

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Una Institución Adventista

**Influencia de la adición de mucílago de nopal
(*Opuntia ficus-índica*) en las propiedades mecánicas del
concreto permeable**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Por:

Bach. Thalía Gianella Inga Julca

Asesor

Mg. Darwin La Torre Esquivel

Lima, diciembre de 2019

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Mg. Darwin La Torre Esquivel, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL (OPUNTIA FICUS-ÍNDICA) EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO PERMEABLE" constituye la memoria que presenta la Bachiller Thalía Gianella Inga Julca para aspirar al título Profesional de Ingeniero Civil ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, a los 28 días del mes de septiembre del año dos mil veinte.



Asesor

Mg. Darwin La Torre Esquivel

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Lima, Naña, Villa Unión, a los 27 día(s) del mes de diciembre del año 2019, asistiendo las 10 señoras y señores
 se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, bajo la dirección del Señor Presidente del Jurado: Mg. Sergio Omar Valladares Escobedo
 secretario: Ing. David Díaz Garamendi
 miembros: Mg. Leonel E. Habituas Toucan; Ing. Miguel Angel Salaseto E. Hainz y el asesor: Mg. Darwin La Torre Esquivel y los demás

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Influencia de la adición multigrano de mopal (Opuntia ficus-indica) en las propiedades mecánicas del concreto permeable

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Thalia Gianella Imga Julca b) -
 conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil (Nombre del Título Profesional)
 con mención en -

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)/(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del Jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Thalia Gianella Imga Julca

| CALIFICACIÓN | ESCALAS | | | Mérito |
|-----------------|-----------|----------|--------------|-------------------|
| | Vigesimal | Literal | Cualitativa | |
| <u>Aprobado</u> | <u>16</u> | <u>B</u> | <u>Bueno</u> | <u>Muy bueno.</u> |

Candidato (b): -

| CALIFICACIÓN | ESCALAS | | | Mérito |
|--------------|-----------|---------|-------------|--------|
| | Vigesimal | Literal | Cualitativa | |
| | | | | |

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)/(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
 Presidente
 Mg. Sergio V.

[Firma]
 Asesor
 X Mg. Darwin L. T.

[Firma]
 Candidato/a (a)
 Thalia.

[Firma]
 Miembro
 Mg. Leonel E.

[Firma]
 Secretario
 Ing. David D.
 Miembro
 X Ing. Miguel A.
 Candidato/a (b)

DEDICATORIA

A mis padres:

Hayler Inga y Juana Julca, porque gracias a su amor, apoyo incondicional y sus buenos consejos que me brindaron, dándome siempre fuerzas y alentándome a no rendirme, me ayudaron a lograr esta meta.

A mi hermano:

A mi hermano Gianmarco, por ser un modelo a seguir como persona y profesional. También por darme amor y ayuda necesaria para ser fuerte ante los obstáculos de la vida.

A mi hermana:

A mi hermana Cindy, por estar siempre conmigo llenándome de amor y felicidad. Y por ser el motivo principal de culminar esta etapa de mi vida profesional.

A mi abuelo:

A mi abuelo José, por haberme dado su amor incondicional, sus consejos y ayuda desde pequeña.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme cuidado en todo momento y por permitirme alcanzar esta meta tan importante para mi vida profesional. También, a mis queridos padres, hermanos y abuelo por haber depositado su confianza en mí. A la Universidad Peruana Unión, por la enseñanza brindada durante estos años de estudio para lograr ser una profesional de éxito, con valores cristianos y ética profesional. A mis amigos, por darme ánimos para seguir adelante y que de alguna manera me ayudaron en la culminación de esta tesis.

INDICE GENERAL

| | |
|---|--------------|
| Dedicatoria | iv |
| Agradecimientos | v |
| Índice de tablas | x |
| Índice de gráficos | xiii |
| Índice de figuras | xiv |
| Índice de anexos | xvii |
| Símbolos usados | xviii |
| Resumen | xix |
| Abstract | xx |
| Capítulo I. El problema | 21 |
| 1.1 Identificación del problema..... | 21 |
| 1.2 Justificación..... | 22 |
| 1.3 Presuposición filosófica | 23 |
| 1.4 Objetivos de la investigación | 23 |
| 1.4.1 Objetivo general | 23 |
| 1.4.2 Objetivos específicos..... | 23 |
| Capítulo II. Marco teórico | 24 |
| 2.1 Antecedentes de la investigación | 24 |
| 2.1.1 Antecedentes internacionales | 24 |
| 2.1.2 Antecedentes nacionales | 29 |
| 2.2 Base teórica científica | 32 |
| 2.2.1 Nopal (<i>Opuntia ficus-índica</i>) | 32 |
| 2.2.1.1 Características morfológicas..... | 32 |
| 2.2.1.2 Composición química | 34 |
| 2.2.1.3 Mucílago de nopal | 34 |
| 2.2.1.4 Lugar de producción del nopal | 35 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 2.2.2 | Concreto permeable..... | 37 |
| 2.2.3 | Componentes del concreto permeable..... | 39 |
| 2.2.3.1 | Cemento Portland | 39 |
| 2.2.3.2 | Agregados | 40 |
| 2.2.3.3 | Agua..... | 48 |
| 2.2.3.4 | Aditivos | 49 |
| 2.2.4 | Propiedades del concreto permeable en estado fresco | 50 |
| 2.2.4.1 | Asentamiento | 51 |
| 2.2.4.2 | Densidad o peso unitario | 53 |
| 2.2.4.3 | Porcentaje de vacíos | 54 |
| 2.2.5 | Propiedades del concreto permeable en estado endurecido | 56 |
| 2.2.5.1 | Resistencia a la compresión ($f'c$)..... | 56 |
| 2.2.5.2 | Resistencia a la tracción por compresión diametral (fcd)..... | 59 |
| 2.2.5.3 | Permeabilidad | 60 |
| 2.2.6 | Aplicaciones del concreto permeable..... | 63 |
| 2.2.7 | Diseño de mezcla | 64 |
| 2.2.7.1 | Materiales | 64 |
| 2.2.7.2 | Criterios de diseño | 65 |
| 2.2.8 | Normas utilizadas | 69 |
| 2.2.8.1 | ACI 522R (Diseño de mezcla)..... | 69 |
| 2.2.8.2 | NTP 339.035 (Asentamiento)..... | 69 |
| 2.2.8.3 | NTP 339.046 (Peso Unitario y Contenido de Vacíos)..... | 69 |
| 2.2.8.4 | NTP 339.034 (Resistencia a la compresión) | 69 |
| 2.2.8.5 | NTP 339.084 (Resistencia a la tracción por compresión diametral)..... | 70 |
| 2.2.8.6 | ACI 522R (Permeabilidad)..... | 70 |
| | Capítulo III. Materiales y métodos | 71 |
| 3.1 | Descripción del lugar de ejecución | 71 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.2 | Tipo de investigación | 71 |
| 3.3 | Nivel de la investigación | 71 |
| 3.4 | Diseño de la investigación | 71 |
| 3.5 | Enfoque de la investigación | 71 |
| 3.6 | Unidad de estudio..... | 71 |
| 3.7 | Población y muestra | 72 |
| 3.7.1 | Población..... | 72 |
| 3.7.2 | Muestra..... | 72 |
| 3.8 | Variables y operacionalización de variables | 74 |
| 3.8.1 | Variable independiente..... | 74 |
| 3.8.2 | Variable dependiente..... | 74 |
| 3.9 | Materiales y equipos | 74 |
| 3.9.1 | Mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus-índica</i>) | 74 |
| 3.9.1.1 | Materia prima | 74 |
| 3.9.1.2 | Equipos | 75 |
| 3.9.2 | Concreto permeable..... | 75 |
| 3.9.2.1 | Materiales | 75 |
| 3.9.2.2 | Equipos y herramientas | 75 |
| 3.10 | Técnicas e instrumentos de recolección de datos..... | 76 |
| 3.11 | Metodología experimental | 78 |
| 3.11.1 | Ensayo de las características físicas de los agregados | 79 |
| 3.11.1.1 | Análisis granulométrico y módulo de finura NTP 400.011, NTP 400.012..... | 79 |
| 3.11.1.2 | Peso específico y absorción NTP 400.022, NTP 400.021..... | 80 |
| 3.11.1.3 | Peso unitario suelto y compactado NTP 400.017 | 81 |
| 3.11.1.4 | Contenido de humedad NTP 339.185..... | 83 |
| 3.11.2 | Extracción del mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus-índica</i>) | 84 |

| | | |
|--|--|------------|
| 3.11.3 | Diseño de mezcla | 85 |
| 3.11.4 | Elaboración de probetas de concreto permeable | 103 |
| 3.11.4.1 | Elaboración de probetas de concreto permeable NTP 339.183... .. | 103 |
| 3.11.4.2 | Elaboración de probetas de concreto permeable con mucílago de nopal..... | 104 |
| 3.11.5 | Ensayos realizados al concreto permeable | 106 |
| 3.11.5.1 | Ensayos en estado fresco | 106 |
| 3.11.5.2 | Ensayos en estado endurecido | 108 |
| Capítulo IV. Resultados y discusión | | 111 |
| 5.1 | Ensayos del concreto en estado fresco | 111 |
| 5.1.1 | Asentamiento..... | 111 |
| 5.1.2 | Peso Unitario | 111 |
| 5.1.3 | Contenido de vacíos | 112 |
| 5.2 | Ensayos del concreto en estado endurecido | 113 |
| 5.2.1 | Resistencia a la compresión | 113 |
| 5.2.2 | Resistencia a la tracción por compresión diametral | 116 |
| 5.2.3 | Permeabilidad..... | 117 |
| 3.11.5.3 | Tramo de prueba..... | 118 |
| Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones..... | | 119 |
| 5.1 | Conclusiones | 119 |
| 5.2 | Recomendaciones..... | 120 |
| Referencias | | 121 |
| Anexos..... | | 129 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Pérez (2009). | 25 |
| Tabla 2 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Barahona et al. (2013). | 26 |
| Tabla 3 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Moujir & Castañeda (2014). | 27 |
| Tabla 4 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según León & Rosero (2016). | 28 |
| Tabla 5 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Porras (2017). | 28 |
| Tabla 6 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Flores & Pacompia (2015). | 29 |
| Tabla 7 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Quispe & Ticona (2017). | 30 |
| Tabla 8 Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Perez (2017). | 31 |
| Tabla 9 Composición de la paleta de nopal (Opuntia ficus-índica). | 34 |
| Tabla 10 Requisitos granulométricos del agregado fino. | 42 |
| Tabla 11 Requisitos granulométricos del agregado grueso. | 43 |
| Tabla 12 Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso. | 44 |
| Tabla 13 Límites permisibles para el agua de mezcla y curado. | 49 |
| Tabla 14 Clasificación de los aditivos. | 50 |
| Tabla 15 Clases de mezclas según su asentamiento. | 51 |
| Tabla 16 Rangos típicos de las proporciones de materiales en el concreto permeable. | 65 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 17 Valores efectivos de b/bo. | 69 |
| Tabla 18 Operacionalización de variables..... | 74 |
| Tabla 19 Herramientas y equipos. | 76 |
| Tabla 20 Peso específico del cemento y agua. | 85 |
| Tabla 21 Propiedades del agregado fino y grueso..... | 85 |
| Tabla 22 Determinación del valor efectivos b/bo..... | 87 |
| Tabla 23 Volúmenes absolutos..... | 90 |
| Tabla 24 Contenido de humedad y absorción de los materiales. | 91 |
| Tabla 25 Pesos por m ³ de los materiales del diseño de mezcla..... | 92 |
| Tabla 26 Proporción de diseño de mezcla..... | 92 |
| Tabla 27 Cantidad de material para una probeta con 10% de desperdicio $V = 0.00583 \text{ m}^3$ | 93 |
| Tabla 28 Cantidad de material para una probeta con 1 % de mucílago de nopal..... | 94 |
| Tabla 29 Cantidad de material para una probeta con 3 % de mucílago de nopal..... | 94 |
| Tabla 30 Cantidad de material para una probeta con 5% de mucílago de nopal..... | 95 |
| Tabla 31 Peso específico del cemento y agua. | 95 |
| Tabla 32 Propiedades del agregado fino y grueso..... | 95 |
| Tabla 33 Asentamiento según el tipo de construcción..... | 96 |
| Tabla 34 Contenido de agua en función del slump y el TMN..... | 96 |
| Tabla 35 Contenido de aire en función del TMN..... | 97 |
| Tabla 36 f'c requerida en función de la resistencia de diseño y un factor de seguridad..... | 97 |
| Tabla 37 Relación a/c en función de la f'cr y aire incorporad. | 98 |
| Tabla 38 Volumen del agregado grueso en función del TMN y MF. | 99 |
| Tabla 39 Volúmenes absolutos..... | 99 |
| Tabla 40 Pesos secos, contenido de humedad y % de absorción de los agregados..... | 100 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 41 Pesos por m ³ de los materiales del diseño de mezcla | 101 |
| Tabla 42 Proporción de diseño de mezcla. | 102 |
| Tabla 43 Cantidad de material para una probeta con 10% de desperdicio $V = 0.00583 \text{ m}^3$ | 103 |

INDICE DE GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1. Peso unitario del concreto convencional y concreto permeable (Puchuri, 2010 y Perez, 2017)..... | 54 |
| Gráfico 2. Porcentaje de vacíos el concreto convencional y concreto permeable (Puchuri, 2010 y Perez, 2017)..... | 55 |
| Gráfico 3. Esfuerzo vs Tiempo (Flores, 2005 y Puchuri, 2010)..... | 58 |
| Gráfico 4. Asentamiento vs Porcentajes de Mucílago de Nopal. | 111 |
| Gráfico 5. Peso unitario vs Porcentaje de Mucílago de Nopal. | 112 |
| Gráfico 6. Contenido de vacíos vs Porcentaje de Mucílago de Nopal. | 112 |
| Gráfico 7. Resistencia a la compresión vs Porcentajes de Mucílago de Nopal a los 7 días. | 113 |
| Gráfico 8. Resistencia a la compresión vs Porcentajes de Mucílago de Nopal a los 28 días. | 113 |
| Gráfico 9. Evolución de la resistencia con respecto al tiempo..... | 114 |
| Gráfico 10. Evolución de la resistencia con respecto al tiempo..... | 115 |
| Gráfico 11. Resistencia a la tracción por compresión diametral vs Porcentaje de Mucílago de Nopal a los 7 días..... | 116 |
| Gráfico 12. Resistencia a la tracción por compresión diametral vs Porcentaje de Mucílago de Nopal a los 28 días..... | 116 |
| Gráfico 13. Evolución de la resistencia a la tracción con respecto al tiempo. | 117 |
| Gráfico 14. Permeabilidad vs Porcentajes de Mucílago de Nopal. | 118 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Planta de nopal (<i>Opuntia ficus-índica</i>) (De León, 2012). | 32 |
| Figura 2. Paleta de nopal (<i>Opuntia ficus-índica</i>) (FAO & ICARDA, 2018)..... | 33 |
| Figura 3. Mucílago de nopal (Loyo, 2018)..... | 35 |
| Figura 4. Mezcla de concreto permeable con revenimiento o slump = 0: (a) relación agua/cemento 0.30 y (b) con agregado de 3/8" y contenido de vacíos 15% (Ortega, 2015 y Pérez, 2009)..... | 38 |
| Figura 5. Muestra de concreto permeable (Aoki, 2009)..... | 38 |
| Figura 6. Cemento (González, 2016)..... | 40 |
| Figura 7. Agregado fino: (a) arena fina y (b) arena gruesa (Contruex, 2019)..... | 41 |
| Figura 8. Agregado grueso: (a) gradación 3/8"; (b) gradación 1/2"; (c) gradación 3/4" y (d) gradación 1" (AVENSA, 2016)..... | 42 |
| Figura 9. Muestras de concreto permeable con diferentes contenidos de agua, formando una bola: (a) muy poca agua, (b) cantidad adecuada de agua y (c) demasiada agua (Tennis et al., 2004)..... | 49 |
| Figura 10. Molde para determinar el asentamiento (MTC E 705, 2016). | 52 |
| Figura 11. Tipos de asentamientos: (a) Asentamiento normal o verdadero: es propio de una mezcla rica y con una adecuada cantidad de agua, (b) Asentamiento de corte: se produce por un exceso de agua y (c) Asentamiento de derrumbamiento: se produce cuando el concreto tiene mucha agua y la arena es pobre (Arauco, 2010)..... | 53 |
| Figura 12. Revenimiento: (a) concreto permeable y (b) concreto convencional..... | 53 |
| Figura 13. Estructura interna de un concreto permeable (Schaefer et al., citado por Pérez 2009)..... | 55 |
| Figura 14. Esquemas de los Modelos de Fractura Típicos en probetas cilíndricas (NTP 339.034, 2008)..... | 58 |

| | |
|--|-----|
| Figura 15. Permeámetro de carga constante (Espinoza, 2006)..... | 61 |
| Figura 16. Permeámetro de carga variable (Espinoza, 2006)..... | 62 |
| Figura 17. Aplicaciones del concreto permeable: (a) áreas de estacionamientos; (b) ciclistas y áreas verdes (Hidrocreto, http://hidrocreto.com/aplicaciones.php?idioma=es#). | 63 |
| Figura 18. Relación entre el contenido de vacíos y la resistencia a la compresión a los 28 días (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015). | 66 |
| Figura 19. Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados N°8 (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015). | 67 |
| Figura 20. Resumen de la cantidad de probetas a realizar a ensayar..... | 73 |
| Figura 21. Procedimiento experimental..... | 78 |
| Figura 22. Proceso de extracción del mucílago de nopal. | 84 |
| Figura 23. Contenido de vacíos (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015). | 86 |
| Figura 24. Porcentaje de pasta (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015). | 86 |
| Figura 25. Ensayo de análisis granulométrico del agregado fino..... | 147 |
| Figura 26. Muestra retenida por cada tamiz (agregado fino). | 147 |
| Figura 27. Muestra retenida por cada tamiz (agregado grueso). | 147 |
| Figura 28. Máquina para realizar el ensayo de análisis granulométrico del agregado grueso (Huso 7). | 148 |
| Figura 29. Ensayo de peso unitario suelto del agregado fino..... | 148 |
| Figura 30. Ensayo de peso unitario compactado del agregado grueso..... | 148 |
| Figura 31. Ensayo de peso específico del agregado fino..... | 149 |
| Figura 32. Horno usado para los ensayos de caracterización de los agregados. | 149 |
| Figura 33. Muestras para los ensayos de contenido de humedad y peso específico. | 149 |
| Figura 34. Pelado de las pencas de nopal. | 150 |

| | |
|---|-----|
| Figura 35. Pencas de nopal debidamente cortadas en cuadros de aprox. 5 cm. | 150 |
| Figura 36. Licuado de las pencas de nopal y obtención del mucílago. | 150 |
| Figura 37. Elaboración del concreto permeable. | 151 |
| Figura 38. Ensayo de peso unitario del concreto convencional y concreto permeable. | 151 |
| Figura 39. Asentamiento del concreto permeable. | 151 |
| Figura 40. Moldeo de la mezcla de concreto. | 152 |
| Figura 41. Curado de probetas. | 152 |
| Figura 42. Resistencia a la compresión del concreto convencional y concreto permeable. | 152 |
| Figura 43. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta del concreto permeable. | 153 |
| Figura 44. Permeámetro. | 153 |
| Figura 45. Probeta envuelta en latex para realizar el ensayo de permeabilidad. | 153 |
| Figura 46. Vaciado de la mezcla de concreto permeable en el tramo de prueba. | 154 |
| Figura 47. Nivelado de la mezcla de concreto permeable en el tramo de prueba. | 154 |
| Figura 48. Ensayo de permeabilidad en el tramo de prueba. | 154 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|------------|
| Anexo A. Propiedades de los agregados | 129 |
| Anexo B. Ensayos del concreto | 133 |
| Anexo C. Análisis estadístico | 140 |
| Anexo D. Panel fotográfico | 147 |
| Anexo E. Certificado de uso del Laboratorio de Concreto y Ensayo de Materiales - UPeU | 155 |

SÍMBOLOS USADOS

| | |
|----------|--|
| ACI | : American Concrete Institute |
| AF | : Agregado fino |
| AG | : Agregado grueso |
| Ag | : Agregado |
| a/c | : Agua/cemento |
| CP | : Concreto Permeable |
| E | : Espécimen |
| f_c | : Resistencia a la compresión |
| f_{cd} | : Resistencia a la tracción por compresión diametral |
| INEI | : Instituto Nacional de Estadística e Informática |
| M | : Muestra |
| NRMCA | : National Ready Mixed Concrete Association |
| NTP | : Norma Técnica Peruana |
| PUS | : Peso unitario suelto |
| PUC | : Peso unitario compactado |
| TM | : Tamaño Máximo |
| TMN | : Tamaño Máximo Nominal |

RESUMEN

En la investigación realizada, se estudió la influencia de la adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en las propiedades mecánicas del concreto permeable. Las variables estudiadas son la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y la permeabilidad. Se realizó 4 diseños de mezcla considerando los mismos criterios de diseño; relación a/c de 0.35, 16.30 % de contenido de vacíos, 10 % de agregado fino, b/bo = 0.93 y 24.5 % de volumen de pasta (Mezcla Tipo I: concreto permeable base, Mezcla Tipo II: concreto permeable (CP) con 1 % de mucílago de nopal (MN), Mezcla Tipo III: CP con 3 % MN y Mezcla Tipo IV: CP con 5 % MN, en peso cemento). De las mezclas elaboradas con mucílago de nopal, la Mezcla Tipo II presentó mejores resultados en comparación a las otras dos mezclas (Mezcla Tipo III y Mezcla Tipo IV) con una resistencia a la compresión de 229.55 kg/cm², resistencia a la tracción por compresión diametral de 20.82 kg/cm² y una permeabilidad de 0.66 cm/s. La adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en el diseño de mezcla del concreto permeable mejora la resistencia a la compresión; sin embargo, se presentan tendencias a la reducción de la resistencia a la tracción por compresión diametral y permeabilidad en comparación al concreto permeable base (Mezcla Tipo I).

Palabras clave: Mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*), concreto permeable, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y permeabilidad.

ABSTRACT

In the conducted investigation, the influence of the addition of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*) on the mechanical properties of pervious concrete was studied. The variables studied are compressive strength, tensile strength by diametral compressive and permeability. Four mixtures designs were made considering the same design criteria; a/c ratio of 0.35, 16.30 % of void content, 10% of fine aggregate, $b/b_0 = 0.93$ and 24.5 % of paste volume (Type I Mixture: base pervious concrete, Type II Mixture: pervious concrete (CP) with 1 % nopal mucilage (MN), Type III Mixture: CP with 3 % MN and Type IV Mixture: CP with 5 % MN, by weight cement). Of the mixtures made with nopal mucilage; the Type II Mixture presented better results compared to the other two mixtures (Type III Mixture and Type IV Mixture) with a compressive strength of 229.55 kg/cm², tensile strength by diametral compressive of 20.82 kg/cm² and a permeability of 0.66 cm/s. The addition of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*) in the mixture design of pervious concrete improves compressive strength; however, there are trends to reduce tensile strength by diametral compressive and permeability compared to pervious base concrete (Type I Mixture).

Keywords: Nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*), pervious concrete, compressive strength, tensile strength by diametral compressive and permeability.

CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

1.1 Identificación del problema

El proceso de urbanización tiene importantes efectos sobre las aguas pluviales en una ciudad, principalmente debido a la disminución de la capacidad de infiltración y de almacenamiento, así como eliminación de los cauces naturales de escurrimiento. “Esto se debe a que las urbanizaciones requieren de construcciones que impermeabilizan grandes superficies de terrenos, produciendo una pérdida de grandes cantidades de lluvia, y estas al no filtrarse en el terreno aumentan la escorrentía superficial” (Benites, 2014). Estos cambios producen un impacto negativo en la hidrología natural y el medio ambiente. Se dañan cauces naturales y ecosistemas, y las inundaciones son más frecuentes, rápidas y severas. Todo esto se intensifica si la ciudad sigue creciendo sin preocuparse del impacto que ella misma genera. Las soluciones necesarias para enfrentar estas consecuencias son caras y no siempre efectivas (Pérez, 2009).

El concreto convencional empleado habitualmente para la construcción de pavimentos, presenta una naturaleza impermeable, debido a la alta presencia de finos en su diseño, obstruyendo el porcentaje de vacíos, contribuyendo de esa manera al aumento de la escorrentía de agua en el sistema de drenaje, sobrecargando la infraestructura y causando inundaciones excesivas en las áreas edificadas. Sin embargo, el concreto permeable se ha desarrollado principalmente para drenar el agua de la superficie del suelo, de tal manera que reduzca la escorrentía de las aguas de lluvia y recargue el agua subterránea. Por otro lado, la alta presencia de porosidad que el concreto permeable presenta en relación con el concreto convencional lo convierte en un concreto liviano con una resistencia a la compresión limitada (Aoki, 2009).

"Existen diversos estudios sobre diseños de mezcla con la finalidad de mejorar las propiedades del concreto permeable adicionando finos, concreto reciclado, aditivo entre otros productos" (Quispe & Ticona, 2017). Pero no se ha encontrado estudios en el que se evalúa el comportamiento del concreto permeable con la adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en el diseño de mezcla, ni mucho menos se tiene el porcentaje óptimo de mucílago de nopal que se debe añadir en el diseño de mezcla; es decir, existe carencia de información. Por tal motivo, se pretende en esta investigación agregar el mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en diferentes proporciones al concreto permeable para aumentar su resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y mejorar la permeabilidad.

1.2 Justificación

El concreto permeable, conocido también como concreto ecológico (Barahona *et al.*, 2013), ayuda a controlar y manejar las aguas pluviales. A comparación del concreto convencional, el concreto permeable ayuda a reducir la escorrentía superficial en áreas pavimentadas, evitando así grandes inversiones económicas en proyectos de sistemas de drenaje (Aoki, 2009). El concreto permeable, por presentar gran porcentaje de vacíos, reduce su capacidad de resistencia a la compresión; por tal motivo, en esta investigación se pretende adicionar mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en determinadas proporciones al concreto, mejorando sus propiedades mecánicas, volviéndolo más óptimo para sus diferentes usos en la construcción. Es necesario mencionar que se usará el nopal por ser una planta que abunda en nuestro país y es de fácil acceso a su adquisición. Por otro lado, en varios países desarrollados el uso de concreto permeable en la construcción de pavimentos, estacionamientos y ciclovías se está volviendo popular; debido a que presenta una alta permeabilidad y porque ayuda a recargar el nivel del agua subterránea (Aoki, 2009).

1.3 Presuposición filosófica

En la actualidad hablar de aditivos naturales que mejoren el comportamiento de un concreto permeable es un tema poco o nada conocido, por tal motivo en esta investigación se pretende plasmar nuevos conocimientos, que servirán como base de una próxima investigación que se desee realizar. Como menciona Louis Pasteur, si no conozco una cosa, la investigaré. Es necesario mencionar, que el concreto permeable aplicado a los pavimentos, ayuda a reducir la escorrentía superficial, ya que permite que el agua filtre al subsuelo logrando así la restauración de los mantos acuíferos, contribuyendo a cuidar los recursos naturales, como se menciona en Génesis 2:15 Dios dio al ser humano derecho y autoridad sobre la tierra, para que la cuidara y trabajara.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de la adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en las propiedades mecánicas del concreto permeable.

1.4.2 Objetivos específicos

Determinar la influencia de la adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en la resistencia a la compresión del concreto permeable.

Determinar la influencia de la adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en la resistencia a la tracción por compresión diametral del concreto permeable.

Analizar la influencia de la adición de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en la permeabilidad del concreto permeable.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Pérez (2009) en su investigación denominada “*Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos*”, menciona que la mezcla de concreto permeable más resistente que se realizó en esta investigación se obtuvo utilizando una relación a/c de 0.35 y con agregado de $\frac{3}{4}$ ”, adicionando un 10 % de arena, 15 % y 20 % de porcentaje de vacíos. Los resultados son adecuados para su uso en pavimentos con tránsito ligero u otras aplicaciones. Además, concluyó que, la mezcla en estado fresco del concreto permeable tuvo una consistencia rígida, por presentar un revenimiento de 0 cm. También el peso unitario de las mezclas con 15 % de vacíos resultó con un promedio de 1944 kg/m^3 y las mezclas con 20 % de vacíos con un promedio de 1899 kg/m^3 quedando dentro del rango esperado. Con respecto a los ensayos del concreto en estado endurecido, las mezclas con 15 % de vacíos, obtuvieron un promedio de resistencia a la compresión de 196 kg/cm^2 , resistencia a la tensión indirecta por compresión diametral de 20 kg/cm^2 ; en cambio, las mezclas con 20 % de vacíos obtuvieron un promedio de resistencia a la compresión de 165 kg/cm^2 , resistencia a la tensión indirecta por compresión diametral de 15 kg/cm^2 . Para que un concreto sea considerado como permeable su coeficiente de permeabilidad debe estar entre 0.20 y 0.54 cm/s; y los resultados de las pruebas de permeabilidad de esta investigación para un 15 % de vacíos se obtuvo una permeabilidad de 0.462 cm/ y respecto al 20 % de vacíos con un promedio de 0.525 cm/s. Se pudo concluir que, a menor porcentaje de vacíos, aumenta la resistencia como el peso volumétrico, pero a la vez disminuye la permeabilidad.

Tabla 1

Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Pérez (2009).

| Propiedades del concreto permeable | Criterios de diseño | | Unidad |
|-------------------------------------|--|--|--------------------|
| | a/c = 0.35 TMN = 3/4" %Finos = 10% CA = 15% | a/c = 0.35 TMN = 3/4" %Finos = 10% CA = 20% | |
| Asentamiento | 0.00 | 0.00 | cm |
| Peso Unitario | 1944.00 | 1899.00 | kg/m ³ |
| Resistencia a la compresión | 215.19 | 176.43 | kg/cm ² |
| Resistencia a la tracción indirecta | 19.99 | 16.87 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.462 | 0.523 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia. a/c = agua / cemento, TMN = Tamaño Máximo Nominal, CA = Contenido de Aire.

Barahona *et al.* (2013) realizaron una investigación denominada “*Comportamiento del concreto permeable utilizando agregado grueso de las canteras, el Carmen, Aramauca y la Pedrera, de la zona oriental de El Salvador*”. El objetivo general fue realizar un estudio del comportamiento del concreto permeable en función del tipo de agregado grueso utilizado. Para el desarrollo de esta investigación se consideró los mismos criterios de diseño de mezcla respecto a relación $a/c = 0.36$, el tamaño máximo de los agregados $TMN = 3/4"$, pero el porcentaje de vacíos fue establecido en tres proporciones (15 %, 20 % y 25 %). Los autores llegaron a la conclusión que el mayor resultado de las propiedades del concreto en estado fresco es de la cantera Aramauca. Las mayores resistencias a la compresión fueron de las muestras elaboradas con agregados de la Cantera El Carmen y empleando un 15 % de contenido de aire.

Tabla 2

Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Barahona et al. (2013).

| Propiedades del concreto permeable | Criterios de diseño | | | Unidad |
|------------------------------------|---------------------|------------|------------|--------------------|
| | a/c = 0.36 | a/c = 0.36 | a/c = 0.36 | |
| | TMN = 3/8" | TMN = 3/8" | TMN = 3/8" | |
| | CA = 15% | CA = 20% | CA = 25% | |
| Cantera El Carmen | | | | |
| Peso Unitario | 2298.15 | 2079.63 | 2079.63 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 15.58 | 23.04 | 26.51 | % |
| Resistencia a la compresión | 146.46 | 120.25 | 101.11 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 1.096 | 1.596 | 1.911 | cm/s |
| Cantera Aramauca | | | | |
| Peso Unitario | 2316.67 | 2168.52 | 2159.26 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 15.78 | 22.90 | 26.61 | % |
| Resistencia a la compresión | 119.01 | 95.70 | 81.14 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.986 | 1.304 | 1.453 | cm/s |
| Cantera La Pedrera | | | | |
| Peso Unitario | 2079.63 | 1983.33 | 1927.78 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 16.91 | 21.86 | 25.29 | % |
| Resistencia a la compresión | 79.89 | 72.82 | 64.08 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 2.584 | 2.878 | 3.028 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia. a/c = 0.36, TMN = Tamaño Máximo Nominal, CA == Contenido de aire.

Moujir & Castañeda (2014) en su investigación denominada “*Diseño y aplicación de concreto poroso para pavimentos*”, tuvieron como objetivo principal diseñar un concreto poroso aplicado a estructuras de pavimento rígido comparando la inclusión o no de agregado fino en la mezcla, al cual denominó concreto poroso Tipo I al diseño con agregado fino y concreto poroso Tipo II al diseño sin agregado fino. El concreto poroso Tipo I contribuye con la disminución de la escorrentía superficial, ya que la gran cantidad de poros que contiene le otorga la propiedad mecánica de la permeabilidad, logrando que los fluidos atraviesen su estructura con mayor facilidad que el concreto convencional. Respecto al asentamiento y al peso unitario, la mezcla Tipo I presentó mayores valores de 2.571 cm y 2010.38 kg/m³ respectivamente. Sin embargo, el porcentaje de vacíos de la mezcla Tipo II, es mayor que de la mezcla Tipo I, esto se debe a que la pasta de la mezcla Tipo I, por efecto de los finos, brinda mayor cohesión entre partículas y disminuye el volumen de vacíos. La

resistencia promedio a la compresión de la mezcla Tipo I es 7.71 % mayor que la mezcla Tipo II sin finos. Por lo que se puede asegurar que la presencia de finos, brinda una mayor cohesión a la pasta llenando los intersticios del agregado grueso. Finalmente, los autores mencionaron que la mezcla sin finos presenta una mayor permeabilidad de 2.57 cm/s.

Tabla 3

Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Moujir & Castañeda (2014).

| Propiedades del concreto permeable | Criterios de diseño | | Unidad |
|------------------------------------|---|---|--------------------|
| | Con finos a/c = 0.35 TMN = 1/2" CA = 20% | Sin finos a/c = 0.66 TMN = 1/2" CA = 20% | |
| Asentamiento | 2.571 | 0.221 | cm |
| Peso Unitario | 2010.38 | 1913.03 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 15.42 | 18.27 | % |
| Resistencia a la compresión | 228.10 | 210.50 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 1.45 | 2.57 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia. a/c = agua / cemento, TMN = Tamaño Máximo Nominal, CA = Contenido de Aire.

León & Rosero (2016) realizaron una investigación titulada “*Optimización del diseño de una mezcla de hormigón permeable a partir de tres distintas gradaciones*”. El objetivo principal fue optimizar una mezcla de hormigón permeable a partir de tres distintas graduaciones, utilizando agregados de las canteras de Pintang y San Antonio. Los autores mencionan que trabajaron con dos valores de relación a/c, para el diseño de mezcla usando agregados de la Cantera Pintang se usó una relación a/c = 0.55 y para la Cantera San Antonio la relación a/c = 0.60. Se usó tres tipos de gradación de agregados los cuales fueron de 3/8”, N°4 y N°8. Los resultados de los ensayos realizados mostraron que los agregados usados de la cantera Pintang ayudan a que la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción por compresión diametral son mucho mayores a los resultados de las muestras que emplearon agregados de la Cantera San Antonio en su diseño de mezcla, pero respecto a la permeabilidad ésta disminuye.

