mientras que el árido grueso es aquel que se retiene sobre dicho tamiz.

Los agregados juegan un papel muy importante en el hormigón, estos además de cumplir la función de reducir el costo de producción, proporcionan rigidez evitando la variación de volumen de la mezcla, ya que, si solo se fabricara un hormigón con pasta de cemento las contracciones que se produjeran en el hormigón serían demasiado altas, provocando un inevitable agrietamiento del mismo, (Quiroz & Salamanca, 2006).

Las propiedades que estos materiales transmiten al hormigón son muy importantes en muchos aspectos como lo son la limpieza, sanidad, resistencia y forma de sus partículas. Son varios los ensayos que se deben realizar sobre los agregados, con el fin de garantizar que estos sean adecuados para su uso como componente de un hormigón, aún más, importante es su selección si estos van a ser parte de un hormigón de alto desempeño.

2.1.2.1. Recomendaciones para la elección de agregado

2.1.2.1.1. Agregado grueso

Para lograr hormigones de alta resistencia se debe garantizar que el agregado grueso sea 100% triturado y de superficie rugosa, ya que esto ofrece mayor trabazón de las partículas, factor que influye directamente a la resistencia del hormigón, sin embargo, el exceso de angularidad de las partículas debe ser



evitada ya que requerirá de mayores cantidades de agua y presenta reducciones en la trabajabilidad. Además, para un adecuado desempeño de los áridos gruesos se debe tratar en medida de lo posible que estos se encuentren limpios y libres de impurezas, (Portugal, 2007).

2.1.2.1.2. Agregado fino:

Un buen agregado fino es aquel que presenta partículas redondeadas y de textura suavizada, ya que este tipo de material requiere menor cantidad de agua. Se recomienda además un módulo de finura superior o semejante a 3, ya que estos presentan mejores trabajabilidad y resistencias a compresión. La granulometría de los agregados finos no representa un papel importante cuando se trata de hormigones con relaciones a/c bajas, (Portugal, 2007).

A continuación, se presenta las siguientes tablas resumen que indican la norma que se siguió para realizar los ensayos en árido grueso y árido fino.

Tabla 1. Ensayos a realizar en el agregado grueso y su norma correspondiente.

| Normas Utilizadas | | |
|---|-------------------|---|
| Ensayo | Norma ASTM | Manual de Carreteras Boliviano Volumen 4 |
| Peso Volumétrico Suelto | ASTM C29 | H0108 |
| Peso Volumétrico Compactado | ASTM C29 | H0108 |
| Peso Específico y Absorción | ASTM C127 | H0109 |
| Granulometría | ASTM C33 | |
| Ensayo de Abrasión Mediante la Máquina de los Ángeles | ASTM C131 | H0111 |

Tabla 2. Ensayos a realizar en el agregado fino y su norma correspondiente.

| Normas Utilizadas | | |
|-----------------------------|-------------------|---|
| Ensayo | Norma ASTM | Manual de Carreteras Boliviano Volumen 4 |
| Peso Volumétrico Suelto | ASTM C29 | H0108 |
| Peso Volumétrico Compactado | ASTM C29 | H0108 |
| Peso Específico y Absorción | ASTM C128 | H0110 |
| Granulometría | ASTM C33 | |



2.1.2.2. Peso volumétrico suelto.

Para la determinación del peso volumétrico suelto la norma establece el siguiente procedimiento:

- A una distancia de 5cm de la parte superior del recipiente, se descarga el material con la ayuda de una pala, hasta que el recipiente se llene.
- Distribuir uniformemente el vaciado
- Sin apisonar, enrasar la superficie del recipiente.
- Determinar y registrar la masa utilizada de árido para llenar el recipiente.

La fórmula empleada para determinar el peso volumétrico suelto es la siguiente:

$$\rho_s(\text{g/cm}^3) = \frac{ms(\text{g})}{V(\text{cm}^3)} \quad \text{Ec. 1 Peso volumétrico suelto}$$

Donde:

ms: masa suelta que llena el recipiente

V: volumen del recipiente

2.1.2.3. Peso volumétrico compactado

Para la determinación del peso volumétrico compactado la norma establece el siguiente procedimiento:

- Se llena el recipiente en tres capas con medidas aproximadamente iguales, con un exceso de material en la última capa para enrasar.
- Después de cada capa compactar con 25 golpes uniformemente distribuidos en el recipiente, penetrando el pisón hasta la capa anterior.
- Enrasar la superficie al final de la tercera capa.
- Determinar y registrar la masa de los áridos compactados necesarios para llenar el recipiente

La fórmula empleada para determinar el peso volumétrico suelto es la siguiente:

$$\rho_c \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{mc(\text{g})}{V(\text{cm}^3)} \quad \text{Ec. 2 Peso volumétrico compactado}$$

Donde:

mc: masa compactada que llena el recipiente

V: volumen del recipiente

2.1.2.4. Peso específico y absorción

El peso específico es un factor de gran importancia para los agregados que van a formar parte de los hormigones de alta resistencia, constituye una medida de la calidad del material, ya que un peso específico bajo indica altas porosidades, baja resistencia y absorción del material.



Universidad de Cuenca

La norma define el peso específico real como aquel que considera el volumen macizo de las partículas de árido, más los poros accesibles e inaccesibles de estas partículas. Se debe determinar la densidad real de áridos en estado seco y en estado saturado superficialmente.

El peso específico neto considera el volumen macizo de las partículas de árido más el volumen de los poros inaccesibles.

La absorción se define como masa de agua necesaria para llevar un material árido del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa de material seco.

Agregado grueso

El procedimiento empleado para determinar las propiedades antes mencionadas se detalla a continuación:

- Inicialmente la muestra requiere un proceso de lavado y secado.
- Sumerja la muestra en agua por un lapso de 24h
- Retire la muestra del agua y seque superficialmente sus partículas, determinar su peso y registrarlo como M_{sss}
- Inmediatamente colocar la muestra en la canastilla que cuelga de la balanza hidráulica.
- Sumergir la muestra por aproximadamente 3min, pesar y registrar su masa como M_{sum}
- Sacar la muestra y secarla al horno hasta que llegue a una masa constante, pesar y registrar esta masa como M_s

Las fórmulas empleadas para la determinación de las propiedades se detallan a continuación:

Densidad real de áridos saturado superficialmente seco

$$P_{RT} = \frac{M_{sss}}{M_{sss} - M_{sum}} \quad \text{Ec. 3 Densidad real sss, agregado grueso}$$

Densidad real de áridos seco

$$P_{RS} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sum}} \quad \text{Ec. 4 Densidad real seca, agregado grueso}$$

Densidad neta

$$P_N = \frac{M_s}{M_s - M_{sum}} \quad \text{Ec. 5 Densidad neta, agregado grueso}$$



Absorción del agua

$$\alpha(\%) = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \quad \text{Ec. 6 Absorción, agregado grueso}$$

Donde:

M_{sum}: masa del árido sumergido

M_{sss}: masa del árido en estado saturado superficialmente seco

M_s: masa del árido seco

Agregado fino

El procedimiento empleado para determinar las propiedades se detalla a continuación.

- Secar el material al horno hasta obtener una masa constante
- Saturar el material en un recipiente, utilizando el mínimo de agua necesario para cubrirlo, durante 24h
- Eliminar lentamente el exceso de agua, con el fin de no perder material.
- Secar la muestra hasta que el material se encuentre en la condición sss
- La condición sss se la determina a través del molde cónico, en una superficie lisa y con el diámetro mayor del cono hacia abajo, llenar con árido en tres capas, después de cada capa compactar suavemente con 25 golpes desde una altura libre del pisón de 5mm aproximadamente, y finalmente enrasar la superficie del cono
- Levantar el cono verticalmente, si se conserva la forma del cono el material no se encuentra en condición sss, para ello el material deberá ser extraído y secado nuevamente, para repetir el procedimiento hasta lograr la condición deseada (cuando al retirar el cono el material, éste caiga lentamente sobre su talud natural)
- Cuando se obtenga la condición desea registrar la masa del material como M_s
- Colocar la muestra antes determinada en el matraz y colocar agua hasta cubrir los 2/3 del volumen del matraz
- Eliminar las burbujas de aire e impurezas que se observen dentro del matraz
- Dejar reposar por aproximadamente 1h
- Llenar el matraz con agua hasta la marca de calibración, registrar la masa del matraz con la muestra y el agua como M_m
- Sacar la muestra del matraz evitando perdidas, y registrar su masa como M_s
- Colocar solamente agua hasta la marca de calibración del matraz y registrar su masa como M_a

Para determinar las propiedades se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Densidad real de áridos saturado superficialmente seco

$$P_{RT} = \frac{M_{sss}}{M_a + M_{sss} + M_m} \quad \text{Ec. 7 Densidad real sss, agregado fino}$$



Densidad real de áridos seco

$$P_{RS} = \frac{M_s}{M_a + M_{SSS} - M_m} \quad \text{Ec. 8 Densidad real seca, agregado fino}$$

Densidad neta

$$P_N = \frac{M_s}{M_a + M_s - M_m} \quad \text{Ec. 9 Densidad neta, agregado fino}$$

Absorción del agua

$$\alpha(\%) = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \quad \text{Ec. 10 Absorción, agregado fino}$$

Donde:

Ms: masa del árido seco

Msss: masa del árido en estado saturado superficialmente seco

Ma: masa del matraz con agua hasta la marca de calibración

Mm: masa del matraz con el agua más la muestra, hasta la marca de calibración

Generalmente los agregados naturales presentan valores de peso específico de alrededor de 2.6 a 2.7, para material triturado el rango de variación es mayor. A continuación, se presentan valores típicos de peso específico de las diferentes rocas:

Tabla 3. Valores de referencia de peso específico para agregados naturales

| Grupo de Roca | Peso Específico Promedio | Amplitud de Densidad |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Basalto | 2.80 | 2-6 a 3.0 |
| Pedernal | 2.54 | 2.4 a 2.6 |
| Granito | 2.69 | 2.6 a 3.0 |
| Arenisca | 2.69 | 2.6 a 2.9 |
| Hornfelsa | 2.82 | 2.7 a 3.0 |
| Caliza | 2.66 | 2.5 a 2.8 |
| Pórfido | 2.73 | 2.6 a 2.9 |
| Cuarcita | 2.62 | 2.6 a 2.7 |

2.1.2.5. Granulometría

La norma define como granulometría a la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido. En realidad este es un ensayo muy sencillo, en síntesis consiste en hacer pasar por una serie de tamices el agregado a utilizar, luego se determina el peso de los agregados retenidos en cada uno de los tamices ensayados, para formar así una curva granulométrica, la cual deberá estar en sistema de coordenadas ortogonal, cuya abscisa, a escala logarítmica, indica las aberturas nominales de los tamices,

mientras que la ordenada, a escala lineal, muestra la cantidad de material retenido en cada uno de los tamices.

Para el presente trabajo, se utilizó una granulometría controlada, es decir se tamizaron y usaron cantidades específicas de material, de tal manera que todas las mezclas realizadas tuvieran exactamente la misma gradación, tanto de agregado grueso como fino. Esto se lo realizó con el fin de eliminar variables, que pudieran presentarse en las mezclas, y poder ejecutar futuros ensayos previos de manera más estandarizada al incorporar las mismas características granulométricas a la mezcla.



Ilustración 3. Separación en tamices del agregado.

La norma ASTM C33 establece límites inferior y superior de gradación que deben cumplir los agregados, en base al tamaño máximo de sus partículas.

El tamaño Máximo de un agregado, es un tamaño inferior que aquél a través del cual se requiere que pase el 100% del material. Si el tamaño máximo de árido requerido es de $3/4$ " , el 100% deberá pasar el tamiz anterior (1") y casi en su totalidad (entre 90-100%) el tamiz de $3/4$ ". Varios autores coinciden que el tamaño máximo de agregado debe variar de $1/2$ " a $3/4$ " , los agregaos de mayor tamaño a lo sugerido presentan problemas de adhesión.

2.1.2.5.1. Agregado grueso

El material utilizado corresponde a roca triturada proveniente de la mina "Vipeza" con un tamaño máximo nominal $3/4$ " el cual de acuerdo con la teoría es el máximo tamaño que aporta con gran significancia, un aumento de resistencia y máxima adherencia con el cemento, además este tamaño presenta adecuada trabajabilidad y su uso en las armaduras no es dificultoso como sucede con agregados de tamaño superior a este.



Debido a que el tamaño máximo del material seleccionado es $\frac{3}{4}$ ", los rangos de gradación a elegirse de la siguiente tabla pueden ser las filas 6 y 7, sin embargo, para tener un mayor control de la granulometría se eligió la fila 6.

Tabla 4. Selección de límites de gradación para agregado grueso, en función del tamaño máximo del agregado. Fuente: ASTM C33

| Tamaño nominal | Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), % en peso | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---|-----------|----------|-----------|----------|-------------|------------|------------|------------|-----------|---------------|---------------|----------------|
| | 4" 100 mm | 3½" 90 mm | 3" 75 mm | 2½" 63 mm | 2" 50 mm | 1½" 37.5 mm | 1" 25.0 mm | ¾" 19.0 mm | ½" 12.5 mm | ⅜" 9.5 mm | No. 4 4.75 mm | No. 8 2.36 mm | No. 16 1.18 mm |
| 3½" a 1½" | 100 | 90-100 | - | 25-60 | - | 0-15 | - | 0-5 | | | | | |
| 2½" a 1½" | - | - | 100 | 90-100 | 35-70 | 0-15 | - | 0-5 | | | | | |
| 2" a No. 4 | - | - | - | 100 | 95-100 | - | 35-70 | - | 10-30 I | - | 0-5 | | |
| 1½" a No. 4 | - | - | - | - | 100 | 95-100 | - | 35-70 | - | 10-30 I | 0-5 | | |
| 1" a ¾" | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 40-85 | 10-40 I | 0-15 | 0-5 | | |
| 1" a No. 4 | - | - | - | - | - | 100 | 95-100 | - | 25-60 | - | 0-10 | 0-5 | |
| ¾" a No. 4 | - | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | - | 20-55 | 0-10 | 0-5 | |
| 2" a 1" | - | - | - | 100 | 90-100 | 35-70 | 0-15 | - | 0-5 | | | | |
| 1½" a ¾" | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 20-55 | 0-15 | - | 0-5 | | | |
| 1 a ½" | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 20-55 | 0-10 | 0-5 | | | |
| ¾" a ⅜" | - | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 20-55 | 0-15 | 0-5 | | |
| 1½" a No. 4 | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | 40-70 | 0-15 | 0-5 | |
| ¾" a No. 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 85-100 | 10-30 I | 0-10 | 0-5 |

Para que el material se encuentre dentro de los límites establecidos se seleccionó el promedio de dichos límites, para el material pasante.

2.1.2.5.2. Agregado fino

El material utilizado proviene las minas de Santa Isabel. Para la selección de la granulometría de este material, se respetó los límites establecidos en la siguiente tabla dispuesta por la norma ASTM C33, sin embargo, los valores adoptados no fueron un promedio de los límites como se realizó en el agregado grueso, para este caso se buscó una granulometría que permitiera tener un módulo de finura mayor a 2.5, como lo establece la teoría en la parte de recomendaciones para la selección del agregado fino.

Tabla 5. Requisitos de gradación para agregado fino. Fuente: ASTM C 33

| Tamiz | Porcentaje que pasa |
|-------|---------------------|
| 3/8" | 100 |
| N°4 | 95-100 |
| N°8 | 80-100 |
| N°16 | 50-85 |
| N°30 | 25-60 |
| N°50 | 10-30 |
| N°100 | 2-10 |

Para el cálculo del módulo de finura se usa la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{\sum \%retenido_{acumulado}(No. 100 + No. 50 + No. 30 + No. 16 + No. 8 + No. 4)}{100} \quad \text{Ec. 11 Módulo de finura}$$



2.1.2.5.3. Arena de sílice

Para la selección de su granulometría, se escogió el valor promedio de los límites establecidos en la norma H0213 del manual de carreteras volumen 4 o ASTM C109.

Tabla 6. Requisitos de gradación para arena de sílice. Fuente: H0213 del manual de carreteras vol. 4.

| Tamices | | % que pasa |
|---------|-------|------------|
| 1.18mm | N°16 | 100 |
| 600µm | N°30 | 96-100 |
| 300µm | N°50 | 23-33 |
| 150µm | N°100 | 0-4 |

2.1.2.6. Ensayo de abrasión

Mediante este ensayo se determina la resistencia al desgaste de los áridos, con la máquina de Los Ángeles.

El procedimiento para su ejecución se detalla a continuación:

- Según la granulometría de la muestra, se eligió de la siguiente tabla procedente de la norma H0111 el grado de ensayo que mejor represente la gradación de la muestra. Seleccionando un tamaño de fracciones tipo 5, al cual le corresponde una carga abrasiva de 11 bolas y 500 revoluciones.

Tabla 7. Grados de ensayo en función de los rangos de tamaño de partícula.

| Tamaño de Partículas (mm) | ASTM | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------------------|-------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | (75-37,5) (3" - 1 1/2") | (50-2,36) (2" - N°8) | (37,5-19) (1 1/2" - 3/4") | (37,5-9,5) (1 1/2" - 3/8") | (19-9,5) (3/4" - 3/8") | (9,5-4,75) (3/8" - N° 4) | (4,75-2,36) (N° 4 - N° 8) |
| Tamaño de las fracciones (g) | | | | | | | | |
| 75 - 63 | 3" - 2 1/2" | 2.500 ± 50 | | | | | | |
| 63 - 50 | 2 1/2" - 2" | 2.500 ± 50 | | | | | | |
| 50 - 37,5 | 2" - 1 1/2" | 5.000 ± 50 | 5.000 ± 25 | | | | | |
| 37,5 - 25,0 | 1 1/2" - 1" | | 5.000 ± 50 | 5.000 ± 25 | 1.250 ± 10 | | | |
| 25,0 - 19 | 1" - 3/4" | | | 5.000 ± 25 | 1.250 ± 25 | | | |
| 19 - 12,5 | 3/4" - 1/2" | | | | 1.250 ± 10 | 2.500 ± 10 | | |
| 12,5 - 9,5 | 1/2" - 3/8" | | | | 1.250 ± 25 | 2.500 ± 10 | | |
| 9,5 - 6,3 | 3/8" - 1/4" | | | | | | 2.500 ± 10 | |
| 6,3 - 4,75 | 1/4" - N° 4 | | | | | | 2.500 ± 10 | |
| 4,75 - 2,36 | N°4 - N°8 | | | | | | | 5.000 ± 10 |
| Masa inicial de muestra (Mi) | | 10.000 ± 100 | 10.000 ± 75 | 10.000 ± 50 | 5.000 ± 10 | 5.000 ± 10 | 5.000 ± 10 | 5.000 ± 10 |
| Esferas | | 12 | | 12 | | 11 | 8 | 6 |
| numero masa (g) | | 5.000 ± 25 | | 5.000 ± 25 | | 4.584 ± 25 | 3.330 ± 25 | 2.500 ± 15 |
| Numero de revoluciones | | 1.000 | | | 500 | | | |

- Se peso el material correspondiente al grado elegido según la tabla anterior, y se registró el total de las masas como masa inicial.
- Se colocó la masa inicial en la máquina de los ángeles para su ensayo según lo establecido.
- Cuando el número de revoluciones se completó, se sacó el material evitando perdidas.
- Se separo el material abrasivo (bolas)



- Se ejecutó un primer tamizado en un tamiz superior al tamiz de corte (#12) a fin de evitar daños en dicho tamiz.
- Se tamizó el material por el tamiz #12
- El material sobre los tamices fue lavado y secado, para finalmente registrar la masa del material como masa final

La fórmula empleada para determinar el porcentaje de pérdida del material es la siguiente:

$$P (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad \text{Ec. 12 Porcentaje de perdida}$$

Donde:

P: pérdida de masa

mi: masa inicial

mf: masa final

2.1.3. Adiciones minerales (humo de sílice)

Características del humo de sílice

La ACI define al humo de sílice como un producto no cristalino muy fino, producido en hornos de arco eléctrico como subproducto de la producción de silicio elemental. Este producto es un polvo de color gris, algo similar al cemento portland o las cenizas volantes. En la siguiente imagen se puede apreciar el aspecto que presenta, (Holland, 2005).



Ilustración 4. Humo de sílice.

El término adiciones minerales es importante ya que así se lo puede distinguir de adiciones químicas, las adiciones minerales son aquellos compuestos naturales considerados como materiales cementantes complementarios. Dentro de las adiciones minerales se encuentran materiales como: cenizas volantes, escoria de altos horno, puzolanas naturales y humo de sílice, estando este último en auge, principalmente por las excelentes propiedades que éste ha proporcionado a los hormigones, muchos estudios se han realizado para que



este tipo de minerales fuesen aceptados y ganen confianza en la industria de producción de hormigones, a continuación se mencionan algunos de investigadores que aseguran los beneficios que estos minerales presentan:

Por cada 15% de humo de sílice que se agregue en lugar del cemento, hay aproximadamente 2 millones de partículas de sílice por cada grano de cemento, el microsíllice es un material extremadamente fino, que permite la reducción de la cantidad de agua de la mezcla, ya que ocupa los espacios que existen entre los granos de cemento, cambiando sin duda las propiedades del hormigón (Bentur & Cohen, 1987), la simple presencia de numerosas partículas finas, sean puzolánicas o no, tiene un efecto catalizador sobre la hidratación del cemento, durante la etapa inicial (Maage & Sellevold, 1987).

En hormigones endurecidos, las partículas de sílice incrementan el acomodo del material sólido al llenar los espacios entre los granos de cemento, de la misma manera como el cemento llena los espacios entre las partículas de agregado fino, y éstas llenan los espacios entre las partículas de agregado grueso en el concreto. Esta analogía se aplica únicamente cuando las fuerzas superficiales entre partículas de cemento son despreciables, esto es, cuando existe suficiente aditivo presente para compensar el efecto de las fuerzas superficiales, (Portugal, 2007).

2.1.4. Aditivos químicos

Los aditivos químicos son sustancias fabricadas por el hombre, debido a la necesidad de mejorar ciertas características (resistencia, trabajabilidad, fraguado, durabilidad) del hormigón, mortero o pasta, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Los aditivos son agregados a la mezcla antes, durante o después del amasado. El uso de estos aditivos debe ser cuidadoso, verificando siempre que estos provoquen las reacciones requeridas, debido a las propiedades que pudiesen tener los diferentes cementos que se comercializan, (Romo, 2008).

Según la norma ASTM C 494, los aditivos pueden ser clasificados como se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Clasificación de aditivos químicos. Fuente: ASTM C 494

| Tipo de aditivo | Característica |
|------------------------|--------------------------------------|
| <i>Tipo A</i> | <i>Reductor de agua</i> |
| <i>Tipo B</i> | <i>Retardante</i> |
| <i>Tipo C</i> | <i>Acelerante</i> |
| <i>Tipo D</i> | <i>Reductor de agua y retardante</i> |
| <i>Tipo E</i> | <i>Reductor de agua y acelerante</i> |



| | |
|---------------|--|
| <i>Tipo F</i> | <i>Reductor de agua de alto rango</i> |
| <i>Tipo G</i> | <i>Reductor de agua de alto rango y retardante</i> |
| <i>Tipo S</i> | <i>Aditivos de desempeño específico</i> |

Como se puede apreciar son varios los tipos de aditivos químicos que se encuentran presentes en el mercado, ya que, cada uno de ellos cumple con una función específica en los hormigones, morteros o pastas, sin embargo, en el presente trabajo se les dará especial mención a los aditivos reductores de agua de alto rango (tipo F), ya que, estos fueron los empleados en la producción de hormigones de alto desempeño elaborados por los autores.

Reductor de agua (plastificantes)

Los aditivos reductores de agua se pueden utilizar para los siguientes beneficios (Quiroz & Salamanca, 2006):

- Mejorar la trabajabilidad: cuando se desea mejorar este aspecto, se agrega a la mezcla el aditivo plastificante, es decir, sin modificar la relación a/c, así el resto de propiedades del hormigón no cambian.
- Mejorar la resistencia del hormigón: para ello se reduce la relación/ agua cemento, la misma que puede disminuir hasta en un 15%, mejorando de manera significativa la resistencia del hormigón en estado endurecido.
- Se puede además cubrir los dos aspectos antes mencionados al mismo tiempo.

Reductor de agua de alto rango (superplastificantes)

Estos aditivos son la evolución de los aditivos plastificantes, en esencia estos “cumplen las mismas funciones que los aditivos reductores de agua, pero, su efecto es más enérgico”, (Quiroz & Salamanca, 2006).

Este tipo de aditivo puede reducir el agua de amasado hasta en 30%, pudiendo alcanzar gracias a esto altas resistencias, otro de los beneficios de este aditivo es que no requiere de mecanismos de vibración o golpe, para que este cubra todas las áreas que se desean llenar de mezcla, ya que los hormigones que se elaboran con los superplastificantes se vuelven autonivelantes y autocompactantes, sin embargo, es importante mencionar que a medida que pasa el tiempo se pierde revenimiento, por lo que la mezcla se debe usar en un tiempo máximo de 30 a 60 minutos después de haberla hecho, (Quiroz & Salamanca, 2006).

A continuación, se mencionan 3 funciones especiales de los aditivos superplastificantes:

- Mejorar la trabajabilidad: sin cambiar las propiedades del diseño, aumenta significativamente la manejabilidad de la mezcla.



- Incrementar la resistencia: esto se logra gracias a la reducción de la cantidad de agua la cual puede llegar a reducirse en un valor de hasta el 40%.
- Disminuir la cantidad de cemento: si bien es cierto se disminuye la cantidad de cemento, pero realizando un análisis económico no existe beneficio como tal.

Para la presente investigación, como agente reductor de agua de alto rango con polímeros de policarboxilatos se seleccionó al aditivo líquido Viscocrete 4100, el cual puede lograr reducciones de agua de hasta un 45% en altas dosis. Permite altos asentamientos, hormigones fluidos con alto mantenimiento de la trabajabilidad por más de una hora y con relaciones a/c tan bajas como 0.25, plastificando el hormigón con alta fluidez, pero manteniendo la cohesión, evitando así la segregación.

2.1.4.1. Ensayo de demanda de agua con el material cementante

Mediante este ensayo se logrará obtener el porcentaje óptimo de aditivo que permita tener la máxima compactación y mínima relación a/c, en función de la capacidad que tiene el material cementante de reaccionar ante aditivos plastificantes y reductores de agua de alto rango.

La esencia de este ensayo se encuentra en la floculación generada en el cemento a causa de la presencia de los aditivos plastificantes que se utilizan en el hormigón.

Se realiza bajo el siguiente procedimiento:

Se coloca una cantidad de cemento P_p de cemento en un recipiente, se añade una cantidad de agua P_e necesaria para que la mezcla pase de un estado de tierra húmeda a un estado de pasta homogénea, esta es considerada como la cantidad de agua que llena la porosidad del acomodo de los granos de cemento. La compactación es determinada por la siguiente ecuación: (Portugal, 2007):

$$C = \frac{1000}{1000 + d * \frac{P_e}{P_p}} \quad \text{Ec. 13 Compactación}$$

Donde:

d: peso específico del cemento en kg/m^3

P_e : agua total de la mezcla

P_p : masa del material cementante en la mezcla

La dificultad de este método se encuentra tanto en el reconocimiento visual del cambio al estado de pasta homogénea y el brusco cambio de estado de un material semejante a tierra húmeda, a un estado de pequeños flóculos brillantes, por el incremento de una pequeña cantidad de agua. En la siguiente ilustración se muestra cómo se consideró el estado de pasta homogénea



Ilustración 5. Pasta homogénea para determinar la compacidad del cemento.

Procedimiento del ensayo:

El método adoptado para el ensayo es el siguiente:

- Se preparó una reserva de agua medida a $20^{\circ}\text{C.} \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Se coloca una masa $P_p = 50\text{g}$ entre cemento y humo de sílice, en un recipiente de goma, con una cierta cantidad de aditivo, desde el 0% al 2% del peso del cemento.
- Se aumenta la cantidad de agua con ayuda de jeringuillas, hasta tener la masa homogénea que se muestra en la ilustración anterior.
- El ensayo se repite con una cantidad de agua ligeramente inferior al total obtenido durante el primer ensayo para así poder obtener un promedio de los dos ensayos.
- Conforme aumenta la dosificación del aditivo, la cantidad de agua necesaria para el cambio de estado se ve reducida.
- Conforme aumenta la cantidad de humo de sílice se ve aumentada la cantidad de agua necesaria para llegar al cambio de estado de la mezcla.

Se obtiene curvas de comportamiento del porcentaje de aditivo vs compacidad, humo de sílice vs compacidad, aditivo vs relación a/c y humo de sílice vs relación a/c, mediante las cuales se obtendrá la cantidad de aditivo óptimo que produzca la mayor compacidad y menor relación a/c con los diferentes porcentajes de humo de sílice (Portugal, 2007).

2.1.5. Cemento

Los hormigones se encuentran conformados principalmente por cemento, el cual cumple la importante función de adhesión y cohesión. Para la fabricación de hormigones se utiliza el cemento hidráulico, “el cual fragua y endurece por la interacción química con el agua, tanto al aire como bajo el agua, a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables”, (Quiroz & Salamanca, 2006).

Existen diferentes tipos de cementos hidráulicos: cemento natural, cemento con alto contenido de alúmina y cemento portland, siendo este último el más vendido en el mercado. Se encuentra compuesto principalmente de silicato de calcio y



aluminio, provenientes de la combinación de calizas, arcillas o pizarras, y yeso, dosificadas en medidas determinadas y molidas juntamente, para luego llevarlas a un proceso de calcinación a una temperatura de alrededor de 1400°C, necesaria para alcanzar el producto final, (Cabrera, 2015).

En Ecuador la industria del cemento se encuentra liderada en el sector público por la empresa Holcim y Lafarge con una participación del 85% en el medio, mientras que las empresas públicas como Guapán y Chimborazo presentan una participación del 15%, (Cabrera, 2015).

Clasificación y usos del cemento

- Según la norma ASTM C150

Tipo I— Conocido como Portland ordinario, constituye el cemento de mayor consumo en el mercado. Utilizados en obras comunes en las cuales el cemento no estará expuesto a la acción de agentes agresivos (sulfatos), ya sea en el ambiente, en el suelo o en el agua del subsuelo.

Tipo II— Se caracteriza por tener menor calor de fraguado que el Tipo I. Utilizado para obras que requieran moderada resistencia a sulfatos o moderado calor de hidratación, ideal para obras marinas u obras enterradas.

Tipo III— Fabricado para aquellas obras en cuyo proceso de construcción se encuentra agua presente, obras que requieren un fraguado rápido, ya que son inestables. El curado en este tipo de cementos es importante debido a que el calor de fraguado se produce con mayor rapidez, por lo tanto, requiere especial cuidado.

Tipo IV— Se usa en obras en las que se requiere controlar el calor de hidratación durante el proceso de fraguado, usado para obras de grandes volúmenes continuos de hormigón. A este cemento se lo conoce también como cemento de fraguado lento.

Tipo V— Son usados para obras que tienen una alta exposición a sulfatos, agente que causa desintegración progresiva y destrucción de la estructura interna del material compuesto.

(Romo, 2008)

- Según la norma INEN 2380 y ASTM C1157

Tipo GU— Cemento usado para construcciones normales, obras que no requieren cumplir con requisitos especiales. Se asume que se trata de este tipo de cemento cuando no se especifica lo contrario.

Tipo HE—Resistencias altas a tempranas edades.

Tipo MS—Moderada resistencia a sulfatos.

Tipo HS—Alta Resistencia a sulfatos.



Universidad de Cuenca

Tipo MH—Moderado calor de hidratación.

Tipo LH—Bajo calor de hidratación.

Adicionalmente existe una subclasificación que se aplica a cualquiera de los tipos de cemento citados anteriormente, representado por la letra “R” que va al final del nombre del tipo. E indica una baja reacción de los agregados ante el álcali-sílice.

La elección del tipo de cemento Portland es muy importante para hormigones de alto desempeño, no solo la resistencia del tipo del cemento es importante sino también su uniformidad. Existen numerosos estudios los cuales han determinado la influencia de los diferentes tipos de cemento, así como de sus características físicas y químicas, en la efectividad de los aditivos y adiciones.

El cemento utilizado para la ejecución de la presente investigación fue el cemento Holcim Premium Tipo HE, debido a su frecuente uso en el país, ya que, uno de los objetivos es conseguir un producto final de alta calidad, usando materiales comunes y asequibles para la sociedad.

2.1.5.1. Resistencia a compresión de morteros

Se sigue la norma ASTM C109 correspondiente a la H0213, para los límites granulométricos estipulados en la norma. Esta norma se utiliza para determinar la capacidad a compresión de cubos de mortero de 5cm x 5cm.

El mortero se conforma por 1 parte de cemento y 2.75 partes de arena gradada por peso de materiales para el mortero, la relación a/c se varía desde 0.60 a 0.4 (la relación más baja), para poder elaborar los morteros.

Por cada relación a/c se realizaron 6 cubos de mortero para una cantidad de 1375g de arena y 500g de cemento, la cantidad de agua y aditivo varía en función de la relación a/c y la cantidad de aditivo determinado por el ensayo de demanda agua.

El procedimiento de apisonamiento de los morteros se los realizó en 32 golpes distribuidos en 4 etapas de 8 golpes adyacentes a cada una como se muestra en el siguiente esquema.

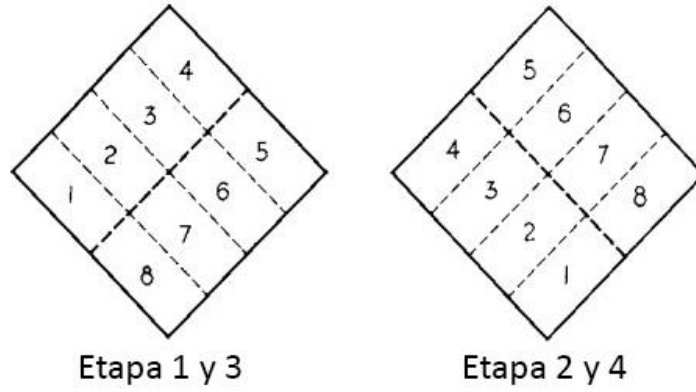


Ilustración 6. Orden de apisonamiento en los moldes ASTM C109.



Ilustración 7. Moldes para elaboración de morteros.



Ilustración 8. Ensayo de resistencia para morteros.



Ilustración 9. Mortero fallado.

2.2. Diseño, dosificación y elaboración de mezclas

Para determinar la mejor mezcla de partida (mezcla patrón) se realizaron 3 mezclas previas en base de los siguientes autores:

- Mezcla propuesta por ACI 211.1
- Mezcla propuesta por el Manual de Usuario del Humo de Sílice
- Mezcla desarrollada por (Bacuilima & Guillen, 2019) de la Universidad de Cuenca.

Tabla 9. Mezclas previas recomendadas como datos de partida

| Fuente | $f'c$ 28 días | Cemento | Arena Seca | Grava Seca | Agua | Aditivo | a/c |
|-------------------------------------|---------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------|----------------|------------|
| ACI 211.1 | 534.74 | 909.1 | 396.86 | 870 | 218.2 | 1.2% | 0.24 |
| Manual de Usuario de Humo de Sílice | 523.55 | 475 | 632 | 1011 | 114 | 0.9% | 0.24 |
| Bacuilima | 538.07 | 793 | 698.3 | 783.6 | 190.3 | 0.9% | 0.24 |

De las cuales, y en base a criterios de resistencia y segregación, se seleccionó la mejor dosificación, perteneciente a la tesis desarrollada por (Bacuilima & Guillen, 2019) de la Universidad de Cuenca.

