



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de parámetros característicos para el diseño y
elaboración de concreto permeable**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

**Bertha Desire Quispe Farfán
Mirella Priscila Vite Agurto**

**Asesor:
Mgtr. Ing. Christian Mario Varhen García**

Piura, diciembre de 2024

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Bertha Desire Quispe Farfán, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 76983257, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Evaluación de parámetros característicos para el diseño y elaboración de concreto permeable”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Mirella Priscila Vite Agurto, identificado con DNI: 75122670

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. Christian Mario Varhen García, identificado con DNI: 41328212

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 17/10/2024.



.....
Firma del autor¹



.....
Firma del asesor¹



.....
Firma del co-asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Mirella Priscila Vite Agurto, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 75122670, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Evaluación de parámetros característicos para el diseño y elaboración de concreto permeable”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Bertha Desire Quispe Farfán, identificado con DNI: 76983257

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. Christian Mario Varhen García, identificado con DNI: 41328212

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 17/10/2024.



.....
Firma del autor¹



.....

Firma del asesor¹



.....

Firma del co-asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

Dedicatoria

A Dios, al Sagrado Corazón de Jesús y a la Virgen María, por ser nuestros guías a lo largo de cada momento de nuestras vidas, y mostrarnos el camino del bien.

A nuestros padres quienes nos han inculcado el sentido de la responsabilidad y nos han brindado la posibilidad de estudiar una carrera profesional, por su apoyo incondicional en todo este proceso y su constante motivación para lograr cada uno de nuestros objetivos.

Agradecimientos

A nuestro asesor el Mgtr. Ing. Christian Mario Varhen García, por estar presente en este proceso, impartiéndonos sus conocimientos y enseñanzas con entusiasmo y paciencia, a todo el personal técnico de Laboratorio Ensayo de Materiales y Construcción, por su tiempo y apoyo brindado.

De manera especial reconocer a Christian Alejandro Valdiviezo Mechato, quien ha sido un gran apoyo durante la realización de esta investigación

Resumen

Conscientes de los efectos del cambio climático que afectan al país y de la urgente necesidad de encontrar soluciones para mitigarlos, el presente trabajo ha decidido enfocarse en el estudio del concreto permeable. El objetivo es evaluar los parámetros necesarios para su diseño y producción utilizando materiales disponibles en la región Piura. El análisis se llevará a cabo siguiendo la metodología recomendada por el American Concrete Institute (ACI), así como las pautas establecidas por las normas técnicas para el concreto permeable de ASTM International y las normativas peruanas correspondientes.

La actual investigación se presenta como una propuesta que intenta reducir los daños que las intensas precipitaciones pluviales ocasionan a la infraestructura vial de nuestro país, contribuyendo así a la sostenibilidad y resistencia de nuestras carreteras ante los retos climáticos que enfrentamos.

Se ha determinado que las propiedades primordiales a examinar son: la resistencia a compresión, permeabilidad y contenido de vacíos. En este análisis, se considerarán diversos factores que pueden afectar su variación. Para llevar a cabo la evaluación, se han diseñado dos mezclas permeables, en las cuales se han establecido dos parámetros fijos: el contenido de vacíos y la cantidad de pasta.

De acuerdo con los ensayos realizados, se ha constatado que las mezclas de concreto permeable cumplen con los estándares estipulados por el ACI. Se ha identificado una relación significativa entre la permeabilidad y la resistencia, donde se observa que, a mayor permeabilidad, la resistencia tiende a disminuir. Asimismo, se ha evidenciado que la energía de compactación ejerce una influencia directa en las propiedades del concreto, particularmente en la variación del contenido de vacíos, y que la relación a/c incide de manera más notable en la trabajabilidad del concreto que en su resistencia.

A partir de los resultados obtenidos en el diseño adicional, se ha establecido que la utilización de una granulometría con diferentes tamaños de partículas, que se encuentran dentro del rango permitido, conduce a un mejor empaquetamiento en el concreto permeable, lo que a su vez mejora sus propiedades mecánicas.

Este estudio resalta la importancia de llevar a cabo investigaciones adicionales en relación con las propiedades del concreto permeable. Estas investigaciones, pueden allanar el camino hacia la formulación de mezclas que cumplan con los estándares establecidos por las normas de construcción en el Perú, logrando así niveles adecuados de resistencia y permeabilidad. Esto, a su vez, podría satisfacer las demandas de la infraestructura vial en nuestro país.

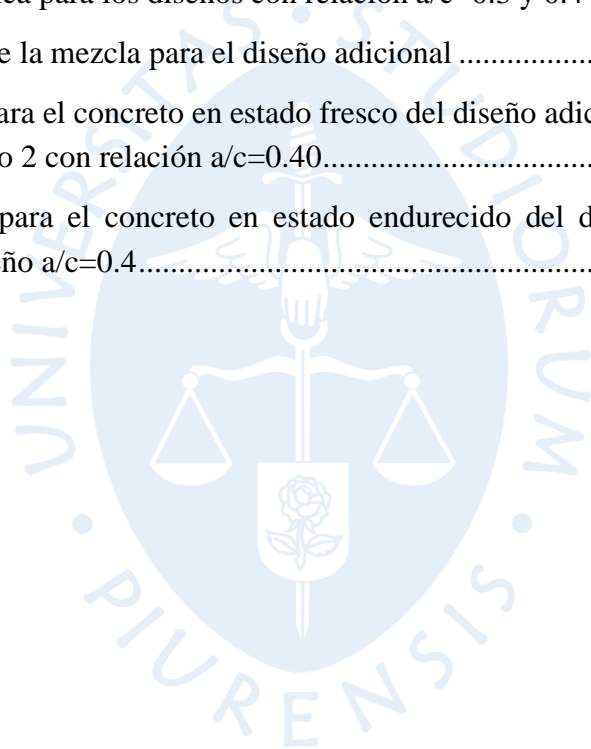
Tabla de contenido

Introducción.....	12
Capítulo 1 Marco teórico.....	14
1.1 Sostenibilidad en la construcción	14
1.2 Sostenibilidad en el concreto.....	15
1.3 Concreto permeable.....	17
1.4 Diseño de concreto permeable ACI.....	19
1.4.1 <i>Energía de compactación</i>	19
1.4.2 <i>Contenido de vacíos</i>	20
1.4.3 <i>Permeabilidad</i>	20
1.4.4 <i>Porcentaje de agregados</i>	21
1.4.5 <i>Porcentaje de pasta</i>	21
1.4.6 <i>Proporcionamiento de la mezcla</i>	22
1.5 Materiales del concreto permeable	27
1.5.1 <i>Cemento Portland tipo I</i>	27
1.5.2 <i>Agua</i>	28
1.5.3 <i>Agregado grueso</i>	28
1.5.4 <i>Agregado fino</i>	29
1.6 Propiedades físicas – reología del concreto permeable en estado fresco	29
1.6.1 <i>Trabajabilidad del concreto drenante</i>	29
1.6.2 <i>Densidad</i>	29
1.6.3 <i>Tiempo de fragua</i>	30
1.7 Propiedades del concreto permeable	30
1.7.1 <i>Resistencia a la compresión</i>	30
1.7.2 <i>Permeabilidad</i>	31
Capítulo 2 Programa experimental	32
2.1 Ensayos.....	32
2.1.1 <i>Caracterización de materiales</i>	32
2.1.2 <i>Concreto en estado fresco</i>	35
2.1.3 <i>Concreto en estado endurecido</i>	36
2.2 Selección de materiales	38
2.2.1 <i>Cemento</i>	38
2.2.2 <i>Agua</i>	38
2.2.3 <i>Agregado grueso</i>	38
2.3 Diseño de mezcla ACI Committee 522R-10	41
2.3.1 <i>Diseños de mezcla</i>	42
2.3.2 <i>Elaboración de especímenes</i>	44
2.3.3 <i>Implementación del equipo de permeabilidad</i>	47
Capítulo 3 Análisis de resultados	52
3.1 Concreto en estado fresco.....	52
3.1.1 <i>Densidad teórica, densidad y contenido de vacíos en estado fresco</i>	52
3.2 Concreto en estado endurecido.....	55
3.2.1 <i>Densidad y contenido de vacíos en estado endurecido</i>	56
3.2.2 <i>Permeabilidad</i>	56
3.2.3 <i>Resistencia a compresión</i>	57
3.3 Diseño adicional	60
Conclusiones	63
Recomendaciones	64
Referencias.....	65
Apéndices	71

Apéndice A. Resultados de tamizado en el ensayo de granulometría.....	72
Apéndice B. Valores obtenidos para el peso unitario.....	73
Apéndice C. Datos para gravedad específica y absorción del agregado grueso.....	74
Apéndice D. Datos para determinar la densidad teórica de ambos diseños	75
Apéndice E. Datos para la densidad en estado fresco $a/c=0.30$	76
Apéndice E1. Datos para la densidad en estado fresco $a/c=0.40$	76
Apéndice E2. Datos para el contenido de vacíos en estado fresco $a/c=0.3$	76
Apéndice F. Datos para el contenido de vacíos en estado fresco $a/c=0.40$	77
Apéndice F1. Datos para el contenido de vacíos en estado fresco $a/c=0.40$	77
Apéndice G. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-20g para el primer diseño $a/c=0.30$	78
Apéndice G1. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-15 g para el primer diseño $a/c=0.30$	78
Apéndice G2. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-20 g para el primer diseño $a/c=0.30$	78
Apéndice G3. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-20 g para el primer diseño $a/c=0.40$	79
Apéndice G4. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-15 g para el primer diseño $a/c=0.40$	79
Apéndice G5. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 1c-20 g para el primer diseño $a/c=0.40$	79
Apéndice H. Datos de permeabilidad para primer diseño con $a/c= 0.30$	81
Apéndice H1. Datos de permeabilidad para segundo diseño con $a/c= 0.40$	81
Apéndice I. Promedio de resistencias a 28 días del diseño con relación $a/c= 0.30$	83
Apéndice I1. Promedio de resistencias a 28 días del diseño con relación $a/c= 0.40$	83
Apéndice J. Diseño de mezclas bajo normativa ACI	84

Lista de tablas

Tabla 1 Valores b/bo para agregado grueso en base al porcentaje de agregado fino.....	21
Tabla 2 Abertura de los tamices para ensayos granulométricos.....	33
Tabla 3 Valores de peso unitario varillado en estado seco y suelto del agregado grueso.....	40
Tabla 4 Ensayo de contenido de humedad	40
Tabla 5 Gravedad específica y absorción del agregado	41
Tabla 6 Datos necesarios para la elaboración de mezclas.....	42
Tabla 7 Proporción de mezclas en SSS para un metro cúbico de concreto.....	44
Tabla 8 Proporción de materiales en stock con relación a/c=0.3 y 0.4	45
Tabla 9 Densidad teórica para los diseños con relación a/c=0.3 y 0.4 con $V_p=15\%$	52
Tabla 10 Proporción de la mezcla para el diseño adicional	61
Tabla 11 Resultados para el concreto en estado fresco del diseño adicional vs resultados para el diseño 2 con relación a/c=0.40.....	61
Tabla 12 Resultados para el concreto en estado endurecido del diseño adicional vs segundo diseño a/c=0.4.....	62



Lista de figuras

Figura 1	Variación del peso unitario con distintos niveles de compactación	20
Figura 2	Relación entre el porcentaje de pasta y el contenido de vacíos	22
Figura 3	Pasos propuestos por el ACI Committee 522R-10.....	23
Figura 4	Relación entre permeabilidad y contenido de vacíos	26
Figura 5	Relación entre la resistencia a compresión y el contenido de vacíos	27
Figura 6	Estructura interna del concreto permeable.....	30
Figura 7	Ubicación de la cantera Santa Cruz	38
Figura 8	Selección de material mediante método de cuarteo.....	39
Figura 9	Curva granulométrica del agregado grueso	39
Figura 10	Selección de la muestra y colocación en el horno	40
Figura 11	Selección del agregado grueso para el ensayo.....	41
Figura 12	Distribución del concreto elaborado para cada tanda	45
Figura 13	Pesado de materiales para elaboración de concreto.....	46
Figura 14	Curado de especímenes e inserción de probetas a una poza.....	47
Figura 15	Rotulación y corte de tee y niple	48
Figura 16	Permeámetro de Neithalath.....	48
Figura 17	Impermeabilización con resina líquida.....	49
Figura 18	Permeámetro	49
Figura 19	Especímenes envueltos en papel film	50
Figura 20	Densidad en estado fresco para diseño 1 con $a/c=0.30$	52
Figura 21	Densidad en estado fresco para diseño 2 con $a/c=0.40$	53
Figura 22	Contenido de vacíos en estado fresco para el diseño 1 con relación $a/c=0.30$	53
Figura 23	Contenido de vacíos en estado fresco para el diseño 2 con relación $a/c=0.40$	54
Figura 24	Diferencia entre las áreas superficiales de los moldes.....	54
Figura 25	Diferencia de aspecto entre los diseños de mezcla	55
Figura 26	Relación entre el contenido de vacíos y la densidad de ambos diseños	56
Figura 27	Resultados de permeabilidad para ambos diseños.....	57
Figura 28	Resultados de resistencia a la compresión para ambos diseños.....	57
Figura 29	Resultados de permeabilidad y resistencia a compresión para ambos diseños.....	58

Figura 30 Relación entre la resistencia a compresión y el contenido de vacíos endurecido	59
Figura 31 Relación entre la permeabilidad y el contenido de vacíos	60



Introducción

Con el objetivo de cuidar y preservar los recursos para las generaciones futuras, el factor ambiental se ha convertido en un tema de suma relevancia. En este contexto, la industria de la construcción, que desempeña un rol fundamental en el desarrollo urbano y vial, se esfuerza por incorporar nuevas tecnologías enfocándose en la sostenibilidad. Esto se traduce en innovaciones no solo en maquinaria y materiales de construcción, sino también en la formulación de mezclas de concreto más respetuosas con el medio ambiente.

El concreto permeable, cuyo uso ya está ampliamente establecido en países como Estados Unidos, Australia y gran parte de Europa, tiene sus raíces en el período posterior a la Segunda Guerra Mundial. En aquel contexto, la necesidad imperante de reconstruir infraestructuras dañadas sirvió como motor para su desarrollo (ACI Committee 522R-10, 2010). Este enfoque hacia el concreto permeable representa un importante paso hacia la construcción sostenible y la conservación de nuestros recursos naturales para las generaciones venideras.

No obstante, es importante destacar que las normas y especificaciones para el concreto permeable se han desarrollado recientemente. El Instituto Americano del Concreto (ACI), durante el año 2010, publicó un primer informe con el objetivo de estandarizar las especificaciones técnicas para este material, y gracias a una serie de estudios e investigaciones realizados entre 2009 y 2015, logró llevar a cabo una actualización de este informe en el año 2023. Además, ASTM International desarrolló diversas normativas con el fin de evaluar las propiedades fundamentales del concreto permeable, como la resistencia a la compresión, contenido de vacíos, permeabilidad y densidad.

En los últimos años se ha orientado el uso de concreto permeable al área vial como superficie de rodadura en carreteras de bajo tránsito, material de pavimentación en estacionamientos, bases y bordes permeables, etc. Todas las aplicaciones mencionadas se han implementado en países desarrollados que profundizaron en la investigación de este material (ACI Committee 522-23, 2023). Por otro lado, en países como Perú se tiene muy poca información acerca del concreto permeable y sus aplicaciones, debido a ello el interés por conocer más sobre esta nueva propuesta se ha incrementado en los últimos años, sobre todo a raíz del fenómeno meteorológico del Niño Costero que afecta al país y trae consigo desbordes e inundaciones. Los estragos más recientes causados por este fenómeno ocurrieron en 2017 afectando principalmente a la ciudad de Piura, donde las intensas y prolongadas precipitaciones desencadenaron deslizamientos de tierra e inundaciones que afectaron a miles de personas y causaron grandes daños a la infraestructura y a la agricultura de la región (Ramírez & Briones, 2017).

En este contexto, las investigaciones de Tennis et al. (2004) se orientan hacia la propuesta del concreto permeable como un componente clave de un sistema de drenaje alternativo para la gestión y transporte de aguas pluviales. No obstante, para desarrollar tales propuestas de manera efectiva es esencial lograr un conocimiento completo de su comportamiento. El presente trabajo se centrará en el análisis de las propiedades mecánicas

del concreto permeable, tales como la resistencia a la compresión, la permeabilidad y el contenido de vacíos. El análisis se llevará a cabo conforme a las directrices establecidas en el informe del ACI Committee 522R-10 (2010).



Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Sostenibilidad en la construcción

Ante el agotamiento de recursos, la creciente contaminación y los impactos adversos del cambio climático a nivel global, se considera fundamental incorporar el concepto de sostenibilidad en las principales industrias. Este enfoque abarca dimensiones económicas, sociales y ambientales, buscando restablecer el equilibrio entre el medio ambiente y los recursos naturales (Herrero, 2002).

El informe de Enshassi et al. (2014) destaca que el sector de la construcción es crucial para implementar estrategias sostenibles. A lo largo de los años, este sector ha generado un impacto negativo en el entorno ambiental debido a la explotación de recursos naturales y materias primas en diversas actividades de ingeniería. Entre estos impactos se encuentran la remoción de arcilla, la tala de árboles, la explotación de canteras, la contaminación de las capas subterráneas del suelo por productos químicos utilizados y la contaminación del aire debido a emisiones de gases tóxicos durante la producción de cemento.

Según Flores (2020), los países de América Latina serían los más afectados por las consecuencias del cambio climático, debido a que su economía depende de actividades agrícolas, hidro-energéticas y ganaderas, por ello en los últimos años las empresas a nivel mundial vienen implementando estrategias donde prima la responsabilidad social.

En la actualidad, varios países de América Latina ya han adoptado medidas sostenibles en el sector de la construcción con el fin de hacer frente y mitigar los efectos adversos del cambio climático. Por ejemplo, Brasil ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en certificación de liderazgo en energía y diseño ambiental para sus construcciones. Argentina ha implementado políticas en favor de la construcción sostenible, Chile ha establecido un sistema de calificación energética, y países como Guatemala y Costa Rica han incorporado la sostenibilidad en sus planes nacionales de desarrollo (Flores P. , 2020).

Por otro lado, el país se enfrenta a una realidad distinta. Conforme a Bebbington y Williams (2008), Perú se sitúa como el tercer país más vulnerable del mundo al cambio climático y su principal consecuencia se reflejaría en la afectación de las fuentes de agua. Según las proyecciones para los próximos 40 años, los extensos períodos de sequías, inundaciones y heladas podrían dar lugar a una disminución del 40% en la disponibilidad de agua potable en comparación con la cantidad actual (Tarabochia, 2014). Por ello, con base a esta alarmante predicción, nace la necesidad de crear e implementar políticas sostenibles que nos permitan hacer frente al cambio climático.

En este contexto, el concreto permeable se presenta como una solución innovadora y sostenible para el sector de la construcción. A diferencia del concreto convencional, el concreto permeable permite la filtración del agua a través de su estructura, reduciendo significativamente el escurrimiento superficial y ayudando a recargar los acuíferos subterráneos. Esto no solo mitiga el riesgo de inundaciones urbanas, sino que también

disminuye la carga sobre los sistemas de drenaje, contribuyendo a una gestión más eficiente del agua. Además, al permitir que el agua se filtre naturalmente en el suelo, el concreto permeable reduce la contaminación hídrica, ya que actúa como un filtro natural que atrapa sedimentos y contaminantes (ACI Committee 522-23, 2023).

Además, el concreto permeable también destaca por su menor huella de carbono en comparación con los materiales de construcción tradicionales. Al utilizar menos cemento y agregar más aire en su mezcla, este tipo de concreto requiere menos energía durante su producción, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas. Asimismo, su capacidad para mejorar la calidad del aire, al reducir la absorción de calor y minimizar el efecto de isla de calor en áreas urbanas, lo convierte en una opción ambientalmente responsable para el desarrollo urbano sostenible. Así, el concreto permeable no solo aborda las necesidades estructurales, sino que también apoya los objetivos más amplios de sostenibilidad en la construcción (Tennis y otros, 2004).

1.2 Sostenibilidad en el concreto

Por lo expuesto anteriormente, la sostenibilidad debe asumirse como un eje vital en el desarrollo urbano, sobre todo en las principales industrias que afectan el medio ambiente. De acuerdo con Ovalle (2019), en los países de América Latina el crecimiento demográfico ha experimentado un aumento. En Perú, los métodos constructivos predominantes se basan en enfoques convencionales, como la albañilería o el concreto armado, ambos, haciendo uso de un porcentaje considerable de concreto.

Sin embargo, de acuerdo con Soto et al. (2018), el cemento, un componente esencial en la elaboración del concreto, consume aproximadamente entre el 12 % al 15 % de la energía total empleada en el proceso del concreto, contribuyendo así con alrededor del 7 % de la emisión total de dióxido de carbono (CO₂) volviéndolo un material agresivo contra el medio ambiente. Además, el concreto, como cualquier material, presenta limitaciones notables, especialmente cuando los diseños arquitectónicos incorporan grandes luces entre los elementos estructurales. Esto conlleva a la necesidad de redimensionar la estructura mediante elementos de mayor dimensión, lo que resulta en una estructura más pesada y costosa. Adicionalmente, el concreto no se modifica fácilmente y, con el tiempo, puede deteriorarse debido a las condiciones climáticas externas (Aris, 2008).

Aris (2008), concluye que, dada la creciente complejidad de los diseños arquitectónicos más modernos que imponen desafíos cada vez mayores al área arquitectónica, surge la necesidad de un enfoque sostenible dentro del uso del concreto. Este enfoque se centra en reducir la dependencia de este material o incluso reemplazarlo con opciones más respetuosas con el medio ambiente.

Para abordar esta problemática, los diseñadores han explorado alternativas con miras a un concreto más sostenible. En este contexto, según Frías (2014), la sostenibilidad en el concreto debe ser una consideración presente a lo largo de todas las fases de su ciclo de vida. Esto implica reducir el impacto ambiental y ofrecer soluciones constructivas y económicas.

En la investigación realizada por Saikia et al (2007), se propuso utilizar ceniza en la fabricación del Clinker de cemento mostrando una reducción de un 20% del carbonato de calcio (CaCO_3), permitiendo disminuir las emisiones de dióxido de carbono CO_2 .

De acuerdo con el ACI Committee 318 (2019) la incorporación de cenizas volantes y escorias de alto horno en el concreto no solo reduce la demanda de cemento Portland, sino que también disminuye el carbono del material.