Tabla 4

Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según León & Rosero (2016).

| Propiedades del concreto permeable | Criterios de diseño | | | Unidad |
|-------------------------------------|---------------------|------------|------------|--------------------|
| | a/c = 0.60 | a/c = 0.60 | a/c = 0.60 | |
| | a/c = 0.55 | a/c = 0.55 | a/c = 0.55 | |
| | TMN = 3/8" | TMN = N°4 | TMN = N°8 | |
| Cantera San Antonio | | | | |
| Resistencia a la compresión | 91.10 | 91.60 | 51.90 | kg/cm ² |
| Resistencia a la tracción indirecta | 7.10 | 9.10 | 6.30 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.280 | 0.284 | 0.223 | cm/s |
| Cantera Pintang | | | | |
| Resistencia a la compresión | 225.00 | 245.90 | 188.60 | kg/cm ² |
| Resistencia a la tracción indirecta | 34.50 | 30.70 | 11.90 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.118 | 0.188 | 0.193 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia. a/c = agua/cemento, TMN = Tamaño Máximo Nominal, a/c = 0.60 (Cantera San Antonio), a/c = 0.55 (Cantera Pintang).

Porras (2017) en su investigación titulada “*Metodología de diseño para concretos permeable y sus respectivas correlaciones de permeabilidad*” desarrolló seis tipos de diseño de mezcla, usando relación a/c de 0.25, 0.27 y 0.30, contenido de aire de 15 y 17 % y la misma gradación 1/2” para todos los diseños de mezcla. En la cual demostraron que los mayores resultados de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción por compresión diametral obtuvieron las probetas elaboradas con una relación a/c = 0.25 y contenido de aire CA = 15%, y la mayor permeabilidad presenta las muestras elaboradas con relación a/c = 0.25 y CA = 17 %.

Tabla 5

Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Porras (2017).

| Propiedades del concreto permeable | Criterios de diseño | | | | | | Unidad |
|-------------------------------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| | a/c = 0.25 | a/c = 0.27 | a/c = 0.30 | a/c = 0.25 | a/c = 0.27 | a/c = 0.30 | |
| | TMN = 1/2" | TMN = 1/2" | TMN = 1/2" | TMN = 1/2" | TMN = 1/2" | TMN = 1/2" | |
| | CA = 15% | CA = 15% | CA = 15% | CA = 17% | CA = 17% | CA = 17% | |
| Peso Unitario | 2001 | 1975 | 1954 | 1926 | 1939 | 1933 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 14.3 | 15.0 | 15.4 | 17.2 | 17.1 | 16.9 | % |
| Resistencia a la compresión | 186.6 | 145.0 | 160.2 | 132.0 | 133.7 | 129.9 | kg/cm ² |
| Resistencia a la tracción indirecta | 15.1 | 14.1 | 14.3 | 12.7 | 13.6 | 12.9 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.172 | 0.165 | 0.168 | 0.191 | 0.189 | 0.188 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia. a/c = agua / cemento, TMN = Tamaño Máximo Nominal, CA = Contenido de Aire.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Flores & Pacompia (2015) en su investigación denominada “*Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de plástico para pavimentos $f'c$ 175 kg/cm² en la ciudad de Puno*”, determinó que el diseño de concreto permeable óptimo para la adición de tiras de polipropileno es el diseño en el cual se utilizaron agregados gruesos de menor tamaño (huso N°8), puesto que permite que el concreto permeable desarrolle mayores valores de resistencia a la compresión. Y con respecto, al coeficiente de permeabilidad y contenido de vacíos, los valores encontrados se encuentran dentro del rango establecido por el ACI. La resistencia a la compresión desarrollada a los 28 días por el concreto permeable elaborado con el diseño óptimo, aumenta en un 16.7 % y 4.2 %, al adicionar las Tiras de Polipropileno en 0.05 % y 0.10 % respectivamente. Mientras que al incorporar las tiras en un 0.15 % disminuye su resistencia a la compresión en un 10.7 %. Concluyendo que el óptimo porcentaje de incorporación de Tiras de Polipropileno es 0.05 % respecto al peso de todos los materiales del diseño de mezclas.

Tabla 6
Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Flores & Pacompia (2015).

| Propiedades del concreto permeable | Criterios de diseño | | | | Unidad |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| | Sin tiras de polipropileno | Con 0.05% de tiras de polipropileno | Con 0.10% de tiras de polipropileno | Con 0.15% de tiras de polipropileno | |
| Asentamiento | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | cm |
| Peso Unitario | 1924.52 | 1931.67 | 1932.00 | 1949.57 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 17.84 | 17.54 | 17.53 | 16.78 | % |
| Resistencia a la compresión | 163.67 | 191.02 | 170.62 | 146.14 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.464 | 0.463 | 0.461 | 0.459 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia.

Quispe & Ticona (2017) realizaron una investigación titulada “*Influencia de la incorporación de fibras de polipropileno en concreto permeable $f'c = 210$ kg/cm²*”, tuvo

como objetivo general evaluar la influencia de la adición de fibras de polipropileno en las propiedades del concreto permeable $f'c=210$ kg/cm² fabricado con agregado grueso artificial y natural. Se estudió el efecto que tiene la adición de fibras de polipropileno en las propiedades del concreto permeable $f'c=210$ kg/cm² fabricado con agregado grueso artificial y natural. Los resultados muestran que el tamaño óptimo para la adición fibras de polipropileno en 10, 25, 40 y 55 % respecto al peso del cemento es el huso 7. La resistencia a la compresión máxima alcanzada con agregado grueso artificial es de 216.77 kg/cm² con adición del 40 % de fibras de polipropileno, por otro lado, con agregado grueso natural alcanzó una resistencia a la compresión 229.11 kg/cm² siendo este el más óptimo según la forma del agregado grueso. La adición de fibras de polipropileno en el diseño de mezcla del concreto permeable mejora la resistencia a la compresión, pero la permeabilidad presenta tendencias a la reducción.

Tabla 7
Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Quispe & Ticona (2017).

| Propiedades del concreto permeable | Sin FP | Con 10% FP | Con 25% FP | Con 40% FP | Con 55% de FP | Unidad |
|------------------------------------|---------|------------|------------|------------|---------------|--------------------|
| Peso Unitario | 1919.40 | 1943.33 | 1972.86 | 1999.64 | 1990.00 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 20.37 | 19.36 | 18.11 | 16.94 | 17.48 | % |
| Resistencia a la compresión | 170.30 | 187.57 | 195.28 | 216.70 | 202.72 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.397 | 0.354 | 0.330 | 0.285 | 0.309 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia. FP = Fibras de Polipropileno.

Perez (2017) en su investigación denominada “*Influencia de la granulometría del agregado grueso en las propiedades mecánicas e hidráulicas de un concreto permeable, Trujillo 2017*”, desarrolló tres diseños de mezcla basado en la norma ACI 522R-10 (Reporte en Concreto Permeable), y evaluó el comportamiento de tres gradaciones de agregado grueso (1/2”, 3/8” y N°4) en las propiedades del concreto permeable. También, comparó los valores de permeabilidad y resistencia a la compresión. Finalmente determinó la viabilidad

económica de los concretos permeables. El autor menciona, que los mejores resultados de resistencia a la compresión se obtuvieron con el agregado de gradación N°4 con un valor de 209.68 kg/cm², y respecto al ensayo de permeabilidad, el agregado de gradación 3/8” presentó un mayor coeficiente, siendo este de 0.22 cm/s. Cabe mencionar que a medida que el tamaño de agregado grueso disminuye, la resistencia a la compresión tiende a elevarse. Para el diseño de mezcla en las tres gradaciones (1/2”, 3/8” y N°4) se consideró los mismos criterios de diseño, relación a/c de 0.35, 8 % de finos, 15 % de vacíos, 25.20 % de volumen de pasta y un factor b/bo de 0.94, estos criterios de diseño se vieron reflejados satisfactoriamente en las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable. El autor menciona que las gradaciones mencionadas anteriormente pueden ser utilizadas como capa de rodadura en pavimentos especiales como pasajes peatonales, ciclovías, aceras y veredas. Ya que sobrepasa el módulo de rotura exigido para tales fines, el cual es de 28 kg/cm² aproximadamente. No existe variación significativa en los costos de materiales para elaborar los tres concretos permeables, debido a que se han usado los mismos parámetros de diseño y principalmente la misma cantidad de cemento, el cual es el material con mayor influencia en el costo.

Tabla 8
Resumen de resultados de las propiedades del concreto permeable según Perez (2017).

| Propiedades del concreto permeable | Criterios de diseño | | | Unidad |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| | a/c = 0.35 TMN = 1/2" CA = 15% | a/c = 0.35 TMN = 3/8" CA = 15% | a/c = 0.35 TMN = N°4 CA = 15% | |
| Asentamiento | 0.50 | 0.40 | 0.55 | cm |
| Peso Unitario | 2043.63 | 2052.84 | 2064.71 | kg/m ³ |
| Porcentaje de vacíos | 17.21 | 16.52 | 15.73 | % |
| Resistencia a la compresión | 180.08 | 190.30 | 209.68 | kg/cm ² |
| Permeabilidad | 0.207 | 0.222 | 0.147 | cm/s |

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Base teórica científica

2.2.1 Nopal (*Opuntia ficus-índica*)

La “*Opuntia ficus-índica*”, es la llamada nopal o tuna (Figura 1); pertenece al género *Opuntia*, de la familia de las cactáceas. Las funciones básicas de estas plantas se realizan por los tallos con forma de segmentos elípticos aplanados y sin espinas. En la actualidad, las plantas del género *Opuntia* son originarias de diversos ambientes, desde zonas áridas al nivel del mar hasta territorios de gran altura como los Andes del Perú (Goldstein, citado por Torres *et al.* 2010). En el Perú el nopal (*Opuntia ficus-índica*) es una planta de gran importancia en los sistemas agropastoriles de los andes y se encuentra distribuida en los valles interandinos, donde ha encontrado condiciones adecuadas para su establecimiento (Castro *et al.*, citado por Primo 2014).



Figura 1. Planta de nopal (*Opuntia ficus-índica*) (De León, 2012).

2.2.1.1 Características morfológicas

a. Paleta, penca o cladodios

El nopal (*Opuntia ficus-índica*) forma pencas denominadas cladodios de 30 a 60 cm de largo por 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de grosor. Sus ramas están formadas por pencas de color verde opaco con areolas que contienen espinas más o menos numerosas de color amarillas. Estas estructuras transforman la luz en energía química a través de la

fotosíntesis y están recubiertos por una cutícula del tipo lipídica, interrumpida por la presencia de estomas, los mismos que permanecen cerrados durante el día. La cutícula del cladodio por las altas temperaturas del verano evita la deshidratación de ésta. El cladodio alcanza una hidratación normal de 95 % de agua en peso (Amaya, 2009).



Figura 2. Paleta de nopal (*Opuntia ficus-índica*) (FAO & ICARDA, 2018).

b. El tallo

El nopal es un vegetal arborescente de 3 a 5 m de alto, su tronco es leñoso y mide de entre 20 a 50 cm de diámetro. En el Perú las variedades más usuales desarrollan portes de aproximadamente 1.5 a 2.0 m de altura. El tallo, a diferencia de otras especies de cactáceas, está conformado por un tronco y ramas aplanadas que posee cutícula gruesa de color verde de función fotosintética y de almacenamiento de agua en los tejidos (Amaya., 2009).

c. Flores

Son solitarias, localizadas en la parte superior de la penca, de 6 a 7 cm de longitud. Cada aérola produce por lo general una flor, aunque no en una misma época de floración, unas pueden brotar el primer año, otras el segundo y tercero. Las flores se abren a los 35 a 40 días de su brotación. Sus pétalos son de colores vivos: amarillo, anaranjado, rojo, rosa. Sépalos numerosos de color amarillo claro a rojizo o blanco (Amaya., 2009).

2.2.1.2 Composición química

Según estudios realizados por (Guzmán & Chávez, 2007) se observó que los cladodios presentan alto contenido de agua, lo que es característico de estas plantas; con relación al contenido de grasa no se ve mayor diferencia; en cuanto al contenido de fibra se observa una diferencia puesto que conforme va madurando el cladodio va aumentando su contenido en fibra; en la parte interna se va formando una red maciza de celulosa; con respecto al porcentaje de cenizas aumenta con la edad; por consiguiente, eleva la cantidad de minerales. En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de dicha investigación (Guzmán & Chávez, 2007).

Tabla 9
Composición de la paleta de nopal (*Opuntia ficus-índica*).

| Componente | Cladodio | |
|------------|---------------------------|---------------------------|
| | De 1 mes de edad (aprox.) | De 1 año de edad (aprox.) |
| Humedad % | 92.57 | 94.33 |
| Grasa % | 0.17 | 0.11 |
| Fibra % | 0.30 | 1.06 |
| Cenizas % | 0.08 | 1.60 |
| Ca % | 0.042 | 0.339 |
| Na % | 0.0018 | 0.0183 |
| K % | 0.00098 | 0.145 |
| Fe % | 0.0792 | 0.322 |

Fuente: Guzmán & Chávez (2007).

2.2.1.3 Mucílago de nopal

El mucílago es una sustancia viscosa (Figura 3) que contienen las pencas de nopal. Entre las propiedades más importantes del nopal, está el de conservar el agua incluso bajo condiciones climáticas desfavorables, debido a la presencia de mucílagos que al formar redes moleculares tridimensionales son capaces de retener grandes cantidades de agua (Cárdenas *et al.*, citado por Julián 2008). Por debajo de la cutícula que cubre una penca u hoja de nopal, se encuentra una sustancia en forma de pulpa (gel) (Chandra *et al.*, citado por Julián 2008).

Este componente está presente tanto en los cladodios como en la piel y pulpa de la fruta, aunque en muy diversas proporciones. Investigaciones realizadas por (Saenz & Sepulveda, 1993) indican que el rendimiento en ambos casos es bajo: 0.5 % en la cáscara y 1.2 % en los cladodios (Silva, 2017).



Figura 3. Mucílago de nopal (Loyo, 2018).

2.2.1.4 Lugar de producción del nopal

Los cladodios de nopal que se utilizaron para la extracción del mucílago fueron recolectados en el distrito de Santiago de Tuna, perteneciente a la provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima, geográficamente está ubicada a una altitud de 2921 m.s.n.m.

a. Recursos naturales

Clima: El distrito de Santiago de Tuna presenta un clima semiárido templado, con dos estaciones bien diferenciadas. Una estación lluviosa, que va desde el mes de enero hasta el mes de abril (4 meses) y, otra estación seca desde el mes de mayo hasta el mes de diciembre (8 meses). En las dos estaciones se pueden contar con días soleados alcanzando una temperatura media de 13°C a 25°C, por las noches la temperatura desciende drásticamente, alcanzando valores de 4°C. la temperatura promedio es 14°C.

Suelos: Los suelos en el ámbito del distrito son extensos y variables; tales como quebradas, faldas, cerros elevados, grandes pendientes y ciertas extensiones planas y lomas,

muy favorables para el desarrollo de la agricultura por la fertilidad de sus tierras, en especial la fruticultura (200 Ha. aproximadamente), también tienen pastos naturales que son utilizados para la cría de ganado en pequeña escala (lanar, vacuno, caprino).

Flora: La flora silvestre en el distrito es rica y variada, entre las variedades de plantas naturales tenemos: mito, taya, lloque, carlunco, molle, caña, llaulle, maguey, huariruma alfalfilla (trébol), entre otros. Las especies están distribuidas de acuerdo a los pisos ecológicos, teniendo muchos de ellos propiedades medicinales, incluyendo la manzanilla, cedrón, hierba buena, romero, ruda, toronjil, orégano, huacatay, productos como el rocoto y muchas otras. Por efecto de las fuertes sequías, el sobre pastoreo, la tala y la quema, la cobertura vegetal está disminuyendo significativamente, incrementando la erosión y la desertificación de los suelos.

Fauna: El distrito de Santiago de Tuna tiene una fauna silvestre cuantitativamente rica. Así tenemos: zorro, cóndor, venado, vizcachas, zorzal, perdiz, paloma “tórtolas”, ruiseñor, chivillo, zorzales, el halconcillo, gato montés, muca, ñaño, entre otros. Entre los reptiles: tenemos a los sapos, ranas, lagartijas, serpientes y culebras. Los insectos existentes son, los grillos, lombriz, gusanos, lansarín, escarabajos, mariposas, moscas, zancudos, luciérnaga, cancabala, araña. Cada una de las especies cumple un rol importante en la cadena trófica del ecosistema y en los sistemas de producción. Como consecuencia de la disminución de la cobertura vegetal, por los cambios climáticos y por las manos del hombre, la cobertura vegetal viene disminuyendo en forma acelerada y amenaza con extinguirse. Entre las especies que se están extinguiendo tenemos al venado y las vizcachas.

b. Producción

Los lugares de producción frutícola producen ciruelos, melocotones, paltas y chirimoyas de muy buena calidad, que abastecen el mercado limeño mayorista de frutas

Nº 2. Debido a la zona árida del distrito, los agricultores en gran porcentaje, cultivan (desde 1975 aprox.) la fruta tuna morada en reemplazo del tradicional melocotón, siendo actualmente la fruta de mayor cultivo.

Según el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAM) (2011), mencionan que los productores de tuna y cochinilla de la provincia de Huarochirí aumentan su producción y calidad en un 100 %, gracias a la asistencia técnica de los especialistas del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y del Ministerio de Agricultura (MINAG). Así mismo, el Ing. Juan Huayhua, especialista del INIA informó que la Asociación de Productores de Tuna y Cochinilla (APROTYC) cuenta con más del 80 % de tierras aptas para el cultivo de la tuna en Huarochirí (2280 ha), aunque solo se aproveche el 65 %. También mencionó que la producción de tuna en el valle del río chilca (Huarochirí) alcanza al año más de 8 toneladas por hectárea, en más de 1200 hectáreas.

2.2.2 Concreto permeable

El concreto permeable también es conocido como concreto poroso, concreto sin agregados finos, concreto discontinuo y concreto de porosidad incrementada (Cabello *et al.*, 2015). Se define, como un concreto con asentamiento cero (Figura 4), con elevado grado de porosidad, y con una alta relación de vacíos; compuesto por cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino y agua (Plasencia & Sarabia, 2016; Aire *sf.*). La mezcla de estos componentes producirá un material endurecido con poros interconectados de 2 a 8 mm de tamaño, lo cual permite el paso del agua. El porcentaje de vacíos varía de 15 % a 35 %, y se pueden lograr resistencias a la compresión entre 2.8 a 28 MPa. Su velocidad de drenaje (Figura 5) depende del tamaño del agregado y de la densidad de la mezcla, pero por lo general varía entre 81 a 730 L/min/m² (ACI 522R, 2010).

El concreto permeable se ubica dentro del grupo de los materiales ecológicos, ya que permite que el agua filtre al subsuelo logrando así la restauración de los mantos acuíferos. El material es altamente duradero, no degradable e increíblemente resistente, conservando sus características de permeabilidad (Barahona *et al.*, 2013) y es empleado mayormente en áreas de aparcamiento, áreas con bajo tráfico, caminos peatonales e invernaderos. Cabe mencionar, que su aplicación es muy importante en la construcción sostenible (National Ready Mixed Concrete Association, 2008).

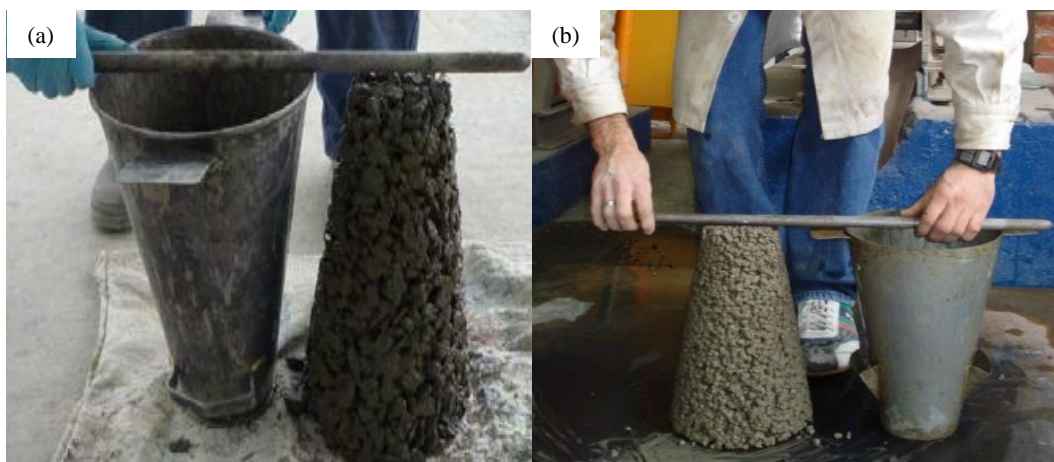


Figura 4. Mezcla de concreto permeable con revenimiento o slump = 0: (a) relación agua/cemento 0.30 y (b) con agregado de 3/8" y contenido de vacíos 15% (Ortega, 2015 y Pérez, 2009).



Figura 5. Muestra de concreto permeable (Aoki, 2009).

2.2.3 Componentes del concreto permeable

El concreto permeable está compuesto esencialmente de cemento Portland, agregado grueso, agua, aditivos, y en ocasiones pequeñas cantidades de finos. Esta mezcla forma una aglomeración de agregados gruesos envueltos por una delgada capa de pasta de cemento endurecida en sus puntos de contacto. Esta configuración permite que entre el agregado grueso se produzca grandes huecos, permitiendo la filtración del agua en una cantidad mucho más elevada que en el concreto convencional (Perez, 2017). A continuación se detalla cada función que cumplen los componentes del concreto permeable:

2.2.3.1 Cemento Portland

Según la Norma Técnica Peruana NTP 334.009 (1997), es un material aglomerante, compuesto a base de caliza, esquistos y arcillas trituradas, y expuestas a elevadas temperaturas para constituir un material conocido como clinker. Este está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferrito aluminato de cal (Barahona *et al.*, 2013). Seguidamente el clinker se tritura y se incorpora un material regulador de fraguado, como lo es el yeso dihidrato para formar finalmente el cemento (González, 2015). Por otro lado, según Torre (2004), el cemento Portland es un polvo muy fino de color verdoso (Figura 6).

La cantidad de agregado en relación con la cantidad de cemento es otra característica importante. Cuanta más pasta de material cementante esté disponible para compactación, mayor será la resistencia a la compresión. Por esta razón, se obstruirá los poros y perjudicará la función del concreto permeable (Chopra *et al.*, 2007).



Figura 6. Cemento (González, 2016).

2.2.3.2 Agregados

De acuerdo con González (2015) los agregados son calificados como materiales pétreos inertes resultado de la degradación natural o artificial de rocas que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas o de otros materiales suficientemente duros que permiten obtener partículas de forma y tamaño estables, estas pueden ser de origen volcánico como las ígneas, o sedimentarias; como la caliza.

a. Tipos de agregados

a.1 Agregado fino

Agregado que pasa por el tamiz de 3/8 pulg (9.5 mm) y casi pasa por completo por el tamiz N°4 (de 4.75 mm). y es retenido de modo predominante por el tamiz N°200 (de 75 μ m); o bien, aquella porción de un agregado que pasa por el tamiz N°4 (de 4.75 mm) y es retenida de modo predominante por el N°200 (de 75 μ m). El agregado fino utilizado en nuestro medio se denomina “arena”, este resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración de esta (Quiroz & Salamanca, 2006).

En general, los agregados finos no conviene ser usados en mezclas de concreto permeable, ya que sus partículas tienden a complicar la capacidad de enlace del sistema de poros (Pérez, 2009; González, 2015 y Barahona *et al.*, 2013).

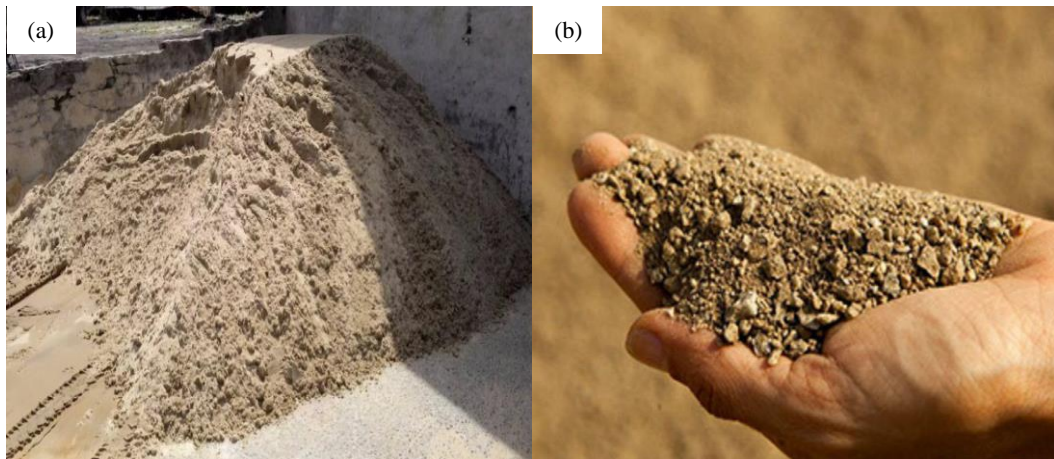


Figura 7. Agregado fino: (a) arena fina y (b) arena gruesa (Contruex, 2019).

a.2 Agregado grueso

Según la Norma Técnica Peruana NTP 400.037 es el agregado retenido en el tamiz normalizado 4.75 mm (N°4) procedente de la desintegración natural o artificial de la roca. Aoki (2009) menciona que la grava redondeada y la piedra triturada angular o la piedra caliza triturada se utilizan como áridos gruesos para el hormigón permeable, en tamaño único o tamaño de gradación estrecha. Los tamaños medios del agregado grueso son de 3.75 mm a 9.5 mm y de 9.5 mm a 12.5 mm. Al igual que en el caso del material fino es recomendable que el agregado grueso en conjunto posea continuidad de tamaños en su composición granulométrica (Barahona *et al.*, 2013).

Según Arauco (2010) el agregado grueso deberá cumplir con los requerimientos que se presentan a continuación: (1) deberá estar conformado por partículas limpias, de perfil preferentemente angular, duras, compactas, resistentes, y de textura preferentemente rugosa; (2) las partículas deberán ser químicamente inalterables y deberán estar libres de escamas, tierra, polvo, limo, humus, incrustaciones superficiales, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas (Figura 8).

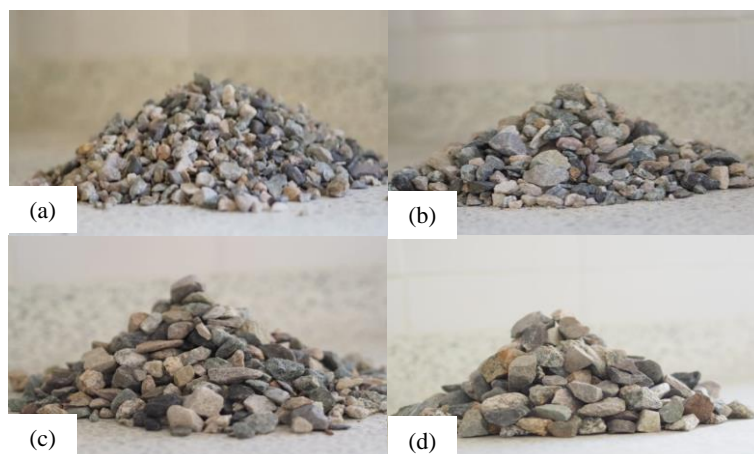


Figura 8. Agregado grueso: (a) gradación 3/8"; (b) gradación 1/2"; (c) gradación 3/4" y (d) gradación 1" (AVENSA, 2016).

b. Ensayos de laboratorio para los agregados

b.1 Análisis granulométrico y módulo de finura

Según la Norma Técnica Peruana NTP 400.012 (2001), define al análisis granulométrico como la representación de la distribución de los tamaños que posee el agregado, y al módulo de finura como el factor que se obtiene sumando los porcentajes acumulados de material de una muestra de agregado en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividido por 100 (NTP 400.011, 2008). El módulo de finura recomendable estará entre 2.3 y 3.1 (NTP 400.037, 2001).

$$MF = \frac{\sum \% \text{Acum.ret.}(11/2", 3/4", 3/8", N^{\circ}4, N^{\circ}8, N^{\circ}16, N^{\circ}30, N^{\circ}50, N^{\circ}100)}{100} \dots\dots\dots (1)$$

Tabla 10
Requisitos granulométricos del agregado fino.

| | Tamiz | Porcentaje que pasa |
|---------|----------|---------------------|
| 9.5 mm | 3/8 pulg | 100 |
| 4.75 mm | N°4 | 95 a 100 |
| 2.36 mm | N°8 | 80 a 100 |
| 1.18 mm | N°16 | 50 a 85 |
| 600 μm | N°30 | 25 a 60 |
| 300 μm | N°50 | 05 a 30 |
| 150 μm | N°100 | 0 a 10 |

Fuente: NTP 400.037 (2002).

Tabla 11
Requisitos granulométricos del agregado grueso.

| Huso | Tamaño máximo nominal | Porcentaje que pasa por los tamices normalizados | | | | | | | | | | | | | |
|------|--|--|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | 100 mm 4 pulg | 90 mm 3 ½ pulg | 75 mm 3 pulg | 63 mm 2 ½ pulg | 50 mm 2 pulg | 37.5 mm 1 ½ pulg | 25.0 mm 1 pulg | 19.0 mm ¾ pulg | 12.5 mm ½ pulg | 9.5 mm 3/8 pulg | 4.75 mm N°4 | 2.36 mm N°8 | 1.18 mm N°16 | 300 µm N°50 |
| 1 | 90 mm a 37.5 mm 3 ½ pulg a 1 ½ pulg | 100 | 90 a 100 | - | 25 a 60 | - | 0 a 15 | - | 0 a 15 | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 63 mm a 37.5 mm 3 ½ pulg a 1 ½ pulg | - | - | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | - | 0 a 5 | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 50 mm a 25.0 mm 2 pulg a 1 pulg | - | - | - | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | - | 0 a 15 | - | - | - | - | - |
| 357 | 50 mm a 4.75 mm 2 pulg a N°4 | - | - | - | 100 | 95 a 100 | - | 35 a 70 | - | 10 a 30 | - | 0 a 5 | - | - | - |
| 4 | 37.5 mm a 19.0 mm 1 ½ pulg a ¾ pulg | - | - | - | - | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 5 | - | 0 a 5 | - | - | - | - |
| 467 | 37.5 mm a 4.75 mm 1 ½ pulg a N°4 | - | - | - | - | 100 | 95 a 100 | - | 35 a 70 | - | 10 a 30 | 0 a 5 | - | - | - |
| 5 | 25.0 mm a 12.5 mm 1 pulg a ½ pulg | - | - | - | - | - | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 10 | 0 a 5 | - | - | - | - |
| 56 | 25.0 mm a 9.5 mm 1 pulg a 3/8 pulg | - | - | - | - | - | 100 | 90 a 100 | 40 a 85 | 10 a 40 | 0 a 15 | 0 a 5 | - | - | - |
| 57 | 25.0 mm a 4.75 mm 1 pulg a N°4 | - | - | - | - | - | 100 | 95 a 100 | - | 25 a 60 | - | 0 a 10 | 0 a 5 | - | - |
| 6 | 19.0 mm a 9.5 mm ¾ pulg a 3/8 pulg | - | - | - | - | - | - | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 15 | 0 a 5 | - | - | - |
| 67 | 19.0 mm a 4.75 mm ¾ pulg a N°4 | - | - | - | - | - | - | 100 | 90 a 100 | - | 20 a 25 | 0 a 10 | 0 a 5 | - | - |
| 7 | 12.5 mm a 4.75 mm ½ pulg a N°4 | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 90 a 100 | 40 a 70 | 0 a 15 | 0 a 5 | - | - |
| 8 | 9.5 mm a 2.36 mm 3/8 pulg a N°8 | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 85 a 100 | 10 a 30 | 0 a 10 | 0 a 5 | - |
| 89 | 9.5 mm a 1.18 mm 3/8 pulg a N°16 | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 90 a 100 | 25 a 55 | 5 a 30 | 0 a 10 | 0 a 5 |
| 9 | 4.75 mm a 1.18 mm N°4 a N°16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 85 a 100 | 10 a 40 | 0 a 10 | 0 a 5 |

Fuente: NTP 400.037 (2002).

De acuerdo a las especificaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 400.012 (2001), para el agregado fino, previamente secado, se requiere una cantidad mínima de 300 g de muestra y con respecto a la cantidad de muestra del agregado grueso para el ensayo, es necesario tener en cuenta lo indicado en la Tabla 12.

Tabla 12
Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso.

| TMN mm (pulg) | Cantidad de la muestra de ensayo Mínimo kg (lb) |
|------------------|--|
| 9.5 (3/8) | 1 (2) |
| 12.5 (1/2) | 2 (4) |
| 19.0 (3/4) | 5 (11) |
| 25.0 (1) | 10 (22) |
| 37.5 (1 1/2) | 15 (33) |
| 50 (2) | 20 (44) |
| 63 (2 1/2) | 35 (77) |
| 75 (3) | 60 (130) |
| 90 (3 1/2) | 100 (220) |
| 100 (4) | 150 (330) |
| 125 (5) | 300 (660) |

Fuente: NTP 400.012, (2001).

b.2 Peso específico

Según la Norma Técnica Peruana NTP 400.021 y NTP 400.022 (2013), es la relación a una temperatura constante, de la masa (o peso en el aire) de un volumen unitario de material, a la masa del mismo volumen de agua a temperaturas indicadas. Por otro lado, el peso específico también es un indicador de calidad, ya que los que presentan valores bajos indican que es un material poroso, absorbente y débil, mientras que los valores altos indican materiales de correcto comportamiento, esto no siempre es seguro, por ello, es recomendable que la calidad se verifique por otros ensayos (Arauco, 2010). De acuerdo al Manual de Ensayo de Materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC E 205 (2016), se debe tener en cuenta las siguientes definiciones:

- a. **Peso específico de masa (Pe_m):** Es la relación entre el peso de masa del agregado y el volumen total (incluyendo los poros permeables e impermeables naturales del material).
- b. **Peso específico de masa saturada superficialmente seca (Pe_{sss}):** Es la relación entre el peso agregado saturado superficialmente seco y el volumen del mismo.
- c. **Peso específico aparente (Pe_a):** es la relación entre el peso de la masa del agregado y el volumen impermeable de masa del mismo.

Para el agregado fino:

$$Pe_m = \frac{D}{(E - C)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Pe_{sss} = \frac{500}{(E - C)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Pe_a = \frac{D}{((E - C) - (500 - D))} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

Pe_m = Peso específico de masa (g/cm^3)

Pe_{sss} = Peso específico de masa saturada superficialmente seca (g/cm^3)

Pe_a = Peso específico aparente (g/cm^3)

A = Pasa de la muestra secada al horno + masa de fiola + masa del agua (g)

B = Peso de la muestra sss + peso del agua

E = Volumen de fiola (cm^3)

C = Pesa del agua (A - B) (g)

D = Pesa de la muestra secada al horno (g)

Para el agregado grueso:

$$Pe_m = \frac{A}{(B - C)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Pe_{sss} = \frac{B}{(B - C)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Pe_a = \frac{A}{(A - C)} \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

Pe_m = Peso específico de masa

Pe_{sss} = Peso específico de masa saturada superficialmente seca (g/cm^3)

Pe_a = Peso específico aparente (g/cm^3)

A = Peso de la muestra secada en el aire (g)

B = Peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (g)

C = Peso en el agua de la muestra saturada (g)

b.3 Absorción

La Norma Técnica Peruana NTP 400.021 y NTP 400.022 (2013), lo definen como el incremento de la masa del agregado debido al agua que penetra en los poros de las partículas, durante un período de tiempo de 24 horas, pero sin incluir el agua que se adhiere a la superficie exterior de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca.