A continuación, se presentan las dosificaciones y metodologías de diseño de los autores antes mencionados

2.2.1. Diseño de Hormigón Método ACI 211.4R

El método propuesto por el comité 211.4R del ACI abarca el rango de resistencia entre 420 kg/cm² y 840 kg/cm², este método es aplicable a hormigones de peso normal. Las consideraciones básicas de este método al igual que en el método para hormigones convencionales es la determinación de la cantidad de los materiales requeridos para producir un hormigón con las propiedades en estado fresco y endurecido deseadas y a un bajo costo.



El procedimiento consiste en una serie de pasos, con los cuales se debe cumplir los requerimientos de resistencia y trabajabilidad deseados, el método recomienda elaborar varias pruebas en laboratorio y en el campo hasta encontrar la mezcla deseada.

El uso de esta guía abarca la selección de proporciones de materiales para la producción de hormigones de alta resistencia, no solo para mezclas con material cementicio como el cemento Portland sino otros materiales cementicios como: cenizas volantes, humo de sílice y escoria de altos hornos.

La metodología presentada es semejante a la del ACI 211.1 que abarca las resistencias entre 140 kg/cm^2 y 420 kg/cm^2 , para la producción de hormigones con la incorporación de humo de sílice la ACI sugiere el uso del libro de Manual de Usuario de Humo de sílice “Silica Fume User’s Manual” del cual se basa la ACI 211.4R para la producción de dichos hormigones.

2.2.2. Manual de usuario de humo de sílice o “Silica Fume User’s Manual”

En el capítulo 6 de este manual se presenta la metodología de diseño, la cual se basa en el registro histórico de construcción donde se ha aplicado el humo de sílice. Este manual dice “no existe un método científico para realizar proporciones, lo que significa no hay tabla que pueda ser utilizada para derivar los ingredientes de una mezcla para llegar a un nivel de rendimiento”, existen tantas variables como para desarrollar una sola tabla y debido a la infinita variedad de materiales con distintas características es indispensable la labor de laboratorio para llegar al nivel de rendimiento y requisitos presentados.

El procedimiento a seguir para la aplicación del humo de sílice ha sido estudiado por muchos años y “es la mejor recomendación que se tiene disponible actualmente.”

2.2.2.1. Procedimiento de la metodología:

- Determinar los requerimientos del proyecto, tanto para capacidad como la proporción de la mezcla
 - Resistencia a compresión
 - Exposición a cloruros
 - Ciclos de hielo y deshielo
 - Tamaño máximo nominal del agregado
 - Exposición a químicos
 - Resistencia a abrasión
 - Restricciones de temperatura
 - Máximo contenido de agua
 - Contenido de materiales cementicios
 - Porcentajes de ceniza volante, escoria y humo de sílice
 - Asentamiento o “Slump”
- Iniciar seleccionando la mezcla



- Determinar el volumen de aire contenido

Es esencial este parámetro en hormigones que van a estar expuestos al hielo y deshielo.

- Incorporar agregados locales en la mezcla inicial, esto tiene dos consideraciones
 - Calcular el volumen total de agregados en 1 m³ de hormigón, usar una relación de agregado fino y grueso que trabaje bien con los materiales del proyecto. Esta relación se puede determinar en laboratorio, esta influye altamente en la trabajabilidad de la mezcla mas no las propiedades del hormigón endurecido.
 - Debido a la naturaleza tan fina del humo de sílice es un buen punto de inicio partir con una mezcla baja en arena en comparación a las mezclas tradicionales sin humo de sílice. Si no se tiene una relación adecuada de agregados se puede utilizar el método descrito en la ACI 211.1 (Dixon et al., 1991).
- Preparar mezclas de prueba en laboratorio

Este paso no es diferente al realizado normalmente en hormigones tradicionales, pero “Silica Fume Association” ha sido testigo de situaciones en las cuales hormigones preparados con humo de sílice en laboratorio ha fallado en producir la resistencia esperada en el hormigón, siendo estas a compresión o baja permeabilidad. Este problema es común en pequeños laboratorios y normalmente en mezcladoras menos eficientes.

Se debe tener en cuenta ciertas particularidades al trabajar con este material en laboratorio:

El humo de sílice es un polvo muy fino, aproximadamente 1/100 del diámetro de los granos del cemento portland. Cuando se utiliza para producir hormigones de alto desempeño, el valor típico ronda entre 4-15% del peso del cemento. La dosificación exacta depende de las características a alcanzar, la cantidad de humo de sílice comparado con los otros componentes del hormigón es mínima. Para que el humo de sílice sea efectivo en la mezcla se debe tomar en cuenta dos aspectos:

- Primero, las aglomeraciones que conforman el humo de sílice densificado se deben descomponer.
- Segundo, el humo de sílice debe ser distribuido de manera uniforme en el hormigón.

La clave para estos dos problemas es acoplar el humo de sílice en el momento adecuado y luego mezclar el concreto adecuadamente. La ASTM C192 en la sección 7.1.2 recomienda: “Mezclar el hormigón, después de que todos los componentes están en la mezcladora, por 3 minutos seguidos de 3 minutos de descanso, seguido de 2 minutos finales de mezclado.” Sin embargo, estas

recomendaciones de tiempo de mezclado no son suficientemente largas para romper las aglomeraciones y dispersar el humo de sílice.

2.2.3. Procedimiento de mezclado para elaboración de hormigones en laboratorio desarrollado por los autores.

A continuación, se detalla la metodología de mezclado para el proceso de elaboración de hormigones de alto desempeño

Paso 0. Todo el agregado utilizado en las mezclas, fue previamente lavado y secado para eliminar materia orgánica e impurezas, de igual manera se eliminaron las partículas redondas, muy elongadas y con gran porosidad, debido que estas son perjudiciales en el hormigón.



Ilustración 10. Paso 0 del procedimiento de mezclado.

Paso 1. Colocar $\frac{3}{4}$ del agua de amasado en la mezcladora



Ilustración 11. Paso 1 del procedimiento de mezclado.

Paso 2. Añadir todo el agregado grueso



Ilustración 12. Paso 2 del procedimiento de mezclado.

Paso 3. Añadir lentamente el humo de sílice, mientras la mezcladora se encuentre en movimiento. El humo de sílice siempre debe ser adicionado con el agregado grueso y parte del agua, caso contrario se puede pegar en las paredes de la mezcladora.



Ilustración 13. Paso 3 del procedimiento de mezclado.

Paso 4. Mezclar por 1.5 min



Ilustración 14. Paso 4 del procedimiento de mezclado.

Paso 5. Añadir el cemento lentamente, mientras la mezcladora se encuentre en movimiento.



Ilustración 15. Paso 5 del procedimiento de mezclado.

Paso 6. Mezclar por 1.5 min



Ilustración 16. Paso 6 del procedimiento de mezclado.



Universidad de Cuenca

Paso 7. Desprender el material adherido a las paredes de la concretera con la ayuda de una cuchareta.



Ilustración 17. Paso 7 del procedimiento de mezclado.

Paso 8. Añadir el material fino



Ilustración 18. Paso 8 del procedimiento de mezclado.

José David Castro Riquetti
Gabriela Lisseth Ojeda Bravo

Paso 9. Colocar el $\frac{1}{4}$ de agua restante, el 25% de agua reservada al final es utilizada para la incorporación de cualquier tipo de aditivo.



Ilustración 19. Paso 9 del procedimiento de mezclado.

Paso 10. Mezclar por 5 min

Paso 11. Detener por 3min la mezcla y limpiar las paredes de la mezcladora en caso de existir adherencia de material en la misma.

Paso 12. Mezcla por 5min

Paso 13. El material debe ser vertido en su molde lo antes posible ya que como se mencionó en los antecedentes este tipo de hormigones pierde revenimiento al paso del tiempo tras culminar el mezclado.



Ilustración 20. Paso 13a del procedimiento de mezclado.



Ilustración 21. Paso 13b del procedimiento de mezclado

El tiempo de mezclado puede variar dependiendo de las características de la mezcladora por lo cual el tiempo de mezclado puede ser extendido, el hormigón con humo de sílice no puede ser sobre mezclado (“over mixed”).

2.3. Trabajabilidad del hormigón

2.3.1. Revenimiento del hormigón (cono de Abrams)

Para determinar el revenimiento del hormigón se sigue la norma ASTM C143 o H0304 de la norma boliviana de carreteras, siguiendo la metodología tradicional del cono de Abrams y clasificando en función del asentamiento según la siguiente tabla.

Tabla 10. Medidas de comparación de consistencia para revenimiento. Fuente: (Arnold et al., 2009).

| Consistencia | Revenimiento, mm. | Revenimiento, pulg. |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <i>Extremadamente seco</i> | - | - |
| <i>Muy rígido</i> | - | - |
| <i>Rígido</i> | 0 a 25 | 0 a 1 |
| <i>Plástico rígido</i> | 25 a 75 | 1 a 3 |
| <i>Plástico</i> | 75 a 125 | 3 a 5 |
| <i>Muy plástico</i> | 125 a 190 | 5 a 7 ½ |



Ilustración 22. Revenimiento del hormigón.



Ilustración 23. Revenimiento del hormigón.

2.3.2. Fluidez del hormigón o “Slump-Flow test”

Para medir la trabajabilidad se utiliza el cono de Abrams invertido de acuerdo con la norma ASTM C1611, los hormigones autocompactantes son mezclas que fluyen por su propio peso, sin segregarse, y no requieren consolidación interna con vibradores.

"La manejabilidad es una propiedad del concreto que permite al mismo, ser mezclado, transportado, vaciado, consolidado y terminado. La manejabilidad no debe alterar la homogeneidad del concreto" (Moreno, 2014).

Para poder clasificar el grado de trabajabilidad del hormigón se utilizarán las siguientes tablas de clasificación de acuerdo con la norma europea y británica de carreteras respectivamente.

Tabla 11. Clases de consistencia para hormigones autocompactantes. Fuente: (BSI, 2009).

| Tipo de consistencia | Estado de flujo (cm) | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| F1 | ≤34 | Rígido |
| F2 | 35 – 41 | Plástico |
| F3 | 42 – 48 | Suave |
| F4 | 40 – 55 | Muy suave |
| F5 | 56 – 62 | Fluido |
| F6 | 63 – 69 | Muy fluido |
| SCC | ≥70 | Autocompactante |



Ilustración 24. Slump-flow test.

2.4. Propiedades del hormigón endurecido

2.4.1. Absorción y densidad del hormigón endurecido

Para determinar la absorción y densidad del hormigón endurecido se sigue la norma ASTM C642, sin realizar los ensayos de llevar las probetas a un punto de ebullición en agua sino solamente se realiza el procedimiento de sumergencia y secado en horno.

El análisis de la densidad del hormigón requirió una corrección extra debido a la reducción del volumen de las probetas de hormigón a causa de la presencia de orificios pequeños pero numerosos, conforme aumentaba el porcentaje de humo de sílice la compactación de las probetas se veía comprometida, a partir del 10% de humo de sílice el tamaño y número de los orificios aumentaba, siendo así más significativo la reducción del volumen. Debido a esto se requiere multiplicar por un factor de aumento al peso de cada cilindro ya que se considera el volumen

de un cilindro sin imperfecciones, para lo cual se analizó la superficie de los cilindros separando por sectores y colocando un porcentaje que representa la cantidad de agujeros en la superficie.

La superficie fue dividida en 40 sectores de aproximadamente como se muestra a continuación, con dimensiones de 2cm x 2cm, para estimar el porcentaje de agujeros en las probetas de 7%, 10% y 30%, ya que en ellas la presencia de agujeros era mas marcada.

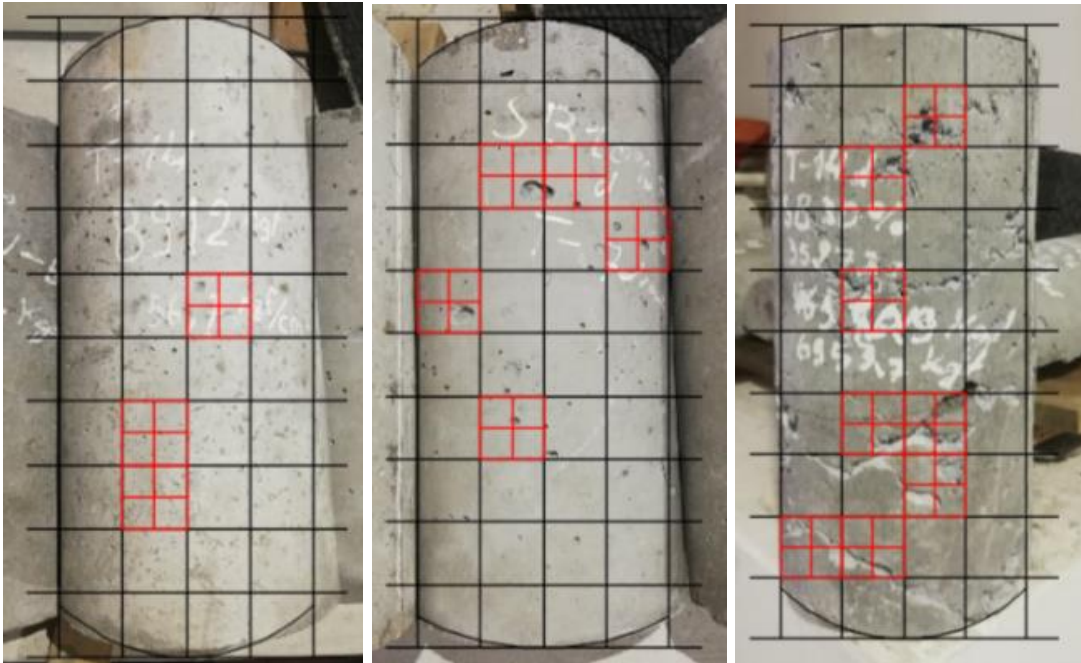


Ilustración 25. Sectorización de probetas de hormigón de 7%, 10% y 30% respectivamente.

Se utilizo el siguiente procedimiento.

- 1) Se marco los sectores donde la presencia de orificios era mas marcada, y a esta se subdividio en 4 sectores para estimar un porcentaje estimado.
- 2) Al estimar el porcentaje de area que correspondia a orificios se dio un porcentaje de orificios a cada sector y despues sacando un promedio de los mismos.
- 3) Al tener estimado ese valor se aplica la siguiente ecuacion para determinar el factor de aumento para el peso de las probetas.

$$F.A. = 1 + \frac{\# \text{ sectores marcados} * \% \text{ de orificios promedio}}{40 * 100\%} \quad \text{Ec. 14 Factor de aumento}$$

- 4) Finalmente estimado cada factor de aumento se procede a multiplicar a los pesos correspondientes a dicho factor.

$$\text{Densidad corregida} = \frac{F.A.* \text{ peso}}{\text{volumen probeta}} \quad \text{Ec. 15 Densidad corregida}$$

2.4.2. Resistencia a compresión simple

El ensayo de compresión se realiza como indica la norma ASTM C39, debido a imperfecciones y desgaste de los neoprenos para romper los cilindros el área de apoyo considerada por esta razón es de 8.5 cm de diámetro menor a los 10 cm de diámetro de las probetas de hormigón, así teniendo un área de acción menor.



Ilustración 26. Medida del neopreno desgastado.



Ilustración 27. Área de aplicación de carga por neopreno.

Se utiliza la siguiente ecuación para calcular la resistencia a compresión en kg/cm^2 .

$$f'c = \frac{P}{d^2 * \frac{\pi}{4}}$$

Ec. 16 Resistencia a compresión

Donde:

$f'c$: esfuerzo a compresión (kg/cm^2)

P: máxima carga aplicada (kgf)

d: diámetro del neopreno utilizado (cm)



Ilustración 28. Ensayo de compresión para cilindros.

2.4.3. Modo de falla a compresión simple

Tras el ensayo de compresión se puede clasificar las probetas rotas según el tipo de falla, de acuerdo con la norma ASTM C39 se clasifica según la siguiente ilustración.

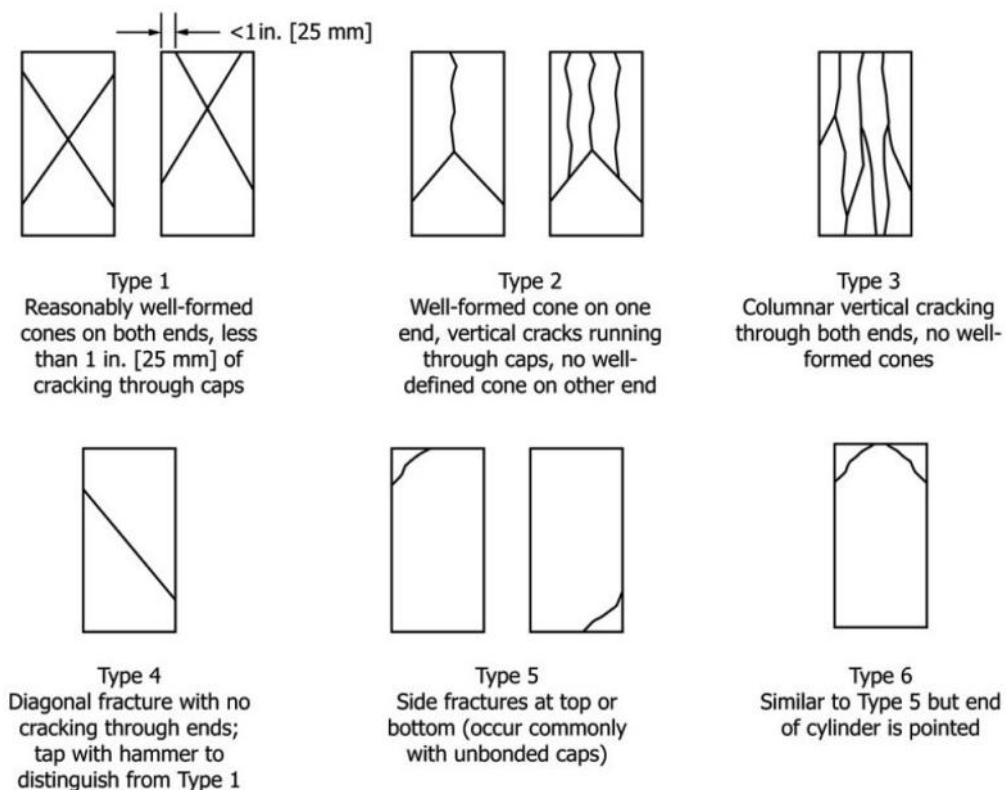


FIG. 2 Schematic of Typical Fracture Patterns

Ilustración 29. Patrones típicos de falla de las probetas de hormigón.

A continuación, se presenta como se identificó los tipos de falla en las probetas de hormigón ensayadas.



Ilustración 30. Tipo de falla 2-1.



Ilustración 31. Tipo de falla 2-2.



Ilustración 32. Tipo de falla 3.



Ilustración 33. Tipo de falla 5.



Ilustración 34. Tipo de falla 6.

2.4.4. Resistencia a tracción

La realización del ensayo de tracción indirecta se realiza en función de la norma ASTM C496 y utilizando la siguiente fórmula para determinar el esfuerzo de tracción en kg/cm².

$$T = \frac{2 * P}{\pi * l * d}$$

Ec. 17 Resistencia a tracción

Donde:

T: esfuerzo de tracción (kg/cm²)

P: máxima carga aplicada (kgf)

l: longitud del cilindro (cm)

d: diámetro del cilindro (cm)



Ilustración 35. Ensayo de tracción para cilindros.

2.4.5. Resistencia a flexión

Para este ensayo se lo realiza según las regulaciones de la norma H0310 de la norma boliviana de carreteras y la norma ASTM C78 para el ensayo de flexión para dos cargas puntuales apoyadas en el tercio interior como se muestra en la ilustración siguiente.

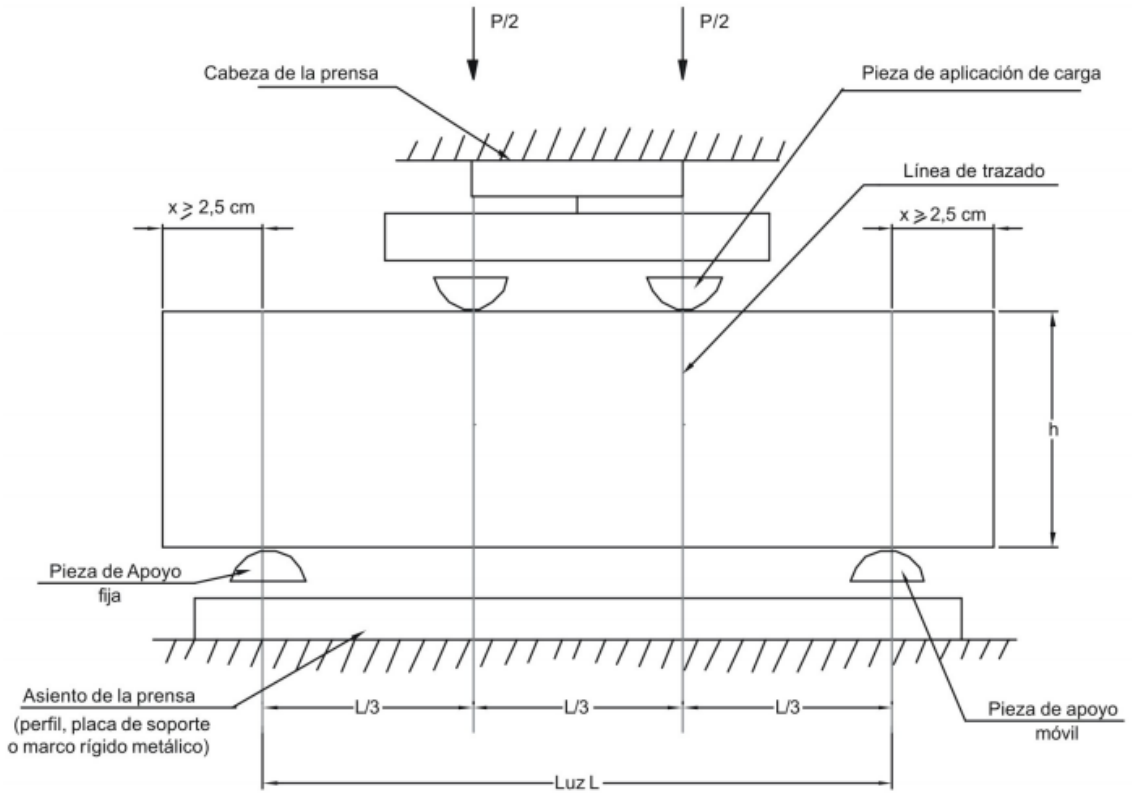


Ilustración 36. Esquema de ensayo a flexión para vigas.

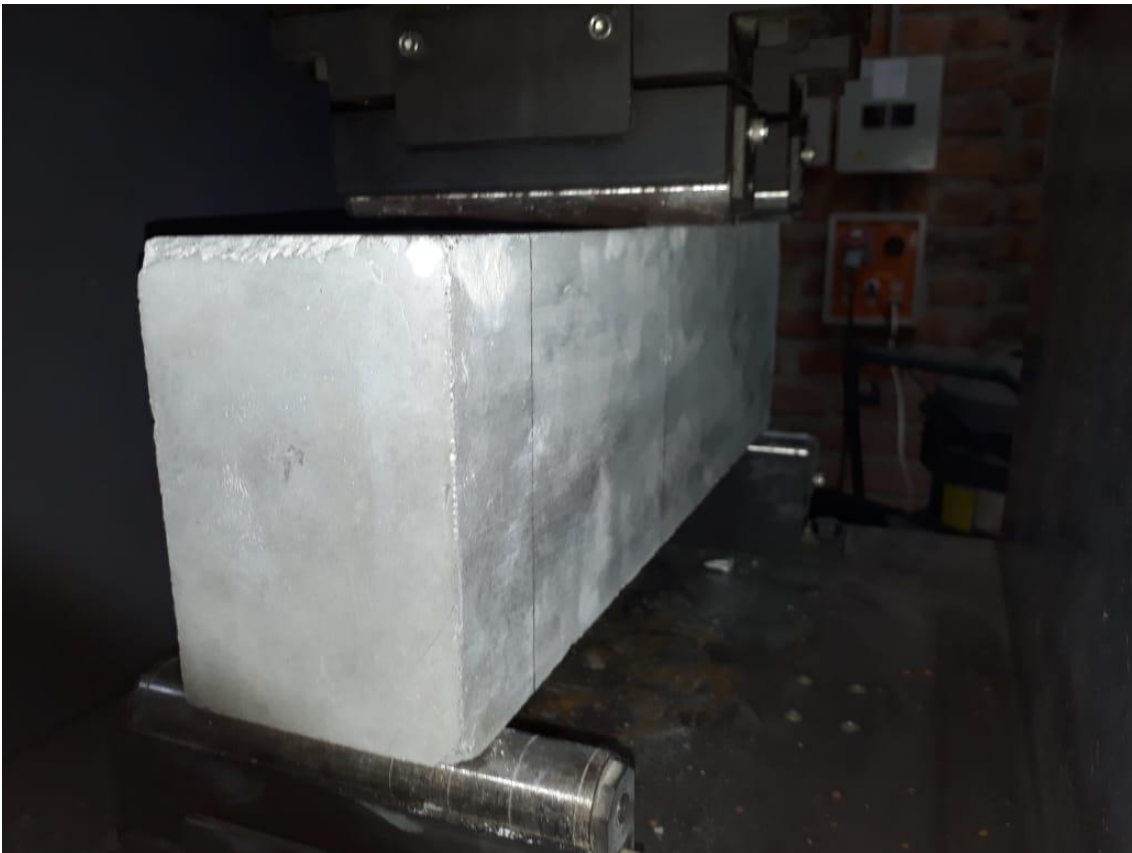


Ilustración 37. Ensayo a flexión de vigas.

Para la ejecución de este ensayo se fabricaron vigas de hormigón simple con porcentajes de humo de sílice de 0%, 5%, 7%, 10%, 13% y 15%. Para tener una mejor aproximación del comportamiento a flexión de estas mezclas



Ilustración 38. Probetas ensayadas a flexión.

Al ser un ensayo para medir la capacidad a flexión y la falla que se presente en el tercio medio se utiliza la siguiente expresión para expresar la tensión de rotura.

$$f_t = \frac{P * L}{b * h^2} * 10.1972 \quad \text{Ec. 18 Tensión de rotura}$$

Donde:

f_t : tensión de rotura

P: carga máxima aplicada (N)

L: luz de ensayo libre de la probeta (mm)

B: ancho promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)

H: altura promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)

2.4.6. Velocidad de pulso ultrasónico

El ensayo de ultrasonido que se aplica a probetas de hormigón endurecido, es un ensayo no destructivo que por ningún motivo reemplaza los resultados que



se pueden obtener de los ensayos directos, se los hace para tener un diagnóstico preliminar que justifique mayores análisis del objeto en estudio. Estos ensayos dan una importante idea sobre la uniformidad y calidad del hormigón que se ensaya, así cuando se dude la calidad del elemento, se aplica este tipo de medida, pues con este ensayo se indica la presencia de vacíos y grietas.

Los pulsos atraviesan la muestra de hormigón y llegan de un transductor a otro transductor donde son convertidos en energía eléctrica, el tiempo (T) que tarda en llegar el pulso se mide de manera electrónica, mientras que la velocidad de pulso se obtiene dividiendo la distancia (L) entre los transductores y el tiempo (T) según la ASTM C597.

La velocidad de onda de pulso ultrasónico se relaciona con las propiedades elásticas del material (módulo elástico dinámico) y densidad. El módulo de elasticidad dinámico (bajo la acción de cargas rápidas) del hormigón representa la rigidez del mismo ante la sollicitación de una carga impuesta, parámetro importante a ser considerado en todas las obras de construcción para garantizar su calidad frente a la posibilidad de ocurrencia de múltiples circunstancias. Estas propiedades se relacionan mediante la siguiente ecuación (Rao, Sravana, & Rao, 2016).

$$E_d = \frac{\rho * V^2 * (1 + \mu) * (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad \text{Ec. 19 Modulo elástico dinámico}$$

Donde:

E_d : módulo elástico dinámico (MPa)

ρ : densidad del hormigón (KN/m³)

μ : relación de poisson

V: velocidad de pulso ultrasónico en Km/s

Para determinar la relación de poisson se requieren datos de deformación transversal y longitudinal. Sin embargo, este valor puede ser definido de forma empírica, mediante estudios realizados se ha comprobado que la relación de poisson varía generalmente de 0.15 a 0.2, para hormigones de alta y baja resistencia respectivamente, (Neville, 2011).

La norma ASTM C597 establece que para iniciar con el ensayo se debe calibrar el equipo, utilizando un agente de acoplamiento (gel) en los transductores, utilizando una barra de referencia, en el equipo se ingresa la distancia de la barra. Al tomar el tiempo de tránsito este debe ser igual al valor que viene dado en la barra, en nuestro caso el valor indicado en la barra de referencia era de 20.8 μ s. Y a partir de esto se comienza a ensayar las probetas de hormigón registrando cada uno de los tiempos y velocidades de pulso obtenidas.

A continuación, se presentan tablas de calificación para hormigones según su velocidad de pulso.



Tabla 12. Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda, según Leslie y Cheesman Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo

| Velocidad de onda longitudinal m/seg | Condición del hormigón |
|---|-------------------------------|
| Más de 4570 | Excelente |
| De 3650 a 4570 | Buena |
| De 3050 a 3650 | Regular a dudosa |
| De 2130 a 3050 | Pobre |
| Menos de 2130 | Muy pobre |

Tabla 13. Evaluación de la calidad del hormigón mediante su velocidad de pulso, según Agraval. Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo

| Velocidad de pulso m/seg | Condición del hormigón |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Más de 3000 | Buena |
| De 2500 a 3000 | Regular |
| Menos de 2130 | Pobre |

Tabla 14. Velocidad de onda mínima en diferentes estructuras. Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo

| Tipo de obra | Velocidad mínima de pulso para su aceptación m/seg |
|---|---|
| Secciones T de hormigón forzado | 4570 |
| Unidades de anclaje de hormigón reforzado | 4360 |
| Marcos de edificios de hormigón reforzado | 4110 |
| Losa de entrepiso | 4720 |

En el presente proyecto se ha usado un tipo especial de resistímetro, los conocidos como transductores: capaces de marcar el tiempo de propagación de la onda a través del material que se ensaya. Para que los ensayos realizados sean consistentes, todas las probetas ensayadas se encontraban en iguales condiciones (saturada superficialmente seca), ya que el grado de saturación afecta la velocidad de onda de pulso.



Ilustración 39. Verificación de la calibración del equipo.

Para determinar el módulo de elasticidad de las probetas de hormigón y ya que no se realizaron ensayos para determinar la deformación transversal de los cilindros de hormigón, se consideró en base a la teoría una relación de poisson de 0.15.

2.4.7. Resistividad eléctrica

Su determinación consiste en emplear dos electrodos en contacto con la superficie del material, distanciados en 20cm, mediante los cuales se aplica una corriente y se mide la diferencia de potencial generada como se muestra en la siguiente ilustración.



Ilustración 40. Esquema de la medida de la resistividad eléctrica del hormigón.

El contacto eléctrico entre electrodos-hormigón se garantiza mediante el gel utilizado en los extremos, se mide la resistencia eléctrica con las muestras

saturadas. Se aplica una corriente entre dos electrodos situados en los extremos del eje, y la medida de las medidas al intercambiar los polos de carga. El valor de la resistencia eléctrica de cada probeta se obtiene del promedio de estas dos medidas.

Para el ensayo se utilizará un equipo comercial denominado “resistivímetro”, disponible en el laboratorio de alta tensión de la Universidad de Cuenca. Da como respuesta el valor de la resistividad.



Ilustración 41. Resistivímetro utilizado.

Se medirán dos probetas de cada hormigón en las edades de 14 y 28 días de curado en cámara húmeda. La resistencia de los cables es aproximadamente de 3.7Ω , el equipo realiza la compensación automáticamente de esta resistencia extra al momento de cada medición.

Para el cálculo de la resistividad eléctrica se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Resistividad} = \frac{\text{Resistencia (k}\Omega\text{)} * \text{Area de placas (cm}^2\text{)}}{\text{Longitud entre placas (cm)}} \quad \text{Ec. 20 Resistividad}$$

Para determinar la calidad y la durabilidad se sigue la norma AASHTO T358 la cual relaciona la resistividad eléctrica con la penetración del ion cloruro y lo clasifica desde alta a nula como va aumentando el valor de la resistividad como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 15. Penetración del ion cloruro en función de la resistividad eléctrica para dos tipos de cilindros según la AASHTO T358.

| Penetración de Iones Cloruro | Prueba de Resistividad Eléctrica | |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|
| | <i>Probetas de 10 x 20 cm</i> | <i>Probetas de 15 x 30 cm</i> |
| <i>Alto</i> | <12 | <12 |
| <i>Moderado</i> | 12 – 21 | 9.5 – 16.5 |
| <i>Bajo</i> | 21 – 37 | 16.5 – 29 |
| <i>Muy bajo</i> | 37 – 254 | 29 – 199 |
| <i>Despreciable</i> | > 254 | > 199 |

2.4.8. Resistencia asociada al índice esclerométrico

El esclerómetro es uno de los ensayos no destructivos más empleados en la evaluación de infraestructuras. Sus ventajas abarcan una considerable reducción en mano de obra, tiempo y dinero. Varios son los factores que influyen en los resultados proporcionados por el esclerómetro; los principales se deben a las características de cada mezcla (Breysse, 2012).

La ejecución de ensayos ha mostrado que este puede entregar una mejor correlación a dispersión, si está calibrado para una mezcla específica. Factores como el tipo de cemento, contenido o tipo de agregado, textura de la superficie, condiciones de humedad, entre otras, muestran cambios significativos en los índices esclerométricos (Cortes, 1993).

El esclerómetro proporciona: un índice esclerométrico (Q), y un valor de resistencia a compresión del concreto relacionada. Este valor “Q” se obtiene del promedio de varios impactos, y dentro de una tolerancia definida (los valores obtenidos no deben diferir en más de 6 unidades según la ASTM C805). Según las cuales el ensayo ha de realizarse en probetas de 150mm de diámetro. Dado que en nuestro medio es frecuente el uso de probetas de menor diámetro, se realizaron 15 disparos a la muestra en lugar de 10, pero distribuidos de a 5 en el área superior, inferior y lateral.



Ilustración 42. Equipo utilizado para el ensayo.