Bedoya y Dzuk (2015) se dedicaron a investigar la formulación de concreto utilizando elementos reciclados obtenidos de escombros de concreto y mampostería. Tras un análisis exhaustivo, llegaron a la conclusión de que las propiedades mecánicas, incluyendo la resistencia, y la porosidad del concreto, exhiben un comportamiento comparable cuando se sustituye un 25 % de estos elementos reciclados. Uno de los principales referentes donde se ve reflejada esta iniciativa, fue la construcción del puente entre Manises y Paterna en España, en las que se reutilizaron 1600 m³ de concreto de buena calidad, generando un impacto positivo fomentando el reciclaje de materias primas (Flores y otros, 2019). De manera complementaria, el uso de concreto reciclado proveniente de demoliciones de edificios puede reducir significativamente la demanda de materiales vírgenes y disminuir los residuos en vertederos, contribuyendo a un ciclo de vida más sostenible (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Este enfoque no solo fomenta la prioridad del reciclaje, sino que también reduce los costos de preparación al convertir residuos en materia prima, contribuyendo significativamente a la infraestructura sustentable.

Otra de las innovaciones destacadas es el concreto biológico, que utiliza fosfato de magnesio para promover procesos naturales y permitir el crecimiento de musgo en su superficie, con aplicaciones arquitectónicas que promueven el respeto por la naturaleza (Veeger y otros, 2021).

Aparte de la sostenibilidad, la eficiencia energética es otro concepto crucial en el ámbito de la construcción. Si bien este sector contribuye significativamente al Producto Interno Bruto (PBI) nacional, generando empleo y fomentando el crecimiento, también es conocido por su alto consumo de energía. Este consumo continuo podría resultar en costos elevados y un impacto ambiental negativo en el futuro. En este contexto, el ahorro energético en nuevos proyectos de edificación se vuelve fundamental y abarca dos aspectos esenciales. En primer lugar, se necesita mejorar el aislamiento térmico y adoptar soluciones constructivas más efectivas para lograr un diseño pasivo, reduciendo la demanda de energía de los edificios y contribuyendo a la reducción de las emisiones CO_2 . En segundo lugar, resulta imperativo incorporar fuentes de energía renovable, como la solar, lo que afecta tanto a la configuración de los edificios como a la planificación urbanística. Este enfoque no solo busca garantizar la eficiencia en el uso de la energía, sino también mitigar los impactos ambientales asociados con la construcción y el consumo energético (Peláez Ramos, 2012).

Aunque se mencionan términos como sustentabilidad, eficiencia energética y calidad ambiental, el auténtico reto radica en implementar estas estrategias de manera efectiva, asegurando al mismo tiempo la preservación para las generaciones futuras. Es fundamental

garantizar que, las estrategias concebidas en la fase inicial del diseño de un proyecto se lleven a cabo durante su construcción. Además, se destaca la importancia de que los profesionales involucrados en este proceso posean una sólida conciencia ambiental, para así salvaguardar la integridad de esta labor (Barton, 2011).

Además de lo expuesto previamente, se destaca la trascendental función del Estado en esta labor a través de la formulación de políticas ambientales específicas para el sector de la construcción. En este sentido, Barton (2011), propone la necesidad de realizar un estudio de impacto ambiental (EIA) y una evaluación de impacto social (EIS) para cada proyecto, abordando dimensiones temporales, escalas y aspectos sociales. De esta manera, la contribución a un desarrollo sustentable en la construcción implica un compromiso a largo plazo, donde los criterios de diseño, construcción y operación deben ser socialmente inclusivos, fundamentados en necesidades y equidad, y considerando plazos intergeneracionales.

1.3 Concreto permeable

Aunque varios autores concuerdan en que la sostenibilidad en la construcción es un proceso a largo plazo, esto no impide que los investigadores avancen en el desarrollo de técnicas ecoamigables dentro de los sistemas constructivos, e incluso propongan innovaciones en los materiales utilizados, siendo uno de los principales el concreto.

Como es sabido, en el ámbito de la infraestructura urbana, se persigue la preservación del concreto ante posibles filtraciones o precipitaciones. Esta preocupación contrasta con la de infraestructura vial, donde diversos agentes externos como lluvias, fluidos y sobrecargas vehiculares pueden ocasionar daños significativos. En este contexto, el concreto permeable emerge como una solución prometedora y sostenible para la construcción de pavimentos.

El concreto permeable se compone principalmente de: agregado pétreo, cemento y agua, siendo su aplicación principal en áreas de bajo tráfico, como estacionamientos y aceras. Este tipo de concreto no solo promueve la permeabilidad, sino que también aboga por criterios estéticos, según lo indicado por el ACI Committee 522-23 (2023). Su característica fundamental, es permitir el paso del agua a través de su estructura, destacándose en la gestión de aguas pluviales.

Las principales ventajas del concreto permeable que abarcan aspectos funcionales y medioambientales son los siguientes:

- **Control de contaminación en aguas pluviales:** El concreto permeable actúa como un filtro natural, permitiendo que el agua de lluvia se filtre a través de su superficie capturando sedimentos y contaminantes, lo cual ayuda a reducir la contaminación.
- **Reducción del ruido:** La textura porosa del concreto permeable reduce el ruido generado por la interacción entre los neumáticos y la superficie del pavimento. Esto contribuye a crear entornos urbanos más silenciosos y cómodos.

- **Mitigación de efectos de olas de calor:** El concreto permeable tiene la capacidad de disminuir los efectos de las olas de calor urbanas al permitir que el agua se infiltre y se evapore, contribuyendo así a moderar las temperaturas superficiales.
- **Manejo sostenible de aguas pluviales:** Al posibilitar el flujo de agua a través de su estructura, el concreto permeable desempeña un papel clave en la gestión sostenible de aguas pluviales. Esto ayuda a prevenir inundaciones y contribuye a la recarga de los mantos acuíferos.
- **Incremento del nivel de mantos acuíferos:** La capacidad de infiltración del concreto permeable colabora en aumentar el nivel de estos, fuentes esenciales de suministro de agua para las ciudades.

La adopción de esta tecnología no solo ofrece beneficios prácticos para la infraestructura urbana, sino que también juega un papel significativo en la preservación y gestión responsable del recurso hídrico en entornos urbanos, promoviendo la sostenibilidad a largo plazo. Estas consideraciones son respaldadas por las directrices del ACI Committee 522-23 (2023), que respaldan la utilización de concreto permeable en aplicaciones específicas.

Como menciona Arrieta y Carro (2011), el concreto permeable tiene diversas aplicaciones en la infraestructura vial, sin embargo, en países en vías de desarrollo, especialmente en Latinoamérica aún no se ha implementado su uso, a diferencia de países desarrollados como Estados Unidos y Europa. El ACI Committee 522R-10 (2010), menciona diversas aplicaciones para el concreto permeable, como ejemplo, en Florida se ha adoptado su uso en los estacionamientos con el propósito principal gestionar las aguas pluviales.

En los pavimentos de bajo tránsito tiene dos usos principales: como base o subbase, y superficie de la calzada, en ambas aplicaciones se deben cumplir los requerimientos de resistencia y permeabilidad, con espesores típicos de 15 a 30 cm para soportar las cargas generadas por el tránsito. Este concreto también se usa como sistema de drenaje alternativo ayudando a reducir el bombeo de los materiales de la subrasante para evitar las fallas en el pavimento. Entre otras aplicaciones secundarias se encuentran su inclusión en los techos verdes, evitando los empozamientos y crecimiento de mala hierba, al mismo tiempo que proporciona una superficie duradera, el uso de losas en canchas de tenis, y como barreras acústicas, gracias a su capacidad de reducción de ruido (ACI Committee 522-23, 2023).

Es innegable que el concreto permeable ha ganado terreno en la industria constructiva y se espera que su uso se extienda a los países de Latinoamérica, dando paso al progreso de una construcción sustentable. En Perú, específicamente en la región de Piura, el control de las aguas pluviales se erige como un desafío crítico, especialmente durante las estaciones de precipitaciones intensas, como ocurre con el fenómeno del Niño. Este fenómeno conlleva inundaciones en las arterias principales de la ciudad y desbordamientos de ríos. A pesar de que Perú se encuentra en una fase de desarrollo, la consideración del concreto permeable se presenta como una opción plausible para abordar la problemática de las inundaciones. Sin embargo, es esencial realizar investigaciones exhaustivas que profundicen nuestro

entendimiento sobre el diseño y la elaboración de este tipo de concreto para garantizar su efectividad como solución.

1.4 Diseño de concreto permeable ACI

De acuerdo con el ACI Committee 522-23 (2023), el concreto permeable ha sido utilizado desde finales de la segunda guerra mundial. Sin embargo, en los últimos años varios autores han empleado diferentes métodos para la investigación de sus propiedades mecánicas y físicas.

Factores como la energía de compactación, el contenido de vacíos, la proporción de los agregados y el porcentaje de pasta son parámetros clave que contribuyen a garantizar características esenciales del concreto permeable, como la resistencia a la compresión y a la permeabilidad.

1.4.1 Energía de compactación

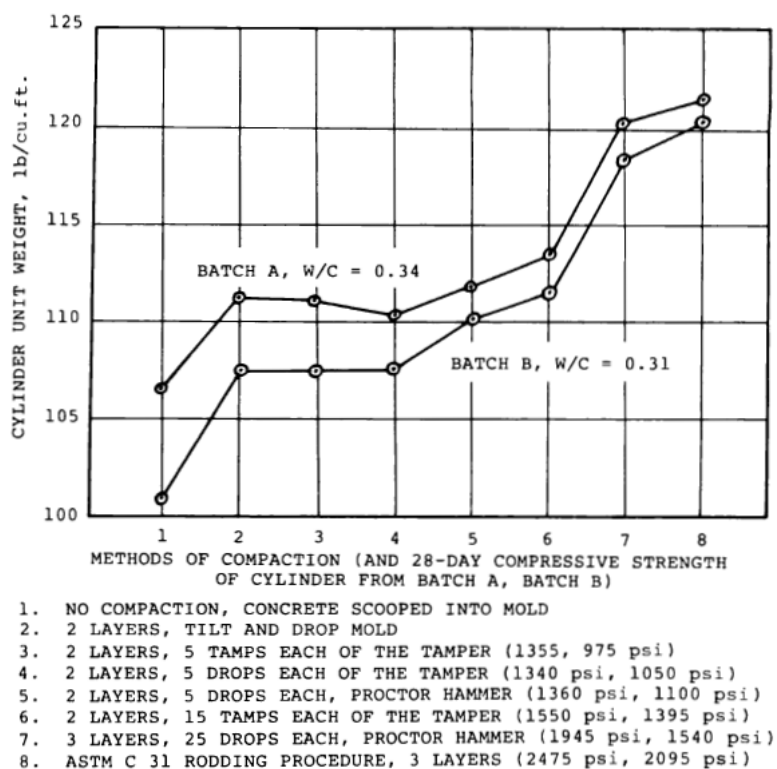
La energía de compactación influye significativamente en la presencia de espacios vacíos, la porosidad y la densidad del concreto permeable. Experimentos realizados en laboratorio señalan que diversos niveles de compactación ocasionan cambios en el peso unitario y contenido de vacíos, lo que repercute en la resistencia a compresión del concreto permeable. En situaciones donde la proporción de pasta es constante, se informa que la cantidad de espacios vacíos es influenciada por la intensidad de compactación, así como por la forma, textura y el coeficiente de uniformidad de las partículas de agregado (ACI Committee 522-23, 2023).

La energía de compactación puede entenderse como la fuerza aplicada de forma mecánica y constante a una muestra de suelo, eliminando o reduciendo sus vacíos (Moscoso Mela & Marcos Chuta, 2022). Meininger (1988), determinó que no solo la proporción de agregados influye en las propiedades del concreto permeable, sino también la energía de compactación. En la Figura 1 se puede observar que el peso unitario del concreto permeable se incrementa a medida que lo hace también la energía de compactación; además se aprecia cómo las muestras no compactadas tienen un rango más amplio de variación entre ellas; Meininger (1988), concluyó que estas muestras presentan grandes vacíos y discontinuidades. Por el contrario, a partir de la muestra 5, las cuales fueron compactadas entre 2 y 3 capas, el peso unitario aumenta, volviendo a la muestra más densa y los resultados se vuelven más constantes. Las muestras 6 y 7, que fueron compactadas con un martillo proctor a 2 y 3 capas con 15 y 25 golpes respectivamente, alcanzaron densidades en el rango de 111 a 121 PSI (1778 kg/m³ a 1938 kg/m³)

Esto demuestra que la aplicación del método proctor estándar, que proporciona una energía de compactación de 600 KN.m/m³ por golpe, es especialmente efectiva para lograr mayores pesos unitarios y densidades más constantes en el concreto permeable. Así, se posiciona como una de las mejores técnicas para compactar este tipo de concreto.

Figura 1

Variación del peso unitario con distintos niveles de compactación



Nota. Extraído de Meininger (1988)

1.4.2 Contenido de vacíos

El contenido de vacíos en el concreto permeable, está influenciado por diversos factores, como la distribución de tamaños de los agregados, la proporción de material cementicio, la relación agua/cemento (a/c) y el nivel de compactación. La distribución del tamaño de los agregados afecta la cantidad de espacios vacíos, y se ha demostrado que combinar agregados de distintos tamaños, puede resultar diferentes porosidades. Sin embargo, es importante tener precaución al combinar tamaños de agregados para evitar relaciones de tamaño excesivamente grandes, ya que esto podría disminuir la porosidad y, por ende, la capacidad de permeabilidad, a pesar de que pueda mejorar las propiedades mecánicas (ACI Committee 522-23, 2023).

1.4.3 Permeabilidad

La permeabilidad está ligada a la cantidad de vacíos y las dimensiones de los poros. Experimentos realizados por Meininger (1988), indican que se necesita un contenido de vacíos mínimo de alrededor del 15 % para obtener una permeabilidad significativa. Para un contenido de vacíos en el rango del 20 al 25 %, se estima que el coeficiente de permeabilidad es aproximadamente de 0.01 m/s (600 mm/min). Meininger (1988), ilustra la relación entre el contenido de vacíos de aire y la permeabilidad en una mezcla de concreto permeable. Dado que la tasa de filtración aumenta con el incremento del contenido de vacíos de aire y, por

ende, disminuye la resistencia a la compresión, el desafío en la proporción de mezclas de concreto permeable consiste en lograr un equilibrio entre una velocidad de percolación aceptable y una resistencia a la compresión adecuada. Esta propiedad se puede evaluar, mediante un permeámetro de cabeza descendente simple (ACI Committee 522-23, 2023).

La propiedad de permeabilidad es la que reconoce a este concreto como ecoamigable y se define comúnmente como la capacidad que tiene un material para transportar agua, de acuerdo con Chandrappa y Prapoorna Biligiri (2016). En este tipo de mezclas, la permeabilidad está definida por los poros basándose en la interconectividad, capilaridad y salida de estos. El armazón de poros conectados es lo que permite que el líquido fluya a lo largo de toda la longitud del espécimen, la capilaridad podrá ayudar a absorber y retener un pequeño porcentaje del agua entre los poros de la mezcla, mientras que los poros sin salida provocarán el estancamiento del líquido, en el punto donde se encuentren.

1.4.4 Porcentaje de agregados

El ACI Committee 522R-10 (2010) establece una relación entre el porcentaje de agregado fino y el contenido de agregado grueso en un volumen de concreto (b/bo) mediante el cuadro de doble entrada mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1

Valores b/bo para agregado grueso en base al porcentaje de agregado fino

Porcentaje de agregado fino (%)	b/bo	
	ASTM C33/C33M Size N°8	ASTM C33/C33M Size N°67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Nota. Extraído de ACI Committee 522R-10 (2010)

De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 1, los porcentajes de agregado fino comúnmente utilizados para el concreto permeable son 0, 10 y 20 %. Sin embargo, para el ACI Committee 522-23 (2023), los factores (b/bo) sufren una variación, dado que, si se utiliza agregado fino, se emplea un factor de 0.95; en caso contrario, se utiliza 0.90. No obstante, la adición del agregado fino puede influir positivamente en la resistencia a la compresión y la densidad, aunque también puede reducir la velocidad del flujo de agua a través de la estructura del concreto permeable.

1.4.5 Porcentaje de pasta

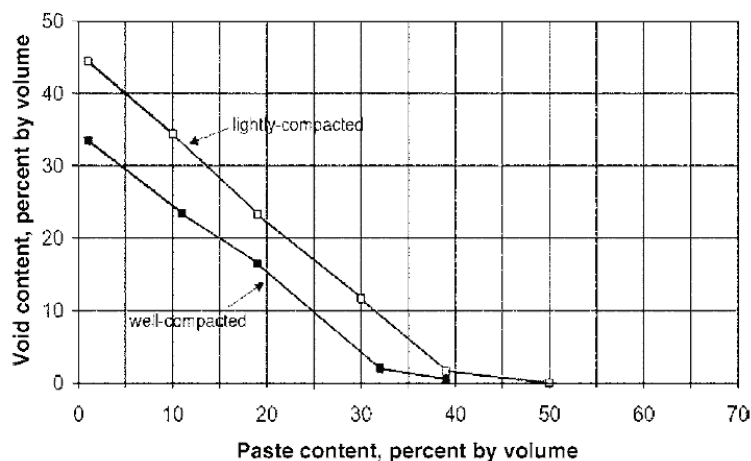
Tanto en el concreto convencional como en el concreto permeable, el porcentaje de pasta es de vital importancia para la trabajabilidad del concreto, la resistencia a la compresión y a la tracción, la durabilidad y la relación a/c.

Para determinar el porcentaje de volumen de pasta, se hace uso de la figura establecida por el ACI Committee 522-R (2010), donde se muestra una correlación entre el contenido de

pasta y el contenido de vacíos. Además, señala la diferencia entre las dos energías de compactación: bien compactado a 15 golpes por capa y ligeramente compactado a 5 golpes por capa, estableciendo un comportamiento inversamente proporcional, dado que, mientras mayor sea el porcentaje de pasta, la cantidad de vacíos será menor.

Figura 2

Relación entre el porcentaje de pasta y el contenido de vacíos



Nota. Extraído de ACI Committee 522R-10 (2010)

Según el ACI Committee 522-23 (2023), los porcentajes de pasta en el concreto permeable varían en función de la resistencia a compresión requerida. Para obtener altas resistencias, se recomienda un contenido de pasta del 24 %, mientras que para resistencias más bajas se utiliza un 21 %.

1.4.6 Proporcionamiento de la mezcla

En el 2010 el ACI publicó un primer informe sobre el hormigón permeable, con un enfoque técnico y detallado en diversos aspectos del material, incluyendo el proporcionamiento de mezclas. Sin embargo, este informe se actualizó en el año 2023. No obstante, los procedimientos propuestos no difieren significativamente de los publicados por el ACI Committee 522R-10 (2010). En ambos informes el peso del agregado grueso, la relación a/c y el contenido de vacíos son parámetros importantes para el diseño, aunque tengan valores diferentes.

Las principales diferencias entre estos informes radican en los valores asignados a la relación agua/cemento (a/c). El ACI Committee 522-23 (2023) establece un rango de 0.30 a 0.40, mientras que el ACI Committee 522R-10 (2010) fija este rango entre 0.26 y 0.40. En cuanto al contenido de vacíos, este se determina según las proporciones de los materiales seleccionados y no está vinculado al contenido de pasta, como sucede en el ACI Committee 522R-10 (2010). En el ACI Committee 522-23 (2023), el contenido de pasta varía en función de la resistencia deseada para el concreto permeable. No obstante, ambos informes coinciden en que el porcentaje de vacíos debe ser superior al 15 %.

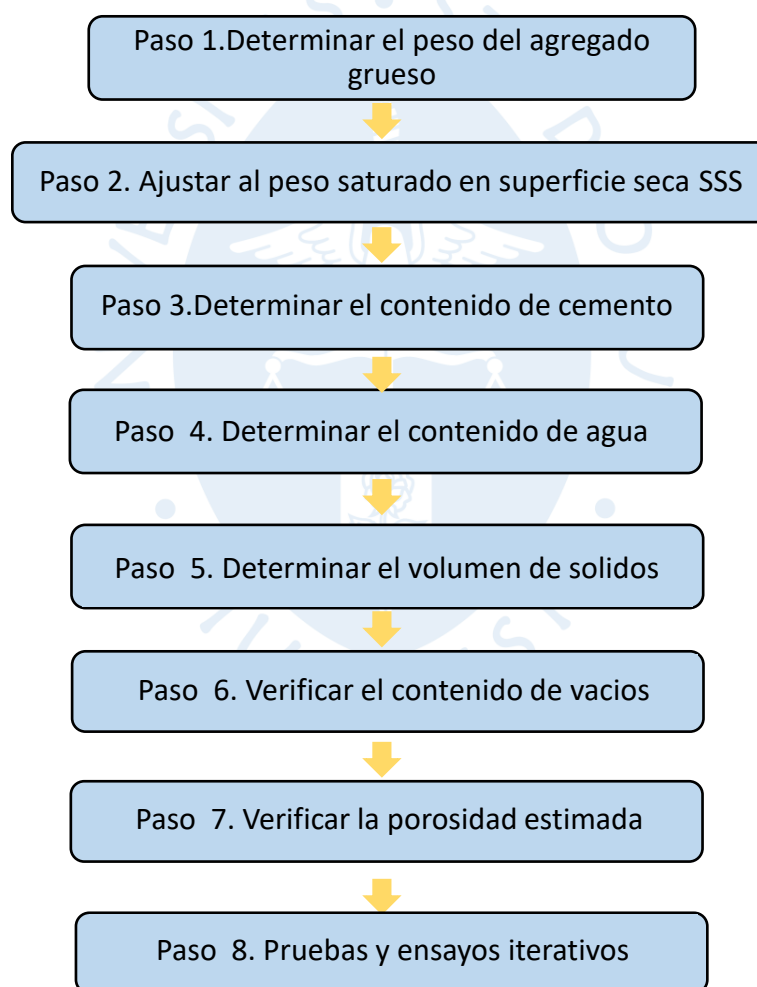
Otra diferencia significativa es la incorporación de suplementos cementicios, fibras y aditivos. Mientras que el ACI Committee 522-23 (2023) establece rangos específicos para su uso, el ACI Committee 522R-10 (2010) no proporciona valores para su adición.

De acuerdo con el ACI Committee 522R-10 (2010), para iniciar con el proporcionamiento de mezcla, es importante fijar algunos parámetros como: coeficiente b/b_o , la relación a/c y el contenido de vacíos. El ACI Committee 522R-10 (2010) recomienda que el coeficiente b/b_o sea 0.99, la cantidad de vacíos sea mayor al 15%, y la relación a/c oscile entre 0.26 y 0.45 para asegurar las propiedades de permeabilidad y resistencia.