Para el agregado fino:

$$A_b (\%) = \left[\frac{500 - D}{D} \right] \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

A_b = Absorción (%)

D = Peso de la muestra secada al horno (g)

Para el agregado grueso:

$$A_b (\%) = \frac{(B - A)}{A} \times 100 \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

A_b = Absorción (%)

A = Peso de la muestra secada al aire (g)

B = Peso de la muestra saturada superficialmente secada al aire (g)

b.4 Peso unitario suelto y compactado

El peso unitario es el peso del material seco necesario para llenar cierto recipiente de volumen unitario, está en función directa del tamaño, forma y distribución de las partículas y el grado de compactación (suelto o compactado). Dentro del peso unitario existen dos tipos: (a) peso unitario suelto seco: el agregado es llenado en el recipiente en una sola capa y sin ninguna presión, (b) peso unitario compactado: el agregado es llenado en tres capas, las cuales son compactadas con 25 golpes cada capa por una varilla estandarizada (Lezama, citado por Primo 2014). El peso unitario suelto o compactado se calcula de la siguiente manera (NTP 400.017, 1999):

$$M = \frac{G - T}{V} \dots\dots\dots (10)$$

Donde:

M = Peso unitario del agregado (kg/m³)

G = Peso del recipiente de medida más el agregado (kg)

T = Peso del recipiente de medida (kg)

V = Volumen del recipiente de medida (m³)

b.5 Contenido de humedad

Puchuri (2010) lo define como la cantidad de agua que el agregado contiene en su estado original, se debe tener en cuenta al momento de realizar los diseños de mezclas, debido a que esta condición nos obligará a ejecutar la corrección del agua de mezcla. El contenido de humedad se calcula mediante la siguiente ecuación (NTP 339.185, 2013):

$$P = \frac{100(W - D)}{D} \dots\dots\dots (11)$$

Donde:

P = Contenido total de humedad de la muestra (%)

W = Masa de la muestra húmeda natural (g)

D = Masa de la muestra seca (g)

2.2.3.3 Agua

El agua es un elemento importante en la elaboración del concreto, ya que forma parte de la estructura del mismo cuando se produce el fraguado del cemento y/o en su curado (Arauco, 2010 y Barahona *et al.*, 2013). Esta íntima relación se debe a que cuando el agua entra en contacto con el cemento, esta reacciona químicamente con el material cementante para lograr la formación del gel. Además, el conjunto de la masa adquiere las propiedades que en estado fresco faciliten un correcto manejo y colocación; y en estado endurecido la conviertan en un producto con las propiedades y características esperadas. El agua empleada en la mezcla del concreto desempeña tres funciones importantes: (1) sirve para hidratar al cemento; (2) se desempeña como lubricante para favorecer en la trabajabilidad de la masa en conjunto y (3) procura que en la pasta la estructura de vacíos sea necesaria.

Según Gonzáles (2015) la cantidad de agua adecuada debe ser la indicada para dar brillo a la mezcla de concreto permeable, que no permita que la pasta sea muy fluida y tampoco la rápida dispersión entre los elementos. Una porción de mezcla de concreto permeable formando una bola cuando contenga una cantidad de agua adecuada no deberá derrumbarse, ni perder su estructura de vacíos mientras la pasta fluya entre los espacios que conectan los agregados. La Figura 9 muestra diferentes mezclas de concreto permeable con distintas cantidades de agua formando una bola.

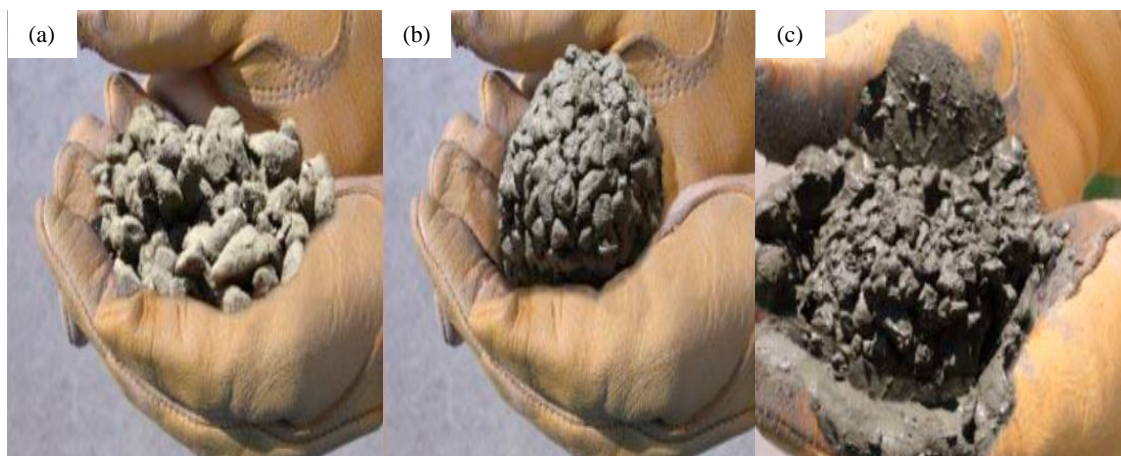


Figura 9. Muestras de concreto permeable con diferentes contenidos de agua, formando una bola: (a) muy poca agua, (b) cantidad adecuada de agua y (c) demasiada agua (Tennis *et al.*, 2004).

El agua de mezcla para el concreto no debe contener sustancias orgánicas, no debe estar contaminada, ni debe ser salina. Por lo general, se considera aceptable agua potable con entre 6 y 8 pH, también se puede usar agua que no sea potable, mientras esta no presente sustancias orgánicas, ni otro tipo de sustancias que puedan afectar el desempeño del concreto (Neville, citado por Cardona 2017 y Torre 2004). La Norma Técnica Peruana NTP 339.088 (2006) considera que las aguas aptas para la preparación y curado del concreto, son aquellas cuyas propiedades y contenidos de sustancias disueltas están comprendidos dentro de los siguientes límites (Tabla 13):

Tabla 13
Límites permisibles para el agua de mezcla y curado.

| Descripción | Límite permisible | | |
|---|-------------------|-----|--------|
| Sólidos en suspensión (residuo insoluble) | 5,000 | ppm | Máximo |
| Materia Orgánica | 3 | ppm | Máximo |
| Alcalinidad (NaHCO ₃) | 1,000 | ppm | Máximo |
| Sulfatos (ión SO ₄) | 600 | ppm | Máximo |
| Cloruros (ión Cl ⁻) | 1,000 | ppm | Máximo |
| pH | 5 a 8 | | Máximo |

Fuente: NTP 339.088 (2006).

2.2.3.4 Aditivos

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones (2017), define al aditivo como un material diferente del agua, de los agregados o del cemento Portland, utilizado como

componente del concreto, y que se añade a este antes o durante su mezclado a fin de modificar sus propiedades. Estos se agregan a la mezcla, con el fin de: (a) variar algunas de sus propiedades para que se adecuen a su necesidad; (b) ayudar en su colocación y (c) reducir los costos (Pacheco, 2017). Por la influencia que tiene en el concreto, los aditivos se pueden clasificar de acuerdo a los requerimientos de la Norma Técnica Peruana NTP 334.001, como se muestra en Tabla 14.

Tabla 14
Clasificación de los aditivos.

| Aditivo | Descripción |
|---|---|
| Reductor de agua | que disminuye la cantidad de agua de mezcla necesaria para producir concreto de una consistencia determinada. |
| Retardante de fraguado | que prolonga el tiempo de fraguado del concreto. |
| Acelerante de fraguado | que acorta el tiempo de fraguado del concreto y desarrolla una rápida resistencia inicial del concreto. |
| Reductor de agua y retardador | que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada y retarda el fraguado |
| Reductor de agua y acelerante | que reduce la cantidad de agua de mezcla determinada para producir un concreto de una consistencia establecida y acelera el fraguado y el desarrollo de su resistencia. |
| Reductor de agua de alto rango | que reduce en 12% o más, la cantidad de agua de mezcla para producir un concreto de una consistencia establecida. |
| Reductor de agua de alto rango y retardante | que reduce en 12% o más, la cantidad de agua de mezcla para producir un concreto de una consistencia establecida y retrasa el fraguado. |

Fuente: NTP 334.001 (2001).

2.2.4 Propiedades del concreto permeable en estado fresco

De acuerdo con López (2010) el estado fresco del concreto permeable está comprendido desde el momento de la elaboración de la mezcla de concreto hasta llegar al proceso de endurecimiento inicial, conservando sus características físicas, permitiendo ejecutar las operaciones de mezclado, transporte, colocación, compactación y acabado.

2.2.4.1 Asentamiento

Es la propiedad que permite observar la facilidad que tiene un concreto en estado fresco para rellenar todos los huecos del molde troncocónico (Figura 10) bajo una débil presión. El método más usado para determinar esta propiedad es el ensayo de revenimiento, asentamiento (Figura 11) o slump del concreto. El comportamiento del concreto en la prueba indica su “consistencia” (Tabla 15) o sea, su capacidad para acomodarse al encofrado o molde con facilidad, manteniéndose homogéneo con una cantidad mínima de vacíos. La consistencia se modifica principalmente por variaciones de la cantidad de agua empleada en la mezcla (Abanto, 2014). Para el concreto permeable este tipo de ensayo es considerado para fines de control de calidad como en el concreto convencional, solo se considera como un valor referencial, debido a que la mezcla es muy rígida y la medición del asentamiento en la mayoría de los casos no es aplicable. El Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) recomienda asentamientos para distintos tipos de concreto, es así que para un concreto permeable el máximo revenimiento es de 20 mm y el mínimo revenimiento es de 0 mm (Figura 12-a) (Perez, 2017). En cambio, para el concreto convencional el revenimiento es mayor, debido a la alta presencia de finos (Figura 12-b).

Tabla 15
Clases de mezclas según su asentamiento.

| Consistencia | Slump | Trabajabilidad | Método de compactación |
|--------------|---------|-----------------|---------------------------|
| Seca | 0" a 2" | poco trabajable | Vibración normal |
| Plástica | 3" a 4" | trabajable | Vibración ligera chuseado |
| Fluida | > 5" | muy trabajable | Chuseado |

Fuente: Abanto (2014).

La consistencia de acuerdo a su asentamiento es:

Consistencia seca, que corresponde a un asentamiento de 0" a 2", mezcla que tiene el grado de humedad necesario como para que al apretarlos con la mano quede adherida a esta

la lechada de cemento. Tienen solo el agua necesaria para que su superficie, después de vibrado quede blanda y unida.

Consistencia plástica, que corresponde a un asentamiento entre 3” a 4”. Son los que contienen agua necesaria para dar a la masa una consistencia pastosa.

Consistencia fluida, que corresponde a un asentamiento de más de 5”. Son aquellas que tienen tanta agua que fluyen como una pasta blanda.

También es necesario mencionar que la trabajabilidad es la propiedad que permite un manejo fácil de mezclado, colocación y compactación de manera homogénea, cuyos elementos (agua y partículas finas) no deben separarse durante el transporte y el manejo del mismo. Existen algunos componentes que influyen en la trabajabilidad del concreto, entre ellos se tiene el método y la duración del transporte, la cantidad y características de los materiales cementantes, el tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos, el aire incluido, la cantidad de agua, la temperatura del concreto, del aire y los aditivos (Kosmatka *et al.*, 2004).

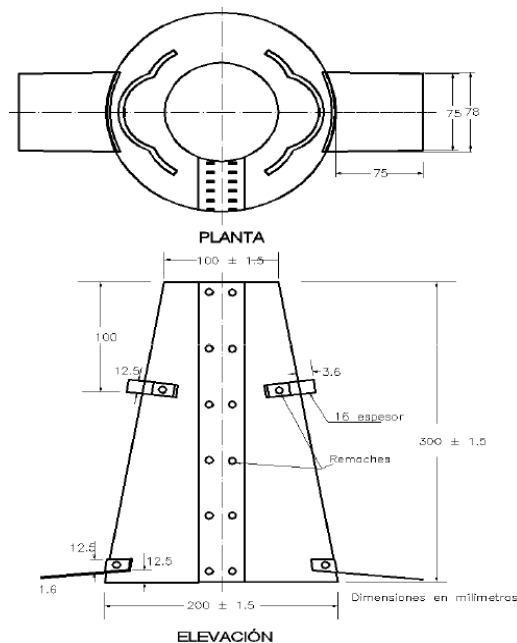


Figura 10. Molde para determinar el asentamiento (MTC E 705, 2016).

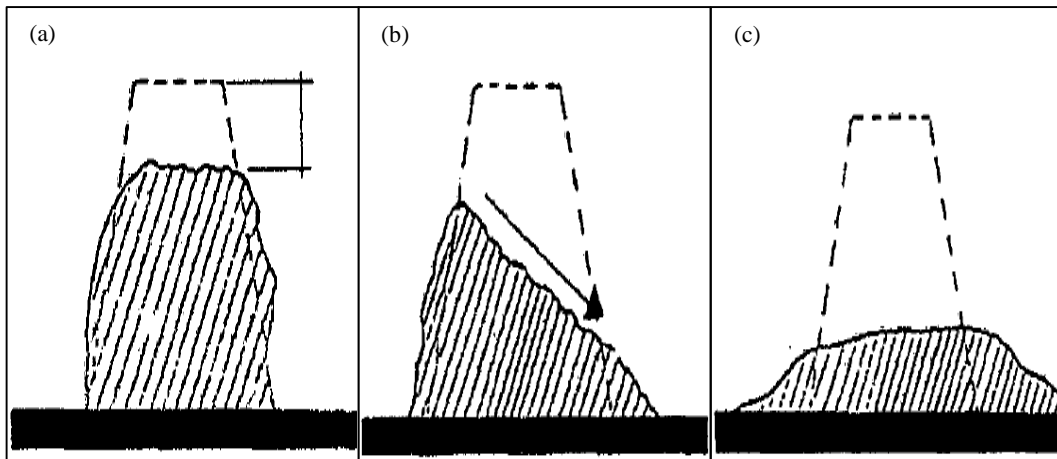


Figura 11. Tipos de asentamientos: (a) Asentamiento normal o verdadero: es propio de una mezcla rica y con una adecuada cantidad de agua, (b) Asentamiento de corte: se produce por un exceso de agua y (c) Asentamiento de derrumbamiento: se produce cuando el concreto tiene mucha agua y la arena es pobre (Arauco, 2010).

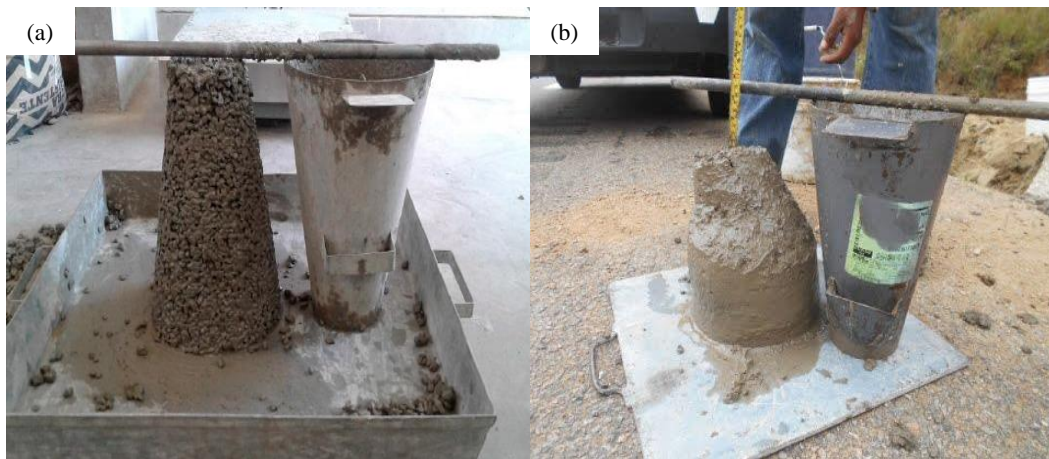


Figura 12. Revenimiento: (a) concreto permeable y (b) concreto convencional.

2.2.4.2 Densidad o peso unitario

“Es la masa del material necesario para llenar un volumen unitario” (Montejo, citado por Nuñez 2015). Por otro lado, la Norma Técnica Peruana NTP 339.046 (2008), define al peso unitario como la masa por unidad de volumen del concreto en estado fresco.

El peso unitario cambia dependiendo de la cantidad y densidad relativa del agregado, también de la cantidad del aire atrapado o incorporado, y de los contenidos de agua y material cementante, estos a su vez se ven afectados por el tamaño máximo (TM) del agregado. Debido a sus altos porcentajes de vacíos, el concreto permeable es considerado un concreto liviano. Sus valores varían entre 1600 y 2000 kg/m³ (López, 2010). En el Gráfico 1, se puede

apreciar la diferencia que existe entre un concreto convencional y un concreto permeable, respecto a su peso unitario.

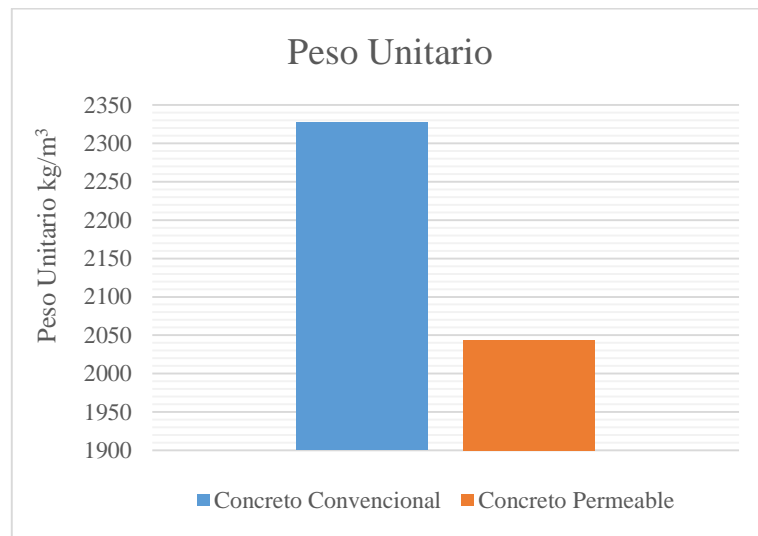


Gráfico 1. Peso unitario del concreto convencional y concreto permeable (Puchuri, 2010 y Perez, 2017).

Para determinar el peso unitario del concreto se usará la siguiente ecuación (NTP 339.046, 2008):

$$D = \frac{(M_c - M_m)}{V_m} \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

D = Densidad (peso unitario) del concreto (kg/m³)

M_c = Masa del recipiente lleno de concreto (kg)

M_m = Masa del recipiente (kg)

V_m = Volumen del recipiente (m³)

2.2.4.3 Porcentaje de vacíos

La mezcla de concreto cuenta con espacios vacíos en su interior, esto es debido a la forma de las partículas de los agregados. Estos, aunque posean diferente granulometría, no van a encajar de manera perfecta, dejando un porcentaje de vacíos, el cual en el concreto permeable será mucho mayor (Figura 13) (Muñoz & Ramón, citado por Nuñez 2015).

El porcentaje de vacíos va a influenciar directamente la permeabilidad del material y especialmente la absorción acústica que este material tendrá. Un porcentaje de vacíos bajo, puede incrementar las posibilidades de obstruir los poros de la mezcla, problema que puede ser evitado utilizando agregados de tamaños grandes (ACI 522R, citado por Nuñez 2015). Aoki (2009) recomienda que los valores de porcentajes de vacíos en los que se maneja el hormigón permeable varíen entre 15 y 30 %. Por lo general, para obtener resistencias mayores a 140 kg/cm² el porcentaje de vacíos empleado en el concreto permeable está en el rango de 15 % a 25 % (Perez, 2017).

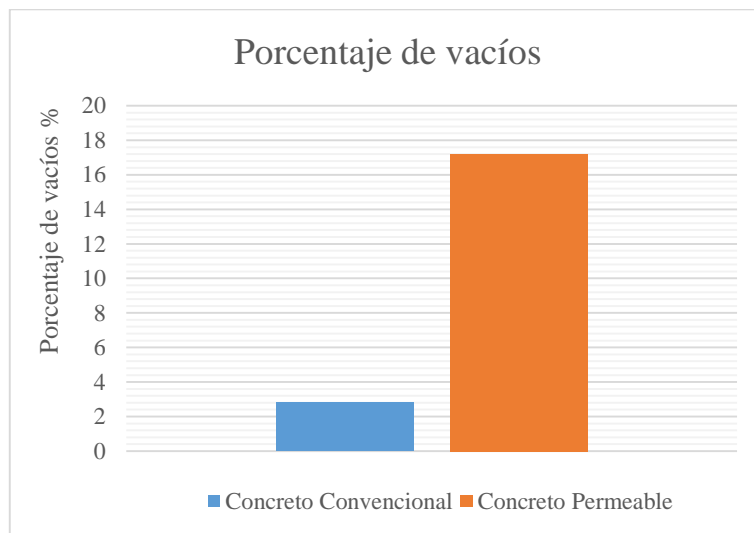


Gráfico 2. Porcentaje de vacíos el concreto convencional y concreto permeable (Puchuri, 2010 y Perez, 2017).

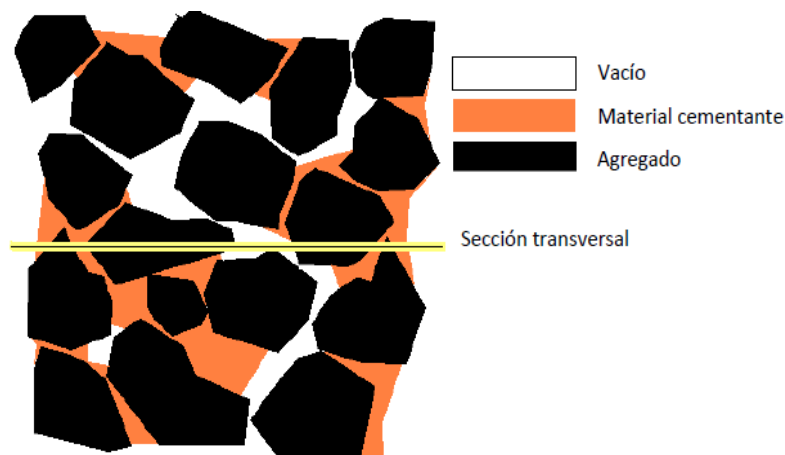


Figura 13. Estructura interna de un concreto permeable (Schaefer *et al.*, citado por Pérez 2009).

Según Arauco (2010), el ensayo de contenido de aire se ejecuta para determinar la cantidad de vacíos que posee el concreto internamente. Esta característica es especialmente importante en los climas extremos (bajas temperaturas), pues se desarrollan grandes presiones cuando se forman los cristales de hielo en los poros del concreto. Sin un contenido de aire apropiado en la mezcla, el concreto que está expuesto a ciclos de congelación y deshielo, se escamará y/o astillará, dando como resultado una falla en su durabilidad. El contenido de vacíos se calcula de la siguiente manera (NTP 339.046, 2008):

$$A = \frac{(Y - D)}{Y} \times 100 \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

A = Contenido de aire en el concreto (%)

Y = Rendimiento (m³)

D = Densidad (peso unitario) del concreto (kg/m³)

El rendimiento del concreto es definido como la cantidad de mezcla en estado fresco que se obtiene a partir de una dosificación conocida de insumos, y se expresa de la siguiente manera (NTP 339.046, 2008):

$$Y = \frac{M}{V_s} \dots\dots\dots (14)$$

Donde:

Y = Rendimiento (m³)

M = Masa total de los materiales en la tanda (kg)

V_s = Volumen absoluto total de los materiales (m³)

2.2.5 Propiedades del concreto permeable en estado endurecido

2.2.5.1 Resistencia a la compresión (f'c)

La máxima resistencia medida de una muestra de concreto o mortero a carga axial se le conoce como resistencia a la compresión (López, 2010). La resistencia que pueda llegar a

alcanzar el concreto va a depender de la cantidad de agua que se utilice en su elaboración. Una cantidad elevada de agua va a ocasionar que el cemento se escurra ocasionando una mala o insuficiente adherencia entre las partículas de los agregados. Por otro lado, una escasa cantidad de agua provocará una falta de cohesión entre las mismas partículas. En ambos casos el resultado final va a dar una mezcla con poca resistencia (Short & Kinniburgh, citado por Nuñez 2015).

La cantidad de material cementante de una mezcla de concreto permeable es de vital importancia para el desarrollo de la resistencia a la compresión y permeabilidad. Si en una mezcla de concreto permeable se presenta un alto contenido de pasta se obtendrá como resultado una estructura de baja porosidad. En cambio, un bajo contenido de material cementante dará como resultado una capa endurecida de pasta envolviendo al agregado y su resistencia a la compresión será reducida. El adecuado contenido de material cementante depende del tamaño y granulometría del agregado. En el Gráfico 3 se muestra gran diferencia entre la resistencia a la compresión del concreto convencional con el concreto permeable, esto se debe a que el concreto convencional, por presentar agregado fino, hace que el contenido de vacíos disminuya, logrando así una mayor resistencia, conforme el tiempo pase. En la Figura 14 se presentan el tipo de fracturas o fallas que el concreto presenta al momento de realizar el ensayo de resistencia a la compresión.

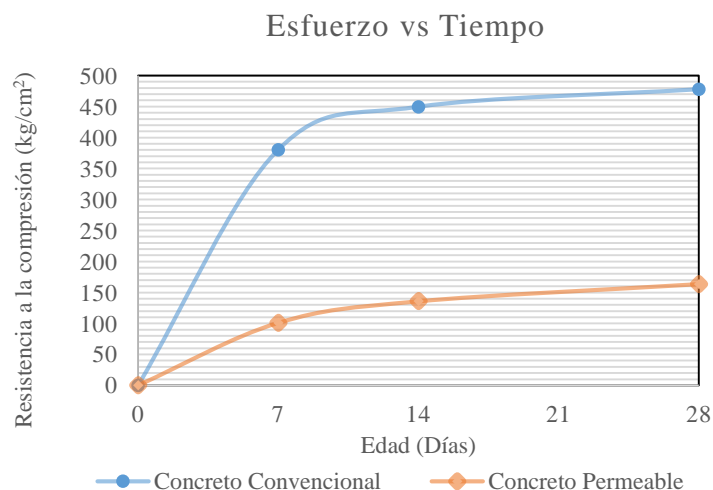


Gráfico 3. Esfuerzo vs Tiempo (Flores, 2005 y Puchuri, 2010).

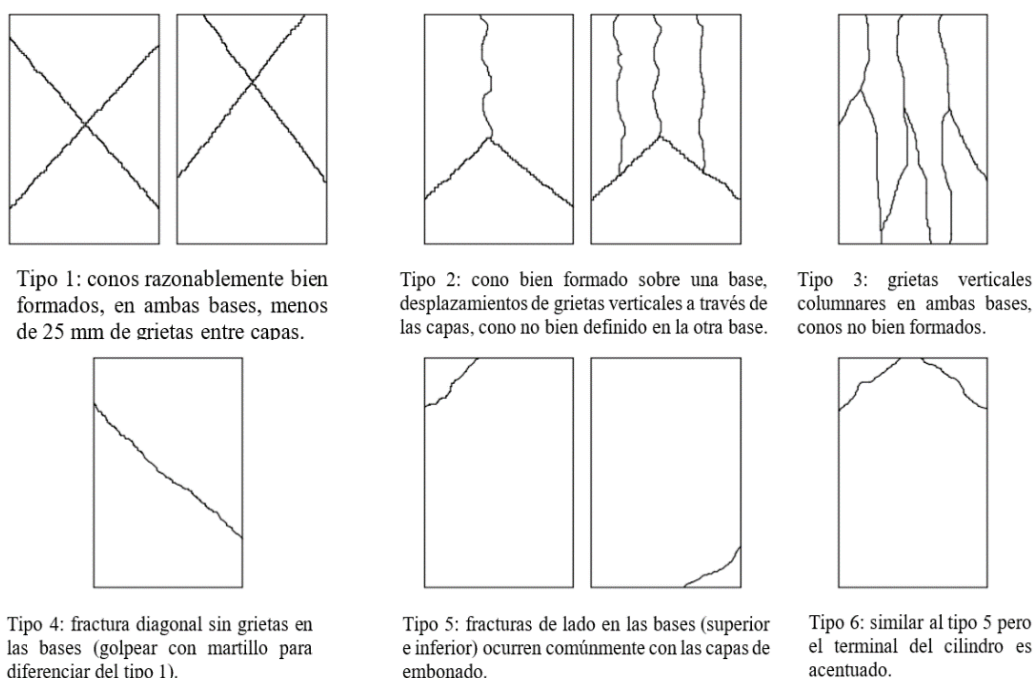


Figura 14. Esquemas de los Modelos de Fractura Típicos en probetas cilíndricas (NTP 339.034, 2008).

El ensayo para calcular la resistencia consiste en aplicar una carga axial en compresión a los especímenes cilíndricos o corazones a una velocidad tal que se encuentre dentro del rango especificado antes que ocurra una falla. El esfuerzo a la compresión de los especímenes de concreto está calculado por el cociente de la carga máxima que se obtiene durante el ensayo entre el área de la sección transversal de las probetas. Esta resistencia es calculada según la Norma Técnica Peruana NTP 339.034 (2008), con la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{4G}{\pi D^2} \dots\dots\dots (15)$$

Donde:

R_c = Resistencia de rotura a la compresión (kg/cm²)

G = Carga máxima de rotura (kg)

D = Diámetro de la probeta cilíndrica (cm)

2.2.5.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral (fcd)

La resistencia a la tracción del concreto es considerablemente menor que su resistencia a la compresión y constituye aproximadamente entre un 8 % a 15 % de esta. Para determinar este parámetro no se acostumbra usar ensayos directos debido a los problemas que se presentan sobre todo por las consecuencias secundarias que generan los dispositivos de carga.

El ensayo para calcular la resistencia consiste en cargar lateralmente el cilindro estándar, a lo largo de uno de sus diámetros hasta que se fracture (Harmsen, 2005). Es necesario que el centrado sea perfecto (Chinen, 2002). La resistencia a la tracción está dada por la siguiente ecuación (MTC E 708, 2016):

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \dots\dots\dots (16)$$

Donde:

T = Resistencia a la tracción (kg/cm²)

P = Carga de rotura (kg)

L = Longitud de la probeta (cm)

D = Diámetro de la probeta (cm)

2.2.5.3 Permeabilidad

Según López (2010) define la permeabilidad como la capacidad de un material para que un fluido traspase por el, sin afectar su estructura interna. La velocidad con la que el fluido traspasa el material depende básicamente de tres factores: porosidad del material, densidad del tipo de fluido que es afectada por su temperatura y presión a la que el fluido se encuentra sometido. El hecho de que algún material sea permeable indica que su estructura es porosa o contiene un porcentaje de vacíos que están interconectados y que le permiten la absorción de otros elementos (Subramanian, 2009 citado por Flores & Pacompia, 2015).

Una de las características más significativas del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de su estructura. Según la Norma ACI 522R (2010) la capacidad filtrante está en un rango de 2 a 18 gal./min/ft² (81 a 730 L/min/m²) o 192 a 1724 pulg/hora (0.14 a 1.22 cm/s) dependiendo del porcentaje de vacíos que esté presente. Para que se pueda asegurar el flujo del agua se recomienda al menos el 15 % del contenido de vacíos (Meininger, citado por Flores & Pacompia 2015 y López, 2010). Puesto que la capacidad de filtración aumenta a medida que se incrementa el contenido de huecos de aire, como consecuencia, la resistencia a la compresión se reduce, por lo que el proporcionamiento de la mezcla debe satisfacer un equilibrio entre una capacidad de filtración y resistencia a la compresión admisible (López, 2010).

La permeabilidad o conductividad hidráulica de una muestra saturada se puede medir en laboratorio a través de dispositivos denominados permeámetros. Todos los permeámetros se componen de una cámara en la cual se ubica una muestra de roca o suelo. En el caso particular de ensayos en roca los permeámetros utilizan muestras de forma cilíndrica. En el caso de muestras no consolidadas existen dos posibilidades. La primera es trabajar con una muestra reconstituida que es remoldeada en la cámara del permeámetro y la segunda considera el uso de muestras inalteradas que son recolectadas en el terreno mediante técnicas

especiales. Si los sedimentos son reconstituidos dentro de un permeámetro los valores de la conductividad hidráulica obtenidos con este procedimiento son sólo una aproximación del valor real de k .

a. Permeámetro de carga constante

El permeámetro de carga constante se utiliza en el caso de sedimentos no cohesivos tales como arena y rocas. Un esquema de un permeámetro de carga constante se presenta en la Figura 15. En este caso una cámara de carga provee una alimentación de agua a una carga constante, con lo que el agua se mueve a través de la muestra hasta alcanzar un régimen de equilibrio o estacionario. Para utilizar este dispositivo se genera un flujo a través de la muestra de suelo y luego que se alcanza una situación de equilibrio se mide el caudal de salida desde el permeámetro, así como la diferencia de carga entre la cámara de nivel constante y el nivel de agua en la salida.

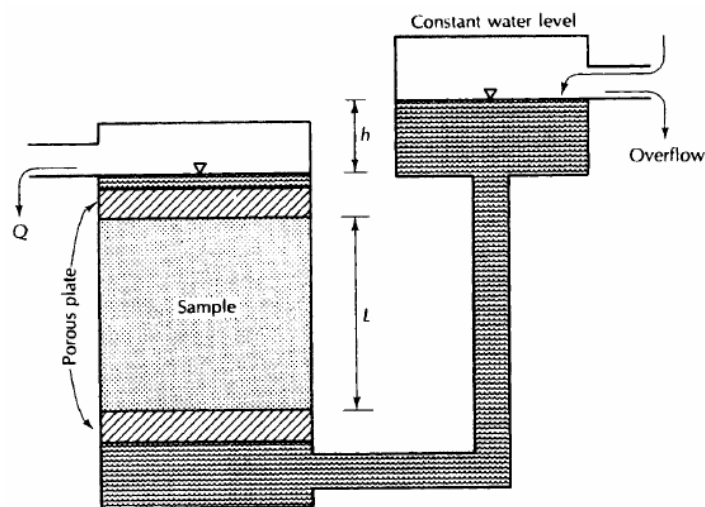


Figura 15. Permeámetro de carga constante (Espinoza, 2006).

b. Permeámetro de carga variable

En el caso de sedimentos cohesivos y con baja permeabilidad se utiliza un permeámetro de carga variable (Figura 16). En este caso la cámara de carga de nivel constante se reemplaza por un tubo vertical en el cual se produce el descenso del nivel de agua a medida

que esta atraviesa la muestra de suelo. Para la determinación de la conductividad hidráulica se anota el nivel inicial de agua en el tubo, h_0 . Luego de un período de tiempo t se mide la posición del agua en el tubo vertical, h . El diámetro interior del tubo vertical d_i , la longitud de la muestra L , así como su diámetro d_c , son también conocidos.

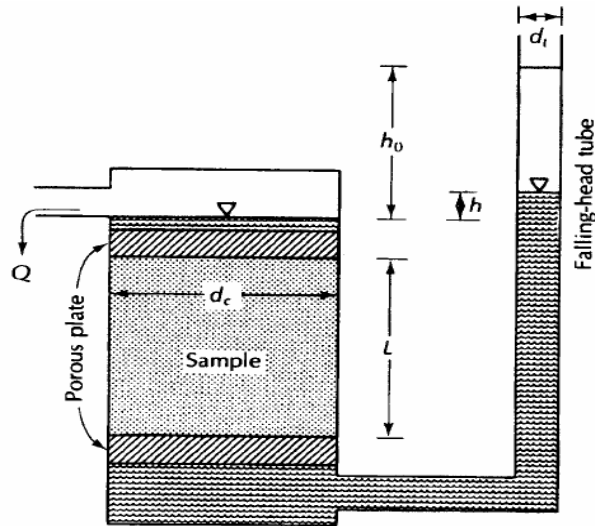


Figura 16. Permeámetro de carga variable (Ezpinoza, 2006).