Una vez que se tiene el valor de rebote se puede calcular con la siguiente ilustración y ecuación la resistencia a compresión que corresponde a los distintos valores de rebote.

$$f_{ck} = 2.77 * e^{0.048*Q}$$

Ec. 21 Resistencia a compresión por esclerómetro

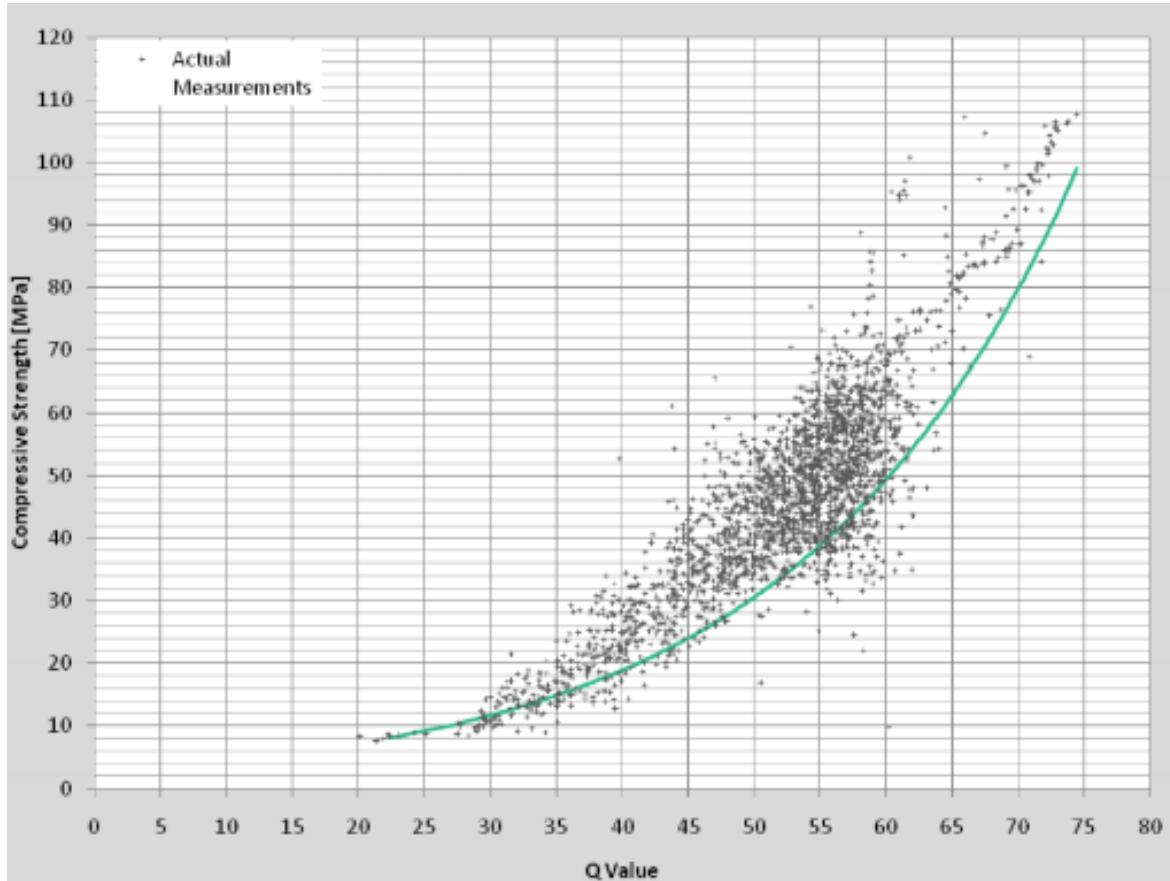


Ilustración 43. Correlación del número de rebotes para resistencia a compresion. Fuente: (Proceq, s. f.).

Debido a la gran diferencia que podría o no presentarse, entre los valores calculados y los reales de compresión, en el caso de hormigones de alta resistencia es necesario realizar el cálculo de un factor de corrección que permita ajustar el valor de rebote, para lo cual se utiliza las siguientes ecuaciones.

$$f.c. = \text{factor de correccion} = \frac{f'c(\text{real})}{f'c(\text{calculada})} \quad \text{Ec. 22 Factor de corrección esclerométrico}$$

$$f'c(\text{calculada corregida}) = f.c. * 2.77e^{0.048*Q} \quad \text{Ec. 23 Resistencia corregida asociada al esclerómetro}$$

Para empezar la ejecución del ensayo se debe verificar que el equipo se encuentre calibrado.

Se les realizara el ensayo del esclerómetro sobre los hormigones a 28 días de edad. Los ensayos esclerométricos serán realizados de conformidad con las normas ASTM C805 (2013) e NTE INEN 3121 (2016).



2.4.9. Durabilidad

Este criterio es la unión de las propiedades de resistencia a compresión, resistividad eléctrica, densidad y velocidad de onda ultrasónico, se consideran como las propiedades más importantes que se relacionan a la durabilidad según la bibliografía citada a lo largo del documento con sus respectivas normas. La metodología para poder evaluar al hormigón con la máxima durabilidad consiste en colocar un puntaje sobre 10 en cada propiedad, siendo 10 el valor máximo de cada propiedad y al final calculando un valor promedio en cada probeta de hormigón en función del porcentaje de humo de sílice, así finalmente tener a que valor se presenta la máxima durabilidad en los hormigones de alto desempeño.

CAPITULO 3: Resultados y Discusión

3.1. Componentes básicos del hormigón

3.1.1. Agua

El agua utilizada en la mezcla del presente trabajo cumple con esta norma ya que fue obtenida de las fuentes de agua potable disponibles en los laboratorios de la Universidad de Cuenca las cuales son subministradas por la empresa pública Etapa EP.

3.1.2. Agregado

Los resultados de la caracterización de los agregados presentados en los puntos siguientes son semejantes a los valores proporcionados por Holcim que poseen los análisis realizados por el laboratorio LABSCON, dichos análisis se adjuntan a los anexos.

3.1.2.1. Peso volumétrico suelto

A continuación, se presentan los datos obtenidos para este ensayo y mediante la Ec. 1, se obtiene el resultado del peso volumétrico suelto

Agregado grueso:

Tabla 16. Peso volumétrico suelto roca triturada.

| Datos | Ensayos | |
|---|------------------------|-------|
| | 1 | 2 |
| <i>Peso del material (g)</i> | 12950 | 12650 |
| <i>Volumen del recipiente (cm³)</i> | 9614.22 | |
| <i>Peso volumétrico suelto (g/cm³)</i> | 1.347 | 1.316 |
| <i>Valor promedio</i> | 1.33 g/cm ³ | |

Agregado fino:

Tabla 17. Peso volumétrico suelto arena.

| Datos | Ensayos | |
|--|----------------|------|
| | 1 | 2 |
| <i>Peso del material (g)</i> | 4250 | 4300 |
| <i>Volumen del recipiente (cm³)</i> | 2943.59 | |



| | | |
|---|------------------------|-------|
| <i>Peso volumétrico suelto (g/cm³)</i> | 1.444 | 1.461 |
| <i>Valor promedio</i> | 1.45 g/cm ³ | |

3.1.2.2. Peso volumétrico compacto

A continuación, se presentan los datos obtenidos para este ensayo y mediante la Ec. 2, se obtiene el resultado del peso volumétrico suelto

Agregado grueso:

Tabla 18. *Peso volumétrico compacto roca triturada.*

| Datos | Ensayos | |
|---|------------------------|-------|
| | 1 | 2 |
| <i>Peso del material (g)</i> | 13950 | 13900 |
| <i>Volumen del recipiente (cm³)</i> | 9614.22 | |
| <i>Peso volumétrico compactado (g/cm³)</i> | 1.451 | 1.446 |
| <i>Valor promedio</i> | 1.44 g/cm ³ | |

Agregado fino:

Tabla 19. *Peso volumétrico compacto arena.*

| Datos | Ensayos | |
|---|------------------------|-------|
| | 1 | 2 |
| <i>Peso del material (g)</i> | 4900 | 5000 |
| <i>Volumen del recipiente (cm³)</i> | 2943.59 | |
| <i>Peso volumétrico compactado (g/cm³)</i> | 1.665 | 1.699 |
| <i>Valor promedio</i> | 1.68 g/cm ³ | |

3.1.2.3. Peso específico y absorción

Agregado grueso:

$$M_{sss} = 3391.5 \text{ g}$$

$$M_{sum} = 2116.3 \text{ g}$$

$$M_s = 3340.7 \text{ g}$$

Peso específico SSS, reemplazando los datos en la Ec. 3, se tiene:

$$\rho_{RT} = 2659.58 \text{ kg/m}^3$$



Peso específico seco, reemplazando los datos en la Ec. 4, se tiene:

$$p_{RS} = 2619.75 \text{ kg/m}^3$$

Peso específico neto, reemplazando los datos en la Ec. 5, se tiene:

$$p_N = 2728.44 \text{ kg/m}^3$$

% de absorción de agua, reemplazando los datos en la Ec. 6, se tiene:

$$\alpha(\%) = 1.52\%$$

Agregado fino

$$M_{SSS} = 74.9\text{g}, 79\text{g}$$

$$M_a = 676\text{g}, 660\text{g}$$

$$M_m = 720\text{g}, 708\text{g}$$

$$M_s = 74.8\text{g}$$

Peso específico SSS reemplazando los datos en la Ec. 7, se tiene:

$$p_{RT} = 2486.17 \text{ kg/m}^3$$

Peso específico seco, reemplazando los datos en la Ec. 8, se tiene:

$$p_{RS} = 2306.78 \text{ kg/m}^3$$

Peso específico aparente, reemplazando los datos en la Ec. 9, se tiene:

$$p_N = 2812.19 \text{ kg/m}^3$$

% de absorción de agua, reemplazando los datos en la Ec. 10, se tiene:

$$\alpha(\%) = 5.61\%$$

3.1.2.4. Granulometría

3.1.2.4.1. Agregado grueso

En la siguiente tabla se muestra los porcentajes seleccionados de material pasante para que se cumpla con la normativa.

Tabla 20. Granulometría utilizada para material triturado.

| Tamiz # | Abertura (mm) | %Pasante (min) | %Pasante (máx) | %Pasante Utilizado |
|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 3/4 | 19.00 | 90% | 100% | 95.00% |
| 1/2 | 12.50 | 20% | 55% | 37.00% |
| 3/8 | 9.50 | 0% | 15% | 6.00% |
| 4 | 4.75 | 0% | 5% | 0.00% |

En la siguiente ilustración se puede apreciar de manera gráfica le granulometría empleada (curva de color lila) y su ubicación dentro de los límites establecidos (curvas rojas).

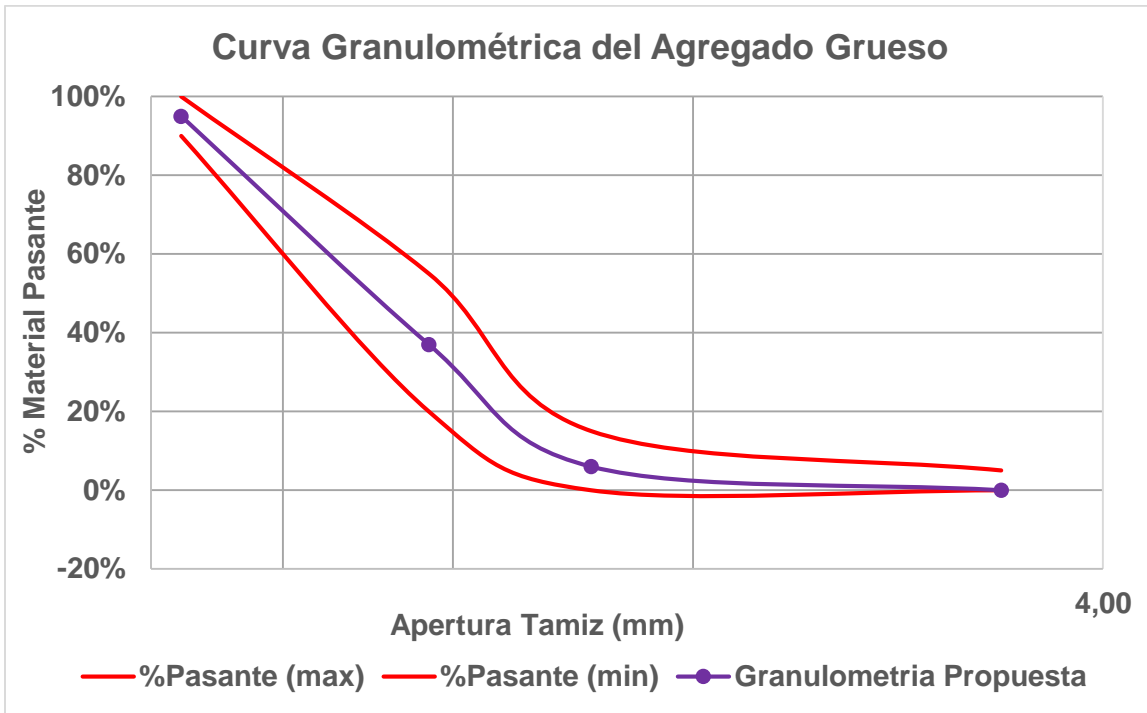


Ilustración 44. Curva granulométrica utilizada material triturado.

3.1.2.4.2. Agregado fino

En la siguiente tabla se indican los porcentajes seleccionados para el material fino pasante:

Tabla 21. Granulometría propuesta para arena.

| Tamiz # | Abertura (mm) | %Pasante (min) | %Pasante (máx) | %Pasante Utilizado |
|---------|---------------|----------------|----------------|--------------------|
| 4 | 4.75 | 100% | 100% | 100.00% |
| 8 | 2.36 | 80% | 100% | 87.00% |
| 16 | 1.18 | 50% | 85% | 62.00% |
| 30 | 0.6 | 25% | 60% | 35.00% |
| 50 | 0.3 | 5% | 30% | 12.00% |
| 100 | 0.15 | 0% | 10% | 4.00% |
| 200 | 0.074 | 0% | 5% | 2.50% |

En la siguiente ilustración se puede apreciar de manera gráfica y más clara el cumplimiento de los límites establecidos en la norma.

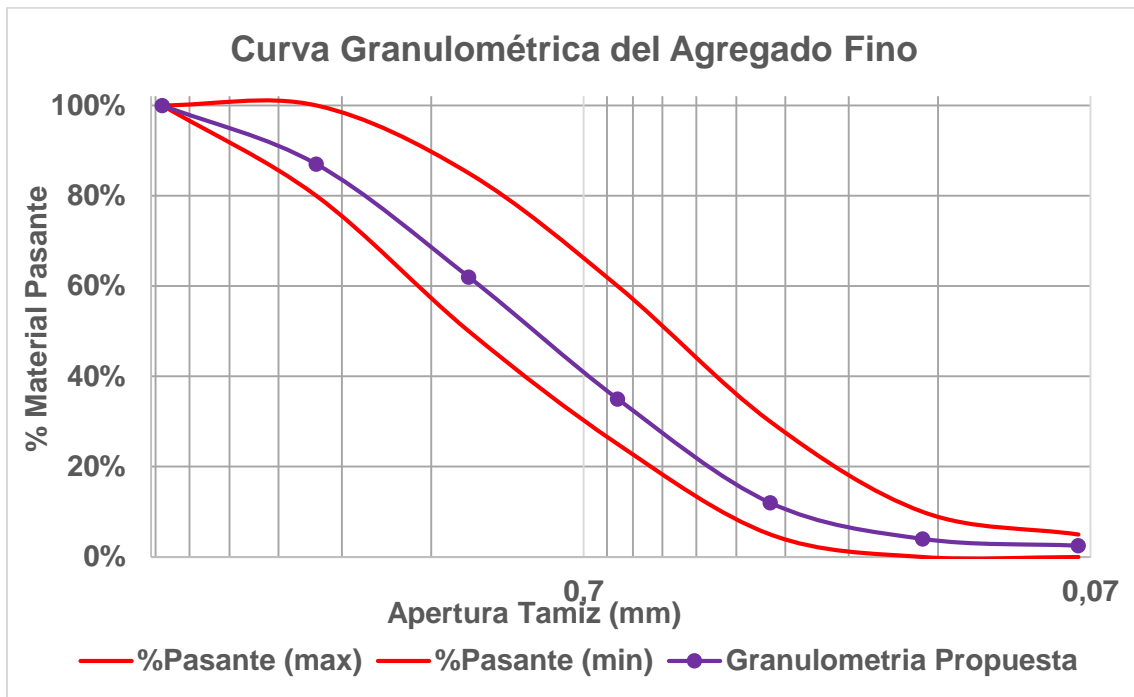


Ilustración 45. Curva granulométrica fina utilizada.

Mediante la Ec. 11, se obtuvo un módulo de finura de 3

Este módulo de finura verifica la correcta elección del porcentaje de material pasante.

3.1.2.4.3. Arena de sílice

A continuación, se muestra la tabla de valor empleado, así como su gráfica para una mejor apreciación de los rangos.

Tabla 22. Granulometría propuesta para arena de sílice según la ASTM C109

| Tamiz # | Abertura (mm) | %Pasante (min) | %Pasante (máx) | %Pasante Utilizado |
|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 30 | 0.6 | 96% | 100% | 98.00% |
| 50 | 0.3 | 23% | 33% | 28.00% |
| 100 | 0.15 | 0% | 4% | 2.00% |

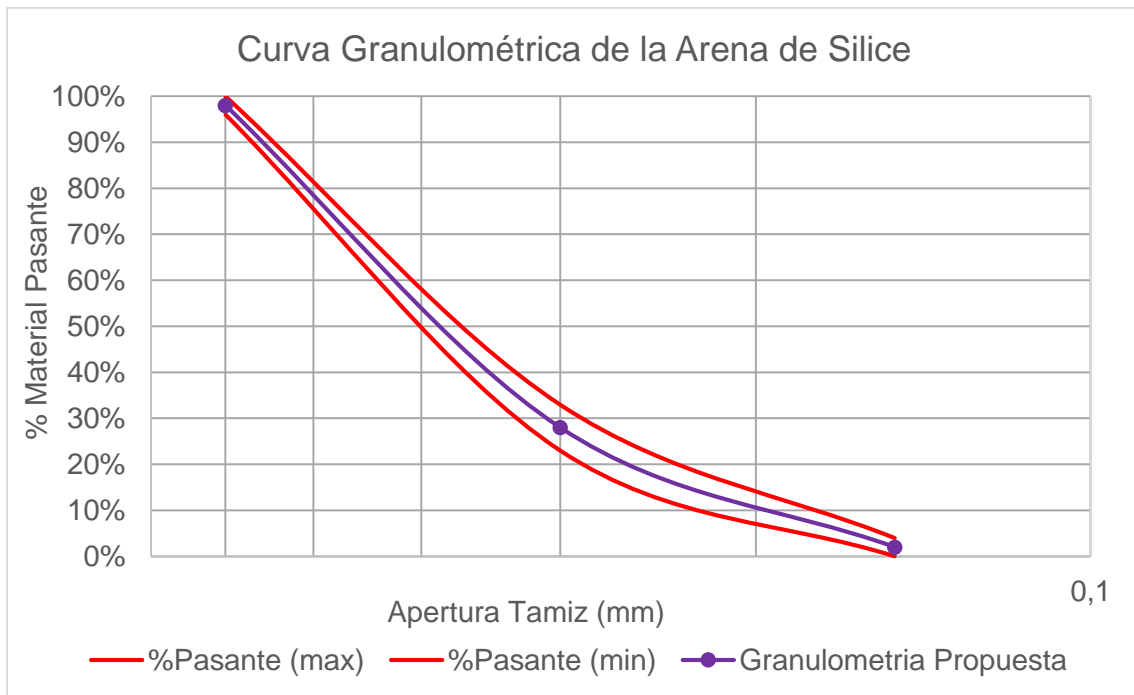


Ilustración 46. Curva granulométrica de arena de sílice propuesta.

3.1.2.5. Ensayo de abrasión

Masa inicial de la muestra

$$m_i = 5000g$$

Masa final de la muestra

$$m_f = 4103.2g$$

Pérdida de masa de la muestra calculada a través de la Ec. 12:

$$P(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100\% = 17.94\%$$

De acuerdo con la norma ASTM C131 el material es apto para el diseño de mezclas de hormigón, ya que el desgaste es menor al 50%.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en los ensayos sobre los agregados:

Tabla 23. Resumen ensayos en agregados

| Propiedad | | Agregado Grueso | Agregado Fino |
|-----------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Peso volumétrico suelto | | 1.33 g/cm ³ | 1.45 g/cm ³ |
| Peso volumétrico compactado | | 1.44 g/cm ³ | 1.68 g/cm ³ |
| Peso específico y absorción | Peso específico sss | 2.66 g/cm ³ | 2.49 g/cm ³ |
| | Peso específico seco | 2.62 g/cm ³ | 2.31 g/cm ³ |



| | | | |
|----------|----------------------|------------------------|------------------------|
| | Peso específico neto | 2.73 g/cm ³ | 2.81 g/cm ³ |
| | Absorción | 1.52% | 5.61% |
| Abrasión | | 17.94% | |

3.1.3. Adiciones minerales (humo de sílice)

Características de humo de sílice utilizado

La micro sílice que se ha usado se distribuye con el nombre comercial de SikaFume, este producto es compatible con los aditivos plastificantes y superplastificantes. A continuación, se presentan sus características principales:

Tabla 24. Características de Sika Fume. Fuente: Manual de usuario de humo de sílice.

| Característica | Valor |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| <i>Blaine</i> | 180000 - 200000 cm ² /g |
| <i>Gravedad específica</i> | 2.2 |
| <i>Finura (diámetro promedio)</i> | 0.1 – 0.2 um |
| <i>Porcentaje pasante 45um</i> | 95 – 100 % |
| <i>Partícula</i> | Esférica |
| <i>Forma</i> | Amorfa |

3.1.4. Aditivos químicos

Tabla 25. Características del aditivo Viscocrete 4100, de la hoja técnica de Sika.

| Característica | Viscocrete 4100 |
|---|------------------------|
| <i>Aspecto</i> | Líquido |
| <i>Color</i> | Translucido |
| <i>Densidad</i> | 1.1 g/cm ³ |
| <i>Dosis por peso del cemento recomendada</i> | 0.19% a 0.9% |

3.1.4.1. Ensayo demanda de agua con el material cementante

Como se presentó en la metodología de este ensayo, se busca obtener la máxima compactación y mínima relación a/c. Para lo cual se han desarrollado ensayos de compactación y de relación a/c.

3.1.4.1.1. Compactación

En la siguiente tabla se muestra los resultados de compactación del material cementante en función del porcentaje de humo de sílice y porcentaje de aditivo.

Tabla 26. Resultados de compacidad de ensayo demanda agua.

| % aditivo | % de Humo de Sílice | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 3% | 5% | 7% | 10% | 13% | 15% | 20% | 25% | 30% |
| 0.00% | 0.531 | 0.507 | 0.502 | 0.492 | 0.481 | 0.465 | 0.459 | 0.439 | 0.428 | 0.413 |
| 0.50% | 0.559 | 0.542 | 0.538 | 0.533 | 0.523 | 0.514 | 0.500 | 0.482 | 0.462 | 0.441 |
| 1.00% | 0.572 | 0.550 | 0.545 | 0.539 | 0.528 | 0.520 | 0.509 | 0.499 | 0.483 | 0.452 |
| 1.20% | 0.576 | 0.554 | 0.551 | 0.545 | 0.536 | 0.527 | 0.519 | 0.512 | 0.494 | 0.459 |
| 1.50% | 0.578 | 0.560 | 0.557 | 0.553 | 0.540 | 0.531 | 0.527 | 0.516 | 0.498 | 0.463 |
| 2.00% | 0.591 | 0.568 | 0.566 | 0.563 | 0.550 | 0.538 | 0.531 | 0.520 | 0.504 | 0.475 |

En la siguiente ilustración cada línea de color representa un porcentaje específico de aditivo, con variaciones de porcentajes de humo de sílice. La compacidad máxima se alcanza en el porcentaje mayor de aditivo y el porcentaje menor de humo de sílice. Ya que teóricamente conforme aumenta el aditivo la compacidad podría aumentar infinitamente, pero de forma menos pronunciada.

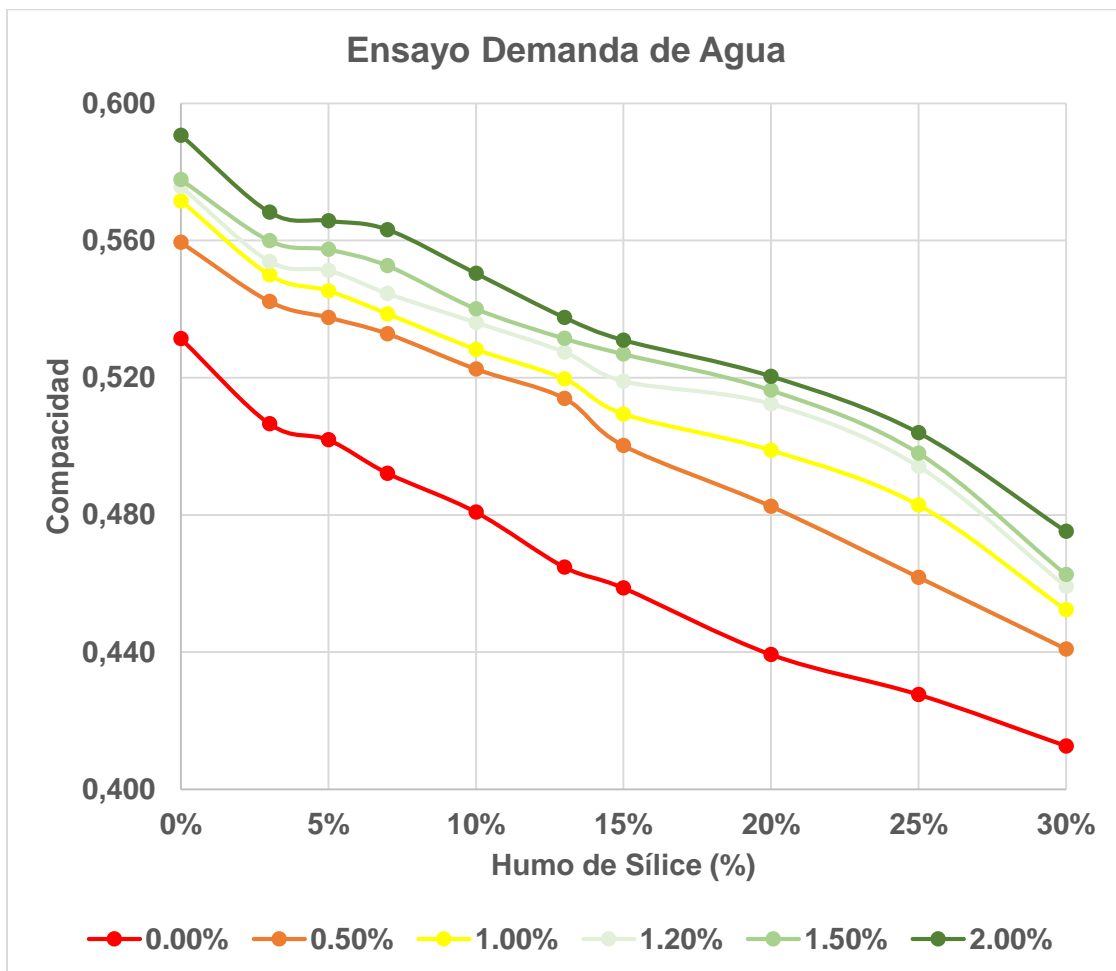


Ilustración 47. Compacidad en función del porcentaje de aditivo de los diferentes porcentajes de humo de sílice.



En la siguiente ilustración cada línea de color representa un porcentaje específico de humo de sílice, con variaciones de porcentajes de aditivo. La compacidad máxima se alcanza en el porcentaje menor de humo de sílice y el porcentaje mayor de aditivo. Ya que teóricamente conforme aumenta el aditivo la compacidad podría aumentar infinitamente, pero de forma menos pronunciada.

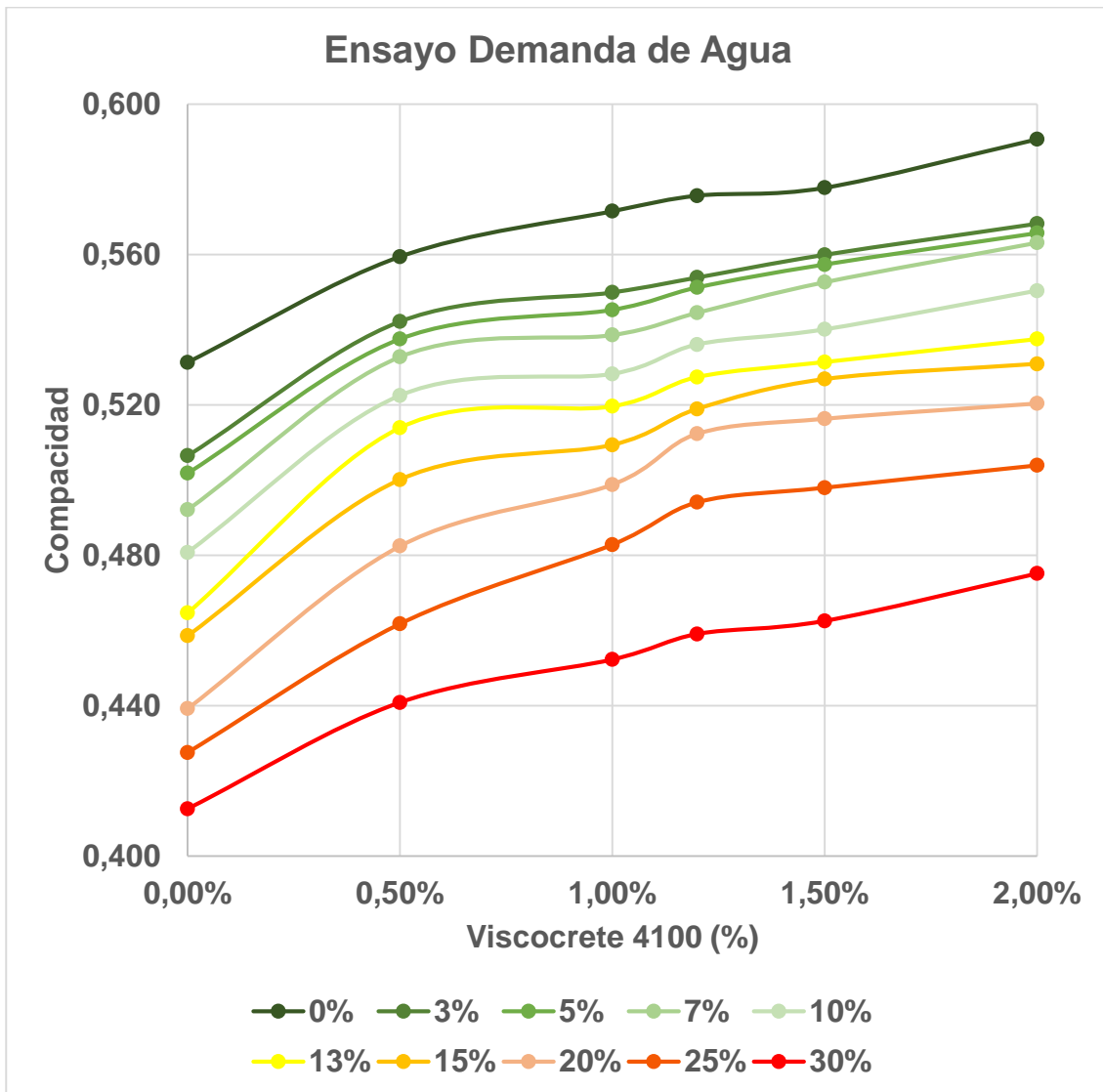


Ilustración 48. Compacidad en función del porcentaje de humo de sílice de los diferentes porcentajes de aditivo.



3.1.4.1.2. Relación a/c

En la siguiente tabla se muestra los resultados de la relación a/c en función del porcentaje de humo de sílice y porcentaje de aditivo.

Tabla 27. Resultados de relación a/c de ensayo demanda agua.

| % aditivo | Relación agua/cemento | | | | | | | | | |
|-----------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | % de Humo de Sílice | | | | | | | | | |
| | 0% | 3% | 5% | 7% | 10% | 13% | 15% | 20% | 25% | 30% |
| 0.00% | 0.28 | 0.31 | 0.32 | 0.33 | 0.34 | 0.37 | 0.37 | 0.41 | 0.43 | 0.45 |
| 0.50% | 0.25 | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.32 | 0.34 | 0.37 | 0.40 |
| 1.00% | 0.24 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.31 | 0.32 | 0.34 | 0.38 |
| 1.20% | 0.23 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.33 | 0.37 |
| 1.50% | 0.23 | 0.25 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.32 | 0.37 |
| 2.00% | 0.22 | 0.24 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.31 | 0.35 |

En la siguiente ilustración cada línea de color representa un porcentaje específico de aditivo, con variaciones de porcentajes de humo de sílice. La relación a/c mínima se alcanza en el porcentaje mayor de aditivo y el porcentaje menor de humo de sílice. Ya que teóricamente conforme aumenta el aditivo la relación a/c podría ser reducida próximo a cero, pero de forma menos pronunciada.

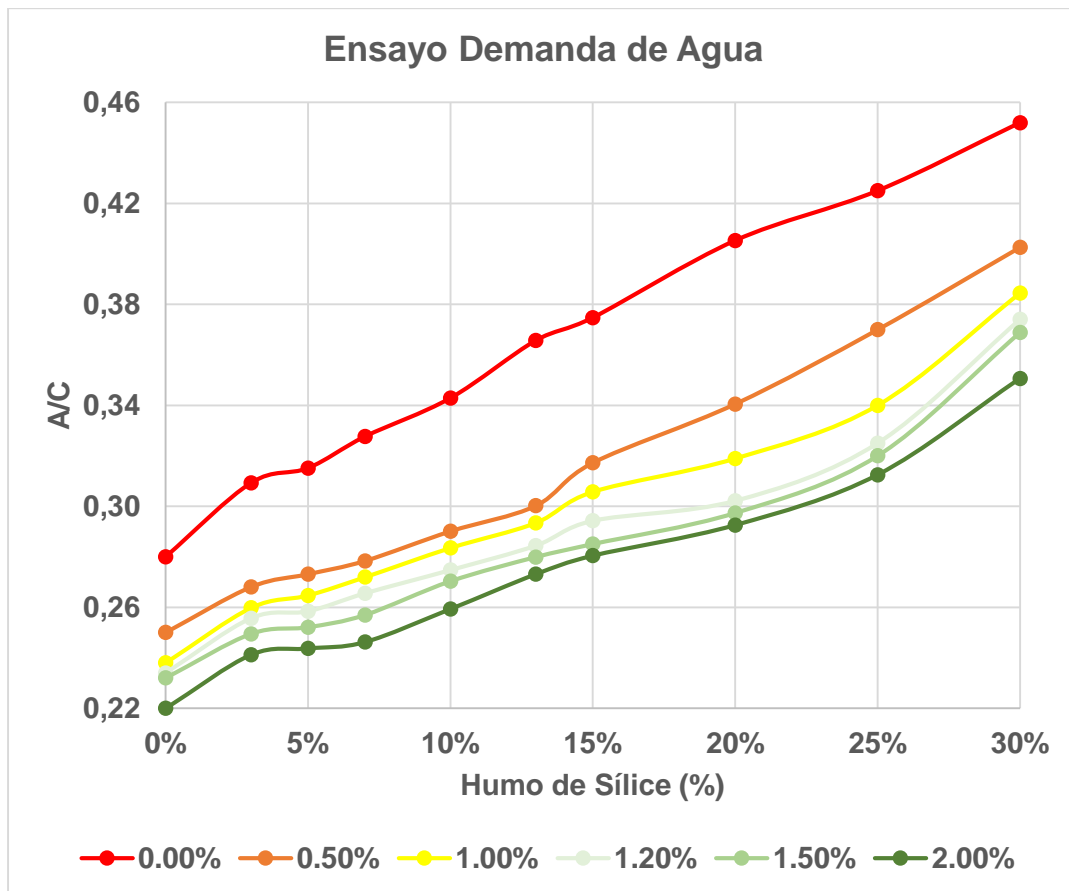


Ilustración 49. Relación a/c en función del porcentaje de aditivo de los diferentes porcentajes de humo de sílice.