En la fig se han estructurado en un diagrama de flujo los pasos para diseñar un concreto permeable, los cuales se detallan en los párrafos a continuación.

Figura 3

Pasos propuestos por el ACI Committee 522R-10



Nota. Extraído de ACI Committee 522R-10 (2010)

a) Paso 1. Determinar el peso del agregado

Para este tipo de concreto se utiliza un agregado grueso con huso #8 y # 67 establecido bajo los requerimientos de la norma ASTM C33/C33M. Una vez elegido el valor de la relación b/b_o de la Tabla 1, se multiplica tanto con el peso unitario compactado seco del

agregado grueso como con un 1 m³ que representa el volumen de concreto, como se aprecia en la Ec. 1.

$$\text{Peso del A. G} = \text{PU compactado seco} * \frac{b}{b_0} * \text{Vol concreto (m}^3\text{)} \quad \text{Ec. 1}$$

b) Paso 2. Ajustar al peso saturado en superficie seca (SSS)

El agregado grueso utilizado debe estar en condición saturado en superficie seca, para esto es importante conocer su capacidad de absorción mediante la Ec. 2. Luego, se determina el P.U seco del A.G mediante la Ec. 3 y finalmente se puede ajustar el agregado grueso al estado SSS, como se especifica en la Ec. 4.

$$\text{Capacidad de absorción} = \text{CA (\%)} = (\text{Peso del A. G}_{\text{SSS}} - \text{Peso del A. G}_{\text{OD}}) \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{P. U seco del A. G.} = \frac{\text{P.U stock del A.G.}}{\% \text{HT}+1} \quad \text{Ec. 3}$$

$$\text{Peso del A. G}_{\text{SSS}} = (1 + \text{CA (\%)}) * \text{P. U seco del A. G.} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- CA (%) = capacidad de absorción
- % HT= humedad total

c) Paso 3. Determinar el contenido de cemento

El contenido cemento en este método es determinado tomando como referente la norma elaborada por el ACI Committee 211.1 (2009), donde se muestra el diseño del concreto convencional, el cual es la base para la elaboración del concreto permeable, por lo que para determinar la masa de cemento se sigue el mismo razonamiento. Como se sabe los componentes de la pasta utilizada en el concreto son el cemento y el agua, y mediante la relación a/c en conjunto con la gravedad específica de dichos materiales se puede obtener la masa de cemento a utilizar por metro cúbico de concreto. Según la norma ACI Committee 522 R-10 (2010), el porcentaje de volumen de pasta tiene una relación directa con el contenido vacíos, tal como se muestra en la Figura 2, por lo tanto, basta con establecer uno de los dos valores para obtener ambos mediante la gráfica, teniendo estos valores se reemplazan y se halla la $\text{Masa}_{\text{cemento}}$ mediante la Ec. 5.

$$\text{Masa}_{\text{cemento}} = \frac{\text{Vol pasta}}{\left(\frac{1}{\rho_{\text{cemento}}} + \frac{a}{\rho_{\text{agua}}} \right)} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- ρ_{agua} =densidad del agua
- ρ_{cemento} = densidad del cemento
- a/c =relación agua/cemento

d) Paso 4. Determinar el contenido de agua final

El contenido de agua final se determinará haciendo uso de la relación a/c , y la $Masa_{\text{cemento}}$ como se muestra en la Ec. 6.

$$Masa_{\text{agua } i} = a/c * Masa_{\text{cemento}} \quad \text{Ec. 6}$$

Adicionalmente se realiza una corrección por el estado de humedad de los agregados denominada absorción efectiva, para que se pueda obtener el contenido de agua necesario a utilizar en el proporcionamiento de mezcla, mediante las Ec. 7, Ec. 8 y Ec. 9.

$$\text{Absorción efectiva} = AE = \%CA - \%HT \quad \text{Ec. 7}$$

$$\text{Corrección} = P. U \text{ Ag. Grueso}_{\text{seco}} * AE / 100 \quad \text{Ec. 8}$$

$$Masa_{\text{agua final}} = Masa_{\text{agua } i} + \text{Corrección} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- AE =absorción efectiva
- $\% CA$ = capacidad de absorción
- $\% HT$ = humedad total

e) Paso 5. Calcular el volumen total de sólidos

Por la composición del concreto permeable el volumen total de sólidos lo constituye el volumen del cemento, agregado grueso y agua. Por lo tanto, es necesario determinar el volumen de cada componente y sumar las cantidades, tal y como lo describen las ecuaciones Ec.10, Ec. 11 y Ec.12. Luego sumando cada una de estas ecuaciones se puede hallar el volumen total de sólidos como en la Ec.13.

$$Vol_{\text{ag,grueso}} = (\text{Peso del A. } G_{SSS}) / (GS_{A.G.} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \quad \text{Ec. 10}$$

$$Vol_{\text{cemento}} = (Masa_{\text{cemento}}) / (GS_{\text{cemento}} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \quad \text{Ec. 11}$$

$$\text{Vol}_{\text{agua}} = (\text{Masa}_{\text{agua}}) / (GS_{\text{agua}} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \quad \text{Ec. 12}$$

Entonces:

$$\text{Vol}_{\text{total de sólidos}} = \text{Vol}_{\text{agua}} + \text{Vol}_{\text{cemento}} + \text{Vol}_{\text{ag.grueso}} \quad \text{Ec. 13}$$

- GS_{agua} = gravedad específica del agua
- GS_{cemento} = gravedad específica del cemento
- $GS_{\text{A.G.}}$ = gravedad específica del agregado grueso

f) Paso 6. Calcular el contenido de vacíos teórico

Obtenido el volumen total de sólidos en el paso 5, se puede determinar el porcentaje de vacíos teórico que tendrá la mezcla mediante la Ec. 14. Tomando como referencia el modelo trifásico del suelo, el volumen total de una muestra está constituido por el volumen total de sólidos y el volumen de vacíos, es por ello por lo que para determinar el porcentaje de vacíos producido por la formación de poros en las muestras cilíndricas del concreto se reemplazará el volumen total (V_{total}) por el valor de 1.

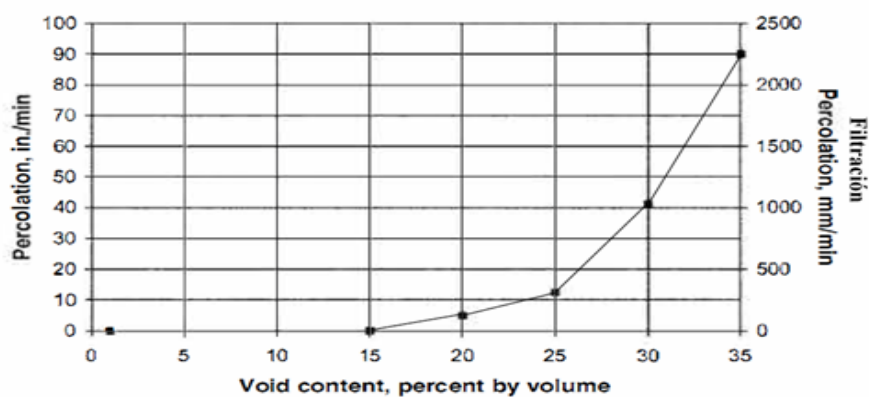
$$\% \text{ Vacíos} = \left(\frac{V_{\text{total}} - V_{\text{total de sólidos}}}{V_{\text{total}}} \right) * 100 \quad \text{Ec. 14}$$

g) Paso 7. Hallar la tasa de filtración estimada

Obtenido el porcentaje de vacíos en el paso 6, se usa dicho resultado y se estima la permeabilidad teórica que tendrá el diseño, gracias al gráfico de la Figura 4, en el que se aprecia una relación directamente proporcional entre el contenido de vacíos (%) y la permeabilidad (mm/min) generada. Además, se observa que el mínimo valor de porcentaje de vacíos que asegura una permeabilidad en el concreto permeable es de 15 %.

Figura 4

Relación entre permeabilidad y contenido de vacíos



Nota. Extraído de ACI Committee 522R-10 (2010)

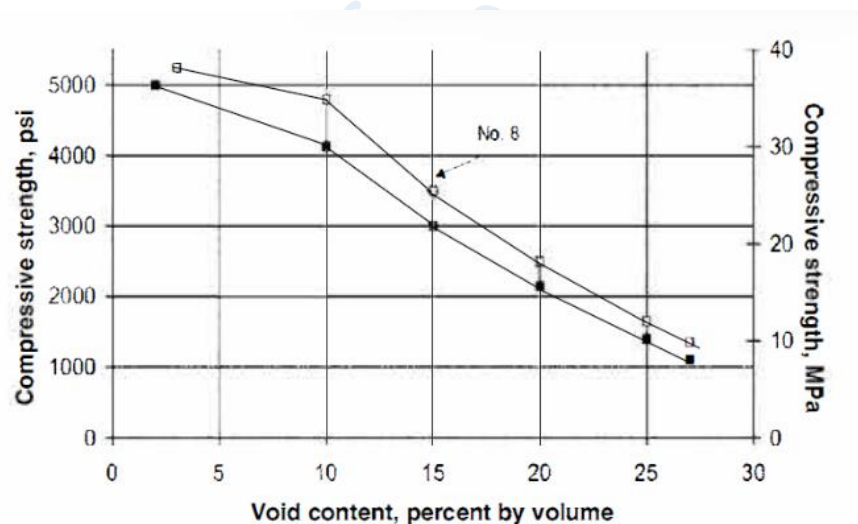
h) Paso 8. Pruebas y ensayos iterativos

Se puede determinar la densidad teórica del concreto permeable al sumar los pesos en stock de cada uno de los componentes como en la Ec.15, y también verificar mediante las pruebas de laboratorio los resultados propuestos en el diseño. Adicionalmente se puede conocer los valores estimados de resistencia a compresión y permeabilidad para los diseños realizados por Meininger (1988) y citados por el ACI Committee 522R-10 (2010), mostrados en la Figura 4 y Figura 5.

$$P. U_{\text{teorico}} = \text{Peso}_{\text{agua(inicial)}} + \text{Peso}_{\text{cemento(stock)}} + \text{Peso}_{\text{agregado (sss)}} \quad \text{Ec. 15}$$

Figura 5

Relación entre la resistencia a compresión y el contenido de vacíos



Nota. Extraído de ACI Committee 522R-10 (2010)

1.5 Materiales del concreto permeable

Los componentes principales del concreto permeable son cemento portland, agua, agregado grueso y poco o nada de agregado fino (ACI Committee 522-23, 2023). Los materiales juegan un rol importante en el diseño de concreto permeable por sus diversas características y distintas propiedades que nos permiten alcanzar la permeabilidad y la resistencia a compresión deseadas.

1.4.1 Cemento Portland tipo I

El cemento Portland tipo I, es utilizado en este tipo de mezclas para recubrir adecuadamente los agregados y proporcionar un correcto entrelazamiento entre las partículas, aumentando la resistencia a compresión, al igual que en el concreto convencional, este debe cumplir lo especificado en la norma ASTM C150 (2022). El concreto permeable alcanza resistencias a compresión que van de 28 kg/cm² a 280 kg/cm².

La relación a/c es otro parámetro importante para tener en cuenta y definir en el diseño para la elaboración de concreto permeable, esta relación no sigue la misma tendencia que se observa en el concreto convencional, donde un aumento en la relación a/c resulta en un aumento de la resistencia. En el caso del concreto permeable, la relación a/c varía típicamente entre 0.28 y 0.4, con el propósito de garantizar la cobertura total de los agregados (Tennis y otros, 2004).

1.4.2 Agua

El agua utilizada en el concreto poroso, debe cumplir las mismas especificaciones que el concreto convencional tal y como lo dicta el ACI Committee 522R-10 (2010). Se recomienda el uso de una relación a/c entre 0.26 y 0.45, ya que una cantidad excesiva de agua podría desencadenar la segregación de los materiales y una cantidad muy pequeña podría obstruir el sistema de poros e interferir en la hidratación del cemento, afectando el desempeño estructural del concreto permeable (ACI Committee 522R-10, 2010).

Mulligan (2005) señala que utilizar una correcta cantidad de agua es importante para obtener una adecuada trabajabilidad e hidratación del cemento en el concreto. Esta última se relaciona con la porosidad, ya que durante el proceso de hidratación el volumen de los sólidos incrementa a medida que la mezcla fragua disminuyendo la porosidad, resultando en un aumento para la fuerza de compresión, por el contrario, al utilizar elevadas relaciones a/c es difícil asegurar el desarrollo de enlaces y el recubrimiento de los agregados, generalmente al trabajar con estas relaciones se obtiene una alta porosidad, conduciendo a una menor resistencia a compresión. Bajo este enfoque Aitcin y Neville (2003), determinaron que se requiere un volumen de 1.2 ml de agua para hidratar 1 ml de cemento, y la relación a/c que permite una hidratación total de la pasta es 0.42.

1.4.3 Agregado grueso

El agregado grueso, ya sea redondeado o triturado, utilizado en el concreto poroso debe cumplir con los parámetros establecidos en las normas ASTM D448 (2017) y ASTM C33/C33M, (2018) debe cumplir con las gradaciones más comunes siendo 7 (de 1/2" a N° 4), 8 (de 3/8" a N° 8), 67 (de 3/4" a N° 4), y 89 (de 3/8" a N° 16). Por lo general, el tamaño del agregado grueso utilizado varía de 19 mm a 9.5 mm, evitando las partículas alargadas o laminadas, y garantizando que el material esté limpio y libre de finos, como arcilla u otras sustancias contaminantes que puedan afectar negativamente la adherencia de la pasta y el agregado (ACI Committee 522R-10, 2010).

El tamaño, la forma y la distribución del agregado desempeñan un papel crucial en el control de la durabilidad y permeabilidad del concreto poroso (Chandrappa & Prapoorna, 2016). Según el ACI, se puede utilizar un solo tamaño de agregado o una combinación de dos tamaños como máximo para evitar que la mezcla se vuelva impermeable. Es esencial realizar una caracterización precisa, que incluya la determinación del contenido de humedad, la capacidad de absorción y el peso unitario, para garantizar la estabilidad volumétrica de la mezcla.

El tamaño del agregado también tiene un impacto directo en la permeabilidad. Un estudio realizado por Neithalath et al. (2010) reveló que, para una porosidad constante, un aumento en el tamaño del agregado de 2.36 mm a 9.5 mm resulta en un incremento en la permeabilidad de hasta el doble de su valor inicial. De acuerdo con Elango y Revathi (2020), la relación agregado cemento (ag/c) también influye en la resistencia a compresión, en un estudio de investigación, Mulligan (2005) determinó que la relación ag/c óptima sin afectar la resistencia a compresión y permeabilidad se encuentra entre 4/1 y 8/1. No obstante, con base a las pruebas de laboratorio realizadas por Arrieta y Carro (2011), se comprobó que dicha relación no influye significativamente en la resistencia y permeabilidad.

1.4.4 Agregado fino

Se ha encontrado que la incorporación de pequeñas cantidades de agregado fino o fibra sintética mejora la resistencia del concreto a los ciclos de congelación y descongelación. El agregado fino incrementa la viscosidad de la pasta cementante, permitiendo que una capa más gruesa de pasta rodee cada partícula de agregado. Esto aumenta el área de contacto entre las partículas durante la colocación, favoreciendo una mayor transferencia de carga y, por ende, una mayor resistencia. Además, se reduce el ángulo de incidencia entre las partículas, lo que contribuye a proteger contra las tensiones generadas por los ciclos de congelación y descongelación. No obstante, la adición del agregado fino puede repercutir negativamente en la capacidad de permeabilidad del concreto drenante, por lo que se sugiere implementar el uso de fibras (ACI Committee 522-23, 2023).

1.6 Propiedades físicas – reología del concreto permeable en estado fresco

El estado fresco del concreto permeable inicia desde el momento en el que sus componentes (agregado grueso, cemento y agua) entran en contacto y finaliza hasta su endurecimiento inicial. La trabajabilidad del concreto es una de las principales características que permite realizar adecuadamente los procesos de mezclado, transporte, colocación, compactación y acabado.

1.6.1 Trabajabilidad del concreto drenante

El concreto drenante debe poseer una trabajabilidad adecuada en su estado fresco para satisfacer los requisitos mínimos de resistencia y durabilidad en estado endurecido, al igual que se exige en el concreto convencional (Vitola & Fernandez, 1998). Esto significa que, debe ser manejable y moldeable durante su colocación, garantizando al mismo tiempo que, una vez endurecido, mantenga la resistencia y durabilidad necesarias que garantizará un rendimiento adecuado para gestionar aguas pluviales.

1.6.2 Densidad

La densidad o peso unitario es la masa del material necesario para llenar un volumen unitario. Para determinar la densidad en el laboratorio se realiza lo especificado en el ASTM C1688/C1688M-14a.

La energía de compactación aplicada en la elaboración del concreto permeable influye en el porcentaje de vacíos y por consiguiente en el peso volumétrico. En una serie de pruebas

(Meininger, 1988), para concreto permeable, compactado con 8 diferentes energías de compactación, los valores de los pesos unitarios oscilan entre los 1680 kg/m³ y 1920 kg/m³.

Como se aprecia en la Figura 6, el concreto permeable es considerado como el concreto más liviano por su alto contenido de vacíos y su masa volumétrica que varía entre el 70% y 85% de una mezcla fresca de concreto convencional, debido a su estructura interna (Flores Quispe & Pacompia Calcina, 2015).

Figura 6

Estructura interna del concreto permeable



Nota. Extraído de Flores & Pacompia (2015)

1.6.3 Tiempo de fragua

El tiempo de fragua es el tiempo requerido para el endurecimiento inicial del concreto permeable en la etapa de colocación y acabado, este tiempo de fragua se reduce a comparación del concreto convencional, debido a la variación de la cantidad de pasta. En el concreto permeable el tiempo de fraguado es menor a 60 min (Aire, 2020) mientras que en el concreto convencional varía entre 240 y 341 min.

1.7 Propiedades del concreto permeable

El concreto permeable debe cumplir con las propiedades necesarias para sus distintas aplicaciones. La resistencia es especialmente crítica en pavimentos de bajo tránsito, dado que influye significativamente en su durabilidad a largo plazo. Asimismo, garantizar un nivel adecuado de contenido de vacíos y permeabilidad resulta fundamental para lograr un desempeño óptimo. Por lo tanto, a continuación, se brindarán detalles adicionales sobre estas propiedades.

1.7.1 Resistencia a la compresión

Una de las propiedades más relevantes es la resistencia a compresión que logra obtener el concreto permeable. Dicha propiedad puede verse influenciada por la relación a/c, la relación ag/c y el tamaño y tipo de los agregados. De acuerdo con Elango y Revathi (2020) con relaciones ag/c de 4/1 y 8/1 se han obtenido resistencias desde 156 kg/cm² hasta 96 kg/cm².

Dentro de las diversas aplicaciones del concreto permeable, la resistencia a compresión es un parámetro estructural de gran importancia, en cuanto se refiere a pavimentos y estacionamientos, nos ayuda a determinar el módulo de rotura y elasticidad para prevenir las fallas por fatiga y erosión, además de ser un factor clave para diseñar el espesor del pavimento (Marks, A., 2008). Esta propiedad se puede determinar usando la norma ASTM C39/C39M (2021). Durante el (2019) Amorós y Bendezu, realizaron una investigación elaborando cinco diseños de mezcla variando la cantidad de cemento, obteniendo resistencias desde 110 kg/cm² hasta 280.56 kg/cm².

Actualmente para mejorar la resistencia a compresión de un concreto permeable también se puede incorporar el uso de plastificantes, tal y como lo hicieron Cruz y Arana (2021), alcanzando resistencias desde 212 kg/cm² hasta 254 kg/cm².

1.7.2 Permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad de permitir el paso del agua a través de la estructura de un material y es quizá la principal característica del concreto permeable (Angelone y otros, 2006). Meininger (1988) estableció que la capacidad de filtración del concreto permeable se encuentra en el rango de 120 a 320 l/m²/min (120 a 324 mm/min), rangos que también aparecen en el ACI Committee 522 R -10 (2010).

De acuerdo con Vélez (2010), la permeabilidad no depende únicamente de la porosidad de la pasta de cemento, sino que también está relacionada con la generación de vacíos y la conectividad de los poros. Mulligan (2005) estudió las propiedades del concreto poroso, entre ellas la permeabilidad, obteniendo valores desde 1270 mm/min hasta 5842 mm/min. Por otro lado, Pereira et al. (2021) estudiaron la variación de la permeabilidad con diferente contenido de vacíos, obteniendo resultados desde 0.99 cm/seg (594 mm/min) hasta 2.01 cm/seg (1206 mm/min).

Capítulo 2

Programa experimental

En este capítulo, se presenta en detalle el proceso de diseño del concreto permeable, siguiendo las pautas establecidas en el ACI. En base a lo referido en el capítulo I, se optó por utilizar el procedimiento explicado en ACI Committee 522R-10 (2010) respecto al ACI Committee 522-23 (2023), dado que se adecua mejor al objetivo de este trabajo, el cual consiste en analizar las propiedades del concreto permeable, empleando sus materiales principales los cuales son: cemento, agregado grueso y agua, sin la adición de ningún aditivo, fibra, o agregado fino.

En primer lugar, se determinó que los agregados provendrían de canteras locales dentro de la región. Tras la selección, se llevaron a cabo los ensayos pertinentes para evaluar las características y propiedades de estos materiales. Todas las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción (LEMC) de la Universidad de Piura.

Después de obtener los parámetros necesarios gracias a la caracterización, se procedió con el proporcionamiento de mezclas siguiendo la metodología de 8 pasos propuesta en el ACI Committee 522-R 10 (2010).

De acuerdo con este procedimiento, se establecieron dos diseños de mezcla cada uno con distinta relación a/c. Ambos diseños mantuvieron el mismo porcentaje de contenido de vacíos, porcentaje de volumen de pasta, y porcentaje de agregado fino. Una vez definidas las cantidades teóricas necesarias, se elaboraron especímenes cilíndricos de concreto de $\varnothing 10 \times 20$ cm.

Finalmente, cuando los especímenes cumplieron 28 días de curado, fueron retirados de la poza de curado y ensayados bajo las normativas nacionales e internacionales especificadas para este tipo de concreto, los principales ensayos son: resistencia a compresión, densidad, contenido de vacíos y permeabilidad. Paralelamente y gracias al estudio realizado por Neithalath et al. (2003) se elaboró un permeámetro de caída libre.