El coeficiente de permeabilidad fue calculado utilizando la ley de Darcy (Flores & Pacompia, 2015):

$$k = \frac{L}{(t_2 - t_1)} \frac{a}{A} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \dots\dots\dots (17)$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad (cm/s)

L = Altura de la muestra (cm)

a = Área del tubo cilíndrico graduado (cm²)

A = Área de la muestra (cm²)

t_1 = Tiempo inicial (s)

t_2 = Tiempo final (s)

h_1 = Altura de la columna de agua en el tubo graduado al inicio de la prueba (cm)

h_2 = Altura de la columna de agua en el tubo graduado al final de la prueba (cm)

2.2.6 Aplicaciones del concreto permeable

El ACI 522R (2010), menciona que el concreto permeable ha sido empleado en una amplia gama de aplicaciones. Las cuales se presentan a continuación:

- Pavimento permeable para estacionamientos.
- Capas de drenaje rígidas debajo de las áreas exteriores del centro comercial.
- Pisos de invernadero para mantener el piso libre de agua estancada.
- Aplicaciones de paredes estructurales donde se requieren características de aislamiento térmico ligeras o mejores, o ambas.
- Pavimento, paredes y pisos donde se desea una mejor característica de absorción acústica.
- Capa de base para calles, carreteras, caminos de entrada, y aeropuertos.
- Capa de superficie para parques y canchas de tenis.
- Puente para áreas de zoológicos y establos de animales y terrazas de piscinas.



Figura 17. Aplicaciones del concreto permeable: (a) áreas de estacionamientos; (b) ciclistas y áreas verdes (Hidrocreto, <http://hidrocreto.com/aplicaciones.php?idioma=es#>).

2.2.7 Diseño de mezcla

El diseño de mezcla del concreto permeable es parecido al diseño de mezcla del concreto convencional por el método del ACI, ambos emplean cuadros obtenidos de forma empírica de ensayos realizados anteriormente; sin embargo, ambos diseños presentan alcances totalmente diferentes.

2.2.7.1 Materiales

a. Material cementante

La cantidad de pasta cementante influye directamente en las propiedades del concreto permeable. Si se tiene una elevada cantidad de material cementante, se podrá alcanzar una mayor superficie de las partículas de los agregados, permitiendo que estas se enlacen mejor brindando mayor resistencia a la mezcla, pero a su vez abarcará el espacio de los vacíos o poros que brindan las propiedades permeables a este concreto (Flores & Pacompia, 2014).

b. Agregados

En el concreto permeable, a diferencia del concreto convencional, la cantidad de pasta es escasa y por este motivo, la resistencia depende de la conexión entre los agregados (Fernández & Navas, 2010). Los concretos permeables deben elaborarse con una relación de agua/cemento (*a/c*) relativamente baja (0.30 a 0.40), ya que si se agrega una alta cantidad de agua llevará a que la pasta sea muy fluida y obstruya de esa manera el sistema de poros (ACI 522R, citado por Pérez 2009).

c. Agua

La cantidad de agua debe ser controlada estrechamente. Se ha descrito que la cantidad adecuada de agua le da brillo a la mezcla, sin salirse del agregado. Un puñado de concreto permeable formando una bola no se derrumbará o perderá su estructura vacía a medida que la pasta fluye hacia los espacios entre los agregados (Tennis *et al.*, 2004).

2.2.7.2 Criterios de diseño

Para el concreto permeable, las relaciones Agregado/cemento (Ag/c) y agua/cemento (a/c) son las principales variables que alteran las propiedades mecánicas (Flores & Pacompia, 2014). La Tabla 16 proporciona rangos típicos (valores referenciales) de proporciones de materiales en el concreto permeable.

Tabla 16
Rangos típicos de las proporciones de materiales en el concreto permeable.

| Parámetro | Proporciones kg/m ³ |
|--|-----------------------------------|
| Materiales cementantes | 270 a 415 |
| Agregado | 1190 a 1480 |
| Relación agua/cemento (en peso) | 0.27 a 0.34 |
| Relación agregado/cemento (en peso) | 4 a 4.5:1 |
| Relación agregado fino/agregado grueso (en peso) | 0 a 1:1 |

Fuente: Tennis *et al.* (2004).

a. Relación agua / cemento

La relación a/c tiene un gran efecto en las propiedades de la mezcla obtenida. Si se emplea una cantidad deficiente de agua se obtendrá como resultado una mezcla sin consistencia y con una baja resistencia a la compresión. Una gran cantidad de agua ocasionará que la pasta obstruya los espacios vacíos de la mezcla, lavando además los agregados dejándolos expuestos, y por consiguiente tendrán baja resistencia al desgaste (Flores & Pacompia, 2014).

Según el ACI 522R (2010), menciona que la relación a/c óptimo para formar una pasta estable y trabajable varía entre 0.26 y 0.45, la trabajabilidad del concreto permeable se admite que es satisfactoria si el agua empleada imparte a la mezcla un aspecto metálico y brillante.

b. Relación agregado / cemento

Las relaciones Ag/c en general varían entre 4:1 a 4.5:1, pero esta relación depende primordialmente del tipo de agregado. Tanto la relación a/c y la relación Ag/c deben satisfacer las características de permeabilidad, capacidad de carga y durabilidad (Flores & Pacompia, 2015).

c. Porcentaje de vacío

“El porcentaje de vacíos que presentan las mezclas de concreto permeable varía según la energía de compactación, la granulometría del agregado usado, la relación agua/cemento y la cantidad de material cementante utilizado” (Fernández & Navas, 2010).

d. Resistencia a la compresión de diseño

La resistencia del concreto y su permeabilidad están ligadas directamente al porcentaje de vacíos que presenta la mezcla, y este valor se verá afectado por la cantidad de agregado fino, el porcentaje de material cementante que se utilice y la fuerza con la que se compacte al concreto. Los valores de porcentaje de vacíos recomendados para el concreto permeable varían entre 15 y 30 % (Perez, 2017).

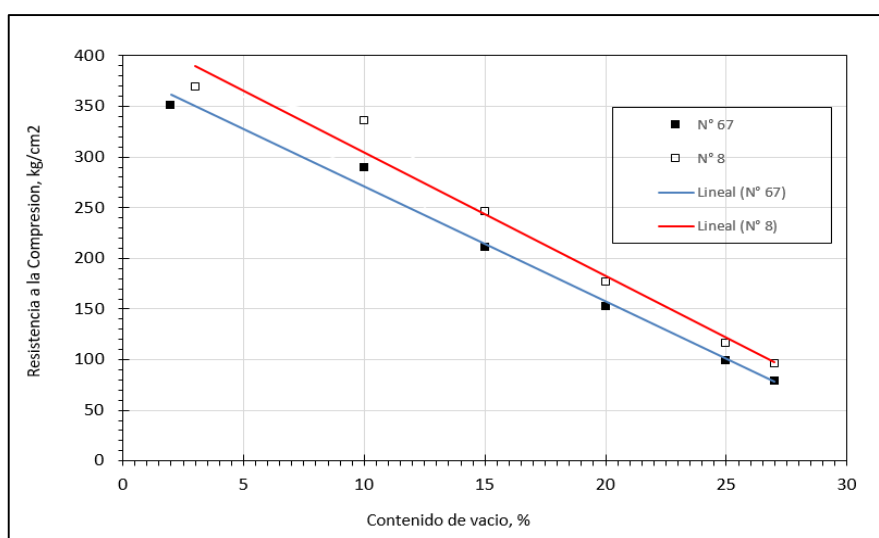


Figura 18. Relación entre el contenido de vacíos y la resistencia a la compresión a los 28 días (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015).

e. Volumen de pasta cementante

Es la pasta que se forma de la unión entre el agua y el cemento, su porcentaje dentro de la mezcla va a depender del porcentaje de vacíos y la resistencia del concreto que se desea alcanzar. A mayor cantidad de pasta cementante, menor porcentaje de vacíos y mayor superficie de los agregados cubiertas por, en este caso, aglomerante, por lo que se obtiene mayor resistencia. De acuerdo con el ACI los valores más utilizados para porcentaje de pasta cementante sobre el volumen total de la mezcla varían entre 10 y 30 % (Perez, 2017).

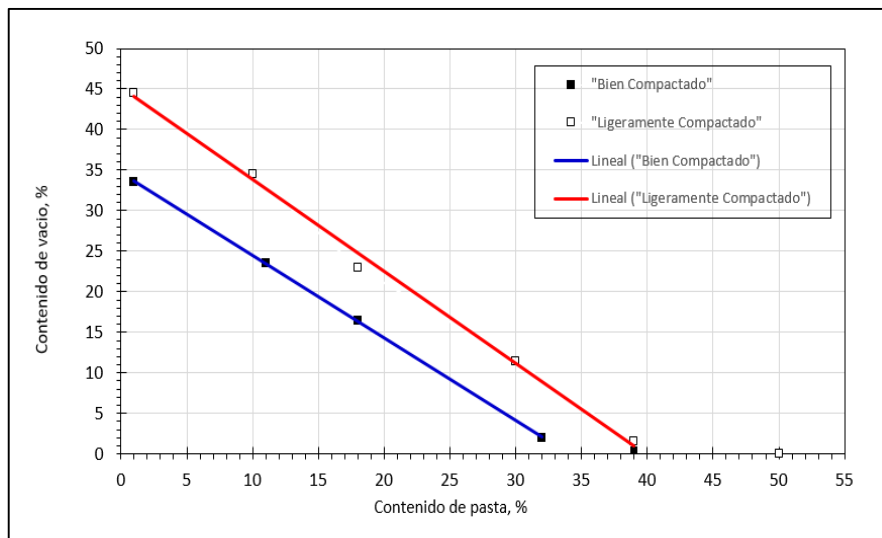


Figura 19. Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados N°8 (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015).

Después de determinar el volumen de pasta necesario, se determinan los pesos de cemento y agua por metro cúbico de mezcla, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_p = V_c + V_a = \frac{c}{Pe_c} + \frac{a}{Pe_a} \dots\dots\dots (18)$$

Donde:

- V_p = Volumen de pasta (m³)
- V_c = Volumen de cemento (m³)
- V_a = Volumen de agua (m³)
- c = Peso del cemento por m³ de mezcla (kg)

$a =$ Peso del agua por m^3 de mezcla (kg)

$Pe_c =$ Peso específico del cemento (kg/ m^3)

$Pe_a =$ Peso específico del agua (kg/ m^3)

Si se desea utilizar agregado fino, se debe reducir del total del agregado un 2 % de volumen de pasta por cada 10 % de agregado fino bien compactado y 1 % por cada 10 % de agregado fino ligeramente compactado. Estas disminuciones son empleadas para mantener el mismo porcentaje de vacíos por volumen (Flores & Pacompia, 2015).

f. Contenido de agregado grueso

Los ensayos han confirmado que la densidad varillada de agregados gruesos en seco, determinada por ASTM C29 / C29M, puede utilizarse eficazmente para dosificar el concreto permeable (Meininger, 1988). Estos ensayos afirman que la proporción del volumen seco varillado de agregado grueso por volumen sólido de agregado grueso (b/bo) puede usarse como relación de diseño.

$$b/bo = \frac{\text{Pesodelagregado grueso}}{\text{P.U.S.CAgregado grueso}} \dots\dots\dots (19)$$

Donde:

$b/bo =$ volumen varillado seco de agregado grueso en un volumen unitario de concreto.

$b =$ volumen sólido de agregado grueso en un volumen unitario de concreto.

$bo =$ volumen sólido de agregado grueso en un volumen unitario de agregado grueso.

El valor b/bo compensa automáticamente los efectos de diferentes formas de partículas de agregado grueso, clasificación y gravedad específica. Además, los valores de b/bo para los agregados nominales de tamaño máximo típicamente usados en concreto permeable de 9.5 a 19 mm, son similares (Perez, 2017). La Tabla 17 presenta los valores de b/bo de

acuerdo al tamaño [N°8 (3/8”) y N°67 (3/4”)] del agregado grueso para un porcentaje de agregado fino de 0 %, 10 % y 20 % del total de agregado.

Tabla 17
Valores efectivos de b/b_o .

| Porcentaje de agregado fino (%) | b/b_o | |
|---------------------------------|------------|-------------|
| | N°8 (3/8”) | N°67 (3/4”) |
| 0 | 0.99 | 0.99 |
| 10 | 0.93 | 0.93 |
| 20 | 0.85 | 0.86 |

Fuente: ACI 522R (2010).

2.2.8 Normas utilizadas

2.2.8.1 ACI 522R (Diseño de mezcla)

Este informe proporciona información técnica del procedimiento que se debe tener en cuenta para realizar el diseño de mezcla de concreto permeable.

2.2.8.2 NTP 339.035 (Asentamiento)

Consiste en llenar un molde troncocónico, en tres capas, con 25 golpes cada una, luego retirar el molde y medir cuanto se ha asentado la mezcla de concreto permeable.

2.2.8.3 NTP 339.046 (Peso Unitario y Contenido de Vacíos)

Este ensayo consiste en llenar un molde en forma de olla, en tres capas, con respectivos golpes (25) cada una, luego enrasar y pesar el molde lleno de concreto permeable.

2.2.8.4 NTP 339.034 (Resistencia a la compresión)

El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una velocidad normalizada en un rango prescrito mientras ocurre la falla. La resistencia a la compresión de la probeta es calculada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección recta de la probeta.

2.2.8.5 NTP 339.084 (*Resistencia a la tracción por compresión diametral*)

El ensayo consiste en aplicar la fuerza de compresión a lo largo de un espécimen cilíndrico de concreto hasta que este falle por la longitud de su diámetro. Esta carga induce esfuerzos de tensión en el plano donde se aplica y esfuerzos a la compresión en el área donde la carga es aplicada.

2.2.8.6 ACI 522R (*Permeabilidad*)

Este método de ensayo permite conocer el parámetro característico del concreto permeable, que es el coeficiente de permeabilidad, se utiliza un permeámetro de carga variable recomendado por la ACI 522R (2010) para los ensayos.

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del lugar de ejecución

La ejecución de la investigación se realizó en los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión - Laboratorio de Concreto y Ensayo de Materiales (LCEM), está ubicado a la Altura del Km 19.5 de la Carretera Central, Ñaña – Lima.

3.2 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, porque dentro de ella se hará la utilización de los conocimientos en la práctica, para aplicarlos en la mayoría de los casos, en provecho de la sociedad.

3.3 Nivel de la investigación

La presente investigación es de nivel explicativo, porque se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa – efecto.

3.4 Diseño de la investigación

La investigación es de tipo experimental, porque se manipula de manera intencional la variable independiente para analizar las consecuencias sobre las variables dependientes. Asimismo, se trabaja con dos grupos, uno experimental y el otro de control, llevando a cabo una comparación entre estos.

3.5 Enfoque de la investigación

La investigación es de enfoque cuantitativo.

3.6 Unidad de estudio

Probetas de concreto permeable.

3.7 Población y muestra

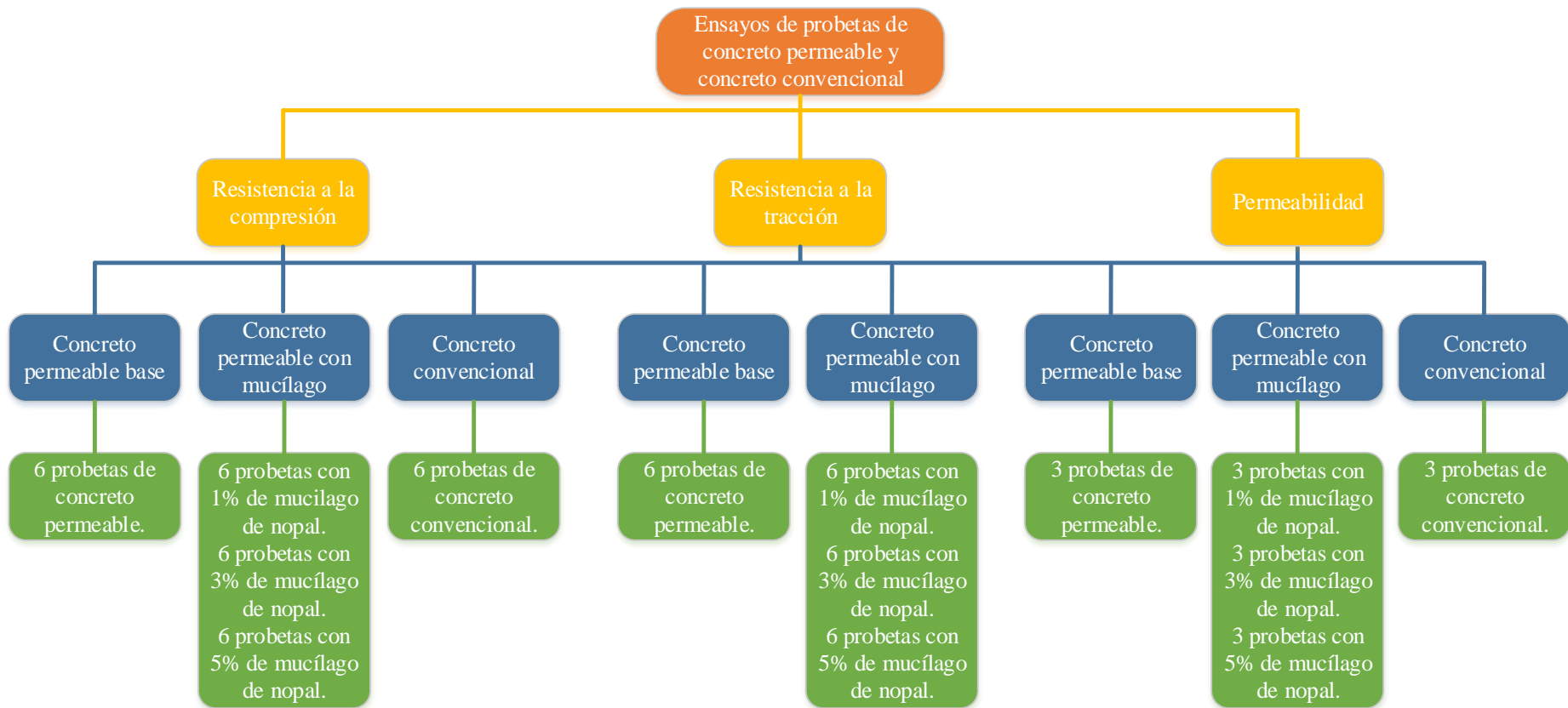
3.7.1 Población

La población objetivo son las probetas de concreto permeable que utilicen en su elaboración mucílago de nopal con concentraciones al 1 %, 3 % y 5 % respecto al peso del cemento. Los porcentajes de las concentraciones fueron tomados de la investigación realizada por (Primo, 2014) de su tesis denominada: “Efecto de la adición de extracto de paleta de tuna (*Opuntia ficus-índica*) en la resistencia a compresión del concreto”.

3.7.2 Muestra

La muestra que ha sido seleccionada fue tomada de acuerdo a la norma ACI 318, lo que menciona respecto al ensayo de resistencia a la compresión que corresponde al promedio de las resistencias de tres cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, ensayados a los 28 días (ACI 318, 2005). Así mismo, en la norma E-060 del Reglamento Nacional de Edificaciones, en el Capítulo 5- Ítem 5.1.6, menciona que debe considerarse como un ensayo de resistencia al promedio de las resistencias de dos probetas cilíndricas hechas de la misma muestra de concreto y ensayadas a los 28 días o a la edad de ensayo establecida para la determinación de $f'c$ (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2009).

Por tal motivo, en lo que corresponde a concreto permeable, se elaborará un total de 60 probetas, de las cuales 45 tendrán mucílago de nopal en concentraciones al 1 %, 3 % y 5 % respecto al peso del cemento. Y las 15 probetas restantes se elaboraron sin mucílago de nopal. Con las cuales se realizarán ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción a los 7 y 28 días, y permeabilidad a los 28 días. Adicional, se elaborará 9 probetas de concreto convencional para realizar ensayos de resistencia a la compresión (7 y 28 días) y permeabilidad (28 días) (Figura 20).



Total de probetas: - 60 probetas de concreto permeable.
 - 9 probeta de concreto convencional

Figura 20. Resumen de la cantidad de probetas a realizar a ensayar.

3.8 Variables y operacionalización de variables

3.8.1 Variable independiente

Mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) (aditivo natural).

3.8.2 Variable dependiente

Propiedades mecánicas del concreto permeable.

Tabla 18
Operacionalización de variables.

| Variable | Definición conceptual | Indicadores | Valores finales |
|--|---|---|---------------------------------------|
| <i>Independiente</i> | | | |
| Mucílago de nopal | Es una sustancia alcalina que se obtiene de la paleta o cladodio del nopal. | Dosificación de mezcla con mucílago de nopal. | % de mucílago de nopal ^(*) |
| <i>Dependiente</i> | | | |
| Resistencia a la compresión | Máxima resistencia medida de una muestra de concreto a carga axial. | Máquina de ensayo de compresión. | kg/cm ² |
| Resistencia a la tracción por compresión diametral | Máxima resistencia medida de una muestra de concreto a carga de compresión triaxial. | Máquina de ensayo de tracción. | kg/cm ² |
| Permeabilidad | Capacidad que posee un material para que lo atraviesen fluidos, sin perder la configuración de su estructura interna. | Permeámetro de carga constante. | cm/s |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ^(*) El mucílago de nopal que se añadió al diseño de mezcla fue de 1, 3 y 5 % respecto al peso del cemento.

3.9 Materiales y equipos

3.9.1 Mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*)

3.9.1.1 *Materia prima*

Para conseguir el material de estudio (mucílago de nopal) se utilizaron pencas de nopal (*Opuntia ficus-índica*). Los cladodios de nopal, conocidos comúnmente como penca, utilizados en esta investigación fueron provenientes del distrito de Santiago de Tuna,

provincia de Huarochirí, departamento de Lima. Se seleccionaron cladodios de aproximadamente un año para realizar la extracción del mucílago. Las pencas fueron cosechadas por la mañana, debido a que la acidez de estas varía según la hora de cosecha por tratarse de plantas con metabolismo ácido (Corrales *et al.*, Goldstein & Nobel citados por Abraján 2008).

3.9.1.2 Equipos

Para la extracción del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) se usarán esencialmente: cuchillo, coladores, tazones, licuadora.

3.9.2 Concreto permeable

3.9.2.1 Materiales

a. Cemento

Se utilizó Cemento Portland Tipo I de uso general, que cumple con las especificaciones de la norma NTP 334.009 (2015).

b. Agregado

En este estudio se utilizó agregado grueso, clasificados según la NTP 400.037 (2002) en Huso 7 (1/2" – N°4), además se agregó por recomendación del ACI 522R (2010) agregado fino (N° 8 – N° 200) para mejorar sus propiedades.

c. Agua

El agua empleada en la elaboración del concreto permeable fue del campus de la Universidad Peruana Unión.

3.9.2.2 Equipos y herramientas

Los equipos y herramientas a utilizar establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP son los siguientes:

Tabla 19
Herramientas y equipos.

| Herramientas y equipos |
|--|
| Tamices 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200 y fondo. |
| Balanza electrónica con precisión 0.5 g y 1g. |
| Tamices 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", N° 4 y fondo. |
| Taras. |
| Fiola de 500 ml. |
| Embudo. |
| Pipeta. |
| Cono y pinzón. |
| Molde cónico metálico de 10 cm de diámetro en la parte superior, 20 cm de diámetro en la parte inferior y altura de 30 cm. |
| Cesta de malla de alambre con abertura no mayor a 3 mm. |
| Varilla de acero liso de 5/8" de diámetro y aproximadamente 60cm de longitud y terminada en punta semiesférica. |
| Recipiente cilíndrico y de metal. |
| Cucharón de suficiente capacidad para llenar el recipiente con el agregado. |
| Estufa a una temperatura de 105°C a 110°C. |
| Trompo. |
| Moldes de 30 cm x 15 cm. |
| Mazo de goma. |
| Cuchara de muestreo y plancha de albañilería. |
| Plancha metálica de 50 cm x 50 cm. |
| Prensa de compresión para rotura de probetas. |
| Permeámetro de carga variable. |

Fuente: Elaboración propia.

3.10 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- a. Observación directa: se recolectará datos mediante la percepción intencionada y selectiva del investigador, en condiciones que este pueda controlar y manipular. Es decir, la observación se aplicará directamente en todos los ensayos que se realizarán bajo la responsabilidad del investigador y que cumplan con los estándares establecidos por el ACI y la NTP.
- b. Análisis documental: se recolectarán datos de fuentes secundarias, como lo son: Tesis (nacionales e internacionales), Normas (ACI y NTP), libros, documentos, revistas. Los cuales están debidamente citados en las referencias de la presente

investigación. Con la finalidad de utilizar esta información para el análisis de las variables de interés.

- c. Ensayos de laboratorio: vienen a ser la técnica principal para la recolección de los datos, los ensayos de materiales: análisis granulométrico de acuerdo a la Norma NTP 400.011 y NTP 400.012, peso específico y absorción según la Norma NTP 400.021 y NTP 400.022, peso unitario suelto y compactado basado en la Norma NTP 400.017, contenido de humedad según la Norma NTP 339.185 y los ensayos a los especímenes de concreto permeable: ensayo de compresión a los 7 y 28 días basándonos en la Norma NTP 339.034, ensayo de resistencia a la tracción a los 7 y 28 días basada en la Norma NTP 339.084. Y el ensayo de permeabilidad, a la edad de 28 días, de acuerdo con la norma ACI 522R-10. Los datos que se obtengan al realizar los ensayos mencionados serán colocados en fichas de resumen.

3.11 Metodología experimental

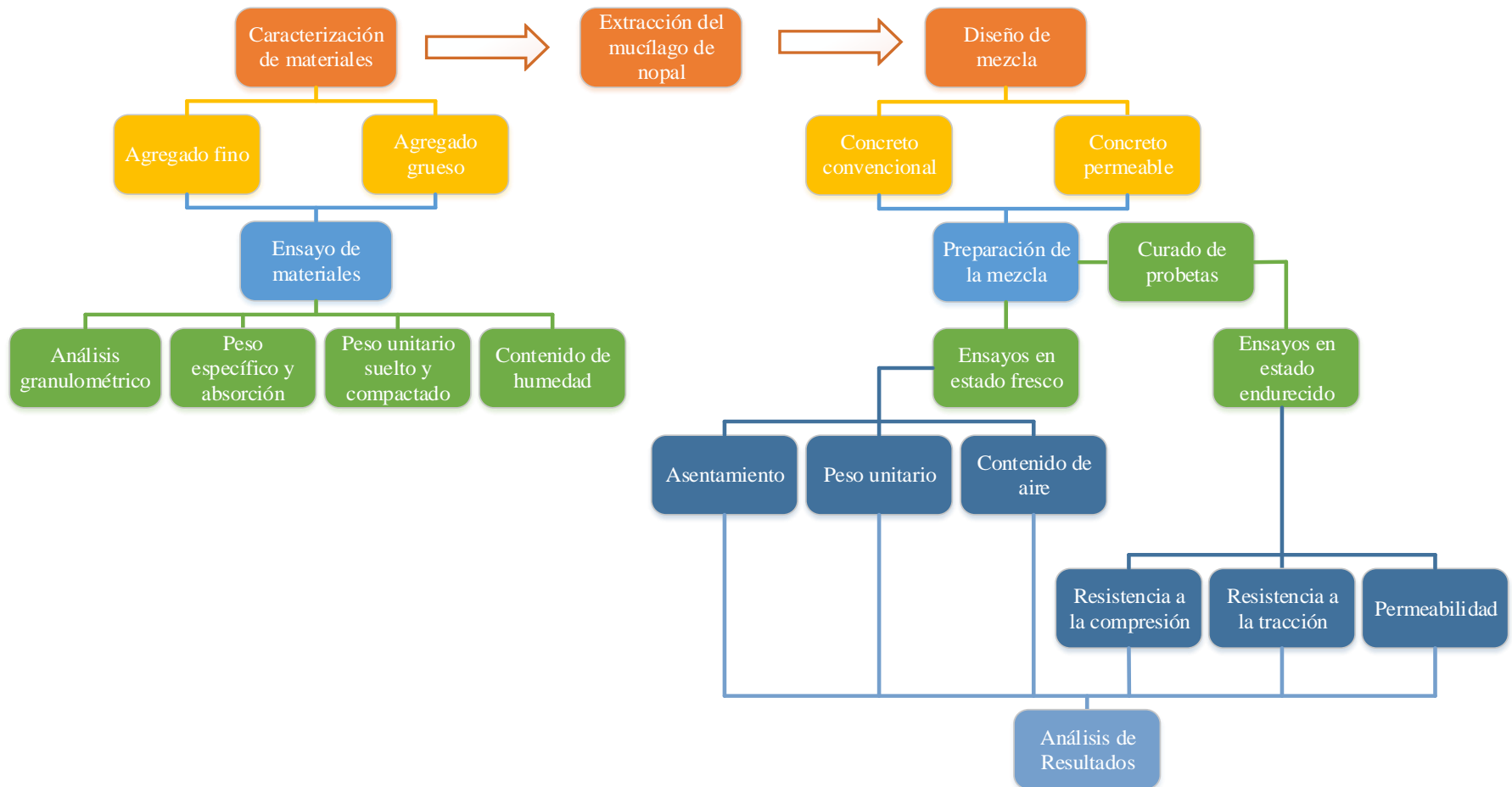


Figura 21. Procedimiento experimental.

3.11.1 Ensayo de las características físicas de los agregados

3.11.1.1 Análisis granulométrico y módulo de finura NTP 400.011, NTP 400.012

a. Análisis granulométrico y módulo de finura del agregado fino

Procedimiento de ensayo.

Se realiza el pesado de la muestra requerida, aproximadamente entre 300 a 500 g. Se coloca la muestra en la malla superior del juego de tamices, encajándolos en orden de abertura decreciente, luego se procede al tamizado en forma manual o por medio de un aparato mecánico. Para luego tomar cada tamiz con tapa y base, y realizar diferentes movimientos de vaivén. No se permitirá en ningún caso, presionar las partículas con la mano para que este pase a través del tamiz. Si en el transcurso de 1 min, no pasa más del 1 % en peso del material retenido sobre el tamiz, la operación del tamizado se dará por concluida. Finalmente, pesamos el material retenido en cada tamiz, y verificamos que la masa total del material luego del tamizado concuerde con la masa de la muestra colocada sobre cada tamiz.

b. Análisis granulométrico y módulo de finura del agregado grueso

Procedimiento de ensayo.

Se realiza el pesado de la muestra requerida, aproximadamente entre 6 a 7 kg. Se coloca la muestra en la malla superior del juego de tamices, encajándolos en orden de abertura decreciente, luego se procede al tamizado en forma manual o por medio de un aparato mecánico. Para luego tomar cada tamiz con tapa y base, y realizar diferentes movimientos de vaivén. No se permitirá en ningún caso, presionar las partículas con la mano para que este pase a través del tamiz. Si en el transcurso de 1 min, no pasa más del 1 % en peso del material retenido sobre el tamiz, la operación del tamizado se dará por concluida. Finalmente, pesamos el material retenido en cada tamiz, y verificamos que la masa total del material luego del tamizado concuerde con la masa de la muestra colocada sobre cada tamiz.

Por otro lado, se debe determinar el tamaño máximo (se define como la menor abertura en la malla del tamiz por la que pasa toda la muestra del agregado) y tamaño máximo nominal del agregado (se define como la abertura en la malla que produce el primer retenido).

3.11.1.2 Peso específico y absorción NTP 400.022, NTP 400.021

a. Peso específico y absorción del agregado fino

Procedimiento de ensayo.

Obtenemos 500 gr de muestra mediante método de cuarteo. Luego cubrimos con agua la muestra y dejamos reposar durante un periodo de 24 horas. Después de pasado ese tiempo, extendemos la muestra sobre una superficie plana expuesta a una corriente suave de aire tibio y vamos revolviendo con periodicidad para garantizar que se seque uniformemente, esta operación se realiza hasta que las partículas del agregado fino no se consoliden entre sí. Luego colocamos el agregado fino en forma suelta en el molde cónico, golpeando suavemente la superficie 25 veces con la varilla metálica y levantamos el molde verticalmente. Si existe humedad libre, el cono del agregado fino mantendrá su forma. Seguimos secando, moviendo constantemente y probamos a quitar el molde a diferentes intervalos hasta que el cono se derrumbe, esto indicará que el agregado fino ha alcanzado una condición de saturado de superficie seca. Sí al realizar el ensayo el cono de agregado fino se derrumba, es porque la muestra ya no posee humedad libre. A continuación, pesamos la fiola seca, y agregamos el material anteriormente pesado, luego la pesamos. Después llenamos de agua hasta pasarla, aproximadamente entre uno y dos centímetros. Enseguida movemos constantemente la fiola, para eliminar los vacíos ayudándonos de baño maría. Y llenamos de agua hasta la marca de 500 ml. Determinamos el peso de la fiola, muestra y el agua. Con cuidado sacamos el material de la fiola. Finalmente llevamos la muestra a la estufa

a una temperatura entre 100°C - 110°C, enfriamos a temperatura ambiente en un paño limpio y pesamos.

b. Peso específico y absorción del agregado grueso

Procedimiento de ensayo.

Obtenemos 6 kg aproximadamente de muestra mediante método de cuarteo, para luego lavarla y eliminar el polvo junto a otras impurezas superficiales de las partículas. Luego cubrimos la muestra con agua y dejamos en reposo durante 24 horas. Sacamos la muestra del agua y la esparcimos sobre un paño grande absorbente, hasta lograr desaparecer toda película de agua visible. Secamos separadamente los fragmentos más grandes teniendo en cuenta evitar la evaporación durante la operación de secado de la superficie. Determinamos el peso de la muestra bajo la condición de saturación con la superficie seca. Después de pesar, colocamos inmediatamente la muestra saturada con superficie seca en la cesta de alambre y determinamos su peso en agua. Seguidamente se coloca la muestra en la estufa a una temperatura de 110°C, durante 24 horas. Finalmente dejamos enfriar a temperatura ambiente y pesamos.

3.11.1.3 Peso unitario suelto y compactado NTP 400.017

a. Peso unitario suelto del agregado fino

Procedimiento de ensayo.

Se llena el recipiente con una pala hasta que la muestra rebase, dejando que el agregado caiga desde una altura no mayor de 5 cm, por encima del borde superior del recipiente. Tomar las medidas necesarias para evitar en lo posible la segregación de las partículas y eliminamos el material excedente con una reglilla. Finalmente determinamos el peso unitario suelto del agregado.

b. Peso unitario compactado del agregado fino

Procedimiento de ensayo.

Para determinar el peso unitario compactado del agregado fino se debe utilizar el método de apisonado. En primer lugar, llenamos hasta la tercera parte el recipiente y nivelamos la superficie con la mano. Apisonamos la muestra con la barra compactadora mediante 25 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie. Luego llenamos hasta 2/3 partes del recipiente y compactamos nuevamente con 25 golpes como anteriormente mencionamos, para que después llenemos el recipiente hasta que rebase golpeándola 25 veces con la varilla de acero. Después se enraza el recipiente utilizando la barra compactadora como regla y eliminando el material sobrante. Cuando se apisona la primera capa debe procurarse que la barra no golpee con fuerza el fondo de las últimas capas, solo se empleará una fuerza suficiente para que la barra compactadora penetre en la última capa del agregado colocado en el recipiente. Finalmente obtenemos el peso unitario compactado del agregado.

c. Peso unitario suelto del agregado grueso

Procedimiento de ensayo.