En la siguiente ilustración cada línea de color representa un porcentaje específico de humo de sílice, con variaciones de porcentajes de aditivo. La relación a/c mínima se alcanza en el porcentaje nulo de humo de sílice y el porcentaje mayor de aditivo. Ya que teóricamente conforme aumenta el aditivo la relación a/c podría ser reducida próximo a cero, pero de forma menos pronunciada.

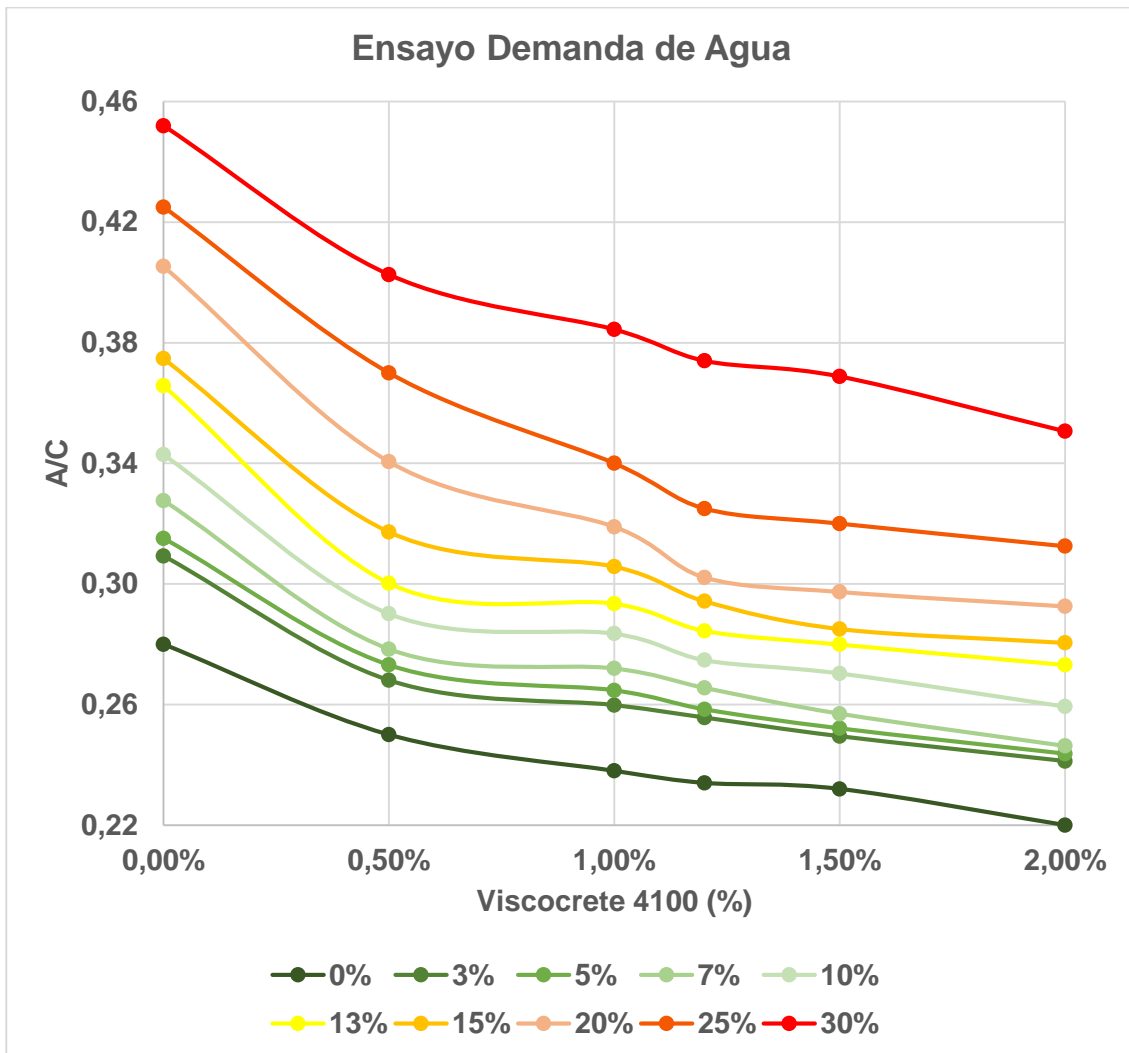


Ilustración 50. Relación a/c en función del porcentaje de humo de sílice de los diferentes porcentajes de aditivo.

Ya que se busca obtener la máxima compactación y mínima relación a/c, la compactación entre los porcentajes de 0.5% a 1.2% de Viscocrete 4100 no presenta un aumento significativo por lo que se podría tomar un valor cercano al 1% de aditivo y con la mínima relación a/c se confirma que el valor óptimo se presenta entre el 0.5% y 1% de aditivo.

De acuerdo con la hoja técnica se recomienda un rango de valores entre 0.19% y 0.9%, y según los resultados presentados se llega a un valor óptimo y máximo de 0.9%, ya que valores más allá de estos se produce efectos negativos en el hormigón como lo es la segregación de la mezcla.



3.1.5. Cemento

Este cemento hidráulico de alta resistencia además de cumplir, sobrepasa los requerimientos de la normativa INEN 2380 equivalente a la ASTM C1157, con resistencias similares a las del cemento portland Tipo III de la Norma ASTM C150. En la siguiente tabla se muestra algunas características de interés del cemento obtenidas de la hoja técnica del producto.

Tabla 28. Características del cemento Holcim HE. Fuente: Hoja técnica del producto.

| | INEN 2380 | Valor Referencial |
|---|------------------|--------------------------|
| <i>Cambio de longitud por autoclave, % máximos</i> | 0.80 | -0.04 |
| Tiempo de fraguado, método de Vicat | | |
| <i>No menos de: (minutos)</i> | 45 | 150 |
| <i>No más de: (minutos)</i> | 420 | |
| Resistencia a la compresión, MPa, mínimo | | |
| <i>1 día</i> | 12 | 14 |
| <i>3 días</i> | 24 | 25 |
| <i>7 días</i> | - | 32 |
| <i>28 días</i> | - | 40 |
| <i>Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.</i> | 0.020 | 0.001 |

3.1.5.1. Resistencia a compresión de morteros

Tabla 29. Resultados de resistencia a compresión de morteros.

| Materiales | | | | | Resistencia a Compresión (kg/cm²) | | |
|-------------------|--------------|------------|-------------|----------------|---|----------------|----------------|
| <i>Cemento</i> | <i>Arena</i> | <i>a/c</i> | <i>Agua</i> | <i>Aditivo</i> | <i>7 días</i> | <i>14 días</i> | <i>28 días</i> |
| 500.00 | 1375.00 | 0.600 | 300.00 | 0.90% | 117.0 | 153.2 | 228.0 |
| 500.00 | 1375.00 | 0.500 | 250.00 | 0.90% | 133.3 | 175.4 | 240.6 |
| 500.00 | 1375.00 | 0.485 | 242.50 | 0.90% | 198.1 | 210.7 | 255.5 |
| 500.00 | 1375.00 | 0.400 | 200.00 | 0.90% | 238.9 | 247.2 | 276.7 |

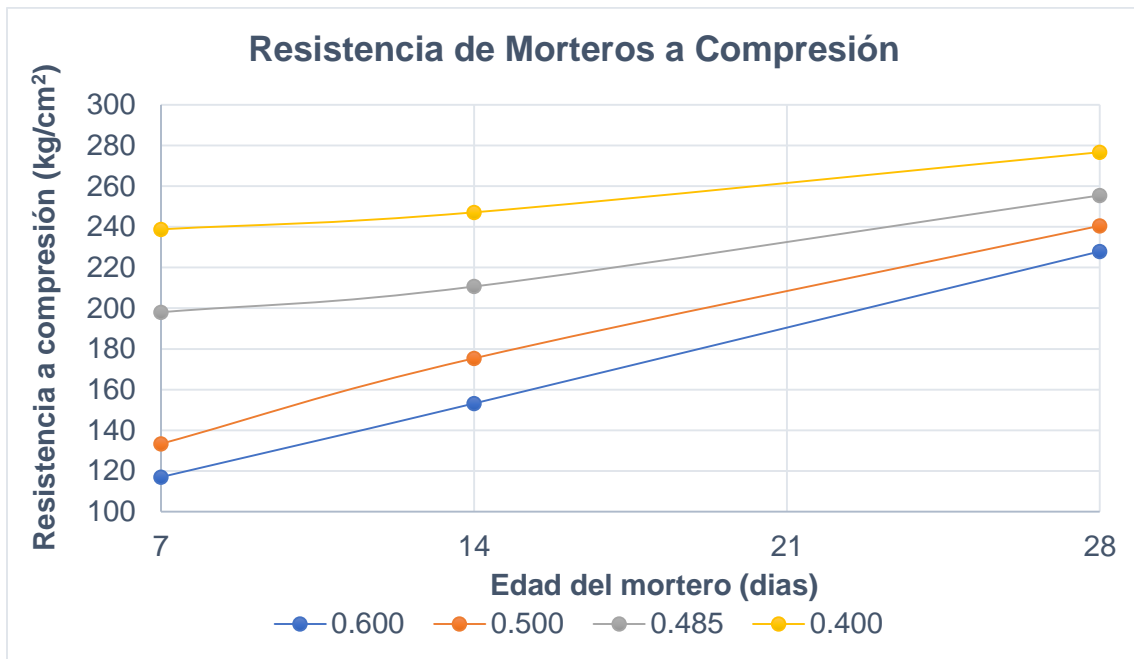


Ilustración 51. Resultados de resistencia a compresión de morteros.

Debido a la alta absorción de la arena de sílice, con relaciones a/c menores a 0.4 se ve imposible de compactar y formar los cubos de mortero a pesar de tener incorporado el aditivo Viscocrete 4100, el aumento de resistencia del cemento alcanza un valor máximo de 276 kg/cm².

3.2. Dosificaciones para metro cubico utilizadas

Tabla 30. Dosificaciones utilizadas para metro cubico.

| ID | a/c | Agua (kg/m ³) | Arena (kg/m ³) | Grava (kg/m ³) | Humo de Sílice (kg/m ³) | Cemento (kg/m ³) | Viscocrete 4100 (kg/m ³) | |
|-------|------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------|
| SB0% | 0.24 | 217.80 | 698.30 | 783.60 | 0% | 0.00 | 721.70 | 6.50 |
| SB3% | 0.24 | 222.80 | 698.30 | 783.60 | 3% | 21.65 | 721.70 | 6.69 |
| SB5% | 0.24 | 226.10 | 698.30 | 783.60 | 5% | 36.09 | 721.70 | 6.82 |
| SB7% | 0.24 | 229.50 | 698.30 | 783.60 | 7% | 50.52 | 721.70 | 6.95 |
| SB10% | 0.24 | 234.50 | 698.30 | 783.60 | 10% | 72.17 | 721.70 | 7.14 |
| SB13% | 0.24 | 239.50 | 698.30 | 783.60 | 13% | 93.82 | 721.70 | 7.34 |
| SB15% | 0.24 | 242.80 | 698.30 | 783.60 | 15% | 108.26 | 721.70 | 7.47 |
| SB20% | 0.24 | 251.20 | 698.30 | 783.60 | 20% | 144.34 | 721.70 | 7.79 |
| SB25% | 0.24 | 259.50 | 698.30 | 783.60 | 25% | 180.43 | 721.70 | 8.12 |
| SB30% | 0.24 | 267.80 | 698.30 | 783.60 | 30% | 216.51 | 721.70 | 8.44 |

Las dosificaciones utilizadas para los diferentes porcentajes de humo de sílice se muestran a continuación, al considerar este como material cementicio extra las cantidades de agua y aditivo aumentan como aumenta la cantidad de humo de sílice ya que este al tener una superficie específica y finura mayor al del



cemento requiere mayor agua de hidratación y aditivo para obtener la trabajabilidad deseada y mantener una relación a/c constante de 0.24.

3.3. Trabajabilidad del hormigón

3.3.1. Revenimiento del hormigón (cono de Abrams)

Tabla 31. Resultados del ensayo del cono de Abrams.

| Asentamiento | | |
|---------------------|--------------------------|---------------------|
| % SikaFume | Asentamiento (cm) | Consistencia |
| 10% | 10 | Plástica |
| 13% | 0 | Seca |
| 15% | 0 | Seca |

3.3.2. Fluidez del hormigón o “Slump-Flow Test”

Tabla 32. Resultados del ensayo de fluidez o “Slump-Flow Test”.

| Slump-Flow Test | | |
|------------------------|----------------------|----------------------|
| % SikaFume | Diámetro (cm) | Clasificación |
| 0% | 70 | Autocompactante |
| 3% | 67.9 | Muy fluido |
| 7% | 60.1 | Fluido |
| 10% | 53.9 | Muy suave |

Como se observó en las tablas anteriores, al 10% de humo de sílice existe una transición en la forma de medir la trabajabilidad, menor al 10% se mide como un hormigón autocompactante a través del ensayo de fluidez, y los porcentajes mayores a 10% se mide a través del cono de Abrams, siendo un hormigón con consistencia plástica, y concentraciones mayores a 15% resulta en una mezcla poco trabajable y medir el asentamiento o revenimiento se vuelve imposible teniendo un valor de cero y consistencia seca.

3.4. Propiedades del hormigón en estado endurecido

3.4.1. Absorción y densidad del hormigón endurecido

De acuerdo con la teoría, uno de los beneficios de la incorporación del humo de sílice es la reducción de la absorción de agua del hormigón. Como se muestra en las siguientes ilustraciones y siguiendo la norma ASTM C642 para asegurar la precisión de los resultados obtenidos, se confirma la hipótesis que al aumentar humo de sílice al hormigone se reduce la absorción de líquidos obteniendo así un hormigón menos permeable, hasta un porcentaje de humo de sílice de 15% a partir del cual vuelve a aumentar la absorción debido a la baja trabajabilidad y calidad del hormigón, por la presencia de hormigueras en los porcentajes altos de humo de sílice, se ve muy reducido este beneficio, teniendo una parábola convexa como se ve en la gráfica de absorción a los 28 días.

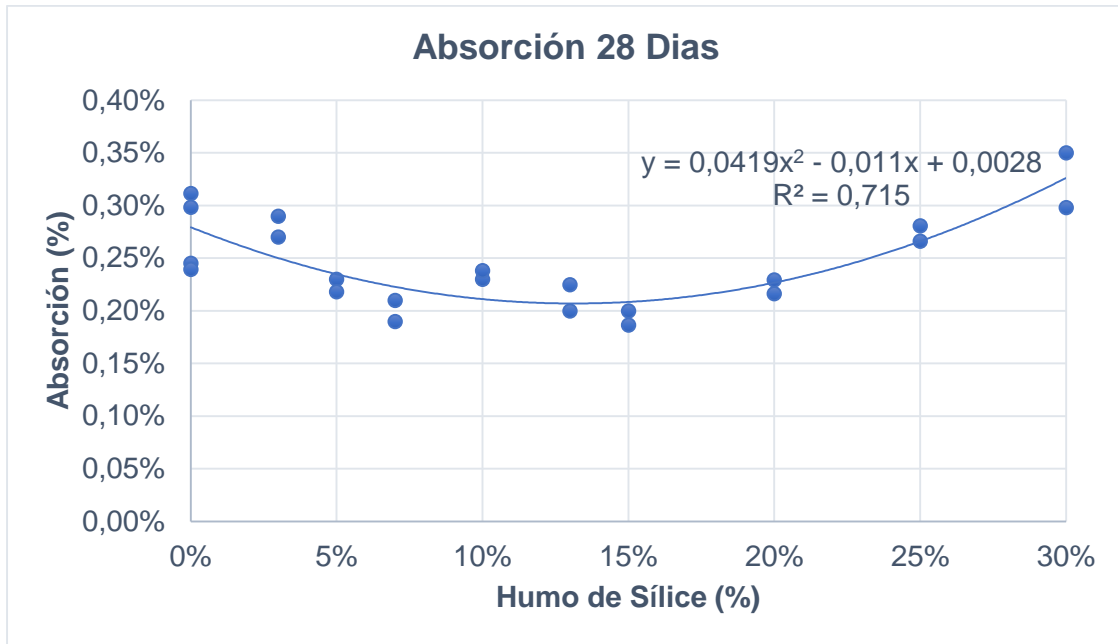


Ilustración 52. Absorción del hormigón de 28 días.

Como se menciona anteriormete para obtener la densidad corregida, se analizaron 3 probetas de hormigon con los porcentajes de 7%, 10% y 30% de humo de sílice.



Ilustración 53. Sectorización del hormigón de 7% humo de sílice.

% de orificios promedio = 10%

El factor de aumento determinado a través de la Ec. 14 es:

$$F. A. = 1.0075$$

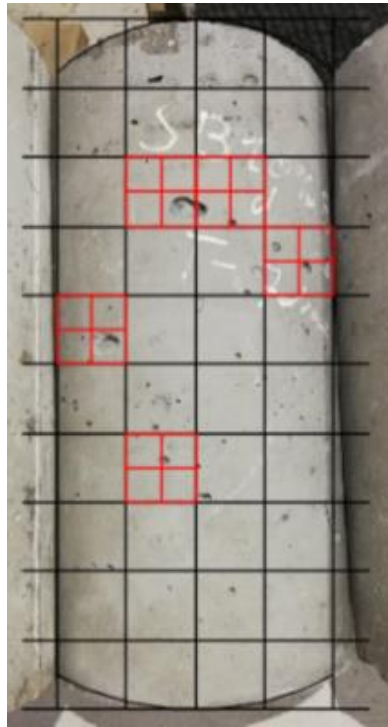


Ilustración 54. Sectorización del hormigón de 10% humo de sílice.

$$\% \text{ de orificios promedio} = 20\%$$

El factor de aumento determinado a través de la Ec. 14 es:

$$F. A. = 1.025$$

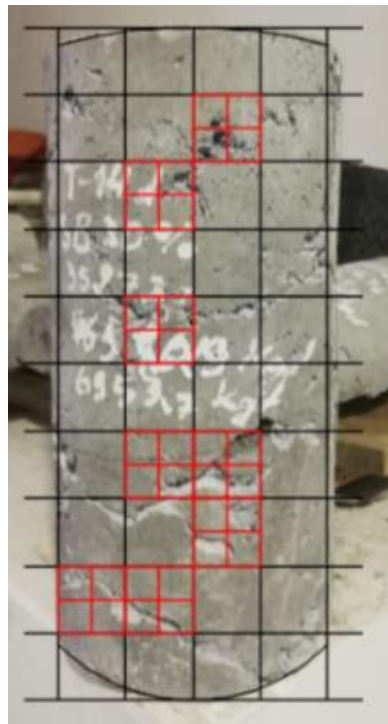


Ilustración 55. Sectorización del hormigón de 30% humo de sílice.



% de orificios promedio = 25%

El factor de aumento determinado a través de la Ec. 14 es:

$$F. A. = 1.05$$

En la siguiente tabla se muestran las densidades originales y corregidas de las probetas de hormigón.

| ID | Densidad Original (g/cm³) | Densidad Corregida (g/cm³) |
|-----------|---|--|
| P-9 | 2.446 | 2.446 |
| P-10 | 2.460 | 2.460 |
| P-11 | 2.461 | 2.461 |
| P-12 | 2.451 | 2.451 |
| SB3-b | 2.448 | 2.466 |
| SB3-c | 2.448 | 2.466 |
| SB5V-e | 2.450 | 2.468 |
| SB5V-f | 2.427 | 2.445 |
| SB7 | 2.430 | 2.491 |
| SB7 | 2.447 | 2.508 |
| SB10-a | 2.419 | 2.479 |
| SB10-e | 2.438 | 2.499 |
| SB13-1 | 2.414 | 2.474 |
| SB13-2 | 2.425 | 2.485 |
| SB15 | 2.432 | 2.493 |
| SB15 | 2.429 | 2.490 |
| SB20-1 | 2.365 | 2.483 |
| SB20-2 | 2.388 | 2.507 |
| SB25-5 | 2.350 | 2.468 |
| SB25-6 | 2.342 | 2.459 |
| SB30-6 | 2.301 | 2.416 |
| SB30-3 | 2.335 | 2.452 |

Tabla 33. Valores de densidad original y corregida.

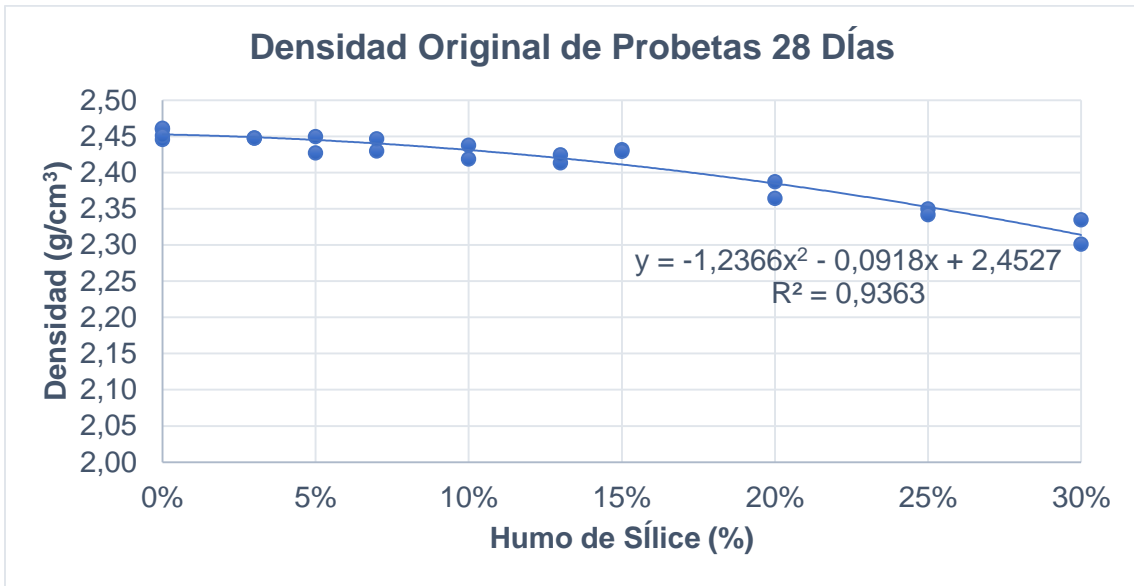


Ilustración 56. Tendencia de la densidad original del hormigón.

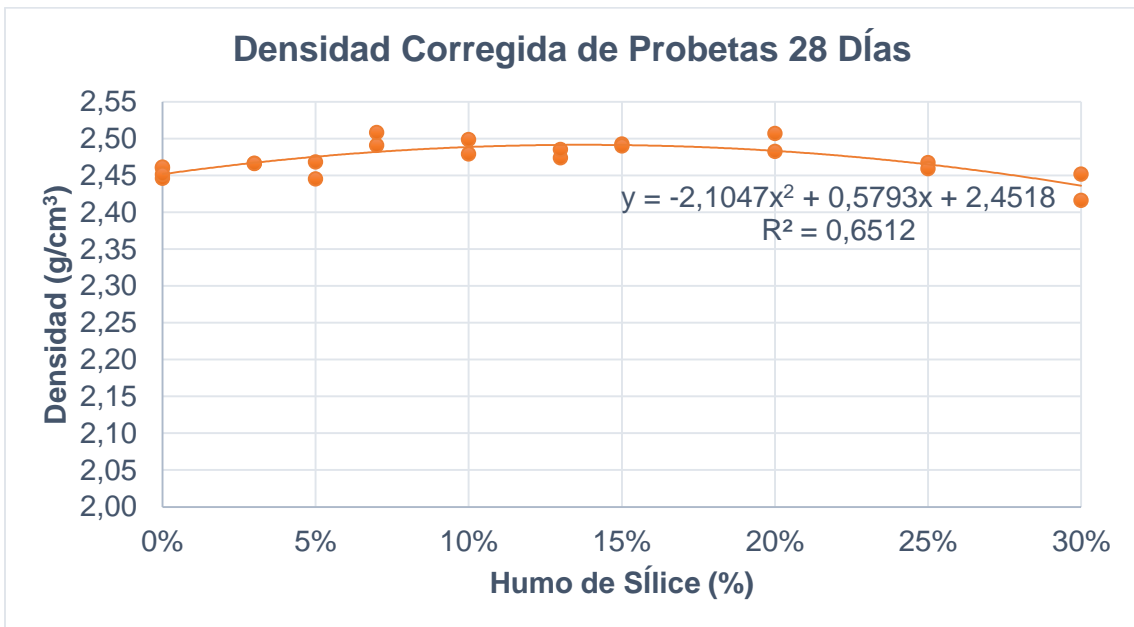


Ilustración 57. Tendencia de la densidad corregida del hormigón.

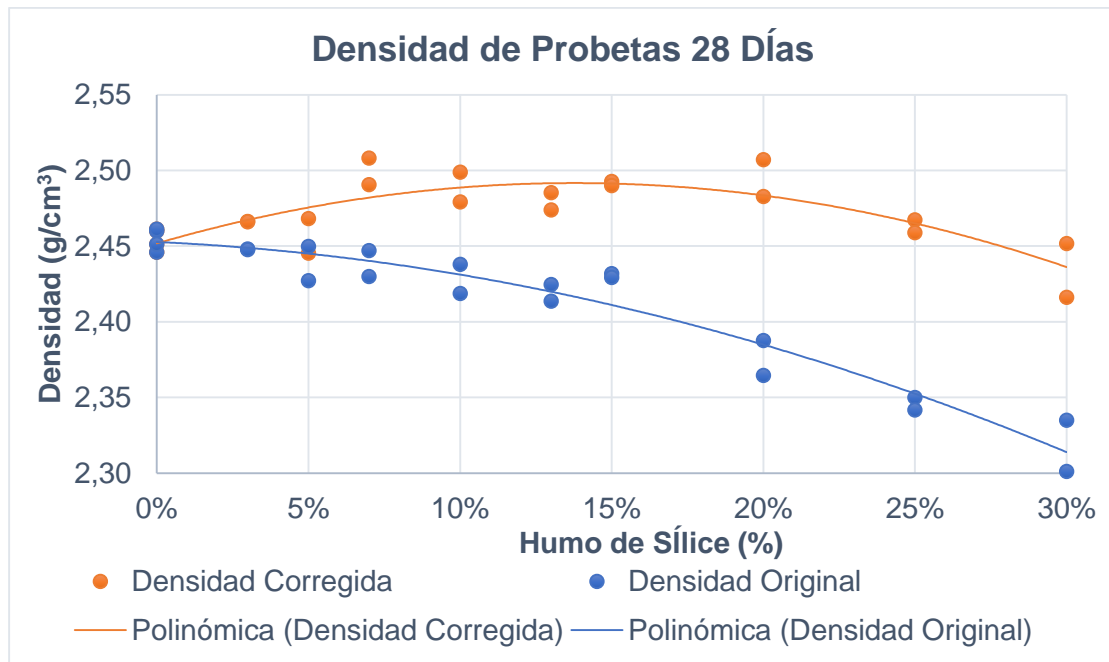


Ilustración 58. Comparación entre la densidad original y corregida.

Al comparar la densidad original con la corregida se verifica el aumento de la densidad conforme aumenta el humo de sílice hasta el 15% donde decrece por la alta presencia y difícil estimación de hormigueras en los porcentajes superiores al mencionado, a pesar de que existe una corrección mayor (25%) por la presencia de orificios, la densidad sigue decayendo debido a la alta presencia de orificios que más allá de esta estimación no se pueden medir, teniendo así una densidad máxima entre el 10% y 20% de humo de sílice.

3.4.2. Resistencia a compresión simple

A continuación, se presenta el crecimiento de resistencia a compresión simple de las probetas de hormigón a los 7, 14 y 28 días, como un porcentaje de resistencia de los 28 días que alcanza en el paso del tiempo.

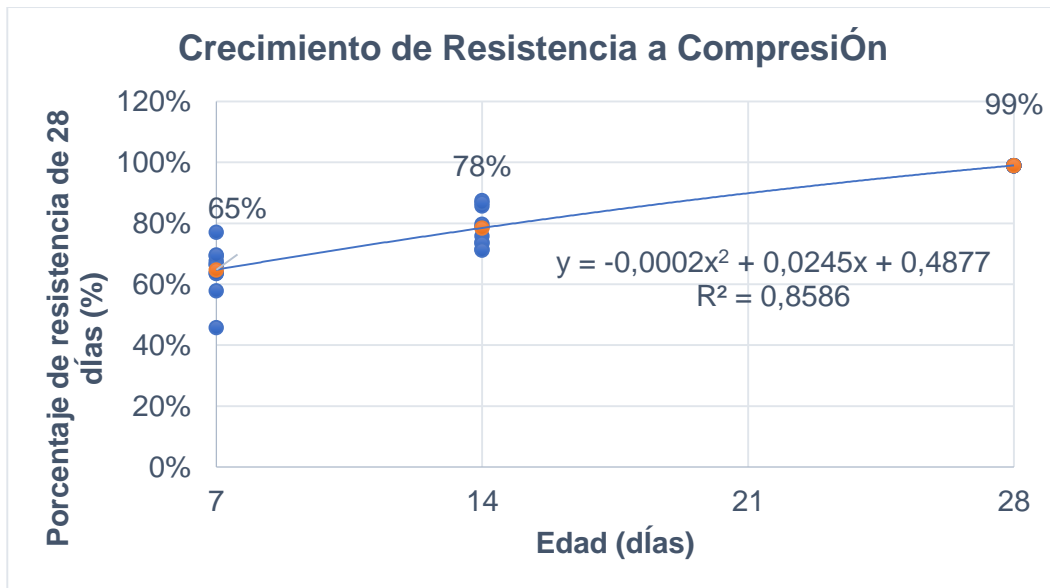


Ilustración 59. Crecimiento de resistencia a compresión en función del tiempo.

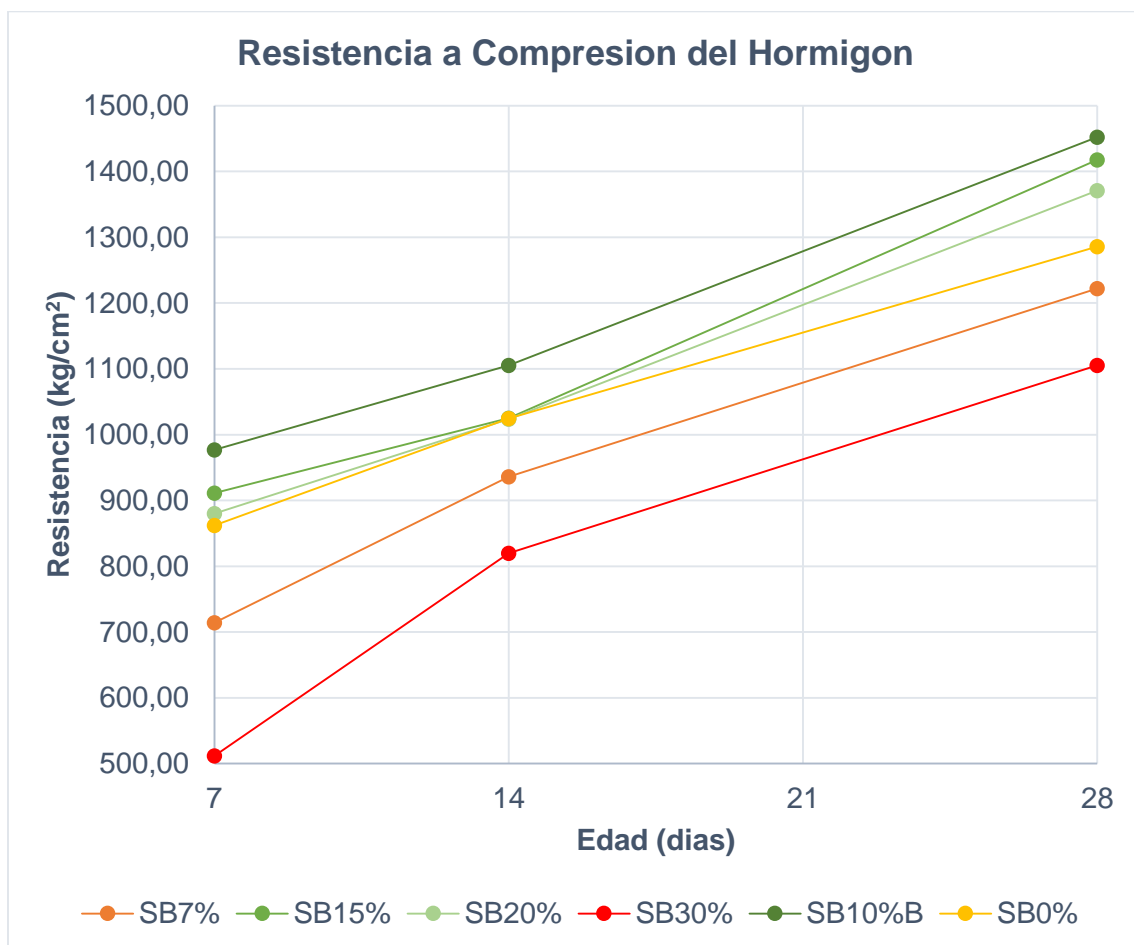


Ilustración 60. Aumento de resistencia a compresión de diferentes porcentajes de humo de sílice.

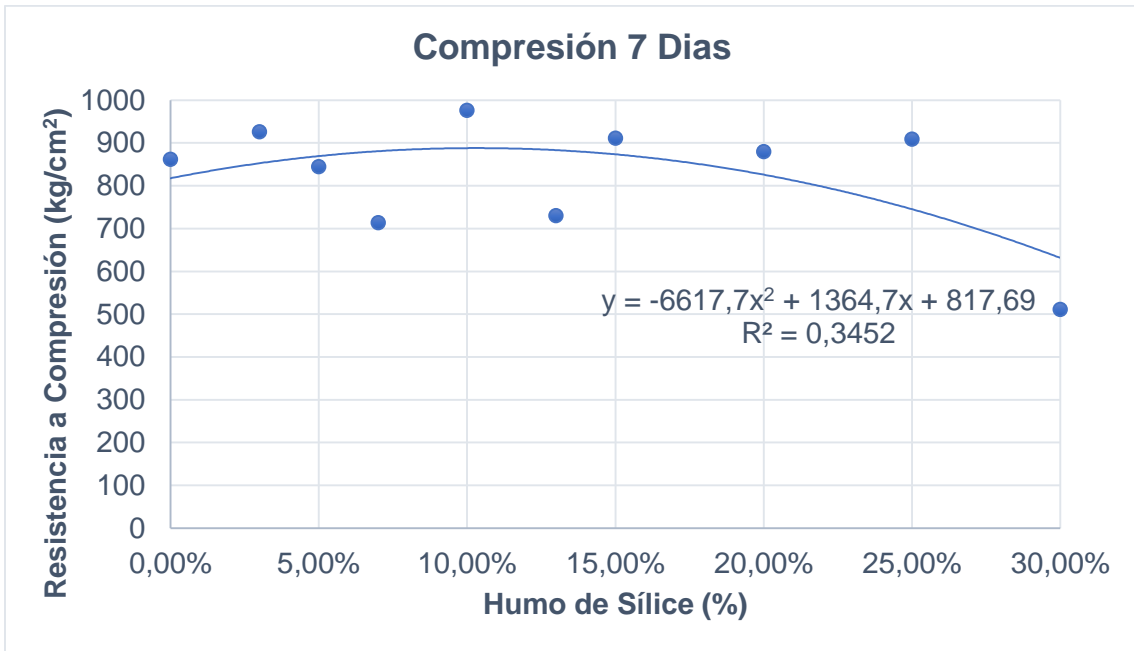


Ilustración 61. Resultados de resistencia a compresión de 7 días.