2.1 Ensayos

Los ensayos son parte fundamental en todo el proceso de elaboración del concreto drenante. En una etapa inicial permite asegurar el uso de materiales en buenas condiciones y conocer características para realizar el diseño de mezcla. Durante el proceso ayuda a verificar que el procedimiento se realice adecuadamente para lograr las propiedades propuestas. Finalmente, en el estado endurecido se puede conocer las propiedades reales alcanzadas como resistencia a compresión, permeabilidad y contenido de vacíos para compararlas con el diseño teórico.

2.1.1 Caracterización de materiales

Una correcta caracterización de agregados influenciará en las propiedades mecánicas que pueda obtener la mezcla en estado endurecido para obtener un concreto de calidad. Li et al. (1993), describe a los agregados como un componente dinámico susceptible a variaciones durante el manejo, transporte y colocación dentro de la mezcla.

Las propiedades más importantes que deben ser evaluadas para elaborar concreto drenante, radican en la capacidad de absorción, humedad total, granulometría, gravedad específica y peso unitario, pues dichos valores ayudarán a calcular las proporciones correctas que deben ser usadas para garantizar las propiedades de resistencia, permeabilidad, porosidad y contenido de vacíos.

Todas las pruebas necesarias se realizaron en el Laboratorio de Ensayos y Materiales de Construcción (LEMC) de la Universidad de Piura, se verificó que los equipos y herramientas estuvieran calibrados y en correcto estado.

2.1.1.1 Ensayo de granulometría. Se realizó el ensayo de granulometría para el agregado grueso siguiendo las indicaciones de la norma técnica NTP 400.012, la cual tiene como antecedentes la norma ASTM C136-96a (1996) , y para verificar los requerimientos de gradación se usó la norma ASTM C33/C33M (2018). Mediante este se conoce la distribución del tamaño de partículas presentes en el agregado gracias a las diferentes aberturas de los tamices, las cuales se muestran en la Tabla 2 y también se puede determinar el coeficiente de uniformidad y distribución los cuales serán de ayuda en la clasificación SUCS (INACAL, 2021).

Tabla 2
Abertura de los tamices para ensayos granulométricos

Tamaño Máximo Nominal (TMN) aberturas cuadradas 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)

Nota. Extraído de Norma Técnica Peruana 400.012

Para el procedimiento se utilizó una balanza de precisión con una escala de 0.01 g, para registrar el peso del material retenido en cada tamiz. Posteriormente, se construye la curva granulométrica utilizando una escala logarítmica (INACAL, 2021).

2.1.1.2 Peso unitario del agregado grueso. Continuando con la obtención de características del agregado grueso se efectuó el ensayo de peso unitario siguiendo las indicaciones de la norma NTP 400.017, para determinar la relación masa/volumen tanto en

estado suelto y compactado. En este documento se detallan los materiales y el procedimiento a seguir el cual es aplicable para agregados con T.M.N de 150 mm (INACAL, 2020).

Para determinar el peso unitario en estado suelto y compactado, los equipos requeridos fueron una balanza con precisión de 0.01 gr, una varilla de acero liso con 5/8" de diámetro con terminado en punta esférica, y un molde con un volumen conocido. Para facilitar el procedimiento, y como última recomendación de la norma NTP 400.017, se pide que la muestra usada sea entre 125 % a 200 % el volumen del recipiente a usar.

Con el molde de volumen conocido se llena el recipiente en tres capas, y por cada una se aplican 25 golpes de varilla para lograr una mejor distribución, se enrasa y finalmente se registra el peso, este proceso se repite 3 veces para obtener un valor promedio. Para determinar el peso suelto el molde se llena en una sola capa y se deja caer el agregado al molde desde una altura no mayor de 50 mm (INACAL, 2020).

Finalmente, con los datos obtenidos se halla el peso unitario en ambos estados utilizando la fórmula de la Ec. 16.

$$\text{Peso unitario} = \frac{A-B}{C} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

- A = Peso del agregado contenido en el molde (sea suelto o varillado) (gr)
- B = Peso del molde (gr)
- C = Volumen del molde usado (cm³)

2.1.1.3 Humedad total. Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento indicado en la Norma NTP 339.185 y ayuda a conocer el porcentaje total de humedad evaporable (superficial y contenida en los poros) en una muestra de agregado (INACAL, 2021).

Para determinar la humedad total se colocó la muestra inicial en un recipiente previamente pesado y se introdujo en el horno durante 24 horas a una temperatura constante de 110 ± 5 °C, finalmente se registró el peso obtenido y se calculó el porcentaje de humedad mediante la Ec. 17.

$$\text{Humedad total (\%)} = \frac{A-B}{B} * 100 \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

- A: Peso de la muestra representativa de agregado grueso en Stock (gr).
- B: Peso de la muestra representativa de agregado grueso luego de 24 hr de secado al horno (gr).

2.1.1.4 Capacidad de absorción y gravedad específica. Para realizar este ensayo se tomó como referencia la norma NTP 400.021, la cual permite determinar el peso específico aparente, seco y en estado saturado en superficie seca solo en agregado grueso, las

características obtenidas en este ensayo son fundamentales para el proporcionamiento de mezclas (INACAL, 2020).

El procedimiento para determinar la absorción y gravedad específica consiste en tomar una muestra inicial superando así el mínimo requerido, de acuerdo con el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Una vez obtenida la muestra, se limpió el agregado meticulosamente para eliminar cualquier impureza o sustancia que pudiera afectar la integridad del material. Se registró el peso inicial y luego se sumergió en agua en una batea durante un período de 24 horas. Después de este periodo de tiempo se retiró el agregado secándolo con una toalla para obtener el peso saturado en superficie seca (SSS) e inmediatamente se determinó su masa sumergida en agua, y los resultados obtenidos para capacidad de absorción y gravedad específica a través de la Ec. 18 y Ec. 19:

$$CA (\%) = \frac{G-F'}{F'} * 100 \quad \text{Ec. 18}$$

$$GE_{SSS} = \frac{G}{G-H} * 100 \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

- F: Peso de la muestra seca en el aire (gr)
- G: Peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gr)
- H: Peso en el agua de la muestra saturada (gr)

2.1.2 Concreto en estado fresco

2.1.2.1 Temperatura. De acuerdo con la norma NTP 339.184, este ensayo se aplica para medir la temperatura de un concreto en estado fresco y, de ser el caso verificar el cumplimiento de un requisito específico para la elaboración de este. El instrumento empleado deberá tener una precisión de ± 0.5 °C y se insertará en la muestra a una profundidad de 3'' durante un tiempo mínimo de dos minutos hasta que se establezca la lectura para poder registrarla (INACAL, 2021).

2.1.2.2 Densidad y contenido de vacíos. De acuerdo con la norma ASTM C1688/C1688M-14a., se llevó a cabo el ensayo para determinar la densidad teórica y real y el contenido de vacíos real en estado fresco de una mezcla de concreto porosa.

La norma ASTM C1688/C1688M-14a, determina que el valor de la densidad teórica (T), se establece al dividir la sumatoria de las masas de cada material en estado SSS (Ms), entre la sumatoria de los volúmenes absolutos de cada material (Vs), como se aprecia en la Ec. 20.

$$T = \frac{Ms}{Vs} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

- Ms= Sumatoria de la masa total de los materiales
- Vs= Sumatoria total de volúmenes de los volúmenes absolutos de los materiales
- T= Densidad teórica

Para determinar la densidad en estado fresco (D) y contenido de vacíos en estado fresco, el procedimiento consiste en rellenar en un molde cilíndrico de volumen equivalente a 7035.1 cm³ con 02 capas de concreto, cada capa debe ser compactada con 20 golpes utilizando un martillo de proctor estándar, como recomendación los golpes de compactación deben distribuirse en toda el área superficial de la muestra para una correcta consolidación y acumulación de partículas (ASTM International, 2014). Los valores mencionados anteriormente se determinan mediante la Ec.21 y Ec. 22.

$$\text{Densidad en estado fresco } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad \text{Ec. 21}$$

$$\text{Contenido de vacios } (\%) = U = \frac{T - D}{T} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

- Mc= Medida de la muestra de concreto
- Mm= Medida del recipiente
- Vm = Volumen del recipiente
- D= densidad
- U= contenido de vacíos (%)

Cabe recalcar que si bien la norma ASTM C1688/C1688M-14 a indica que para este tipo de ensayos es necesario utilizar un molde con una capacidad de 7± 0.6 L, se creyó conveniente determinar también el contenido de vacíos real y la densidad en estado fresco de los especímenes de 10x20 cm, para evaluar su variación (2014).

Si bien este ensayo no reemplaza a los valores obtenidos *in-situ* permite dar una idea al diseñador del comportamiento futuro del concreto.

2.1.3 Concreto en estado endurecido

2.1.3.1 Resistencia a compresión. Para determinar la resistencia a compresión del concreto drenante, se toma como base la norma utilizada en el concreto convencional NTP 339.034, la cual consiste en aplicar carga de manera controlada a especímenes cilíndricos de concreto, la única limitación de esta norma es que el peso unitario de las muestras debe ser mayor a 800 kg/m³ (INACAL, 2021).

Esta prueba se realizó en el laboratorio LEMC de la siguiente manera, a los 28 días de curado se retiraron tres muestras por cada energía de compactación, se tomaron las medidas

de altura y diámetro de cada una, se capearon y colocaron a una máquina que aplicaba carga constante hasta su rotura.

2.1.3.2 Densidad y contenido de vacíos. Se utilizó la norma ASTM C1754/C1754M para determinar la cantidad de vacíos y la densidad en el concreto en estado endurecido. En este ensayo, es importante determinar el peso de cada material utilizado, y conocer los volúmenes de los moldes usados (ASTM International, 2012).

El procedimiento se realizó siguiendo los pasos descritos en la norma ASTM C1754/C1754M, después de sumergir los especímenes en la poza de curado durante 28 días, se retiraron y con la ayuda de un pie de rey se tomaron 4 medidas de diámetro y longitud de cada probeta para sacar un promedio y posteriormente su volumen. Respecto al método de secado se procedió con la metodología B, colocando en el horno tres especímenes a 105 ± 5 °C durante 24 horas, y luego se retiraron dejándolas secar hasta una temperatura de aproximadamente 50 °C, para que sean manipulables y poder determinar su peso totalmente seco, nuevamente se sumergieron totalmente durante aproximadamente 30 minutos en un recipiente con agua, y se golpearon para remover las burbujas de aire atrapado en el concreto, finalmente se determina el peso sumergido de las muestras y mediante las Ec. 23, Ec. 24 y Ec. 25 podremos determinar el contenido de vacíos y densidad:

$$\rho = \frac{w}{v} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\text{Densidad} = D_E = \frac{K * M_S}{D_i^2 * L} \quad \text{Ec. 24}$$

$$\text{Contenido de vacíos} = \%V_E = \left[1 - \left(\frac{K * (M_S - B)}{\rho_w * D_i^2 * L} \right) \right] \quad \text{Ec. 25}$$

Dónde:

- Ms= Masa seca del espécimen
- Di= Promedio del diámetro
- L= Promedio de la longitud
- K= Valor constante 1273240 para unidades SI
- B= Masa sumergida del espécimen
- ρ_w = densidad del agua en base a la temperatura
- ρ = densidad
- w= peso en kg
- v= volumen

2.1.3.3 Permeabilidad. Para evaluar la permeabilidad, se ha tomado como referencia el informe desarrollado por Neithalath et al. (2003), quién propone el uso de un permeámetro

de caída libre para determinar la tasa de filtración en especímenes cilíndricos. En dicho estudio se detalla tanto el procedimiento como los materiales utilizados para su elaboración.

2.2 Selección de materiales

2.2.1 Cemento

Para la elaboración de mezcla drenante se ha utilizado el cemento producido por Pacasmayo tipo “Extra-Forte”, que de acuerdo con la ficha técnica 2023 V1, consta con un compuesto tipo Ico que ayuda en la trabajabilidad y un correcto desarrollo de la resistencia, además es ideal para la construcción de estructuras que no requieran propiedades especiales cumple con los requisitos químicos y físicos normalizados en la NTP 334.090.

2.2.2 Agua

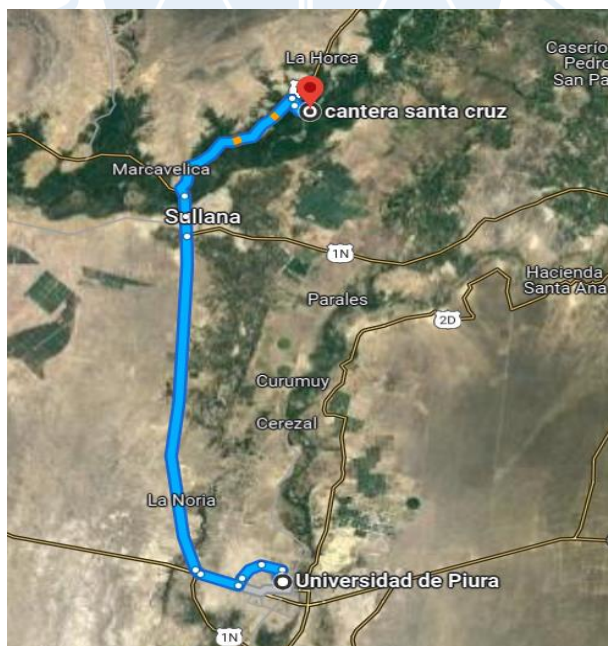
El agua empleada en el proceso fue agua potable suministrada por las instalaciones del laboratorio LEMC. Esta agua cumple con las normas establecidas por las autoridades locales, no contiene impurezas ni sustancias químicas que puedan afectar la elaboración del concreto permeable.

2.2.3 Agregado grueso

El agregado grueso utilizado proviene de la cantera Santa Cruz que se encuentra a una distancia aproximada de 55 km al norte de la ciudad de Piura, a continuación, se muestra la ubicación en la Figura 7.

Figura 7

Ubicación de la cantera Santa Cruz



Nota. Extraído de Google Earth

Se adquirió un metro cúbico (m³) de agregado grueso de dicha cantera para ser trasladado al laboratorio LEMC de la Universidad de Piura. Donde comenzó el proceso de

caracterización del agregado. El primer ensayo realizado fue el análisis granulométrico bajo el procedimiento detallado en la norma NTP 400.12. Como primer paso, se escogió la muestra inicial del agregado en base al tamaño máximo nominal. Posteriormente la muestra fue seleccionada aleatoriamente a través del método de cuarteo y luego se hizo pasar por los tamices 2"; 1½", 1", ¾", ½", 3/8", ¼" y #4, registrando los pesos en cada tamiz, como se aprecia en la Figura 8, los valores obtenidos *in-situ* se especifican en el apéndice A.

Se definió así el huso granulométrico conforme a las especificaciones detalladas en la norma ASTM C33/C33M (2018). Los resultados de este proceso se presentan en el apéndice A. Finalmente, se construyó la curva granulométrica utilizando una escala logarítmica, verificando de esta manera que el agregado se encuentra dentro del rango recomendado por la el ACI Committee 522R-10 (2010). Este análisis garantiza que el material cumple con los estándares requeridos según las normativas mencionadas y sus resultados se muestran en la Figura 9.

Figura 8

Selección de material mediante método de cuarteo

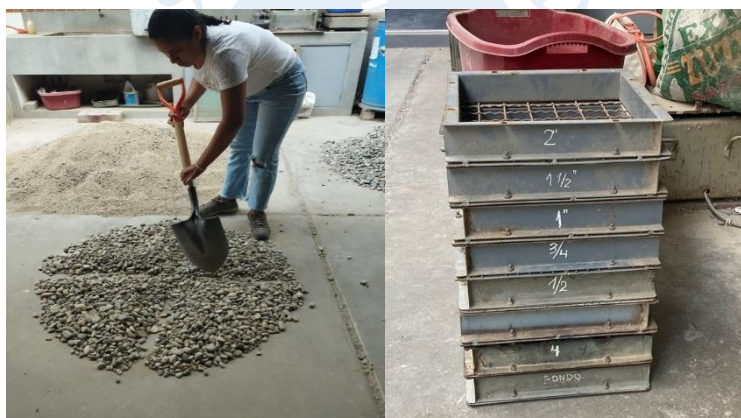
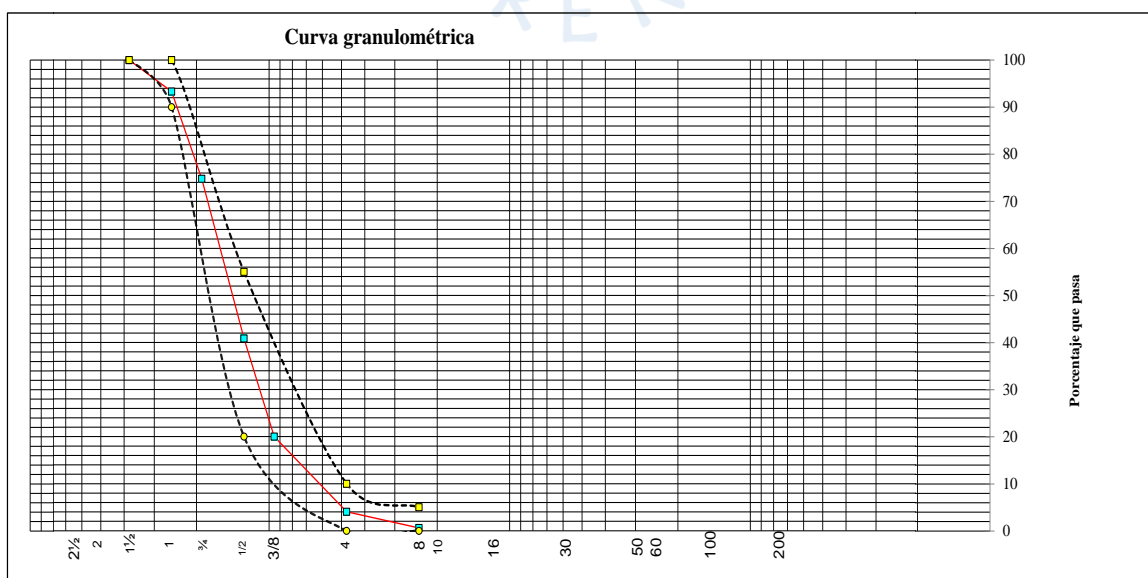


Figura 9

Curva granulométrica del agregado grueso



Después de llevar a cabo el análisis granulométrico, se determinó el tamaño del material a utilizar en la mezcla. Siguiendo la orientación del ACI Committee 522-R (2010), se optó por el material retenido en los tamices de 1/2" (12.5 mm) y 3/8" (9 mm).

Para determinar el peso unitario en estado suelto y compactado se siguió el procedimiento descrito en la norma NTP 400.017. Los pesos obtenidos para este ensayo se detallan en el apéndice B. Posteriormente, aplicando la Ec.16 y realizando un promedio aritmético simple de tres valores, se obtuvieron los resultados de peso unitario compactado y peso unitario suelto, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Valores de peso unitario varillado en estado seco y suelto del agregado grueso

Peso unitario suelto (kg/m ³)	1621.00
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1765.00

Para determinar la humedad total se siguió el procedimiento descrito en la norma NTP 339.185. Finalmente, se registraron los pesos obtenidos y se calculó el porcentaje de humedad mediante la Ec.17. Se muestran los resultados obtenidos para este ensayo en la Tabla 4 y el procedimiento seguido en la Figura 10.

Tabla 4

Ensayo de contenido de humedad

Determinación de humedad total	
Peso de la muestra (gr)	2048
Peso seco al horno 24 h	2040
Humedad total (%)	0.39

Figura 10

Selección de la muestra y colocación en el horno



Simultáneamente, se llevó a cabo el procedimiento para determinar la absorción y gravedad específica del material de acuerdo con la NTP. 400.021, la muestra inicial tomada tenía un peso de 2.5 kg, superando así el mínimo requerido de 2 kg. Los resultados obtenidos para capacidad de absorción y gravedad se especifican a través de las Ec. 18 y Ec. 19, los datos se muestran en el apéndice C y los resultados en la Tabla 5 y Figura 11.

Tabla 5

Gravedad específica y absorción del agregado

Gravedad específica	2.72
Porcentaje de absorción (%)	0.89

Figura 11

Selección del agregado grueso para el ensayo



2.3 Diseño de mezcla ACI Committee 522R-10

El diseño de mezcla se realizó siguiendo los pasos enunciados en la norma ACI Committee 522R-10 (2010), donde se sugiere que el contenido de vacíos sea mayor al 15 %, y la relación a/c oscile entre 0.26-0.45. Debido a ello se escogió un contenido de vacíos de 20 % y relaciones agua/cemento (a/c) equivalentes a 0.30 y 0.40. Después de determinar la gradación y especificar que el tamaño del agregado grueso a utilizar sería el retenido en los tamices de 1/2" y 3/8", y tras haber realizado la caracterización de agregados para obtener los valores de humedad total, peso unitario compactado, gravedad específica y peso unitario suelto mostrados en la Tabla 6, se procede con el proporcionamiento de mezcla mediante el método de volumen seco b/bo.

Tabla 6*Datos necesarios para la elaboración de mezclas*

Datos del agregado grueso	
Peso unitario compactado (kg/cm ³)	1765
Porcentaje de humedad (%)	0.39
Porcentaje de absorción (%)	0.89
Gravedad específica	2.72

2.3.1 Diseños de mezcla

Para la proporción de los dos diseños de mezcla, se establecieron las relaciones $a/c=0.3$ y $a/c=0.40$ respectivamente, para ambas relaciones se ha seguido el procedimiento detallado en el capítulo 1. Como se mencionó previamente, ambos diseños mantendrían el mismo porcentaje de contenido de vacíos, porcentaje de volumen de pasta, y porcentaje de agregado fino: 20 %, 15 % y 0 % respectivamente.

a) Paso 1. Se procede a determinar el volumen de agregado grueso

El peso unitario obtenido a través de la caracterización es denominado como peso unitario en stock, sin embargo, para el diseño se necesita un peso unitario en estado seco (Ec. 28) por lo cual se utilizan las ecuaciones Ec. 26 y Ec. 27.

$$HT = \frac{PU_{stock} - PU_{OD}}{PU_{OD}} \times 100 \quad \text{Ec. 26}$$

$$PU_{OD} = \frac{PU_{stock}}{\left(\frac{HT}{100} + 1\right)} \quad \text{Ec. 27}$$

$$PU_{OD} = \frac{1765}{(0.39/100+1)} = 1758 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Ec. 28}$$

El ACI Committee 522R-10 (2010), detalla el método de volumen seco (OD), donde relaciona el agregado grueso en un metro cúbico de concreto (b/b_0) para el proporcionamiento de la mezcla permeable, dicha relación se escoge como 0.99, y dado que este diseño se está realizando con un porcentaje nulo de finos, se reemplazan los valores en la Ec. 29:

$$\text{Peso del A. } G_{OD} = 1758 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.99 * 1\text{m}^3 = 1740.420 \text{ kg} \quad \text{Ec. 29}$$

b) Paso2. Se ajusta al peso saturado en superficie seca

Mediante el valor obtenido de capacidad de absorción obtenido en la caracterización del agregado grueso, en la Ec.30.

$$\text{Peso del A. } G_{SSS} = (1 + 0.0089) * 1740.42 \text{ kg} = 1755.910 \text{ kg} \quad \text{Ec. 30}$$

El porcentaje de volumen de pasta se escogido para el diseño es 15 %.

c) Paso 3. Determinar el contenido de cemento

Como ya se ha determinado el porcentaje de volumen de pasta a utilizar y se ha definido la relación $a/c = 0.30$ se puede obtener la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, en la Ec.31.