Primero llenamos el recipiente con una pala hasta que se derrame, dejando que el agregado caiga desde una altura no mayor de 5 cm, por encima del borde superior del recipiente. Tomar las medidas necesarias para evitar en lo posible la segregación de las partículas. Luego eliminamos el material excedente con una reglilla. Finalmente obtenemos el peso unitario suelto del agregado.

d. Peso unitario compactado del agregado grueso

Procedimiento de ensayo.

Para determinar el peso unitario compactado del agregado fino se realizará con el método de apisonado. En primer lugar, llenamos el recipiente hasta la tercera parte y

nivelamos la superficie con la mano. Apisonar la muestra con la barra compactadora mediante 25 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie. Luego llenamos hasta 2/3 partes del recipiente y compactamos nuevamente con 25 golpes como antes, para que después llenemos la medida hasta rebosar golpeándola 25 veces con la varilla de acero. Después, se enraza el recipiente utilizando la barra compactadora como regla y desechando el material sobrante. Cuando se apisona la primera capa se procurará que la barra no golpee el fondo con fuerza en las últimas capas, solo se empleará una fuerza suficiente para que la barra compactadora penetre en la última capa del agregado colocada en el recipiente. Finalmente obtenemos el peso unitario compactado del agregado.

3.11.1.4 Contenido de humedad NTP 339.185

a. Contenido de humedad del agregado fino

Procedimiento de ensayo.

Colocamos la muestra húmeda en un depósito apropiado. Luego, determinamos su peso (peso del recipiente + muestra húmeda). Seguidamente, llevamos el recipiente con la muestra húmeda a una estufa a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para secarla durante 24 horas. Finalmente pesamos el recipiente con la muestra seca (peso del recipiente + muestra seca) y determinamos la cantidad de agua evaporada.

b. Contenido de humedad del agregado grueso

Procedimiento de ensayo.

Se coloca la muestra húmeda a ensayar en un depósito adecuado. Luego, determinamos dicho peso. Seguidamente, llevamos el recipiente con la muestra húmeda a una estufa a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para secarla durante 24 horas. Finalmente pesamos el recipiente con la muestra seca y determinamos la cantidad de agua evaporada.

3.11.2 Extracción del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*)

Procedimiento de extracción.

En primer lugar, se recolectarán pencas de 2 a 3 años de edad, se cosechan durante la mañana, ya que los ácidos de estas varían según la hora de cosecha por tratarse de plantas con metabolismo ácido. Luego de la selección, la penca debe ser lavada y se debe remover las espinas con cuchillos afilados; de igual modo ocurre con el pelado manual del nopal. Seguidamente, con un cuchillo se elimina la cutícula y la epidermis, tratando de recuperar la mayor cantidad de colénquima y parénquima, que es donde se encuentra la mayor cantidad de células que almacenan el mucílago. Luego, se procede a cortar el cladodio en cuadros aproximados de 5cm. Después, se vierte agua en la licuadora junto con los trozos de nopal y se licúa hasta obtener una mezcla mucilaginosa. Se deberá mantener refrigerado, en caso el uso sea después de pasado dos horas de preparado.

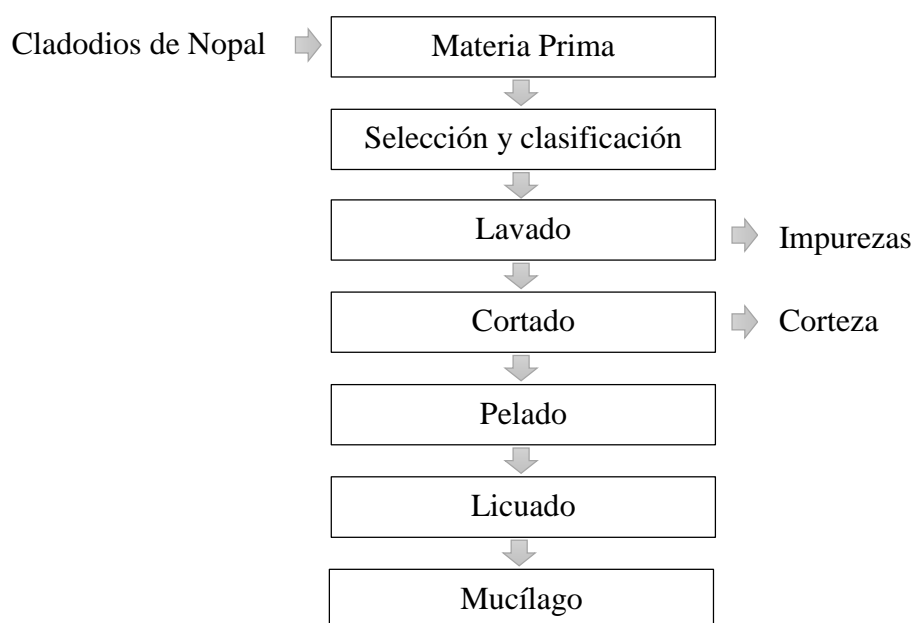


Figura 22. Proceso de extracción del mucílago de nopal.

3.11.3 Diseño de mezcla

a. *Diseño de mezcla del concreto permeable.*

Diseño de mezcla realizado para un concreto permeable de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Paso 1: Se define las características de los materiales.

Tabla 20

Peso específico del cemento y agua.

| Propiedad | | Valor | Unidad |
|-----------------------------|-----|-------|-------------------|
| Peso específico del cemento | Pec | 3120 | kg/m ³ |
| Peso específico del agua | Pea | 1000 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21

Propiedades del agregado fino y grueso.

| Propiedad | | A. Fino | A. Grueso | Unidad |
|--------------------------|-----|---------|-----------|-------------------|
| Peso Unitario Suelto | PUS | 1345.34 | 1149.38 | kg/m ³ |
| Peso Unitario Compactado | PUC | 1476.81 | 1226.17 | kg/m ³ |
| Peso Específico | Pe | 2463.64 | 2738.03 | kg/m ³ |
| Absorción | Ab | 1.49 | 1.80 | % |
| Contenido de Humedad | Ch | 1.47 | 0.49 | % |
| Módulo de Finura | MF | 3.1 | 6.5 | - |
| Tamaño Máximo Nominal | TMN | - | 1/2 | " |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Obtención del porcentaje de vacíos.

La obtención del porcentaje de vacíos se realiza mediante la Figura 23 y está en función de la resistencia a la compresión de diseño.

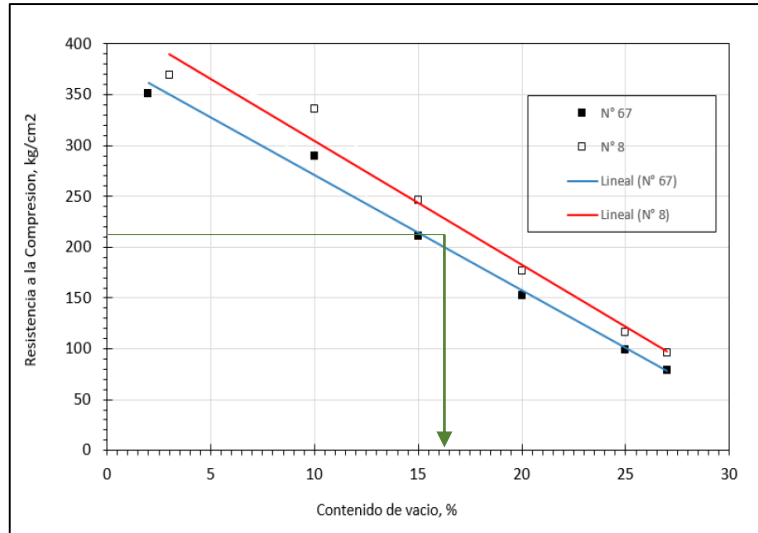


Figura 23. Contenido de vacíos (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015).

% de vacíos: 16.30 %

Paso 3: Obtención del porcentaje de pasta.

La obtención del contenido de pasta se realiza mediante la Figura 3, con el dato del contenido de vacíos.

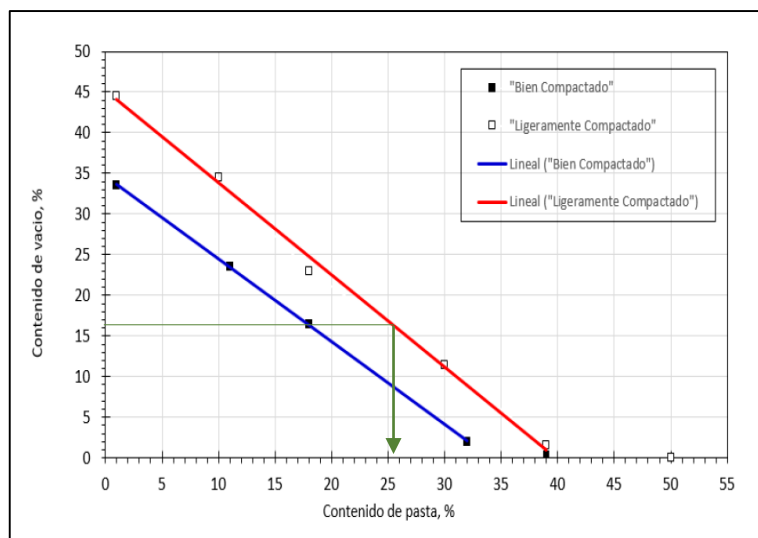


Figura 24. Porcentaje de pasta (ACI 522R-10, citado por Flores & Pacompia 2015).

Como se usará un 10 % de agregado fino, el ACI 522-R, menciona que se debe reducir un 2 % de volumen de pasta por cada 10% de agregado fino bien compactado y 1 % por cada 10 % de agregado fino ligeramente compactado.

- % de agregado fino incluido en el diseño: 10 %.
- Nivel de compactación: Ligeramente compactado, porque permite obtener un mayor contenido de pasta en la mezcla.

Entonces: $25.5 \% - 1 \% = 24.5 \%$

% de pasta: 24.5 %

Paso 4: Elección de la relación a/c.

El ACI menciona que para formar una pasta estable y trabajable la relación a/c varía entre 0.25 y 0.45. Por lo que se optó usar el promedio de relación a/c = 0.35.

Relación a/c = 0.35.

Paso 5: Determinar el valor b/bo.

El ultimo criterio que es necesario tener en cuenta es el valor b/bo, el cual nos ayuda a determinar el peso del agregado grueso en la mezcla, para ello se usa la tabla de valores efectivos que brinda el ACI 522R-10, el cual especifica el factor b/bo según el porcentaje de agregado fino que se pretende utilizar en la mezcla.

Tabla 22
Determinación del valor efectivos b/bo.

| % de agregado fino | b/bo | |
|--------------------|------|------|
| | N°8 | N°67 |
| 0 | 0.99 | 0.99 |
| 10 | 0.93 | 0.93 |
| 20 | 0.85 | 0.86 |

Fuente: ACI 211.3R, Citado por Pérez (2009).

$b/bo = 0.93 m^3$.

Paso 6: Determinar el peso del agregado grueso.

Usando la siguiente ecuación, se calcula el Peso del Agregado Grueso (Pag):

$$b/b_o = \text{Peso del agregado grueso}^3 / \text{PUSC agregado grueso}$$

$$\text{Pag} = b/b_o \times \text{PUSC agregado grueso}$$

Se calcula el Peso Unitario Suelto Compactado del agregado grueso (PUSC):

$$\text{PUSC} = \text{PUC} / \text{Contenido de Humedad}$$

$$\text{PUSC} = 1226.17 \text{ kg/m}^3 / 1.0049$$

$$\text{PUSC} = 1220.19 \text{ kg/m}^3$$

Se determina el Peso del agregado grueso seco (Pag):

$$\text{Pag} = b/b_o \times \text{PUSC agregado grueso}$$

$$\text{Pag} = 0.93 \times 1220.19 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Pag} = 1134.78 \text{ kg}$$

Se realiza el ajuste por absorción (sss):

$$\text{Pag (sss)} = \text{Pag} \times \text{Porcentaje de Absorción}$$

$$\text{Pag (sss)} = 1134.78 \times 1.018$$

$$\text{Pag (sss)} = 1155.21 \text{ kg}$$

Restando el % que ocupará el agregado fino, obtenemos el peso final del agregado grueso:

$$\text{Pag (sss)} = \text{Pag (sss)} \times 10\% \text{ de Paf (sss)}$$

$$\text{Pag (sss)} = 1155.21 \times (1 - 10/100)$$

$$\text{Pag (sss)} = 1039.69 \text{ kg}$$

Paso 7: Determinar el peso del agregado fino.

Se calcula el Peso del agregado fino seco (sss):

$$Paf (sss) = Pag (sss) - Pag (sss) \text{ final}$$

$$Paf (sss) = 1155.21 - 1039.69$$

$$Paf (sss) = 115.52 \text{ kg}$$

Se determina el Peso del agregado fino seco (Paf):

$$Paf = Paf (sss) / \% \text{ Absorción}$$

$$Paf = 115.52 / 1.0149$$

$$Paf = 113.82 \text{ kg}$$

Paso 8: Determinar el contenido de cemento y agua.

Volumen de Pasta = Volumen de cemento + Volumen de agua

$$V_p = \frac{c}{P_{ec}} + \frac{a}{P_{ea}}$$

$$V_p = \frac{c}{3120} + \frac{a}{1000} \dots\dots\dots (20)$$

Como se conoce la relación $a/c = 0.35 \rightarrow a = 0.35 \times c \dots\dots\dots (21)$

Reemplazando (21) en (20):

$$V_p = \frac{c}{3120} + \frac{0.35 \times c}{1000} \dots\dots\dots (22)$$

Reemplazando el $V_p = 24.5 \%$ en (22) obtenemos la cantidad de cemento:

$$0.245 = \frac{c}{3120} + \frac{0.35 \times c}{1000}$$

$$c = 365.39 \text{ kg/m}^3 \dots\dots\dots (23)$$

Reemplazando (23) en (21) obtenemos la cantidad de agua de diseño:

$$a = 0.35 \times 365.39 = 127.89 \text{ lt}$$

Paso 9: Calcular volúmenes absolutos.

Para el cálculo del volumen absoluto de los materiales, se usa la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Peso material}}{\text{Peso específico material}} \dots\dots\dots (24)$$

Tabla 23
Volúmenes absolutos.

| Descripción | Peso seco (kg) | Peso específico (kg/m ³) | Volumen Absoluto (m ³) |
|-----------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Cemento | 365.39 | 3120.00 | 0.12 |
| Agua | 127.89 | 1000.00 | 0.13 |
| Agregado grueso | 1039.69 | 2738.03 | 0.38 |
| Agregado fino | 115.52 | 2463.64 | 0.05 |
| Vacío | 16.30 | | 0.163 |
| | | Vol. Sólido | 0.843 |

Fuete: Elaboración propia.

Paso 10: Determinar el nuevo porcentaje de vacíos.

Para calcular el nuevo porcentaje de vacíos se usa la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{V_{\text{total}} - V_{\text{sólido}}}{V_{\text{total}}} \times 100$$

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{1.00 - 0.843}{1.00} \times 100$$

$$\% \text{ Vacíos} = 15.70 \%$$

Paso 11: Corregir por humedad y absorción.

Tabla 24
Contenido de humedad y absorción de los materiales.

| Descripción | Pesos secos (kg) | Contenido de humedad | % Absorción |
|-----------------|------------------|----------------------|-------------|
| Cemento | 365.39 | - | - |
| Agua | 127.89 | - | - |
| Agregado grueso | 1039.69 | 0.49 | 1.80 |
| Agregado fino | 113.82 | 1.47 | 1.49 |

Fuente: Elaboración propia.

Se calcula el agua efectiva.

Agua en el agregado grueso:

$$\text{Adición de agua} = (\% \text{Absorción} - \% \text{Humedad}) \times \text{Ag}$$

$$\text{Adición de agua} = (1.80\% - 0.49\%) \times 1039.69$$

$$\text{Adición de agua} = 1.31\% \times 1039.69$$

$$\text{Adición de agua} = 13.62 \text{ kg}$$

Agua en el agregado fino:

$$\text{Adición de agua} = (\% \text{Absorción} - \% \text{Humedad}) \times \text{Af}$$

$$\text{Adición de agua} = (1.49\% - 1.47\%) \times 113.82$$

$$\text{Adición de agua} = 0.02\% \times 113.82$$

$$\text{Adición de agua} = 0.023 \text{ kg}$$

Agua efectiva:

$$\text{Agua efectiva} = 127.89 + 13.62 + 0.023$$

$$\text{Agua efectiva} = 141.53 \text{ kg}$$

Se corrige el agregado por humedad.

Agregado grueso:

$$A_{gc} = A_g \times \% \text{Humedad}$$

$$A_{gc} = 1039.69 \times 1.0049$$

$$A_{gc} = 1044.78 \text{ kg}$$

Agregado fino:

$$A_{fc} = A_f \times \% \text{Humedad}$$

$$A_{fc} = 113.82 \times 1.0147$$

$$A_{fc} = 115.49 \text{ kg}$$

Paso 12: Valores de diseño de mezcla.

Tabla 25
Pesos por m³ de los materiales del diseño de mezcla.

| Material | Pesos por m ³ (kg) |
|-----------------|-------------------------------|
| Cemento | 365.39 |
| Agregado fino | 115.49 |
| Agregado grueso | 1044.78 |
| Agua efectiva | 141.49 |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 13: Proporción de diseño de mezcla en peso.

Tabla 26
Proporción de diseño de mezcla.

| Material | Proporción | Unidad |
|-----------------|------------|--------|
| Cemento | 1 | kg |
| Agregado fino | 0.32 | kg |
| Agregado grueso | 2.86 | kg |
| Agua | 16.46 | lt |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 14: Diseño de mezcla por probeta.

Para una probeta de dimensiones 15 cm de diámetro x 30 cm de altura el volumen calculado es de 0.0053 m³. Considerando un 10% de desperdicio tenemos:

$$V = V_{\text{probeta}} + 10\% V_{\text{probeta}}$$

$$V = 0.0053 + 0.10 (0.0053)$$

$$V = 0.00583 \text{ m}^3$$

Con los datos de la Tabla 26 se calculó las cantidades de materiales para 0.00583 m³.

Hallamos la cantidad de cemento para 0.00583 m³:

$$\text{Cemento} = 0.00583 \times 365.39 = 2.13 \text{ kg}$$

Hallamos la cantidad de agregado fino para 0.00583 m³:

$$\text{Agregado fino} = 0.00583 \times 115.49 = 0.67 \text{ kg}$$

Hallamos la cantidad de agregado grueso para 0.00583 m³:

$$\text{Agregado grueso} = 0.00583 \times 1041.60 = 6.09 \text{ kg}$$

Hallamos la cantidad de agua para 0.00583 m³:

$$\text{Agua} = 0.00583 \times 141.49 = 0.82 \text{ litros}$$

Tabla 27

Cantidad de material para una probeta con 10% de desperdicio $V = 0.00583 \text{ m}^3$.

| Material | Valor | Unidad |
|-----------------|-------|--------|
| Cemento | 2.13 | kg |
| Agregado fino | 0.67 | kg |
| Agregado grueso | 6.07 | kg |
| Agua | 0.82 | lt |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 15: Cantidad de material para una probeta con adición de mucílago de nopal (1%, 3% y 5%).

La cantidad de materiales que se utilizaron fueron calculadas anteriormente (Tabla 27).

Calculamos la cantidad de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) al 1 % en peso de cemento.

Peso del cemento = 2.13 kg

Entonces el 1% de mucílago de nopal en peso cemento = $0.01 \times 2.13 = 0.0213$ kg

Por lo tanto, tenemos:

Tabla 28
Cantidad de material para una probeta con 1 % de mucílago de nopal.

| Material | Valor | Unidad |
|-------------------|--------|--------|
| Cemento | 2.13 | kg |
| Agregado fino | 0.67 | kg |
| Agregado grueso | 6.07 | kg |
| Agua efectiva | 0.82 | lt |
| Mucílago de nopal | 0.0213 | kg |

Fuente: Elaboración propia.

Calculamos la cantidad de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) al 3 % en peso de cemento.

Peso del cemento = 2.13 kg

Entonces el 3% de mucílago de nopal en peso cemento = $0.03 \times 2.13 = 0.0639$ kg

Por lo tanto, tenemos:

Tabla 29
Cantidad de material para una probeta con 3 % de mucílago de nopal.

| Material | Valor | Unidad |
|-------------------|--------|--------|
| Cemento | 2.13 | kg |
| Agregado fino | 0.67 | kg |
| Agregado grueso | 6.05 | kg |
| Agua efectiva | 0.82 | lt |
| Mucílago de nopal | 0.0639 | kg |

Fuente: Elaboración propia.

Calculamos la cantidad de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) al 5 % en peso de cemento.

Peso del cemento = 2.13 kg

Entonces el 5 % de mucílago de nopal en peso cemento = $0.05 \times 2.13 = 0.1065$ kg

Por lo tanto, tenemos:

Tabla 30
Cantidad de material para una probeta con 5% de mucílago de nopal.

| Material | Valor | Unidad |
|-------------------|--------|--------|
| Cemento | 2.13 | kg |
| Agregado fino | 0.67 | kg |
| Agregado grueso | 6.07 | kg |
| Agua efectiva | 0.82 | lt |
| Mucílago de nopal | 0.1065 | kg |

Fuente: Elaboración propia.

b. Diseño de mezcla del concreto convencional

Diseño de mezcla realizado para un concreto convencional de $f'c = 210$ kg/cm².

Paso 1: Se define las características de los materiales.

Tabla 31
Peso específico del cemento y agua.

| Propiedad | | Valor | Unidad |
|-----------------------------|-----|-------|-------------------|
| Peso específico del cemento | Pec | 3120 | kg/m ³ |
| Peso específico del agua | Pea | 1000 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32
Propiedades del agregado fino y grueso.

| Propiedad | | A. Fino | A. Grueso | Unidad |
|--------------------------|-----|---------|-----------|-------------------|
| Peso Unitario Suelto | PUS | 1345.34 | 1149.38 | kg/m ³ |
| Peso Unitario Compactado | PUC | 1476.81 | 1226.17 | kg/m ³ |
| Peso Específico | Pe | 2463.64 | 2738.03 | kg/m ³ |
| Absorción | Ab | 1.49 | 1.80 | % |
| Contenido de Humedad | Ch | 1.47 | 0.49 | % |
| Módulo de Finura | MF | 3.1 | - | - |
| Tamaño Máximo Nominal | TMN | - | 1/2 | " |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Seleccionar el asentamiento.

Tabla 33
Asentamiento según el tipo de construcción.

| Tipos de construcción | Slump Máximo | Slump Mínimo |
|--|-----------------|-----------------|
| Zapatas y muros de cimentación reforzados. | 3" | 1" |
| Zapatas simples, cajones y muros de subestructura. | 3" | 1" |
| Vigas y muros reforzados. | 4" | 1" |
| Columnas de edificios. | 4" | 1" |
| Pavimentos y losas. | 3" | 1" |
| Concreto ciclópeo. | 2" | 1" |

Fuente: Abanto (2015).

$$\text{Slump} = 3''$$

Paso 3: Determinar el Tamaño Máximo Nominal (TMN).

El tamaño máximo nominal del agregado grueso se determina mediante el ensayo de análisis granulométrico.

$$\text{TMN} = 1/2''$$

Paso 4: Estimar el contenido de agua y aire.

Tabla 34
Contenido de agua en función del slump y el TMN.

| Slump | Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso | | | | | | | |
|--------------------------------|---|------|------|-----|--------|-----|-----|-----|
| | 3/8" | 1/2" | 3/4" | 1" | 1 1/2" | 2" | 3" | 6" |
| Concretos sin aire incorporado | | | | | | | | |
| 1" a 2" | 207 | 199 | 190 | 179 | 166 | 154 | 130 | 113 |
| 3" a 4" | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 | 145 | 124 |
| 6" a 7" | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 | 160 | - |
| Concretos con aire incorporado | | | | | | | | |
| 1" a 2" | 181 | 175 | 165 | 160 | 150 | 142 | 122 | 7 |
| 3" a 4" | 202 | 193 | 184 | 175 | 165 | 157 | 133 | 119 |
| 6" a 7" | 216 | 205 | 197 | 184 | 174 | 166 | 154 | - |

Fuente: Abanto (2015).

$$\text{Contenido de agua} = 216 \text{ l/m}^3$$

Tabla 35
 Contenido de aire en función del TMN.

| Tamaño máximo nominal del agregado grueso | Aire atrapado (%) |
|---|-------------------|
| 3/8" | 3 |
| 1/2" | 2.5 |
| 3/4" | 2 |
| 1" | 1.5 |
| 1 1/2" | 1 |
| 2" | 0.5 |
| 3" | 0.3 |
| 6" | 0.2 |

Fuente: Abanto (2015)

Contenido de aire = 2.5 %

Paso 5: Determinar la relación a/c por resistencia promedio requerida.

Tabla 36
f'c requerida en función de la resistencia de diseño y un factor de seguridad.

| $f'c$ (kg/cm ²) | $f'cr$ |
|--------------------------------|------------|
| Menor de 210 | $f'c + 70$ |
| 210 a 350 | $f'c + 84$ |
| Mayor de 350 | $f'c + 98$ |

Fuente: Abanto (2015).

De la Tabla 36 tenemos:

$$f'cr = f'c + 84 \dots\dots\dots (25)$$

Para el estudio se propuso una resistencia de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Reemplazando en la ecuación (25):

$$f'cr = 210 + 84 = 294 \text{ kg/cm}^2$$

Calculamos la relación a/c usando la Tabla 37:

Tabla 37
Relación a/c en función de la f'_{cr} y aire incorporad.

| f'_{cr} (kg/cm ²) | Relación agua/cemento en peso | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Concreto sin aire incorporado | Concreto con aire incorporado |
| 150 | 0.80 | 0.71 |
| 200 | 0.70 | 0.61 |
| 250 | 0.62 | 0.53 |
| 300 | 0.55 | 0.46 |
| 350 | 0.48 | 0.40 |
| 400 | 0.43 | --- |
| 450 | 0.38 | --- |

Fuente: Abanto (2015).

Como el $f'_{cr} = 294$ kg/cm² se realiza la interpolación de los siguientes datos:

| | |
|-----|------|
| 250 | 0.62 |
| 294 | a/c |
| 300 | 0.55 |

$$\frac{250-300}{294-300} = \frac{0.62-0.55}{\frac{a}{c}-0.55}$$

Relación a/c = 0.56

Paso 6: Calcular el contenido de cemento.

Usando la relación a/c calculamos el contenido de cemento.

$$a/c = 0.56 \rightarrow c = a/0.56 = 216/0.56 = 385.71 \text{ kg} / 42.5 = 9.08 \text{ bolsas}$$

Cemento = 385.71 kg = 9.08 bolsas

Paso 7: Calcular el peso del agregado grueso.

Tabla 38

Volumen del agregado grueso en función del TMN y MF.

| Tamaño máx. del agregado grueso | Volumen de agregado grueso | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|------|------|------|
| | Módulo de finura del agregado fino | | | |
| | 2.40 | 2.60 | 2.80 | 3.00 |
| 3/8" | 0.50 | 0.48 | 0.46 | 0.44 |
| 1/2" | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.53 |
| 3/4" | 0.66 | 0.64 | 0.62 | 0.60 |
| 1" | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 1 1/2" | 0.76 | 0.74 | 0.72 | 0.70 |
| 2" | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 3" | 0.81 | 0.79 | 0.77 | 0.75 |
| 6" | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.81 |

Fuente: Abanto (2015).

Como el TMN = 1/2" y el MF = 3.1 se interpola, obteniendo un volumen de agregado $b/b_o = 0.52 \text{ m}^3$.

Peso del agregado grueso = $b/b_o \times \text{PUC}$

Peso del agregado grueso = 0.52×1226.17

Peso del agregado grueso = 637.61 kg

Paso 8: Calcular el peso del agregado fino mediante el método del volumen absoluto.

Tabla 39

Volúmenes absolutos.

| Descripción | Peso seco (kg) | Peso específico (kg/m ³) | Volumen Absoluto (m ³) |
|-----------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Cemento | 385.71 | 3120.00 | 0.13 |
| Agua | 216.00 | 1000.00 | 0.22 |
| Aire | 2.5 | | 0.03 |
| Agregado grueso | 637.61 | 2738.03 | 0.23 |
| | | Vol. Sólido | 0.61 |

Fuente: Elaboración propia.

Volumen del agregado fino = $1 - \text{Vol. Sólido} = 1 - 0.61 = 0.39$

Peso del agregado fino = Vol.af x Pe

Peso del agregado fino = 0.39 x 2463.64

Peso del agregado fino = 960.82 kg

Paso 9: Corregir por humedad y absorción.

Tabla 40
Pesos secos, contenido de humedad y % de absorción de los agregados.

| Descripción | Pesos secos (kg) | Contenido de humedad | % Absorción |
|-----------------|------------------|----------------------|-------------|
| Cemento | 385.71 | - | - |
| Agua | 216.00 | - | - |
| Agregado grueso | 637.61 | 0.49 | 1.80 |
| Agregado fino | 960.82 | 1.47 | 1.49 |

Fuente: Elaboración propia.

Se calcula el agua efectiva.

Agua en el agregado grueso:

$$\text{Adición de agua} = (\% \text{Absorción} - \% \text{Humedad}) \times \text{Ag}$$

$$\text{Adición de agua} = (1.80\% - 0.49\%) \times 637.61$$

$$\text{Adición de agua} = 1.31\% \times 637.61$$

$$\text{Adición de agua} = 8.35 \text{ kg}$$

Agua en el agregado fino:

$$\text{Adición de agua} = (\% \text{Absorción} - \% \text{Humedad}) \times \text{Af}$$

$$\text{Adición de agua} = (1.49\% - 1.47\%) \times 960.82$$

$$\text{Adición de agua} = 0.02\% \times 960.82$$

$$\text{Adición de agua} = 19.22 \text{ kg}$$

Agua efectiva:

$$\text{Agua efectiva} = 216.00 + 8.35 + 19.22$$

$$\text{Agua efectiva} = 243.57 \text{ kg}$$

Se corrige el agregado por humedad.

Agregado grueso:

$$\text{Agc} = \text{Ag} \times \% \text{Humedad}$$

$$\text{Agc} = 637.61 \times 1.0049$$

$$\text{Agc} = 640.73 \text{ kg}$$

Agregado fino:

$$\text{Afc} = \text{Af} \times \% \text{Humedad}$$

$$\text{Afc} = 960.82 \times 1.015$$

$$\text{Afc} = 975.23 \text{ kg}$$

Paso 10: Valores de diseño de mezcla por m³.

Tabla 41
Pesos por m³ de los materiales del diseño de mezcla.

| Material | Pesos por m ³ (kg) |
|-----------------|-------------------------------|
| Cemento | 385.71 |
| Agregado fino | 975.23 |
| Agregado grueso | 640.73 |
| Agua | 243.57 |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 11: Proporción de diseño de mezcla en peso.

Tabla 42
Proporción de diseño de mezcla.

| Material | Proporción | Unidad |
|-----------------|------------|--------|
| Cemento | 1 | kg |
| Agregado fino | 2.52 | kg |
| Agregado grueso | 1.66 | kg |
| Agua | 26.84 | lt |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 12: Diseño de mezcla por probeta.

Para una probeta de dimensiones 15 cm de diámetro x 30 cm de altura el volumen calculado es de 0.0053 m^3 . Considerando un 10% de desperdicio tenemos:

$$V = V_{\text{probeta}} + 10\% V_{\text{probeta}}$$

$$V = 0.0053 + 0.10 (0.0053)$$

$$V = 0.00583$$

Con los datos de la Tabla 41 se calculó las cantidades de materiales para 0.00583 m^3 .

Hallamos la cantidad de cemento para 0.00583 m^3 :

$$\text{Cemento} = 0.00583 \times 385.71 = 2.25 \text{ kg}$$

Hallamos la cantidad de agregado fino para 0.00583 m^3 :

$$\text{Agregado fino} = 0.00583 \times 975.23 = 5.69 \text{ kg}$$

Hallamos la cantidad de agregado grueso para 0.00583 m^3 :

$$\text{Agregado grueso} = 0.00583 \times 640.73 = 3.74 \text{ kg}$$

Hallamos la cantidad de agua para 0.00583 m^3 :

$$\text{Agua} = 0.00583 \times 243.57 = 1.42 \text{ litros}$$

Tabla 43
 Cantidad de material para una probeta con 10% de desperdicio $V = 0.00583 \text{ m}^3$.

| Material | Valor | Unidad |
|-----------------|-------|--------|
| Cemento | 2.25 | kg |
| Agregado fino | 5.69 | kg |
| Agregado grueso | 3.74 | kg |
| Agua | 1.42 | l |

Fuente: Elaboración propia.

3.11.4 Elaboración de probetas de concreto permeable

3.11.4.1 Elaboración de probetas de concreto permeable NTP 339.183

Procedimiento de elaboración.

Pesamos los materiales obtenidos en el diseño de mezcla y agregamos los materiales, pesados anteriormente en el trompo para conseguir una mezcla de concreto que se verterá en los moldes. Antes de verter la mezcla en los moldes verificamos el asentamiento mediante el ensayo de cono de Abrams. Verificamos que los moldes con sus bases se encuentren limpios y su superficie interior debe estar cuidadosamente aceitada. Colocamos el molde sobre una superficie estable, horizontal, nivelada y libre de vibración. Luego vertimos la mezcla de concreto en el interior del molde, depositándolo con cuidado alrededor del borde para asegurar la correcta distribución del concreto y una baja segregación. Llenamos el molde hasta un tercio de su altura, compactando a continuación de manera enérgica con la varilla mediante 25 golpes verticales, uniformemente repartidos en forma de espiral, comenzando por el borde y terminando en el centro. El proceso se repite en las siguientes dos capas, de manera que la varilla penetre hasta la capa precedente no más de 1". En la última capa se debe colocar material en exceso, para enraizar a tope con el borde superior del molde, sin agregar material. Después de terminar de consolidar cada capa, procedemos a golpear suavemente con el mazo de goma de 10 a 15 veces las paredes del molde para lograr liberar las burbujas de aire que puedan estar atrapadas (en caso de no contar con el mazo de

goma, se puede utilizar la varilla de acero), enrasamos el exceso de mezcla de concreto con la varilla de compactación. Debe darse el menor número de pasadas para obtener una superficie lisa y acabada. Posteriormente identificamos los especímenes con la información correcta respecto a la fecha, tipo de mezcla y lugar de colocación. Hay que proteger correctamente la cara descubierta de los moldes con telas humedecidas o membranas plásticas para evitar la pérdida de agua por evaporación. Después de elaboradas las probetas serán transportadas al lugar de almacenamiento donde deberán permanecer sin ser perturbados durante el periodo de curado inicial. Si la parte superior de la probeta resultase dañada durante el traslado es necesario realizar nuevamente el acabado. Las probetas se retirarán de los moldes entre las 18 y 24 horas después de fabricadas. Se marcarán en la cara circular de la probeta lo que anteriormente se anotó en la tarjeta de identificación del molde. Luego se debe pasar a curar las probetas. Después de desmoldar las probetas y antes de que transcurran 30 minutos de haber quitado los moldes, almacenamos las probetas en condiciones adecuadas de humedad, cubriéndolas con agua a una temperatura de entre 23°C y 25°C. El agua utilizada será potable y limpia, no se encontrarán en movimiento y cubrirá por completo todas las caras de la probeta.

3.11.4.2 Elaboración de probetas de concreto permeable con mucílago de nopal

Para la elaboración de estas probetas nos basamos en la norma NTP 339.183, añadiendo el mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) en los diferentes porcentajes establecidos anteriormente. El procedimiento se describe a continuación.

Procedimiento de elaboración.