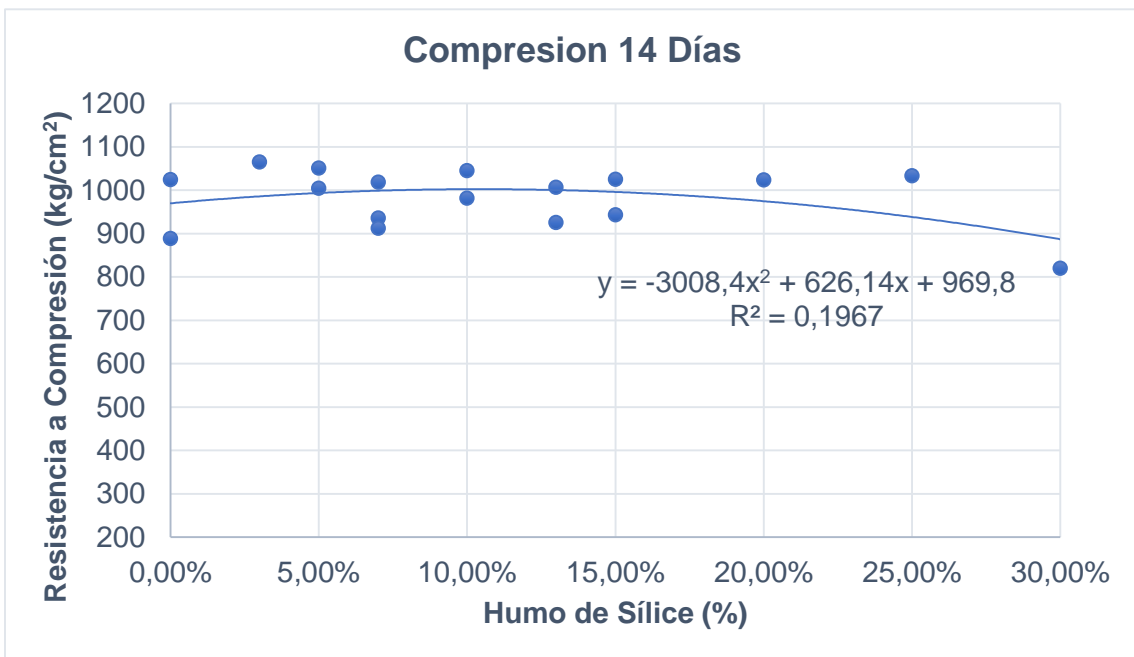


Ilustración 62. Resultados de resistencia a compresión de 14 días.

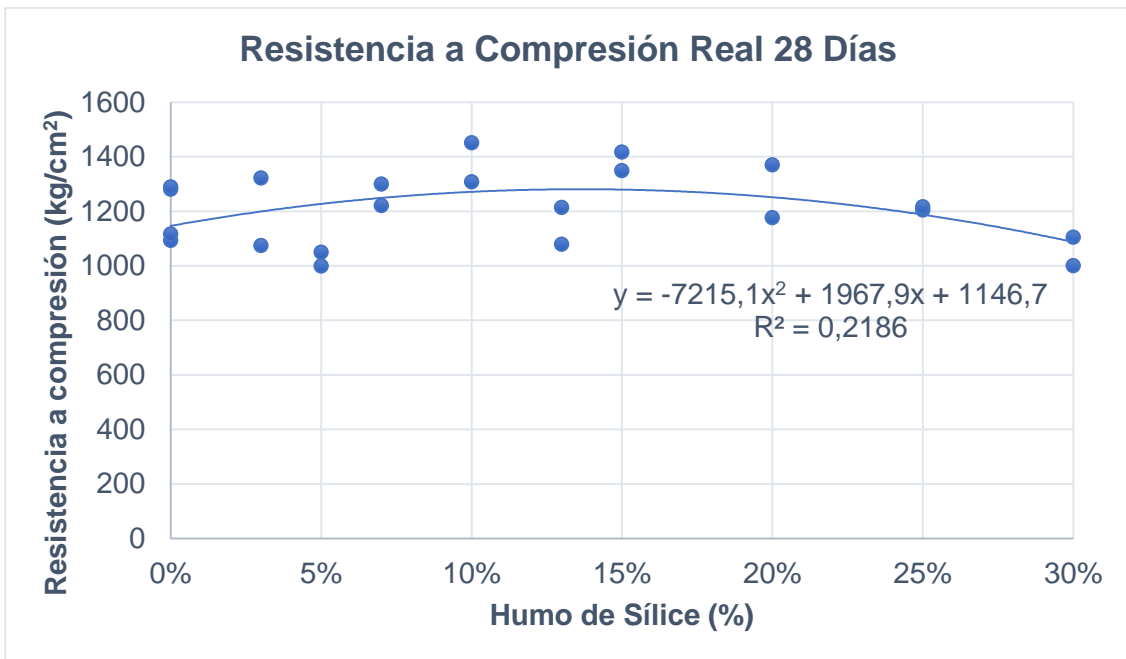


Ilustración 63. Resultados de resistencia a compresión de 28 días.

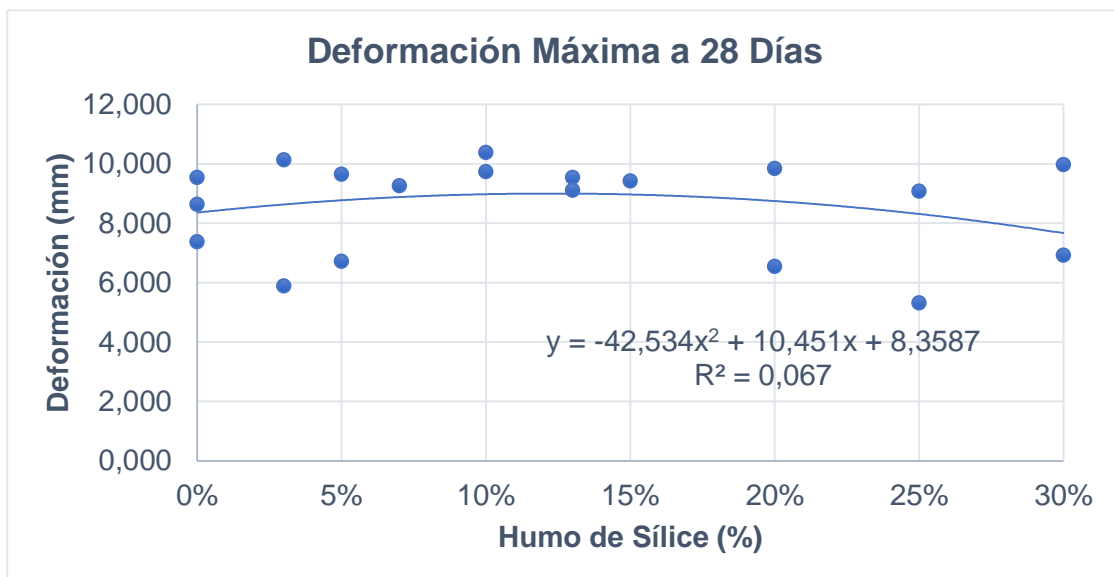


Ilustración 64. Deformación longitudinal del hormigón a 28 días.

Analizando las ilustraciones mostradas del ensayo a compresión simple a los 28 días, los valores más altos se encuentran variando en el rango del 7% al 13% de humo de sílice tomándose como porcentaje óptimo el 10%, que brinda el máximo beneficio a esta propiedad, dando una máxima resistencia a compresión simple de 1452 kg/cm².

3.4.3. Modo de falla a compresión simple

| 7 días | | 14 días | | 28 días | | | |
|---------------|----------|----------------|------------|----------------|----------|--------|----------|
| P1 | TIPO 3 | P5 | TIPO 2 - 1 | P-9 | TIPO 2-1 | P-11 | TIPO 3 |
| P3 | TIPO 2-2 | P6 | TIPO 2-2 | P-10 | TIPO 5 | P-12 | TIPO 2-1 |
| SB3 | TIPO 2-2 | SB3 | TIPO 2-1 | SB3-b | TIPO 2-1 | SB3-c | TIPO 2-1 |
| SB5 | TIPO 5 | SB5 | TIPO 5 | SB5V-f | TIPO 2-1 | SB5V-e | TIPO 2-1 |
| SB7 | TIPO 3 | SB7 | TIPO 2-1 | SB7 | TIPO 2-2 | | |
| SB10 | TIPO 2-1 | SB10 | TIPO 2-1 | SB10-a | TIPO 3 | SB10-e | TIPO 3 |
| SB13 | TIPO 2-1 | SB13 | TIPO 2-1 | SB13-2 | TIPO 2-1 | SB13-1 | TIPO 2-1 |
| SB15 | TIPO 2-2 | SB15 | TIPO 2-1 | SB15 | TIPO 3 | | |
| SB20 | TIPO 2-1 | SB20 | TIPO 2-1 | SB20-1 | TIPO 2-1 | SB20-2 | TIPO 2-2 |
| SB25 | TIPO3 | SB25 | TIPO 2-1 | SB25-6 | TIPO 3 | SB25-5 | TIPO 2-1 |
| SB30 | Tipo 1-2 | SB30 | TIPO 2-1 | SB30-6 | TIPO 3 | SB30-3 | TIPO 2-1 |

Debido al uso de neoprenos para romper los cilindros se tiene un tipo de fallo general que clasifica este tipo de hormigones el tipo 2-1, formando un cono y una grieta a lo largo del cilindro.

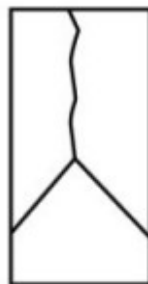


Ilustración 65. Tipo de falla 2-1 dominante en las probetas de hormigón según ASTM C39.



Ilustración 66. Tipo de falla 2-1 en probetas de hormigón.

3.4.4. Resistencia a tracción

A continuación, se observa los resultados del ensayo a tracción, realizado en probetas de hormigón.

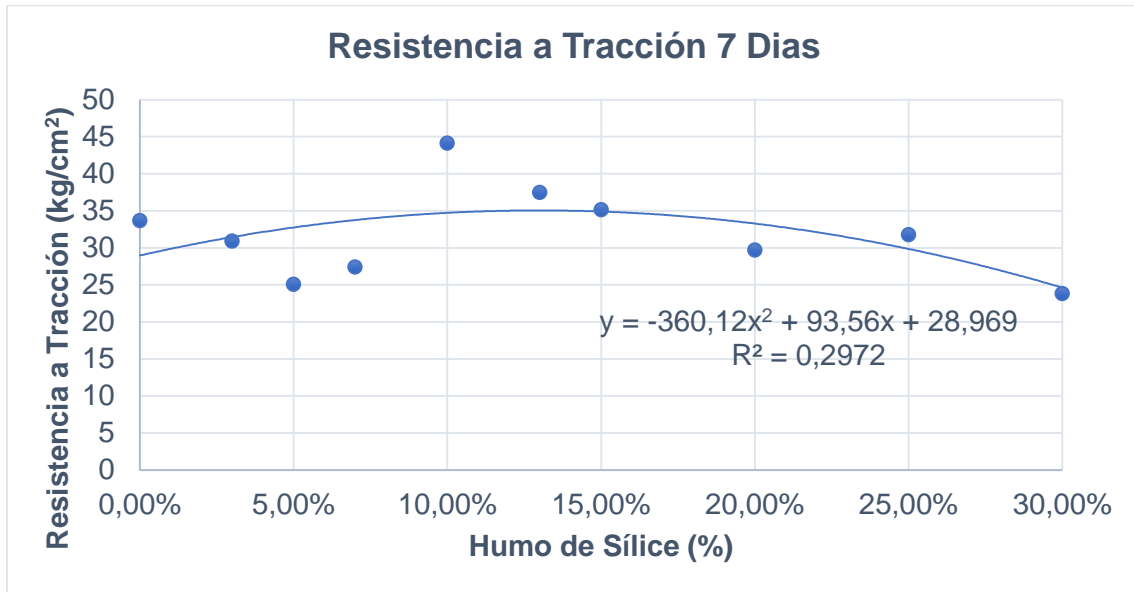


Ilustración 67. Resistencia a tracción indirecta de 7 días.

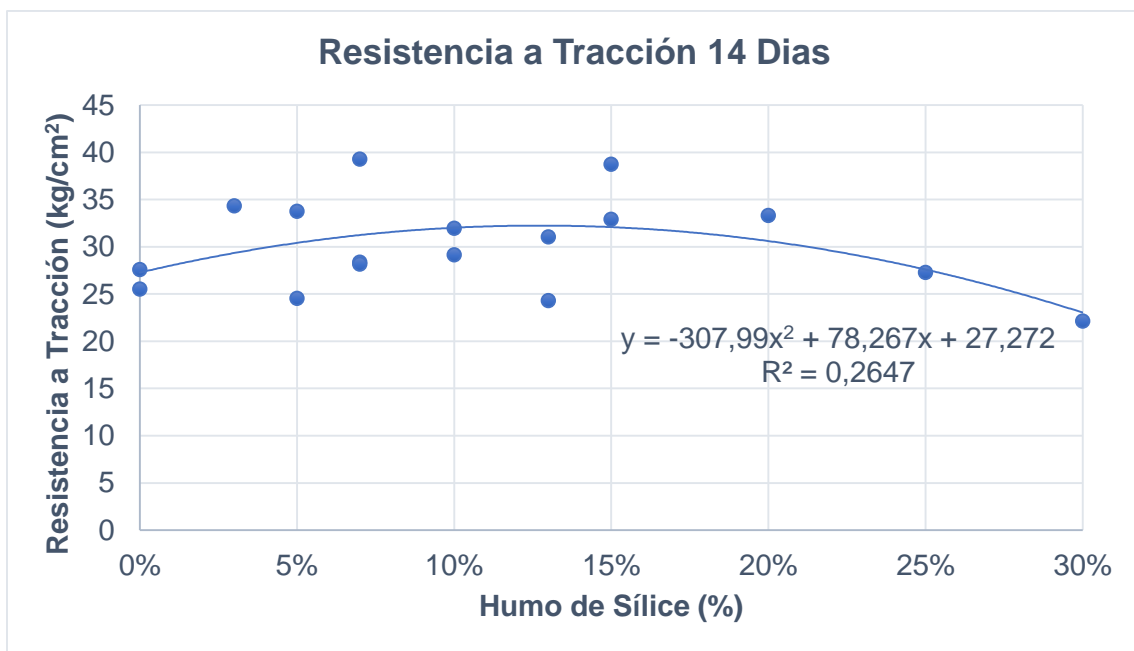


Ilustración 68. Resistencia a tracción indirecta de 14 días.

Al igual que en el ensayo a compresión en el ensayo a tracción también se puede obtener un porcentaje óptimo de humo de sílice, el cual se encuentra entre 10% y 15% según la línea de tendencia formada, sin embargo según la siguiente ilustración no existe un patrón de crecimiento de resistencia apreciable en algunos casos la resistencia sube a los 14 días y en otros baja, se puede justificar este comportamiento ya que esta propiedad no solo depende de la resistencia a compresión, sino, además la compactación, trabazón de los agregados y el



acomodo del mismo. Por esta razón se decidió no realizar este ensayo a los 28 días.

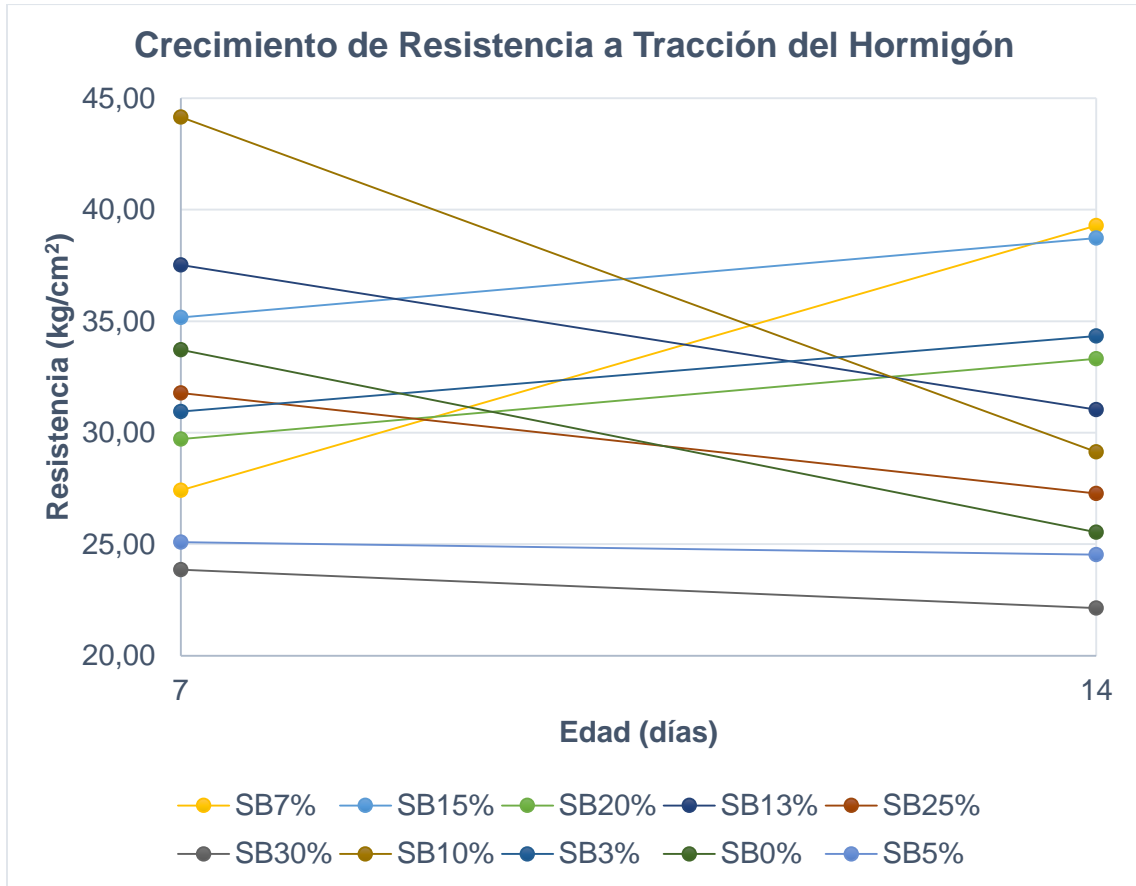


Ilustración 69. Comportamiento de la resistencia a tracción del hormigón.

3.4.5. Resistencia a flexión

De acuerdo con los requerimientos dimensionales y la separación de los apoyos para aplicar la carga de 15 cm se requiere una viga con luz mínima de al menos 45 cm y por los apoyos 5 cm extras teniendo así una longitud total mínima de 50 cm de la viga.

Según la ASTM C78 el peralte mínimo de la viga es un tercio de la luz libre siendo así de 15 cm, para el ancho de la sección se planteó usar dos tercios del peralte, teniendo un ancho de 10 cm.



Tabla 34. Comportamiento de vigas a flexión.

| Vigas | Compresión (kg/cm ²) | Fuerza (N) | Tensión de Rotura (kg/cm ²) | Deflexión Máxima (mm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|-----------------------|
| 0% | 888.67 | 31567.3 | 64.40 | 0.61 |
| 0% | 888.67 | 29203.4 | 59.57 | 0.46 |
| 5% | 1051.42 | 39320.3 | 80.21 | 0.88 |
| 7% | 1018.42 | 26238.4 | 53.53 | 0.60 |
| 10% | 981.58 | 29585.80 | 60.36 | 0.30 |
| 13% | 1006.74 | 35545.00 | 72.51 | 0.82 |
| 13% | 1006.74 | 36990.50 | 75.46 | 0.43 |
| 15% | 943.38 | 30092.60 | 61.39 | 0.34 |

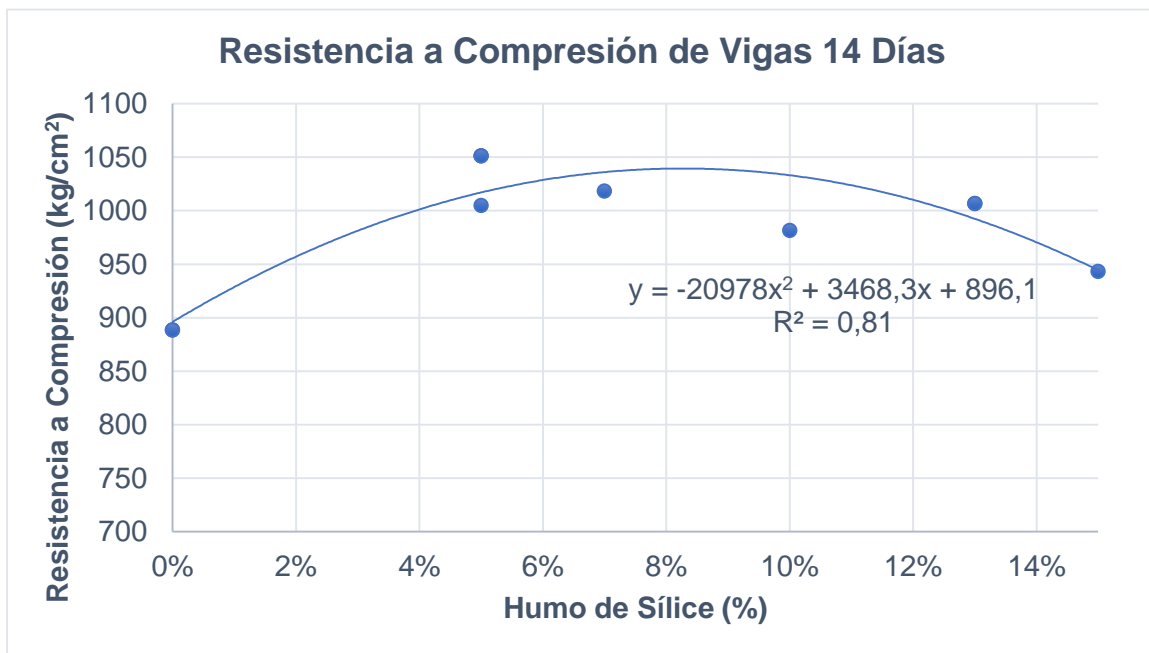


Ilustración 70. Resistencia a compresión de probetas de hormigón correspondiente a las vigas de 14 días.

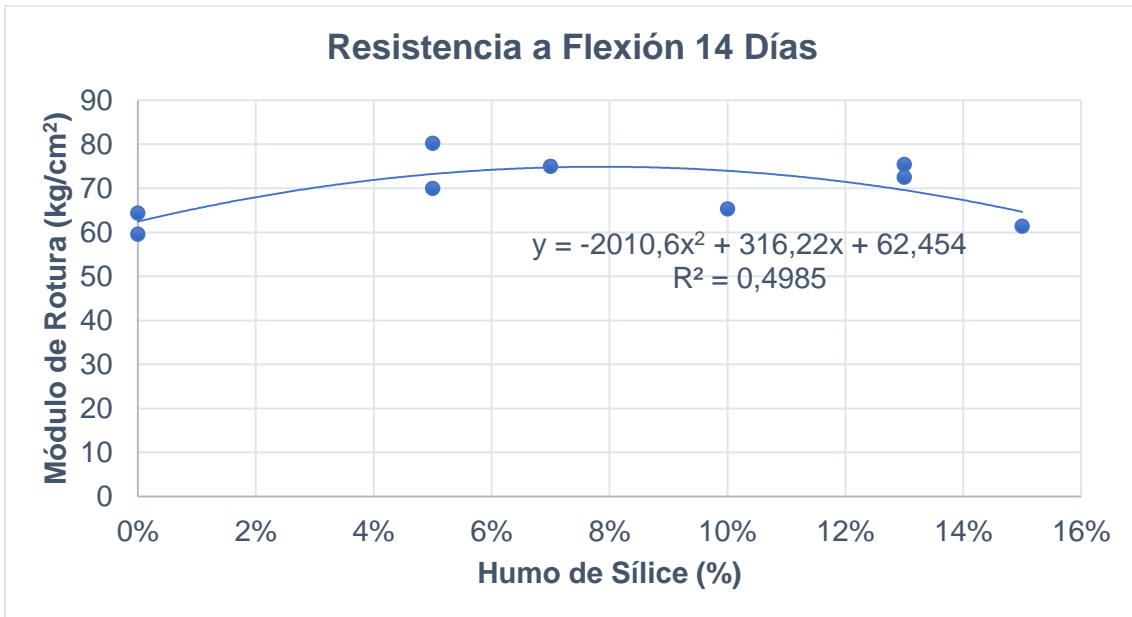


Ilustración 71. Resistencia a flexión de vigas a 14 días.

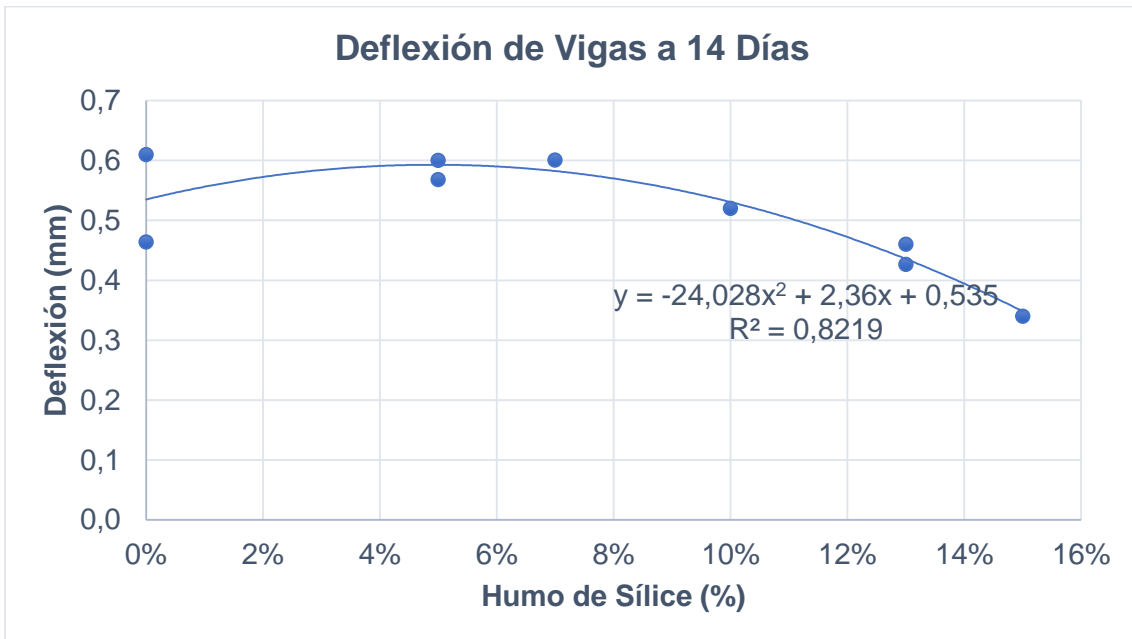


Ilustración 72. Deflexión de vigas a 14 días tras el ensayo a flexión.

En esta propiedad, así como en las otras, el porcentaje óptimo de humo de sílice se encuentra entre el 7% y 13% según el módulo de rotura, la máxima deflexión se encuentra al 7%, se recomendaría aumentar el número de vigas para un mejor análisis de esta propiedad.



3.4.6. Velocidad de pulso ultrasónico

Tabla 35. Resultados del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico

| ID | Tiempo (us) | Velocidad de onda (m/s) | Velocidad de onda (km/s) | Densidad corregida (kg/m³) | Módulo de elasticidad dinámico (MPa) | f'c (kg/cm²) |
|-----------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|---|--------------------------------|
| P-9 | 41 | 4878.1 | 4.88 | 2446.1 | 55124.4 | 1146.70 |
| P-10 | 40 | 5018.8 | 5.02 | 2460.0 | 58682.7 | 1146.70 |
| P-11 | 41 | 4919.0 | 4.92 | 2461.3 | 56402.6 | 1146.70 |
| P-12 | 40 | 4960.0 | 4.96 | 2451.4 | 57116.3 | 1146.70 |
| SB3-b | 40 | 4943.3 | 4.94 | 2466.5 | 57081.4 | 1199.24 |
| SB3-c | 41 | 4896.7 | 4.90 | 2466.1 | 56000.0 | 1199.24 |
| SB5V-e | 41 | 4873.3 | 4.87 | 2468.3 | 55518.1 | 1227.06 |
| SB5V-f | 41 | 4880.0 | 4.88 | 2445.4 | 55153.7 | 1227.06 |
| SB7 | 41 | 4860.0 | 4.86 | 2490.8 | 55716.0 | 1249.10 |
| SB7 | 40 | 4940.0 | 4.94 | 2508.2 | 57969.0 | 1249.10 |
| SB10-a | 41 | 4870.0 | 4.87 | 2479.3 | 55688.5 | 1271.34 |
| SB10-e | 41 | 4900.0 | 4.90 | 2498.9 | 56823.3 | 1271.34 |
| SB13-1 | 42 | 4810.0 | 4.81 | 2474.1 | 54210.3 | 1280.59 |
| SB13-2 | 41 | 4880.0 | 4.88 | 2485.4 | 56055.7 | 1280.59 |
| SB15 | 41 | 4820.0 | 4.82 | 2492.8 | 54847.7 | 1279.55 |
| SB15 | 41 | 4863.0 | 4.86 | 2490.1 | 55771.1 | 1279.55 |
| SB20-1 | 41 | 4840.0 | 4.84 | 2482.8 | 55082.6 | 1251.68 |
| SB20-2 | 42 | 4800.0 | 4.80 | 2507.2 | 54706.8 | 1251.68 |
| SB25-5 | 42 | 4723.3 | 4.72 | 2467.5 | 52135.6 | 1187.73 |
| SB25-6 | 42 | 4743.3 | 4.74 | 2459.0 | 52397.2 | 1187.73 |
| SB30-6 | 42 | 4760.0 | 4.76 | 2416.2 | 51848.1 | 1087.71 |
| SB30-3 | 43 | 4630.0 | 4.63 | 2451.7 | 49775.3 | 1087.71 |

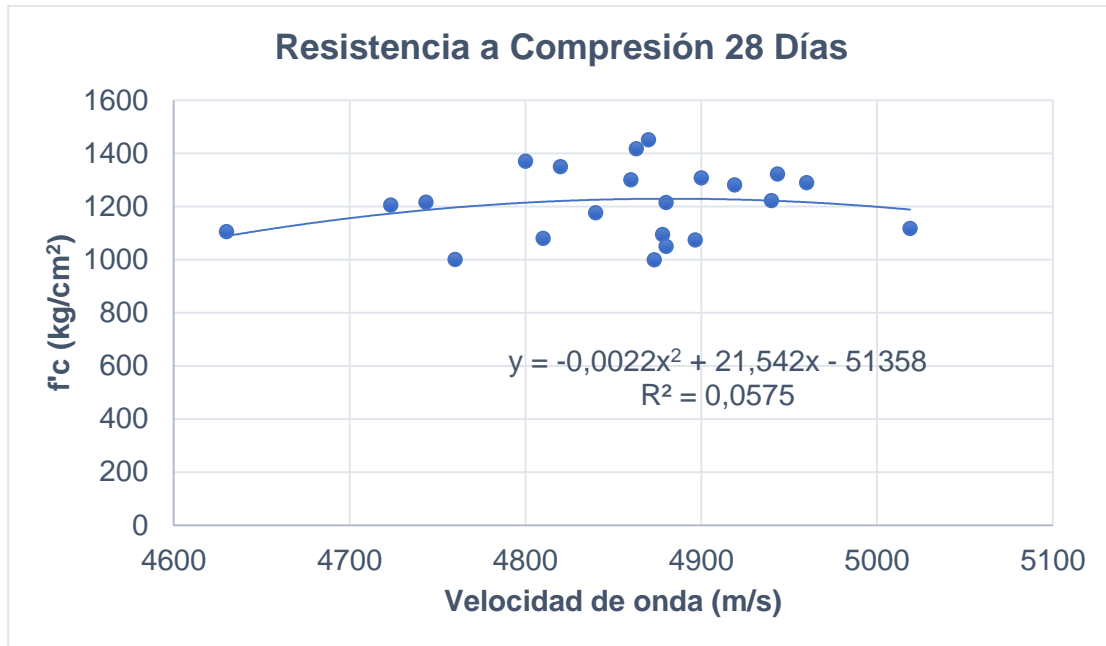


Ilustración 73. Representación gráfica de la velocidad de onda vs la resistencia a compresión.

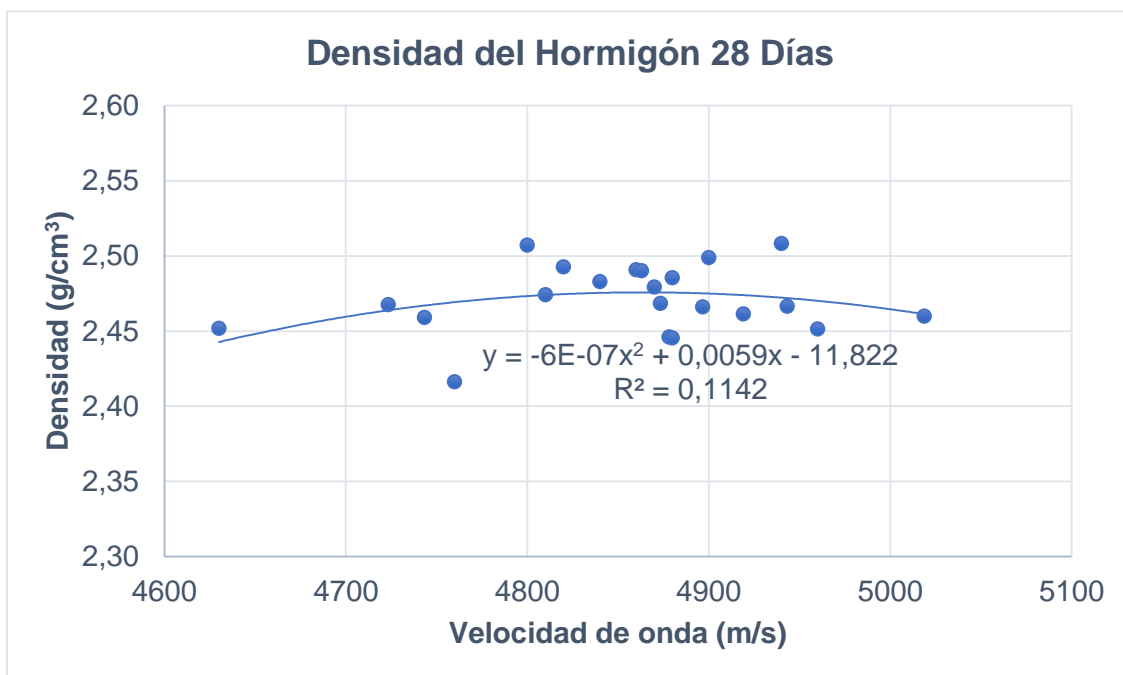


Ilustración 74. Representación gráfica de la velocidad de onda vs la densidad corregida del hormigón.