Reemplazando:

$$G_{\text{cemento}} = 3.15, G_{\text{agua}} = 1, \text{Vol}_{\text{pasta}} = 15\% * (1\text{m}^3) \text{ y } \frac{a}{c} = 0.30$$

$$\text{Masa}_{\text{cemento}} = 0.15 / \left(\frac{1}{3.15} + 0.30 \right) * 1000 \text{ kg/m}^3 = 242.931 \text{ kg} \quad \text{Ec. 31}$$

d) Paso 4. Determinar el contenido de agua, a través de la relación a/c

Se determina la masa de agua inicial mediante la Ec.32

$$\text{Masa}_{\text{agua i}} = 0.30 * 242.931 = 72.789 \text{ kg} \quad \text{Ec. 32}$$

Después de calcular el contenido de agua, realizamos el ajuste debido a la absorción efectiva del agregado grueso en la Ec. 33 y la Ec. 34.

$$\text{Corrección} = 1740.42 * \frac{0.89 - 0.39}{100} = +8.702 \text{ kg} \quad \text{Ec. 33}$$

$$\text{Masa}_{\text{agua}} = 72.879 \text{ kg} + 8.702 \text{ kg} = 81.581 \text{ kg} \quad \text{Ec. 34}$$

e) Paso 5. Determina el volumen de solidos

Teniendo las cantidades necesarias a utilizar, se puede determinar el volumen de cada uno de los materiales, el cemento, el agua y los sólidos en la Ec. 35, Ec. 36, Ec. 37 y la Ec.38.

$$\text{Vol}_{\text{ag.grueso}} = \frac{\text{Peso del A.G}_{\text{SSS}}}{G_{\text{S}} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{1755.910 \text{ kg}}{2.72 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.6456 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 35}$$

$$\text{Vol}_{\text{cemento}} = \frac{\text{Masa}_{\text{cemento}}}{G_{\text{S}} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{242.931}{3.15 * 1000} = 0.0771 \text{ m}^3 \quad \text{Ec.36}$$

$$\text{Vol}_{\text{agua}} = \frac{\text{Masa}_{\text{agua}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{72.879}{1000} = 0.0729 \text{ m}^3 \quad \text{Ec.37}$$

$$\text{Vol}_{\text{total de sólidos}} = 0.6456 + 0.0771 + 0.0729 = 0.796 \text{ m}^3 \quad \text{Ec.38}$$

f) Paso 6. Determina el contenido de vacíos

Conociendo el volumen total de los sólidos, se puede determinar la cantidad de vacíos teórica que ocuparía el concreto en un cuerpo con un volumen dado mediante la Ec.39.

$$\% \text{ Vacíos} = \left(\frac{1-0.796}{1} \right) * 100 = 20.4 \% \quad \text{Ec.39}$$

g) Paso 7. Determinar la porosidad estimada

Para un porcentaje de vacíos del 20.4 %, se estima una permeabilidad aproximada a 125 mm/min.

h) Paso 8. Pruebas y ensayos

Por último, se determina el peso unitario teórico del concreto, mediante la Ec.40.

$$P. U_{\text{teorico}} = 72.879 + 242.931 + 1755.910 = 2071.72 \text{ kg} \quad \text{Ec.40}$$

Para el segundo diseño con una relación a/c de 0.4. Se han seguido los mismos pasos que en el diseño anterior. La diferencia radica a partir del paso 3, dado que el porcentaje de volumen de pasta es igual, pero al variar la relación a/c el contenido de pasta será distinto afectando al paso 4, 5 y 7 al momento de determinar el porcentaje de vacíos y la cantidad de agua a utilizar, variando también la densidad de la mezcla. Por lo tanto, las proporciones para ambos diseños y estimación de propiedades mecánicas serían las mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7

Proporción de mezclas en SSS para un metro cúbico de concreto

Materiales	SSS	SSS
	a/c=0.3	a/c=0.4
Cemento (kg)	242.93	209.071
Agua (Kg)	72.88	83.628
Ag. Grueso (kg)	1755.91	1755.910
Contenido de vacíos (%)	20.40	20.40
Permeabilidad (mm/min)	125	125

2.3.2 Elaboración de especímenes

Finalizado el diseño, se elaboraron los especímenes cilíndricos de concreto en el laboratorio. Se debe tener en cuenta que las cantidades obtenidas anteriormente son para 1 m³, y las mezcladoras de 0.03 m³ o aproximadamente 1 pie³, por lo tanto, se procedió a calcular la cantidad exacta de materiales en stock necesarios para las dosificaciones según capacidad utilizando la Ec.41.

$$W_{\text{stock}} = \frac{W_{\text{seco}}}{\%H_{\text{Total}}+1} \quad \text{Ec. 41}$$

Se inició el proceso de dosificación de especímenes para el primer diseño de mezcla, manteniendo una relación a/c de 0.3. Primero, se calculó el peso en stock del agregado grueso y del agua, considerando que la cantidad de cemento se mantenía constante. Luego, se ajustó este peso para que se adecuara a la capacidad de la mezcladora en ambos diseños, lo que resultó en las proporciones detalladas en la Tabla 8.

Tabla 8

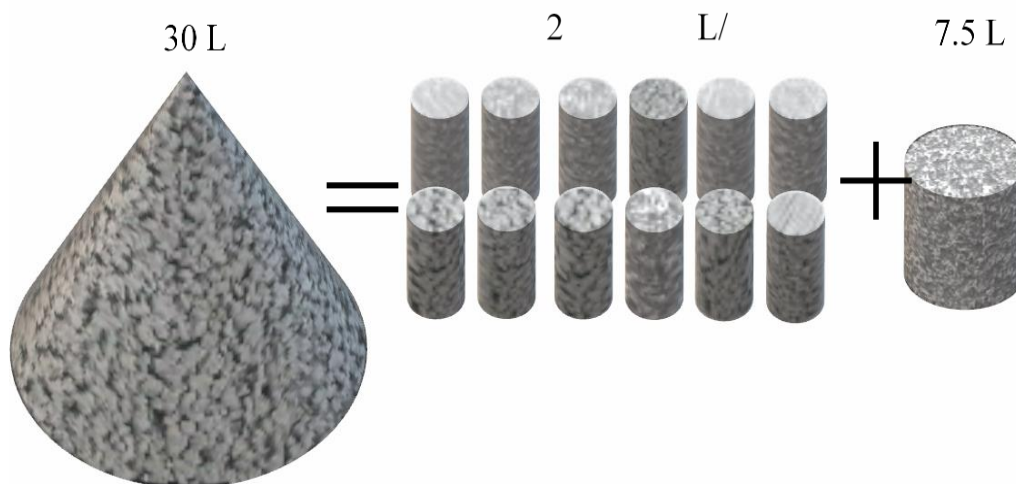
Proporción de materiales en stock con relación a/c=0.3 y 0.4

Materiales	Cantidad por 1 m ³		Cantidad por diseño	
	a/c=0.40	a/c=0.30	a/c=0.40	a/c=0.30
Cemento (kg)	209.07	242.93	6.27	7.29
Agua (kg)	92.33	81.58	2.77	2.45
Ag. grueso (kg)	1747.21	1747.21	52.42	52.42

Se estima los m³ de concreto que se necesitarán para moldes de probetas y moldes de peso unitario, por cada 30 L de concreto se obtuvieron 12 probetas de concreto permeable, y un ensayo de peso unitario en estado fresco, dicha distribución se aprecia en la Figura 12

Figura 12

Distribución del concreto elaborado para cada tanda



Para iniciar con la preparación, primero se determinó el peso de cada uno de los materiales por separado tal como se especifica en la Tabla 8, utilizando balanzas digitales con precisión de 0.01 gr. Una vez que los materiales estuvieron pesados y colocados en recipientes se llevaron al exterior del LEMC junto con la mezcladora como se muestra en la Figura 13. Como recomendación el último elemento que debe pesarse es el agua, puesto que debido a las elevadas temperaturas de la ciudad de Piura esta podría evaporarse causando una pequeña variación en el diseño.

Figura 13

Pesado de materiales para elaboración de concreto



Antes de colocar los materiales en la mezcladora se realizó un pre-humedecimiento del trompo. Luego siguiendo las indicaciones de la norma NTP 339.183 (INACAL, 2021) se incorporó el agregado grueso con una parte del agua, acto seguido el trompo dio unas vueltas y se le agregó el cemento junto con el resto del agua, y se dio un tiempo de mezclado de 3 minutos, continuando con un periodo de reposo de 3 min y un mezclado final de 2 minutos, durante el reposo se desprendió parte de la mezcla de las paredes del trompo para evitar la retención de mortero en la mezcladora y lograr una mezcla homogénea de los materiales. La temperatura fue determinada siguiendo la norma NTP 339.184 (INACAL, 2021).

Previo a la colocación, se ubicaron las probetas en una superficie nivelada y libre de perturbaciones y con la ayuda de un cucharón se realizó el llenado de los moldes de probetas. Dentro de los primeros 5 minutos de la obtención de mezcla se realizó el ensayo de peso unitario en estado fresco bajo la norma NTP 339.046 (INACAL, 2018), y se procedió con la colocación de la mezcla en los moldes de probetas, cuatro moldes de probetas fueron llenados en dos capas con una energía de compactación de 20 golpes por capa, se llenaron cuatro moldes de probetas en dos capas con una energía de compactación de 15 golpes y cuatro moldes de probetas a una capa con una energía de compactación de 20 golpes. Se puede diferenciar la energía de compactación de acuerdo con el número de golpes realizados por el martillo proctor estándar, el cual por cada golpe aplicaba una energía compactación de $600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ a cada uno de los especímenes (INACAL, 2019).

Finalizada la consolidación del concreto permeable en los moldes, se procedió con el acabado y curado de los especímenes cubriendo los moldes con láminas de, como se muestra en la Figura 14. Pasadas las 24 h se realizó el desmolde e inserción de las muestras en una poza de curado libre de vibraciones.

Figura 14

Curado de especímenes e inserción de probetas a una poza



Este procedimiento se realizó 4 veces para obtener un número de muestras igual a 48 probetas, 24 correspondientes al diseño con $a/c=0.3$ y 24 al diseño con $a/c=0.40$.

2.3.3 Implementación del equipo de permeabilidad

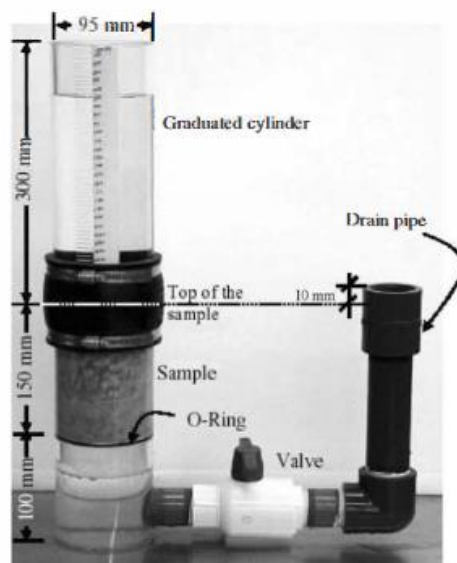
Para realizar el ensayo de permeabilidad se implementó el permeámetro de carga variable de Neithalath recomendado en el ACI Committee 522R-10 (2010), los materiales empleados para su fabricación fueron:

- tubo acrílico con un diámetro de 0.10 m y 0.45 m de altura
- válvula de control de $\frac{1}{2}$ ”;
- tee de 4” con reducción de 2”
- niple de 4”
- niple de 2” con reducción de 1”
- tubería PVC de $\frac{1}{2}$ ” SP
- pegamento OATEY transparente para PVC
- flexómetro

Como se observa en la Figura 15, primero se rotulan los materiales para alcanzar la medida deseada; el tubo de $\frac{1}{2}$ ” a una longitud de 23 cm, la tee de 4” con reducción de 2” a una altura de 4 cm en la parte superior y 2 cm en la parte inferior y el Niple de 4” a una a longitud de 4 cm.

Figura 15*Rotulación y corte de tee y niple*

Esto se realiza para que al momento de unir todas las piezas la parte inferior tenga la altura recomendada por el ACI Committee 522R-10 (2010), donde nos indica que desde la base del instrumento de medición hasta el “O-ring” tenga una altura de 10 cm, esto se muestra en la Figura 16.

Figura 16*Permeámetro de Neithalath*

Se procede a impermeabilizar la parte inferior de la tee de 4 “con reducción de 2”, este proceso se muestra en la Figura 17 y se realizó con resina líquida.

Figura 17*Impermeabilización con resina líquida*

Con todos los elementos requeridos a mano, se procede a ensamblar las distintas piezas utilizando pegamento para PVC. Esto implica la unión de los nipples con la válvula de control 1/2'', el tubo 1/2'' y la tee de reducción, asegurando un acople adecuado de todas las piezas para prevenir cualquier fuga de agua.

Para finalizar, pegamos el flexómetro en el tubo acrílico, obteniendo el permeámetro de la Figura 18.

Figura 18*Permeámetro*

El ensayo de permeabilidad en los especímenes se realizará de acuerdo con el siguiente procedimiento:

a) Procedimiento antes de la prueba

1. Seleccionar dos especímenes por cada diseño y esfuerzo de compactación, y posteriormente medir las dimensiones de longitud y diámetro de los especímenes con el pie de rey.
2. Para preparar la muestra a ensayar, los especímenes fueron envueltos con papel film asegurando que, durante la prueba el agua solo drene dentro del espécimen y evitar que el agua escurra entre el tubo y las paredes del espécimen como se aprecia en la Figura 19

Figura 19

Especímenes envueltos en papel film



3. Procedemos a colocar los especímenes de manera adecuada dentro del tubo acrílico, se sella la parte superior de la probeta con plastilina. Verificamos que el permeámetro de carga variable no tenga fugas.
4. Se estableció una altura inicial (h_1) la cual representa la altura que debe alcanzar el agua en el permeámetro, al inicio de cada prueba.
5. Llenamos el tubo acrílico con la válvula cerrada, se espera que el agua escurra por toda la probeta para asegurar que sus poros se encuentren saturados.
6. Para continuar con la prueba, se abre la válvula para que se nivele el agua del tubo acrílico y del tubo posterior, esto sucede por el principio de los vasos comunicantes.
7. Una vez alcanzado el nivel deseado en el tubo posterior, se procede a cerrar la válvula y llenamos el tubo acrílico con agua hasta la altura inicial h_1 , para dar comienzo con las lecturas de cada prueba.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad se utilizó la ley de Darcy mediante la Ec.42:

$$K = -\frac{A_1 * l}{A_2 * t} * \log \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad \text{Ec. 42}$$

Donde:

- A1= Área transversal de la muestra
- A2=Área transversal del interior del tubo
- L= Longitud de la muestra
- T= tiempo (s)
- H1=lectura inicial del permeámetro
- H2= lectura final del permeámetro

b) Procedimiento de prueba

Para cada prueba se registraron los siguientes datos: altura inicial constante H1, altura H2 que es la altura de descarga, tiempo de descarga y el peso del agua en cada descarga.

1. Con el aparato estabilizado, se procede a abrir la válvula para comenzar con la descarga. Cuando se cierra la válvula se procede a registrar el tiempo de descarga, la altura H2 que es el nivel del agua alcanzado después de la descarga y el peso de agua de la descarga.
2. Este proceso se realiza tres veces por cada probeta.

Capítulo 3 Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los diseños de concreto permeable, durante su estado fresco y endurecido, en estos resultados se pueden identificar las características y comportamiento de sus propiedades para su análisis y comparación

3.1 Concreto en estado fresco

3.1.1 Densidad teórica, densidad y contenido de vacíos en estado fresco

Para determinar la densidad teórica, densidad y contenido de vacíos en estado fresco se siguió el procedimiento explicado en el capítulo 2. Los valores resultados para la densidad teórica se muestran en el apéndice D y la tabla 9.

Tabla 9

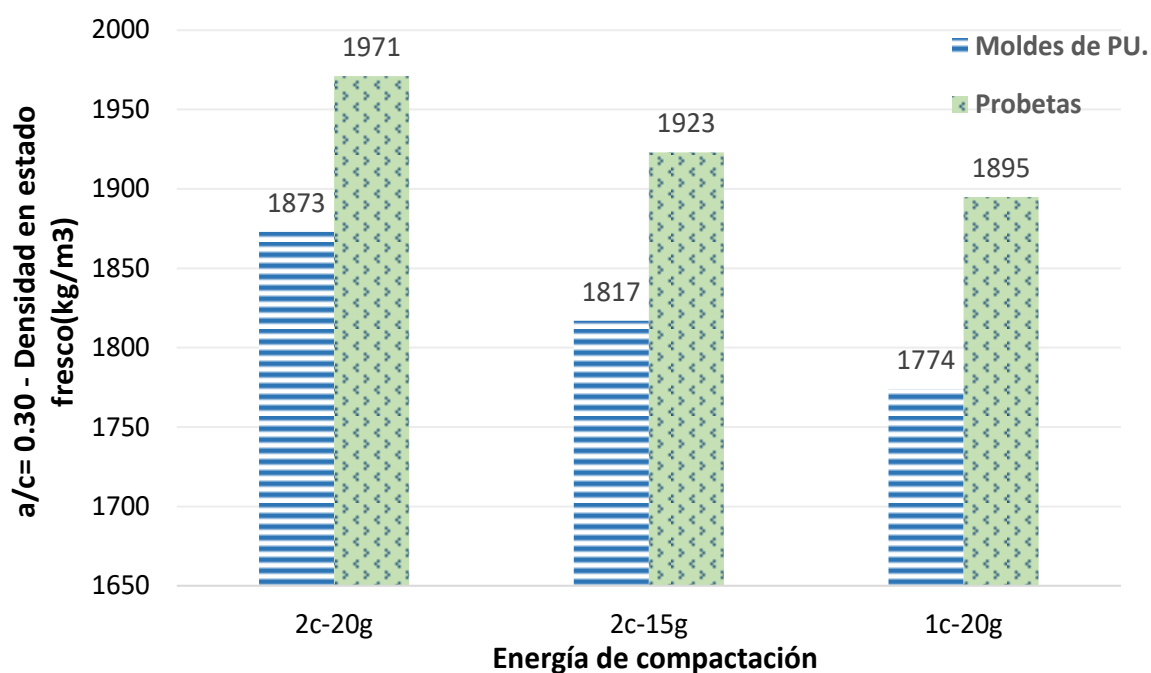
Densidad teórica para los diseños con relación a/c=0.3 y 0.4 con $V_p=15\%$

Relación a/c	0.3	0.4
Densidad teórica T (kg/m ³)	2604	2575

El procedimiento para obtener la densidad y contenido de vacíos en estado fresco fue repetido para cada diseño y energía de compactación empleada. Los valores y resultados se muestran en el apéndice E y las Figura 20 y Figura 21.

Figura 20

Densidad en estado fresco para diseño 1 con a/c=0.30

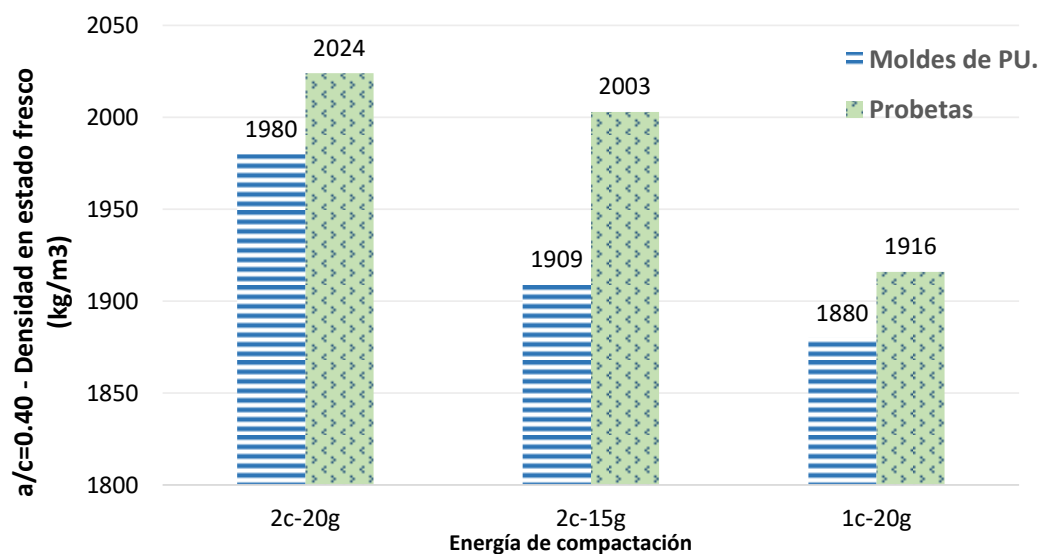


Donde la energía de compactación proporcionada las probetas fueron:

2c-20g= 2 capas a 20 golpes, 2c-15g= 2 capas a 15 golpes y 1c-20g= 1 capa a 20 golpes

Figura 21

Densidad en estado fresco para diseño 2 con $a/c=0.40$



Una vez obtenidos los valores de densidad de estado fresco (DEF) y la densidad teórica (T), se puede obtener el contenido de vacíos en estado fresco para ambos diseños y niveles de compactación, todos los datos se muestran en el apéndice F y los resultados en la Figura 22 y Figura 23 para cada relación a/c .