Pesamos los materiales obtenidos en el diseño de mezcla. Luego agregamos los materiales, pesados anteriormente, en el trompo; vertimos el 1% de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en peso cemento a la mezcla para obtener el concreto que se verterá en los moldes. Hacemos lo mismo con el 3% y 5% de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-*

indica) en peso cemento. Verificamos que los moldes y bases se encuentren limpios y aceitados para luego colocarlos sobre una superficie estable, horizontal, nivelada y libre de vibración. Colocamos la mezcla en el interior del molde, depositándolo con cuidado alrededor del borde para asegurar la correcta distribución del concreto y una segregación mínima. Luego llenamos el molde hasta un tercio de su altura, compactando a continuación de manera enérgica con la varilla mediante 25 golpes verticales, uniformemente repartidos en forma de espiral, comenzando por el borde y terminando en el centro. El proceso se repite en las siguientes dos capas, de manera que la varilla penetre hasta la capa precedente no más de 1". En la última capa se coloca material en exceso, para enraizar a tope con el borde superior del molde, sin agregar material. Después de consolidar cada capa, procedemos a golpear de 10 a 15 veces las paredes del molde ligeramente con el mazo de goma para liberar las burbujas de aire que puedan estar atrapadas (es usual dar pequeños golpes con la varilla de fierro en caso de no contar con el mazo de goma) y enrasamos el exceso de concreto con la varilla de compactación. Debe darse el menor número de pasadas para obtener una superficie lisa y acabada. Identificamos los especímenes con la información correcta respecto a la fecha, tipo de mezcla y lugar de colocación. Hay que proteger adecuadamente la cara descubierta de los moldes con telas humedecidas o películas plásticas para evitar la pérdida de agua por evaporación. Después de elaboradas las probetas se transportarán al lugar de almacenamiento donde deberán permanecer sin ser perturbados durante el periodo de curado inicial. Si la parte superior de la probeta se daña durante el traslado se debe dar nuevamente el acabado. Las probetas se retirarán de los moldes entre las 18 y 24 horas después de moldeadas. Se marcarán en la cara circular de la probeta las anotaciones de la tarjeta de identificación del molde. Luego de esto deben pasar a curado. Finalmente desmoldamos los especímenes de concreto y antes de que transcurran 30 minutos después de haber removido los moldes, almacenamos las probetas en condiciones adecuadas de

humedad, siempre cubiertas por agua a una temperatura de entre 23°C y 25°C. El agua utilizada será potable y limpia, no se encontrarán en movimiento y cubrirá por completo todas las caras de la probeta.

3.11.5 Ensayos realizados al concreto permeable

3.11.5.1 Ensayos en estado fresco

a. Peso unitario del concreto permeable NTP 339.046

Procedimiento de ensayo.

Llenamos el recipiente hasta un tercio de su capacidad y la masa del hormigón se compacta con el número de golpes indicados. Del mismo modo se proceden en las dos capas restantes, cuidando que esta última tenga un ligero exceso. Al compactar la primera capa, la barra no debe golpear el fondo del recipiente. Al ejecutar en la segunda y tercera capa se aplica la fuerza necesaria para hacer que la barra penetre ligeramente en la superficie de la capa anterior. Los golpes de la compactación se distribuyen uniformemente sobre la sección. Cuando se use un recipiente de 14 dm³ (1/2 pie³), cada capa se compactará con 25 golpes, y cuando se use el recipiente de 28 dm³ (1 pie³) cada capa se compactará con 50 golpes. Luego golpeamos la superficie exterior de 10 a 15 veces o hasta que no aparezcan burbujas de aire en ella. Después, la superficie se alisa y termina con una placa de cubierta plana, teniendo mucho cuidado de dejar el recipiente lleno justo hasta su nivel superior. Finalmente limpiamos el material adherido en las paredes externas y luego pesamos el recipiente lleno con aproximación de 50 gramos.

b. Asentamiento del concreto permeable NTP 339.035

Procedimiento de ensayo.

Se coloca el molde sobre una superficie plana y humedecida, manteniéndose estática las aletas del molde. Luego se vierte una capa de mezcla de concreto hasta un tercio del

molde y se comprime con la varilla de acero, aplicando 25 golpes, distribuidos uniformemente. Seguidamente se colocan otras dos capas con el mismo procedimiento a un tercio del volumen y consolidando, de manera que la barra penetre en la capa inmediata inferior. La tercera capa se llenará en exceso, para luego enrasar al término de la consolidación en dirección vertical. El concreto moldeado fresco se asentará, la diferencia entre la altura del molde y la altura de la mezcla fresca se denomina slump o revenimiento. Se calcula que desde el inicio de la operación hasta el término no deben transcurrir más de 2 minutos de los cuales el proceso de desmolde no toma más de cinco segundos.

c. Contenido de aire del concreto permeable NTP 339.046

Procedimiento de ensayo.

Llenamos el recipiente hasta un tercio de su capacidad y la masa del concreto se compacta con 25 golpes. De la misma manera se proceden con las dos capas restantes, cuidando que la última tenga un ligero exceso. Al compactar la primera capa, la barra no debe golpear el fondo del recipiente. Al compactar la segunda y tercera capa se aplica la fuerza necesaria para hacer que la barra penetre ligeramente en la superficie de la capa anterior. Los golpes de la compactación se distribuyen uniformemente sobre la sección. Cuando se use un recipiente de $\frac{1}{2}$ pie³, cada capa se compactará con 50 golpes. La superficie exterior del recipiente se golpea con cuidado de 10 a 15 veces o hasta que no aparezcan burbujas grandes de aire en la superficie de la capa compactada. Luego la superficie superior se alisa y termina con un aplaca de cubierta plana, teniendo mucho cuidado de dejar el recipiente lleno justo hasta su nivel superior. El material adherido en las paredes externas se limpia y luego el recipiente lleno se pesa con aproximación de 50 gramos.

3.11.5.2 Ensayos en estado endurecido

a. Resistencia a la compresión del concreto permeable NTP 330.034

Procedimiento de ensayo.

En primer lugar, es necesario limpiar cuidadosamente las superficies planas de contacto de los bloques superior e inferior de la máquina y también ambas bases de cada probeta. Luego se ubica el espécimen de concreto sobre el bloque inferior de apoyo, y se centra sobre la superficie del mismo, tratando que la probeta quede en el centro con el bloque superior. Se aplicará la velocidad de carga continua y constante, desde el inicio hasta producir la rotura de la probeta registrando el valor de la carga máxima y el tipo de fractura. Se podrá aplicar una velocidad de carga inicial mayor hasta llegar a la mitad de carga resistente esperada, luego reducirla a velocidad continua y constante, hasta producir la rotura de la probeta. En los momentos finales del ensayo, cuando la probeta se deforma rápidamente, no se debe modificar la velocidad de aplicación de la carga.

b. Resistencia a la tracción por compresión diametral del concreto permeable NTP 339.084

Procedimiento de ensayo.

Se colocan los listones de apoyo, un listón de apoyo a lo largo del centro de la placa inferior. Se pone el cilindro sobre el listón, de tal manera que el punto de tangencia de las dos bases esté centrado sobre la lámina de apoyo. Se coloca el segundo listón longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo en forma similar al anterior. Luego se aplica la carga al cilindro en forma continua evitando impactos, a velocidad constante comprendida entre 7 daN/cm²/min y 15 daN/cm²/min hasta la rotura. La velocidad de aplicación de carga indicada para cilindros normales está comprendida entre 5000 y 1 0000 daN/m/min.

c. Permeabilidad ACI 522R

Procedimiento de ensayo.

El ACI 522R-10 nos da pautas para realizar este ensayo y poder medir el coeficiente de permeabilidad de los especímenes de concreto elaborados en laboratorio, para ello es esencial hacer uso del equipo de permeabilidad. Para la fabricación de este equipo se ensambla una serie de tubos PVC de 1" a la tubería en donde se ubica la probeta cilíndrica de prueba, esta tubería debe tener una altura de 30 cm y el mismo diámetro de la probeta, esta debe envolverse con plástico y/o látex antes de ser introducida en la tubería con el fin de evitar el flujo del agua a lo largo de sus lados. Encima de la tubería se ubica un cilindro de acrílico de 30 cm de longitud, que es donde se va a especificar la altura del agua, el mismo que debe ir acoplado con abrazaderas junto con la probeta de ensayo, la válvula que permite el paso del agua se ubica entre la tubería que contiene la probeta y la tubería de desagüe. Además, el extremo de esta última se debe encontrar a 1 cm más de la altura superior de la probeta a ensayar. Una vez que se tiene listo el equipo de permeabilidad, se abre la válvula de agua y se introduce la probeta de concreto permeable envuelta con plástico y látex dentro de la tubería PVC. Luego se coloca el tubo de acrílico encima y se sella con ayuda de abrazaderas, para evitar que se filtre el agua al exterior. Una vez lleno el agua en el tubo acrílico, se procede a abrir la válvula, y se espera hasta que el agua salga por la tubería de desagüe.

d. Tramo de prueba de concreto permeable

El tramo de prueba que se realizó para evaluar la permeabilidad, fue elaborado aplicando los mismos criterios de diseño de mezcla que se usó en la elaboración de las probetas. Los cuales son: relación a/c = 0.35, contenido de vacíos = 16.30%, porcentaje de agregado fino = 10% y volumen de pasta = 24.5%, con la adición de 1% de mucílago de nopal (*Opuntia ficus – indica*). Se elaboró un área de 1.20 m².

Procedimiento

En primer lugar, pesamos los materiales obtenidos en el diseño de mezcla y lo agregamos al trompo. Una vez terminado este proceso, se vacía la mezcla obtenida en el encofrado de 1.20 m². Conforme se va vaciando, se debe distribuir la mezcla en el área de trabajo. Luego, se nivela la mezcla con pequeñas compactaciones para lograr una superficie uniforme y estable. Al terminar el nivelado, se procederá a realizar el curado, que consiste en cubrir la superficie con plástico color claro, de un espesor de aproximadamente 0.15 mm. El plástico debe permanecer sobre la superficie mínimo durante 7 días. Al cumplir los 7 días de curado se realiza el ensayo de permeabilidad, que consiste en vaciar agua sobre la superficie de concreto permeable, y calcular cuánto tiempo demora en filtrarse el agua. Para calcular la permeabilidad, se usó la ecuación brindada por el ACI 522R:

$$k = A/t = 19.2/115 = 0.17 \text{ cm/s}$$

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Ensayos del concreto en estado fresco

5.1.1 Asentamiento

En el Gráfico 4, se presentan los resultados obtenidos del asentamiento del concreto permeable. El concreto permeable base (Mezcla Tipo I) presenta el mayor asentamiento, las demás mezclas de concreto con adición de mucílago de nopal tienen un asentamiento de 0.30 cm; todas las mezclas son de consistencia seca, por tener asentamientos entre el rango de 0” a 2” (Abanto, 2014). La Norma ACI 522R (2010), menciona que el asentamiento máximo es 2 cm, por lo que los resultados están dentro del rango establecido.

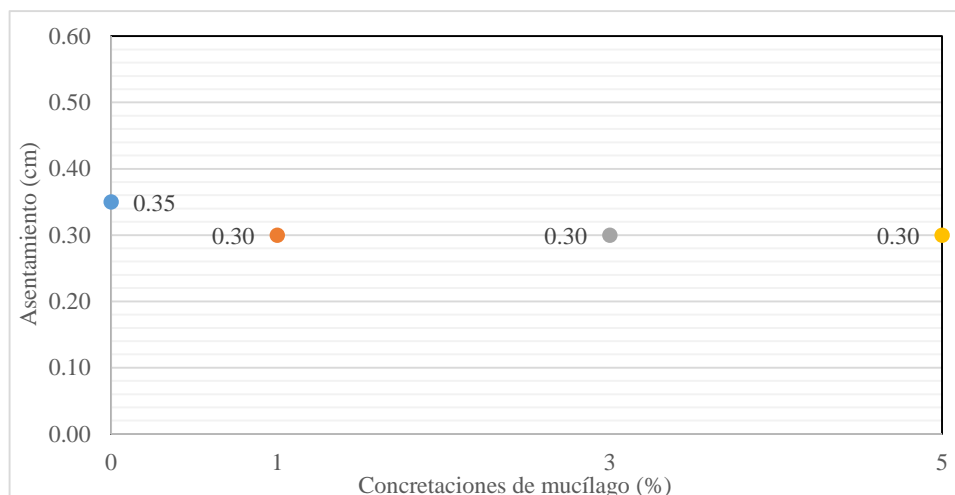


Gráfico 4. Asentamiento vs Porcentajes de Mucílago de Nopal.

5.1.2 Peso Unitario

El Gráfico 5, muestra que el mayor peso unitario es del concreto permeable base (Mezcla Tipo I) con un valor de 2012.67 kg/m³. Los tres tipos de mezcla que contienen mucílago de nopal (1, 3 y 5 %) presentan comportamientos similares a los resultados de investigaciones realizadas por Pérez (2009), Moujir & Castañeda (2014) y Porras (2017) que muestran un rango entre 1970 a 2010 kg/m³.

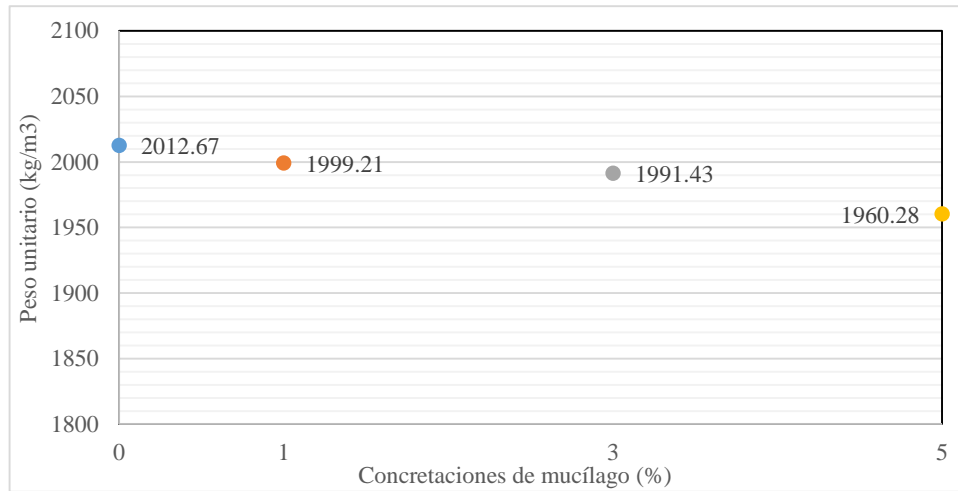


Gráfico 5. Peso unitario vs Porcentaje de Mucílago de Nopal.

5.1.3 Contenido de vacíos

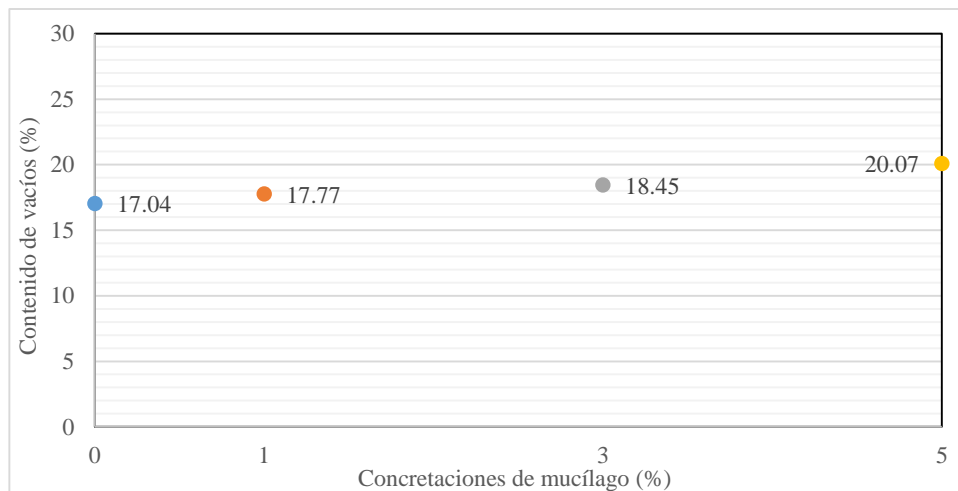


Gráfico 6. Contenido de vacíos vs Porcentaje de Mucílago de Nopal.

El contenido de vacíos presentado en el Gráfico 6, muestra que el mayor porcentaje de vacíos lo tiene el concreto permeable con adición del 5 % de mucílago de nopal (Mezcla Tipo IV) con un valor de 20.07 %, estando en el rango de 13 a 20 % (Pérez, 2019; Moujir & Castañeda, 2014 y Porras, 2017).

5.2 Ensayos del concreto en estado endurecido

5.2.1 Resistencia a la compresión

A los siete días el concreto permeable presentó una resistencia a la compresión dentro del rango de 78.10 a 178.55 kg/cm². Siendo la mezcla con 1% de mucílago de nopal (Mezcla Tipo II), el que alcanzó un mayor resultado (Gráfico 7).

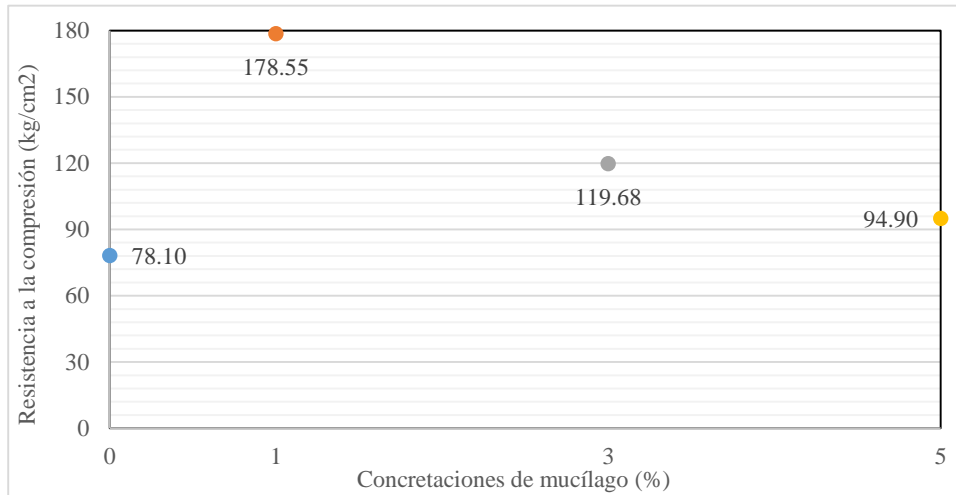


Gráfico 7. Resistencia a la compresión vs Porcentajes de Mucílago de Nopal a los 7 días.

El Gráfico 8, presenta los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días. El concreto permeable base (Mezcla Tipo I) logró un $f^c=188.85$ kg/cm². En cambio, el concreto con más mucilago de nopal (5 %) logró una resistencia de $f^c=202.87$ kg/cm².

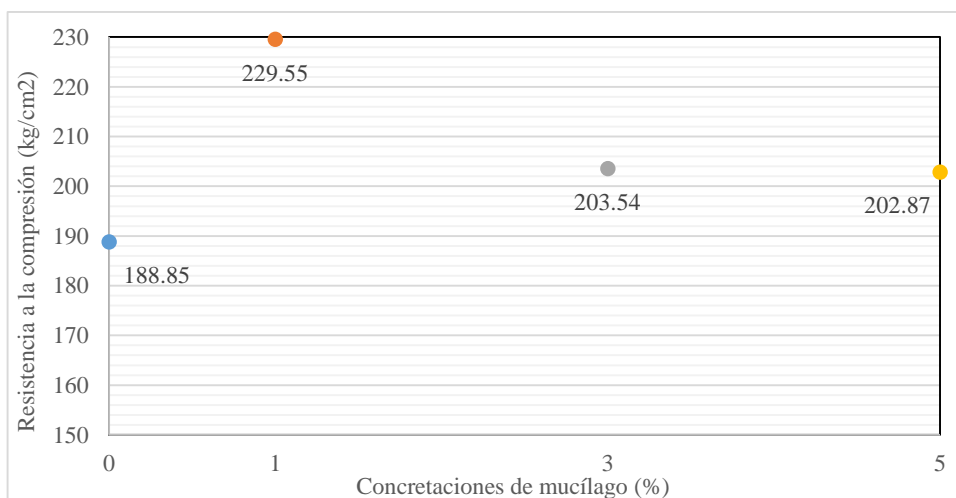


Gráfico 8. Resistencia a la compresión vs Porcentajes de Mucílago de Nopal a los 28 días.

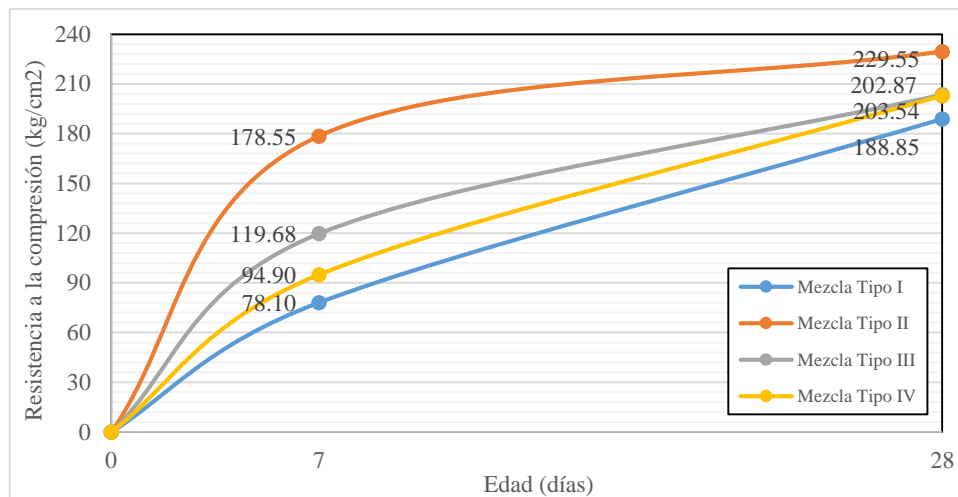


Gráfico 9. Evolución de la resistencia con respecto al tiempo.

En el Gráfico 9 se presentan los resultados de las resistencias a compresión que alcanza el concreto permeable con respecto a su edad (7 y 28 días). Al séptimo día el concreto permeable base (Mezcla Tipo I) alcanza aproximadamente un 40 % de su resistencia final. En cambio, el concreto permeable con adiciones de mucílago de nopal tiene significativas variaciones con respecto al porcentaje de adición. Las mezclas con adiciones de mucílago 1 %, 3 % y 5 % (Mezcla Tipo II, Mezcla Tipo III y Mezcla Tipo IV respectivamente) superan en resistencia inicial al concreto base con un 50 % a 80 % de la resistencia final.

La mayor resistencia a la compresión es de 229.55 kg/cm² y se obtuvo utilizando 1% de mucílago de nopal en peso cemento (Mezcla Tipo II). En segundo lugar, se tiene la mezcla con adición del 3% en peso cemento de mucílago de nopal (Mezcla Tipo III), con el cual se obtiene una resistencia a la compresión promedio de 203.34 kg/cm². En tercer lugar, se tiene la mezcla de concreto permeable con 5 % de mucílago de nopal (Mezcla Tipo IV), con una resistencia promedio de 202.87 kg/cm² y por último la mezcla con sin ninguna adición de mucílago de nopal (Mezcla Tipo I) con el cual se obtiene la resistencia de 188.85 kg/cm². Entonces se puede establecer que la mezcla óptima es la que contiene el 1 % de mucílago de nopal, la que nos dará mejores resultados con respecto a la resistencia a la compresión.

En cuanto a resistencia a la compresión respecta, se puede concluir que los valores alcanzados guardan relación a la resistencia que se pretendía alcanzar cuando se realizó el diseño de mezcla, el cual fue de 210 kg/cm^2 . Además, estas resistencias se encuentran dentro del rango esperado de 28 a 280 kg/cm^2 (2.8 a 28 MPa) brindado por el ACI 522R (2010).

Al momento de realizar este ensayo, se pudo observar el tipo de falla que presentaron los especímenes de concreto al momento de su ruptura, estas fueron variadas y no se encontró una relación exacta para poder analizar. Conos razonablemente bien formados en ambos extremos (Tipo 1), como bien formado sobre su base, con desplazamientos verticales (Tipo 2), fisuras verticales columnadas en ambos extremos (Tipo 3), hasta fracturas en los lados de las partes superior o inferior (Tipo 5) se pudieron identificar en las probetas ensayadas, siendo la falla Tipo 3 la que se presentó en mayores ocasiones, representando un 55 % del total de probetas.

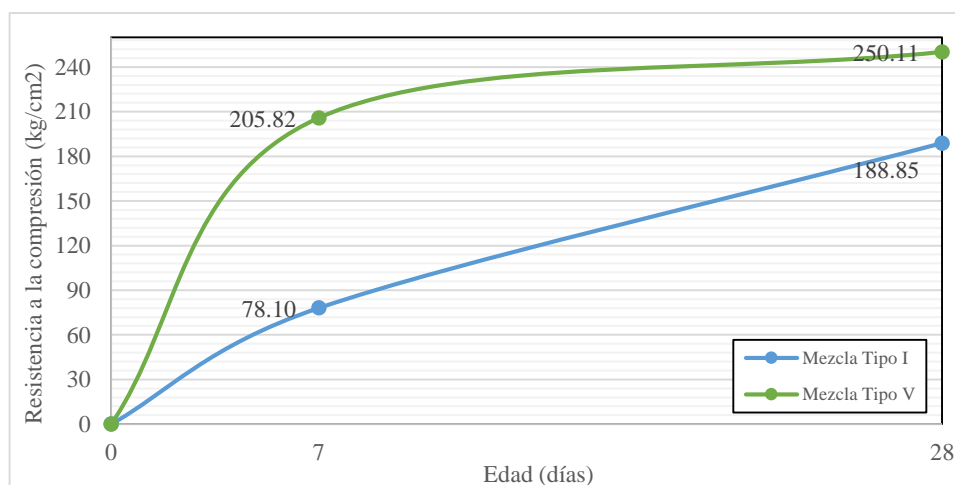


Gráfico 10. Evolución de la resistencia con respecto al tiempo.

En el Gráfico 10 se presentan los valores de las resistencias a compresión que alcanza el concreto permeable base y concreto convencional con respecto a su edad (7 y 28 días). El concreto permeable a comparación del concreto convencional, tiene una menor resistencia a la compresión, debido al bajo contenido de finos, y al alto contenido de vacíos. A los 7 días

el concreto permeable alcanza aproximadamente un 40 % de la resistencia final, en cambio el concreto convencional obtiene un 80% de esta resistencia.

5.2.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral

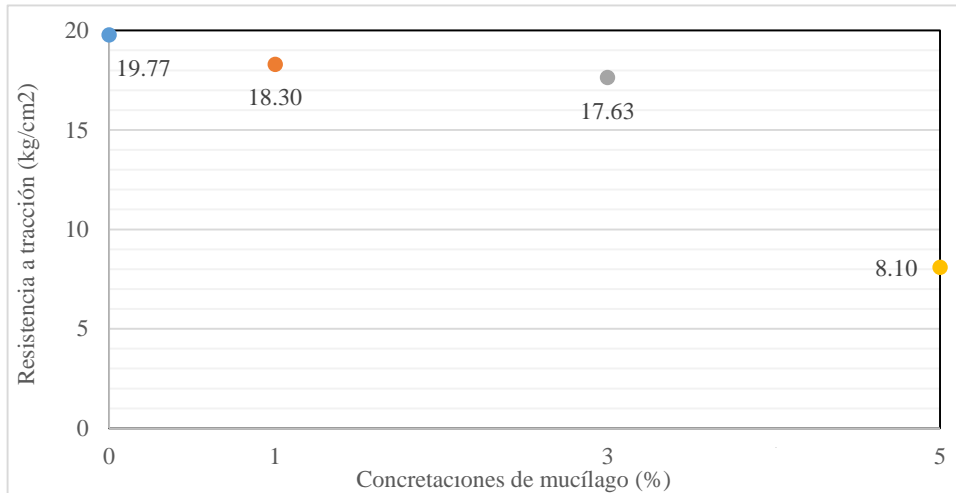


Gráfico 11. Resistencia a la tracción por compresión diametral vs Porcentaje de Mucílago de Nopal a los 7 días.

La menor resistencia obtenida fue de la mezcla con 5 % de mucílago de nopal (Mezcla Tipo IV). Mientras que la mezcla sin adición de mucílago de nopal (Mezcla Tipo I), obtuvo una mayor resistencia de 19.77 kg/cm² (Gráfico 11).

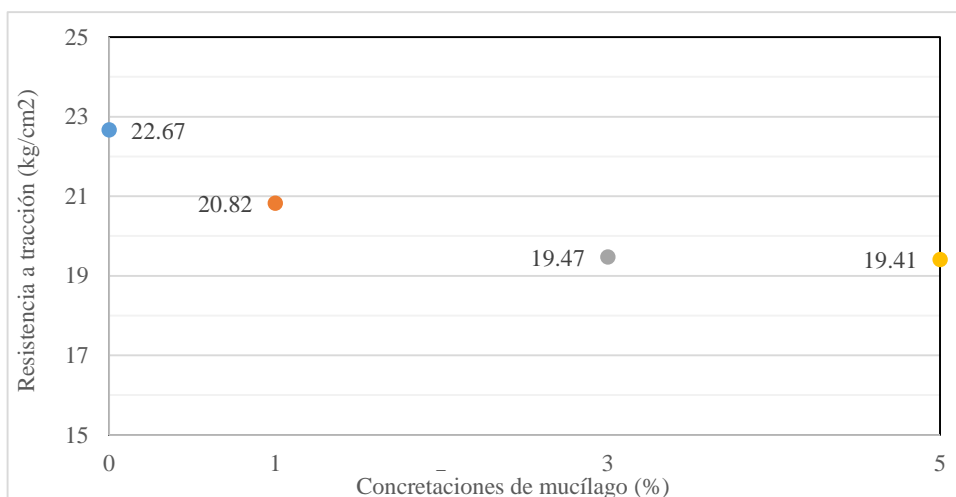


Gráfico 12. Resistencia a la tracción por compresión diametral vs Porcentaje de Mucílago de Nopal a los 28 días.

Los valores más altos obtenidos fueron del concreto permeable base (Mezcla Tipo I) y del concreto con 1 % de mucílago de nopal (Mezcla Tipo II), con 22.67 kg/cm² y

20.82 kg/cm², respectivamente (Gráfico 12). Estos resultados corroboran las investigaciones de Perez (2009), León & Rosero (2016) y Porras (2017), que obtuvieron como resultados 20.00, 34.50 y 14.50 kg/cm² respectivamente.

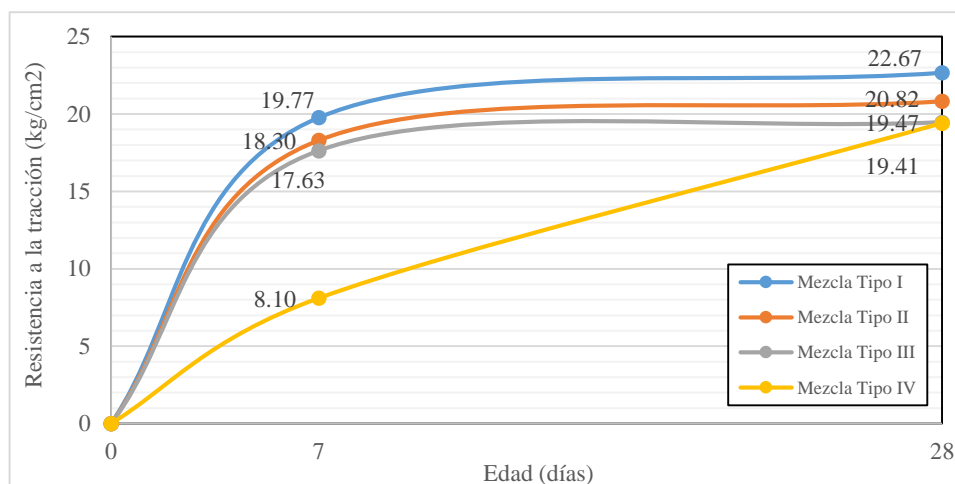


Gráfico 13. Evolución de la resistencia a la tracción con respecto al tiempo.

Con respecto a la resistencia a la tracción indirecta (Gráfico 13), el concreto permeable sin adición de mucílago a los 28 días obtiene una resistencia de 22.67 kg/cm², superior a las mezclas que contienen mucílago de nopal (1 %, 3 % y 5 % en peso cemento). Por otro lado, se puede contrastar que las probetas elaboradas con 1 %, 3 % y 5 % de mucílago de nopal, alcanzan resistencias similares al concreto permeable base (Mezcla Tipo I) con una resistencia de 20.82, 19.47 y 19.41 kg/cm² respectivamente. Los resultados obtenidos se encuentran de 19.41 a 22.67 kg/cm² el cual confirma la posición de Dash & Kar (2018), quienes señalan que la resistencia a la tracción se encuentra entre 1 a 3 Mpa.

5.2.3 Permeabilidad

En el Gráfico 14 se presenta los resultados obtenidos con respecto a la permeabilidad a los 28 días del concreto permeable. Se puede observar, que a medida que el contenido de adición de mucílago de nopal aumenta, la permeabilidad va disminuyendo. Sin embargo, los valores obtenidos se encuentran entre 0.22 a 0.77 cm/s (132 a 462 L/min/m²) cumpliendo

con lo establecido por el ACI 522R (2010) que menciona que la permeabilidad se encuentra entre 0.14 a 1.22 cm/s (81 a 730 L/min/m²).

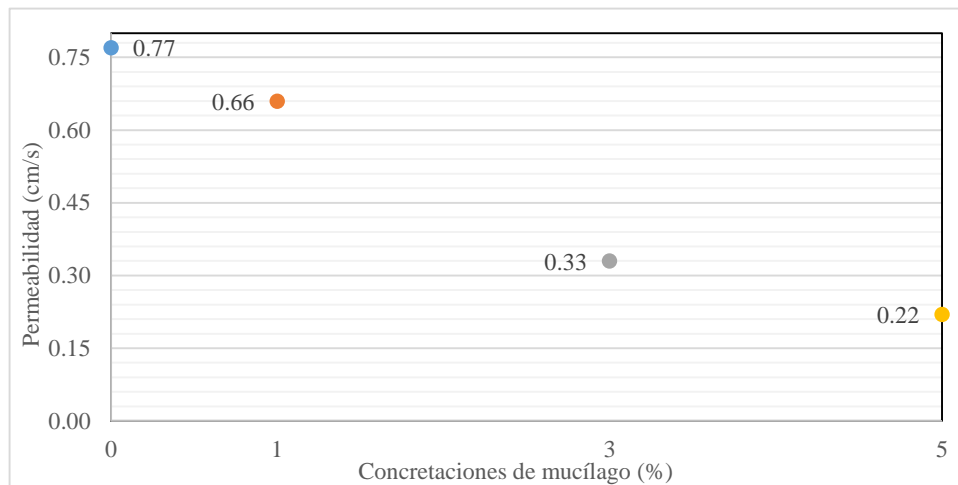


Gráfico 14. Permeabilidad vs Porcentajes de Mucílago de Nopal.

3.11.5.3 Tramo de prueba

El resultado obtenido en el tramo de prueba presenta una permeabilidad de $k = 0.17$ cm/s (102 L/min/m²), este resultado cumple con lo establecido por el ACI 522R que menciona que la permeabilidad se encuentra en el rango de 81 a 730 L/min/m².

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De los resultados obtenidos en la presente investigación se concluye, que la adición de mucílago de nopal en el diseño de mezcla del concreto permeable con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ no afecta en el asentamiento de la mezcla, pero con respecto al peso unitario, hace que disminuya. El contenido de vacíos aumenta a comparación del concreto permeable base. También, mejora la propiedad de resistencia a la compresión, en cambio, los resultados que presenta la resistencia a la tracción y permeabilidad tienen tendencias a ir disminuyendo a medida que se va aumentando la cantidad de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*), pero cumplen con los parámetros establecidos por el ACI 522-R. Por tal motivo, después de evaluar los resultados, el porcentaje óptimo de mucílago de nopal es de 1 % en peso cemento.