En base a las velocidades de pulso obtenidas se puede observar las dosificaciones desarrolladas sobrepasan los requisitos mínimos establecidos en las Tabla 12. Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda, según Leslie y Cheesman Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo Tabla 13. Evaluación de la calidad del hormigón mediante su velocidad de pulso, según Agraval. Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo y Tabla 14. Velocidad de onda mínima en diferentes estructuras. Fuente: Material de apoyo PhD. Daniel Mogrovejo tanto para que se consideren de excelente y muy buena calidad siendo esta la máxima calidad del hormigón



según dichos autores citados, así como para ser utilizadas en cualquier tipo de estructura.

La velocidad de onda se relaciona directamente con la densidad y resistencia a compresión del hormigón, la primera porque un hormigón al ser más denso la cantidad de vacíos que producen interferencia en la transmisión de la onda es menor, el segundo criterio de igual manera relaciona el aumento de velocidad con el aumento de resistencia.

Como se menciona en la parte teórica se obtuvo el módulo de elasticidad dinámico de las probetas ensayadas en base a la velocidad de onda. En todos los casos el módulo de elasticidad supera los 490000MPa confirmando una vez más la excelente calidad del producto, La norma ACI 318 establece que el módulo de elasticidad para hormigones normales con $f'c$ de 210kg/cm² y 300kg/cm², es de 23771MPa y 24392Mpa respectivamente.

3.4.7. Resistividad eléctrica

Tabla 36. Resultados de ensayo de resistencia eléctrica y clasificación de durabilidad ante cloruros

| ID | Densidad Corregida | Resistencia Eléctrica | Resistividad | Penetración del Ion Cloruro |
|--------|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|
| | g/cm ³ | kΩ | kΩ*cm ² /cm | Alto |
| P-9 | 2.446 | 2.375 | 9.322 | Alto |
| P-10 | 2.460 | 2.445 | 9.597 | Alto |
| P-11 | 2.461 | 2.385 | 9.361 | Alto |
| P-12 | 2.451 | 2.180 | 8.557 | Alto |
| SB3-b | 2.466 | 2.505 | 9.832 | Alto |
| SB3-c | 2.466 | 2.470 | 9.695 | Alto |
| SB5V-e | 2.468 | 2.685 | 10.539 | Alto |
| SB5V-f | 2.445 | 2.700 | 10.598 | Alto |
| SB7 | 2.491 | 2.850 | 11.186 | Moderado |
| SB7 | 2.508 | 3.255 | 12.776 | Moderado |
| SB10-a | 2.479 | 3.080 | 12.089 | Moderado |
| SB10-e | 2.499 | 3.350 | 13.149 | Moderado |
| SB13-1 | 2.474 | 4.315 | 16.936 | Moderado |
| SB13-2 | 2.485 | 4.505 | 17.682 | Moderado |
| SB15 | 2.493 | 4.200 | 16.485 | Moderado |
| SB15 | 2.490 | 4.080 | 16.014 | Moderado |
| SB20-1 | 2.483 | 5.160 | 20.253 | Moderado |
| SB20-2 | 2.507 | 5.690 | 22.333 | Bajo |
| SB25-5 | 2.468 | 4.150 | 16.289 | Moderado |
| SB25-6 | 2.459 | 4.200 | 16.485 | Moderado |
| SB30-6 | 2.416 | 4.175 | 16.387 | Moderado |
| SB30-3 | 2.452 | 4.110 | 16.132 | Moderado |

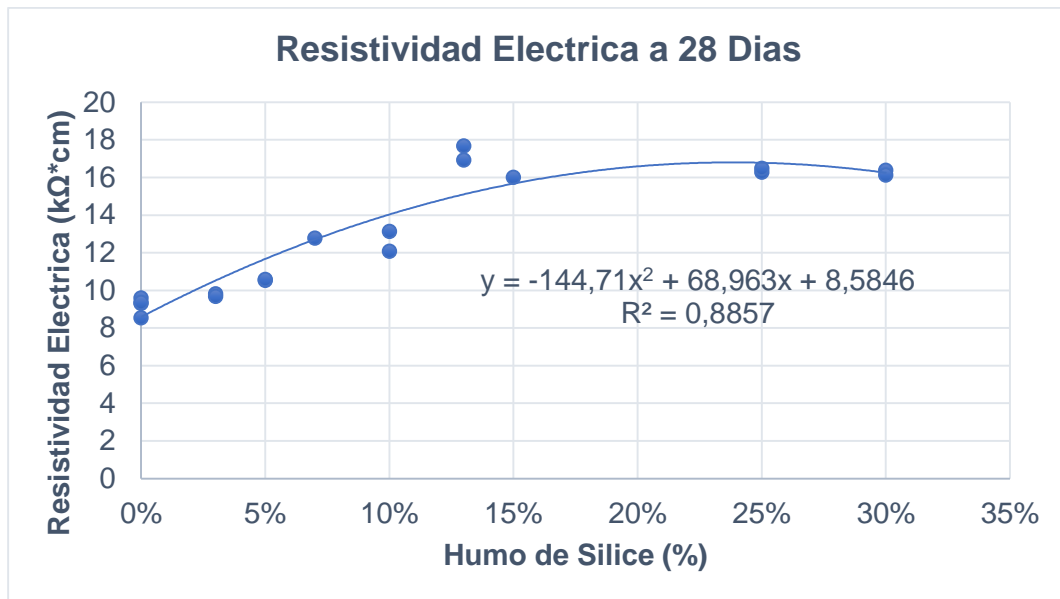


Ilustración 75. Crecimiento de resistividad eléctrica.

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente, la durabilidad correspondiente a un 10% del humo de sílice se clasifica como una resistencia moderada a cloruros, por lo que cualquier obra que vaya a estar en contacto este agente corrosivo resulta beneficiosa para preservar la durabilidad y aumentar el periodo entre mantenimiento que se realice a la obra.

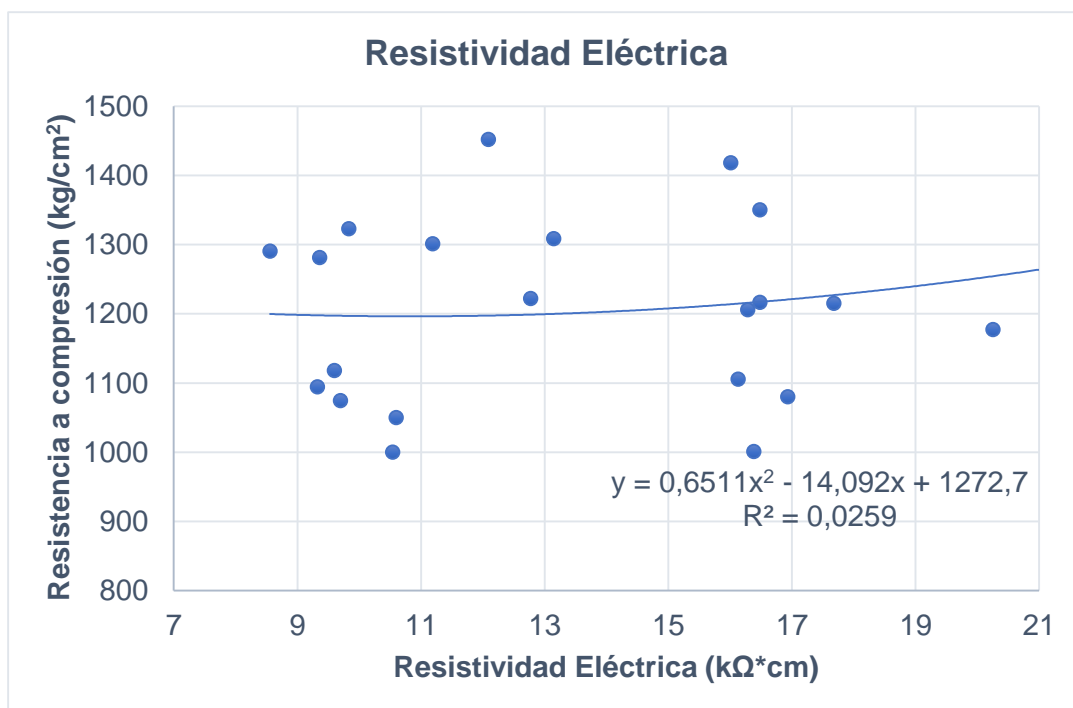


Ilustración 76. Resistencia a compresión en función de la resistividad eléctrica

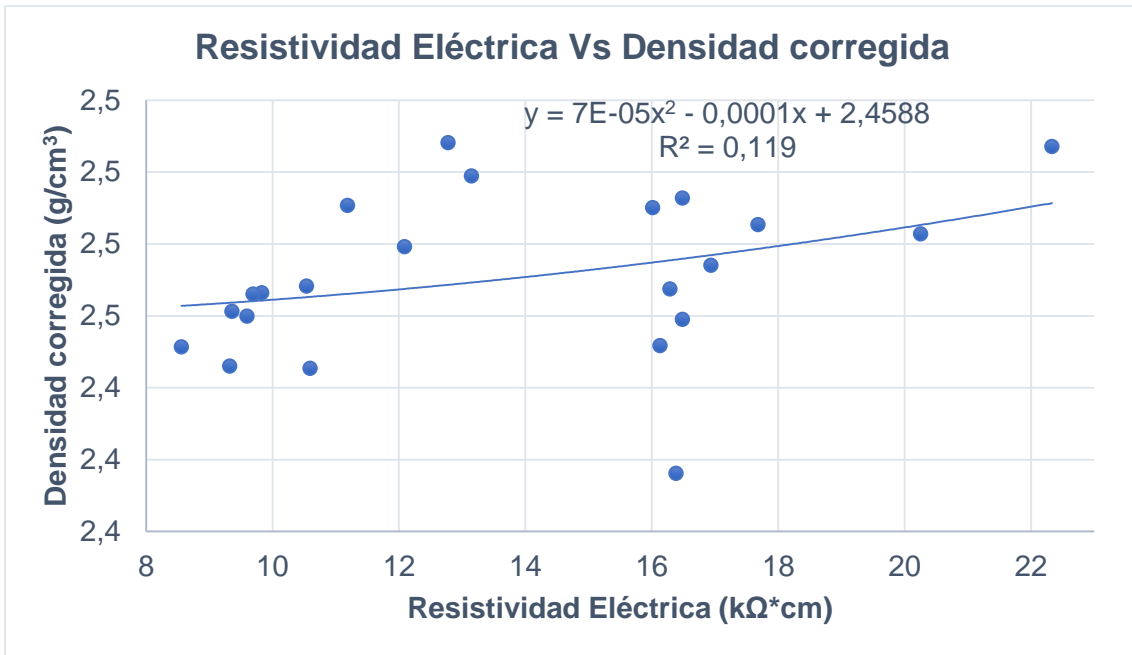


Ilustración 77. Densidad del hormigón en función de la resistividad eléctrica.

Los hormigones de alta durabilidad son frecuentemente utilizados en obras hidráulicas y sanitarias por la presencia constante de agentes químicos agresivos que deterioran significativamente los hormigones.

El efecto directo más nocivo de la penetración de cloruros es la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque es más intenso cuando el agua o la humedad pueden penetrar en él hormigón, jugando además la permeabilidad un factor de gran importancia (Girón, 1998).



3.4.8. Resistencia asociada al índice esclerométrico.

Tabla 37. Análisis de correlación de resistencia a compresión para el índice esclerométrico.

| ID | Índice Esclerométrico | f'c asociado (kg/cm ²) | f'c Real (kg/cm ²) | Factor de Corrección | f'c Calculada Corregida (kg/cm ²) | Δ f'c (%) |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------|---|-----------|
| P-9 | 57.5 | 446.3 | 1094.4 | 2.5 | 1106.7 | 1% |
| P-10 | 58.0 | 457.1 | 1117.7 | 2.4 | 1133.6 | 1% |
| P-11 | 60.0 | 503.2 | 1281.3 | 2.5 | 1247.8 | 3% |
| P-12 | 59.5 | 491.3 | 1290.3 | 2.6 | 1218.2 | 6% |
| SB3-b | 60.5 | 515.4 | 1322.6 | 2.6 | 1278.1 | 3% |
| SB3-c | 60.0 | 503.2 | 1074.6 | 2.1 | 1247.8 | 16% |
| SB5V-e | 59.5 | 491.3 | 1000.0 | 2.0 | 1218.2 | 22% |
| SB5V-f | 59.0 | 479.6 | 1050.0 | 2.2 | 1189.3 | 13% |
| SB7 | 60.0 | 503.2 | 1301.0 | 2.6 | 1247.8 | 4% |
| SB7 | 59.0 | 479.6 | 1222.0 | 2.5 | 1189.3 | 3% |
| SB10-a | 60.5 | 515.4 | 1452.0 | 2.8 | 1278.1 | 12% |
| SB10-e | 60.0 | 503.2 | 1308.2 | 2.6 | 1247.8 | 5% |
| SB13-1 | 59.5 | 491.3 | 1080.0 | 2.2 | 1218.2 | 13% |
| SB13-2 | 60.0 | 503.2 | 1215.0 | 2.4 | 1247.8 | 3% |
| SB15 | 60.0 | 503.2 | 1350.0 | 2.7 | 1247.8 | 8% |
| SB15 | 59.0 | 479.6 | 1417.8 | 3.0 | 1189.3 | 16% |
| SB20-1 | 59.0 | 480.6 | 1177.0 | 2.4 | 1191.7 | 1% |
| SB20-2 | 60.5 | 515.4 | 1371.1 | 2.7 | 1278.1 | 7% |
| SB25-5 | 59.5 | 490.9 | 1205.8 | 2.5 | 1217.2 | 1% |
| SB25-6 | 60.5 | 515.4 | 1216.6 | 2.4 | 1278.1 | 5% |
| SB30-6 | 56.5 | 425.4 | 1000.9 | 2.4 | 1054.8 | 5% |
| SB30-3 | 57.5 | 446.3 | 1105.2 | 2.5 | 1106.7 | 0% |
| Factor de corrección promedio | | | | 2.5 | Δ f'c promedio | 7% |

La interpretación de la tabla presentada anteriormente, se muestra de mejor manera en las siguientes ilustraciones, el crecimiento del número de rebotes sigue una tendencia cóncava, donde el máximo rebote esta entre el 10% y 20% de humo de sílice.

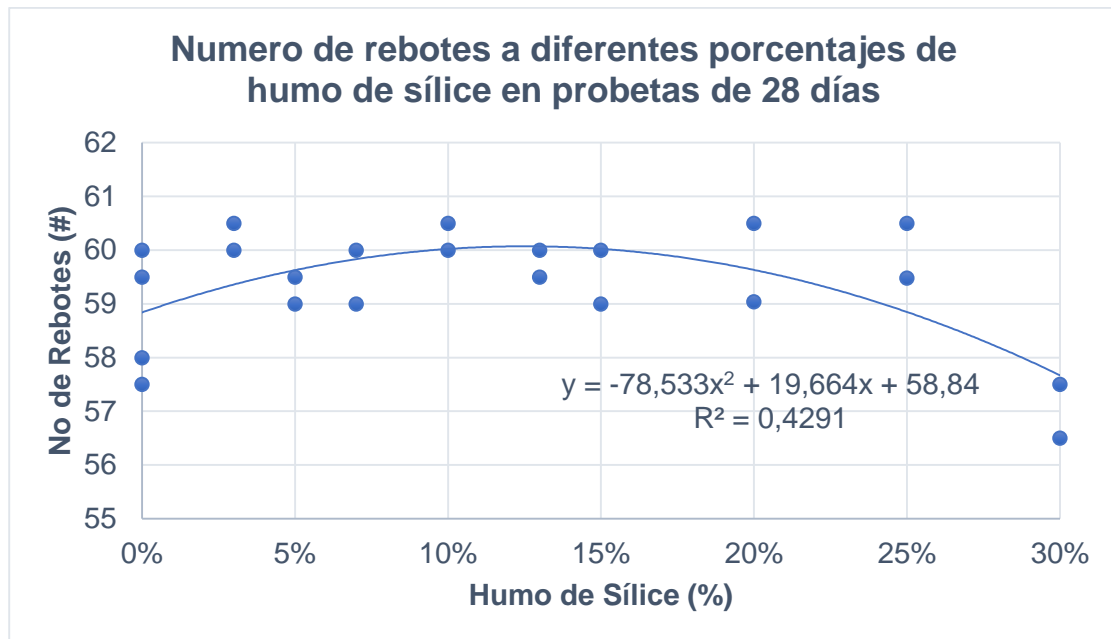


Ilustración 78. Representación gráfica del índice esclerométrico de 28 días.

Al realizar el ajuste a una línea polinómica de segundo grado de los valores de $f'c$ reales (compresión simple) y $f'c$ calculados corregidos (índice esclerométrico), se puede obtener la ecuación de tendencia, donde es más apreciable la variación entre las resistencias obtenidas.

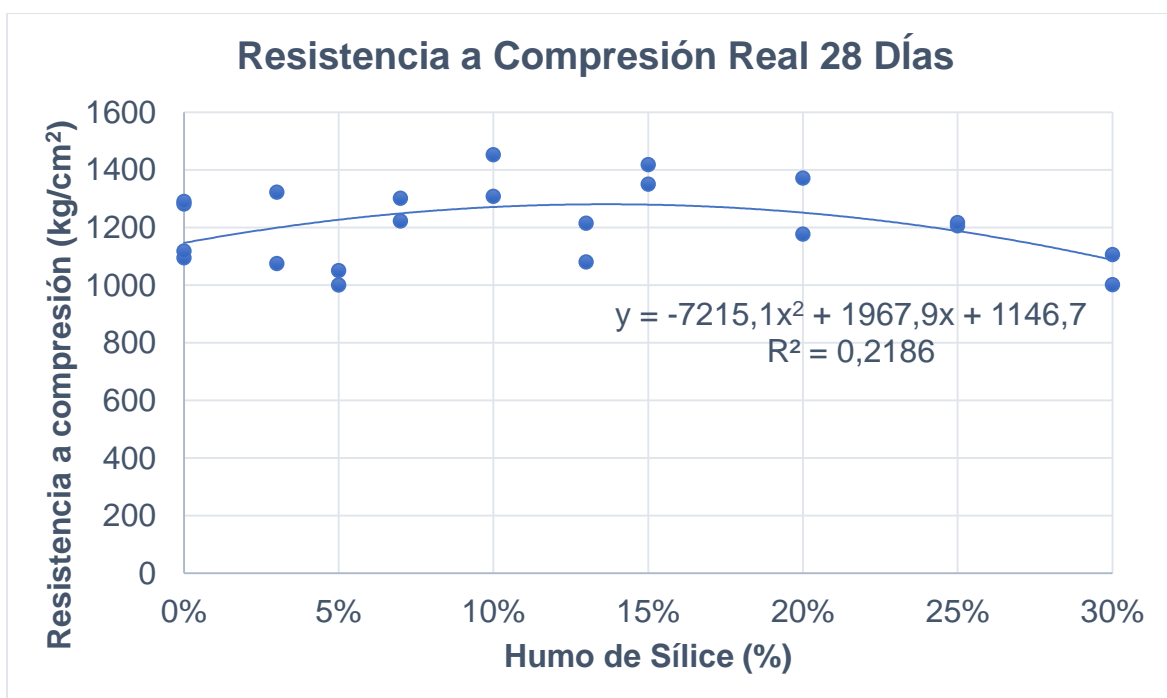


Ilustración 79. Resistencia a compresión simple real.

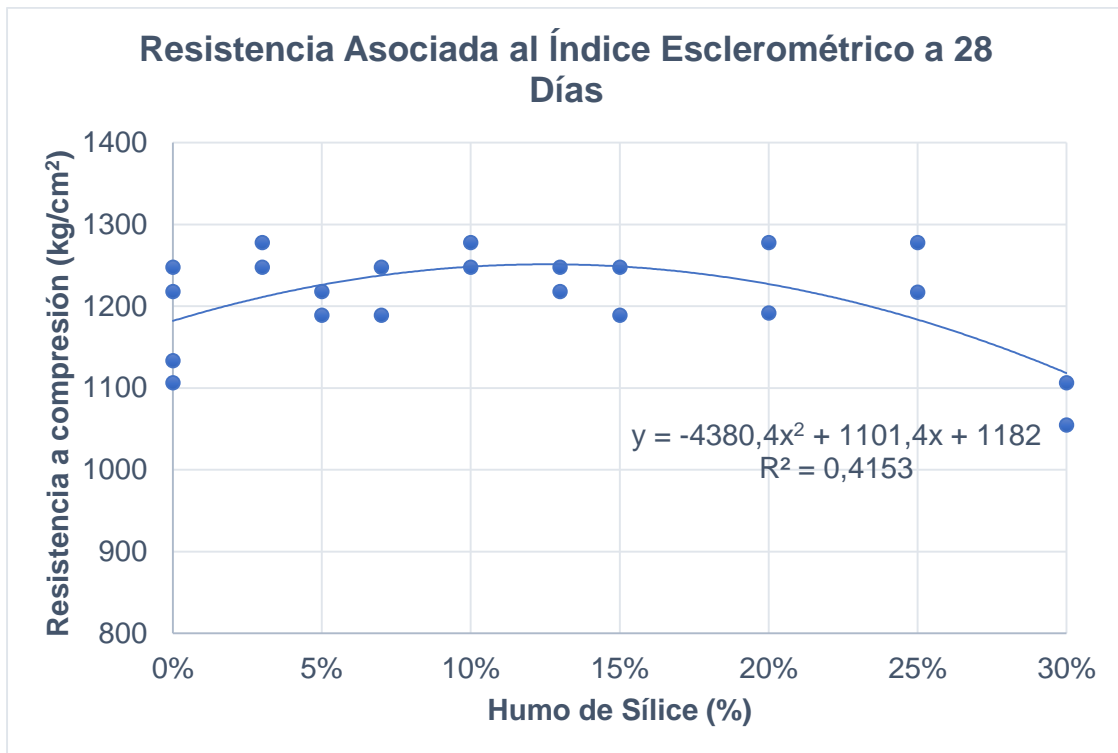


Ilustración 80. Resistencia a compresión corregida de correlación del índice esclerométrico.

La siguiente ilustración se presenta para una comparación de los resultados anteriores al aislar las líneas de tendencia correspondientes a cada resistencia $f'c$, donde en porcentajes entre el 5% y 25% de humo de sílice, el cálculo de capacidad de resistencia subestima la resistencia real lo cual se podría considerar conservativo por la seguridad, sin embargo, fuera de este rango sobre estima la resistencia calculada.

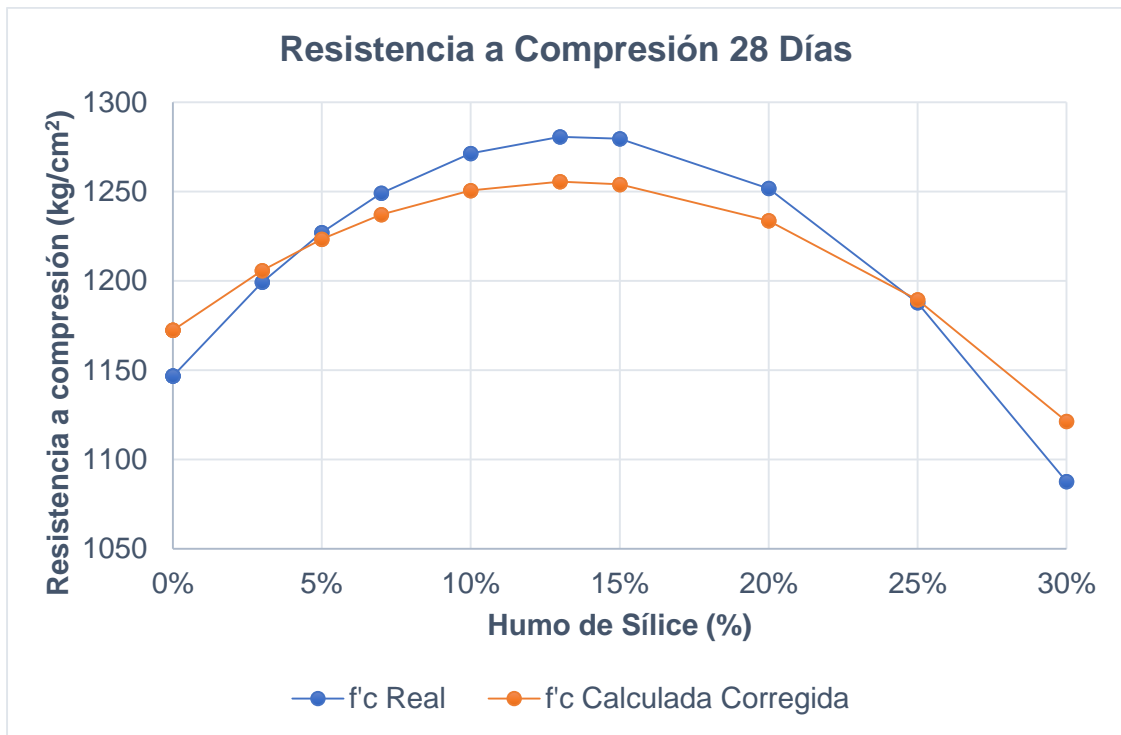


Ilustración 81. Comparación de la resistencia a compresión real y de correlación corregida.

En este tipo de ensayos no destructivos el equipo utilizado tiene el 95% de precisión en cada medición de rebote, para medir la resistencia del hormigón se ve necesario la utilización de un factor de corrección para aproximar de mejor manera el cálculo de la resistencia a compresión, por lo que se ve necesario la fábrica o extracción de probetas de este tipo de hormigón para determinar dicho factor.



3.4.9. Durabilidad

Para el cálculo de la durabilidad se consideró dar una calificación sobre 10 a las diferentes propiedades analizadas como se ve en la siguiente tabla, y para la calificación total se obtiene el promedio.

Tabla 38. Análisis de durabilidad del hormigón.

| Humo de sílice | Resistividad Eléctrica | | $f'c$ | | Densidad Corregida | | Velocidad de onda ultrasónica | | Calif. General prom. |
|----------------|------------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|-------------------------------|--------|----------------------|
| | kΩ*cm | Calif. | kg/cm ² | Calif. | g/cm ³ | Calif. | m/s | Calif. | |
| 0% | 9.322 | 4.6 | 1094.39 | 7.5 | 2.446 | 9.8 | 4878.1 | 9.7 | 7.9 |
| 0% | 9.597 | 4.7 | 1117.75 | 7.7 | 2.460 | 9.8 | 5018.8 | 10.0 | 8.1 |
| 0% | 9.361 | 4.6 | 1281.28 | 8.8 | 2.461 | 9.8 | 4919.0 | 9.8 | 8.3 |
| 0% | 8.557 | 4.2 | 1290.26 | 8.9 | 2.451 | 9.8 | 4960.0 | 9.9 | 8.2 |
| 3% | 9.832 | 4.9 | 1322.61 | 9.1 | 2.466 | 9.8 | 4943.3 | 9.8 | 8.4 |
| 3% | 9.695 | 4.8 | 1074.62 | 7.4 | 2.466 | 9.8 | 4896.7 | 9.8 | 8.0 |
| 5% | 10.539 | 5.2 | 1000 | 6.9 | 2.468 | 9.8 | 4873.3 | 9.7 | 7.9 |
| 5% | 10.598 | 5.2 | 1050 | 7.2 | 2.445 | 9.7 | 4880.0 | 9.7 | 8.0 |
| 7% | 11.186 | 5.5 | 1301 | 9.0 | 2.491 | 9.9 | 4860.0 | 9.7 | 8.5 |
| 7% | 12.776 | 6.3 | 1221.97 | 8.4 | 2.508 | 10.0 | 4940.0 | 9.8 | 8.6 |
| 10% | 12.089 | 6.0 | 1451.99 | 10.0 | 2.479 | 9.9 | 4870.0 | 9.7 | 8.9 |
| 10% | 13.149 | 6.5 | 1308.23 | 9.0 | 2.499 | 10.0 | 4900.0 | 9.8 | 8.8 |
| 13% | 16.936 | 8.4 | 1080 | 7.4 | 2.474 | 9.9 | 4810.0 | 9.6 | 8.8 |
| 13% | 17.682 | 8.7 | 1215 | 8.4 | 2.485 | 9.9 | 4880.0 | 9.7 | 9.2 |
| 15% | 16.485 | 8.1 | 1350 | 9.3 | 2.493 | 9.9 | 4820.0 | 9.6 | 9.2 |
| 15% | 16.014 | 7.9 | 1417.85 | 9.8 | 2.490 | 9.9 | 4863.0 | 9.7 | 9.3 |
| 20% | 20.253 | 10.0 | 1177.05 | 8.1 | 2.483 | 9.9 | 4840.0 | 9.6 | 9.4 |
| 20% | 19.821 | 9.8 | 1371.13 | 9.4 | 2.507 | 10.0 | 4800.0 | 9.6 | 9.7 |
| 25% | 16.289 | 8.0 | 1205.80 | 8.3 | 2.468 | 9.8 | 4723.3 | 9.4 | 8.9 |
| 25% | 16.485 | 8.1 | 1216.58 | 8.4 | 2.459 | 9.8 | 4743.3 | 9.5 | 9.0 |
| 30% | 16.387 | 8.1 | 1000.94 | 6.9 | 2.416 | 9.6 | 4760.0 | 9.5 | 8.5 |
| 30% | 16.132 | 8.0 | 1105.17 | 7.6 | 2.452 | 9.8 | 4630.0 | 9.2 | 8.7 |

Así en la siguiente ilustración se aprecia la durabilidad del hormigón teniendo el máximo al 20% de humo de sílice, sin embargo, se recomienda considerar 15% como el hormigón de máxima durabilidad, porque hasta ese porcentaje se tiene un hormigón bien compactado.

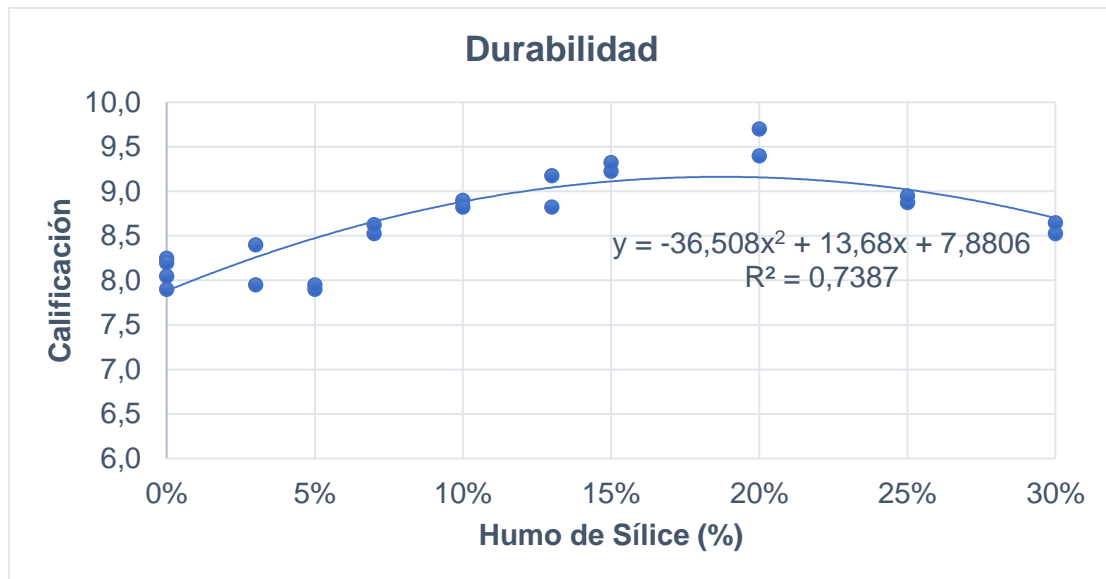


Ilustración 82. Durabilidad del hormigón a diferentes porcentajes de humo de sílice.

3.4.10. Análisis de costo de producción de hormigones de alto desempeño por metro cubico de mezcla

Para la determinación del costo de producción, en primer lugar, se analizarán en detalle todos los precios unitarios de los materiales correspondientes. En las siguientes tablas se detalla la cantidad de material a usar, el precio unitario según la unidad correspondiente y el precio final de cada material por metro cubico de hormigón, finalmente se suman los precios complementarios para determinar el costo final del hormigón de alta resistencia por metro cubico.

Cada tabla corresponde a un porcentaje específico de humo de sílice usado en la mezcla, iniciando con un porcentaje de 0% de humo de sílice, la cual es la mezcla patrón, para continuar con porcentajes de humo de sílice de 3%, 5%,7%,10%,13%,15%,20%,25% y 30% de humo de sílice.

Tabla 39. Precios unitarios de los componentes de un hormigón. Fuente: Índice de precios de materiales de construcción de la ACI.

| | Costo unitario | Unidad |
|-----------------|-----------------------|---------------|
| Arena | \$23.00 | \$/m3 |
| Grava | \$25.00 | \$/m3 |
| Cemento | \$7.50 | \$/50kg |
| Humo de sílice | \$13.00 | \$/15kg |
| Agua | \$0.83 | \$/m3 |
| Viscocrete 4100 | \$264.00 | \$/m3 |

Tabla 40. Precio por metro cubico de hormigón de los diferentes porcentajes de humo de sílice.

| Porcentaje de humo de sílice | Precio por metro cubico |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| SB 0% | \$124 |
| SB 3% | \$143 |
| SB 5% | \$156 |

| | |
|--------|-------|
| SB 7% | \$168 |
| SB 10% | \$187 |
| SB 13% | \$206 |
| SB 15% | \$219 |
| SB 20% | \$250 |
| SB 25% | \$281 |
| SB 30% | \$313 |

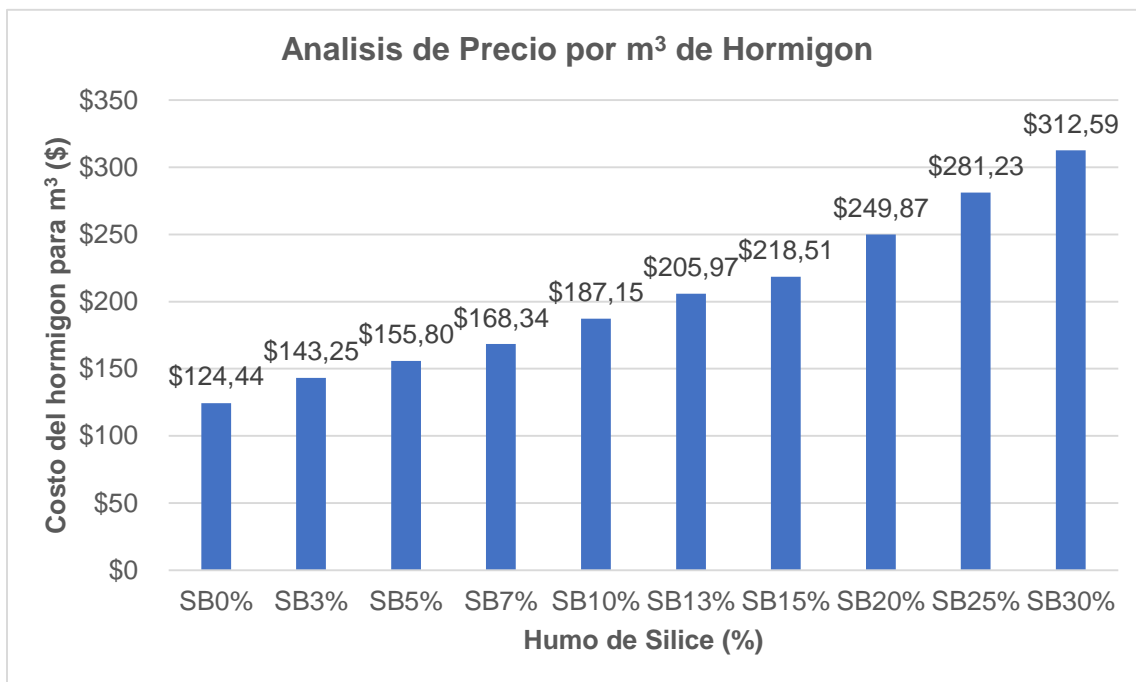


Ilustración 83. Precio por metro cubico de hormigón de los diferentes porcentajes de humo de sílice.