Figura 22

Contenido de vacíos en estado fresco para el diseño 1 con relación $a/c=0.30$

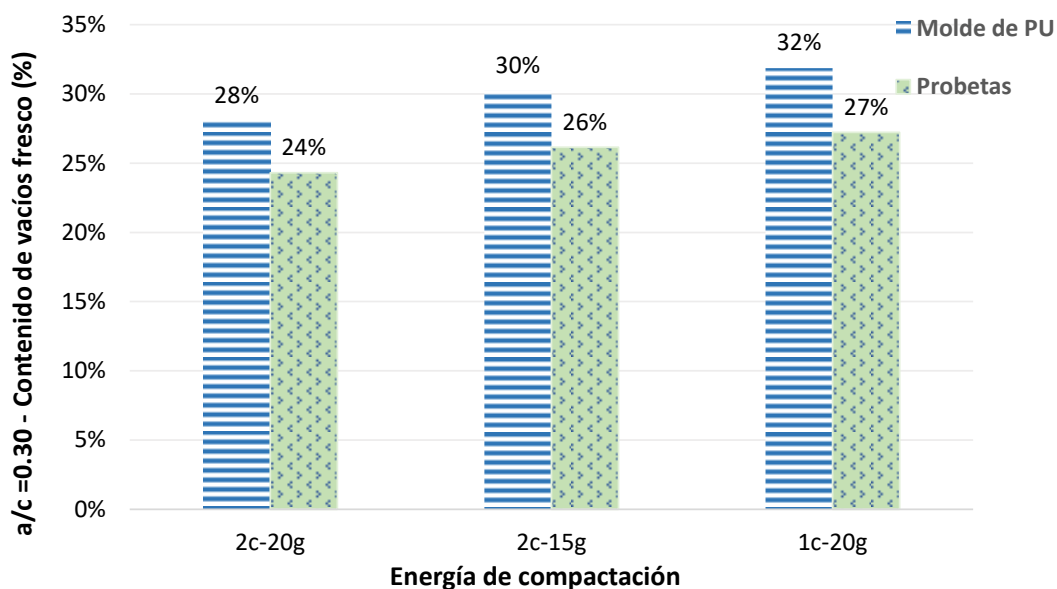
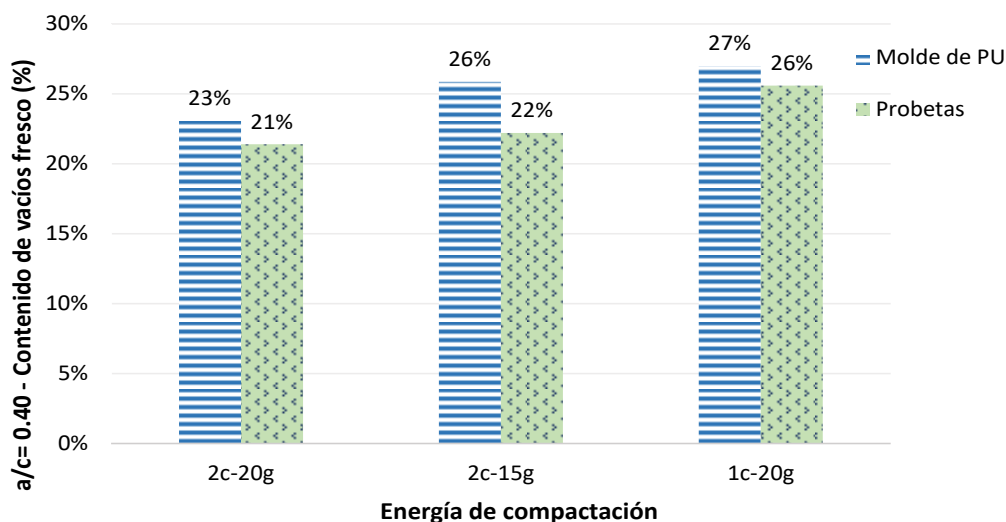


Figura 23

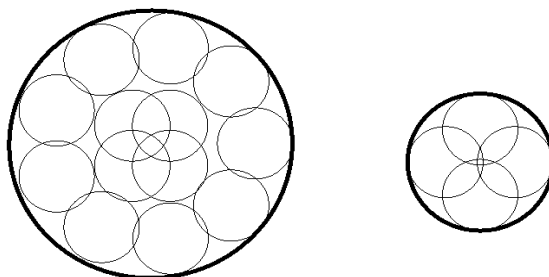
Contenido de vacíos en estado fresco para el diseño 2 con relación $a/c=0.40$



Como se aprecia en la Figura 22 y la Figura 23, el contenido de vacíos en estado fresco varía incluso para una misma relación a/c dependiendo del molde utilizado, lo que puede deberse al tamaño de la superficie de compactación, pues mientras esta sea mayor se necesitará más cantidad de golpes para cubrir el área, tal y como se muestra en la Figura 24, provocando que en los moldes de menor diámetro y altura la mezcla se compacte mejor y exista una menor cantidad de vacíos.

Figura 24

Diferencia entre las áreas superficiales de los moldes



Se esperaba que el contenido de vacíos en ambos diseños fuera de 20%. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 22 y la Figura 23, ningún espécimen logró el valor esperado, no obstante, las muestras con mayor energía de compactación mostraron los valores más cercanos, para el primer diseño con relación $a/c=0.30$, un valor de 28% para el molde del peso unitario y 24% para el molde de los especímenes de 10x20 cm, para el segundo diseño con relación $a/c=0.40$ los valores obtenidos fueron 23% y 21% para los moldes respectivos, siendo estos más cercanos al diseño propuesto. En ambos diseños existe una relación inversamente proporcional entre la energía de compactación y el contenido de vacíos, y a su

vez cumplen con el requerimiento especificado en el ACI Committee 522R-10 (2010) donde enuncia que el porcentaje mínimo para el contenido de vacíos en el concreto permeable es de 15 %.

De acuerdo con Pereira da Costa et al. (2021), tanto el método de compactación como la proporción de mezcla influyen en la densidad de los especímenes, por lo tanto, si se quiere llegar a una densidad deseada se puede lograr mediante la variación del número de golpes, esto queda demostrado en las Figura 20 y Figura 21, ya que se logra apreciar la variación de ambos diseños tan solo con el número de golpes.

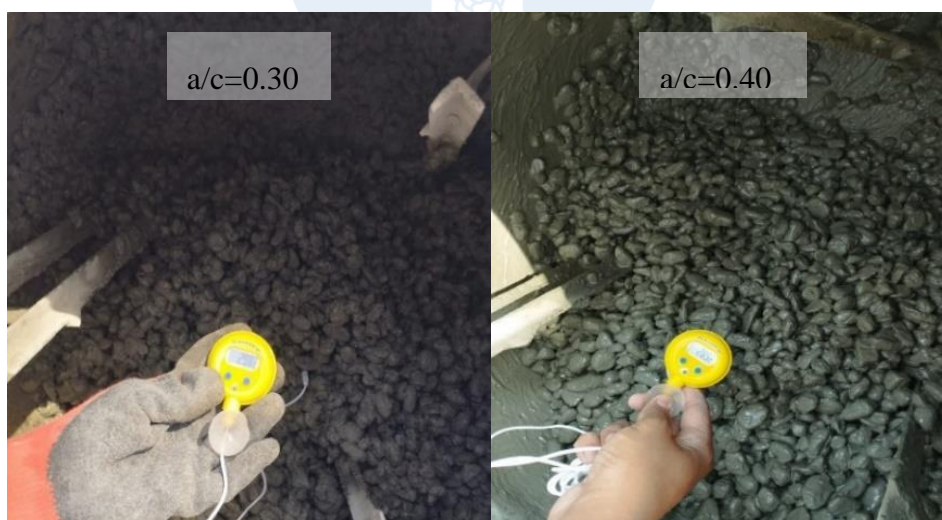
Existe una diferencia entre ambos diseños, pues las muestras obtenidas con la relación $a/c=0.30$ tienen una mayor cantidad de vacíos y a su vez registran menores densidades, mientras que las muestras obtenidas con la relación $a/c=0.40$ presentan menores cantidades de vacíos y mayores densidades, siendo los resultados de este diseño más cercanos a los valores esperados por el ACI Committee 522R-10 (2010).

Esta discrepancia es mucho más notoria en las muestras que tienen una mayor energía de compactación, en este caso 2c-20g, dicha diferencia puede atribuirse a que la mezcla con relación $a/c=0.40$ tenía una pasta más diluida permitiendo un mejor acomodo y unión entre los agregados durante el proceso de compactación y colocación de muestras.

Esto se logró determinar *in-situ*, pues la pasta que contenía una relación $a/c=0.30$ se notaba seca y de difícil colocación en los moldes, caso contrario al diseño con la relación $a/c=0.40$, esto se logra apreciar con mayor detalle en la Figura 25.

Figura 25

Diferencia de aspecto entre los diseños de mezcla



3.2 Concreto en estado endurecido

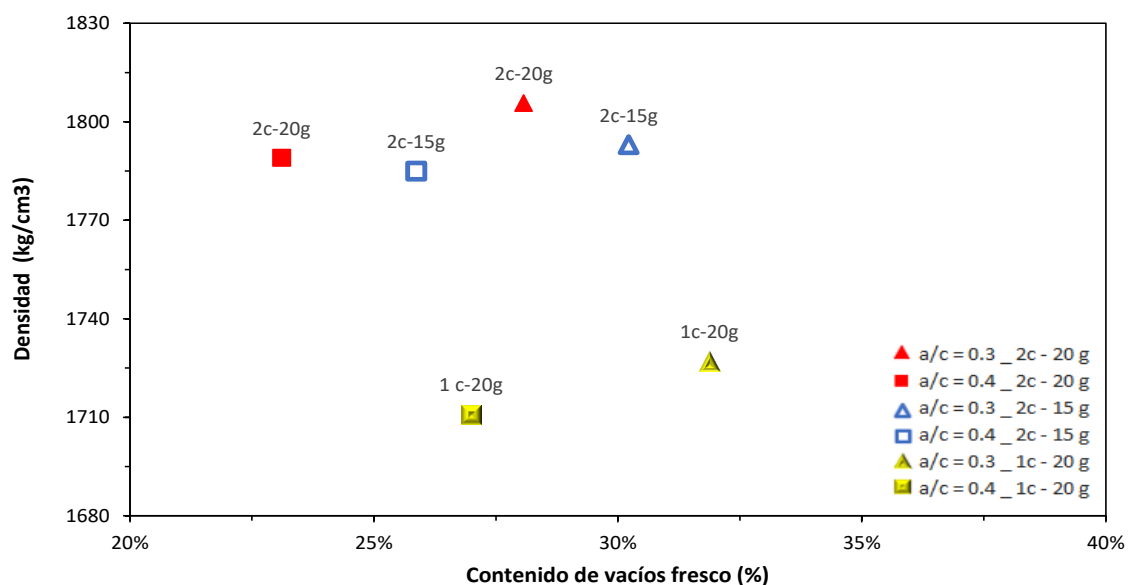
A continuación, se muestran los resultados de los ensayos realizados para el concreto endurecido, los cuales comprenden la resistencia a compresión a 28 días, medición de la densidad, contenido de vacíos, permeabilidad y resistencia de las muestras de concreto poroso.

3.2.1 Densidad y contenido de vacíos en estado endurecido

Los especímenes para el ensayo fueron diferenciados por diseño y energía de compactación tal como se muestra en el apéndice G. Los resultados para densidad y contenido de vacíos en estado endurecido se muestran en la Figura 26.

Figura 26

Relación entre el contenido de vacíos y la densidad de ambos diseños



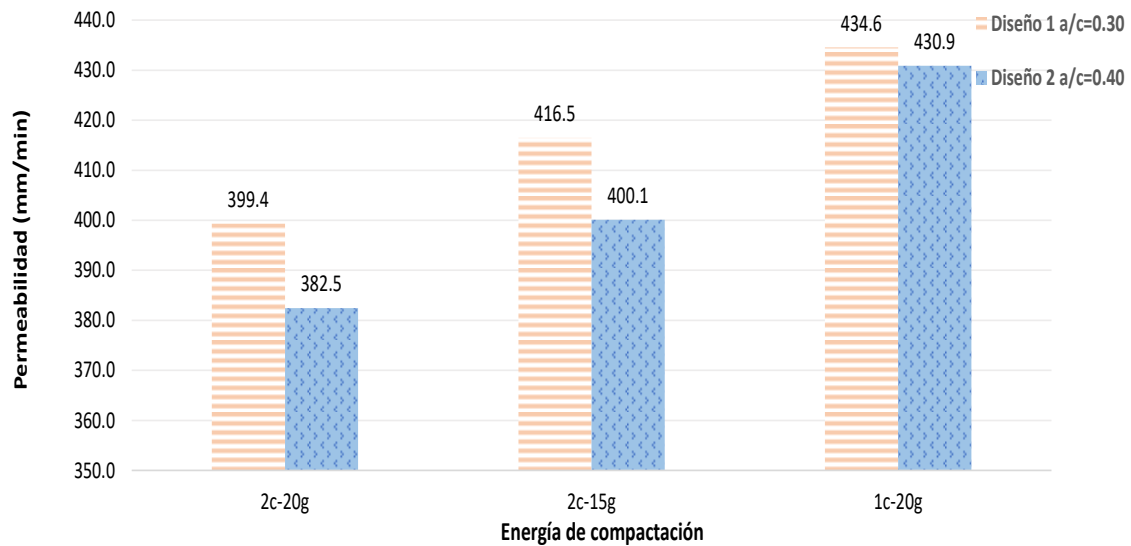
En la Figura 26 se observa que, entre las dos primeras energías de compactación (2c-20g y 2c-15g), la diferencia de 5 golpes por cada capa no afecta de manera significativa a la densidad, pero si amplía la diferencia en el contenido de vacíos. Por otro lado, se observa que las muestras con menores energías de compactación (1c-20g) generan menores densidades y mayores contenidos de vacíos. En base a la Figura 26 se concluye que al compactar las muestras en un mayor número de capas la densidad se vuelve un valor más constante. Cabello Sequera et al. (2015) afirma que, al utilizar un agregado de tamaño de 3/8" mm y 1/2" mm, da como resultado mezclas con un porcentaje de vacíos de 15-25 %, y 30-40 % respectivamente. Para el desarrollo de esta tesis se han utilizado agregados de ambos tamaños y el rango de vacíos obtenidos esta entre 29 % - 36 %, dentro del rango establecido por Cabello Sequera et al. (2015).

3.2.2 Permeabilidad

Para determinar la permeabilidad los datos se encuentran en el apéndice H y los resultados obtenidos en la Figura 27, muestran una diferencia, por lo cual se debe analizar que otros factores influyen en la permeabilidad, uno de los más notorios es la energía de compactación utilizada, pues mientras mayor sea esta menor es la permeabilidad.

Figura 27

Resultados de permeabilidad para ambos diseños



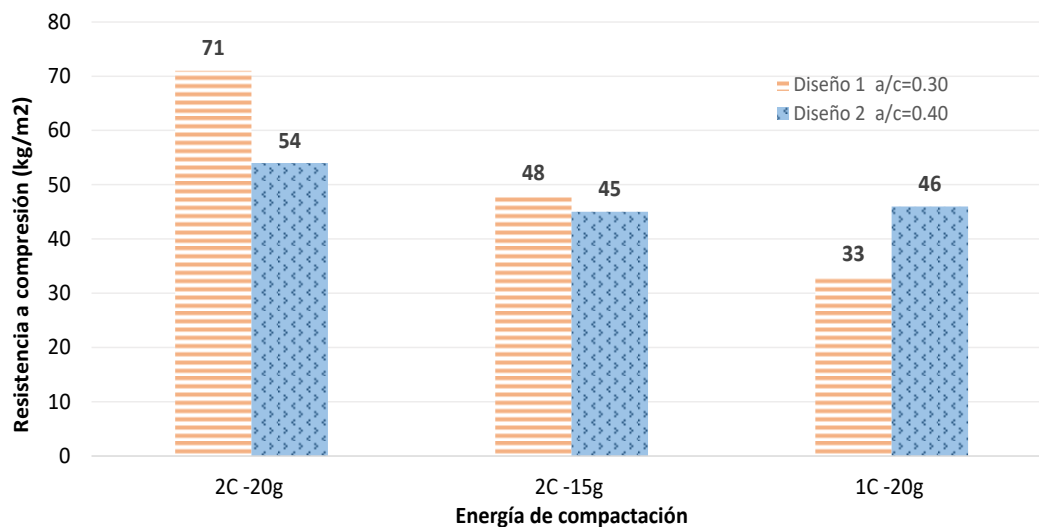
La energía de compactación puede impactar en la disposición de los poros dentro de la muestra, dado que cuando las partículas se encuentran más cercanas, aumenta la posibilidad de que se formen poros sin salida. Otro factor influyente es la trabajabilidad de la mezcla, la cual está relacionada con la proporción a/c. Una mezcla más fluida facilita una mejor unión entre las partículas, especialmente durante su colocación, mientras que una mezcla más seca puede dificultar este proceso.

3.2.3 Resistencia a compresión

Los datos obtenidos mediante la rotura de probetas se muestran en el apéndice I y la Figura 28.

Figura 28

Resultados de resistencia a la compresión para ambos diseños



De acuerdo con Guevara Fallas et al. (2011) la relación a/c es de gran importancia en el concreto convencional, debido a que, si se aumenta el agua también lo hará la fluidez, trabajabilidad y plasticidad, sin embargo, a la par su resistencia comenzará a disminuir debido a la mayor cantidad de espacios generados por el agua. Caso contrario ocurre con el concreto poroso, donde su mayor característica es el contenido de vacíos, y la resistencia del concreto dependerá de la interconectividad de los poros y la recubierta del agregado utilizado, de acuerdo con los resultados de la Figura 28 se aprecia que para las mezclas compactadas en dos capas, mientras menor sea la relación a/c , mayor será la resistencia, sin embargo la diferencia de valores no es significativa, pero se hace más notoria cuando se aplica una mayor energía de compactación generando una diferencia de 7.6 %.

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 29, se observa que mientras la permeabilidad aumenta la resistencia disminuye. Como se ha mencionado anteriormente uno de los principales retos para el concreto permeable es encontrar un balance entre la permeabilidad y resistencia, se observa que el segundo diseño presenta un rango más amplio para valores de permeabilidad y un rango más reducido para los valores de resistencia, respecto al primer diseño. Si bien el diseño 1 con menor relación $a/c = 0.30$ presenta la mayor resistencia con 71 kg/cm^2 y el segundo diseño un valor de 54 kg/cm^2 , la diferencia no es tan significativa como en el concreto convencional, con lo cual se puede deducir que la variación de la relación a/c predomina más en la trabajabilidad que en la resistencia.

Figura 29

Resultados de permeabilidad y resistencia a compresión para ambos diseños

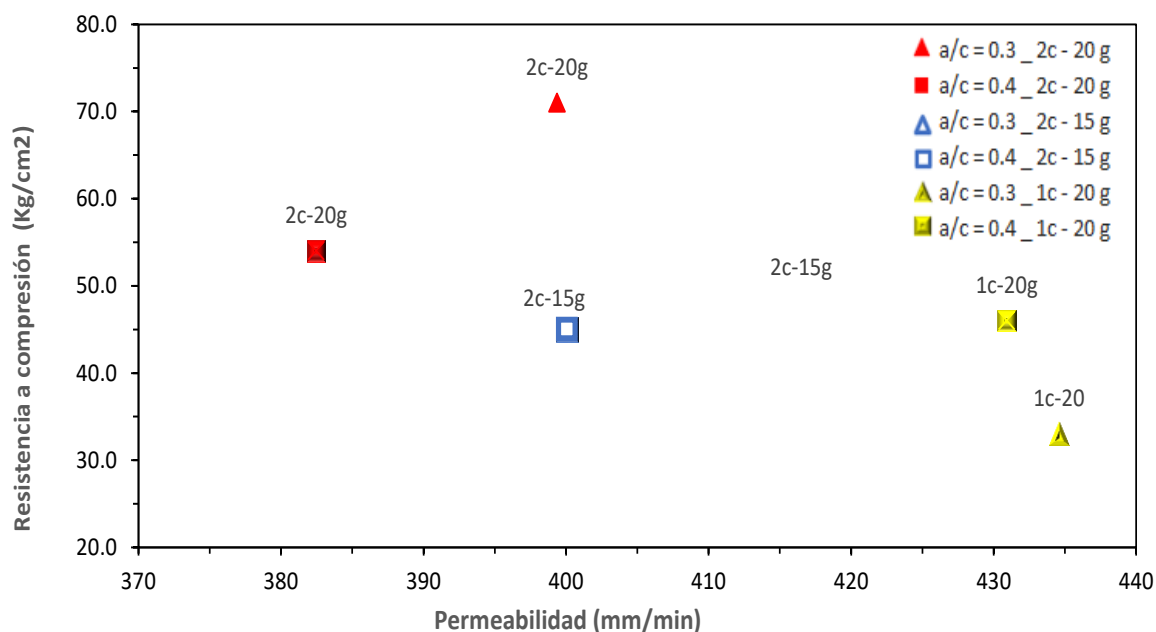
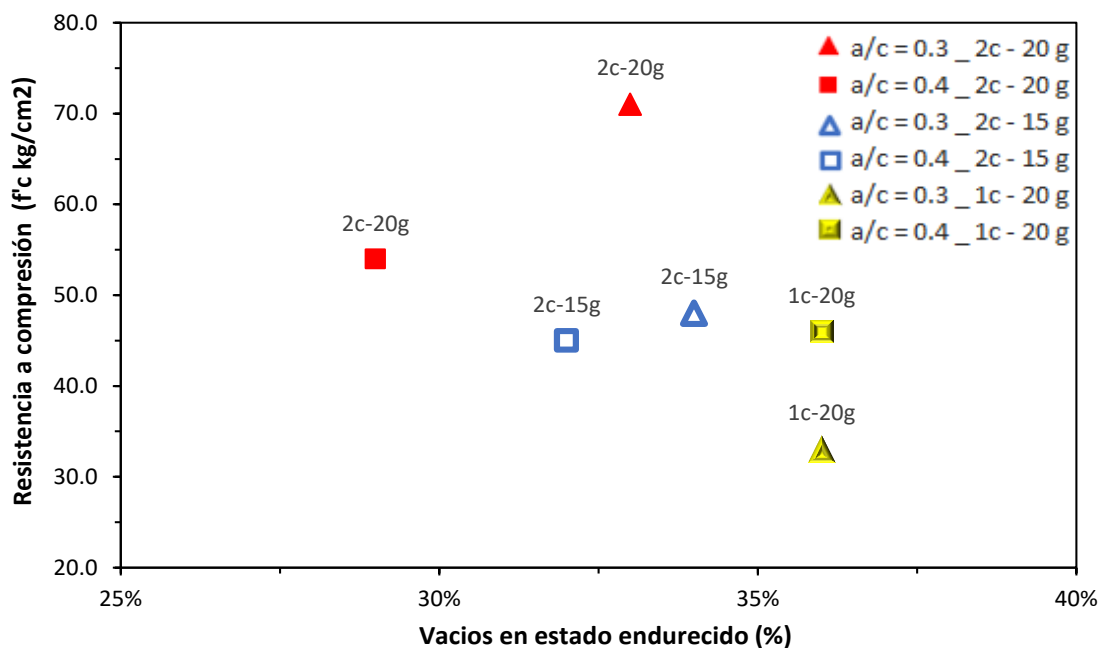