Con respecto al asentamiento se concluyó que en todos los diseños de mezcla de concreto permeable realizados, se obtuvo una consistencia seca, con un asentamiento de 0.30 cm para las mezclas con adición de mucílago de nopal y 0.35 cm respecto al concreto permeable base.

El resultado mayor de peso unitario fue de 2012.67 kg/m^3 , que corresponde a la mezcla de concreto permeable sin adición de mucílago de nopal (Mezcla Tipo I).

Se concluyó que la mezcla con 5 % de mucílago de nopal, obtuvo el mayor resultado de contenido de vacíos con un 20.07 %.

Con respecto a la resistencia a la compresión se concluye que la adición del 1 % de mucílago de nopal con respecto al peso del cemento, incrementa la resistencia a la compresión con un resultado de 229.55 kg/cm^2 ; por otro lado, la adición del 5 % de mucílago de nopal en la mezcla disminuye la resistencia a la compresión obteniendo como resultado 202.87 kg/cm^2 .

También respecto a la resistencia a la tracción por compresión diametral se concluye que adicionando 1, 3 y 5 % de mucílago de nopal, la resistencia a la tracción solo llega a un 92 % aproximadamente de la resistencia obtenida del concreto permeable base (Mezcla Tipo D). Con 1 % de mucílago de nopal, se obtuvo una resistencia de 20.82 kg/cm²; con 3 % de mucílago, la resistencia a la tracción fue de 19.47 kg/cm², y finalmente con 5% de mucílago de nopal la resistencia fue la más baja, con un resultado de 19.41 kg/cm².

Por otro lado, se concluye que conforme se va aumentando la adición de mucílago de nopal en sus tres concentraciones (1 %, 3 % y 5 %), la permeabilidad va disminuyendo, pero cabe mencionar que dichos resultados cumplen con lo establecido en el ACI 522R-10 (0.14 a 1.22 cm/s) o (81 a 730 L/min/m²). Los resultados obtenidos fueron 0.66, 0.33 y 0.22 cm/s (396, 198 y 132 L/min/m²) respectivamente.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda utilizar en el diseño de mezcla del concreto permeable un 10 % de agregado fino respecto al peso del agregado grueso porque ayuda a generar mayor área de contacto entre las partículas.

Se recomienda mezclar el mucílago de nopal en el agua a usar en la mezcla, para lograr una mejor distribución en el proceso de mezclado. También, es necesario, que al terminar de realizar el mezclado el moldeo debe ser rápido, que no exceda los 5 min.

REFERENCIAS

- Abanto, F. (2014). “Propiedades del concreto”. *Tecnología del concreto: teoría y problemas*. 6ta ed. Lima: Editorial San Marcos E.I.R.L. 47-58 pp. ISBN 978-612-302-060-6
- Abraján, M. (2008). Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Aire, C. sf. “Concreto Permeable: alternativas sustentables. Construcción y tecnología del concreto”. *Construcción y Tecnología de Concreto*. Consultado en: <http://www.imcyc.com/revistacyt/jun11/arttecnologia.htm#>
- Amaya, J. (2009). Cultivo de tuna (*opuntia ficus-indica*). Trujillo: Gerencia Regional AgrariaLaLibertad.
- Aoki, Y. (2009). Development of Pervious Concrete (Tesis de Master). University of Technology, Sydney.
- Aquino, R. (2015). Diseño y aplicación de concreto ecológico con fibras de polipropileno para pavimentos rígidos (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Arauco, S. (2010). Estudio de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido utilizando cemento de la República Dominicana Quisqueya Pórtland – Tipo I (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Barahona, R.; Martínez, M. & Zelaya, S. (2013). Comportamiento del concreto permeable utilizando agregado grueso de las canteras, el Carmen, Aramuaca y la Pedrera, de la

zona oriental de El Salvador (Tesis de Pregrado). Universidad de El Salvador, San Miguel.

Benites, J. (2014). Características físicas y mecánicas del concreto permeable usando agregados de la cantera río Jequetepeque y el aditivo chemaplast (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.

Cabello, S.; Campuzano, L.; Espinoza, J. & Sánchez, C. (2015). “Concreto poroso: constitución, variables influyentes y protocolos para su caracterización”. Cumbres: Revista Científica, 1 (1), 64-69 pp. ISSN: 1390-954

Cardona, H. (2017). Propiedades mecánicas y de filtración en hormigones permeables con cemento portland e hidráulicos (Tesis de Pregrado). Universidad San Francisco de Quito, Quito.

Chopra, M.; Mulligan, A. & Wanielista, M. (2007). Compressive strength of pervious concrete pavements. Orlando: Stormwater Management Academy, University of Central Florida.

Dash, S. & Kar, B. (2018). Environment pervious concrete for sustainable construction. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

De León, R. (2012). Evaluación de mucílago de nopal como reductor de retracción en concreto auto-consolidable (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León.

Espinoza, C. (2006). Ley de Darcy. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/38247261/Hidraulica-de-Aguas-Subterranas-y-Su-Aprovechamiento>

- FAO & ICARDA. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Recuperado de:
<http://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>. ISBN 978-92-5-130494-5
- Flores, C. & Pacompia, I. (2015). Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de plástico para pavimentos $f'c$ 175 kg/cm² en la ciudad de Puno (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Fernández, R. & Navas, A. (2010). Concreto Permeable. Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. 40-49 pp.
- González, J. (2015). Estudio y evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto polímero permeable para su utilización en proyectos con fines ambientales (Tesis de Pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Guizado, A. & Curi, E. (2017). Evaluación del concreto permeable como una alternativa para el control de las aguas pluviales en vías locales y pavimentos especiales de la costa noroeste del Perú (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Guzmán, L. & Chávez, J. (2007). “Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-índica*) para el consumo humano”. Revista de la Sociedad Química del Perú, 73 (1), 41-45 pp. ISSN: 1810-634X
- Harmsen, T. (2005). Diseño de estructuras en concreto armado. 4ta ed. Lima: Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. ISBN 9972-42-730-7
- Joung, Y. (2008). Evaluation and optimization of pervious concrete with respect to permeability and clogging (Tesis de Master). Universidad de Texas, Texas.

- Játiva, F. (2014). Desarrollo de hormigones permeables enfocado al diseño de mezclas, construcción de obras y a la protección ambiental, basado en las normas ACI, ASTM e INEN (Tesis de pregrado). Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Julián, F. (2008). Secado, absorción de agua y difusión de cloruros en concreto conteniendo extracto de nopal (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Santa Cruz Xoxocotlán.
- León, C. & Rosero, G. (2016). Optimización del diseño de una mezcla de hormigón permeable a partir de tres distintas gradaciones (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito.
- López, E. (2010). Control de calidad y colocación de concretos permeables. Propiedades del concreto permeable (Tesis de Pregrado). Universidad Autónoma de México, México D.F.
- Loyo, M. (2018). Evaluación de los efectos del uso del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) y la temperatura en la clarificación de juego de caña sobre el color de la panela (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra.
- Lozada, M. (2015). Efecto de la temperatura y tiempo de extracción en el rendimiento y color del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-índica*) (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Kosmatka, S.; Kerkhoff, B.; Panarese, W. & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. 1era ed. Skokie, Illinois: Portland Cement Association. Recuperado de: https://www.academia.edu/29059360/PCA_Dise%C3%B1o_y_Control_de_Mezclas_de_Concreto

- Meneses, C. & Bravo, C. (2007). Resistencia mecánica y condiciones de obra del concreto poroso en los pavimentos según el tipo de granulometría (Tesis de pregrado). Universidad de Medellín, Medellín.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Manual de ensayo de materiales. Recuperado de: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Moujir, Y. & Castañeda, L. (2014). Diseño y aplicación de concreto poroso para pavimentos (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Santiago de Cali.
- National Ready Mixed Concrete Association. (2008). Pervious Concrete. Silver Spring, EE.UU.
- NTP 334.009. (1997). Cementos. Cemento Portland. Requisitos. 1ra ed. Lima, 30 de junio.
- NTP 400.017. (1999). Agregados. Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado. 2da ed. Lima, 21 de abril.
- NTP 334.001. (2001). Cementos. Definiciones y nomenclatura. 2da ed. Lima, 21 de marzo.
- NTP 400.012. (2001). Agregados. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. 2da ed. Lima, 31 de mayo.
- NTP 400.037. (2001). Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en hormigón (concreto). 2da ed. Lima, 14 de febrero.
- NTP 400.022. (2006). Hormigón (Concreto). Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos. 2da ed. Lima, 16 de febrero.

- NTP 339.034. (2008). Hormigón (Concreto). Método de ensayo normalizado para determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas. 3ra ed. Lima, 02 de enero.
- NTP 339.035. (2008). Hormigón (Concreto). Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de cemento Portland. 3ra ed. Lima, 23 de diciembre.
- NTP 339.046. (2008). Hormigón (Concreto). Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón (concreto). 2da ed. Lima, 03 de setiembre.
- NTP 400.011. (2008). Agregados. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos). 2da ed. Lima, 12 de diciembre.
- NTP 339.185. (2013). Agregados. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. 2da ed. Lima, 07 de agosto.
- NTP 400.021. (2013). Agregados. Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado grueso. 2da ed. Lima, 16 de mayo.
- NTP 400.022. (2013). Agregados. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y la absorción del agregado fino. 3ra ed. Lima, 26 de diciembre.
- Núñez, F. (2015). Fabricación de hormigón permeable para canchas de uso múltiple con la utilización de agregados de la provincia de Pichincha (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- Ortega, Á. (2015). Estudio de una mezcla en concreto con estructura drenante fabricado con agregados de las fuentes de abastecimiento del municipio de Ipiales (Tesis de Pregrado). Universidad de Nariño, San Juan de Pasto.

- Pacheco, L. (2017). Propiedades del concreto en estado fresco y endurecido (Tesis de Pregrado). Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua.
- Plasencia, K. & Saravia, P. (2016). Influencia del porcentaje de vacíos sobre la trabajabilidad en estado fresco y la resistencia a la compresión en estado endurecido de un concreto permeable.
- Perez, J. (2017). Influencia de la granulometría del agregado grueso en las propiedades mecánicas e hidráulicas de un concreto permeable, Trujillo 2017 (Tesis de Pregrado). Universidad Privada del Norte, Trujillo.
- Pérez, D. (2009). Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Porras, J. (2017). Metodología de diseño para concretos permeables y sus respectivas correlaciones de permeabilidad (Tesis de Pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Primo, C. (2014). Efecto de la adición de extracto de paleta de tuna (opuntia ficus-indica) en la resistencia a compresión del concreto (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Puchuri, A. (2010). Actualización de la correlación entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión del concreto usando cemento andino tipo I (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Quiroz, M. & Salamanca, L. (2006). Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje en la asignatura de “Tecnología del Hormigón” (Tesis de Licenciatura). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.

- Quispe, I. & Ticona, E. (2017). Influencia de la incorporación de fibras de polipropileno en concreto permeable $f'c=210$ kg/cm² (Tesis de Pregrado). Universidad Peruana Unión, Juliaca.
- Ramírez, S. (2008). Propiedades mecánicas y microestructura de concreto conteniendo mucílago de nopal como aditivo natural (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Santa Cruz Xoxocotlán.
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2017). Norma E.060 Concreto Armado. 11va ed. Lima: Grupo Editorial Megabyte.
- Silva, M. (2017). Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Tennis, P.; Leming, M. & Akers, D. (2004). Pervious concrete pavements. Illinois: Portland Cement Association.
- Torre, A. (2004). Curso básico de tecnología del concreto. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.
- Torres, A.; Celis, C.; Martínez, W. & Lomelí, M. (2010). Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas. México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado de: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt326.pdf> ISSN 0188-7297

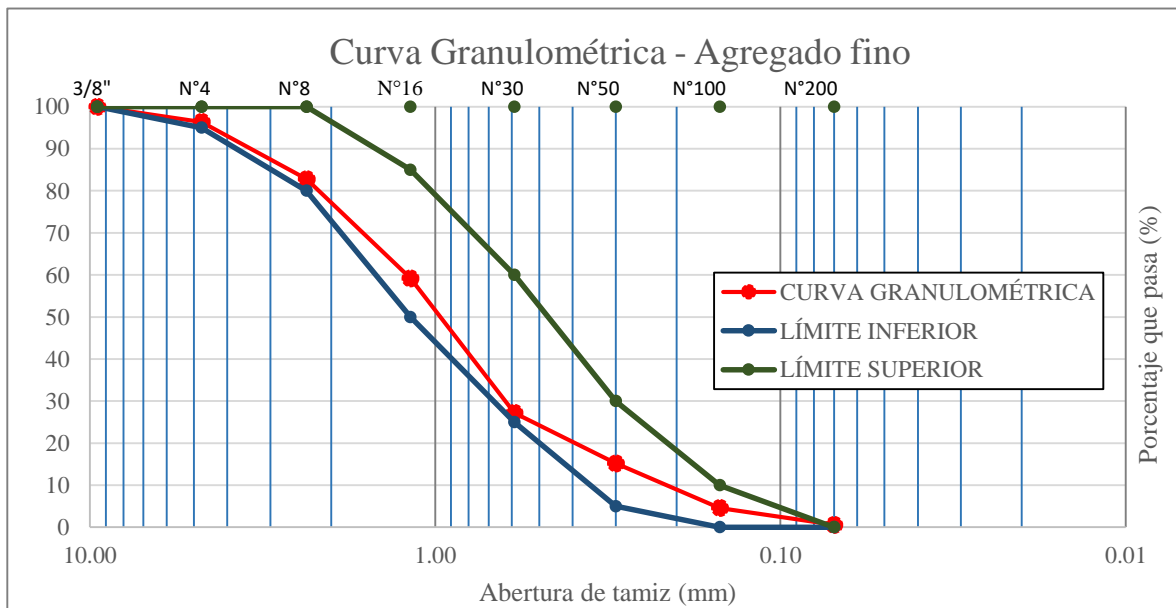
ANEXOS

Anexo A. Propiedades de los agregados

Anexo A.1. Agregado fino

1. Análisis granulométrico

| ENSAYO | | ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO NTP 400.012 | | | | | |
|------------------|-------|--|--------------------|----------------------|------------|----------------------|--------|
| Tamiz | | Peso retenido (g) | % retenido parcial | % retenido acumulado | % que pasa | | |
| (pulg) | (mm) | | | | A. Fino | Especificación (NTP) | |
| 3/8" | 9.525 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| N°4 | 4.75 | 18.00 | 3.60 | 3.60 | 96.40 | 95.00 | 100.00 |
| N°8 | 2.36 | 68.00 | 13.60 | 17.20 | 82.80 | 80.00 | 100.00 |
| N°16 | 1.18 | 118.00 | 23.60 | 40.80 | 59.20 | 50.00 | 85.00 |
| N°30 | 0.59 | 160.00 | 32.00 | 72.80 | 27.20 | 25.00 | 60.00 |
| N°50 | 0.30 | 60.00 | 12.00 | 84.80 | 15.20 | 5.00 | 30.00 |
| N°100 | 0.15 | 53.00 | 10.60 | 95.40 | 4.60 | 0.00 | 10.00 |
| N°200 | 0.07 | 20.00 | 4.00 | 99.40 | 0.60 | 0.00 | 0.00 |
| Fondo | - | 3.00 | 0.60 | 100.00 | 0.00 | | |
| Total | | 500.00 | | | | | |
| Módulo de finura | | 3.146 | | | | | |



2. Peso específico y absorción

| ENSAYO | PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN NTP 400.022 | | | | |
|--|--|--------|--------|----------|-------------------|
| Descripción | Ensayos | | | | Unidad |
| | M-01 | M-02 | M-03 | Promedio | |
| Masa de tara: | 212.00 | 221.00 | 134.00 | - | g |
| Masa de la muestra secada al horno + tara: | 704.00 | 714.00 | 627.00 | - | g |
| Masa de la muestra secada al horno: D | 492.00 | 493.00 | 493.00 | - | g |
| Masa de la muestra saturada superficialmente seca + peso del frasco: B | 648.00 | 647.00 | 648.00 | - | g |
| Masa de la fiola + muestra sss + agua: A | 945.00 | 949.00 | 949.00 | - | g |
| Peso del agua: C=A-B | 297.00 | 302.00 | 301.00 | - | g |
| Volumen de fiola: E | 500.00 | 500.00 | 500.00 | - | g/cm ³ |
| Peso específico de masa: $Pem=[D/(E-C)]$ | 2.42 | 2.49 | 2.48 | 2.46 | g/cm ³ |
| Peso específico de masa sss: $Pesss=[500/(E-C)]$ | 2.46 | 2.53 | 2.51 | 2.50 | g/cm ³ |
| Peso específico aparente: $Pea=[D/((E-C)-(500-D))]$ | 2.52 | 2.58 | 2.57 | 2.56 | g/cm ³ |
| Absorción: $[(500-D)/D] * 100$ | 1.63 | 1.42 | 1.42 | 1.49 | % |

3. Peso unitario suelto y compactado

| ENSAYO | PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTADO NTP 400.017 | | | | | | |
|-----------------------------------|--|---------|---------|--------------------------|---------|---------|-------------------|
| Descripción | Agregado fino suelto | | | Agregado fino compactado | | | Unidad |
| | M-01 | M-02 | M-03 | M-01 | M-02 | M-03 | |
| Peso del recipiente: T | 4.857 | 4.857 | 4.857 | 4.857 | 4.857 | 4.857 | kg |
| Peso del recipiente + material: G | 20.144 | 20.065 | 19.969 | 21.464 | 21.513 | 21.658 | kg |
| Volumen del recipiente: V | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | m ³ |
| Peso unitario: $M=(G-T)/V$ | 1352.83 | 1345.84 | 1337.35 | 1469.65 | 1473.98 | 1486.81 | kg/m ³ |
| Peso unitario promedio | 1345.339 | | | 1476.814 | | | kg/m ³ |

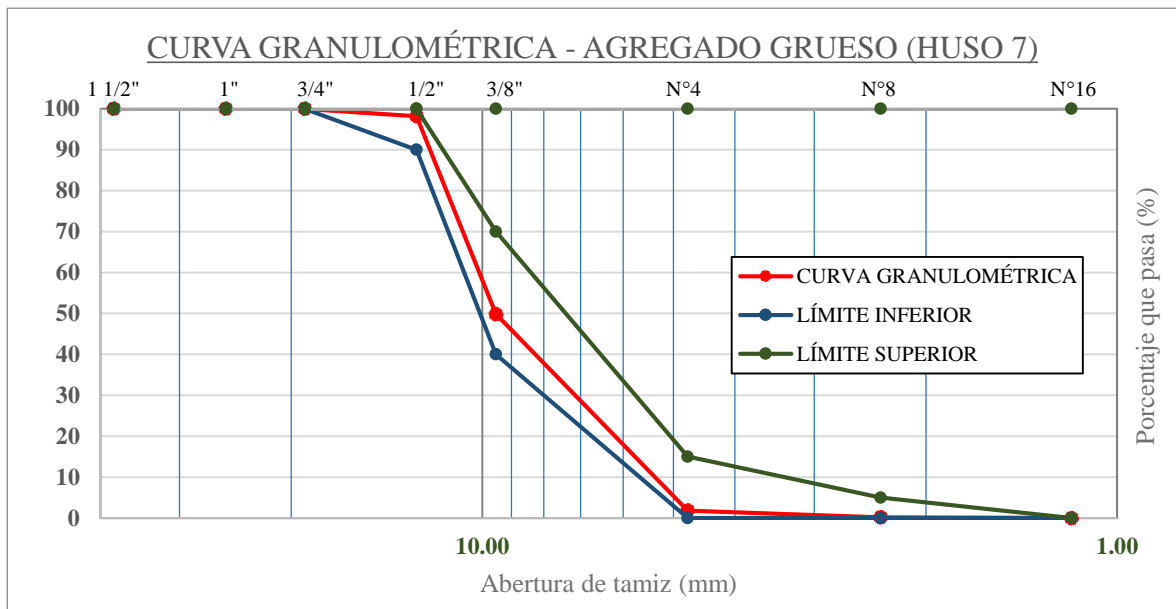
4. Contenido de humedad

| ENSAYO | CONTENIDO DE HUMEDAD NTP 339.185 | | | |
|---|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
| | M-01 | M-02 | M-03 | |
| Peso del recipiente | 210.00 | 220.00 | 217.00 | g |
| Peso de M. húmeda + Recipiente: W | 710.00 | 720.00 | 717.00 | g |
| Peso de M. seca + Recipiente: D | 703.00 | 703.00 | 710.00 | g |
| Contenido de humedad: $P=[(W-D)/D]*100$ | 1.00 | 2.42 | 0.99 | % |
| Contenido de humedad promedio | 1.47 | | | % |

Anexo A.2. Agregado grueso (Huso 7)

1. Análisis granulométrico

| ENSAYO | | ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO NTP 400.012 | | | | | |
|-----------------------------|-------|--|--------------------|----------------------|------------|----------------------|--------|
| Tamiz | | Peso retenido (g) | % retenido parcial | % retenido acumulado | % que pasa | | |
| (pulg) | (mm) | | | | A. Grueso | Especificación (NTP) | |
| 1 1/2" | 38.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1" | 25.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 3/4" | 19.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1/2" | 12.70 | 108.00 | 1.80 | 1.80 | 98.20 | 90.00 | 100.00 |
| 3/8" | 9.53 | 2903.00 | 48.38 | 50.18 | 49.82 | 40.00 | 70.00 |
| N°4 | 4.75 | 2880.00 | 48.00 | 98.18 | 1.82 | 0.00 | 15.00 |
| N°8 | 2.36 | 99.00 | 1.65 | 99.83 | 0.17 | 0.00 | 5.00 |
| N°16 | 1.18 | 10.00 | 0.17 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| N°30 | 0.59 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | | |
| N°50 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | | |
| N°100 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | | |
| Fondo | - | 0.00 | 0.00 | 98.18 | 1.82 | | |
| Total | | 6000.00 | | | | | |
| Módulo de finura | | 6.5 | | | | | |
| Tamaño Máximo (TM) | | 3/4" | | | | | |
| Tamaño Máximo Nominal (TMN) | | 1/2" | | | | | |



2. Peso específico y absorción

| ENSAYO | PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN NTP 400.021 | | | | |
|--|--|---------|---------|----------|-------------------|
| Descripción | Ensayos | | | | Unidad |
| | M-01 | M-02 | M-03 | Promedio | |
| Peso de tara: D | 231.00 | 227.00 | 213.00 | - | g |
| Peso de la muestra secada al horno + tara: E | 3180.00 | 3172.00 | 3160.00 | - | g |
| Peso de la muestra secada al horno: A | 2949.00 | 2945.00 | 2947.00 | - | g |
| Peso de la muestra saturada superficialmente seca: B | 3000.00 | 3000.00 | 3000.00 | - | g |
| Peso de la muestra saturada: C | 1950.00 | 1910.00 | 1910.00 | - | g |
| Peso específico de masa: $P_{em}=A/(B-C)$ | 2.81 | 2.70 | 2.70 | 2.74 | g/cm ³ |
| Peso específico de masa sss: $P_{ess}=B/(B-C)$ | 2.86 | 2.75 | 2.75 | 2.79 | g/cm ³ |
| Peso específico aparente: $P_{ea}=A/(A-C)$ | 2.95 | 2.85 | 2.84 | 2.88 | g/cm ³ |
| Absorción: $[(B-A)/A] \times 100$ | 1.73 | 1.87 | 1.80 | 1.80 | % |

3. Peso unitario suelo y compactado

| ENSAYO | PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTADO NTP 400.017 | | | | | | |
|--|--|---------|---------|----------------------------|---------|---------|-------------------|
| Descripción | Agregado grueso suelto | | | Agregado grueso compactado | | | Unidad |
| | M-01 | M-02 | M-03 | M-01 | M-02 | M-3 | |
| Peso del recipiente: (kg) (T) | 4.857 | 4.857 | 4.857 | 4.857 | 4.857 | 4.857 | kg |
| Peso del recipiente + material: G (kg) | 18.028 | 17.698 | 17.809 | 18.908 | 18.560 | 18.670 | kg |
| Volumen del recipiente: V (m3) | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | m3 |
| Peso unitario: $M=(G-T)/V$ (kg/m3) | 1165.58 | 1136.37 | 1146.20 | 1243.42 | 1212.66 | 1222.39 | kg/m ³ |
| Peso unitario promedio (kg/m3) | 1149.381 | | | 1226.165 | | | kg/m ³ |

4. Contenido de humedad

| ENSAYO | CONTENIDO DE HUMEDAD NTP 339.185 | | | |
|--|-------------------------------------|---------|---------|--------|
| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
| | M-01 | M-02 | M-03 | |
| Peso del recipiente: (g) | 217.00 | 95.00 | 94.00 | g |
| Peso de M. húmeda + Recipiente: W (g) | 3217.00 | 3095.00 | 3094.00 | g |
| Peso de M. seca + Recipiente: D (g) | 3202.00 | 3080.00 | 3078.00 | g |
| Contenido de humedad: $P=[(W-D)/D] \times 100$ (%) | 0.47 | 0.49 | 0.52 | % |
| Contenido de humedad promedio | 0.49 | | | % |

Anexo B. Ensayos del concreto

Anexo B.1. Asentamiento

| | | | |
|-------------------|--|--------|--|
| ENSAYO | REVENIMIENTO - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL | | |
| Descripción | Valor | Unidad | |
| Asentamiento (cm) | 7.62 | cm | |
| ENSAYO | REVENIMIENTO - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE | | |
| Descripción | Valor | Unidad | |
| Asentamiento (cm) | 0.35 | cm | |
| ENSAYO | REVENIMIENTO - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | |
| Descripción | Valor | Unidad | |
| Asentamiento (cm) | 0.30 | cm | |
| ENSAYO | REVENIMIENTO - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | |
| Descripción | Valor | Unidad | |
| Asentamiento (cm) | 0.30 | cm | |
| ENSAYO | REVENIMIENTO - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | |
| Descripción | Valor | Unidad | |
| Asentamiento (cm) | 0.30 | cm | |

Anexo B.2. Peso unitario

| | | | | |
|--|--|----------|----------|-------------------|
| ENSAYO | PESO UNITARIO - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL | | | |
| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
| | M-01 | M-02 | M-03 | |
| Masa del recipiente de medida + concreto: Mc | 25.90 | 25.90 | 26.06 | kg |
| Masa del recipiente de medida: Mm | 4.821 | 4.821 | 4.821 | kg |
| Volumen de recipiente: Vm | 0.00942 | 0.00942 | 0.00942 | m ³ |
| Peso unitario: $D=(Mc-Mm)/Vm$ | 2238.510 | 2238.510 | 2255.502 | kg/m ³ |
| Promedio de peso unitario | 2244.17 | | | kg/m ³ |
| ENSAYO | PESO UNITARIO - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE | | | |
| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
| | M-04 | M-05 | M-06 | |
| Masa del recipiente de medida + concreto: Mc | 23.70 | 23.82 | 23.80 | kg |
| Masa del recipiente de medida: Mm | 4.821 | 4.821 | 4.821 | kg |

| | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|-------------------|
| Volumen de recipiente: Vm | 0.00942 | 0.00942 | 0.00942 | m ³ |
| Peso unitario: D=(Mc-Mm)/Vm | 2004.879 | 2017.622 | 2015.498 | kg/m ³ |
| Promedio de peso unitario | 2012.67 | | | kg/m ³ |

| | | | | |
|--------|--|--|--|--|
| ENSAYO | PESO UNITARIO - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | |
|--------|--|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|--|----------|----------|----------|-------------------|
| | M-07 | M-08 | M-09 | |
| Masa del recipiente de medida + concreto: Mc | 23.56 | 23.46 | 23.92 | kg |
| Masa del recipiente de medida: Mm | 4.821 | 4.821 | 4.821 | kg |
| Volumen de recipiente: Vm | 0.00942 | 0.00942 | 0.00942 | m ³ |
| Peso unitario: D=(Mc-Mm)/Vm | 1990.011 | 1979.391 | 2028.242 | kg/m ³ |
| Promedio de peso unitario | 1999.21 | | | kg/m ³ |

| | | | | |
|--------|---|--|--|--|
| ENSAYO | PESO UNITARIO - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | |
|--------|---|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|--|----------|----------|----------|-------------------|
| | M-10 | M-11 | M-12 | |
| Masa del recipiente de medida + concreto: Mc | 23.34 | 23.42 | 23.96 | kg |
| Masa del recipiente de medida: Mm | 4.821 | 4.821 | 4.821 | kg |
| Volumen de recipiente: Vm | 0.00942 | 0.00942 | 0.00942 | m ³ |
| Peso unitario: D=(Mc-Mm)/Vm | 1966.648 | 1975.144 | 2032.490 | kg/m ³ |
| Promedio de peso unitario | 1991.43 | | | kg/m ³ |

| | | | | |
|--------|--|--|--|--|
| ENSAYO | PESO UNITARIO - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | |
|--------|--|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|--|----------|----------|----------|-------------------|
| | M-13 | M-14 | M-15 | |
| Masa del recipiente de medida + concreto: Mc | 23.54 | 23.16 | 23.14 | kg |
| Masa del recipiente de medida: Mm | 4.821 | 4.821 | 4.821 | kg |
| Volumen de recipiente: Vm | 0.00942 | 0.00942 | 0.00942 | m ³ |
| Peso unitario: D=(Mc-Mm)/Vm | 1987.887 | 1947.533 | 1945.409 | kg/m ³ |
| Promedio de peso unitario | 1960.28 | | | kg/m ³ |

Anexo B.3. Contenido de vacíos

| | | | | |
|--------|--|--|--|--|
| ENSAYO | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL | | | |
|--------|--|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|---------|---------|---------|-------------------|
| | M-16 | M-17 | M-18 | |
| Masa total de todos los materiales: M | 2245.24 | 2245.24 | 2245.24 | kg |
| Volumen absoluto total de los materiales: Vs | 0.98 | 0.98 | 0.98 | m ³ |
| Rendimiento: Y=M/Vs | 2302.81 | 2302.81 | 2302.81 | m ³ |
| Peso unitario del concreto: D | 2238.51 | 2238.51 | 2255.50 | kg/m ³ |
| Contenido de aire en el concreto: A=[(Y-D)/Y]x100 | 2.792 | 2.792 | 2.054 | % |
| Promedio de contenido de aire | 2.546 | | | % |

| | | | | |
|--------|---|--|--|--|
| ENSAYO | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE | | | |
|--------|---|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|---------|---------|---------|-------------------|
| | M-19 | M-20 | M-21 | |
| Masa total de todos los materiales: M | 1664.28 | 1664.28 | 1664.28 | kg |
| Volumen absoluto total de los materiales: Vs | 0.69 | 0.69 | 0.69 | m ³ |
| Rendimiento: Y=M/Vs | 2425.97 | 2425.97 | 2425.97 | m ³ |
| Peso unitario del concreto: D | 2004.88 | 2017.62 | 2015.50 | kg/m ³ |
| Contenido de aire en el concreto: A=[(Y-D)/Y]x100 | 17.36 | 16.83 | 16.92 | % |
| Promedio de contenido de aire | 17.04 | | | % |

| | | | | |
|--------|--|--|--|--|
| ENSAYO | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | |
|--------|--|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|---------|---------|---------|-------------------|
| | M-22 | M-23 | M-24 | |
| Masa total de todos los materiales: M | 1667.93 | 1667.93 | 1667.93 | kg |
| Volumen absoluto total de los materiales: Vs | 0.69 | 0.69 | 0.69 | m ³ |
| Rendimiento: Y=M/Vs | 2431.30 | 2431.30 | 2431.30 | m ³ |
| Peso unitario del concreto: D | 1990.01 | 1979.39 | 2028.24 | kg/m ³ |
| Contenido de aire en el concreto: A=[(Y-D)/Y]x100 | 18.15 | 18.59 | 16.58 | % |
| Promedio de contenido de aire | 17.77 | | | % |

| | | | | |
|--------|---|--|--|--|
| ENSAYO | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | |
|--------|---|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|---------|---------|---------|-------------------|
| | M-25 | M-26 | M-27 | |
| Masa total de todos los materiales: M | 1675.24 | 1675.24 | 1675.24 | kg |
| Volumen absoluto total de los materiales: Vs | 0.69 | 0.69 | 0.69 | m ³ |
| Rendimiento: Y=M/Vs | 2441.95 | 2441.95 | 2441.95 | m ³ |
| Peso unitario del concreto: D | 1966.65 | 1966.65 | 1966.65 | kg/m ³ |
| Contenido de aire en el concreto: A=[(Y-D)/Y]x100 | 19.46 | 19.12 | 16.77 | % |
| Promedio de contenido de aire | 18.45 | | | % |

| | | | | |
|--------|--|--|--|--|
| ENSAYO | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | |
|--------|--|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|---------|---------|---------|-------------------|
| | M-28 | M-29 | M-30 | |
| Masa total de todos los materiales: M | 1682.55 | 1682.55 | 1682.55 | kg |
| Volumen absoluto total de los materiales: Vs | 0.69 | 0.69 | 0.69 | m ³ |
| Rendimiento: Y=M/Vs | 2452.60 | 2452.60 | 2452.60 | m ³ |
| Peso unitario del concreto: D | 1987.89 | 1947.53 | 1945.41 | kg/m ³ |
| Contenido de aire en el concreto: A=[(Y-D)/Y]x100 | 18.95 | 20.59 | 20.68 | % |
| Promedio de contenido de aire | 20.07 | | | % |