Al incrementar el porcentaje de humo de sílice el precio de producción del hormigón por metro cubico de mezcla crece de manera directa. Para el porcentaje óptimo de humo de sílice es del 10%, analizando el precio de producción de este hormigón, el incremento en referencia al costo de un cero por ciento de humo de sílice (muestra patrón), es de aproximadamente \$63 por metro cubico. Sin embargo, para poder apreciar el beneficio real de este tipo de hormigones se realiza un análisis costo-beneficio total.

3.4.10.1. Análisis de costo beneficio total

De acuerdo con la premisa de que un hormigón lo suficientemente resistente a compresión podría reducir la sección de los elementos estructurales al máximo, en el caso presentado a continuación se realiza al análisis de columnas y vigas de una misma edificación de 8 pisos con uso para oficinas, se analiza el piso 1 del modelo.

3.4.10.1.1. Análisis de columnas

En función de la resistencia se analizó el aumento de capacidad y reducción de la sección, en función de los criterios de capacidad a compresión y cortante, donde se tiene la siguiente tabla de resultados, se plantea las mismas



condiciones de carga máxima y momento a resistir por parte de las columnas siendo estos de 603 ton/cm² y 123.8 ton-m.

Se analiza la capacidad a compresión y cortante, variando la capacidad de resistir del hormigón a compresión simple, teniendo así la siguiente tabla.

Tabla 41. Análisis de capacidad de columnas por fuerza axial y cortante.

| Sección (cm) | f'c (kg/cm ²) | Pu (tnf) | M max (tnf-m) | Pu capacidad (tnf) | Pu actuante (tnf) | Cortante Rotula Plástica 0.75*Vs (tnf) | Vs (tnf) | Vc (tnf) | Cortante Fuera Rotula Plástica 0.75*(Vs+Vc) (tnf) | Vu actuante (tnf) |
|--------------|---------------------------|----------|---------------|--------------------|-------------------|--|----------|----------|---|-------------------|
| 80 | 240 | -602.3 | 123.8 | 625.8 | 605 | 136.3 | 109.0 | 44.7 | 115.3 | 75.3 |
| 65 | 350 | -602.3 | 123.8 | 697.7 | 605 | 110.7 | 88.6 | 35.6 | 93.1 | 75.3 |
| 55 | 500 | -602.3 | 123.8 | 683.1 | 605 | 93.7 | 74.9 | 30.5 | 79.1 | 75.3 |
| 55 | 800 | -602.3 | 123.8 | 1,050.3 | 605 | 93.7 | 74.9 | 38.5 | 85.2 | 75.3 |
| 50 | 1000 | -602.3 | 123.8 | 1,070.3 | 605 | 85.2 | 68.1 | 35.6 | 77.8 | 75.3 |
| 50 | 1450 | -602.3 | 123.8 | 1,525.5 | 605 | 85.2 | 68.1 | 42.9 | 83.3 | 75.3 |

De igual manera al tener el peso total en el piso del edificio 7260 ton se puede obtener el número de columnas requeridas en función de la capacidad que tiene, en la siguiente tabla se muestra este análisis para las diferentes resistencias a compresión simple.

Tabla 42. Número mínimo de columnas requeridas.

| f'c | #Columnas | Área Columna (m ²) | Volumen Columna (m ³) | Volumen Total Columnas (m ³) |
|------|-----------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| 240 | 12 | 0.64 | 1.92 | 23.04 |
| 350 | 11 | 0.42 | 1.27 | 13.94 |
| 500 | 11 | 0.30 | 0.91 | 9.98 |
| 800 | 7 | 0.30 | 0.91 | 6.35 |
| 1000 | 7 | 0.25 | 0.75 | 5.25 |
| 1450 | 5 | 0.25 | 0.75 | 3.75 |

De acuerdo con este análisis se puede observar claramente la gran reducción respecto a la sección y número de elementos estructurales, y al analizar el volumen de material requerido en función de las dos condiciones analizadas (sección y numero de columnas) se puede obtener el siguiente gráfico.

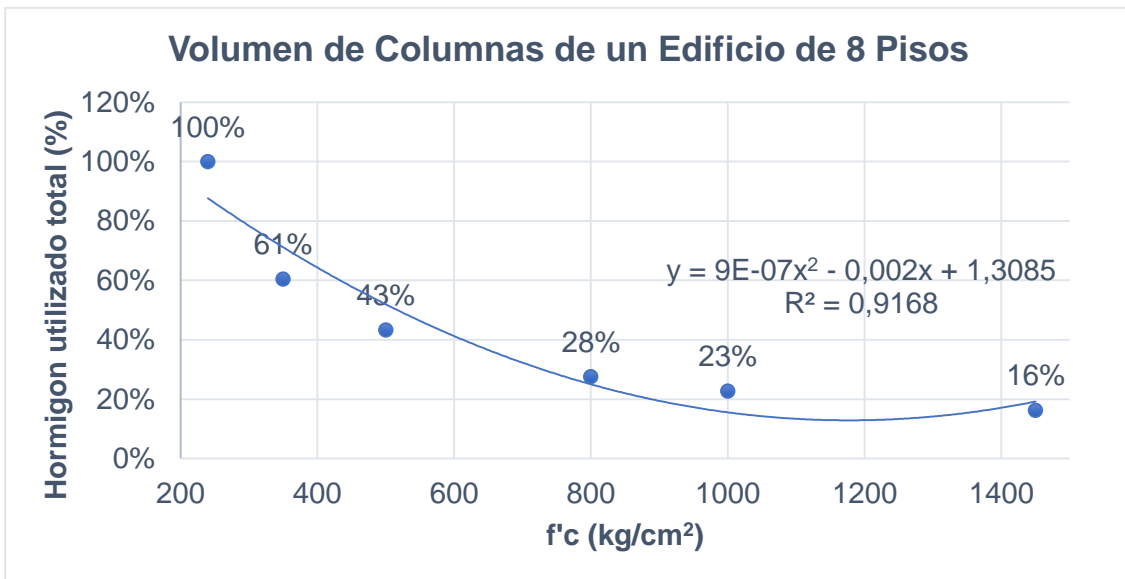


Ilustración 84. Reducción de volumen conforme aumenta la resistencia a compresión del hormigón.

Como se aprecia en la ilustración anterior la reducción de material de acuerdo aumenta la resistencia del hormigón se ve reducida en un 80%, lo que en el costo final de la obra significa un gran beneficio a pesar del costo aumentado del hormigón de alto desempeño.

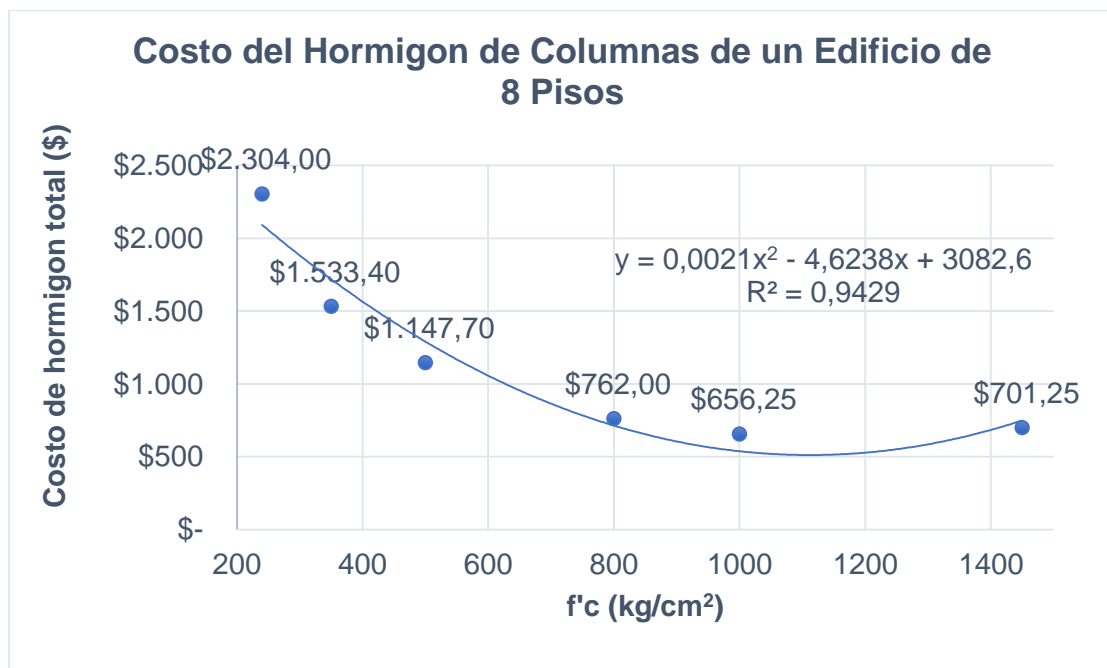


Ilustración 85. Reducción de costo conforme aumenta la resistencia a compresión.

En función del material ahorrado para las columnas de hormigón, se tiene el precio total del hormigón de las columnas considerando la reducción de sección y reducción del número de las mismas considerando solamente la capacidad para soportar el peso de la estructura.



CAPITULO V – Conclusión y Recomendaciones

- **Desarrollar Hormigones de alto desempeño**

Se logró elaborar hormigones de muy alta resistencia hasta los 1452 kg/cm², con una trabajabilidad muy fluida, durabilidad superior a un hormigón tradicional, capaz de soportar agresiones climáticas y químicas, y excelente calidad como alternativas que mejoran el desempeño estructural y permiten la reducción de las mismas gracias a su alta resistencia

- **Caracterización del agregado**

La caracterización del agregado tanto grueso como fino se rigió al cumplimiento de la norma ASTM C33, respetando el rango establecido en las curvas límite, y manteniendo la misma granulometría en cada mezcla para así eliminar una variable que altere las mezclas. En el agregado grueso se utilizó los valores promedio de los límites establecidos por la norma para mantener la tendencia de las curvas límites. Se excluyó el material pasante del tamiz 3/8", el cual no se consideró adecuado debido a la forma irregular de las partículas, siendo compensadas por partículas de este tamaño proveniente de la arena. Para el agregado fino la gradación fue aproximada al límite máximo, lo que permitió llegar a un módulo de finura de 3, ya que tanto el tamaño grande de partículas finas como la forma redondeada de las mismas favorece el desarrollo de hormigones de alto desempeño, así aumentando la capacidad reológica del hormigón.

En general la caracterización de los agregados presento buenos resultados, un alto peso específico correspondiente a un agregado de muy buena calidad, una absorción baja que permite reducir la cantidad de agua de corrección, y una abrasión del 17%, adecuada para el desarrollo de hormigones que por norma se establece sea menor al 35%.

- **Porcentaje óptimo de aditivo.**

Se determinó el porcentaje óptimo de aditivo de 0.9% del peso del material cementante mediante el ensayo demanda-agua, con el que se obtuvo la máxima compacidad del material cementante, sin perjudicar la estabilidad de la mezcla, ya que a cantidades mayores de aditivo la mezcla presenta problemas de segregación, además este porcentaje de aditivo permite la máxima reducción de la relación a/c igual a 0.24 necesaria para lograr altas resistencias a compresión del hormigón.

- **Diseño y elaboración de mezclas**

La metodología de la ACI 211.4 permite llegar a resistencias de hasta 843kg/cm² y sirve como base para el desarrollo de hormigones de mayor resistencia, esta metodología recomienda el uso del manual de usuario de humo de sílice para obtener mayores resistencias. A partir de ello se desarrolló la metodología



propuesta, la cual se enfoca en obtener una mayor dispersión y romper las aglomeraciones del material de mezcla (agregado y material cementante), para lograr un hormigón más homogéneo extendiendo el tiempo de mezclado, como alternativa a la metodología de mezcla de la ACI 211.4.

- **Trabajabilidad de las mezclas**

Para determinar la trabajabilidad del hormigón en estado fresco se necesitó la ejecución de 2 ensayos, debido a la variación en las consistencias de las mezclas de hormigón con los diferentes porcentajes de humo de sílice. Del 0% al 10% de humo de sílice se midió la trabajabilidad con el ensayo de fluidez dando una clasificación desde autocompactante hasta muy suave, más allá de este porcentaje resulto imposible medir su trabajabilidad mediante este ensayo, por lo cual se realizó el ensayo del cono de Abrams para medir el asentamiento de los porcentajes restantes clasificándoles desde una pasta plástica hasta seca.

- **Ensayos destructivos**

Con el ensayo de compresión simple a los 28 días, los resultados más altos se encuentran en un rango de humo de sílice de 7% al 13%, con un valor máximo el 10% de humo de sílice correspondiente a una resistencia máxima de 1452kg/cm². Para el ensayo a tracción los resultados máximos se alcanzaron a porcentajes de humo de sílice de entre 10% y 15%, con una resistencia máxima de 32kg/cm². Sin embargo, la línea de tendencia que se formaba a diferentes días de ensayo era dispersa, se puede justificar este comportamiento a que, esta propiedad no solo depende de la resistencia a compresión, sino, además la compactación, trabazón de los agregados y el acomodo del mismo, siendo difícil replicar una misma condición de ensayo en las probetas de hormigón. La capacidad a flexión siguió una tendencia convexa, con la máxima capacidad entre el 7% y 13% de humo de sílice, con una resistencia máxima de 80kg/cm² y la máxima deflexión al 7% de 0.6mm, se requirió la fabricación de probetas para compresión de la misma mezcla, según los cálculos de capacidad son muy semejantes al módulo de rotura teniendo resultados muy precisos.

- **Ensayos no destructivos**

Los resultados de absorción y densidad en los cilindros de hormigón endurecido dieron valores acordes a lo esperado, la absorción presenta una curva convexa, los puntos de inflexión de la curva correspondientes hormigones con porcentaje de humo de sílice entre 10% y 15%, el aumento de absorción a partir de este porcentaje es justificado por la consistencia seca de las mezclas que provoco la aparición de hormigueras en hormigones con porcentajes de humo de sílice superiores al 20%, razón por la cual estos se volvieron más absorbentes. Debido a la presencia de estas hormigueras los resultados de densidad obtenidos se vieron afectados, ya que, el volumen de los cilindros era inferior al utilizado para el cálculo habitual, como solución se aproximó el volumen de estas probetas en base a el área de agujeros presentados en las mismas. Se puede observar un



crecimiento pronunciado de densidad hasta un porcentaje de 10% de humo de sílice, a partir del cual el crecimiento se vuelve casi lineal, para finalmente presentar un descenso en los porcentajes de humo de sílice más altos, justificado por el apreciable tamaño de orificios que presentan estos cilindros.

En los resultados obtenidos por el ensayo del índice esclerométrico el número de rebote obtenido varían de 56 a 61, la precisión de este método indirecto es de aproximadamente del 93% al utilizar el factor de corrección ya que sin este la precisión del ensayo sería de aproximadamente el 20%. Para este tipo de hormigones en especial se requiere la elaboración o extracción de probetas para realizar la debida corrección, el factor utilizado es 2.5 el cual se multiplica a la ecuación correspondiente a la curva de correlación del equipo.

Al realizar una comparación entre los resultados de compresión simple y los obtenidos con la velocidad de pulso ultrasónico se observa que no existe una relación definida entre estos ensayos. Por lo tanto, el análisis del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico se enfoca en establecer la calidad del hormigón a partir de los valores obtenidos, los cuales no presentan un extendido rango de variación, ya que, los valores mínimos y máximos corresponden a velocidades de 4630m/s y 5018m/s. Para estos valores y en base a lo establecido en la parte teórica, las dosificaciones desarrolladas se clasifican de excelente y muy buena calidad, pudiendo además utilizarse en cualquier tipo de estructura como: secciones T de hormigón reforzado, unidades de anclaje de hormigón reforzado, marcos de edificios de hormigón reforzado, losa de entrepiso, entre otros. Reafirmando la excelente calidad del producto los valores de modulo elástico dinámico obtenidos a partir de los datos de velocidad de pulso fueron excelentes, dando valores por encima de 49000MPa, que supera en gran medida a los módulos de elasticidad dinámico que presentan los hormigones convencionales.

Los resultados de resistividad eléctrica demostraron un crecimiento a medida que aumentaba la edad del hormigón (14 y 28 días), también se evidenció un aumento de resistividad a medida que se aumentaba el porcentaje de humo de sílice en la mezcla, esto solamente hasta el 20% en el cual se obtuvo un valor máximo de 22.3 k Ω *cm, a partir de este porcentaje se presenta una disminución en la resistividad justificada por la baja trabajabilidad en porcentajes superiores al mencionado.

- **Durabilidad del hormigón**

Se evaluó tanto la resistividad eléctrica enfocado en la penetración de cloruros, resistencia a compresión, densidad y velocidad de onda ultrasónico como indicadores de durabilidad, se consideró que a mayor valor de cada uno de los indicadores la durabilidad es mayor. Posteriormente a los indicadores se dio un puntaje sobre 10, siendo 10 el valor máximo obtenido en cada indicador, y al final obtener un promedio de dicha calificación, efectivamente conforme aumentaba



el porcentaje de humo de sílice la durabilidad aumenta hasta el 20% que representa el máximo y empieza a decaer.

- **Costo de optimización del costo total**

Conforme aumenta la resistencia a compresión del hormigón, se permite la construcción de elementos estructurales de menor sección y luces más amplias, un simple cálculo para de capacidad en columnas proporciona el volumen de hormigón, el cual puede llegar a reducir el costo de producción hasta en un 90% del costo total, ya que no solo se reducen las dimensiones de la sección sino también el número de elementos estructurales empleados. En el análisis de vigas no hay un beneficio marcado ligado a la resistencia a compresión ya que en estas rige la resistencia a flexión, ya que mayor resistencia es proveída por el acero a tracción.

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos han sido satisfactorios según los objetivos impuestos y otros adicionales, demostrando la ventaja que se tiene de este tipo de hormigones respecto al hormigón tradicional aplicando los materiales disponibles en la región.



Bibliografía

- Aldred, J. (2012). *El concreto en las grandes alturas*. AECOM.
- ASTM C29. (2009). *Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*. https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-09
- ASTM C33. (2013). *Specification for Concrete Aggregates*.
https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-13
- ASTM C39. (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- ASTM C109. (2007). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. ASTM International.
- ASTM C127. (1988). *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C128. (2001). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C131, I. (2014). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1425-1.50009-4>
- ASTM C136. (2014). *Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-14
- ASTM C143. (2015). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M
- ASTM C150. (2007). *Standard Test Method for Portland Cement*. ASTM International.



Universidad de Cuenca

ASTM C192. (2002). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International.

ASTM C219. (2003). *Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement*. ASTM International.

ASTM C494. (2005). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International.

ASTM C535. (2003). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. ASTM International.

ASTM C618. (2005). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International.

ASTM C642. (1997). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International.

ASTM C873. (1999). *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds*. ASTM International.

ASTM C995. (2001). *Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone*. ASTM International.

ASTM C1157. (2008). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*. ASTM International.

ASTM C1240. (2003). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*. ASTM International.

ASTM C1611. (2005). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. ASTM International.



Universidad de Cuenca

Bacuilima, A., & Guillen, W. (2019). *Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión*. Universidad de Cuenca, Cuenca.

BENTUR, A., & COHEN, M. D. (1987). Effect of Condensed Silica Fume on the Microstructure of the Interfacial Zone in Portland Cement Mortars. *Journal of the American Ceramic Society*, 70(10), 738-743.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb04873.x>

Cabrera, M. I. (2015). *Utilización de los concretos de alta resistencia y concretos celulares en la industria de la construcción ecuatoriana, clasificados por sectores: Vivienda, electricidad, gas/petróleo, salud y educación*. 1, 16.

Carino, N. J., & Clifton, J. R. (1990). *Outline of a national plan on high-performance concrete: Report on the NIST/ACI workshop, May 16-18, 1990*. Recuperado de <http://archive.org/details/outlineofnationa4465cari>

Dixon, D. E., Prestreza, J. R., Burg, G. R. U., Crocker, D. A., Day, K. W., Dodl, C. L., ... Yuan, R. (1991). *Reported by ACI Committee 21*. 38.

Garrido, A. (2007). *Materiales de Construcción II* (pp. 72-79). Universidad Politécnica de Cartagena.

Ghafari, E., Arezoumandi, M., Costa, H., & Júlio, E. (2015). Influence of nano-silica addition on durability of UHPC. *Construction and Building Materials*, 94, 181-188.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.009>

Giron, H. (1998). Ataque por cloruros en el concreto. Recuperado 29 de octubre de 2019, de <http://www.imcyc.com/revista/1998/oct/ataque.htm>



Universidad de Cuenca

HAROTECNO. (2010, enero 10). WEBQUEST: RASCACIELOS Y LOS EDIFICIOS MÁS ALTOS DEL MUNDO. Recuperado 4 de noviembre de 2019, de HAROTECNO website:

<https://harotecno.wordpress.com/2010/01/10/webquest-rascacielos-y-los-edificios-mas-altos-del-mundo/>

Holland, T. (2005). *Silica Fume User's Manual*. 193.

Imbaquingo, A. J. (2012). *Diseño de Hormigon de Alto Desempeño*. Escuela Politecnica del Ejercito, Salgolqui.

Maage, M., & Sellevold, E. (1987). Effect of Microsilica on the Durability of Concrete Structures. *Concrete International*, 9(12).

Martínez, J. (2003). *Specific application to the Torre Espacio Building in the Paseo de la Castellana in Madrid*. 80.

Moreno, A. (2014, enero 24). Buenas prácticas para determinar la manejabilidad del concreto. Recuperado 30 de septiembre de 2019, de Comunidad 360 website:

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/buenas-practicas-para-determinar-manejabilidad-del-concreto>

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed). Harlow, England ; New York: Pearson.

Portugal, P. (2007). *Tecnología del Concreto de Alto Desempeño*. Francia: Tous droits réservés.

Proceq. (s. f.). *The Silver Schmidt Reference Curve*.

Quiroz, M., & Salamanca, L. (2006). *Apoyo Didáctico para la Enseñanza y Aprendizaje en la Asignatura de "Tecnología del Hormigón"*. Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.



Universidad de Cuenca

- Rao, S. K., Sravana, P., & Rao, T. C. (2016). Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 289-301. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.003>
- Romo, M. (2008). *Temas de Hormigon Armado*. Escuela Politecnica del Ejercito - Ecuador.
- Russell, H. (1999). ACI Defines High-Performance Concrete. *Concrete International*, 21(2).
- Russell, H., Ozyildirim, H. C., Tadros, M. K., & Miller, R. A. (2006). *Compilation and Evaluation of Results from High-Performance Concrete Bridge Projects, Volume I: Final Report* (Reporte Tecnico N.º FHWA-HRT-05-056; p. 178). Glenview.
- Yépez, F., & Calderón, F. (2014). *Design of high performance concrete: High compressive strength, adequate workability and high resistance to erosion—Abrasion for hydraulic works Diseño de hormigones de alto desempeño: Alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión—Abrasión para obras hidráulicas*. 6(1), 7.
- Zia, P., Leming, M. L., & Ahmad, S. (1993). *MECHANICAL BEHAVIOR OF HIGH PERFORMANCE CONCRETES, VOLUME 1* (p. 97) [Reporte Resumen].



Anexos

Anexo 1: Resultados de laboratorio de arena natural.

 **LABSCON**
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE
SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA
AGREGADO : ARENA NATURAL
PROCEDENCIA: SANTA ISABEL

PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL
FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019

% DE PARTICULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS ASTM C- 142

| DATOS | ENSAYOS |
|---|------------|
| PESO DEL MATERIAL RETENIDO TAMIZ # 16 LUEGO DE LAVADO SOBRE EL TAMIZ # 200 | = W = 32.1 |
| PESO DEL MATERIAL DESPUES DEL ENSAYO RETENIDO SOBRE EL TAMIZ # 20 | = R = 30.3 |
| $P = \frac{(W - R)}{W} \times 100$ | |
| P = | 5.46% |
| % MAXIMO DE PARTICULAS SEGÚN LA MOP 001 F 2002 | ≤ 5% |
| Observaciones: _____ _____ _____ _____ | |



 **LABSCON**
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización
Ing. Guillermo Roberto Vélez Narváez

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com

| | |
|---|-------------------------------|
|  LABSCON Laboratorio de Suelos y Concretas Diseño Control de Calidad y Fiscalización | |
| PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD | |
| SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA | |
| AGREGADO : ARENA NATURAL | PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL |
| PROCEDENCIA: SANTA ISABEL | FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019 |

**ENSAYO PARA LA DETERMINACION DEL CONTENIDO ORGANICO
(Método de colorimetría ASTM C-40)**

| MUESTRA EN ESTADO NATURAL | COLOR OBSERVADO |
|-----------------------------|-----------------|
| | MENOR AL Nº 1 |
| NUMERO DE LA PLACA ORGANICA | |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | COLOR ESTANDAR |
| 4 | |
| 5 | |



Observaciones:



Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884 441
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com
Fig. Guillermo Roberto Vélez Narváez




PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA
AGREGADO : ARENA NATURAL **PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL**
PROCEDENCIA: SANTA ISABEL **FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019**

P E S O V O L U M E T R I C O V A R I L L A D O N O R M A : I N E N 8 5 8

| DATOS | E N S A Y O S | | | |
|---|----------------------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| PESO DEL MATERIAL (g) | 4,843 | 4,837 | 4,829 | 4,844 |
| VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³) | 2,988 | 2,988 | 2,988 | 2,988 |
| P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³) | 1,621 | 1,619 | 1,616 | 1,621 |
| VALOR PROMEDIO | 1,619 kg/m ³ | | | |
| Observaciones: | | | | |
| _____ | | | | |
| _____ | | | | |
| _____ | | | | |
| _____ | | | | |




Ing. Guillermo Roberto Vélez Narváez

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com




PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA

AGREGADO : ARENA NATURAL **PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL**

PROCEDENCIA: SANTA ISABEL **FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019**

P E S O V O L U M E T R I C O S U E L T O N O R M A : I N E N 8 5 8

| DATOS | E N S A Y O S | | | |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| PESO DEL MATERIAL (g) | 4,418 | 4,430 | 4,427 | 4,421 |
| VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³) | 2,988 | 2,988 | 2,988 | 2,988 |
| P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³) | 1,479 | 1,483 | 1,482 | 1,480 |
| VALOR PROMEDIO | 1,481 kg/m ³ | | | |

Observaciones:



Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com





LABSCON
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA

AGREGADO : ARENA NATURAL **PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL**

PROCEDENCIA: SANTA ISABEL **FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019**

PESOS ESPECIFICOS Y ABSORCION NORMA: INEN 856

| | | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------|--|
| A = | <u>500.0</u> <u>500.0</u> | | |
| | | | (Peso del material superficie saturada seca) |
| B = | <u>955.8</u> <u>955.6</u> | | (Peso del pignómetro + agua + material) |
| C = | <u>657.4</u> <u>657.3</u> | | (Peso del pignómetro + agua) |
| D = | <u>471.5</u> <u>472.1</u> | | (Peso del material seco) |
| <i>PROMEDIO</i> | | | |
| Peso específico seco = | $\frac{D}{A - (B - C)} =$ | 2.34 2.34 | 2.34 |
| Peso espec. superf. saturad | $\frac{A}{A - (B - C)} =$ | 2.48 2.48 | 2.48 |
| Peso específico aparente = | $\frac{D}{D - (B - C)} =$ | 2.72 2.72 | 2.72 |
| % de absorción de agua = | $\frac{100(A - D)}{D} =$ | 6.04 5.91 | 5.98 |
| Observaciones : | | | |
| _____ | | | |
| _____ | | | |
| _____ | | | |



Ing. Guillermo Roberto Vélez Narváez

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com



PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA

AGREGADO : ARENA NATURAL

PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL

PROCEDENCIA: SANTA ISABEL

FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019

PORCENTAJE DE MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ N°200

| | |
|---|--------|
| Peso de la muestra seca previo al lavado | 459.23 |
| Peso de la muestra seca después de lavado | 446.80 |
| % de material que pasa tamiz N° 200 | 2.71% |
| % de acuerdo a norma ASTM - C 33 | 5% |

Observaciones :

Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización
Ing. Guillermo Roberto Vélez Narváez

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com



LABSCON

Laboratorio de Sueldos y Concetos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD


SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA

AGREGADO : ARENA NATURAL **PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL**

PROCEDENCIA: SANTA ISABEL **FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019**

MEMORIA FOTOGRAFICA





INGRESO DE MUESTRAS A LABORATORIO

Fecha de Ingreso: 08 de Febrero 2019

PROYECTO: Control de Calidad


| | |
|--|---|
| FACTURA | |
| NO. 51 4 | # |
| SOLICITADO POR: Holcim (Procesadora) S.A. | POZO N.: |
| CONSTRICCIÓN: - | MINERA N.: |
| FISCALIZADO: - | PROFUNDIDAD: |
| UBICACIÓN: | LABORATORIO: |
| CONTACTO: | CELSULAR: MINA: Santa Isabela |

MUESTRA

| TIPO | COLORES | ASPECTO | ARENA X | GRASA | TOME DE MUESTRA |
|--------------|---------|---------|------------|-------|-----------------|
| MEZCLAMIENTO | PLUMAS | NEGRO | NATURAL | | |
| BASE | ANILLO | ROJO | ARTIFICIAL | | |
| QUE. BASE | CARE | | | | |
| MED. | VERDE | | | | |
| | BLANCO | | | | |

ENSAYOS A REALIZAR

| ENSAYO | ESTADO | ESTADO | ESTADO | ESTADO | ESTADO |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| EXAMEN VISUAL | + | | | | |
| PRUEBA DE LIGERO | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |
| PRUEBA DE LIGEREA | | | | | |



Laboratorio de Sueldos y Concetos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Tel. 07 2 814 076 Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com / Ing. Guillermo Roberto Vélez Narváez



LABSCON
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

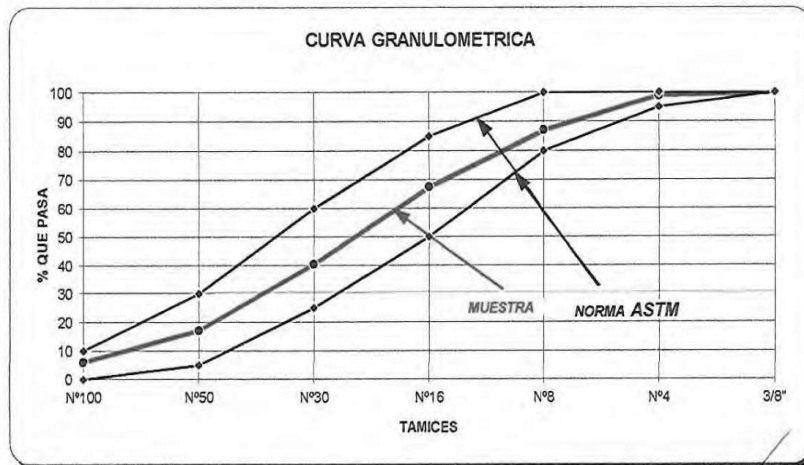
PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM PLANTA CUENCA
AGREGADO : ARENA NATURAL
PROCEDENCIA: SANTA ISABEL

PROCESADORA: MINERA ROOKAZUL
FECHA: 08 DE FEBRERO DEL 2019

ANALISIS GRANULOMETRICO NORMA: INEN 696

| TAMIZ Nº | P.RETENIDOS PARCIALES | P.RETENIDOS ACUMULADOS | PORCENTAJES RETENIDOS | PORCENTAJES QUE PASAN | PORCENTAJES ESPECIFICADOS |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 3/4" | 0.0 | 0.0 | 0 | 100 | |
| 3/8" | 0.0 | 0.0 | 0 | 100 | 100 |
| Nº4 | 4.6 | 4.6 | 1 | 99 | 95 - 100 |
| pasa Nº4 | | | | | |
| Nº8 | 54.9 | 59.5 | 13 | 87 | 80 -100 |
| Nº16 | 89.8 | 149.3 | 33 | 67 | 50 - 85 |
| Nº30 | 124.1 | 273.4 | 60 | 40 | 25 - 60 |
| Nº50 | 107.0 | 380.4 | 83 | 17 | 5 - 30 |
| Nº100 | 51.0 | 431.4 | 94 | 6 | 0-10 |
| Nº200 | 15.4 | 446.8 | 97 | 3 | |
| Pasa Nº200 | 0.0 | 12.4 | | | |
| TOTAL | 459.2 | 459.2 | | | |

| | | |
|------------------------|-------------------------------|--------|
| P.TOTAL HUMEDO ANTES | P.HUMEDO ANTES DEL LAVADO | 500.00 |
| P.TOTAL HUMEDO DESPUES | HUMEDAD DEL MATERIAL | 8.88% |
| P.TOTAL SECO | P. TOTAL SECO ANTES DE LAVADO | 459.23 |
| MODULO DE FINEZA | PESO SECO DESPUES DE LAVADO | 446.80 |



NORMA GRANULOMETRICA ASTM C - 33



Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com



LABSCON
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD Y FISCALIZACIÓN
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
 SOLICITA: HOLCIM
 AGREGADO : ARENA FINA
 TRATADA CON : SULFATO DE MAGNESIO

PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA
 MINA: SANTA ISABEL
 NUMERO DE CICLOS : 5

SANIDAD DEL AGREGADO
 NORMA : ASTM C 88

| TAMANO DE MALLA | GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA ORIGINAL | PESO DE LA FRACCION ANTES DE LA PRUEBA | PESO DE LA FRACCION DESPUES DE LA PRUEBA | % QUE PASA LAS MALLAS ASIGNADAS DESPUES DE LA PRUEBA | PORCENTAJES PESADOS DE PERDIDA | |
|---|--------------------------------------|--|--|--|--------------------------------|--------|
| PASA 3/8" | RETIENE N°4 | 0.0% | | | | |
| N°4 | N°8 | 5.3% | 100.00 | 58.30 | 41.70% | |
| N°8 | N°16 | 13.0% | 100.00 | 56.10 | 43.90% | |
| N°16 | N°30 | 22.1% | 100.00 | 67.20 | 32.80% | |
| N°30 | N°50 | 27.5% | 100.00 | 75.40 | 24.60% | |
| N°50 | N°100 | 21.9% | 100.00 | 81 | 19.00% | |
| MENOR A N°100 | | 10.2% | -- | -- | -- | |
| TOTALES | | | | | 100% | 26.08% |
| PERDIDA OBTENIDA | | | | | 26.08% | |
| PERDIDA ESTIPULADA SEGUN NORMA ASTM C -33 EN CINCO CICLOS | | | | | 15% | |


Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
 Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com





| | |
|---|-----------------------------------|
|  LABSCON <small>LABORATORIOS DE CALIDAD Y FISCALIZACIÓN</small> Diseño Control de Calidad y Fiscalización | |
| PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD | |
| SOLICITA: HOLCIM | |
| AGREGADO : ARENA FINA | PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA |
| FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019 | MINA: SANTA ISABEL |

**ENSAYO PARA LA DETERMINACION DEL CONTENIDO ORGANICO
(Método de colorimetría ASTM C-40)**

| | |
|---|---|
| MUESTRA EN ESTADO NATURAL | COLOR OBSERVADO |
| | MENOR AL N° 1 |
| NUMERO DE LA PLACA ORGANICA | |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |
| COLOR ESTANDAR | |
| |  |
| Observaciones: _____ _____ _____ | |





LABSCON
Laboratorio de Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM
AGREGADO : ARENA FINA
FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019

PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA
MINA: SANTA ISABEL

% DE PARTICULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS ASTM C- 142

| DATOS | E N S A Y O S | |
|--|---------------|-------|
| PESO DEL MATERIAL RETENIDO TAMIZ # 16 LUEGO DE LAVADO SOBRE EL TAMIZ # 200 | = W = | 30.2 |
| PESO DEL MATERIAL DESPUES DEL ENSAYO RETENIDO SOBRE EL TAMIZ # 20 | = R = | 29.8 |
| $P = \frac{(W - R)}{W} \times 100$ | | |
| P = | | 1.33% |
| % MAXIMO DE PARTICULAS SEGUN LA MOP 001 F 200 | ≤ | 5% |
| Observaciones: | | |
| | | |
| | | |
| | | |






LABSCON
 Laboratorio de Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM
AGREGADO : ARENA FINA **PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA**
FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019 **MINA: SANTA ISABEL**

PORCENTAJE DE MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ N°200

| | |
|---|--------|
| Peso de la muestra seca previo al lavado | 480.51 |
| Peso de la muestra seca después de lavado | 468.40 |
| % de material que pasa tamiz N° 200 | 2.52% |
| % de acuerdo a norma ASTM - C 33 | 5% |

Observaciones :



 Ing. Guillermo Eusebio Velez Narváez

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com



LABSCON
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
 SOLICITA: HOLCIM
 AGREGADO : ARENA FINA PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA
 FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019 MINA: SANTA ISABEL

PESOS ESPECIFICOS Y ABSORCION NORMA: INEN 856

| | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--|
| A = | <u>500.0</u> | <u>500.0</u> | | (Peso del material superficie saturada seca) |
| B = | <u>954.3</u> | <u>953.6</u> | | (Peso del pignómetro + agua + material) |
| C = | <u>657.4</u> | <u>657.4</u> | | (Peso del pignómetro + agua) |
| D = | <u>479.6</u> | <u>479.5</u> | | (Peso del material seco) |
| | | | | PROMEDIO |
| Peso específico seco = | $\frac{D}{A - (B - C)}$ | = | 2.36 2.35 | 2.36 |
| Peso espec. superf. saturad | $\frac{A}{A - (B - C)}$ | = | 2.46 2.45 | 2.46 |
| Peso específico aparente = | $\frac{D}{D - (B - C)}$ | = | 2.63 2.62 | 2.63 |
| % de absorción de agua = | $\frac{100(A - D)}{D}$ | = | 4.25 4.28 | 4.27 |
| Observaciones : | <hr/> <hr/> <hr/> | | | |

LABSCON
 Laboratorio de Control de Calidad y Fiscalización
 Ing. Guillermo Roberto Valdez Narvaez

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com




PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
 SOLICITA: HOLCIM
 AGREGADO : ARENA FINA PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA
 FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019 MINA: SANTA ISABEL

P E S O V O L U M E T R I C O V A R I L L A D O NORMA: INEN 858

| DATOS | E N S A Y O S | | | |
|---|---------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| PESO DEL MATERIAL (g) | 4,724 | 4,739 | 4,748 | 4,731 |
| VOL DEL RECIPIENTE (cm³) | 2,988 | 2,988 | 2,988 | 2,988 |
| P. VOLUMET. SUELTO (kg/m³) | 1,581 | 1,586 | 1,589 | 1,583 |
| VALOR PROMEDIO | 1,585 | kg/m³ | | |
| Observaciones: <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> | | | | |



Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-1211 Fax 07 2 814-070 Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com



LABSCON
Laboratorio de Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM
AGREGADO : ARENA FINA
FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019

PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA
MINA: SANTA ISABEL

PESO VOLUMETRICOSUELTO NORMA: INEN 858

| DATOS | ENSAYOS | | | |
|---------------------------------------|---------|-------------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| PESO DEL MATERIAL (g) | 4,259 | 4,237 | 4,208 | 4,228 |
| VOL DEL RECIPIENTE (cm ³) | 2,988 | 2,988 | 2,988 | 2,988 |
| P VOLUMET SUELTO (kg/m ³) | 1,425 | 1,418 | 1,408 | 1,415 |
| VALOR PROMEDIO | 1,417 | kg/m ³ | | |

Observaciones:

| | |
|--|--|
|  LABS CON <small>Diseño Control de Calidad y Fiscalización</small> | |
| PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD | |
| SOLICITA: HOLCIM | |
| AGREGADO : ARENA FINA | PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA |
| FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019 | MINA: SANTA ISABEL |

MEMORIA FOTOGRAFICA



| | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|  | | INGRESO DE MUESTRAS A LABORATORIO | | LABORIO 10 Julio 2014 QUITO - ECU | | | | | | | |
| PROYECTO: Control de Calidad | | | FACTORIA: | | VECINA: | | | | | | |
| SOLICITADO POR: Bureau Control Control | | PODER: | | UBICACION: | | | | | | | |
| CONSTRUCION: El Mariano Heredia | | MUESTRA N.º: | | LABORATORIO: | | | | | | | |
| FISCALIZADOR: | | PERSONAL: | | LABORATORIO: | | | | | | | |
| CONTACTO: | | CELULAR: | | MINA: Santa Isabel | | | | | | | |
| RECIBIDA | | | | | | | | | | | |
| FECHA: | CANTIDAD: | ADMICHO: | ARENA: | GRABA: | TIPO DE MUESTRA: | | | | | | |
| INGRESO A BASES | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </table> | | | | | | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | |

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070
 Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com





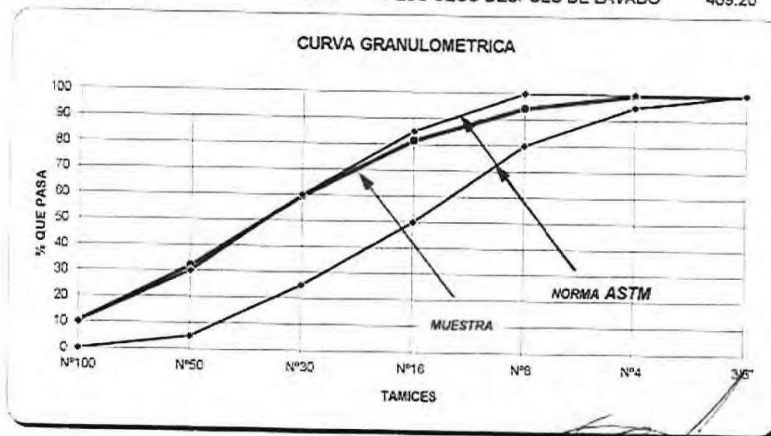
LABSCON
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
 SOLICITA: HOLCIM
 AGREGADO : ARENA FINA PROCEDENCIA : SR. MARIANO HEREDIA
 FECHA: 19 DE MARZO DEL 2019 MINA: SANTA ISABEL

ANALISIS GRANULOMETRICO NORMA: INEN 696

| TAMIZ N° | P.RETENIDOS PARCIALES | P.RETENIDOS ACUMULADOS | PORCENTAJES RETENIDOS | PORCENTAJES QUE PASAN | PORCENTAJES ESPECIFICADOS |
|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 3/4" | 0.0 | 0.0 | 0 | 100 | |
| 3/8" | 0.0 | 0.0 | 0 | 100 | 100 |
| N°4 | 1.8 | 1.8 | 0 | 100 | 95 - 100 |
| pasa N°4 | | | | | |
| N°8 | 25.2 | 27.0 | 6 | 94 | 80 - 100 |
| N°16 | 62.2 | 89.2 | 19 | 81 | 50 - 85 |
| N°30 | 105.6 | 194.8 | 41 | 59 | 25 - 60 |
| N°50 | 131.8 | 326.6 | 68 | 32 | 5 - 30 |
| N°100 | 105.0 | 431.6 | 90 | 10 | 0-10 |
| N°200 | 36.8 | 468.4 | 97 | 3 | |
| Pasa N°200 | 0.8 | 12.1 | | | |
| TOTAL | 480.5 | 480.5 | | | |

P. TOTAL HUMEDO ANTES P. HUMEDO ANTES DEL LAVADO 500.00
 P. TOTAL HUMEDO DESPUES HUMEDAD DEL MATERIAL 4.06%
 P. TOTAL SECO P. TOTAL SECO ANTES DE LAVADO 480.51
 MODULO DE FINEZA 2.23 PESO SECO DESPUES DE LAVADO 469.20



NORMA GRANULOMETRICA ASTM C - 33



Manuel Davila 1-52 y Av Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 Telefax: 07 2 814-070




LABS
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM
AGREGADO : GRAVA TRITURADA 3/4
PROCEDENCIA: VIPESA

FECHA: 24 DE ENERO DEL 2019

ENSAYO DE ABRASION ASTM C - 535

| | | |
|---|---|---------------|
| GRANULOMETRIA TIPO | = | B |
| CARGA ABRASIVA # DE BOLAS | = | 11 |
| # DE REVOLUCIONES | = | 500 |
| PESO MATERIAL PASA 3/4 " RETIENE 1/2" | = | 2506 |
| PESO MATERIAL PASA 1/2 " RETIENE 3/8" | = | 2502 |
| PESO DEL MATERIAL ANTES DEL ENSAYO | = | 5008 |
| PESO DEL MATERIAL DESPUES DEL ENSAYO SOBRE TAMIZ # 12 | = | 4441 |
| % DE ABRASION | = | 11.32% |



Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884 421 / Telefax: 07 2 814 070
Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com



LABSCON
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM
AGREGADO : GRAVA TRITURADA 3/4
PROCEDENCIA: VIPESA

FECHA: 24 DE ENERO DEL 2019

% DE PARTICULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS
NORMA I.N.E.V -211, ASTM C 142

| TAMAÑO DE LA MALLA | PESO DE CADA FRACCION TOMADA (gr) | MALLAS | GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA ORIGINAL | PESO TOTAL ANTES DEL ENSAYO (gr) | PESO DE LA FRACCION DESPUES DE LA PRUEBA (gr) | % QUE PASA LAS MALLAS ASIGNADAS DESPUES DE LA PRUEBA | PORCENTAJES PESADOS DE PERDIDA |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|--|--------------------------------|
| 2" a 1,5" | 0.0 | 2" a 1,5" | 0% | - | - | - | |
| 1,5" a 1,0" 1,0" a 3/4" | 0.0 497.0 | 1,50" a 3/4" | 0% | - | - | - | |
| 3/4" a 1/2" 1/2" a 3/8" | 3,806.0 1,191.0 | 3/4" a 3/8" | 79% | 2,006.9 | 1,995.5 | 0.57% | 0.45% |
| 3/8" a Nº4 | 814.0 | 3/8" a Nº4 | 13% | 1,005.4 | 1,002.9 | 0.25% | 0.03% |
| TOTALES | | | 92.12% | | | | 0.48% |

PERDIDA OBTENIDA

0.48%

PERDIDA ESTIMULADA SEGÚN LA NORMA MOP 2002 < 5%

Observaciones:

LABSCON
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización
Ing. Guillermo Roberto Vélez Narváez



LABSCON
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM
AGREGADO : GRAVA TRITURADA 3/4
PROCEDENCIA: VIPESA **FECHA: 24 DE ENERO DEL 2019**

PESOS ESPECIFICOS Y ABSORCION NORMA: INEN 856

| | | | |
|-----|----------------|----------------|--|
| A = | <u>1,507.0</u> | <u>1,508.4</u> | (Peso del material superficie saturada seca) |
| B = | <u>8,155.7</u> | <u>8,156.1</u> | (Peso del pignómetro + agua + material) |
| C = | <u>7,215.1</u> | <u>7,215.3</u> | (Peso del pignómetro + agua) |
| D = | <u>1,477.9</u> | <u>1,479.9</u> | (Peso del material seco) |

| | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|------|------|----------|------|
| Peso específico seco = | $\frac{D}{A - (B - C)}$ = | 2.61 | 2.61 | PROMEDIO | 2.61 |
| Peso espec. superf. saturad | $\frac{A}{A - (B - C)}$ = | 2.66 | 2.66 | | 2.66 |
| Peso específico aparente = | $\frac{D}{D - (B - C)}$ = | 2.75 | 2.75 | | 2.75 |
| % de absorción de agua = | $\frac{100(A - D)}{D}$ = | 1.97 | 1.93 | | 1.95 |

Observaciones :

[Signature]

LABSCON
 Laboratorio de Suelos y Concretos
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización
 Ing. Guillermo Roberto Vélez Narváez



LABSCON
 Laboratorio de Suelos y Concretos
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
 SOLICITA: HOLCIM
 AGREGADO : GRAVA TRITURADA 3/4
 PROCEDENCIA: VIPESA

FECHA: 24 DE ENERO DEL 2019

P E S O V O L U M E T R I C O V A R I L L A D O N O R M A : I N E N 8 5 8

| DATOS | E N S A Y O S | | | |
|---|----------------------------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| PESO DEL MATERIAL (g) | 14,201 | 14,209 | 14,210 | 14,211 |
| VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³) | 9,969 | 9,969 | 9,969 | 9,969 |
| P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³) | 1,425 | 1,425 | 1,425 | 1,426 |
| VALOR PROMEDIO | 1,425 kg/m ³ | | | |

Observaciones:

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-121 / Telefax: 07 2 814-079
 Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com

LABSCON
 Laboratorio de Suelos y Concretos
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización
 Ing. Eusebio Vázquez Naváez



LABSCON
 Laboratorio de Suelos y Concretos
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización


PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD
SOLICITA: HOLCIM
AGREGADO : GRAVA TRITURADA 3/4
PROCEDENCIA: VIPESA **FECHA: 24 DE ENERO DEL 2019**

P E S O V O L U M E T R I C O S U E L T O N O R M A : I N E N 8 5 8

| DATOS | E N S A Y O S | | | |
|---|--------------------------------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| PESO DEL MATERIAL (g) | 12,928 | 12,971 | 12,923 | 12,890 |
| VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³) | 9,969 | 9,969 | 9,969 | 9,969 |
| P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³) | 1,297 | 1,301 | 1,296 | 1,293 |
| VALOR PROMEDIO | 1,297 kg/m ³ | | | |

Observaciones:

Manuel Davila 1-52 y Av. Remigio Crespo / Telefono 07 2 884-122 / Telefax: 07 2 814-070
 Cuenca - Ecuador / Email: labscon1@outlook.com
LABSCON
 Laboratorio de Suelos y Concretos
 Diseño Control de Calidad y Fiscalización

| | |
|--|------------------------------------|
|  LABSOON Laboratorio de Calidad y Control de Calidad y Fiscalización | |
| PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD | |
| SOLICITA: HOLCIM | |
| AGREGADO : GRAVA TRITURADA 3/4 | |
| PROCEDENCIA: VIPESA | FECHA: 24 DE ENERO DEL 2019 |

MEMORIA FOTOGRAFICA



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|---|----------------|---|--------------------------|--|------------|---|--|--|--|--|--|--|----------|--|---|--|--|--|--|--|--------------------------|--|--|---|---|---|---|--|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|-------------------|--|--|--|--|--|--|--|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|----------------------|--|--|--|--|--|--|--|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| LABSOON | | INGRESO DE MUESTRAS A LABORATORIO | | | | Edición 02 Julio 2014 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PROYECTO: Control de Calidad | | FACTURA | | FECHAS | | 557-R-26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLICITADO POR: HOLCIM | | POZO N.º | | UBICACIÓN: | | FECHA DE MUESTRA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CONSTRUCION: | | MUESTRA N.º | | OBSERVACIONES | | 13/01/19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FISCALIZADOR: | | PROFUNDIDAD: | | LABORATORISTA: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CONTACTO: | | MINA: VIPESA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TIPO | | COLOR | | ASPECTO | | TOMA DE MUESTRA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ARREGLO | | ARREGLO | | ARREGLO | | ARREGLO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LAVE | | LAVE | | LAVE | | LAVE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GRANULACION | | GRANULACION | | GRANULACION | | GRANULACION | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GRANULACION | | GRANULACION | | GRANULACION | | GRANULACION | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GRANULACION | | GRANULACION | | GRANULACION | | GRANULACION | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ENSAYOS A REALIZAR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td>COMPRESION</td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TRACCION</td> <td></td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A COMPRESION</td> <td></td> <td></td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A TRACCION</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A FLEXION</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A DESGASTE</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A GEL</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A GOLPE</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A FROTAMIENTO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A RAYADO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESISTENCIA A ABRAZADO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> | | | | | | | | COMPRESION | X | | | | | | | TRACCION | | X | | | | | | RESISTENCIA A COMPRESION | | | X | X | X | X | | RESISTENCIA A TRACCION | | | | | | | | RESISTENCIA A FLEXION | | | | | | | | RESISTENCIA A DESGASTE | | | | | | | | RESISTENCIA A GEL | | | | | | | | RESISTENCIA A GOLPE | | | | | | | | RESISTENCIA A FROTAMIENTO | | | | | | | | RESISTENCIA A RAYADO | | | | | | | | RESISTENCIA A ABRAZADO | | | | | | | |
| COMPRESION | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TRACCION | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A COMPRESION | | | X | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A TRACCION | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A FLEXION | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A DESGASTE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A GEL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A GOLPE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A FROTAMIENTO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A RAYADO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RESISTENCIA A ABRAZADO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |





LABSCON
Laboratorio de Suelos y Concretos
Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: HOLCIM

AGREGADO : GRAVA TRITURADA 3/4

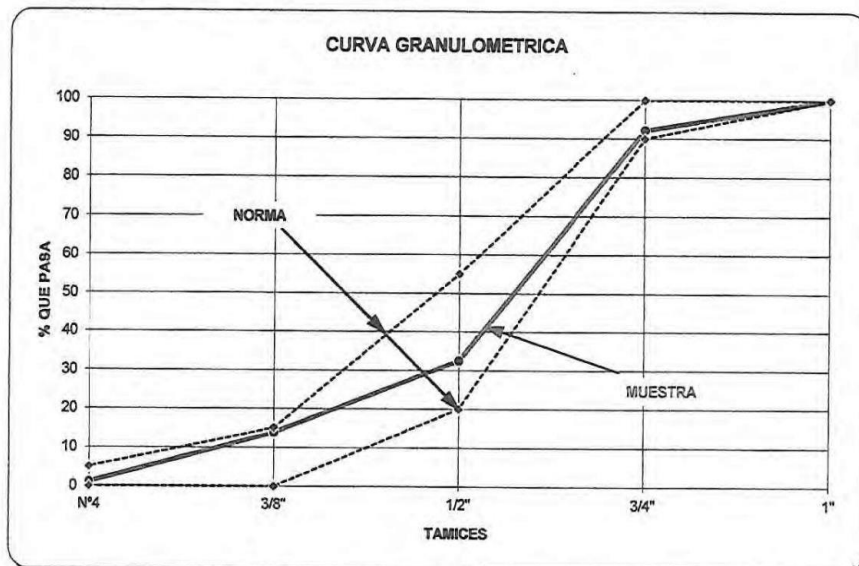
PROCEDENCIA: VIPESA **FECHA: 24 DE ENERO DEL 2019**

ANALISIS GRANULOMETRICO NORMA: INEN 696

| TAMIZ N° | P.RETENIDOS PARCIALES | P.RETENIDOS ACUMULADOS | PORCENTAJES RETENIDOS | PORCENTAJES QUE PASAN | PORCENTAJES ESPECIFICADOS |
|----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 2" | 0 | 0 | 0 | 100 | |
| 1 1/2" | 0 | 0 | 0 | 100 | |
| 1" | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 - 100 |
| 3/4" | 497 | 497 | 8 | 92 | 90 - 100 |
| 1/2" | 3,806 | 4,303 | 67 | 33 | 20 - 55 |
| 3/8" | 1,191 | 5,494 | 86 | 14 | 0 - 15 |
| N°4 | 814 | 6,308 | 99 | 1 | 0 - 5 |
| N°8 | 52 | 6,360 | 100 | 0 | |
| FONDO | 17 | 6,377 | | | |
| TOTAL | 6,377 | | | | |

P.TOTAL ANTES DE ENSAYO : 6,379

P.TOTAL DESPUES ENSAYO : 6,377



NORMA GRANULOMETRICA ASTM C - 33 3/4 " a 3/8 "





| Certificado de Producto | | | Doc ID: | ACB0-H00-RC25 | |
|--------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | | Revisión: | 6 | |
| Autor: | Técnico de Control de Calidad | Revisa: | Jefe de Control de Calidad | Aprueba: | Jefe de Control de Calidad |



Cemento de alta resistencia inicial Tipo HE

El Cemento Holcim Premium Tipo HE es un cemento de alta resistencia inicial que se fabrica bajo la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2380. Esta norma establece los requisitos de desempeño que deben cumplir los cementos hidráulicos y los clasifica de acuerdo a sus propiedades específicas.

| | | |
|----------------------------------|----------------|-------------------------|
| Especificaciones técnicas | Fecha reporte: | 02.04.2019 |
| | Fecha de | 01.03.2019 a 01.04.2019 |

Requisitos Químicos

La composición química para el cemento no está especificada en la NTE INEN 2380, sin embargo los constituyentes individuales molidos y mezclados para producirlo son analizados.

Requisitos Físicos

| | NTE INEN 2380 | Valor |
|--|---------------|-------|
| Cambio de longitud por autoclave, % máximo | 0,80 | -0,01 |
| Tiempo de fraguado, método de Vicat | | |
| Inicial, no menos de, minutos | 45 | 119 |
| Inicial, no más de, minutos | 420 | |
| Contenido de aire del mortero, en volumen, % | A | 4 |
| Resistencia a la Compresión, mínimo MPa | | |
| 1 día | 12 | 15,6 |
| 3 días | 24 | 26,6 |
| 7 días | A | 33,6 |
| 28 días | A | 41,5 |
| Expansión en barras de mortero 14 días, % máx. | 0,020 | 0,002 |

NOTAS:

- La información que consta en el certificado corresponde al promedio de los datos obtenidos en el período indicado. Los datos son del cemento típico despachado por Holcim; los despacho individuales pueden variar.
- La resistencia a 28 días corresponde al promedio del mes anterior.
- (A) Límite no especificado por la NTE INEN 2380. Resultado reportado sólo como información.
- (ND) Resultado del ensayo no disponible para el período de análisis indicado.

ALMACENAMIENTO:
 Almacenar el cemento en ambientes ventilados, sin humedad y cambios bruscos de temperatura.
 Para cemento a granel se debe contar en obra con silos de al menos 30 toneladas (capacidad promedio de camiones graneleros)

| | | |
|------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Planta Guayaquil | Vía a Salinas km 18.5 | Servicio al cliente: 04-370 9000 |
| Dirección | Guayaquil, Ecuador | Extensiones: 361066 |
| Teléfono | 593 4 3709000 | 361067 |

www.holcim.com.ec



Jairo Guana
 Jefe de Control de Calidad
 Planta Guayaquil
 Holcim Ecuador S.A.



PRESENTACIÓN

Fundas de 15 kg.

ALMACENAMIENTO

El tiempo de almacenamiento es de 60 meses, protegido de la humedad.
Condiciones de almacenamiento: lugar seco y bajo techo.

CÓDIGOS R/S

R: 20/36

S: 2/24/25

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.

Sika Ecuatoriana S.A. dispone de un sistema de gestión de la calidad y ambiental certificado de acuerdo a las normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 respectivamente, por SGS.

Sika Ecuatoriana S.A. <https://ecu.sika.com>

Durán.- Km. 3 1/2 vía Durán - Tambo (Casilla 10093) PBX (593-4) 2812700 Fax (593-4) 2801229

Quito.- Av. Naciones Unidas entre Iñaquito y Núñez de Vela. Edificio Metropolitano. PBX (593-4) 2812700

Cuenca.- Av. Ordoñez Lasso y Los Claveles. Edf. Palermo Tel: +5937 4 089725 - 4102829





DATOS TÉCNICOS

| | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| CONTENIDO DE SO₂: | Mayor al 95% |
| SUPERFICIE ESPECIFICADA: | Mayor a 30 m ² /g |
| HUMEDAD: | 3 - 5 % aprox. |

La humedad del producto, debido a su altísima superficie especificada, puede aumentar, en caso de un inadecuado almacenamiento o de alta humedad relativa en la zona de trabajo. Las normas especifican la humedad solo en razón a que el producto se utiliza como materia prima para elaborar morteros predosificados, que incorporan cemento y una alta humedad los haría endurecer.

MODO DE EMPLEO

SikaFume viene listo para ser empleado. Se adiciona a la mezcla con los agregados o con el cemento. Para garantizar la distribución homogénea de la microsíllica en la mezcla, debe incrementarse el tiempo de mezclado.

Este es el siguiente esquema de mezcla tanto en planta como en la obra:

- Colocar en la mezcladora los agregados.
- Adicionar la cantidad de SikaFume requerida y mezclar por 1 minuto.
- Adicionar el cemento y continuar el mezclado hasta los 2 minutos.
- Adicionar el agua de amasado con el superplastificante Sikament disuelto en ella, en la dosis requerida para lograr la consistencia deseada de la mezcla.
- Mezclar por 2 minutos adicionales.

DOSIFICACIÓN

SikaFume se dosifica entre el 3 y el 10% del peso del cemento de la mezcla de acuerdo con los resultados deseados. Debido a que la microsíllica es una adición en polvo, muy fina, por su gran superficie específica se genera una mayor demanda de agua, para igual consistencia de la mezcla, por lo tanto debe acompañarse SikaFume con la dosis adecuada de superplastificante Sikament, evitando así elevar la relación agua/cemento. Se recomienda realizar ensayos previos para determinar el diseño óptimo de la mezcla y las dosis requeridas de adiciones y aditivos.

LIMITACIONES

Proteger el producto de la humedad. Debido a las bajas relaciones a/c característica de los hormigones con microsíllica es recomendado el uso de superplastificantes. Para obtener superficies con un acabado eficiente es necesario usar curadores. Se recomienda usar Antisol como curador.

PRECAUCIONES

Se debe prever un excelente curado al momento de utilizar microsíllica o SikaFume en los hormigones y morteros. Curar por lo menos durante 7 días, ya que se pueden presentar microfisuras en caso de defectuoso curado. Contiene sílice y óxido de hierro. Evite respirar el polvo. Use solamente con ventilación adecuada. Puede causar irritación en la piel, ojos y vías respiratorias. Use gafas de seguridad, guantes de caucho y mascarillas para polvos. En caso de contacto con la piel, lavar la parte afectada con abundante agua y jabón. Para contacto con los ojos lavar con abundante agua durante 15 minutos y consultar un especialista. En caso de derrames accidentales recoger en recipientes adecuados y desecharlos de acuerdo a las regulaciones locales.



HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

SikaFume®

ADITIVO EN POLVO CON BASE A SILICA-FUME

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

SikaFume, es una adición en polvo fino, color gris, con base en microsilica, que permite aumentar las resistencias mecánicas y químicas de hormigones y morteros endurecidos. Su doble efecto puzolánico y granular, mejora las características de la matriz del hormigón o mortero, disminuyendo la porosidad y creando mediante su reacción con la cal libre, una estructura densa y resistente al ataque de aguas y ambientes agresivos. No contiene cloruros. Diseñado para cumplir con los requerimientos de la Norma ASTM C-1240

USOS

SikaFume es de gran utilidad cuando se requiere:

- Colocar hormigón bajo agua.
- Reducir la exudación y la segregación del hormigón.
- Mejorar la aptitud para el bombeo de hormigones y morteros.
- Elaborar hormigones resistentes al ataque de sulfatos.
- Dotar al hormigón de resistencia al ataque químico de aguas y suelos agresivos.
- Reducir la permeabilidad del hormigón.
- Mejorar la cohesión y la adherencia al soporte de hormigones y morteros proyectados.

VENTAJAS

SikaFume imparte a la mezcla las siguientes propiedades:

• EN EL HORMIGÓN FRESCO

- Evita la segregación, mejora la cohesión y la bombeabilidad de hormigones y morteros, en especial cuando se trabaja con diseños de mezcla carentes de finos.
- Reduce el rebote, permite disminuir la cantidad de acelerante y se logran capas de mayor espesor cuando se adiciona a hormigones y morteros proyectados.
- Reduce la energía necesaria para bombear hormigones y morteros.
- Aumenta la adherencia del hormigón con el acero de refuerzo.

• EN EL HORMIGÓN ENDURECIDO

- Disminuye los picos de temperatura de las mezclas cuando se usa como reemplazo parcial de cemento.
- Disminuye la permeabilidad, densifica la matriz de hormigones y morteros y aumenta la compactación.
- Reduce la permeabilidad a gases como el CO₂ y el SO₂ que carbonatan y disgregan el hormigón.
- Disminuye apreciablemente la penetración de aguas con cloruros y otras sales.
- Reduce notablemente la expansión de hormigón y morteros sometidos a fuerte ataque de sulfatos.



Anexo 5: Hoja técnica Sika Viscocrete 4100

MODO DE EMPLEO

Dosis: Las dosis varían de acuerdo al tipo de material usado, condiciones ambientales y a los requerimientos de un proyecto específico.

Sika Ecuatoriana recomienda usar dosis entre 0,19% a 0,9% del peso del cemento. Dosis mayores a las recomendadas pueden usarse cuando están especificados materiales, tales como microsilica, condiciones ambientales extremas. Para mayor información comuníquese con el Departamento Técnico de Sika.

Mezclado: Para mejores resultados de superplastificación, adicionar el Sika ViscoCrete 4100 directamente a la mezcla fresca de hormigón en el mixer y dejar mezclándose por lo menos 60 segundos. El Sika ViscoCrete 4100 también puede adicionarse a la mezcla fresca directamente en la planta al final del ciclo de mezclado.

Combinación con otros aditivos: Sika ViscoCrete 4100 es muy efectivo sólo o combinado con otros aditivos de Sika. Si se usa con ciertos aditivos Sikament puede afectar la plasticidad del hormigón fresco.

Combinación con microsilica: Sika ViscoCrete 4100 es particularmente recomendable para el uso con microsilica por su capacidad de reducción de agua y mayor control de la plasticidad.

PRESENTACIÓN

Tambores de 230 kg y al granel.

ALMACENAMIENTO

12 meses en su envase original, bien sellado y bajo techo.

SEGURIDAD

Medidas generales de protección e higiene.

Prever una ventilación suficiente o escape de gases en el área de trabajo.

Evitar el contacto con los ojos y la piel.

Protección preventiva de la piel con pomada protectora.

Quitarse inmediatamente la ropa manchada.

No fumar, no comer o beber durante el trabajo. Lavarse las manos antes de los descansos.

Protección de las manos con guantes de goma de butilo/nitrilo.

Protección de los ojos con gafas herméticamente cerradas. Protección corporal.

Ecología

No verter directamente sobre vertientes de agua o el suelo, actuar de acuerdo a las regulaciones locales.

Toxicidad

No peligroso.

Transporte

Mercancía no peligrosa.

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.

Sika Ecuatoriana S.A. dispone de un sistema de gestión de la calidad y ambiental certificado de acuerdo a las normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 respectivamente, por SGS.

Sika Ecuatoriana S.A. <https://ecu.sika.com>

Durán.- Km. 3 1/2 vía Durán - Tambo (Casilla 10093) PBX (593-4) 2812700 Fax (593-4) 2801229

Quito.- Av. Naciones Unidas entre Iñaquito y Núñez de Vela. Edificio Metropolitan. PBX (593-4) 2812700

Cuenca.- Av. Ordoñez Lasso y Los Claveles. Edf. Palermo Tel: +5937 4 089725 - 4102829

Hoja técnica de producto
Sika ViscoCrete 4100
Edición N°1 12-2015
Documento N° 011301011000000201

BUILDING TRUST





HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

Sika® ViscoCrete 4100

ADITIVO REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Sika ViscoCrete 4100 es un aditivo reductor de agua de alto rango e hiperplastificante, fabricado con los polímeros policarboxilatos de nuestra Tecnología Sika ViscoCrete. Diseñado para cumplir con todos los requerimientos de la Norma ASTM C-494. Tipos A y F.

USOS

- Sika ViscoCrete 4100 puede ser usado, tanto en hormigón premezclado, así como en prefabricados, adicionado en la planta como un reductor de agua de alto rango, proporciona excelente plasticidad mientras mantiene la trabajabilidad por más de una hora. Los tiempos de fraguado controlados del Sika ViscoCrete 4100 lo hacen ideal para aplicaciones tanto horizontales como verticales.
- Sika ViscoCrete 4100 es ideal para producción de hormigones autocompactados (SCC).

VENTAJAS

Reductor de agua: Sika ViscoCrete 4100 con pequeñas dosificaciones, se obtienen reducciones de agua entre 10-15% y con altas dosificaciones se pueden lograr reducciones de agua de hasta un 45%.

Sika ViscoCrete 4100 es aplicable para todos los niveles de reducción de agua.

Alta plasticidad: la acción superplastificante del Sika ViscoCrete 4100 permite obtener altos asentamientos, hormigones fluidos con alto mantenimiento de la trabajabilidad que facilitan la colocación con el mínimo vibrado aún cuando las relaciones agua-cemento sean tan bajas como 0,25

Sika ViscoCrete 4100 plastifica el hormigón dando alta fluidez, pero manteniendo la cohesión, evitando de esta manera sangrado o segregación.

Larga trabajabilidad y control del fraguado: Sika ViscoCrete 4100 está formulado para mantener la trabajabilidad por más de una hora, manteniendo los tiempos de fraguado normales.

La acción combinada de reductor de agua de alto rango y superplastificante del Sika ViscoCrete 4100, proporciona al hormigón endurecido los siguientes beneficios:

- Las altas resistencias finales permiten flexibilidad en los diseños de ingeniería y economía en las estructuras.
- Bajas relaciones agua cemento producen hormigones más durables, más densos y menos permeables.
- La alta plasticidad permite reducir los defectos de la superficie del hormigón y mejora la apariencia estética.

DATOS TÉCNICOS

ASPECTO: Líquido translúcido
DENSIDAD: 1.1 g/cc aprox.