Figura 30

Relación entre la resistencia a compresión y el contenido de vacíos endurecido

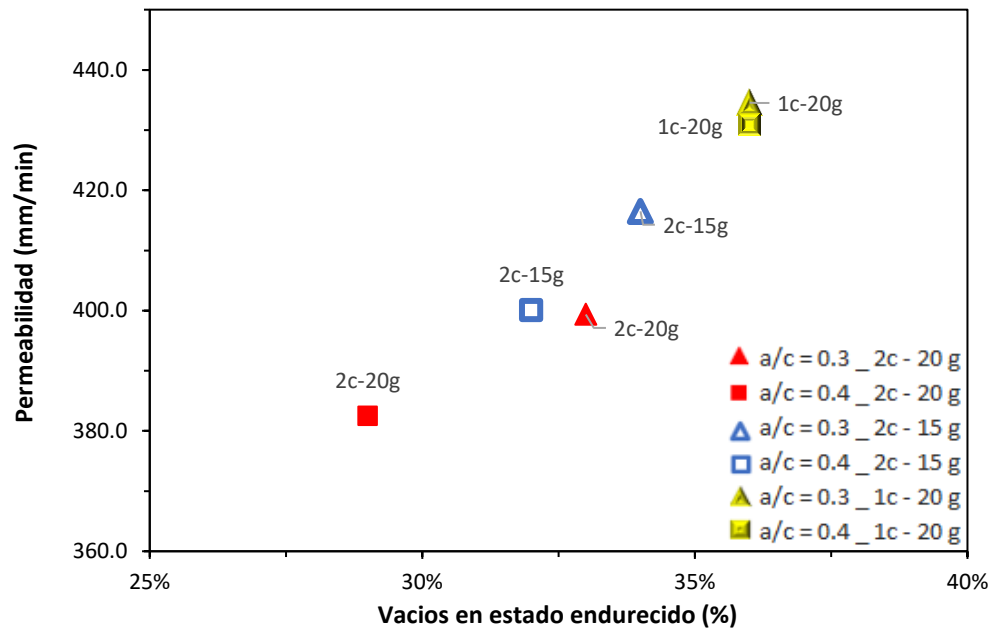


Al comparar los resultados de resistencia y contenido de vacíos en estado endurecido en la Figura 30, se observa que, mientras mayor sea el contenido de vacíos, menor será resistencia, comprobando el comportamiento esperado. Desde el punto de vista de Pereira da Costa et al. (2021) los bajos valores de resistencia pueden deberse a mezclas secas y falta de unión entre agregados, si bien, debido a la relación a/c se esperaba que el primer diseño presente menor cantidad de vacíos y mayor resistencia respecto al segundo, en los resultados se obtuvo lo opuesto para el contenido de vacíos, direccionando el análisis hacia la trabajabilidad de la mezcla, pues mientras esta sea más fluida le será más fácil esparcirse para cubrir una mayor cantidad de agregados durante la compactación, al mismo tiempo que debilita los enlaces del esqueleto granular de la mezcla, tal y como afirma Fan et al. (2022) ante un incremento de la trabajabilidad se puede producir una obstrucción y reducción del tamaño de los poros, es por ello que el primer diseño presenta una mayor resistencia y mayor contenido de vacíos, puesto que el porcentaje de pasta proporciona una cubierta de mayor espesor al agregado fortaleciendo el enlaces entre los componentes de la mezcla, y debido a su consistencia seca se hace más difícil la colocación en los moldes mediante la compactación.

Al comparar la permeabilidad de los especímenes con el contenido de vacíos como en la Figura 31, se observa una relación directamente proporcional, donde a mayor contenido de vacíos, mayor es la permeabilidad. Además, se evidencia la importancia de la energía de compactación, pues mientras menor es la fuerza aplicada, mayor es la cantidad de vacíos que se forman en las probetas, inclusive se aprecia como en los especímenes menos compactados se obtienen valores muy similares de contenido de vacíos.

Figura 31

Relación entre la permeabilidad y el contenido de vacíos



Si bien es cierto, este concreto desea plantearse como un nuevo material para pavimentos rígidos debido a su capacidad de drenaje, la obtención de resistencia debe tratarse con una especial atención, pues en muchos casos no cumple con el requisito mínimo para su utilización, la cual está en el rango de 210 kg/cm² a 280 kg/cm² por ende, actualmente sus aplicaciones se reducen a infraestructuras viales de menos tránsito y que soporten menos carga como estacionamientos, caminos peatonales, ciclovías, etc. (Fu y otros, 2014). De acuerdo con los diseños iniciales se esperaban valores de resistencia alrededor de los 150 kg/cm², sin embargo, el máximo valor alcanzado por los especímenes fue de 71 kg/cm², para el primer diseño, concluyendo que no cumple los requisitos mínimos para ser utilizado en construcción.

3.3 Diseño adicional

Uno de los objetivos principales de esta tesis, era comparar los resultados obtenidos con los esperados de acuerdo con el ACI Committee 522R-10 (2010). Se esperaba que ambos diseños al tener un mismo porcentaje de vacíos en estado fresco de 20 %, otorgaran valores de permeabilidad y resistencia cercanos a 125 mm/min y 150 kg/cm² respectivamente, sin embargo, los valores obtenidos sobrepasaron en permeabilidad y disminuyeron en resistencia.

Debido a la variabilidad en los resultados obtenidos, se realizó un diseño adicional, donde se incorporó a la granulometría previamente utilizada el material retenido en la malla #4, con la finalidad de evaluar el comportamiento de la mezcla y analizar las variaciones de las propiedades descritas anteriormente. Como se adicionó un porcentaje de nuevo material, se procedió a realizar la caracterización del agregado grueso, y posteriormente se realizó el diseño, tal y como se describe en el capítulo 2.

En este diseño adicional, se optó por una relación a/c de 0.4 y una energía de compactación de 2c-20g, ya que la mezcla al ser más diluida permitiría un mejor acomodo en las partículas. Los resultados para este diseño adicional se compararon con los resultados del diseño 2 para la primera energía de compactación, ya que cuentan con la misma relación a/c. Como se observa en la Tabla 10, la dosificación por metro cúbico para el diseño adicional no experimenta cambios en las cantidades de cemento y agregado grueso. Esto se debe a que el porcentaje de volumen de pasta se determina mediante su correlación con el contenido de vacíos. Por lo tanto, si el volumen de pasta y la relación a/c no varían, tampoco lo hace la cantidad de agua. Sin embargo, el contenido de agregado grueso varía, ya que su peso unitario y granulometría también lo hacen.

Tabla 10

Proporción de la mezcla para el diseño adicional

Materiales	SSS	Stock	Vol.	Proporción(kg)
Cemento (kg)	209.071	209.071	0.03	6.27
Agua (Kg)	83.628	92.414	0.03	2.77
Ag. Grueso (kg)	1772.890	1764.103	0.03	52.42

Se realizaron solo ocho probetas de este diseño, que serían compactadas mediante 2 capas con 20 golpes, de las cuales tres fueron ensayadas para determinar la resistencia a compresión, tres para determinar el contenido de vacíos en estado endurecido, y dos fueron ensayadas para determinar su permeabilidad. La elaboración de los especímenes se realizó bajo las mismas condiciones que las mezclas anteriores, y se ejecutaron los mismos ensayos, obteniéndose los siguientes resultados para concreto en estado fresco, y estado endurecido mostrados en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11

Resultados para el concreto en estado fresco del diseño adicional vs resultados para el diseño 2 con relación a/c=0.40

Diseños	Diseño adicional a/c=0.4		Diseño 2 a/c=0.40	
	Molde de P. U	Probeta	Molde de P. U	Probeta
Densidad y contenido de vacíos en estado fresco				
Densidad teórica (T) (kg/m ³)	2576	2576	2575	2575
Densidad en estado fresco (D) (kg/m ³)	2028	2055	1980	2024
Contenido de vacío (U) (%)	21%	20%	23%	21%

Tabla 12

Resultados para el concreto en estado endurecido del diseño adicional vs segundo diseño a/c=0.4

Propiedades	Diseño adicional a/c=0.4	Diseño 2 a/c=0.4
Resistencia (kg/cm ²)	68	54
Permeabilidad (mm/min)	299.9	382.5
Densidad (kg/m ³)	1803	1789
Contenido de vacíos (%)	24%	29%

De las tablas anteriores, se evidencia que para la misma mezcla en el concreto fresco existe una reducción en el contenido de vacíos de un 2 %, ya que con la granulometría anterior se obtuvo un porcentaje de 23 %, quedando mucho más cercano al valor propuesto para el diseño que fue un porcentaje de vacíos del 20 %. Al comparar las propiedades del concreto endurecido, se evidencia una mejora en la resistencia a compresión, variando de 54 kg/cm² a 68 kg/cm², para la permeabilidad se observó una reducción de aproximadamente 21.5 % pasando de 382 mm/min a 299.9 mm/min. Arcolezi et al. (2023), indican que cuando se utilizan diferentes tamaños de agregados, se produce un mejor empaquetamiento y acomodo de las partículas, obteniendo así mejores propiedades mecánicas e hidráulicas

El diseño adicional al incluir las partículas retenidas en la malla #4 se obtiene un mejor empaquetamiento y acomodo de partículas, caso contrario ocurre cuando solo utilizamos 2 tamaños diferentes del agregado en los diseños 1 y 2, confirmando lo propuesto por Fu et al. (2014) quienes dicen que a mayor tamaño del agregado la resistencia a compresión disminuye, así como sucedió en el diseño 2 y cuando se utilizan agregados de distintos tamaños la permeabilidad decrece como en el diseño adicional.

Por otro lado, si bien, aun realizado la adición de material en la granulometría, no se han alcanzado los valores propuestos por el ACI Committee 522R-10 (2010), el comportamiento que predice este si se ha logrado confirman en cada uno de los ensayos, además se hace hincapié en que los valores dictados por dicha norma no tienen la intención de ser determinantes sino referenciales. Una apreciación interesante respecto a la resistencia es que al adicionar el agregado de la malla #4, se logró una resistencia similar a la obtenida con una relación a/c=0.3 en el primer diseño, y se logró una menor permeabilidad en el diseño adicional respecto a los diseños 1 y 2.

Conclusiones

Para una mayor resistencia se espera una permeabilidad menor lo que corresponde a un menor contenido de vacíos. En esta investigación, ningún diseño alcanzó el valor de resistencia a compresión esperado teóricamente en el procedimiento inicial.

La energía de compactación puede impactar en la disposición de los vacíos dentro del elemento, dado que cuando las partículas se encuentran más cercanas, aumenta la posibilidad de que se formen poros sin salida. Otro factor influyente es la trabajabilidad de la mezcla, la cual está relacionada con la proporción a/c . Una mezcla más fluida facilita una mejor unión entre las partículas, especialmente durante su colocación, mientras que una mezcla más seca puede dificultar este proceso.

La relación a/c tiene escasa importancia para definir la resistencia del concreto permeable, sin embargo, queda en evidencia su importancia para otorgar la trabajabilidad de la mezcla, pues demasiada trabajabilidad puede bloquear el esqueleto granular de poroso, disminuyendo la permeabilidad, tal y como se mostró en el segundo diseño con una mayor relación $a/c=0.4$, obteniéndose un menor porcentaje de vacíos en estado endurecido y menor permeabilidad respecto al primer diseño con relación $a/c=0.30$.

Dado que la variación de resistencia entre ambos diseños no es significativa, pues los mayores valores alcanzados para los diseños 1 y 2 fueron 71 kg/cm^2 y 54 kg/cm^2 respectivamente, se establece que los principales factores que influyen en su resistencia son el porcentaje de pasta y la trabajabilidad, dado que mientras estos sean mayores otorgarán un incremento en el espesor de la cubierta que envuelve a los agregados, y al mismo tiempo fortalece los enlaces entre las partículas, por su parte la trabajabilidad permitirá una mejor colocación de la mezcla, logrando un empaquetamiento de agregados más compacto.

Al optimizar el diseño, se observó que cuando hay mayor variedad de tamaño entre las partículas del agregado grueso, se logra un mejor empaquetamiento, mejorando las propiedades mecánicas y reduciendo las propiedades hidráulicas, acercándose más al balance entre resistencia y permeabilidad que busca el concreto permeable.

Recomendaciones

Para todos los diseños realizados en esta tesis se obtuvieron permeabilidades muy altas y resistencias muy bajas con los agregados de la región, haciendo inviable su utilización en el ámbito constructivo, sin embargo, se cree que, con una mayor cantidad de estudios y/o adición de materiales se pueda lograr concreto permeable con resistencias y permeabilidades dentro de los parámetros establecidos por las normas de construcción en el Perú.

Uno de los principales retos para el concreto permeable es encontrar altas resistencias con permeabilidades adecuadas, nos encontramos más cerca de este objetivo cuando se produce un mejor empaquetamiento de los agregados tal y como en el diseño adicional, por lo que se recomienda realizar una distribución granulométrica porcentual, incluyendo diferentes tamaños de agregados y evaluar su comportamiento.

Se recomienda utilizar aditivos como superplastificantes, retardante de fragua, para alargar la trabajabilidad de la mezcla asegurando un mejor acomodo de las partículas y obtener una mejora en la resistencia, además de tener los cuidados necesarios durante su elaboración y colocación tal como lo son la energía de compactación y el curado.

Las principales investigaciones respecto al concreto permeable hacen hincapié en que el concreto permeable reduce la ola de calor, reflexión de brillo y la absorción acústica, respecto al pavimento tradicional, por lo que se recomienda estudiar estas propiedades para tener un mejor entendimiento del concreto permeable, sobre todo en las zonas del norte donde las temperaturas alcanzan máximos de 34 °C y el sistema de drenaje pluvial es deficiente.

Referencias

- ACI Committee 211. (2009). ACI PRC-211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (Reapproved 2009). *American Concrete Institute*.
https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211191&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_Units
- ACI Committee 318. (2019). ACI CODE -318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
[https://www.concrete.org/store/storerresults.aspx?DocumentType=Handbooks+and+Manuals%2cPractices+\(guides+%26+reports\)%2cStandards+\(codes+%26+specs\)&Keyword=aci%2c318](https://www.concrete.org/store/storerresults.aspx?DocumentType=Handbooks+and+Manuals%2cPractices+(guides+%26+reports)%2cStandards+(codes+%26+specs)&Keyword=aci%2c318)
- ACI Committee 522-23. (2023). Pervious concrete. *American Concrete Institute*, 55.
https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=52223&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_AND_METRIC
- ACI Committee 522R-10. (2010). Report on pervious concrete. *American Concrete Institute*, 44.
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51663557>
- Aire, M. (2020). Concreto Poroso. *P y S concreto*, 9.
- Aitcin, P., & Neville, A. (2003). How the water.cement ratio affects concrete strength. *Concrete International*, 25(1), 51-58.
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/12778>
- Amorós Morote, C., & Bendezú Ulloa, J. (2019). Diseño de mezcla de concreto permeable para la construcción de la superficie de rodadura de un pavimento de resistencia de 210 kg/cm². *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas*.
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626313>
- Angelone, S., Garibay, M., & Casaux, M. (2006). Geología y geotecnia. Permeabilidad de suelos. *Universidad Nacional del Rosario*.
<https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- Arcolezi, K., Da Silva, R., Soriano, L., Borrachero, M., Monzó, J., Payá, J., . . . Akasaki, J. (2023). Effect of Aggregates Packing with the Maximum Density Methodology in Pervious Concrete. *Sustainability*, 18. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/6/4939>
- Aris, C. (2008). Pabellón y patio, elementos de la arquitectura moderna. *Dearq*, 16-27.
https://www.researchgate.net/publication/50888864_Pabellon_y_patio_elementos_de_la_arquitectura_moderna

- Arrieta, R., & Carro, A. (2011). Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. *Infraestructura vial*, 40-49. <https://www.redalyc.org/pdf/4782/478276563005.pdf>
- ASTM C33/C33M-18. (2018). Standard Specification for concrete aggregates. *ASTM International*. https://www.astm.org/c0033_c0033m-18.html
- ASTM D448-17. (2017). Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction. *ASTM International*. <https://www.astm.org/d0448-12r17.html>
- ASTM International. (1996). ASTM C136-96a: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. <https://www.astm.org/standards/c136>
- ASTM International. (2012). Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. https://www.madcad.com/store/subscription/ASTM-C1754_C1754M-12/
- ASTM International. (2014). ASTM C1688/C1688M-14a: Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete. https://www.astm.org/c1688_c1688m-14a.html
- ASTM International. (2021). ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html
- ASTM International. (2022). ASTM C150/C150M-22: Standard specification for portland cement. https://www.astm.org/c0150_c0150m-22.html
- Barton, J. (2011). Revisión de marcos conceptuales y análisis de enfoques metodológicos para el desarrollo de una infraestructura urbana sostenible y ecoeficiente. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/8b89d18a-5f2e-40d0-bfe3-3c8c69f7aa4f>
- Bebbington , A., & Williams, M. (2008). Agua y Minería: Conflictos en el Perú. https://hummedia.manchester.ac.uk/schools/seed/andes/es/publications/papers/BebbingtonandWilliams2008_espanol.pdf
- Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, 99-108. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732015000200002
- Cabello Sequera, S., Campuzano Vera, L., Espinoza Correa, J., & Sanchez Mendieta, C. (2015). Concreto poroso: Constitución, variables influyentes y protocolos para su caracterización. *Cumbres, Revista científica*, 1(1), 64-69. <file:///C:/Users/mirel/Downloads/Dialnet-ConcretoPoroso-6550706.pdf>
- Chandrappa, A., & Prapoorna, K. (15 de Mayo de 2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research. *Construction and Building Materials*, 111, 262-274. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816301131>

- Cruz Diaz, F., & Arana Pari, C. (2021). Evaluación de la resistencia mecánica de un concreto permeable ordinario frente a concretos permeables elaborados con un aditivo superplastificante y relaciones a/c menores, para su uso en pavimentos urbanos; Arequipa - 2021. *Universidad Continental*.
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10415>
- Elango, K., & Revathi, K. (2020). Mechanical and durability studies on pervious concrete using different types of binder. *Revista Romana de Materiale*, 50(2), 258-267.
<https://solacolu.chim.upb.ro/pg258-267.pdf>
- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (diciembre de 2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 29(3). https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732014000300002&script=sci_arttext&tlng=pt
- Fan, Y., Guo, J., Liu, J., Cai, H., & Huang, Y. (2022). A review of the pore structure of pervious concrete: Analyzing method, characterization parameters and the effect on performance. *Construction and Building Materials*, 17, 1254-1256.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822036273>
- Flores Quispe, C., & Pacompia Calcina, 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 para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Antiplano, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Puno.
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_6c2359cbfafdc9b0798ecc9f44c5db8c
- Flores, A., Villafranca, A., & Reconco, J. (2019). El concreto con árido reciclado: una opción de material para construcción con criterio de sostenibilidad. *INNOVARE. Revista de Ciencia y Tecnología*(8), 120-124.
<https://camjol.info/index.php/INNOVARE/article/view/9067>
- Flores, P. (2020). La construcción sostenible en Latinoamérica. *Construcción y tecnología del concreto*. <https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Limaq/article/view/5336>
- Frias, A. (2014). Concreto y sustentabilidad. *Construcción y tecnología del concreto*, 6.
<https://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/mayo2014/mejor.pdf>
- Fu, T., Yeih, W., Chang, J., & Huang, R. (2014). The Influence of Aggregate Size and Binder Material on the properties of pervious concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 17. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2014/963971>
- Guevara Fallas, G., Hidalgo Madrigal, C., Pizarro Garcia, M., Rodríguez Valenciano, I., Rojas Vega, L., & Segura Guzmán, G. (2011). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*, 25(2), 80-86.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835626>

- Herrero, L. (2002). La sostenibilidad como proceso de equilibrio dinámico y adaptación al cambio. *ICE, Revista de economía*(800), 20. <https://www.revistasice.com/index.php/ICE/article/download/373/373>
- INACAL. (2018). HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico del hormigón (concreto). <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2019). Suelos. Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada (2 700 kN-m/m³ (56 000 pie-lbf/pie³)). 1ª Edición. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_5%20%20EM-2016.pdf
- INACAL. (2020). AGREGADOS. Densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. Método de ensayo. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2020). AGREGADOS. Método de ensayo para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso Unitario”) y los vacíos en los agregados. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2021). AGREGADOS. *Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. Método de ensayo.* (Cuarta edición ed.). Lima. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2021). AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. Método de ensayo. 4a Edición. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2021). AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Método de ensayo. 3a Edición. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2021). CONCRETO. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en campo. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2021). CONCRETO. Práctica para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio. 3a Edición. 2. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- INACAL. (2021). Concreto: Determinación de la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado. Método de ensayo. 3a Edición. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- Li, L., Chan, P., Zollinger, D., & Lytton, R. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. *ACI Materials Journal*, 90(4), 357-365.