Anexo B.4. Resistencia a la compresión

| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL | | | | | | | | | | |
|--|----|---------------|----------|----------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| ENSAYO | N° | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| | 01 | Espécimen 001 | 19-07-19 | 26-07-19 | 7 | 15.21 | 30.49 | 181.70 | 36041.09 | 198.36 |
| | 02 | Espécimen 002 | 19-07-19 | 26-07-19 | 7 | 15.14 | 30.47 | 180.03 | 37346.07 | 207.45 |
| | 03 | Espécimen 003 | 19-07-19 | 26-07-19 | 7 | 15.26 | 30.26 | 182.89 | 38713.20 | 211.67 |
| | 04 | Espécimen 004 | 19-07-19 | 16-08-19 | 28 | 15.14 | 30.39 | 180.03 | 46608.43 | 258.89 |
| | 05 | Espécimen 005 | 19-07-19 | 16-08-19 | 28 | 15.20 | 30.71 | 181.46 | 45694.44 | 251.82 |
| | 06 | Espécimen 006 | 19-07-19 | 16-08-19 | 28 | 15.23 | 30.57 | 182.18 | 43654.64 | 239.63 |
| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE | | | | | | | | | | |
| ENSAYO | N° | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| | 01 | Espécimen 007 | 16-07-19 | 23-07-19 | 7 | 15.00 | 30.00 | 176.71 | 11296.16 | 63.92 |
| | 02 | Espécimen 008 | 16-07-19 | 23-07-19 | 7 | 15.26 | 30.86 | 182.89 | 11721.18 | 64.09 |
| | 03 | Espécimen 009 | 16-07-19 | 23-07-19 | 7 | 15.16 | 30.01 | 180.50 | 19184.94 | 106.29 |
| | 04 | Espécimen 010 | 16-07-19 | 13-08-19 | 28 | 14.95 | 30.14 | 175.54 | 30833.39 | 175.65 |
| | 05 | Espécimen 011 | 16-07-19 | 13-08-19 | 28 | 15.31 | 30.65 | 184.09 | 36690.63 | 199.30 |
| | 06 | Espécimen 012 | 16-07-19 | 13-08-19 | 28 | 15.15 | 30.25 | 180.27 | 34536.07 | 191.58 |
| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | | | | | | |
| ENSAYO | N° | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| | 01 | Espécimen 013 | 23-07-19 | 30-07-19 | 7 | 15.33 | 30.20 | 184.58 | 30138.95 | 163.29 |
| | 02 | Espécimen 014 | 23-07-19 | 30-07-19 | 7 | 15.35 | 30.49 | 185.06 | 31646.23 | 171.01 |
| | 03 | Espécimen 015 | 23-07-19 | 30-07-19 | 7 | 15.32 | 30.78 | 184.33 | 37116.56 | 201.35 |
| | 04 | Espécimen 016 | 23-07-19 | 20-08-19 | 28 | 15.12 | 30.92 | 179.55 | 53729.83 | 299.24 |
| | 05 | Espécimen 017 | 23-07-19 | 20-08-19 | 28 | 15.01 | 30.57 | 176.95 | 33481.92 | 189.22 |
| | 06 | Espécimen 018 | 23-07-19 | 20-08-19 | 28 | 15.34 | 30.46 | 184.82 | 36997.72 | 200.19 |
| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | | | | | | |
| ENSAYO | N° | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| | 01 | Espécimen 019 | 25-07-19 | 01-08-19 | 7 | 15.88 | 30.16 | 198.06 | 23159.07 | 116.93 |
| | 02 | Espécimen 020 | 25-07-19 | 01-08-19 | 7 | 15.23 | 30.58 | 182.18 | 23488.83 | 128.94 |
| | 03 | Espécimen 021 | 25-07-19 | 01-08-19 | 7 | 15.19 | 30.61 | 181.22 | 20511.14 | 113.18 |
| | 04 | Espécimen 022 | 25-07-19 | 22-08-19 | 28 | 15.26 | 30.86 | 182.89 | 41411.52 | 226.42 |
| | 05 | Espécimen 023 | 25-07-19 | 22-08-19 | 28 | 15.26 | 30.75 | 182.89 | 32082.38 | 175.42 |
| | 06 | Espécimen 024 | 25-07-19 | 22-08-19 | 28 | 15.30 | 30.92 | 183.85 | 38385.4 | 208.78 |

| ENSAYO | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | | | | |
|--------|--|----------|----------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Nº | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| 01 | Espécimen 025 | 26-07-19 | 02-08-19 | 7 | 15.05 | 30.30 | 177.89 | 9800.32 | 55.09 |
| 02 | Espécimen 026 | 26-07-19 | 02-08-19 | 7 | 15.30 | 30.48 | 183.85 | 20400.32 | 110.96 |
| 03 | Espécimen 027 | 26-07-19 | 02-08-19 | 7 | 15.11 | 30.24 | 179.32 | 21273.94 | 118.64 |
| 04 | Espécimen 028 | 26-07-19 | 23-08-19 | 28 | 15.21 | 30.94 | 181.70 | 36939.66 | 203.30 |
| 05 | Espécimen 029 | 26-07-19 | 23-08-19 | 28 | 15.12 | 30.33 | 179.55 | 35131.18 | 195.66 |
| 06 | Espécimen 030 | 26-07-19 | 23-08-19 | 28 | 15.02 | 30.43 | 177.19 | 37145.03 | 209.64 |

Anexo B.5. Resistencia a la tracción

| ENSAYO | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE | | | | | | | | |
|--------|---|----------|----------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Nº | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| 01 | Espécimen 031 | 16-07-19 | 23-07-19 | 7 | 15.37 | 30.65 | 185.54 | 14197.44 | 19.19 |
| 02 | Espécimen 032 | 16-07-19 | 23-07-19 | 7 | 15.20 | 30.84 | 181.46 | 15090.56 | 20.49 |
| 03 | Espécimen 033 | 16-07-19 | 23-07-19 | 7 | 15.23 | 30.82 | 182.18 | 14479.12 | 19.64 |
| 04 | Espécimen 034 | 16-07-19 | 13-08-19 | 28 | 15.32 | 30.56 | 184.33 | 16484.45 | 22.42 |
| 05 | Espécimen 035 | 16-07-19 | 13-08-19 | 28 | 15.33 | 30.59 | 184.58 | 16323.43 | 22.16 |
| 06 | Espécimen 036 | 16-07-19 | 13-08-19 | 28 | 15.24 | 30.49 | 182.41 | 17095.90 | 23.42 |

| ENSAYO | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | | | | |
|--------|--|----------|----------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Nº | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| 01 | Espécimen 037 | 23-07-19 | 30-07-19 | 7 | 15.30 | 30.52 | 183.85 | 13797.83 | 18.81 |
| 02 | Espécimen 038 | 23-07-19 | 30-07-19 | 7 | 15.24 | 30.50 | 182.41 | 13685.34 | 18.74 |
| 03 | Espécimen 039 | 23-07-19 | 30-07-19 | 7 | 15.19 | 30.68 | 181.22 | 12706.48 | 17.36 |
| 04 | Espécimen 040 | 23-07-19 | 20-08-19 | 28 | 15.05 | 30.18 | 177.89 | 13879.47 | 19.45 |
| 05 | Espécimen 041 | 23-07-19 | 20-08-19 | 28 | 14.76 | 30.34 | 171.10 | 15275.18 | 21.72 |
| 06 | Espécimen 042 | 23-07-19 | 20-08-19 | 28 | 15.26 | 30.82 | 182.89 | 15739.20 | 21.30 |

| ENSAYO | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | | | | |
|--------|---|----------|----------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Nº | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| 01 | Espécimen 043 | 25-07-19 | 01-08-19 | 7 | 15.13 | 30.88 | 179.79 | 12778.60 | 17.41 |
| 02 | Espécimen 044 | 25-07-19 | 01-08-19 | 7 | 15.54 | 30.95 | 189.67 | 15343.22 | 20.31 |
| 03 | Espécimen 045 | 25-07-19 | 01-08-19 | 7 | 15.19 | 30.94 | 181.22 | 11201.92 | 15.17 |
| 04 | Espécimen 046 | 25-07-19 | 22-08-19 | 28 | 15.32 | 30.56 | 184.33 | 14962.65 | 20.35 |
| 05 | Espécimen 047 | 25-07-19 | 22-08-19 | 28 | 15.07 | 30.85 | 178.37 | 14927.72 | 20.44 |
| 06 | Espécimen 048 | 25-07-19 | 22-08-19 | 28 | 14.97 | 30.68 | 176.01 | 12716.46 | 17.63 |

| ENSAYO | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | | | | |
|--------|--|----------|----------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| N° | Descripción | Fecha | | Edad (días) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) | Lectura dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) |
| | | Moldeo | Rotura | | | | | | |
| 01 | Espécimen 049 | 26-07-19 | 02-08-19 | 7 | 15.21 | 30.46 | 181.70 | 6187.45 | 8.50 |
| 02 | Espécimen 050 | 26-07-19 | 02-08-19 | 7 | 15.39 | 30.43 | 186.02 | 5683.97 | 7.73 |
| 03 | Espécimen 051 | 26-07-19 | 02-08-19 | 7 | 15.21 | 30.53 | 181.70 | 5887.63 | 8.07 |
| 04 | Espécimen 052 | 26-07-19 | 23-08-19 | 28 | 15.25 | 30.42 | 182.65 | 14585.72 | 20.02 |
| 05 | Espécimen 053 | 26-07-19 | 23-08-19 | 28 | 15.39 | 30.59 | 186.02 | 10711.13 | 14.48 |
| 06 | Espécimen 054 | 26-07-19 | 23-08-19 | 28 | 15.17 | 30.86 | 180.74 | 17447.43 | 23.73 |

Anexo B.6. Permeabilidad

| ENSAYO | PERMEABILIDAD - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL | | | |
|--------|--|--|--|--|
|--------|--|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|--|----------|-----------|-----------|-----------------|
| | Esp. 055 | Esp. 056 | Esp. 057 | |
| Diámetro de la muestra: D | 15.38 | 15.34 | 15.15 | cm |
| Altura de la muestra: L | 30.64 | 30.32 | 30.55 | cm |
| Área de la muestra: A | 185.78 | 184.82 | 180.27 | cm ² |
| Diámetro del tubo cilíndrico graduado: D ₁ | 15.24 | 15.24 | 15.24 | cm |
| Altura del tubo cilíndrico graduado: L ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Área del tubo cilíndrico graduado: a | 182.41 | 182.41 | 182.41 | cm ² |
| Tiempo que demora en pasar de h ₁ a h ₂ : t | 144000.0 | 1512000.0 | 1476000.0 | s |
| Altura del agua en el tubo al inicio de la prueba: h ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Altura del agua en el tubo al final de la prueba: h ₂ | 10.00 | 10.00 | 10.00 | cm |
| Coeficiente de permeabilidad: $k=[(L/t) \times (a/A)] \times \ln(h_1/h_2)$ | 0.00023 | 0.00002 | 0.00002 | cm/s |
| Promedio de coeficiente de permeabilidad | 0.0001 | | | cm/s |

| ENSAYO | PERMEABILIDAD - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE | | | |
|--------|---|--|--|--|
|--------|---|--|--|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|--|----------|----------|----------|-----------------|
| | Esp. 058 | Esp. 059 | Esp. 060 | |
| Diámetro de la muestra: D | 15.16 | 15.32 | 15.05 | cm |
| Altura de la muestra: L | 30.50 | 30.39 | 30.01 | cm |
| Área de la muestra: A | 180.50 | 184.33 | 177.89 | cm ² |
| Diámetro del tubo cilíndrico graduado: D ₁ | 15.24 | 15.24 | 15.24 | cm |
| Altura del tubo cilíndrico graduado: L ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Área del tubo cilíndrico graduado: a | 182.41 | 182.41 | 182.41 | cm ² |
| Tiempo que demora en pasar de h ₁ a h ₂ : t | 128.10 | 149.90 | 128.30 | s |
| Altura del agua en el tubo al inicio de la prueba: h ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Altura del agua en el tubo al final de la prueba: h ₂ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | cm |
| Coeficiente de permeabilidad: $k=[(L/t) \times (a/A)] \times \ln(h_1/h_2)$ | 0.82 | 0.68 | 0.82 | cm/s |
| Promedio de coeficiente de permeabilidad | 0.77 | | | cm/s |

| | |
|--------|--|
| ENSAYO | PERMEABILIDAD - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL |
|--------|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|----------|----------|----------|-----------------|
| | Esp. 061 | Esp. 062 | Esp. 063 | |
| Diámetro de la muestra: D | 15.27 | 15.31 | 14.90 | cm |
| Altura de la muestra: L | 30.42 | 30.86 | 30.24 | cm |
| Área de la muestra: A | 183.13 | 184.09 | 174.37 | cm ² |
| Diámetro del tubo cilíndrico graduado: D ₁ | 15.24 | 15.24 | 15.24 | cm |
| Altura del tubo cilíndrico graduado: L ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Área del tubo cilíndrico graduado: a | 182.41 | 182.41 | 182.41 | cm ² |
| Tiempo que demora en pasar de h ₁ a h ₂ : t | 124.40 | 128.12 | 127.80 | s |
| Altura del agua en el tubo al inicio de la prueba: h ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Altura del agua en el tubo al final de la prueba: h ₂ | 2.00 | 2.00 | 2.00 | cm |
| Coefficiente de permeabilidad: $k = [(L/t) \times (a/A)] \times \ln(h_1/h_2)$ | 0.66 | 0.65 | 0.67 | cm/s |
| Promedio de coeficiente de permeabilidad | 0.66 | | | cm/s |

| | |
|--------|---|
| ENSAYO | PERMEABILIDAD - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL |
|--------|---|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|----------|----------|----------|-----------------|
| | Esp. 064 | Esp. 065 | Esp. 066 | |
| Diámetro de la muestra: D | 15.16 | 15.32 | 15.05 | cm |
| Altura de la muestra: L | 30.50 | 30.39 | 30.01 | cm |
| Área de la muestra: A | 180.50 | 184.33 | 177.89 | cm ² |
| Diámetro del tubo cilíndrico graduado: D ₁ | 15.24 | 15.24 | 15.24 | cm |
| Altura del tubo cilíndrico graduado: L ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Área del tubo cilíndrico graduado: a | 182.41 | 182.41 | 182.41 | cm ² |
| Tiempo que demora en pasar de h ₁ a h ₂ : t | 188.00 | 333.40 | 274.40 | s |
| Altura del agua en el tubo al inicio de la prueba: h ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Altura del agua en el tubo al final de la prueba: h ₂ | 2.00 | 7.00 | 5.00 | cm |
| Coefficiente de permeabilidad: $k = [(L/t) \times (a/A)] \times \ln(h_1/h_2)$ | 0.44 | 0.13 | 0.20 | cm/s |
| Promedio de coeficiente de permeabilidad | 0.26 | | | cm/s |

| | |
|--------|--|
| ENSAYO | PERMEABILIDAD - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL |
|--------|--|

| Descripción | Ensayo | | | Unidad |
|---|----------|----------|----------|-----------------|
| | Esp. 067 | Esp. 068 | Esp. 069 | |
| Diámetro de la muestra: D | 15.16 | 15.32 | 15.05 | cm |
| Altura de la muestra: L | 30.50 | 30.39 | 30.01 | cm |
| Área de la muestra: A | 180.50 | 184.33 | 177.89 | cm ² |
| Diámetro del tubo cilíndrico graduado: D ₁ | 15.24 | 15.24 | 15.24 | cm |
| Altura del tubo cilíndrico graduado: L ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Área del tubo cilíndrico graduado: a | 182.41 | 182.41 | 182.41 | cm ² |
| Tiempo que demora en pasar de h ₁ a h ₂ : t | 396.40 | 330.10 | 268.00 | s |
| Altura del agua en el tubo al inicio de la prueba: h ₁ | 30.00 | 30.00 | 30.00 | cm |
| Altura del agua en el tubo al final de la prueba: h ₂ | 5.00 | 5.00 | 5.00 | cm |
| Coefficiente de permeabilidad: $k = [(L/t) \times (a/A)] \times \ln(h_1/h_2)$ | 0.14 | 0.16 | 0.21 | cm/s |
| Promedio de coeficiente de permeabilidad | 0.17 | | | cm/s |

Anexo C. Análisis estadístico

Anexo C.1.Peso unitario

| RESULTADOS | | PESO UNITARIO - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL | | | | | |
|------------|---------|--|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|-------------------|
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-001 | 2238.51 | -5.66 | 32.08 | Media (\bar{X}): | 2244.17 | kg/m ³ |
| | M-002 | 2238.51 | -5.66 | 32.08 | Varianza (s ²): | 96.24 | |
| | M-003 | 2255.50 | 11.33 | 128.31 | Desviación Estándar (s): | 9.81 | kg/m ³ |
| | | 6732.52 | | 192.47 | Coefficiente de varianza (CV): | 0.43713 | % |

| RESULTADOS | | PESO UNITARIO - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE | | | | | |
|------------|---------|---|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|-------------------|
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-004 | 2004.88 | -7.79 | 60.65 | Media (\bar{X}): | 2012.67 | kg/m ³ |
| | M-005 | 2017.62 | 4.96 | 24.56 | Varianza (s ²): | 46.61 | |
| | M-006 | 2015.50 | 2.83 | 8.02 | Desviación Estándar (s): | 6.83 | kg/m ³ |
| | | 6038.00 | | 93.23 | Coefficiente de varianza (CV): | 0.33922 | % |

| RESULTADOS | | PESO UNITARIO - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | |
|------------|---------|--|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|-------------------|
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-007 | 1990.01 | -9.20 | 84.71 | Media (\bar{X}): | 1999.21 | kg/m ³ |
| | M-008 | 1979.39 | -19.82 | 392.96 | Varianza (s ²): | 660.12 | |
| | M-009 | 2028.24 | 29.03 | 842.56 | Desviación Estándar (s): | 25.69 | kg/m ³ |
| | | 5997.64 | | 1320.24 | Coefficiente de varianza (CV): | 1.28514 | % |

| RESULTADOS | | PESO UNITARIO - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | |
|------------|---------|---|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-010 | 1966.65 | -24.78 | 614.00 | Media (\bar{X}): | 1991.43 | kg/m ³ |
| | M-011 | 1975.14 | -16.28 | 265.15 | Varianza (s ²): | 1282.64 | |
| | M-012 | 2032.49 | 41.06 | 1686.13 | Desviación Estándar (s): | 35.81 | kg/m ³ |
| | | 5974.28 | | 2565.29 | Coefficiente de varianza (CV): | 1.7984094 | % |

| RESULTADOS | | PESO UNITARIO - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | |
|------------|---------|--|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-013 | 1987.89 | 27.61 | 762.37 | Media (\bar{X}): | 1960.28 | kg/m ³ |
| | M-014 | 1947.53 | -12.74 | 162.40 | Varianza (s ²): | 572.90 | |
| | M-015 | 1945.41 | -14.87 | 221.04 | Desviación Estándar (s): | 23.94 | kg/m ³ |
| | | | | 1145.81 | Coefficiente de varianza (CV): | 1.2210225 | % |

Anexo C.2. Contenido de vacíos

| RESULTADOS | | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA I CONCRETO CONVENCIONAL | | | | | |
|------------|---------|--|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|--------|
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-016 | 2.79 | 0.25 | 0.06 | Media (\bar{X}): | 2.55 | % |
| | M-017 | 2.79 | 0.25 | 0.06 | Varianza (s ²): | 0.18 | |
| | M-018 | 2.05 | -0.49 | 0.24 | Desviación Estándar (s): | 0.43 | % |
| | | 7.64 | | 0.36 | Coefficiente de varianza (CV): | 16.73026 | % |
| RESULTADOS | | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE | | | | | |
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-019 | 17.36 | 0.32 | 0.10 | Media (\bar{X}): | 17.04 | % |
| | M-020 | 16.83 | -0.20 | 0.04 | Varianza (s ²): | 0.08 | |
| | M-021 | 16.92 | -0.12 | 0.01 | Desviación Estándar (s): | 0.28 | % |
| | | 51.11 | | 0.16 | Coefficiente de varianza (CV): | 1.6519132 | % |
| RESULTADOS | | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | |
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-022 | 18.15 | 0.38 | 0.14 | Media (\bar{X}): | 17.77 | % |
| | M-023 | 18.59 | 0.82 | 0.66 | Varianza (s ²): | 1.12 | |
| | M-024 | 16.58 | -1.19 | 1.43 | Desviación Estándar (s): | 1.06 | % |
| | | 53.32 | | 2.23 | Coefficiente de varianza (CV): | 5.9462404 | % |
| RESULTADOS | | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | |
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-025 | 19.46 | 1.01 | 1.03 | Media (\bar{X}): | 18.45 | % |
| | M-026 | 19.12 | 0.67 | 0.44 | Varianza (s ²): | 2.15 | |
| | M-027 | 16.77 | -1.68 | 2.83 | Desviación Estándar (s): | 1.47 | % |
| | | 55.35 | | 4.30 | Coefficiente de varianza (CV): | 7.9494098 | % |
| RESULTADOS | | CONTENIDO DE VACÍOS - MEZCLA V CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | | | | |
| Cant. | Muestra | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
| 3 | M-028 | 18.95 | -1.13 | 1.27 | Media (\bar{X}): | 20.07 | % |
| | M-029 | 20.59 | 18.05 | 325.69 | Varianza (s ²): | 0.63 | |
| | M-030 | 20.68 | 18.13 | 328.83 | Desviación Estándar (s): | 0.98 | % |
| | | 60.22 | | 655.79 | Coefficiente de varianza (CV): | 4.8616862 | % |

Anexo C.3. Resistencia a la compresión

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL (7 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|
|------------|--|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|--------------------|
| 3 | E-001 | 198.36 | -7.47 | 55.75 | Media (\bar{X}): | 205.82 | kg/cm ² |
| | E-002 | 207.45 | 1.62 | 2.63 | Varianza (s2): | 46.28 | |
| | E-003 | 211.67 | 5.85 | 34.17 | Desviación Estándar (s): | 6.80 | kg/cm ² |
| | | 617.47 | | 92.55 | Coefficiente de varianza (CV): | 3.30504 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA V CONCRETO CONVENCIONAL (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|---|--|--|--|--|--|
|------------|--|---|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|--------------------|
| 3 | E-004 | 258.89 | 8.78 | 77.10 | Media (\bar{X}): | 250.11 | kg/cm ² |
| | E-005 | 251.82 | 1.70 | 2.90 | Varianza (s2): | 94.96 | |
| | E-006 | 239.63 | -10.48 | 109.92 | Desviación Estándar (s): | 9.74 | kg/cm ² |
| | | 750.34 | | 189.92 | Coefficiente de varianza (CV): | 3.89612 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE (7 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|---|--|--|--|--|--|
|------------|--|---|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|--------------------|
| 3 | E-007 | 63.92 | -14.18 | 200.94 | Media (\bar{X}): | 78.10 | kg/cm ² |
| | E-008 | 64.09 | -14.01 | 196.31 | Varianza (s2): | 595.87 | |
| | E-009 | 106.29 | 28.19 | 794.48 | Desviación Estándar (s): | 24.41 | kg/cm ² |
| | | 234.30 | | 1191.73 | Coefficiente de varianza (CV): | 31.25587 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|
|------------|--|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|--------------------|
| 3 | E-010 | 175.65 | -13.20 | 174.12 | Media (\bar{X}): | 188.85 | kg/cm ² |
| | E-011 | 199.30 | 10.46 | 109.36 | Varianza (s2): | 145.49 | |
| | E-012 | 191.58 | 2.74 | 7.49 | Desviación Estándar (s): | 12.06 | kg/cm ² |
| | | 566.54 | | 290.98 | Coefficiente de varianza (CV): | 6.38716 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (7 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|
|------------|--|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|--------------------|
| 3 | E-013 | 163.29 | -15.26 | 232.93 | Media (\bar{X}): | 178.55 | kg/cm ² |
| | E-014 | 171.01 | -7.54 | 56.89 | Varianza (s2): | 404.92 | |
| | E-015 | 201.35 | 22.80 | 520.03 | Desviación Estándar (s): | 20.12 | kg/cm ² |
| | | 535.65 | | 809.84 | Coefficiente de varianza (CV): | 11.27006 | % |

| | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|--------------------|
| 3 | E-016 | 299.24 | 69.69 | 4857.18 | Media (\bar{X}): | 229.55 | kg/cm ² |
| | E-017 | 189.22 | -40.33 | 1626.64 | Varianza (s2): | 3672.97 | |
| | E-018 | 200.19 | -29.36 | 862.12 | Desviación Estándar (s): | 60.61 | kg/cm ² |
| | | 688.64 | | 7345.94 | Coeficiente de varianza (CV): | 26.40188 | % |

| | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (7 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------------|
| 3 | E-019 | 116.93 | -2.75 | 7.57 | Media (\bar{X}): | 119.68 | kg/cm ² |
| | E-020 | 128.94 | 9.25 | 85.60 | Varianza (s2): | 67.71 | |
| | E-021 | 113.18 | -6.50 | 42.24 | Desviación Estándar (s): | 8.23 | kg/cm ² |
| | | 359.05 | | 135.42 | Coeficiente de varianza (CV): | 6.8752163 | % |

| | | | | | | |
|------------|---|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|---|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|--------------------|
| 3 | E-022 | 226.42 | 22.88 | 523.65 | Media (\bar{X}): | 203.54 | kg/cm ² |
| | E-023 | 175.42 | -28.13 | 791.02 | Varianza (s2): | 671.07 | |
| | E-024 | 208.78 | 5.24 | 27.47 | Desviación Estándar (s): | 25.91 | kg/cm ² |
| | | 610.62 | | 1342.15 | Coeficiente de varianza (CV): | 12.72724 | % |

| | | | | | | |
|------------|---|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (7 DÍAS) | | | | | |
|------------|---|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------------|
| 3 | E-025 | 55.09 | -39.81 | 1584.51 | Media (\bar{X}): | 94.90 | kg/cm ² |
| | E-026 | 110.96 | 16.06 | 258.02 | Varianza (s2): | 1203.13 | |
| | E-027 | 118.64 | 23.74 | 563.73 | Desviación Estándar (s): | 34.69 | kg/cm ² |
| | | 284.69 | | 2406.26 | Coeficiente de varianza (CV): | 36.551551 | % |

| | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|--------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------------|
| 3 | E-028 | 203.30 | 0.44 | 0.19 | Media (\bar{X}): | 202.87 | kg/cm ² |
| | E-029 | 195.66 | -7.21 | 51.96 | Varianza (s2): | 49.00 | |
| | E-030 | 209.64 | 6.77 | 45.85 | Desviación Estándar (s): | 7.00 | kg/cm ² |
| | | 608.60 | | 98.00 | Coeficiente de varianza (CV): | 3.4505742 | % |

Anexo C.4. Resistencia a la tracción

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE (7 DÍAS) | | |
|------------|--|---|--|--|
|------------|--|---|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|--------------------|
| 3 | E-031 | 19.19 | -0.59 | 0.34 | Media (\bar{X}): | 19.77 | kg/cm ² |
| | E-032 | 20.49 | 0.72 | 0.52 | Varianza (s ²): | 0.44 | |
| | E-033 | 19.64 | -0.13 | 0.02 | Desviación Estándar (s): | 0.66 | kg/cm ² |
| | | 59.32 | | 0.88 | Coefficiente de varianza (CV): | 3.35993 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA I CONCRETO PERMEABLE (28 DÍAS) | | |
|------------|--|--|--|--|
|------------|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|--------------------|
| 3 | E-034 | 22.42 | -0.25 | 0.06 | Media (\bar{X}): | 22.67 | kg/cm ² |
| | E-035 | 22.16 | -0.51 | 0.26 | Varianza (s ²): | 0.45 | |
| | E-036 | 23.42 | 0.76 | 0.57 | Desviación Estándar (s): | 0.67 | kg/cm ² |
| | | 68.00 | | 0.89 | Coefficiente de varianza (CV): | 2.94467 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (7 DÍAS) | | |
|------------|--|--|--|--|
|------------|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|--------------------|
| 3 | E-037 | 18.81 | 0.51 | 0.26 | Media (\bar{X}): | 18.30 | kg/cm ² |
| | E-038 | 18.74 | 0.44 | 0.19 | Varianza (s ²): | 0.67 | |
| | E-039 | 17.36 | -0.95 | 0.90 | Desviación Estándar (s): | 0.82 | kg/cm ² |
| | | 54.91 | | 1.35 | Coefficiente de varianza (CV): | 4.48158 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | |
|------------|--|---|--|--|
|------------|--|---|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|--------------------|
| 3 | E-040 | 19.45 | -1.37 | 1.88 | Media (\bar{X}): | 20.82 | kg/cm ² |
| | E-041 | 21.72 | 0.89 | 0.79 | Varianza (s ²): | 1.45 | |
| | E-042 | 21.30 | 0.48 | 0.23 | Desviación Estándar (s): | 1.20 | kg/cm ² |
| | | 62.47 | | 2.90 | Coefficiente de varianza (CV): | 5.78612 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (7 DÍAS) | | |
|------------|--|---|--|--|
|------------|--|---|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------|
| 3 | E-043 | 17.41 | -0.22 | 0.05 | Media (\bar{X}): | 17.63 | kg/cm ² |
| | E-044 | 20.31 | 2.68 | 7.17 | Varianza (s ²): | 6.63 | |
| | E-045 | 15.17 | -2.46 | 6.04 | Desviación Estándar (s): | 2.57 | kg/cm ² |
| | | 52.89 | | 13.26 | Coefficiente de varianza (CV): | 14.602 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA III | | | CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | |
|------------|--|---|--|--|--|--|--|
|------------|--|---|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------|
| 3 | E-046 | 20.35 | 0.87 | 0.77 | Media (\bar{X}): | 19.47 | kg/cm ² |
| | E-047 | 20.44 | 0.97 | 0.94 | Varianza (s ²): | 2.55 | |
| | E-048 | 17.63 | -1.84 | 3.40 | Desviación Estándar (s): | 1.60 | kg/cm ² |
| | | 58.41 | | 5.11 | Coefficiente de varianza (CV): | 8.2078719 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA IV | | | CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|
|------------|--|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------|
| 3 | E-049 | 8.50 | 0.40 | 0.16 | Media (\bar{X}): | 8.10 | kg/cm ² |
| | E-050 | 7.73 | -0.37 | 0.14 | Varianza (s ²): | 0.15 | |
| | E-051 | 8.07 | -0.03 | 0.00 | Desviación Estándar (s): | 0.39 | kg/cm ² |
| | | 24.30 | | 0.30 | Coefficiente de varianza (CV): | 4.7970777 | % |

| RESULTADOS | | RESISTENCIA A LA TRACCION - MEZCLA IV | | | CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|
|------------|--|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------|
| 3 | E-052 | 20.02 | 0.61 | 0.37 | Media (\bar{X}): | 19.41 | kg/cm ² |
| | E-053 | 14.48 | -4.92 | 24.25 | Varianza (s ²): | 21.63 | |
| | E-054 | 23.73 | 4.32 | 18.64 | Desviación Estándar (s): | 4.65 | kg/cm ² |
| | | 58.23 | | 43.26 | Coefficiente de varianza (CV): | 23.962354 | % |

Anexo C.5. Permeabilidad

| RESULTADOS | | PERMEABILIDAD - MEZCLA V | | | CONCRETO CONVENCIONAL (28 DÍAS) | | |
|------------|--|---------------------------------|--|--|---------------------------------|--|--|
|------------|--|---------------------------------|--|--|---------------------------------|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|--------|
| 3 | E-055 | 0.00023 | 0.0001 | 0.0000 | Media (\bar{X}): | 0.0001 | cm/s |
| | E-056 | 0.00002 | -0.0001 | 0.0000 | Varianza (s ²): | 0.0000 | |
| | E-057 | 0.00002 | 0.0001 | 0.0000 | Desviación Estándar (s): | 0.0001 | cm/s |
| | | 0.0150 | | 0.0000 | Coefficiente de varianza (CV): | 130.8141 | % |

| RESULTADOS | | PERMEABILIDAD - MEZCLA I | | | CONCRETO PERMEABLE (28 DÍAS) | | |
|------------|--|---------------------------------|--|--|------------------------------|--|--|
|------------|--|---------------------------------|--|--|------------------------------|--|--|

| Cant. | Espécimen | Xi | (Xi- \bar{X}) | (Xi- \bar{X}) ² | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|--------|
| 3 | E-058 | 0.82 | 0.05 | 0.00 | Media (\bar{X}): | 0.77 | cm/s |
| | E-059 | 0.68 | -0.09 | 0.01 | Varianza (s ²): | 0.01 | |
| | E-060 | 0.82 | 0.04 | 0.00 | Desviación Estándar (s): | 0.08 | cm/s |
| | | 2.32 | | 0.01 | Coefficiente de varianza (CV): | 10.07403 | % |

| | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | PERMEABILIDAD - MEZCLA II CONCRETO PERMEABLE CON 1% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | X_i | $(X_i - \bar{X})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|-------------------|---------------------|--------------------------------|---------|--------|
| 3 | E-061 | 0.66 | 0.00 | 0.00 | Media (\bar{X}): | 0.66 | cm/s |
| | E-062 | 0.65 | -0.01 | 0.00 | Varianza (s^2): | 0.00 | |
| | E-063 | 0.67 | 0.01 | 0.00 | Desviación Estándar (s): | 0.01 | cm/s |
| | | 1.98 | | 0.00 | Coefficiente de varianza (CV): | 1.82678 | % |

| | | | | | | |
|------------|---|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | PERMEABILIDAD - MEZCLA III CONCRETO PERMEABLE CON 3% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|---|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | X_i | $(X_i - \bar{X})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|-------------------|---------------------|--------------------------------|-----------|--------|
| 3 | E-064 | 0.44 | 0.11 | 0.01 | Media (\bar{X}): | 0.33 | cm/s |
| | E-065 | 0.24 | -0.09 | 0.01 | Varianza (s^2): | 0.01 | |
| | E-066 | 0.30 | -0.03 | 0.00 | Desviación Estándar (s): | 0.10 | cm/s |
| | | 0.99 | | 0.02 | Coefficiente de varianza (CV): | 31.014598 | % |

| | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|
| RESULTADOS | PERMEABILIDAD - MEZCLA IV CONCRETO PERMEABLE CON 5% DE MUCÍLAGO DE NOPAL (28 DÍAS) | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|

| Cant. | Espécimen | X_i | $(X_i - \bar{X})$ | $(X_i - \bar{X})^2$ | Descripción | Valor | Unidad |
|-------|-----------|-------|-------------------|---------------------|--------------------------------|-----------|--------|
| 3 | E-066 | 0.18 | -0.04 | 0.00 | Media (\bar{X}): | 0.22 | cm/s |
| | E-067 | 0.21 | -0.01 | 0.00 | Varianza (s^2): | 0.00 | |
| | E-068 | 0.26 | 0.05 | 0.00 | Desviación Estándar (s): | 0.04 | cm/s |
| | | 0.65 | | 0.00 | Coefficiente de varianza (CV): | 19.853113 | % |

Anexo D. Panel fotográfico



Figura 25. Ensayo de análisis granulométrico del agregado fino.



Figura 26. Muestra retenida por cada tamiz (agregado fino).



Figura 27. Muestra retenida por cada tamiz (agregado grueso).



Figura 28. Máquina para realizar el ensayo de análisis granulométrico del agregado grueso (Huso 7).



Figura 29. Ensayo de peso unitario suelto del agregado fino.



Figura 30. Ensayo de peso unitario compactado del agregado grueso.



Figura 31. Ensayo de peso específico del agregado fino.



Figura 32. Horno usado para los ensayos de caracterización de los agregados.



Figura 33. Muestras para los ensayos de contenido de humedad y peso específico.



Figura 34. Pelado de las pencas de nopal.



Figura 35. Pencas de nopal debidamente cortadas en cuadros de aprox. 5 cm.



Figura 36. Licuado de las pencas de nopal y obtención del mucílago.



Figura 37. Elaboración del concreto permeable.



Figura 38. Ensayo de peso unitario del concreto convencional y concreto permeable.



Figura 39. Asentamiento del concreto permeable.



Figura 40. Moldeo de la mezcla de concreto.



Figura 41. Curado de probetas.



Figura 42. Resistencia a la compresión del concreto convencional y concreto permeable.



Figura 43. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta del concreto permeable.



Figura 44. Permeámetro.



Figura 45. Probeta envuelta en latex para realizar el ensayo de permeabilidad.



Figura 46. Vaciado de la mezcla de concreto permeable en el tramo de prueba.



Figura 47. Nivelado de la mezcla de concreto permeable en el tramo de prueba.



Figura 48. Ensayo de permeabilidad en el tramo de prueba

Anexo E. Certificado de uso del Laboratorio de Concreto y Ensayo de Materiales - UPeU



CERTIFICADO ENSAYOS EN LABORATORIO

El que suscribe, Ing. Elías Felipe Tala Allca, encargado del Laboratorio de Concreto y Ensayo de Materiales (LCEM), hace constar por medio de la presente que la Bach. Thalía Gianella Inga Julca, identificada con D.N.I. N° 75420109, ha realizado ensayos de materiales: análisis granulométrico, peso específico, peso unitario suelto y compactado, contenido de humedad de los agregados fino y grueso; y ensayos del concreto: asentamiento, porcentaje de vacíos, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y permeabilidad, en las instalaciones del laboratorio de Concreto y Ensayos de Materiales de la Universidad Peruana Unión, requeridos para la tesis *"Influencia de la adición de mucilago de nopal (Opuntia ficus – indica) en las propiedades mecánicas del concreto permeable"*.

Se expide esta certificación a solicitud del interesado, para los fines que estime conveniente.

Lima, 09 de agosto de 2019.



Ing. Elías Felipe Tala Allca