- <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/3894>
- Marks, A. (2008). Pervious concrete pavement: how important is compressive strength? *Journal of Green Building*, 3(3), 36-41. <https://meridian.allenpress.com/jgb/article/3/3/36/199888/Pervious-Concrete-Pavement-How-Important-Is>
- Meininger, R. C. (1988). No-fines pervious concrete for paving. *Concrete International*, 10(8), 20-27. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/1801>
- Moscoso Mela, A., & Marcos Chuta, M. (2022). Análisis de energía de compactación en conformación de bases para pavimento rígido urbano en el distrito de distrito de Challhuahuacho, Apurímac. *Universidad Continental*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11789>
- Mulligan, A. (2005). Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems. *United States: University of Central Florida*. <https://stars.library.ucf.edu/etd/473/>
- Neithalath, N., Bentz, D., & Sumanasooriya, M. (2010). Predicting the permeability of pervious concrete. *ACI Committee 236*, 32(5), 35-40. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=902557
- Neithalath, N., Weiss, W., Olek, J., Marolf, A., Sell, E., & Thornton, W. (2003). Development of quiet and durable porous portland cement concrete paving materials. 179. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/16086>
- Ovalle, B. H. (2019). Análisis de la causalidad de las muertes violentas y su relación con el PIB: caso Guayaquil. *Revista multidisciplinaria de investigación*. <https://revistaespirales.consultorioampuero.com/index.php/es/article/view/447>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). *Eco-efficient construction and building materials*. Springer Science & Business Media. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=_ZjiAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Eco-efficient+construction+and+building+materials&ots=eagWB1lbPb&sig=uQIAIQqRTqGbBdU04dWu6kAl7wY#v=onepage&q=Eco-efficient%20construction%20and%20building%20materials&f=false
- Peláez Ramos, M. L. (2012). El reto de la eficiencia energética en el sector de la construcción. *Ministerio de Industria y Turismo*. [https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/385/M%20AA%20Luz%20Pe%20A1ez%20Ramos%20\(2\).pdf](https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/385/M%20AA%20Luz%20Pe%20A1ez%20Ramos%20(2).pdf)

- Pereira da Costa, F., Haselbach, L., & P. Da Silva Filho, L. (2021). Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ratio and a rheology-modifying admixture. *Construction and Building Materials*(268), 121084. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820330889>
- Ramírez, I. J., & Briones, F. (2017). Understanding the El Niño Costero of 2017: The Definition Problem and Challenges of Climate Forecasting and Disaster Responses. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30, 1-9. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13753-017-0151-8>
- Saikia , N., Kato, S., & Kojima, T. (2007). Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. *Waste Management*, 27(9). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X06001905>
- Soto Izquierdo, I., Soto Izquierdo, O., & Ramalho, M. (2018). Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento. *Revista de Ingeniería y Construcción*, 33(3), 12. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732018000300229&script=sci_arttext&tlng=pt
- Tarabochia, M. (2014). Perú es el tercer país más vulnerable del mundo al cambio climático. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/306347-cambio-climatico-y-desarrollo-sostenible-en-el-peru>
- Tennis, P., Leming, M., & Akers, D. (2004). Pervious concrete pavements. *PCA Serial No. 2828*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/62123845/Journal120200217-89712-rw600r.pdf?1581955898=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPervious_concrete_An_overview.pdf&Expires=1729916469&Signature=VSSIdpkMpjS7wsdivXBdca1PgEggbdcK0XJIKqin3IcjdGnxD
- Veeger, M., Ottelé, M., & Prieto, A. (2021). Making bioreceptive concrete: Formulation and testing of bioreceptive concrete mixtures. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221004022>
- Velez, L. (diciembre de 2010). Permeabilidad y porosidad en concreto. *Revista Tecnológica*(25), 169-187. <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/869>
- Vitola, L., & Fernandez, L. (1998). *Estado del arte de los hormigones porosos*. Buenos Aires: Instituto de cemento Portland Argentino. http://www.aacarreteras.org.ar/uploads/pdf/pdf_Revts/154.pdf

Apéndices



Apéndice A. Resultados de tamizado en el ensayo de granulometría

Muestra:		M-01		Peso inicial seco:		17250.0 gr
Tamiz	Aashto t-27 (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa	Especificación ASTM C33/C33 M
1 1/2"	38.100	0			100.000	100
1"	25.400	1150.000	6.670	6.700	93.300	[90-100]
3/4"	19.000	3200.000	18.600	25.200	74.800	[40-85]
1/2"	12.500	5850.000	33.900	59.100	40.900	[10-40]
3/8"	9.500	3600.000	20.900	80.000	20.000	[0-15]
1/4"	6.350	2750.000	15.900	95.900	4.100	-
N.º 4	4.750	600.000	3.500	99.400	0.600	[0-5]
	FONDO	100.000	0.600	100.000	0.000	
		Clasificación SUCS				GP
		Clasificación AASTHO				A-1-a (0)



Apéndice B. Valores obtenidos para el peso unitario

Datos	M1	M2	M3
Peso del molde (gr)	1586.000	1586.000	1586.000
(C) Volumen del molde (cm3)	2831.400	2831.400	2831.400
(A-B) Peso del material varillado	5002.000	4994.000	4995.000
(A-B) Peso del material en estado suelto (gr)	4589.000	4598.000	4586.000



Apéndice C. Datos para gravedad específica y absorción del agregado grueso

Gravedad específica y absorción de los agregados		Unidad
F. Peso material seco al aire	2500.000	kg/m ³
G. Peso Mat.Sat. Sup. Seca (En Aire)	2511.200	kg/m ³
H. Peso Mat.Sat. Sup. Seca (En Agua)	1588.000	kg/m ³
F'. Peso del material seco en horno 105°C	2489.000	kg
Vol. de masa + vol. de vacíos = B-C	923.200	
Vol. de masa = D- (B - A)	912.000	
Pe bulk (Base seca) = A/D	2.710	
Pe bulk (Base saturada) = B/D	2.720	
Pe Aparente (Base Seca) = A/E	2.740	
% de absorción = $((B - A') / A * 100)$	0.890	



Apéndice D. Datos para determinar la densidad teórica de ambos diseños

Materiales	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (kg)
Masa en SSS (kg/m ³ de concreto)	242.931	1755.910	72.880
Masa SSS cada 30 litros de concreto (kg)	7.288	52.677	2.186
Gravedad específica (Gs)	3.150	2.720	1.000
Masa total de los materiales Ms (kg)		62.150	
Volumen (m ³)	0.002	0.019	0.002
Suma de los volúmenes absolutos vs (m ³)		0.024	
Densidad teórica en estado fresco (T) (kg/m ³)	2604.000		

Materiales	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (kg)
Masa en SSS (kg/m ³ de concreto)	209.071	1755.910	83.628
Masa SSS cada 30 litros de concreto (kg)	6.270	52.680	2.510
Gravedad específica (Gs)	3.150	2.720	1.000
Masa total de los materiales Ms (kg)		62.460	
Volumen (m ³)	0.002	0.019	0.003
Suma de los volúmenes absolutos vs (m ³)		0.024	
Densidad teórica en estado fresco (T) (kg/m ³)		2575.000	

Apéndice E. Datos para la densidad en estado fresco a/c=0.30

Energía de compactación – Moldes P.U	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Masa del recipiente Mm (gr)	3620.000	3620.000	3620.000
Masa de la mezcla + recipiente Mc (gr)	16800.000	16400.000	16100.000
Volumen del recipiente de medida Vm (cm3)	7035.100	7035.100	7035.100
Densidad en estado fresco (D)	1873.000	1817.000	1774.000

Energía de compactación - Probetas	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Masa del recipiente Mm (gr)	5654.000	5624.000	5715.000
Masa de la mezcla + recipiente Mc (gr)	8750.000	8644.000	8691.000
Volumen del recipiente de medida Vm (cm3)	1570.800	1570.800	1570.800
Densidad en estado fresco (D)	1971.000	1923.000	1895.000

Apéndice E1. Datos para la densidad en estado fresco a/c=0.40

Energía de compactación – Moldes P.U	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Masa del recipiente Mm (gr)	3620.000	3623.000	3623.000
Masa de la mezcla + recipiente Mc (gr)	17550.000	17050.000	16850.000
Volumen del recipiente de medida Vm (cm3)	7035.100	7035.100	7035.100
Densidad en estado fresco (D)	1980.000	1909.000	1880.000

Energía de compactación - Probetas	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Masa del recipiente Mm (gr)	5654.000	5714.000	5628.000
Masa de la mezcla + recipiente Mc (gr)	8834.000	8860.000	8637.000
Volumen del recipiente de medida Vm (cm3)	1570.800	1570.800	1570.800
Densidad en estado fresco (D)	2024.000	2003.000	1916.000

Apéndice E2. Datos para el contenido de vacíos en estado fresco a/c=0.3

Energía de compactación	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Densidad teórica en estado fresco (T)	2604.000	2604.000	2604.000
Densidad en estado fresco (D)	1873.000	1817.000	1774.000
Contenido de vacíos (U)	0.280	0.300	0.320

Energía de compactación	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Densidad teórica en estado fresco (T)	2604.000	2604.000	2604.000
Densidad en estado fresco (D)	1971.000	1923.000	1895.000
Contenido de vacíos (U)	0.240	0.260	0.270

Apéndice F. Datos para el contenido de vacíos en estado fresco $a/c=0.40$

Energía de compactación	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Densidad teórica en estado fresco (T)	2575.000	2575.000	2575.000
Densidad en estado fresco (D)	1980.000	1909.000	1880.000
Contenido de vacíos (U)	0.230	0.260	0.270

Energía de compactación	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Densidad teórica en estado fresco (T)	2575.000	2575.000	2575.000
Densidad en estado fresco (D)	1980.000	1909.000	1880.000
Contenido de vacíos (U)	0.230	0.260	0.270

Apéndice F1. Datos para el contenido de vacíos en estado fresco $a/c=0.40$

Energía de compactación	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Densidad teórica en estado fresco (T)	2575.000	2575.000	2575.000
Densidad en estado fresco (D)	1980.000	1909.000	1880.000
Contenido de vacíos (U)	0.230	0.260	0.270

Energía de compactación	2c-20 g	2c-15g	1c-20 g
Densidad teórica en estado fresco (T)	2575.00	2575.00	2575.00
Densidad en estado fresco (D)	2024.00	2003.00	1916.00
Contenido de vacíos (U)	0.210	0.220	0.260

Apéndice G. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-20g para el primer diseño a/c=0.30

2c-20g		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Ms (gr)	Masa seca del espécimen	2975.000	3015.000	3000.000
B (gr)	Masa sumergida del espécimen	1887.000	1898.000	1890.000
L (mm)	Promedio de longitud del espécimen	212.090	208.840	210.240
Di (mm)	Promedio del diámetro de espécimen	100.380	99.830	100.450
K (mm ³ kg/m ³ g)	Constante	1273240	1273240	1273240
ρ_w (kg/m ³)	Densidad del agua - por temperatura	997.000	997.000	997.000
De	Densidad	1772.000	1844.000	1801.000
% Ve	Contenido de vacíos	0.350	0.310	0.330

Apéndice G1. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-15 g para el primer diseño a/c=0.30

2c-15g		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Ms (gr)	Masa seca del espécimen	2984.00	2973.00	3054.00
B (gr)	Masa sumergida del espécimen	1888.000	1884.000	1925.000
L (mm)	Promedio de longitud del espécimen	209.330	204.960	210.840
Di (mm)	Promedio del diámetro de espécimen	101.010	101.270	101.270
K (mm ³ kg/m ³ g)	Constante (mm ³ kg/m ³ g)	1273240	1273240	1273240
ρ_w (kg/m ³)	Densidad del agua- por temperatura	997.000	997.000	997.000
De	Densidad	1779.000	1801.000	1798.000
% Ve	Contenido de vacíos	0.340	0.340	0.330

Apéndice G2. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-20 g para el primer diseño a/c=0.30

1c-20g		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Ms (gr)	Masa seca del espécimen	2839.000	2829.000	2878.000
B (gr)	Masa sumergida del espécimen	1792.000	1788.000	1810.000
L (mm)	Promedio de longitud del espécimen	204.960	210.080	206.170
Di (mm)	Promedio del diámetro de espécimen	101.000	100.510	100.610
K (mm ³ kg/m ³ g)	Constante (mm ³ kg/m ³ g)	1273240	1273240	1273240
ρ_w (kg/m ³)	Densidad del agua- por temperatura	997.000	997.000	997.000
De	Densidad	1729.000	1697.000	1756.000
% Ve	Contenido de vacíos	0.360	0.370	0.350

Apéndice G3. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-20 g para el primer diseño a/c=0.40

2c-20g		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Ms (gr)	Masa seca del espécimen	3023.000	2962.000	3040.000
B (gr)	Masa sumergida del espécimen	1867.000	1721.000	1888.000
L (mm)	Promedio de longitud del espécimen	212.600	211.420	210.270
Di (mm)	Promedio del diámetro de espécimen	100.750	100.500	100.660
K (mm ³ kg/m ³ g)	Constante (mm ³ kg/m ³ g)	1273240	1273240	1273240
ρw (kg/m ³)	Densidad del agua – por temperatura	997.000	997.000	997.000
De	Densidad	1784.000	1766.000	1817.000
% Ve	Contenido de vacíos	0.320	0.260	0.310

Apéndice G4. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 2c-15 g para el primer diseño a/c=0.40

2c-15g		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Ms (gr)	Masa seca del espécimen	2999.000	2998.000	3044.000
B (gr)	Masa sumergida del espécimen	1852.000	1870.000	1867.000
L (mm)	Promedio de longitud del espécimen	212.580	208.000	209.620
Di (mm)	Promedio del diámetro de espécimen	100.660	101.130	101.660
K (mm ³ kg/m ³ g)	Constante (mm ³ kg/m ³ g)	1273240	1273240	1273240
ρw (kg/m ³)	Densidad del agua – por temperatura	997.000	997.000	997.000
De	Densidad	1773.000	1794.000	1789.000
% Ve	Contenido de vacíos	0.320	0.320	0.310

Apéndice G5. Densidad y contenido de vacíos con energía de compactación 1c-20 g para el primer diseño a/c=0.40

1c-20g		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Ms (gr)	Masa seca del espécimen	2900.000	2917.000	2911.000
B (gr)	Masa sumergida del espécimen	1824.000	1834.000	1829.000
L (mm)	Promedio de longitud del espécimen	211.760	211.640	210.420
Di (mm)	Promedio del diámetro de espécimen	100.600	101.080	102.030
K (mm ³ kg/m ³ g)	Constante (mm ³ kg/m ³ g)	1273240	1273240	1273240
ρw (kg/m ³)	Densidad del agua – por temperatura	997.000	997.000	997.000
De	Densidad	1723.000	1718.000	1692.000
% Ve	Contenido de vacíos	0.360	0.360	0.370

Diseño 1 con $a/c=0.30$	2c-20g	2c-15g	1c-20g
De	1806.000	1793.000	1727.000
% Ve	0.330	0.340	0.360
Diseño 2 con $a/c=0.40$	2c-20g	2c-15g	1c-20g
De	1789.000	1785.000	1711.000
% Ve	0.290	0.320	0.360



Apéndice H. Datos de permeabilidad para primer diseño con $a/c= 0.30$

Diseño 1	2c-20 g						2c-15 g					
	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 1			Muestra 2		
A1 (mm ²)	7.992.820			8.026.529			7.928.772			7.916.939		
L (mm)	208.140			208.570			203.890			206.690		
A2 (mm ²)	8335.53											
h1 (mm)	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
h2 (mm)	15.70	16.10	16.20	16.60	16.50	16.80	15.20	15.70	15.80	15.75	15.60	15.15
t (s)	11.44	11.07	11.30	10.90	11	10.70	11.34	10.93	11.04	10.60	10.76	10.89
k (mm/s)	6.70	6.72	6.55	6.62	6.65	6.70	6.81	6.81	6.70	7.08	7.05	7.20
k(mm/min)	401.80	403.40	393	397	399	402	408.3	408.7	401.7	425	423.3	432

Diseño 1	Diseño 1			1c-20 g		
	Muestra 1			Muestra 2		
A1 (mm ²)	8120.491			7986.087		
L (mm)	210.940			212.893		
A2 (mm ²)						
h1 (mm)	38	38	38	38	38	38
h2 (mm)	15.90	16.10	15.90	15.30	15.30	14.60
t (s)	10.97	10.91	10.90	11	10.90	11.40
k (mm/s)	7.09	7.02	7.14	7.38	7.41	7.42
k(mm/min)	425.30	421.50	428	443	444	445

Apéndice H1. Datos de permeabilidad para segundo diseño con $a/c= 0.40$

Diseño 2	2c-20 g						2c-15 g					
	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 1			Muestra 2		
A1 (mm ²)	7967.882			8157.669			8144.867			7922.460		
L (mm)	210.908			211.7325			211.083			211.518		
A2 (mm ²)	7967.88											
h1 (mm)	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
h2 (mm)	15.4	14.9	15.3	16.7	16	15.9	14.95	15.6	15.7	16.7	16.8	16.6
t (s)	12.7	13.3	12.71	11.4	11.9	12	12.01	11.83	11.61	11.18	10.86	11.11
k (mm/s)	6.23	6.16	6.27	6.54	6.52	6.53	6.96	6.74	6.82	6.42	6.56	6.51
K(mm/min)	373.8	369.6	376.2	392.4	391.2	381.2	417.6	404.4	409.2	385.2	393.6	390.6

Diseño 2	1c-20 g					
Muestras	Muestra 1			Muestra 2		
A1 (mm ²)	8120.491			7986.087		
L (mm)	210.940			212.893		
A2 (mm ²)						
h1 (mm)	38	38	38	38	38	38
h2 (mm)	15.9	16.1	15.85	15.3	15.3	14.6
t (s)	10.97	10.91	10.93	11	10.9	11.4
k (mm/s)	7.09	7.03	7.14	7.38	7.41	7.42
K (mm/min)	425.4	421.8	428.4	442.8	444.6	445.2

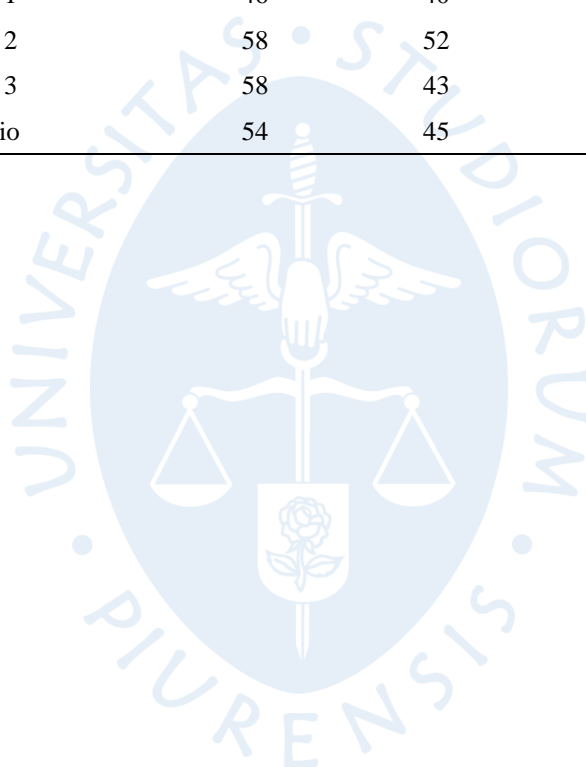


Apéndice I. Promedio de resistencias a 28 días del diseño con relación a/c= 0.30

Resistencia (kg/cm ²)	2C -20g	2C -15g	1C -20g
Probeta 1	78	43	25
Probeta 2	65	53	38
Probeta 3	71	49	36
Promedio	71	48	33

Apéndice II. Promedio de resistencias a 28 días del diseño con relación a/c= 0.40

Resistencia (kg/cm ²)	2C -20g	2C -15g	1C -20g
Probeta 1	46	40	46
Probeta 2	58	52	42
Probeta 3	58	43	49
Promedio	54	45	46



Apéndice J. Diseño de mezclas bajo normativa ACI

Datos fijos para ambos diseños	
Porcentaje de vacíos (%)	20.00%
Peso unitario stock (kg/m ³)	1765
Peso unitario compactado seco (kg/m ³)	1758
Porcentaje de humedad (%)	0.39
Porcentaje de absorción (%)	0.89
Gravedad específica	2.72
Relación b/bo	0.99

Diseño 1 para un m ³ de concreto con a/c=0.30	
Relación a/c	0.30
Volumen de la pasta (%)	15.00%
Peso del A. G. x b/b ₀ (kg/m ³)	1740.42
Peso del A. G. SSS	1755.91
Masa del cemento (kg)	242.931
Cantidad de agua inicial (kg)	72.879
Ajuste por absorción de agregado (Kg)	8.702
Masa de agua corregida (kg)	81.58
Corrección por humedad del A.G	1747.21
Volumen de cemento (m ³)	0.077
Volumen del agregado (m ³)	0.646
Volumen de agua (m ³)	0.073
Volumen total de sólidos (m ³)	0.796
Corrección del porcentaje de vacíos (%)	20.40%
Densidad teórica (kg/m ³)	2072

Proporción para 30 litros de concreto			
Capacidad de cada espécimen (m ³)		0.002	
Nº de probetas	Volumen de las probetas (m ³)	Volumen por cada 2 l de concreto	Peso en stock para 30 l
15	Agua (kg)	0.163	2.447
15	Cemento (kg)	0.486	7.288
15	Piedra (kg)	3.494	52.416

Diseño 2 para un m ³ de concreto con a/c=0.40	
Relación a/c	0.40
Volumen de la pasta (%)	15.00%
Peso del A. G x b/b ₀ (kg/m ³)	1740.420
Peso del A. G. SSS	1755.910
Masa del cemento (kg)	209.071
Cantidad de agua inicial (kg)	83.628
Ajuste por absorción de agregado (Kg)	8.702

Diseño 2 para un m³ de concreto con a/c=0.40	
Masa de agua a corregida (kg)	83.630
Corrección por humedad del A.G	1747.210
Volumen de cemento (m3)	0.066
Volumen del agregado (m3)	0.646
Volumen de agua (m3)	0.084
Volumen total de solidos (m3)	0.796
Corrección del porcentaje de vacíos (%)	20.40%
Densidad teórica (kg/m3)	2057

Proporción para 30 litros de concreto			
Capacidad de cada espécimen (m³)		0.002	
N° de probetas	Componente	Volumen por cada 2 l de concreto	Peso en stock para 30 l
15	Agua (kg)	0.185	2.770
15	Cemento (kg)	0.418	6.272
15	Piedra (kg)	3.494	52.416

Proporción para 30 litros de concreto para el diseño adicional			
Capacidad de cada espécimen (m³)		0.002	
N° de probetas	Componente	Volumen por cada 2 l de concreto	Peso en stock para 30 l
13	Agua (kg)	0.185	2.403
13	Cemento (kg)	0.418	5.4358
13	Piedra (kg)	3.528	45.867

Diseño adicional para 1 m³ de concreto con a/c=0.40	
Porcentaje de vacíos (%)	20.00%
Relación a/c	0.400
Peso unitario stock (kg/m3)	1782
Peso unitario compactado seco (kg/m3)	1775
Porcentaje de humedad (%)	0.390
Porcentaje de absorción (%)	0.890
Gravedad específica	2.720
Relación b/bo	0.990
Peso del A. G. (kg/m3)	1757.250
Peso del A. G. SSS (kg/m3)	1772.890
Volumen de la pasta (%)	15.00%
Masa del cemento (kg)	209.071
Cantidad de agua (kg)	83.628
Ajuste por absorción de agregado	8.78600

Masa de agua corregida (kg)	92.414
Corrección por humedad del A.G	1764.100
Volumen de cemento (m3)	0.06640
Volumen del agregado (m3)	0.6518
Volumen de agua (m3)	0.083600
Volumen total de solidos (m3)	0.802
Corrección del porcentaje de vacíos	19.80%
Densidad teórica (Kg/m3)	2066.000

